سيرك الفيزياء الطائر

جيرل ووكر

سيرك الفيزياء الطائر

تأليف

جيرل ووكر

ترجمة

رشا صلاح الدخاخني

صفية مختار

سارة طه علام

لبنى أحمد نور

مراجعة

محمد فتحي خضر

هنـــداوي

سيرك الفيزياء الطائر

جيرل ووكر

The Flying Circus of Physics 2E

Jearl Walker

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

٣ هاي ستريت، وندسور، SL4 1LD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: عبد العظيم بيدس.

الترقيم الدولي: ٢ ١٩٨٨ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٠٧
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٠

جميع الحقوق محفوظة لمؤسسة هنداوي.
يُمنَع نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب بأية وسيلة تصويرية أو إلكترونية أو ميكانيكية، ويشمل ذلك التصوير الفوتوغرافي والتسجيل على أشرطة أو أقراص مضغوطة أو استخدام أية وسيلة نشر أخرى، ومن ذلك حفظ المعلومات واسترجاعها، دون إذن خطي من الناشر.

Arabic Language Translation Copyright © 2020 Hindawi Foundation.
The Flying Circus of Physics 2E
Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc.
All rights reserved.
Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Hindawi Foundation and is not the responsibility of Wiley. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Inc.

المحتويات

تمهيد	٩
١- الحركة	١٥
٢- الموائع	٢٤٣
٣- الصوت	٤٢٣
٤- الحرارة	٥٠٩
٥- الكهرباء والمغناطيسية	٦١٩
٦- البصريات	٦٨٣
٧- الرؤية	٨٥٩

أُهدي هذا الكتاب إلى زوجتي
ماري جولريك
التي جلسَت بجواري لمدة ١٣ عامًا في أثناء كتابتي العمود الصحفي المعنون «العَالِم الهاوي» بمجلة سَاينتِفيك أمَرِيكان، ولمدة ١٦ عامًا (ولا يزال العدُّ مُستمرًّا) في أثناء تأليفي كتاب «أساسيات علم الفيزياء»، ولمدة تبدو وكأنها ٢٠٠ عام قضيتُها في تأليف هذه الطبعة وتنقيحها. ولولا تشجيعُكِ ودعمكِ وحبُّكِ وتسامُحُكِ لانتَهت بي الحال أُحملِق في حائط غرفتي بدلًا من التمعُّن في شاشتي أمام برامج مُعالجة الكلمات.

تمهيد

بدأت فكرة هذا الكتاب في ليلة مُظلِمة ومُوحِشة من عام ١٩٦٨، حين كنتُ طالبَ دراسات عُليا بجامعة ميريلاند. حسنًا، في الواقع، جميع الليالي تقريبًا مُظلمة ومُوحشة في نظر معظم طلاب الدراسات العُليا؛ ولكنِّي أَقصد أن تلك الليلة بعَينها كانت كذلك بحق. كنتُ أعمل مدرسًا مساعدًا بدوامٍ كامل. وفي وقتٍ مُبكر من ذلك اليوم كنتُ قد أعطيتُ شارون — إحدى طالباتي — اختبارًا قصيرًا. وقد أبلتْ فيه بشكلٍ سيِّئ، وفي النهاية وجَّهت إليَّ سؤالًا مثَّل لي تحدِّيًا؛ إذ قالت: «ما علاقة أيٍّ من هذا بحياتي؟»

بادرتُ بالإجابة على الفَور قائلًا: «شارون، هذا علم الفيزياء! إنه علمٌ ذو صلةٍ وثيقة بحياتك!»

حينها اعتدلَت كي تُواجهني مباشرةً وقالت بنبرةٍ مُتوتِّرة ومحسوبة وهيَ تُضيِّق عينَيها: «هلَّا تضرب لي بعض الأمثلة!»

أخذتُ أُفكِّر مرارًا وتكرارًا ولكني عجزتُ عن التوصُّل إلى مثالٍ واحد. لقد قضيتُ ستَّ سنواتٍ على الأقل في دراسة الفيزياء وها أنا أعجز عن التوصُّل إلى مثالٍ واحد وحسب.

في تلك الليلة أدركتُ أن مشكلة شارون هي في الحقيقة مشكلتي أنا؛ كان هذا الشيء المَدعو بعلم الفيزياء مُتعلِّقًا بالأبحاث التي يُجريها علماء الفيزياء داخل مبنًى مُخصَّص لذلك؛ ولا علاقة له بالعالَم الواقعي الذي تعيش فيه شارون (أو الذي أعيش فيه أنا). ولهذا، قرَّرتُ أن أجمع بعضًا من الأمثلة الواقعية، لأجذب انتباهها إلى هذا العلم، وهذه الأمثلة المُجمَّعة خرجت على هيئة هذا الكتاب الذي بين يدَيك؛ وشيئًا فشيئًا أضفتُ إلى المجموعة المزيد من الأمثلة.

وسُرعان ما رغب طلَّاب آخرون في الحصول على نُسَخ من محتوى هذا الكتاب، بدايةً من طلاب الصف الدراسي الذي كانت فيه شارون، ثم زملائي من طلاب الدراسات العُليا،

ثم بعض أفراد هيئة التدريس. وبعد طباعة مادة الكتاب على هيئة «تقرير فني» من جانب قسم الفيزياء بجامعة ميريلاند، حصلتُ على فرصة للتعاقُد على نشْر هذا الكتاب من دار نشْر جون وايلي آند صَنز.

ونُشِر هذا الكتاب عام ١٩٧٥، بعد مرور بضع سنوات على تعييني أستاذًا لمادة الفيزياء بجامعة كليفلاند، ثم خضع للمراجعة والتنقيح في عام ١٩٧٧. ومنذ ذلك الحين، تُرجِم إلى ١١ لغة كي يُنشَر في مختلف أنحاء العالم. وهذه هي الطبعة الثانية من الكتاب الذي أُعيدُ كتابتَه وتصميمه بالكامل مرة أخرى.

عندما شرعتُ في تأليف المادة العلمية لهذا الكتاب، لم أُجرِ بحثًا إلَّا في عشرات الدوريات البحثية فقط، مُتفقِّدًا إيَّاها صفحةً بصفحة. وفي تلك الأثناء اكتشفتُ عددًا محدودًا من الأبحاث ذات الصِّلة بالمَوضوع. بالطبع، كان التشبيه المُفضَّل لي فيما يخصُّ هذا المشروع هو أنني كنتُ أُنقِّب عن الذهب على سفْح جبل قاحل؛ فقد كانت قِطَع الذهب قليلةَ العدد وصعبًا العثورُ عليها.

لكن تغيَّر وجه العالم؛ فحاليًّا يُنشَر كلَّ عام المئات من الأبحاث ذات المادة العِلمية الشبيهة بما جاء في هذا الكتاب، وبالاستعانة بالتشبيه الذي ذكرتُه آنفًا، فقد عثرتُ على عروق الذهب الخام. والآن، لم أَعُدْ أُنقِّب في عددٍ محدود من الدوريات وحسْب، بل أطَّلع على ٤٠٠ دورية علمية مباشرةً وأستعين بمُحرِّكات البحث لأُنقِّب من خلالها عن مئات الدوريات الأخرى. وفي أيامٍ كثيرة أجد أصابعي تَتنقَّل برشاقة على لوحة مفاتيح جهاز الكمبيوتر الخاص بي، وأتمنَّى لو أن شارون تنظُر من وراء كتِفي إلى الأشياء المُثيرة للفضول التي أَعثُر عليها. من خلال هذا الكتاب ستُتاح لك تلك الفرصة؛ تعالَ وانظُر من وراء كتِفي وسترى أنَّ علم الفيزياء ذو «علاقة وثيقة بحياتك».

الموقع الإلكتروني لهذا الكتاب

فيما يلي الموقع الإلكتروني المرتبط بهذا الكتاب: www.flyingcircusofphysics.com، ويحتوي على ما يلي:

- أكثر من ١٠ آلاف استشهاد مِن دوريات وكُتب العلوم والهندسة والرياضيات والطب والقانون. جُمِعت الاستشهادات وَفْق العناوين المذكورة في هذا الكتاب وصُنِّفَت حسب الصعوبة.

- معلومات إضافية.
- ملاحظات وتحديثات وتعليقات إضافية.
- فهرس مُستفيض.

أصل تسمية هذا الكتاب

سمَّيتُ المجموعة الأصلية من هذه الألغاز الفيزيائية تيمُّنًا بالعُروض الجوية التي يؤدِّي فيها الطيارون المُتهوِّرون حركاتٍ استعراضيةً خطيرة تقشعرُّ لها الأبدان. وقد ظننتُ أن مثل هذه العُروض الجوية تُعرَف بوجهٍ عام باسم «السيرك الطائر»، وتمنيتُ أن تَلفت صورة الطيارين المُتهوِّرين انتباه أحدهم ليقرأ كلماتي.

وقد عرفت بعد ذلك أن السيرك الطائر هو بالأساس سيرك مُتنقِّل يُسافر من مكان إلى آخر على متن القطارات. وفي وقتٍ لاحق أُطلِق الاسم على طراز من الطائرات الألمانية التي تطير وتتحرَّك بتلك الطريقة. أصبح الاسم مُرتبطًا بالطيَّار الألماني الشهير، الملقَّب باسم البارون الأحمر، الذي قام بطلاء طائرته باللون الأحمر في الحرب العالمية الأولى ليُرهِب أعداءه في الجو.

ثم ظهرت الفرقة الكوميدية التي عُرفت باسم مونتي بايثون لأول مرة في إنجلترا من خلال المسلسل الكوميدي «فلاينج سيركس» (السيرك الطائر) بعد عام من استخدامي للاسم والتشبيه. هكذا، فمِن المؤكَّد أن الاسم صار معروفًا في كلٍّ من أمريكا وإنجلترا في ذلك العام. (إلا أن مشهد «الببغاء الميِّت» هو بالأساس مشهد من تأليف فرقة مونتي بايثون.)

ثَبْت المصادر

جميع الاستشهادات الواردة في هذا الكتاب موجودة على الموقع الإلكتروني للكتاب، وتمَّ تجميعها وَفقًا للعناوين المذكورة، ومصنَّفة حسب الصعوبة الرياضية. ويَحتوي الموقع الإلكتروني على أكثر من ١٠ آلاف استشهاد.

التواصُل معي ومُراسَلتي

أُرحِّب كثيرًا بالملاحظات والتعليقات والأفكار الجديدة والاستشهادات. أما بخصوص الجزئية الأخيرة، فسأكون مُمتنًّا إذا أرسلتَ إليَّ الاستشهاد كاملًا بلا مختصرات وبأرقام

الصفحات كاملة؛ ولكن إذا تعذَّر ذلك، فإن أقلَّ القليل من المعلومات سيُثير انتباهي. وإذا استطعت إرسال نسخة من بحثٍ ما أو عنوان موقع إلكتروني، فإن هذا سيكون رائعًا.

وبوجهٍ عام، لا أُدرج قائمة بالمواقع الإلكترونية في الاستشهادات؛ لأنَّني لا يُمكنني التأكد بصفةٍ دورية ممَّا إذا كانت المواقع لا تزال قائمة وقيْد العمل أم لا.

إنني أُدرِّس بدوامٍ كامل، وأعمل على تأليف هذا الكتاب بدوامٍ كامل، وأعمل على تأليف كتاب دراسي آخر بعنوان «أساسيات علم الفيزياء» بدوامٍ كامل مُضَعَّف. هذا وقت كبير مُستقطَع للعمل بدوامٍ كامل، وأنا وقتي محدود؛ لذا، أرجو أن تتفهَّم لماذا لا أستطيع الردَّ على كلِّ رسالة أو كل تعليق يصِلني.

جامعة كليفلاند

إذا أردتَ الالتحاق بجامعة متوسِّطة الكثافة الطلابية وذات سُمعة طيبة، فالْتحِق بجامعة كليفلاند (www.csuohio.edu) بمدينة كليفلاند، ولاية أوهايو. لقد أمضيتُ أكثر من ثلاثين عامًا في التدريس وليس لديَّ أيُّ نيَّة للتوقُّف عن هذا العمل (رغم أنني أتوقَّع أن تَحُول الطبيعة تدريجيًّا دون ذلك في نهاية المطاف). أنا ذلك الشخص الذي يَجلِس في حجرة مكتب صغيرة محاطًا بأوراق الأبحاث منقِّلًا أصابعي برشاقة على لوحة مفاتيح جهاز الكمبيوتر في محاولة يائسة للوفاء بالموعد النهائي لتسليم عمل آخر.

الكُتب الدراسية

تَفترض المادة العلمية الموجودة في هذا الكتاب أنك درستَ المستوى الأساسي من علم الفيزياء أو العلوم الفيزيائية في المرحلة الأساسية. وإذا أردتَ الاطِّلاع على كُتب دراسية أخرى بالإضافة إلى هذا الكتاب، فإليك فيما يَلي بعض المقترحات:

- «كيف تعمل الأشياء: فيزياء الحياة اليومية» (How Things Work: The Physics of Everyday Life) تأليف لويس إيه بلومفيلد (دار نشر جون وايلي آند صَنز)، مقدمة غير رياضية إلى الفيزياء.
- «الفيزياء» (Physics)، تأليف جون دي كاتنيل وكينيث دبليو جونسون (دار نشر جون وايلي آند صَنز)، مقدمة إلى الفيزياء استنادًا إلى علم الجبر.

- «أساسيات علم الفيزياء» (Fundamentals of Physics) تأليف ديفيد هاليداي وروبرت ريسنيك وجيرل ووكر (دار نشر جون وايلي آند صَنز)، مقدمة إلى الفيزياء استنادًا إلى علم التفاضُل والتكامُل.

شكر وتقدير

ثمَّة عدد كبير من الأشخاص أودُّ أن أشكرهم على تشجيعهم لي في فتراتٍ كنتُ أقول فيها لنفسي: «الأمل مفقود تمامًا!» حسنًا، هذا فقط جزء من السبب، وإنما باقي السبب هو أن الكثير من الأشخاص تحمَّلوني حين كان يتملَّكُني هاجس بأنه «يجِب عليَّ أن أعمل اليوم كما لو أن شمس الغد لن تُشرق!»

أتوجَّهُ بالشكر إلى جيرل ومارثا ووكر (والديَّ اللذَين أمضيا ليالِيَ كثيرةً دون نوم — حين كنتُ مُراهقًا — قَلِقَيْن على مستقبلي وما إذا كان ستَنتهي بي الحال في السجن أم سأُحقِّق النجاح)، وإلى بوب فيليبس (معلم الرياضيات والفيزياء في مدرستي الثانوية، الذي فتح لي آفاقًا جديدة من العالم)، وإلى فيل ديلافور (الذي شجَّعني على بدء العمل في التدريس)، وإلى جو ريديش (الذي ساهم في الحصول على الملاحظات الأساسية لهذا الكتاب الذي نشَرَه قسم الفيزياء بجامعة ميريلاند في شكل تقرير فني)، وإلى فيل موريسون (أول مَن شجَّعني على نشر التقرير الفني على هيئة كتاب، والذي كتَب مراجعة رائعة له في مجلة سَاينتِفِك أمريكان، وهو ما وفَّر لي على الأرجح فرصة كتابة العمود الصحفي «العَالِم الهاوي» في المجلة نفسها على مدار ١٣ عامًا)، وإلى دينيس فلاناجان (محرِّر مجلة سَاينتِفِك أَمَرِيكان، الذي قام بتعييني والذي قدَّم لي النُّصْح والإرشاد على مدار سنوات)، وإلى دونالد دينيك (المُحرِّر المتخصِّص في الفيزياء بدار نشر وايلي آند صَنز في أوائل سبعينيات القرن العشرين، والذي قدَّم لي أول تعاقُد على نشر هذا الكتاب)، وإلى كارل كاسبر وبرنارد هامرميش (اللذَين فكَّرا بالقدر الكافي في أعمالي المؤلَّفة لتعييني في منصب أستاذ مساعد بجامعة كليفلاند)، وإلى ديفيد هاليداي وروبرت ريسنيك (اللذَين سَمحا لي بالمشاركة في كتابهما الذي بعنوان «أساسيَّات علم الفيزياء» في عام ١٩٩٠)، وإلى إيد ميلامان (الذي درَّبني على تأليف الكتب الدراسية)، وإلى ماري دين سوندرز (عميدة كلية العلوم بجامعة كليفلاند، التي وفَّرت مناخًا إيجابيًّا لظهور هذه الطبعة من الكتاب، والتي راجعَت عددًا كبيرًا من المسوَّدات مراجعةً نقدية)، وإلى ستيوارت جونسون (مُحرِّر الفيزياء بدار نشر جون وايلي آند صَنز الذي أرشَدني خلال تأليفي هذا الكتاب والطبعات العديدة

التي صدَرت من كتاب «أساسيَّات علم الفيزياء»)، وإلى كارول سايتزر (التي قرَأت مسوَّدة هذا الكتاب وأجرَتِ العديد من التغييرات الوجيهة)، وإلى مادلين لاسور (المُصمِّمة الفنية لهذا الكتاب)، وإلى إليزابيث سواين (محرِّرة قسم الإنتاج بدار نشر جون وايلي آند صَنز التي أشرَفَت على إنتاج هذا الكتاب)، وإلى كريس ووكر وهيذر ووكر وكلير ووكر (أبنائي الكبار الذين تحمَّلوا هوَسِي بالكتابة والتدريس طوال حياتهم بأكملها)، وإلى باتريك ووكر (ابني الصغير الذي لم يتحمَّل السنوات الكثيرة التي قضيتُها في العمل في القَبو وحسْب، وإنما علَّمني أيضًا كيف أتسلَّق الصخور الصناعية الموجودة على جدار التسلق بصالة الألعاب)، وإلى (الشخص الأهم في حياتي) ماري جولريك (زوجتي التي ساهمَت في الكثير من أفكار هذه الطبعة، والتي شجَّعتني على المُواصَلة في كلِّ مرة أصرخ فيها قائلًا: «الأمل مفقود تمامًا»).

جيرل ووكر
قسم الفيزياء
كلية العلوم
جامعة كليفلاند
٢١٢١ يوكليد أفينيو
كليفلاند، أوهايو، الولايات المتحدة الأمريكية ٤٤١١٥
فاكس: الولايات المتحدة الأمريكية ٢١٦-٦٨٧-٢٤٢٤

الفصل الأول

الحركة

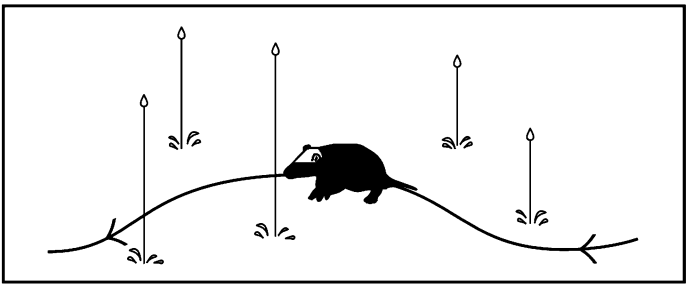
(١) الركض أم السَّير تحت الأمطار؟

هل يَنبغي عليك الركض أم السير تحت الأمطار عند عبور الطريق بدون مِظلَّة؟ الركضُ يعني بالتأكيد أنك ستقضي وقتًا أقلَّ تحت الأمطار، ولكنه يعني أيضًا أنك قد تتعرَّض لعددٍ أكبر من قطرات المياه. هل الإجابة ستتغيَّر إذا هبَّت الرياح لتقذِف الأمطار في طريقك أم لتُبعِدها عنك؟

إذا كنتَ تقود سيارتك عبْر الأمطار، فما السُّرعة التي ينبغي عليك اختيارها لتُقَلِّل كميَّة المياه المُتساقِطة على الزجاج الأمامي للسيارة لكي تتمكَّن من الحفاظ على وضوح الرؤية أمامك؟

الجواب: إذا كانت الأمطار تَنهمِر إلى الأسفل مباشرةً أو إذا هبَّت الرياح ناحيتك، ينبغي أن تَركُض بأقصى سرعةٍ ممكنة. وعلى الرغم من أنك تُواجِه قطرات المطر، فإن الوقت القليل الذي تُمضيه تحت الأمطار يَتركُكَ أقلَّ بللًا مما لو كنتَ تتحرَّك على نحوٍ أبطأ. ولكي تُقلِّل عددَ قطرات المطر المُصطدمة بك، ينبغي أن تُقلِّل مساحة المقطَع العَرضي الرأسي من خلال الانحناء إلى الأمام أثناء الركض. ولكي تتحرَّك على نحوٍ أسرع أثناء الانحناء إلى الأمام، يُمكنك أن تركب لَوح تزلُّج عبر الأمطار — كما اقترح أحد الباحِثين — ولكن هذا سيَجذب الانتباه بكلِّ تأكيد، بالإضافة إلى أنَّ لَوح التزلُّج يَحمل قَدْرًا أكبر من المتاعب مقارنةً بالمظلَّة.

إذا كانت الرياح تهبُّ من خلفِكَ، فإنَّ أفضل استراتيجية هي أن تَركُض بسرعةٍ تتناسَب مع السرعة الأفقية لقطرات المياه المُتساقِطة. وبتلك الطريقة، سيبتلُّ رأسك وكتفاك، ولكنَّك



شكل ١-١: بند ١-١.

لن تصطدِم بقطرات المياه بوجهك، وهي لن تصطدم بظهرك أيضًا. ورغم ذلك، فإن هذه الاستراتيجية لا تَنطبِق على جسمٍ يُجرى تحريكه عبْر الأمطار إذا كان الجسم يحتلُّ مساحةً أكبر من مساحة المقطع العرضي الأُفقي التي تحتلُّها أنت. فهذا الجِسم سيَجمع كمية ملحوظة من المياه فوق سطحه حتى وإن كانت سُرعته تَتناسَب مع السُّرعة الأفقية لتساقُط الأمطار. ومن أجل تقليل البَلَل، ينبغي أن يُحرَّك هذا الجسم بأقصى سرعة مُمكِنة.

فإذا كنتَ تقود سيارتك عبْر الأمطار، فما يَهمُّك هو الحفاظ على وضوح الرؤية أمامك وليس حرصك على تقليل البلَل. وإذا كانت قطرات المطر تتساقَط مباشرةً لأسفل أو إذا كانَت تندفع تجاهك بسبب الرياح، يجِب أن تقودَ سيارتك ببطء. وإذا كانت الأمطار تَندفِع في الاتجاه الذي تقودُ فيه سيارتك، يجِب أن تجعل سرعة سيارتك تتناسَب مع السرعة الأُفقيَّة لقطرات المياه، ولكن قد لا يكون هذا الأمر عمليًّا.

(٢) القوافل والاختناقات المُروريَّة

إذا كانت الحركة المرورية المُزدحِمة تَسير في سلاسة على امتداد أحد الشوارع مِن دون توقُّف، فكيف ينبغي ضبط توقيت تتابُع إشارات المرور عند التقاطُعات؟ أينبغي تغيير التوقيت حين تبدأ ساعة الذُّروة؟ ولماذا يفشل هذا النظام أحيانًا، كما في حالة العواصف الثلجيَّة مثلًا، بحيث تَحدُث «الاختناقات المرورية» وتتجمَّد حركة المرور تمامًا؟

الجواب: السيارات التي تتحرَّك في مجموعاتٍ تُسمَّى «قوافل» مرورية. افترِض أنَّ قافلةً ما توقَّفت عند إشارة المرور الحمراء في التقاطع الأول. وحين يتحوَّل ضوء إشارة المرور إلى الأخضر، تبدأ السيارات التي تتقدَّم القافلة في التَّسارُع، إلى أن تصِل إلى سرعة مُعينة لحركة المَركبات. وقبل أن تصل هذه السيارات إلى التقاطُع الثاني، من المُفترَض أن تكون الإشارة هناك قد تحوَّلت إلى الضوء الأخضر حتى لا تُجبَر السيارات على الإبطاء. وإذا علمتَ المسافة بين التَّقاطُعَين، والتَّسارُع التقليدي للسيارات التي في المُقدِّمة، والوقت المُنقضي في حركة السيارة بسُرعتها العادية، يمكنك أن تحسُب الوقت الذي ينبغي فيه لضوء الإشارة الموجودة في التقاطُع الثاني أن يتحوَّل إلى الأخضر.

تتأخَّر حركة السيارات الموجودة في مواضع مُتأخِّرة من القافلة عن الانطلاق عند صدور الضوء الأخضر لأنه يجب أن تنتقل «مَوجة بدْء» إليها أولًا (فالسائقون لا يبدءون في التحرُّك في وقتٍ واحد). سيتطلَّب ذلك انقضاء بضْع عشراتٍ من الثواني. وإذا تأخَّر ذيل القافلة كثيرًا، فسيتوقَّف عند الإشارة الحمراء التالية في التقاطُع الثاني. هَب أن القافلة التالية التي تتحرَّك في الشارع تُساوي في الطول القافلة السابقة عليها، أو أطول منها. حينها فإنَّ عدد السيارات المُتوقِّفة عند الإشارة الحمراء التالية في التقاطُع الثاني سيزداد.

ويسُوء الموقف إذا استمرَّ تزايُد طول القوافل؛ فخطُّ السيارات المتوقِّفة عند التقاطُع الثاني قد يطُول إلى أن يمتدَّ وصولًا إلى التقاطُع الأول، ويمنع سَير المرور من خلاله تمامًا. وهنا يبدأ الاختناق المروري. ومن أجل تخفيف حدَّة المُشكلة، يجِب عكس تتابُع إشارات المرور في التقاطُعَين الأول والثاني؛ بحيث يَجب أن تتحوَّل الإشارة في التقاطُع الثاني إلى الضوء الأخضر قبلَ أن تتحوَّل الإشارة في التقاطُع الأول إلى الضوء عَينِه؛ وذلك حتى يكون بمقدور السيارات المُتوقِّفة عند التقاطُع الثاني إخلاء الطريق قبل أن تصل القافلة التالية. يجِب القيام بهذا التغيير في التتابُع يدويًّا أو بواسطة كمبيوتر يُراقِب عدد السيارات المُتوقِّفة عند التقاطُع الثاني.

ويمكن أن نجد قوافل السيَّارات في حركة المرور داخل الأنفاق كذلك (خاصةً حين يكون تغيير الحارة المرورية محظورًا) وفي الطرق الريفية ذات الحارتَين؛ ففي كلٍّ من هذه الحالات تبدأ القافلة حين تقابل السيارات الأسرع سيارةً أبطأ منها، كشاحنة مثلًا. وفي حالة الطرق الريفية، قد تتشتَّت القافلة إذا تمكَّن السائقون من تجاوُز المركبة البطيئة.

(٣) موجات الصدمة على الطريق السريع

حين تزداد الكثافة المروريَّة على أحد الطرق الحُرة أو السريعة، لماذا تتشكَّل «موجات» داخل حركة المرور يُبطِئ فيها السائقون أو يُسرِعون؟ أحيانًا تتكوَّن هذه المَوجات حين يتسبَّب حادث أو سيارة مُعطَّلة في تعطيل إحدى الحارات، وأحيانًا تُسبِّبها «حوادث وهميَّة» يُبطئ فيها المرور لسببٍ تافهٍ نسبيًّا، كتغيير إحدى السيارات حارتها المرورية. هل تتحرَّك المَوجات في اتجاه حركة السيارات أم في الاتجاه المُعاكس؟ ولماذا يمكن أن تستمرَّ إحدى المَوجات بعد إزالة آثار الحادث أو السيارة المعطَّلة؟

الجواب: حين تكون كثافة المركبات مُنخفِضة نسبيًّا، لا يكون لأفعال أي سائق مُنفرد تأثيرٌ كبير على السائقين الآخرين، خاصَّةً إذا كان تجاوز السيارات مسموحًا به. لكن حين تكون الكثافة أكبر نسبيًّا، يكون ردُّ فعل السائقين هو الإبطاء، وهو ما يرجِع جزئيًّا إلى مخاوف تتعلَّق بالسلامة، وكذلك بسبب تضاؤل إمكانية تجاوز السيارات الموجودة أمامهم. افترض أنك تقود سيارتك في هذه الحركة المرورية. إذا بطَّأ السائق الذي أمامك من سُرعته أو زادها، فستقوم أنت أيضًا بنفس الشيء بعد زمن استجابةٍ قدرُه ثانية واحدة. وسيحذو السائق الذي خلفك حذوَكَ بعد زمن استجابةٍ مُماثل قدره ثانية واحدة، وهكذا دواليك. ينتقل فعل التَّسارُع هذا على امتداد سيارات الحارة المرورية على صورة مَوجة. وهذه الموجة تكون على الأرجَح غير مرئيَّة لأيِّ شخص على جانب الطريق؛ لأن التعديلات في السرعة تكون بسيطة في المُعتاد.

الآن افترض أنَّ السائق في السيارة التي أمامك ضغط المكابح بقوَّة على نحوٍ مفاجئ. ستضغط أنت والسائقون خلفك المكابح بقوةٍ أيضًا، وكلٌّ منكم سيحتاج زمن استجابةٍ قدره ثانية واحدة. سينتقِل فعل الإبطاء بالمِثل على امتداد سيارات الحارة المرورية على صورة موجة، لكن الآن سيصير الفعل ملحوظًا من طرف أي راصدٍ يقِف على جانب الطريق. هذه الموجة هي موجة صدمة. واعتمادًا على تركيز السيارات قبل وبعد مرور الموجة، تستطيع الموجة التحرُّك في نفس اتجاه الحركة المرورية (مع التيَّار) أو في الاتجاه المعاكس للحركة المرورية (ضد التيار)، أو يُمكن أن تكون ساكنة.

افترِض أنَّ ثَمَّةَ موجة صدمة تكوَّنت حين توقَّفَت إحدى السيارات في مرورٍ مزدحم نسبيًّا وأن السائق يحتاج ١٥ دقيقة كي يُبعِد السيارة عن الطريق. بينما تبدأ السيارات في التسارُعَ مجدَّدًا وصولًا إلى سرعة الحركة العادية، تنتقل «موجة تحرُّر» عبْر خط السيارات

المُنتظِرة الطويل. ربما يمرُّ وقتٌ طويل قبل أن تَلحق موجة التحرُّر بموجة الصدمة التي لا تزال تنتقل عبْر المرور. وحينها فقط تعود الحركة المرورية كلها إلى وضعِها الطبيعي.

(٤) الحد الأدنى للمسافة الفاصلة بين السيارات

إذا كانت إحدى السيارات تسير خلف سيارة أخرى، فما الحدُّ الأدنى للمَسافة الفاصلة التي تُتيح للسيارة الخلفية التوقُّف قبل الاصطدام بالسيارة الأمامية إذا ما ضغَط قائدُها على المكابح فجأةً وأوقفَها؟ تقضي النصيحة التقليدية بضرورة تَركِ مسافة فاصلة تُعادِل مقدار سيارة؛ وذلك في مُقابل كلِّ عشرة أميال في الساعة (حوالي ١٦ كيلومترًا في الساعة) من سرعة السيارة. هل هذه النصيحة سديدة؟

الجواب: النصيحة ليست سديدة؛ لأنها قائمة على افتراضَين ضعيفَين: الافتراض الأول هو أنَّ زمن استجابة قائدي السيَّارات لحالة الطوارئ مُتماثِل؛ فإذا كان قائد السيارة الخلفية أبطأ في استجابته من قائد السيارة الأمامية، فإنَّ هذا يستلزم أن تكون المسافة الفاصلة أكبر. والافتراض الثاني — وهو الأصعب حدوثًا — هو أنَّ السيارات تُبطِّئ من سُرعتها بنفس المعدل؛ فإذا كانت السيارات لا تَنزلِق بالكامل على الطريق، فعلى الأرجح هذا الافتراض خاطئ. بالطبع، يُصبح الموقف خطيرًا حين تبطئ السيارة الأمامية من سُرعتها بوتيرةٍ أسرع من السيارة الخلفية.

هبْ أنَّ ثمَّة فارقًا طفيفًا في معدَّلات إبطاء السرعة. هل تُوجَد قاعدة بسيطة يمكن بها حساب الحدِّ الأدنى للمسافة الفاصِلة لتفادي وقوع الحوادث؟ من المُثير للدهشة أنه لا تُوجَد قاعدة عامَّة؛ لأن الحدَّ الأدنى للمسافة الفاصلة يتوقَّف على مربَّع السرعة؛ ولذا ليس من السهل أن تُحسَب — بطريقة تخيليَّة — في موقف افتراضي. ومِن ثم، إذا كنتَ تقودُ سيارتك بسرعةٍ خلْف سيارة أخرى، فمن الأفضل أن تُتيح مسافة فاصلةً أكبر مما تُوصي به النصيحة التقليدية.

(٥) اجتياز الضوء الأصفر

هَبْ أن إشارة المرور عند إحدى التقاطُعات تحوَّلت إلى الضوء الأصفر قبل وصولك إلى التقاطُع. هل ينبغي عليك أن تضغط على المكابح قبل أن تصِل إلى التقاطع، أم تُواصل القيادة على سُرعتك الحالية أم تزيد من سُرعتك؟ لعلَّك تأخذ قرارًا بناءً على تجربتك من

خلال تقدير سُرعتك والمسافة التي تفصلك عن التقاطع وعرض هذا التقاطُع وتقديرك للمُدَّة التي سيَستغرِقها الضوء الأصفر. هل تُوجَد إمكانية بأن تُخالِف قانون المرور إذا ما أخذتَ أي قرارٍ من القرارات السابقة حتى وإن لم تتعدَّ حدود السرعة المسموحة؟

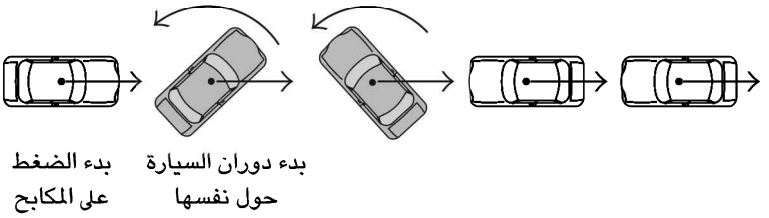
الجواب: قد يتأثَّر الجواب بقانون المرور المحلي لأنك ربما تُخالف القانون إذا كنتَ موجودًا داخل التقاطُع عند تحوُّل إشارة المرور إلى الضوء الأحمر، بينما في مناطق أخرى، من القانوني أن تكون داخل التقاطُع ما دُمتَ قد وصلتَ إليه قبل أن تتحوَّل الإشارة إلى اللَّون الأحمر. في الموقف الأول، غالبًا ستجد نفسك خاسرًا في كلتا الحالتَين؛ لأنك قد لا تَستطيع التوقُّف في التوقيت المناسب أو تزيد السرعة بالقدْر الكافي (رغم عدم تعدِّي حدود السرعة المسموحة) لتجتاز التقاطُع. وفي مثل هذا الموقف، يُوجَد نطاق من المسافات التي تفصلك عن التقاطع والتي تفشل فيها أيُّ استراتيجية أن تُجنِّبك مخالفة القانون. وتسُوء المشكلة حين تكون المُدة التي يستغرقها الضوء الأصفر قصيرةً وتكون السرعة المسموح بها قانونيًّا قليلة. إلا أن خطر التصادُم يقلُّ إذا تأخَّر الضوء الأخضر لمدَّة ثانية أو ثانيتَين ليَسمح لك بالمرور إلى الطريق المُتعامِد بعد أن تحوَّلت إشارتُك إلى اللون الأحمر.

(٦) دوَران السيارة حول نفسها بسبب الضغط المُفاجئ على المكابح

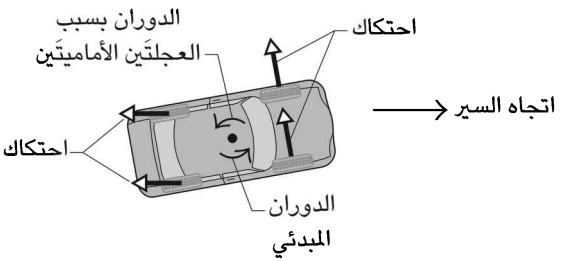
عندما تضغط فجأةً على مكابح بعض السيارات المُزوَّدة بأنظمة منْع انغِلاق المكابح، تدور السيارة بسرعةٍ حول نَفسها وربَّما تنتهي الحال بتراجُعِها إلى الخلف على الطريق (شكل ١-٢أ). ما الذي يجعل السيارة تدور حول نفسها، ولماذا لا يحدُث ذلك مع جميع أنواع السيارات؟ إذا بدأت سيارتك تدور حول نفسها، فما أفضل استراتيجية لاستعادة السيطرة على حركتها؟ هل ينبغي عليك أن تُدير العجلات الأمامية في اتِّجاهِ انحراف السيارة أم في الاتجاه الذي تودُّ أن تَسلُكه؟

الجواب: الحركة في الاتجاه العكسي أمر شائع الحدوث في السيارات ذات المُحرِّكات الأمامية لأنَّ العجلات الأماميَّة تَحمل وزنًا أكبر من العجلات الخلفية. وهذا يعني أنه من المُرجَّح أن «تنغلق» العجلتان الخلفيَّتان وتشرَعان في الانزلاق قبل العجلتَين الأماميتَين، وبعد ذلك من شأن أي حركة عشوائية للسيارة ناتجة عن وجود شيءٍ غير مُعتاد على الطريق أن تُسفِر سريعًا عن تغيير اتِّجاه السيارة وتُحرِّكها في الاتجاه العكسي.

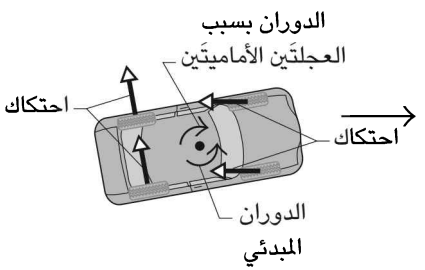
ومن أجل تخيُّل الحركة العكسية، ضَعْ في اعتبارك الاحتكاك الواقع على الإطارات عندما تدور السيارة حول نفسها نحوَ يَسار اتجاه السير المرغوب فيه (شكل ١-٢ب)؛



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل ١-٢: بند ١-٦: (أ) انعكاس اتجاه السيارة بسبب الضغط المُفاجئ على المكابح. قوى الاحتكاك الواقعة على الإطارات بالنسبة إلى (ب) السيارات ذات المُحرِّك الأمامي و(جـ) السيارات ذات المُحرِّك الخلفي.

فثمة قوة احتكاك واقعة على الإطارات الخلفية — التي تنزلق — مباشرةً تدفع السيارة إلى الخلف. وثمَّة قوة احتكاك واقعة على الإطارات الأمامية — التي لا تزال تدور — ومُوازِية

للمِحور الأمامي ومُتَّجِهة يسارًا إلى الخلف. وكلُّ هذه القوى تخلق عزمًا يجعل السيارة تدور أفقيًّا حول مركز الكتلة الخاص بها. ويُهيمِن عزْم الدوران الناتج من احتكاك العجلتَين الأماميَّتَين لأنهما تدوران بجهد في الاتجاه نفسِه، وهو الاتجاه الذي بدأت فيه السيارة تدور حول نفسها؛ ومِن ثَمَّ يتعزَّز دوران السيارة حول نفسها وينقلب اتجاهها.

وإذا كان مُحرِّك السيارة موجودًا في الجزء الخلفي منها، تتبدَّل أدوار قوى الاحتكاك الواقعة على العجلات الأمامية والخلفية ويُهيمِن عزم الدوران الناتج من احتكاك العجلتَين الخلفيتَين اللتَين تُقاومان الدوران المبدئي (شكل ١-٢جـ).

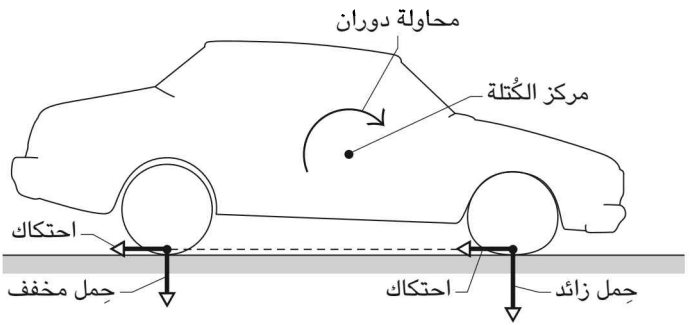
ووفقًا للنصيحة التقليدية في هذا الموقِف، إذا بدأت سيارتك تدور حول نفسها، يَنبغي أن تُدير العجلتَين الأماميتَين ناحية اتجاهِ السَّير المرغوب. وعندما تقوم بذلك، يَنشأ عزم دوران للعجلتَين الأماميَّتَين يُقاوم دوران السيارة حول نفسها، ولكن إن لم تكن قائدًا مُحترفًا، فربما تفشل في ذلك وتخرج السيارة عن السيطرة وتدور في الاتجاه المعاكس.

(٧) الاختيار بين الانزلاق وعدم الانزلاق

تخيَّل أنك تقود سيارتك على الطريق حين اعترض مسارك حيوانُ موظ ضخم على مسافةٍ قريبة منكَ. تخيَّل أيضًا أن سيارتك غير مُزوَّدة بنِظام منْع انغلاق المكابح. هل يَنبغي عليك أن تجعل العجلات تَنغلِق من خلال الضغط على المكابح بأقصى قوَّة لدَيك أم ينبغي عليك أن تضغط عليها بأقصى قدْرٍ مُمكِن لكن من دون أن تجعل العجلَات تَنغلِق؟ وإذا انزلقَتْ سيارتك وخرجَت عن السيطرة تمامًا، فلماذا يتوقَّف انزلاق السيارة على نحوٍ مُباغت؟

الجواب: عادةً ما تُؤيِّد الكُتب الدراسية الاختيار الثاني وتُشير، مُحقَّةً، إلى أن احتكاك الإطارات هو ما يجعل السيارة تتوقَّف؛ فعندما تدور العجَلات، ربما يتزايد معدَّل الاحتكاك ليصِل إلى أقصى درجةٍ له من خلال الضغط على المكابح بالقدْر المناسب. لكن إذا ضغطتَ بقوة أكبر على المكابح، تنغلِق العجلات وتنزلق الإطارات، وحينها يقلُّ الاحتكاك أكثر فأكثر، ومع تراجُع درجة الاحتكاك لا بدَّ أن تطول مسافة التوقُّف.

والخيار الأفضل هو أن تَضغط على المكابح بحيث تجعل العجلات على وشْك الانزلاق؛ ومِن ثَمَّ تكون مسافة التوقُّف قصيرة. أليس كذلك؟ حسنًا، في الواقع، الأمر ليس كذلك؛ لأنَّ هذا الخيار قد يَزيد مسافة التوقُّف بنسبة ٢٥٪ أكثر مما لو جعلتَ العجلات تَنغلِق وتَنزلِق تمامًا.



شكل ١-٣: بند ١-٧: سيارة تندفع إلى الأمام في أثناء الضغط على المكابح.

المنطق الذي تَستند إليه الكُتب الدراسية غير سليم في حالات الطوارئ، وذلك لسببَين؛ السبب الأول هو أنه لن يكون لديك متَّسع من الوقت لتُجرِّب درجات متفاوتة من الضغط على المكابح. والسبب الثاني مُتعلِّق بعزم دوران السيارة الناجِم عن قوى احتكاك العجلات؛ وهذا العزم يدفع السيارة إلى الأمام من خلال دوَرانها حول مِحوَرٍ أفقي عبْر مركز الكتلة الخاص بها (شكل ١-٣). ويُقلِّل هذا الدوران الأحمال الواقعة على العجلتَين الخلفيَّتَين ويَزيد الأحمال على العجلتَين الأماميَّتَين.

هَبْ أنك ضغطتَ على المكابح بقوة كافية لتجعل السيارة على وشْك الانزلاق. نظرًا لأنَّ جميع العجلات ما زالت تدور في حركتها المُعتادة، ونظرًا لأنَّ الأحمال الواقعة على العجلتَين الخلفيَّتَين تناقصَت، تكون العجلتان الخلفيَّتان على وشْكِ الانزلاق (وليس العجلتان الأماميَّتان ذواتا الأحمال الإضافية) ويصير الاحتكاك الواقع على العجلتَين الخلفيتَين ضئيلًا. إذا كانت المكابح الأماميَّة والخلفية مُماثلة، فإنَّ درجة الاحتكاك الواقعة على العجلتَين الأماميَّتَين تكون ضئيلة على نحوٍ متساوٍ، وكذلك درجة الاحتكاك الإجمالية للسيارة تكون ضئيلة؛ ومِن ثَمَّ تطُول المسافة التي تقطعها السيارة للتوقُّف عن الحركة.

الآن، هبْ أنك ضغطتَ على المكابح بقوةٍ كافية لتَنغلِق جميع العجلات وتنزلق تمامًا. مع انزلاق العجلات، تَعتمِد قوى الاحتكاك على الأحمال الضاغطة على العجلات. ونظرًا لأن الأحمال مُتزايدة على العجلتَين الأماميَّتَين، تكون درجة احتكاكهما كبيرة. وعلى الرغم من أن درجة احتكاك العجلتَين الخلفيَّتَين ضئيلة، فإنَّ هذا الاحتكاك المُتزايد للعجلتَين الأماميَّتَين

يعني أن درجة الاحتكاك الإجمالية للسيارة تكون أكبر ممَّا كانت عليه في الموقف السابق، ولذا تتوقَّف السيارة بعد قطع مسافة أقل. ورغم ذلك، فإنه لا يُحبَّذ جعل العجلات تنغلق لأنَّ الانزلاق يُفقدك السيطرة على السيارة، وربما تدور السيارة حول نفسها بكلِّ سهولة (انظر البند السابق)، ممَّا يتسبَّب في اصطدامك بالسيارات المُجاوِرة أو السيارات القادمة في الحارة المرورية المُقابِلة.

يَحدُث توقُّف السيارة عن الانزلاق على نحوٍ مُباغِتٍ بسبب الزيادة المفاجئة للاحتكاك الواقع على الإطارات. أثناء حدوث الانزلاق فإنَّ المنطقة التي تتلامَس فيها الإطارات بالأسفلت تتشحَّم بالقطران السائل والمطَّاط المُنصهِر (انظر البند التالي). ولكن مع تباطُؤ السيارة، تقلُّ المواد المنصهرة ويقلُّ التشحيم، وهو ما يزيد من الاحتكاك فجأة.

(٨) انزلاق الإطارات على الطريق

إذا حدَث انغلاق لعجلات السيارة أثناء الضغط على المَكابح على نحوٍ طارئ، تَنزلِق الإطارات وتحتكُّ بالرصيف تاركةً علامات احتكاك على الطريق. هبْ أن ثمة سيارة تَنزلِق حتى تتوقَّف بعد بُلوغها سرعةً معيَّنة. هل يُؤثِّر وزن السيارة على طول علامات احتكاك؟ ماذا عن نمط التعريجات الموجودة على الإطارات وعرض هذه الإطارات؟ ماذا لو كانت الإطارات ملساء؟

لماذا يَصعُب إيقاف السيارة عندما يكون الطريق مُبتلًّا بعض الشيء أكثر ممَّا لو كان مغمورًا بمياهٍ مُتدفِّقة؟

الجواب: عند الضغط على المَكابح على نحوٍ طارئ، يزداد الاحتكاك بين الإطارات والطريق في البداية ليصِل إلى أقصى درجة، ثم يَتناقَص الاحتكاك حين تَنغلِق العجلات وتنزلق الإطارات. ويُمزِّق الانزلاق أجزاءً من الإطار ويُسبِّب سخونة الإطارات والطريق. قد تنصهر الإطارات؛ وإذا كان الطريق يتكوَّن من مادة تحتوي على القطران، فإنه قد يَنصهِر أيضًا. وإذا انصهر أيٌّ منهما، ينتج عن ذلك سائل يُسهِّل الانزلاق ويُقلِّل بدَوره الاحتكاك أكثر.

وسرعان ما تتجمَّد المادة المُنصهرة من جديد، ولكن يستمرُّ الأثر — علامة الاحتكاك — ربما لمُدة شهور. وعادةً ما يَحتوي الأثر على تحزيزات تمتدُّ بطوله؛ وتكون بسبب التضليعات الموجودة في الإطار أو بسبب الحَصى المُتناثر على الطريق. نادرًا ما تحدُث علامات الاحتكاك على الأسطُح الخرسانية وتكاد تكون غير مرئية على هذه الأسطح، وتتكوَّن بالأساس من أجزاء الإطار المُنصهِر أو المُتمزِّق.

وعندما تَنزلِق السيارة وتتوقَّف دون أن تَصطدِم بشيء، فإنَّ طول المسافة الخاصة بعلامات الاحتِكاك تُتيح للباحث أن يُقدِّر سرعة السيارة عند بَدء انزلاقها. ورغم ذلك، يُوجَد العديد من العوامل المُتغيِّرة التي قد تجعل هذه الحسبة مجرَّد رقمٍ تقديري. أحد هذه العوامل المُتغيِّرة هو كتلة السيارة (أو وزنها)؛ فالسيارة الثقيلة تتطلَّب مسافة أطول قليلًا من السيارات الأخفِّ وزنًا كي تَقِف، وهذا بالأساس يرجِع إلى التشحيم المُتزايد الناتج عن الوزن الأثقل. (في محاكم المُخالَفات المرورية والكثير من كُتب الفيزياء، يَجري تجاهُل هذا التأثير بوجهٍ عام.)

ويتوقَّف طول علامة الاحتكاك أيضًا على ظروف الطريق؛ فعادةً ما تكون العلامات أقصرَ حين يكون ثَمَّةَ حصًى مُتناثِر على الطريق وتكون العلامات أطولَ حين يكون الطريق أملس من كثرة الاستخدام. ولا علاقة لمسافة التوقُّف بعرض الإطارات؛ لأنَّ قُوى الاحتكاك الواقعة على الإطارات تعتمد عمومًا على الوزن الذي تتحمَّله هذه الإطارات وبِنيَتِها وخصائص الالتحام بين الإطارات وسطح الطريق، ولا علاقة لها بعرض الإطارات.

وحين يكون الطريق جافًّا، يكون للتعريجات الموجودة على الإطارات تأثير ضئيل على المسافة التي تَقطعها السيارة للتوقُّف؛ إلَّا أنها قد تكون ذات أهمية بالغة حين يكون الطريق مُبتلًّا. وإذا كان مستوى المياه عاليًا، كما هي الحال عند تساقط أمطار غزيرة، فإن الإطارات قد تَنزلِق (أو يحدُث ما يُسمَّى «الانزلاق المائي») على طبقة رقيقة من المياه والتي تَمنع بدَورها حدوث أي احتكاك تقريبًا. بعبارة أخرى، لا يحدُث تلامُس بين الإطارات والطريق لأنَّ المياه لا تُنَحَّى على جانِبَي الطريق أو تُزاح من أسفل الإطارات. ويزداد الانزلاق المائي سُوءًا حين يكون الطريق مُتَّسخًا وتكون الأمطار قد بدأت تتساقط لتوِّها؛ لأن المياه والوَحل يَمتزجان ليُشكِّلا بقعةً زلِقة شديدة اللزوجة أشبَهَ كثيرًا بالطَّمي السائل. هكذا، يقلُّ الاحتكاك بين الإطار والطريق بشكل كبير، الأمر الذي يتفاجَأ منه الكثير من السائقين الذين يتوقَّفون فجأةً لأنهم يظنُّون أنه مع بدء سقوط الأمطار لا يكون الطريق مبتلًّا بالدرجة الكافية لحدوث الانزلاق المائي. وبعد أن تغسل الأمطار الطريق وبعد أن يَجفَّ الطريق، يُصبح الاحتكاك بين الإطارات والطريق أكثر ممَّا كان قبل سقوط الأمطار لأنَّ الأوساخ قد أُزيلت. وتَحتوي الإطارات المُصمَّمة لتقليل الانزلاق المائي على تعريجاتٍ تُوجِّهُ المياه أو تُزيحها من أسفل الإطارات نحو جانبَي الطريق.

وإذا كانت كميَّة المياه غير كافية لحدوث الانزلاق المائي، فإنَّ بإمكانها أن تُقلِّل الاحتكاك الواقع على الإطارات بدرجةٍ كبيرة. تَلتصِق الإطارات بسطح الطريق الجافِّ؛ لأن

الوزن الواقِع عليها يُلصِق الجزء السُّفلي من الإطار بالسطح بشكلٍ مؤقَّت. وهذا الالتصاق يُتيح للإطارات أن تتشابك بالسطح المُتعرِّج لتنساب بين الشقوق البسيطة وتعلَق وسط النتوءات البسيطة. وهذا التعشيق الوثيق بين الإطارات وسطح الطريق المُتعرِّج قد يُسفِر عن المزيد من الاحتكاك الواقع على الإطارات أثناء إيقاف السيارة بشكلٍ طارئ. ورغم ذلك، عندما يكون سطح الطريق مُبتلًّا، تَمتلئ هذه الشقوق بالمياه. وحين تلتصِق الإطارات بالطريق على نحوٍ مؤقت، تَنحبِس المياه في هذه الشقوق، ممَّا يجعل سطح الطريق أملسَ نسبيًّا ويُزيل النتوءات فعليًّا؛ ومن ثَمَّ لا يكون في مقدور الإطارات أن تحتكَّ بهذه النتوءات.

وإذا بدأت السيارة تدور حول نفسها أثناء توقُّفها على نحوٍ طارئ، فستكون العلامات الموجودة على الطريق مُنحنية. ويحدُث دوران السيارة حول نفسها عند انغلاق العجلتَين الخلفيَّتَين قبل العجلتَين الأماميَّتَين أو قد يَحدُث بسبب انحدار الطريق. (عادةً ما يكون منتصف الطريق أعلى من جانبَيه بهدَف تصريف مياه الأمطار.)

إذا كانت العجلات لا تزال تدور أثناء دوران السيارة حول نفسها، فإنها تحكُّ جانبَي الطريق وتترُك «علامات الكحت» التي ينقصها الخطوط المميزة لعلامات الاحتِكاك. ربما يكون كِلا النَّوعَين من العلامات مُتقطِّعًا إذا كان الطريق غير مُستوٍ بالدرجة الكافية، مما يجعل السيارة ترتجُّ أو إذا كانت المكابح غير مُتَّسقة. والفواصل القصيرة في العلامات تكون عادةً بسبب الارتجاج، بينما الفواصل الأطول قد تُشير إلى ضغط قائد السيارة على المكابح على نحوٍ مُتقطِّع.

قصة قصيرة

(٩) بعض الأرقام القياسيَّة لعلامات الاحتكاك

يبدو أن تسجيل الأرقام القياسية لعلامات الاحتكاك على الطُّرُق السريعة بدأ عام ١٩٦٠ على يد سائق يقود سيارة جاجوار على الطريق السريع إم١ بإنجلترا؛ إذ وصل طول العلامات إلى ٢٩٠ مترًا. وفي محكمة المُخالَفات المرورية، زُعِم أنَّ السرعة تخطَّت ١٦٠ كيلومترًا في الساعة (أو ١٠٠ ميل في الساعة)، حين حدَث انغلاق للعجلات أولًا. وإذا افترضْنا أن مُعامل الاحتكاك بين الإطارات والطريق كان يَبلُغ ٧٫٠، يُمكننا أن نُقدِّر سرعة السيارة بحوالي ٢٢٥ كيلومترًا في الساعة (أو ١٤٠ ميلًا في الساعة).

كانت علامات الاحتكاك التي تركَتْها السيارة الجاجوار مُثيرةً للإعجاب، إلَّا أنها لا تُقارَن بالعلامات التي ترَكها كريج بريدلوف في أكتوبر ١٩٦٤ على طريق بونفيل سولت فلاتس بولاية يوتا. وفي محاولة لتحطيم الرقم القياسي وتخطِّي «حاجز» سرعة ٥٠٠ ميل في الساعة (٨٠٥ كيلومترات في الساعة)، قطع بريدلوف بسيارته المُسمَّاة «سبيرت أوف أمريكا»، والمدفوعة بمُحرِّك صارُوخي، مسافة ميل واحد، أولًا في أحد الاتِّجاهَين ثم في الاتجاه المُعاكس، بحيث يُمكن حساب مُتوسِّط تأثير الرياح. وفي المرة الثانية التي قطَع فيها الميل، كان يقود السيارة بسرعة ٥٤٠ ميلًا في الساعة تقريبًا.

ومن أجل إبطاء السُّرعة، أطلق مظلَّة الكَبْح ولكن حبل المظلَّة انقطع تحت وطأة الضغط، كما فشلَت المظلَّة الثانوية أيضًا. بعد ذلك، ضغط على المَكابح، دافعًا الدوَّاسة إلى الأرضية، لكن كل ما فعلته هو ترك علامات احتكاك امتدَّت على طول ستَّة أميال تقريبًا قبل الاحتِراق. كانت السيارة تَسير حينها بسرعة ٥٠٠ ميل في الساعة ومرَّت — بشِقِّ الأنفُس — بين صفَّيْن من أعمدة خطوط الهاتف. وتوقَّفت السيارة في النهاية حين صعدت تلًّا منخفضًا ثم هبطت منه بسرعة ١٦٠ ميلًا في الساعة إلى بِركة مالِحة بعُمق ٥ أمتار. ونظرًا لأن بريدلوف كان مثبتًا بإحكام في مقعده، كاد يَموت غرقًا في مقصورة القيادة المغمورة أسفل المياه. ورغم ذلك، سجَّل بريدلوف رقمًا قياسيًّا وكسر حاجز ٥٠٠ ميل في الساعة بسُرعة متوسطة بلغت ٥٢٦ ميلًا في الساعة.

(١٠) نقَّار الخشب وكبش الجبال الصخريَّة وارتجاج المخ

يدقُّ نقَّار الخشب بمِنقاره على فرع إحدى الأشجار بحثًا عن حشرات ليَأكلها أو ليَصنع مِساحةً تخزينية لطعامه أو ليَجذِب وليفةً له بصوتٍ مَسموع. وأثناء هذا الفعل، يُقدَّر المُعدَّل الذي تتباطأ به حركة رأس الطائر بـ ١٠٠٠ ضعف عجلة الجاذبية الأرضية. ربما يكون مثل هذا المعدَّل للتباطؤ مُميتًا بالنسبة إلى الإنسان أو على أفضل تقدير قد يتسبَّب في تلفٍ بالغٍ في الدِّماغ ويُصيب الإنسان بارتجاج في المخ. ولكن لماذا لا يَسقط نقَّار الخشب من فوق الشجرة ميِّتًا أو فاقدًا للوعي في كل مرة ينقُر فيها بعُنفٍ على الشجرة؟

من أجل فرض الهيمنة أثناء موسم التزاوُج، تتصادَم ذكور كِباش الجبال الصخرية بقرونها ورءوسها تصادُمًا عنيفًا. ورغم ذلك، لا تتساقَط الكباش على الأرض فاقدةً الوعي (من الصعب أن تختارك أنثى وأنت مُمدَّد على الأرض وفاقد للوعي). ولعلَّ بعض أنواع

الديناصورات ذات القرون (مثل ترايسيراتوبس) كانت تتصادَم بصورةٍ مُشابهة. فلماذا لا تتأذَّى الكِباش من هذا التصادُم؟

الجواب: إن قُدرة نقَّار الخشب على مقاومة التباطؤ الهائل لحركة رأسِه حين يدقُّ بمنقاره على فرع إحدى الأشجار غير مفهومة، ولكن ثَمَّةَ تفسيران أساسيَّان لهذا الأمر: (١) تكاد تكون حركة طائر نقَّار الخشب في خطٍّ مستقيم. ويرى بعض الباحثين أنَّ ارتجاج الدماغ يحدُث في البشر والحيوانات حين يدور الرأس بسرعة بالغة حول الرقبة (وجذع الدماغ)، ولكن ليس من المُرجَّح حدوث هذا عندما تكون الحركة في خطٍّ مستقيم. (٢) دماغ نقَّار الخشب مُثبَّت بإحكام بالجُمجمة لدرجة أنَّ الأثر المُتبقِّي لحركة الرأس أو ارتجاج الدماغ يكون ضئيلًا بعد الفعل ولا مجال لتمزُّق الأنسجة التي تربط بين الجمجمة والدماغ.

وعادةً ما تحمي الكباش، التي تتصادَم برءوسها وقُرونها، أنفسها بثلاثِ سِمات: (١) تلتوي قُرونها لكي تُطيل مدَّة التصادُم، ومن ثَمَّ تُقلل من قوى الاصطدام. (٢) تدور أيضًا عظام الجُمجمة (العظام القَحفيَّة) أو تتحرَّك حول المفاصل (دروز الجمجمة) في حركة أشبَهَ بحركة الزنبرك أو مِفصل الباب من أجل تخفيف أثر الضربة على الرأس. (٣) مُعظَم الطاقة الناجمة عن التصادُم يَنتهي بها المطاف عند عضلات الرقبة القوية للحيوان. وعلى الرغم من أن التصادُمات تبدو شديدة العنف، فقد تطوَّرت عضلات وقرون الحيوانات لدرجة أنه مِن المُستبعَد أن يُكسَر قرنٌ أو يُصاب الدماغ. وعلى الأرجح، استفاد ديناصور «ترايسيراتوبس» مِن وجود جهاز تجويفي مُوسَّع يُبطِّن القَحف العصبي للجمجمة، وهو الذي قد يقوم مقام مُمتصِّ الصدمات.

قصة قصيرة

(١١) لعبة عجلة الجاذبية الأرضية

في يوليو عام ١٩٧٧، في بحيرة إل ميراج دراي، بولاية كاليفورنيا، سجَّلت كيتي أونيل رقمَين قياسيَّين لسباق السيارات في مضمار بلغ طوله ٤٤٠ ياردة. وعند نقطة التوقُّف، كانت كيتي أونيل قد وصلَت إلى أقصى «سرعة ختامية» (سرعة السيارة عند نهاية مضمار السباق) على الإطلاق وحطَّمت الرقم القياسي لأقلِّ وقتٍ مُستغرَق؛ ألا وهو ٣,٧٢ ثوانٍ. كانت سرعتها مذهلة؛ إذ وصلت إلى ٣٩٢,٥٤ ميلًا في الساعة (حوالي ٦٣٢,١ كيلومترًا في الساعة).

وبلغ مُتوسِّط سُرعتها أثناء السباق ٤٧٫١ مترًا في الثانية؛ أي بمقدار ٤٫٨١ مرات قدْر عجلة الجاذبية الأرضية.

وفي ديسمبر عام ١٩٥٤، وفي قاعدة هولمان الجوية، بولاية نيومكسيكو، قُيِّدَ دكتور جون ستاب، العقيد بالقوات الجوية، في مقعد مِزلجة صاروخية تدفَعُها تسعة صواريخ. وحين تمَّ إطلاقها، اندفع العقيد ستاب والمِزلجة الصاروخية على مضمار لمدَّة ٥ ثوانٍ ليصِل إلى سرعة ٦٣٢ ميلًا في الساعة؛ أي حوالي ١٠١٨ كيلومترًا في الساعة. وبلغت سرعته أثناء مرحلة الدفع حوالي ٥٦٫٤ مترًا في الثانية المُربَّعة أو ٥٫٧٦ مرات قدْر عجلة الجاذبية الأرضية. بالتأكيد، الأرقام مُثيرة للإعجاب، إلَّا أنَّ الاختبار الحقيقي للعقيد ستاب تمثَّل في التوقُّف باستخدام مكابح مائية، وهو ما استغرق ١٫٤ ثانية فقط؛ حيث إنه أبطأ المِزلجة الصاروخية بمعدَّل يُقدر بـ ٢٠٫٦ مرَّة قدْر عجلة الجاذبية الأرضية.

وفي مايو عام ١٩٥٨، في مِزلجة صاروخية مُشابهة بقاعدة هولمان، بلغت سرعة إيلي إل بيدينج، جونيور، حوالي ٧٢٫٥ ميلًا في الساعة أو ١١٧ كيلومترًا في الساعة. وتكاد هذه السرعة تبدو غير لافتة للأنظار؛ لأنه من الشائع بلوغها على بعض الطُّرق السريعة، إلَّا أنها تفرض الانتباه لها حين يكون الوقت المُستغرق لبلوغ هذه السرعة لافتًا. كان الوقت المُستغرق ٠٫٠٤ ثانية؛ أي أقل من لمح البصر. وظلَّت السرعة التي بلغها بيدينج — والتي قُدِّرت بمقدار ٨٢٫٦ مرةً قدْر عجلة الجاذبية الأرضية — رقمًا قياسيًّا في ظلِّ ظروف خاضعة للمُراقبة.

وفي يوليو عام ١٩٧٧، في مقاطعة نُورْثَمابتونشير، بإنجلترا، تحطَّمت سيارة السباق الخاصَّة بديفيد بيرلي وتناقصَت سُرعته من ١٠٨ أميال في الساعة إلى صفر أثناء تحرُّكه مسافة ٢٦ بوصة فقط. (بلغت السرعة ١٧٤ كيلومترًا في الساعة، وقُدِّرت المسافة بمقدار ٢/٣ أمتار.) وبدا تباطُؤه مُهلِكًا؛ حيث وصَل ١٧٩٫٨ مرة قدْر عجلة الجاذبية الأرضية، وعلى الرغم مِن أن بيرلي أُصيب بـ ٢٩ كسرًا وعانى من خلع ثلاثة مفاصل وتوقَّف قلبه ستَّ مرات، فإنه نجا من الموت بأعجوبة.

(١٢) التصادم الأمامي

تخيَّل فجأةً أنك ترى سيارة قادمة ناحيتك من الاتجاه المعاكس لنفَقٍ ذي اتجاهٍ واحد. لكي تَحُدَّ من خطر وقوع حادث وشيك، هل ينبغي عليك أن تجعل سرعة سيارتك مساوية

لسرعة السيارة القادمة في الاتجاه المعاكس، أم تسير بسرعة أكبر منها، أم تخفض سرعتك لتُوقِف السيارة؟

ويُعَدُّ التصادم الأمامي للسيارات أخطر أنواع التصادمات. ومن المُدهش أن البيانات التي جُمعت عن حوادث التصادم الأمامي تُشير إلى أن خطر (أو احتمال) وفاة السائق يقلُّ إذا ما كان هناك ركاب آخرون في السيارة؛ فما السبب؟

الجواب: أفضل نصيحة هي أن تُوقِف السيارة، وإن أمكن، ضَعْ ناقل الحركة في اتجاه الرجوع إلى الخلف. ويُمكِنك أن تُقدِّر شدَّة الاصطدام من خلال حساب إجمالي الطاقة الحركية أو إجمالي الزخم للسيارتَين قبل حدوث الاصطدام. وإذا لم تُقلِّل سرعتك تجاه السيارة الأخرى، فستكون كِلتا الكميَّتَين عالية، وسيكون التصادم شديدًا.

الموقف هنا يَختلف عن لعبة كرة القدم الأمريكية؛ حيث قد يَختار اللاعب الإسراع عندما يركض مباشرة تجاه لاعبٍ آخر. يَتمثَّل الفارق في أنَّ اللاعب قد يَرغب أن يكون الاصطدام عنيفًا، ومن خلال توجيه جسده بدقَّة يُمكنه أن يُحوِّل التصادُم إلى مناطق الضعف لدى خصمه أو يُفقِد خصمه التوازُن ويطرحه أرضًا على الملعب.

وتُشير البيانات التي جُمعت عن التصادُم الأمامي للسيارات إلى أنَّ وجود راكب في السيارة بخلاف السائق يُقلِّل من خطر وفاة السائق. ويتوقَّف ذلك الخطر على تغيير سُرعتك المتَّجِهة أثناء التصادم؛ فالتغيير الكبير يعني أنك تعرَّضتَ لتسارُع شديد بسبب قوة شديدة. على سبيل المثال، إذا كانت كتلة سيارتك ضئيلة وكتلة السيارة الأخرى كبيرة، فإن سرعتك المتَّجهة قد تتغيَّر بقدرٍ كبير للغاية لدرجة أنه ستَنتهي بك الحال بالتراجُع إلى الوراء. ووجود كتلة إضافية في سيارتك، نابِعة من وجود راكبٍ آخر أو حتى وجود جوال رمال في شنطة السيارة، قد يُقلِّل من التغيير الواقع على سُرعتك المُتَّجهة، ومن ثَمَّ يُقلِّل خطر تعرُّضك للوفاة. وإليك نتيجةً عددية: إذا فرَضْنا أنَّ سيارتك والسيارة الأخرى مُتطابِقتان وكُتلتك وكتلة السائق الآخر مُتماثِلتان، فإنَّ خطر وفاتك يقلُّ بنسبة ٩٪ تقريبًا إذا كان لدَيك راكب آخر في السيارة يزن ٨٠ كيلوجرامًا.

قصة قصيرة

(١٣) اللَّعِب بالقاطرات

المكان: مدينة واكو، ولاية تكساس. الزمان: ١٥ سبتمبر ١٨٩٦، فكَّر ويليام كراش من شركة السكك الحديدية لميزوري وكنساس وتكساس في فكرة عرْض مؤكَّدة النجاح؛ إذ

رتَّب مواجهة بين قاطرتَين عتيقتَين عند طرفَين مُتقابلَين لمسارٍ بلغ طوله ٤ أميال. كانت إحدى القاطرتين مَطليَّة باللون الأحمر والأخرى مطلية باللون الأخضر. تمثَّلت الفكرة في تصادُم القاطرتَين بأقصى سُرعةٍ لهما.

حسنًا، لا يُوجَد شيء يُحقِّق مبيعات مهولة مثل العُنف، ودفع ٥٠ ألف مُتفرِّج ثمنَ تذكرة مُشاهدة حادث التصادم. وبعد أن زُوِّدت القاطرتان بالوقود وثُبِّتت الصمامات الخانقة على وضْع الفتح، وتسارَعت القاطرتان كل منهما ناحية الأخرى. وعندما تصادَمتا، كانتا تسيران بسرعة ٩٠ ميلًا في الساعة تقريبًا أو ١٤٥ كيلومترًا في الساعة.

قُتِل عدَّة متفرِّجين من أثر تناثُر الحطام وجُرِح المئات. أما باقية الحشود فقد استمتَعت على الأرجح بإنفاق المال لمشاهدة العرْض. كان الوجود بالقُرب من التصادُم، وما صحِبَه من تحوُّلٍ جذري في الطاقة الحركية للقطارات إلى طاقة حرَكية للحُطام المُتناثر، أشبَهَ بالوجود بالقُرب من انفجارٍ مُتوسِّط الحجم.

(١٤) التصادُم الخلفي للسيارات وإصابات الرَّقَبة

في حوادث التصادُم الخلفي، تَصطدم سيارة بأخرى من الخلف. وعلى مدار عقود، سعى المهندسون والباحثون في المجال الطبِّي إلى تفسير سبَب إصابة رقَبة راكب المقعد الأمامي في مثل هذه الحوادث. وبحلول سبعينيَّات القرن العشرين، توصَّلوا إلى أن الإصابة كانت بسبب اصطدام رأس الراكب بالجزء العلوي من المقعد عند اندفاع السيارة إلى الأمام؛ ولذا تُعرَف بالاسم الشائع «الإصابة المصعية»؛ إذ إنَّ الرقبة تَنثني إلى الخلف أكثر ممَّا يَنبغي بسبب حركة الرأس. وبسبب هذا الاستنتاج، وُضِعت مَساند الرأس في السيارات، ورغم ذلك، لا تزال إصابات الرقبة تقَع في حوادث التصادُم الخلفي. إذن، ما الذي يتسبَّب في وقوع هذه الإصابات؟

الجواب: السبب الأساسي لحدوث الإصابة المصعية هو حقيقة أنَّ الاندفاع الناتج عن تسارُع رأس الضحية إلى الأمام يتأخَّر عن اندفاع جذعها؛ ومِن ثَمَّ عندما يتحرَّك الرأس إلى الأمام، يكون الجذع قد اكتسب بالفعل سُرعة أمامية كبيرة. وهذا الاختلاف في الحركة الأمامية يتسبَّب في تعرُّض الرقبة إلى ضغط كبير؛ مما يتسبَّب في إصابتها. يحدُث ارتداد

الرأس إلى الوراء في وقتٍ لاحق من الاصطدام ويُمكن أن يزيد من حدَّة الإصابة، لا سيما في غياب مسند الرأس.

(١٥) منعطفات سباق السيارات

عادةً ما يتحدَّد الفوز بسباق السيارات الفائقة السرعة وَفقًا لأداء السيارات والسائقين أثناء اجتياز المُنعطفات. تخيَّل مُنعطفًا بزاوية تسعين درجة على مضمارٍ مستوٍ، مثل مضمار سباق فورميلا وان. بالتأكيد، تعتمِد الطريقة المُثلى لاجتياز المنعطف على خصائص التحكُّم في السيارة ومهارة السائق وخبرته وظروف مضمار السباق. ومع ذلك، هل يَنبغي بوجهٍ عام أن يَتبع السائق طريقًا دائريًّا حول المُنعطف؟ عادةً يضمن لك ذلك الاختيار أقلَّ وقتٍ مُستغرَق لاجتياز المُنعطَف، ولكن لماذا لا يُعدُّ هذا أفضل اختيار؟

لماذا يُواجِه السائقون مُحترفو قيادة المسارات المستوية لسباق فورميلا وان صعوبةً عند المشاركة في سباق إندي كار، الذي يُوجَد به عادةً مُنعطفات مائلة؟ وبالأخص، لماذا يكون مثل هؤلاء السائقين عرضةً للانزلاق في حركة دائرية إلى الخارج عند قيادة السيارة خلال المُنعطفات؟

الجواب: يقطع السائق المُبتدئ المُنعطف في مسارٍ دائري؛ بينما يضغط السائق المُحترِف على المكابح أثناء الانعطاف قليلًا، ثم يَنعطِف بحدَّة ويتبع بعد ذلك مسارًا أقلَّ انحناءً أثناء زيادة السرعة. ويستغرق هذا التصرُّف وقتًا أطول لقطع المُنعطَف ولكنه يتيح للسائق أن يدخل على الجزء المستقيم من المضمار بسرعة أكبر مقارنةً بالسائق المُبتدئ. وتلك السرعة الكبيرة على المسار المستقيم تُعوِّض الوقت الضائع في قطع المنعطف.

وثمَّة ميزة أخرى لهذا التصرُّف. فإذا قطعت المنعطف بسرعة أكبر مما ينبغي، فستتجاوَز الحد الأقصى لقوى الاحتكاك الواقعة على الإطارات وستَخرج السيارة عن نطاق السيطرة. ومن أجل الحفاظ على درجة الاحتكاك، يضغط السائق المُحترف أولًا على المكابح وحينئذٍ فقط يقطع المُنعطَف بحدة. ونظرًا لأن المسافة المُتبقية من المنعطف تكون تدريجية، يستطيع السائق أن يزيد من سرعة السيارة دون المبالغة في الاحتكاك.

ويتمتَّع المُتسابق المُحترِف في سباقات فورميلا وان بشعور حدسي بخُصوص القوى والحركة أثناء اجتياز المنعطف المستوي. ولكن يختلف هذا الشعور تمامًا عند قطع المُنعطفات المائلة، ويتأخَّر السائق في سباقات فورميلا وان كثيرًا عند اجتياز المنعطَفات الحادة.

(١٦) مضمار سباقات العَدْو

لماذا يكون السباق على مِضمارٍ مُستقيم أسرع بوجهٍ عام من سباقٍ بنفس المسافة على مضمار مُنحَنٍ؟ حين يكون المضمار مُستويًا وبيضاويَّ الشكل، لماذا يتفوَّق العدَّاء الموجود في الحارة الخارجية على العدَّاء الموجود في الحارة الداخلية، على الرغم من تَساوي المسافة في الحارتَين؟ لماذا تعتمد السرعة في مثل هذه السباقات على نوعيَّة الشكل البيضاوي للمِضمار؟

الجواب: عند دخول مسارٍ مُنحَنٍ، يُبطِّئ العدَّاء سُرعته؛ وعند الانتهاء من هذا المسار يعود ليَزيد سُرعته مرةً أُخرى ليَصل إلى السرعة المُعتادَة على المضمار المُستقيم. وعند المُنعطَفات، تكون قوة الجذب المركزي تجاه مركز المُنعطَف حتميَّة. وفي هذه الحالة، تتولَّد قوة الجذب المركزي بسبب قوى الاحتكاك الناجمة عن حذاء العدَّاء بأرض المضمار. وبسبب هذه القوى الداخلية الواقعة على الحذاء، يَنحني جسد العدَّاء إلى خارج المنعطف كما لو أنه قُذف إلى الخارج. ولذا، من أجل الحفاظ على التوازُن، يبطِّئ العدَّاء من سُرعته ليُقلِّل القوى الواقعة عليه وينحني بجسده إلى الداخل ليوازن ميله إلى الانحناء للخارج. وكلَّما كان المُنعطف حادًّا، تعيَّن على العدَّاء أن يُبطِّئ سرعته ويميل إلى الخارج أكثر. وهكذا، يتفوَّق العدَّاء الذي يركُض في الحارة الخارجية (الأقل انحناءً) بوجهٍ عام على العدَّاء الذي يركض في الحارة الداخلية (الأكثر انحناءً).

وعندما يكون المضمار مُستويًا وبيضاويَّ الشكل، تُحدِّد مسافة السباق على الأجزاء المُنحنية وتيرة السباق. وبوجهٍ عام، تكون وتيرة السباق على مضمار بيضاوي واسِعٍ أسرع من وتيرة السباق على مضمار بيضاوي ضيِّق؛ لأن درجة انحناء الأجزاء المنحنية من المضمار أصغر للمضمار البيضاوي الواسع مقارنةً بالمنعطفات الحادَّة للمضمار البيضاوي الضيِّق. وأفضلُ شكل هندسي (بخلاف المضمار المستقيم، بالطبع) هو المضمار الدائري؛ لأن درجة انحنائه هي الأقل.

(١٧) خدعة الإقلاع

تخيَّل طائرة نفَّاثة مُقلعة من حاملة طائرات تدفعها مُحركاتها القوية أثناء إطلاقها باستخدام آلة المَنجنيق المُثبتة على متْن الحاملة. يُتيح التسارُع العالي الناتج عن هذا الإطلاق للطائرة أن تصِل إلى السرعة اللازمة للإقلاع بعد قطْع مسافة قصيرة على متْن الحاملة. ورغم ذلك، يُجبِر ذلك التسارُع العالي الطيَّار أن يُوجِّه مُقدمة الطائرة إلى أسفل

بزاوية حادَّة أثناء الإقلاع. ويُدرَّب الطيارون على تجاهل هذا الدافع، ولكن أحيانًا تسقط الطائرة مباشرة إلى المُحيط. ما المسئول عن هذا الدافِع؟

الجواب: يتوقَّف إحساسك بالوضعية العمودية على الدلائل البصرية وعلى الجهاز الدهليزي للأذن الداخلية. ويَحتوي هذا الجهاز على خلايا شُعيرية دقيقة مغمورة في سائل. عندما يكون رأسك في وضعٍ عمودي، تكون الشُّعَيرات مُتوافِقة بشكلٍ عمودي مع قوى الجاذبية الواقعة عليك، ويرسل الجهاز إشارات إلى مُخِّك بأن رأسك في وضعيَّة عمودية. وعندما تَميل برأسك إلى الخلف، تَنثني الشُّعيرات ويرسل الجهاز إشارات إلى مُخِّك بخصوص إمالة الرأس. وتنثني الشُّعيرات حين تزيد سرعتك إلى الأمام بفعل قوة أفقية. والإشارة المُرسَلة إلى مخِّك تُشير بالخطأ إلى أنَّ رأسك يميل إلى الخلف. ورغم أنَّ هذه الإشارة الخاطئة يتمُّ تجاهلها حين تُشير الدلائل البصرية إلى عدَم حدوث إمالة للرأس إلى الخلف، كما هي الحال عندما تزداد سرعتك وأنت داخل السيارة.

ليس لدى الطيار المنطلق من على متن حاملة الطائرات في المساء أيُّ دلائل بصرية تقريبًا. وتكون خدعة الإمالة قوية ومُقنعة للغاية، بما يترتَّب عليه شعور الطيَّار كما لو أنَّ الطائرة تُغادِر متن حاملة الطائرات وهي متَّجهة لأعلى بزاوية حادة. ومع غياب التدريب المناسب، يُحاول الطيَّار أن يضبط مستوى الطائرة من خلال توجيه مقدمتها إلى أسفل بزاوية حادَّة، وهو ما يتسبَّب في سقوطها بالمحيط.

قصة قصيرة

(١٨) رحلة طيران كندا رقم ١٤٣

في الثالث والعشرين من يوليو عام ١٩٨٣، كان يَجري تجهيز الرحلة رقم ١٤٣، التابعة لطيران كندا، لقَطْع مسافة طويلة من مدينة مونتريال إلى مدينة إدمونتون؛ وحينها طلب طاقم الطائرة من موظَّفي المطار تحديد كمية الوقود الموجودة على متن الطائرة بالفعل. كان طاقم الطائرة يَعلم أنهم بحاجة إلى ١١٣٠٠ كيلوجرام من الوقود في بداية الرحلة. وقد حدَّد الطاقم كمية الوقود بالكيلوجرامات؛ لأن كندا كانت قد انتقلَت مؤخَّرًا إلى العمل بالنظام المتري؛ إذ إنَّ كمية الوقود كانت تُقاس فيما مضى بالرطل. لم يستطع موظَّفو المطار قياس كمية الوقود الموجودة على متن الطائرة إلَّا باللترات؛ وأفادوا بأنَّ الكمية الموجودة في خزَّان الوقود هي ٧٦٨٢ لترًا. لذا، من أجل تحديد كمية الوقود الموجود على

متن الطائرة والكمية الإضافية اللازمة لقطع الرحلة، طلَب طاقم الطائرة من موظفي المطار مُعامِل تحويل اللترات إلى الكيلوجرامات. وجاء الرد بالرقم ١٫٧٧، واستخدم طاقم الطائرة هذا الرقم (١٫٧٧ كيلوجرام يعادل ١ لتر) لاحتساب كمية الوقود الموجودة على متن الطائرة والتي بلَغت ١٣٥٩٧ كيلوجرامًا وكانت كمية الوقود الإضافية اللازمة ٤٩١٧ لترًا.

لكن لسوء الحظ، كان الرد الذي جاء من موظَّفي المطار مبنيًّا على ما جرى به العُرف قبل العمل بالنظام المتري؛ حيث لم يكن الرقم ١٫٧٧ مؤشرًا لتحويل اللترات إلى كيلوجرامات؛ وإنما لتحويل اللترات إلى «أرطال» من الوقود (١٫٧٧ رطل يعادل ١ لتر). في الواقع، كان يُوجَد على متن الطائرة ٦١٧٢ كيلوجرامًا فقط، وكان ينبغي إضافة ٢٠٠٧٥ لترًا آخر. وهذا يَعني أن الرحلة رقم ١٤٣ غادرَت مونتريال وعلى مَتنِها ٤٥٪ فقط من كمية الوقود اللازمة لقطع الرحلة.

وفي الطريق إلى مدينة إدمونتون، وعلى ارتفاع ٧٫٩ كيلومترات فوق سطح الأرض، نفَد وقود الطائرة وشرعت في السقوط. وعلى الرغم من نَفاد الوقود، استطاع الطيَّار أن يهبط بها باستخدام تقنية الطيران الشراعي. ونظرًا لأن أقرب مطار جوي قيد العمل والتشغيل كان يبعد كثيرًا عن مكان الهبوط، وجه الطيار الطائرة نحو مطار قديم مُعطَّل.

ولسوء الحظ، كان مهبط ذلك المطار قد تمَّ تحويله إلى مضمار لسباقات السيارات، وتمَّت إحاطته بحاجز فولاذي. لكن لحسن الحظ، بمجرَّد أن نزلت الطائرة إلى المهبط، تحطَّمت عجلات الهبوط الأمامية، مما تسبَّب في انخفاض مقدمة الطائرة نحو المهبط. أبطأ الانزلاق من سرعة الطائرة لتتوقَّف قبل الاصطدام بالحاجز الفولاذي بمسافة قصيرة، على مرأى ومَسمع من السائقين المشاركين في السباق والجمهور المُندهِش. غير أن جميع ركاب الطائرة خرجوا بأمان. المغزى من هذه القصة: الكميَّات وحدَها عديمة الفائدة من دون الوحدات المناسبة.

(١٩) الشعور بالخوف والرهبة داخل مدينة الملاهي

ما سبب الشعور بالمُتعة والإثارة عند ركوب لعبة الأُفعوانية في مدينة الملاهي؟ بالتأكيد الارتفاعات والسرعات وشعور السقوط الوهمي كلها عوامل؛ إلَّا أن هذه الأحاسيس يمكن الشعور بها عند استقلال مصعد زجاجي خارجي؛ حيث لا تُوجَد طوابير ولا رسوم لركوب المصعد.

ماذا عن ركوب الألعاب التي تتعلَّق وتتدلَّى منها؟ لماذا تتشبَّث، وربما تصرخ أيضًا، أثناء ركوب لعبة الأفعوانية؟

لعبة الأفعوانية مصمَّمة لمنح الشعور الوَهمي بالخطورة (وهذا جزء من مُتعة ركوبها)، لكن في الواقع يبذل المهندسون قصارى جهدهم لجَعل ركوبها آمنًا للغاية. وعلى الرغم من الاهتمام البالِغ بسلامة الركاب، فإن عددًا قليلًا — سيِّئ الحظ — من ملايين الأشخاص الذين يَركبون لعبة الأفعوانية كلَّ عام تنتهي بهم الحال إلى الإصابة بحالة مرضية تُدعى «صداع الأفعوانية». ومن بين الأعراض — التي قد لا تَظهر إلَّا بعد مرور بضعة أيام — دوار وصداع، كلاهما شديد إلى درجة تَستلزم العلاج الطبي. إذن، ما الذي يتسبَّب في الصداع الناجم عن ركوب الأفعوانية؟

الجواب: بعض الألعاب تتَّسم بالإثارة بسبب الارتفاعات أو السُّرعات العالية أو معدَّلات التسارُع العالية (التي تصل إلى ٤ مرَّات قدر عجلة الجاذبية على الأفعوانية نفسها)، أو لأن الدوران السريع يخلق شعورًا رائعًا بقوة الطرد المركزي (الموجهة إلى الخارج)، إلَّا أن أكثر الألعاب إثارة هي عادةً تلك التي يَنتج عنها وقوع قوة مُتغيِّرة بسرعة وغير مُتوقَّعة؛ فعندما تشعُر بقوة ثابتة وتخضع لتسارُع ثابت، تبدو أن الأمور تحت نطاق السيطرة، ولكن حين تُغيِّر القوة فجأة شدَّتها أو اتجاهها وتتسارَع على نحوٍ غير مُتوقَّع، تشعُر بالخطر على نحوٍ لا واعٍ. وعنصر المفاجأة على مُستوى اللاوعي يولِّد شعورًا بمراوغة الموت.

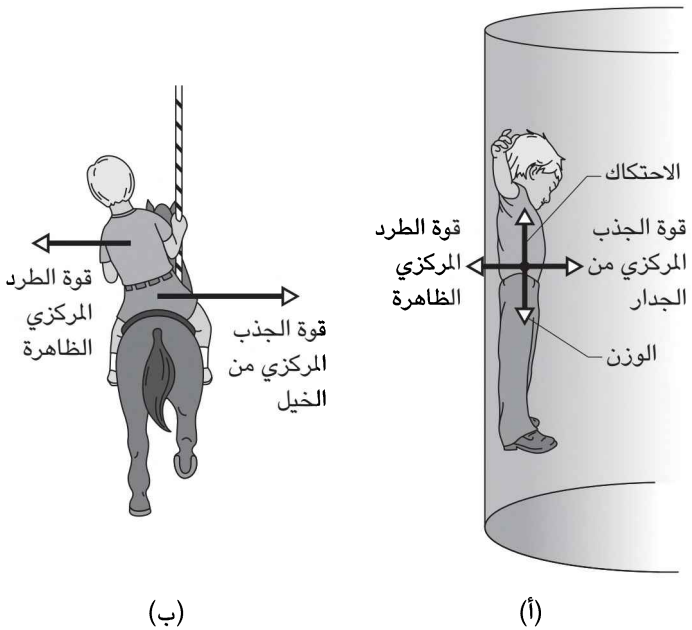
الأفعوانية التقليدية: الارتفاعات والسرعات العالية مُثيرة للغاية، شأنها شأن صوت الخشخشة الصادرة عن الأفعوانية الخشبية القديمة. فعندما تدور بسرعة عبْر منحنًى منخفض، تدفعك قوة طرد مركزي ظاهرة لتُثبِّتك في المقعد؛ وعندما تدور على منحدر شديد الانحناء، تبدو أن السرعة ستُلقي بك من فوق المقعد. وعندما تصعد على حافة أول وأكبر منحدر، يتملَّكك شعور واضح بالسقوط من ارتفاع. ويصِل هذا الشعور الوهمي إلى أَوْجِهِ حين تجلس في العربة الأمامية بحيث يكون جزء صغير فقط من الأفعوانية موجودًا أمامك. ورغم ذلك، أعتقد أن الجلوس في العربة الخلفية يكون مُخيفًا أكثر. فعندما تقترب من الحافة وجزء أكبر من جسم الأفعوانية يبدأ في النزول، تتراكم القوة الواقعة على ظهرك تدريجيًّا في البداية ثم تَزداد سرعتها (يكون المعدل تصاعديًّا)، ومع وصولك إلى الحافة، تَختفي القوة. التجربة أشبَهُ بقوة شيطانية تَقذف بك نحو الحافة على نحوٍ مَحموم ثم تُلقي بك في وضعية السقوط الحر.

أفعوانية الفأر: تَسير العربات بشكلٍ مُنفصِل على طول المسار. ترتكز المقصورة التي تَجلس فيها فوق إطار ذي عجلات يَتبع المسار، مع وجود مِحوَر الارتكاز بالقُرب من مؤخِّرة العربة. وعندما تصل إلى منعطفٍ حاد، يتبع الإطار المسار المُنحني بدقة، إلا أن المقصورة تواصل سيرها إلى الأمام للحظة قبل أن تستدير أيضًا. في تلك اللحظة، يُساورك شعور وهمي بأن المقصورة خرجت عن المسار وطارت في الهواء.

الأفعوانية العصرية: تُعطي الحلقات العمودية والدوائر الحلزونية شعورًا بقُوى الطرد المركزي التي تتغيَّر بسرعة في الشدة والاتجاه، ونتيجةً لذلك تنقلب أنت رأسًا على عقب، وكلا العاملَين يبعثان على الشعور بالخوف. فبينما تصعد إلى قمة حلقة عمودية، من المفترض أن تقلَّ قُوة الطرد المركزي الظاهرة مع تباطؤك، إلا أن درجة انحناء المسار تزداد بشدَّة لكي تُحافظ على تلك القوة الظاهرة. وفي بعض أنواع الأفعوانيات قد تتحرَّك عبْر المسار ووجهك متجهٌ إلى الخلف بحيث لا يمكنك التنبُّؤ بأيِّ تغييرات في القوى أو السرعة أو معدَّل التسارُع الذي أنت بصدد أن تتعرَّض له. كما أن ركوب الأفعوانية في الظلام يُقلِّل أيضًا من قدرتك على التوقُّع ويُعزِّز شعورك بالخوف.

لعبة البرميل الدوار: عندما تستند إلى الجدار الداخلي لأسطوانة كبيرة دوَّارة، تشعر بأنك مُثبَّتٌ إلى الجدار بسبب وجود قوة طرد مركزي شديدة (شكل ١-٤أ). وقد تُغير هذه القوة إدراكك للاتجاه نحو الأسفل وتخلق لدَيك شعورًا وهميًّا بأنك تَميل إلى الخلف. فإذا كانت القوة كبيرة بدرجة كافية، فإنَّ المسافة بينك وبين الأرضية تتباعَد في حين أنك تبقى مُثبتًا في مكانك بفعل قوَّة الاحتكاك بينك وبين الجدار. وعلى الرغم من أن فكرة وجود قوة خارجية هي فكرة مُقنعة للغاية في تلك الحالة، فإن القوة التي تُثبتك إلى الجدار هي قوة داخلية؛ إذ إن الجدار يدفعك ناحية مركز الأسطوانة كي تُواصِل الدوران. ونظرًا لأنك لا تَنحدِر إلى أسفل الجدار، لا بدَّ أن تكون قوى الاحتكاك متَّجهة إلى أعلى ومُساوية لوزنك.

لعبة دولاب الهواء ودوَّامة الخَيل والأرجوحة الدوَّارة: تُقدِّم هذه الألعاب إحساسًا أخفَّ بقوة الطرد المركزي. فعندما تَرتفع عربتُك في لعبة دولاب الهواء لتصِل إلى أعلى نقطة بالدائرة، تَشعُر وكأنَّ قوة الطرد ترفعك. وعند أدنى نقطة بالدائرة، تَشعُر وكأنك مثبَّت في المقعد. وفي لعبة دوَّامة الخيل، يبدو أن قوة الطرد المركزي تدفعُك إلى الخارج



شكل ١-٤: بند ١-١٩: القوى اللازمة في (أ) لعبة البرميل الدوار، و(ب) لعبة دوامة الخيل.

(شكل ١-٤ب)، ولا سيما إذا كنت تركب خيلًا خارجيًّا يتحرَّك حول الدائرة على نحوٍ أسرع مِن الخيول الموجودة على مقربة من مركز الدائرة. وعندما تركب أرجوحة تدور حول مِحوَر مركزي، تتحرَّك السلاسل عموديًّا كما لو أنَّ قوة الطرد المركزي تدفعك إلى الخارج. وفي كلِّ لعبة من هذه الألعاب الثلاث، لا تُوجَد حقًّا قوة طرد مركزي؛ وإنما تُوجَد قوة جذب مركزي (من مقعد لعبة دولاب الهواء وخيل لعبة دوامة الخيل وسلاسل الأرجوحة الدوارة)، وتلك القوة هو ما يَجعلك تدور.

لعبة أخطبوط الملاهي: في هذه اللعبة أنت تجلس في مقصورة موجودة على طرف أحد أذرُع الأخطبوط وتدور حول الطرف الخارجي لِذراعٍ أُخرى، أكثر محورية. إذا كانت الأذرُع تدور حول مَحاورها في الاتجاه نفسه، فإنك تَشعر بأعظم قدْرٍ من قوى الطرد

المركزي وتسير بأكبر سرعة حين تمرُّ بأبعد نقطة عن مركز جسم اللعبة. وعندما تكون اتجاهات الدوَران مُتعاكسة، تكون سرعتك في أقلِّ مستوًى لها عند أقصى نقطة (بسبب الدوران المتعاكس)، إلا أن القوة الواقعة عليك تتفاوَت بأقصى سرعة لها لأنك تتحرَّك سريعًا عبْر مسارٍ مُنحنٍ بشدَّة.

ألعاب السقوط الرأسي: في هذه الألعاب أنت تَجلس في مقصورة على ارتفاع ٤٠ مترًا تقريبًا، ثم تتحرَّر هذه المقصورة على نحوٍ مفاجئ وتهبط في وضعية السقوط الحُر. وعلى أثر ذلك، يُراودك شعور بانعدام الوزن لأنك تسقط أنت والمقعد من أسفلك بنفس المعدَّل تقريبًا؛ ومِن ثَمَّ لم تَعُد تشعُر بوجود المقعد كمصدر داعم لك. ويرى بعضُ الراكبين أن هذا الإحساس مُمتِع.

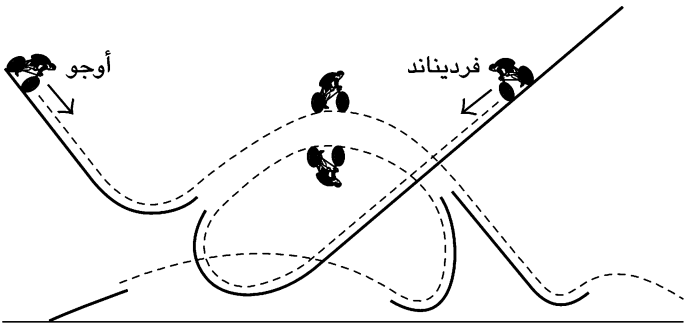
وقد ينتج صداع الأفعوانية من أيِّ لعبة في مدينة الملاهي يكون فيها مُعدَّل التسارُع مرتفعًا ويحدُث فيها تغيُّر سريع في الاتجاه. إنَّ مُعدَّل التسارُع المرتفع يُعرِّض المخ لضغط، وأي تغيير مفاجئ في الاتجاه قد يتسبَّب في ارتجاج الدِّماغ داخل الجمجمة، مما يتسبَّب في تمزق الأوردة التي تربط بين المخ والجمجمة.

قصة قصيرة

(٢٠) فقرة السير داخل الحلقات بالسيرك

ربما تَزخر مُدن الملاهي الحديثة بالمتعة والإثارة، إلَّا أن بريقها يتضاءَل مقارنة ببعض الفقرات البهلوانية المُقدَّمة في السيرك، والتي تَشتمِل على فقرة الدرَّاجات الهوائية التي عُرضت في الفترة بين عامي ١٩٠٠ و١٩١٢. ونظرًا لأنَّ كلَّ سيرك كان يُحاول التفوُّق على غيره، ابتُكرت فقرات جريئة وتمَّ تأدِيتُها، وبعضها عُرض أكثر من مرة إذا ما نجا المؤدُّون من الإصابة. وفي عام ١٩٠١، عرض سيرك آدم فوربيو آند سيلز بروس واحدة من الفقرات البهلوانية الأولى. هبط رجل اشتُهر باسم «ستار» (النجم) بدراجة هوائية من ارتفاع ١٨ مترًا على طول مُنحدَر مائل بزاوية ٥٢ درجة. قد لا يبدو هذا صعبًا للغاية؛ إلَّا أن المُنحدَر كان يتكوَّن من ثلاثة أجزاء عبارة عن سلالم قابلة للتمدُّد، مما يعني أن ركوب الدراجة كان صعبًا للغاية، لا سيما بالقُرب من الجزء السفلي.

وفي العام التالي في صالة ماديسون سكوير جاردن بنيويورك، قدَّم سيرك فوربيو آند سيلز استعراض دافولو ومُناوَرة الدرَّاجة داخل الحلقة. ومع وجود سيارة الإسعاف



شكل ١-٥: بند ١-٢٠: فقرة الدراجة الهوائية لأوجو وفرديناند.

بالجوار، بدأ دافيلو يقود دراجته نزولًا على منحدَر يبدأ من عند مصابيح السقف المُتوهِّجة ثم مرَّ عبر (داخل) حلقة عمودية بقُطر يبلغ ١١ مترًا ثم إلى داخل شِبَّاك لكي يتوقَّف عن الحركة. وفي عام ١٩٠٤، قدَّم نفس السيرك عرض «بورسوث العظيم» في استعراض آخر بالدرَّاجة الهوائية. كان المُنحدَر مُشابهًا، ولكن أعلى نقطة على الحلقة كانت أبعد مسافة، ممَّا تطلَّب من بورسوث أن يطير مسافة ١٥ مترًا عبْر الهواء، وهو مقلوب، كي يصِل إلى الجزء الثاني من الحلقة.

ولعلَّ أخطر فقرة بهلوانية بالدراجات الهوائية نُفِّذَت عام ١٩٠٥ عندما قدَّم سيرك بارنوم وبيلي فقراته على مسرح بصالة ماديسون سكوير جاردن. بدأ العرض بنزول أوجو أنشيلوتي بدراجة هوائية من أعلى أحد المُنحدَرات وعلى نحوٍ مُماثل نزل أخوه فرديناند من مُنحدر ثانٍ مُواجهٍ له أعلى قليلًا (شكل ١-٥). وعند إعطاء الإشارة، شرع الأخَوان في الهبوط. وعند الوصول إلى أدنى طرفٍ شديد الانحناء لهذا المنحدر، قُذِفَ أوجو لمسافة ١٤ مترًا ليصِل إلى المنحدر الآخر، ثم كرَّر العرض عبْر فجوة ثانية مقدارها ٩ أمتار. في الوقت ذاته، وصل فرديناند إلى مسار مُنحنٍ عند الجزء السفلي من المنحدر؛ بحيث حلَّق رأسًا على عقب ليصِل إلى المنحدر الآخر. جاء الجانب الأكثر إثارة من العرض حين حلَّق فرديناند عاليًا رأسًا على عقب وأسفله بمسافة بضع أقدام كان يُوجَد أوجو، الذي تخطَّى أول فجوة له. كان عنصر الخطر في العرض حقيقيًّا تمامًا؛ وحين حاول فرديناند إعادة

الفقرة مرة أخرى في العرض المسائي، سقط سقوطًا شديدًا أثناء اجتياز «الفجوة»، وأُلغي العرض على إثر ذلك فيما يبدو.

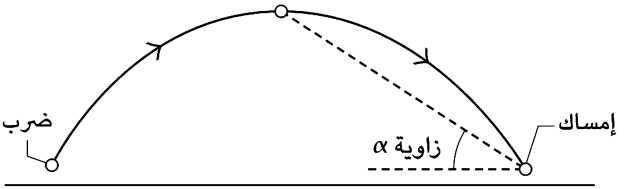
شرعت الأسرِكة تستعين بالسيارات كبديل. وجزء من السبَّب يعود إلى حداثة السيارات في ذلك الوقت. يقود راكب واحد أو راكبان سيارة على مُنحدَر ويَنقلبان في الهواء مرة أو مرتَين قبل الوصول إلى المنحدَر الثاني. ورغم ذلك، خبا وهَجُ هذا النوع من الفقرات البهلوانية في السيرك بعد عام ١٩١٢، على الأرجح بسبب أنَّ الجمهور اعتاد على عنصر الخُطورة المُتضمَّن في هذه العروض. ولم يَلفِت انتباه الفيزيائيِّين عروض خطيرة أخرى إلَّا في عصر أكثر حداثة حين صعد وهبط إيفل كنيفيل وابنه روبي كنيفيل، ومؤدُّون آخرون للفقرة، بدرَّاجات بُخارية على مُنحدَر وحلَّقوا فوق السيارات والشاحنات.

(٢١) الإمساك بكرة بيسبول طائرة

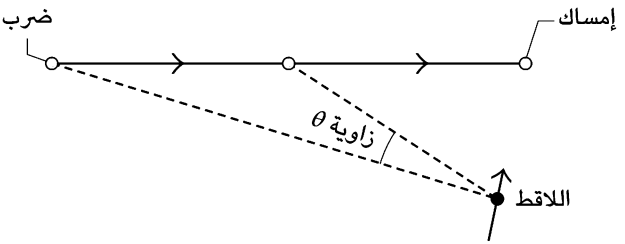
عندما تُضرَب كرة بيسبول عالية نحوَ الملعب المفتوح، كيف يُحدِّد اللاعب لاقط الكرة الموجود هناك الموقعَ الذي عليه الاتجاه إليه للإمساك بها؟ قد يَركُض اللاقِط إلى النقطة الصحيحة وينتظر الكُرة هناك، أو قد يركض بمعدَّل محسوب ويَصل إلى النقطة الصحيحة في نفس توقيت وصول الكرة. في كلتا الحالتَين، تسهل خبرة اللاقِط عليه الأمر بالتأكيد، ولكن هل تُوجَد إشارات خفيَّة في حركة الكرة يمكنها أن تُرشِده؟

يَحكي روبرت وينستوك — أستاذ الفيزياء بكلية أوبرلين — كيف أنَّ بيب رُوث، باعتباره مثالًا على مهارة لاقِط الكرة، أمسك ذات مرة بكُرة ألقاها جيمي فوكس لاعب فيلادلفيا أثليتيكس. كان روث ينتظر في قلب الجهة اليسرى من الملعب، مُتوقِّعًا كرة طويلة من طرف فوكس، ولكن فوكس ضرب الكرة بزاوية مائلة فطارت عاليًا لمسافة قصيرة. وما إن وصل صوت ضربة الكرة إلى مسامع روث حتى ركض إلى النقطة الصحيحة وانتظر هناك ثم التقطَها بقُفازه.

الجواب: على الرغم من أنَّ اللاقِط يستعين بإشارات عديدة ليُمسك بالكرة الطائرة، يبدو أنَّ هناك زاويتَين مُهمَّتَين في هذا الصدد؛ الأولى هي الزاوية الرأسية (α) التي تتحرَّك خلالها الكرة في مجال رؤية اللاعب أثناء حركتها في ملعب البيسبول (شكل ١-٦أ). فإذا كان اللاعب موجودًا بالفعل عند النقطة الصحيحة للإمساك بالكرة، فهذه الزاوية تزيد ولكن بمُعدَّل مُتناقِص (في البداية تزيد بسرعة، ثم تزداد بوتيرة أقل). وإذا كان اللاعب قريبًا للغاية (ويجِب عليه أن يتراجع)، تزداد الزاوية الرأسية في البداية ثم تبدأ في التناقُص. وإذا



(أ)



(ب)

شكل ١-٦: بند ١-٢١: (أ) منظر جانبي لمسار الكرة الطائرة. (ب) منظر عمودي للمسار.

كان اللاعب بعيدًا للغاية (ويجِب عليه أن يتقدَّم إلى الأمام)، تزداد الزاوية الرأسية في البداية ثم تبدأ في التناقُص. ويعرف اللاعب من واقع خبرته أنه يجِب عليه أن يتحرَّك حتى تزداد الزاوية الرأسية بمعدَّل مُتناقص مناسب في مرحلة لاحقة من رحلة الكرة نحو السقوط.

ويظهر تأثير الزاوية الثانية المهمة عند ضرب الكرة على يسار اللاعب أو يمينه. فبينما تتَّجِه الكرة إلى خارج الملعب، تتحرك أفقيًّا بزاوية θ داخل مجال رؤية اللاعب (شكل ١-٦ب). ويركض اللاعب بحيث تزيد هذه الزاوية بمُعدَّل ثابت. وهذا يُتيح له أن يركض نحو نقطة الإمساك الصحيحة بمعدل ثابت إلى حدٍّ ما بدلًا من الركض بسرعة بالغة على آخر ثانية. وتتطلَّب إجادة هذا الأمر تدريبًا ولكن يجِب أن يأتي هذا بشكلٍ طبيعي لأنَّ الكلاب، التي تُمسك بالصحن الطائر بفمها، تستخدم نفس الإجراء (كما تُبيِّن كاميرات الفيديو المعلَّقة بها).

قصة قصيرة

(٢٢) إلقاء الكرة من مسافة عالية

في أغسطس عام ١٩٣٨، عزم فرانكي بيتلاك وهانك هيلف — لاقطا الكرة بفريق كليفلاند إنديانز للبيسبول — على تسجيل رقم قياسي عالَمي للإمساك بكرات مقذوفة من أعلى مسافة مُمكنة. وبينما كانا ينتظران أسفل ناطحة سحاب ترمينال تاور بكليفلاند، كان كين كيلتنر، لاعب القاعدة الثالثة، يستعدُّ لإلقاء الكرات من أعلى قمَّة ناطحة السحاب؛ أي من ارتفاع ٧٠٠ قدم تقريبًا (أو ٢١٣ مترًا). سجَّل الرقم القياسي السابق من ارتفاع ٥٥٥ قدمًا لاعبان من فريق آخر عام ١٩٠٨، واللذان أمسكا بكرات البيسبول المُلقاة من أعلى نصب واشنطن التذكاري بواشنطن العاصمة.

لم يكن متاحًا لكيلتنر أن يشاهد اللاعبَين الآخرَين وهما واقفان في الشارع؛ ومِن ثم ألقى بالكرات على نحوٍ عشوائي. كان بيتلاك وهيلف يرتديان خوذتَين فولاذيتَين ليَحميا رأسيهما من الإصابة بالكرات التي وصلتْ سرعاتها التقديرية إلى ١٤٠ ميلًا تقريبًا في الساعة (أو ٢٢٥ كيلومترًا في الساعة). أمسك هيلف بالكرة الأولى، مُعلنًا سهولة الإمساك بها بابتسامة عريضة منه، ولكن الكرات الخمسة التالية أفلتَتْ من قبضة بيتلاك. عَلقت إحداها بالطابق الثالث عشر وأمسك بها رقيب بالشرطة بعد ارتدادِها ثلاث مرات. وفي المحاوَلة السادسة، استطاع بيتلاك أن يُمسك بالكرة ويسجِّل الرقم القياسي المشترك.

وفي العام التالي، حاول جو سبرينز من نادي سان فرانسيسكو للبيسبول أن يُمسك بكرة مُلقاة من ارتفاع ٨٠٠ قدم من منطاد. (تزعم بعض التقارير أن السقوط كان من ارتفاع أعلى من ذلك بكثير.) وفي محاولته الخامسة، أمسك الكرة بقفَّازه، ولكن تأثير الإمساك بالكرة جعل يدَه وقفازه والكرة تصطدم بوجهه مما تَسبَّب في تهشُّم فكِّه العلوي في ١٢ موضعًا وكسر خمسة أسنان وسقوطه مغشيًّا عليه، وسقطَت الكرة من يدِه.

وثمَّة مُحاولة أكثر إثارة أُجريَت عام ١٩١٦ للإمساك بكرة بيسبول مُلقاة من طائرة صغيرة. كان من المُفترَض أن تُلقى على ويلبرت روبنسون، مدير فريق بروكلين دودجرز ولاعب البيسبول السابق، الكرة من طائرة على ارتفاع ٤٠٠ قدم، وذلك من جانب مُدرِّب الفريق فرانك كيلي. ولكن بدون علم روبنسون، ألقى كيلي عنبًا أحمر بدلًا من الكرة. وعندما انفجرت حبَّات العنب على الفور، ابتلَّ روبنسون بلبِّ العنب الأحمر وصاح قائلًا: «لقد أُصبت! غَمرتني الدماء!»

(٢٣) ضرب كرة البيسبول

إذا كنتَ تستخدم يدَك اليُمنى، فلماذا حين تُمسِك المَضرب تكون يدُك اليمنى أعلى من يدك اليسرى، وتُولِّي الرامي جانبك الأيسر؟ كم من الوقت تستغرق كرة البيسبول كي تصل إلى قاعدة الضارب؟ كم متاح لك من الوقت لتنفيذ الضربة؟ وما مقدار الخطأ الذي يُمكن أن يحدُث ومع ذلك تنجح في ضرب الكرة؟

يفضل اللاعبون الذين يُحبُّون ضرب الكرة حتى خارج حدود المَلعب أن يستخدموا مضارب ثقيلة، ويَزعُمون أن الوزن الإضافي في عملية الاصطدام يؤدِّي إلى ضرب الكرة لمسافة أبعد. يَختار لاعبون آخرون مضارب خفيفة الوزن أو مُتوسِّطة الوزن للسبب عينه. (أحيانًا، حين يُستخدَم مضرب خشبي، يركِّب اللاعب بصورة غير قانونية قلبًا من الفلِّين كي يُخفِّف الوزن.) مَن المُحقُّ في ذلك الجدال حول الوزن؟ أينبغي على اللاعب الإحماء باستخدام مضرب قياسي مُثبَت على طرفه الخارجي حلقة من الرصاص، أم باستخدام مضرب أخف كثيرًا أو أثقل كثيرًا من المضرب الذي سيُستخدَم في المباراة؟

أي موضع من المضرب يجِب أن تصطدم به الكرة كي تكتسب أكبر قدْرٍ من السرعة؟ لماذا يتسبَّب المضرب أحيانًا في لسْع يدَيك ويُحاول الإفلات من قبضتك عند ارتطامه بالكرة؟

كان الرامُون يَخشون كثيرًا قوة الضارب الأسطوري بيب روث لدرجة أنهم أحيانًا كانوا يتعمَّدون رمْيَ كرات بطيئة بدلًا من السريعة؛ إذ كانوا يَظنُّون أنه لو ارتطمت الكرة بالمضرب ببطء، فسترتدُّ عنه ببطء؛ ومِن ثَمَّ لن تُقذَف لمسافة بعيدة. هل كان تَفكيرهم سليمًا؟

الجواب: إذا كنت شخصًا يستخدم يده اليمنى، فأنت في المُعتاد تستخدمها في أداء المهام التي تَستلزِم منك التحكُّم، كالكتابة مثلًا. تُعدُّ أرجحة المضرب أحد هذه المهام؛ لأنك كي تضرب الكرة سيتعيَّن عليك أرجحة المضرب دون ارتكاب أخطاء. وحين تُؤرجِح المضرب فأنت تدفعه بيدِك وذراعك اليُمنى بينما تَجذبه بيدك وذراعك اليُسرى. يبذل جانبك الأيسر مُعظم الجهد، بينما يتولَّى جانبك الأيمن معظم عملية التوجيه. ويُمكنك توجيه المضرب على نحوٍ أفضل إذا كانت يدك اليمنى في موضع مُرتفع، ويمكنك جذب المضرب على نحوٍ أفضل إذا كانت يدُك اليسرى في موضع منخفض. في وضعية الوقوف التقليدية التي تُواجِه فيها الرامي بجانبك الأيسر، يكون بوسعك الاستدارة نحوَ الكرة المقذوفة بينما يدُكَ المتحكِّمة خلف المضرب؛ حيث يُمكنها توجيه حركة المضرب على نحوٍ أسهل.

حتى الكرة البطيئة تستغرق أقلَّ من ثانية كي تَصِل إلى قاعدة الضارب، بينما الكرة السريعة قد تستغرق زمنًا قصيرًا للغاية لا يزيد عن ٠٫٤ ثانية. (تحقَّقَ رقم قياسي لسرعة الكرة، مقداره ١٠٠٫٩ ميل في الساعة في ٢٠ أغسطس عام ١٩٧٤ على يدِ نولان رايان، وكان وقتَها يلعب في فريق كاليفورنيا إيجلز.) يُتاح لك بالفعل أقل من ٠٫٤ ثانية؛ لأن عليك أولًا أن تُقيِّم الرمية ثم تُقَدِّر ذهنيًّا مسار الكرة عند لوحة الضارب. باستطاعة اللاعبين المُحترفين أرجحة المضرب في ٠٫٢٨ ثانية تقريبًا، لكن بعض الضاربين المَهرَة يَستطيعون أرجحة المضرب في زمنٍ قليل للغاية يبلغ ٠٫٢٣ ثانية. القدرة على أرجحة المضرب بشكلٍ أسرع تَمنح اللاعب مزية دراسة مسار الكرة لوقت أطول قبل البدء في الأرجحة.

كي تَضرب الكرة خارج حدود الملعب، يجب أن يكون توجيهك للمَضرب دقيقًا في حدود بضعة أجزاء من المِلِّي من الثانية. فإذا كان المضرب منخفضًا قليلًا، فستعلو الكرة، وإذا كان مرتفعًا قليلًا، فستضرب الكرة الأرض قبل أن تَقطع مسافة بعيدة. علاوةً على ذلك، يجب أن يكون توقيت الضرب دقيقًا في حدود بضعة أجزاء من المِلِّي من الثانية. وما يزيد من صعوبة المهمة هو أن عليك القيام بكلِّ هذا من دون أن ترى الكرة وهي تقترب من المضرب، لأن جهازك البصري يعجز عن تتبُّعها خلال الجزء الأخير من مسارها. ومن قبيل العجب أن بعض اللاعبين يَنجحون باستمرار في ضرب الكرة.

أوضحت التجارب أنَّ سرعة الكرة المضروبة تتحسَّن مع زيادة وزن المضرب؛ وذلك إلى أن يتجاوَز الوزن نحو ٣٥ أو ٤٠ أوقية. والمضرب ذو الوزن المتوسط (نحو ٣٢ أوقية) أفضل من المضرب الثقيل لثلاثة أسباب على الأقل؛ سبَبان منهما معروفان بصورة بَدِيهية لمعظم اللاعبين؛ فالمضرب ذو الوزن المتوسط أسهل في الأرجحة وفي التحكُّم من المضرب الثقيل. كلا هذين العامِلين يرجعان إلى اتِّسام المضرب بـ «قصور دوَراني» أقل؛ بمعنى توزيع الكتلة نسبةً إلى المركز (أو المراكز) الذي يدور المضرب حوله في أثناء الأرجحة. السبب الثالث يتعلَّق بانتقال الطاقة خلال الاصطدام بين المضرب والكرة. بصورة عامة، يتحسَّن انتقال الطاقة عند اصطدام أي جسمَين كلَّما كان الجسمان أكثر تقاربًا من حيث الكتلة (أو الوزن)؛ ومِن ثَمَّ في حالة اصطدام المضرب والكرة، حين يكون المَضرب مُتوسِّط الوزن ينتقل قدرٌ من الطاقة من المضرب إلى الكرة أكبر ممَّا في حالة المضرب الثقيل الوزن.

لماذا إذن يُفضِّل بعض الضاربين استخدام مضرب ثقيل الوزن؟ ربما يكون الاختيار مبنيًّا على الطول المُصاحِب للمضرب؛ فالمضرب الخفيف قصير، ويتطلَّب من اللاعب أن يقِف بالقُرب من قاعدة الضرب. وإذا تحركت الكرة عبْر الجزء القريب من «منطقة الضرب»،

فربما يتعيَّن على اللاعب أن يضربها بالجزء القريب من المِقبض. وكما سنُوضِّح فيما يلي، فإنَّ مثل هذا الاصطدام يُقلِّل بشدَّة من احتمالات تحقيق ضربة جيدة. ومن أجل تجنُّب هذه المشكلة، قد يختار اللاعبون مضربًا أثقل وزنًا بسبب الطول الإضافي الذي يتمتَّع به. يُمكنهم حينئذٍ الوقوف على مسافة أبعد من قاعدة الضرب؛ ومِن ثَمَّ يحدُث الاصطدام في منطقة أفضل من المضرب.

تكشف التجارب أن اللاعب سوف يُؤرجِح المضرب بسرعة «أقل» لو أنَّ اللاعِب أجرى عملية الإحماء مُستخدمًا مضربًا أثقل أو أخفَّ وزنًا، أو مضربًا مُثبتًا به حلقة من الرصاص على طرفه الخارجي. يبدو أن السبب هو أنه عند الإحماء باستخدام المضرب؛ فإنَّ اللاعب يُرسِّخ برنامجًا عقليًّا معينًا (كيفية استخدام العضلات) من أجل أرجحة المضرب. وإذا كان المضرب المُستخدَم في الإحماء مختلفًا بدرجة كبيرة عن ذلك المُستخدَم في اللعب، فحينها لن يكون البرنامج العقلي ملائمًا تمامًا، ولن يُؤرجَح المضرب المُستخدَم في اللعب جيدًا.

تَعتمد القوى التي تشعُر بها عند اصطدام المضرب بالكرة على موضع الاصطدام على جانب المضرب. في المعتاد يدفع الاصطدام المقبض ويُديره، لكن ليس إذا ضربت الكرة «البُقعة المثالية» المعروفة باسم «مركز الصَّدم». فإذا وقَع الاصطدام بين مركز الكتلة ومركز الصدم، يُدفَع المقبض حينَها في اتجاه الرمية. وإذا وقع خارج مركز الصدم، يَندفع المقبض نحوَ الرامي.

ثمة بُقعة مثالية أخرى مُرتبطة بالذبذبات التي يُمكن لعملية الاصطدام أن تُحدِّثها في المضرب، والذي يُمكن أن يتسبَّب في لسْع يدك. في أغلب الحالات يظهر نوعان من الذبذبات على المضرب. النوع الأبسط منهما، ويُسمَّى الذبذبات «الأساسية»، هو ذلك الذي فيه يتذبذب الطرف البعيد للمضرب بالقدر الأقصى. وعلى الأغلب لن تُلاحظ هذا التذبذُب بسبب تردُّده المُنخفض.

التذبذُب الآخر، والمُسمَّى النغمة التوافُقية الأولى، محسوس بدرجة كبيرة بل ويُمكن أن يُؤذِي يدَيك قليلًا، وفيه يتذبذَب الطرف الحرُّ للمضرب بعُنف، لكن هناك نقطة، تُسمَّى «العقدة» تكون قريبة منك بصورةٍ ما ولا يَتغيَّر موضعها مُطلقًا. هذه البقعة تُسمَّى هي الأخرى البقعة المثالية؛ لأنه لو ضربَت الكرة هذه البقعة، فإن النغمة التوافُقية الأولى لن تُنتَج؛ ومِن ثمَّ لن يكون هناك أي تَذبذُب محسوس في يديك.

يُمكنك العثور على العُقدة في مضربك عن طريق تدليتِه من بين أصابعك والنَّقر على جانبه. حين تُصيب العُقدة، ستُلاحظ عدَم وجود ذبذبات، أو وجود ذبذبات قليلة للغاية.

لكن حين تَضرب النقاط الأخرى، خاصَّة تلك القريبة من مركز المضرب، يُمكن الإحساس بالذبذبات وسماعها.

من أجل منْح الكُرة أكبر سرعة مُمكنة، عليك في العموم أن تَضربها في نقطة بين البُقعتَين المِثاليَّتَين ومركز الكُتلة، غير أن الموضع المحدَّد يعتمد على السرعة الأولية للكرة وعلى نسبة كتلة المضرب إلى كتلة الكرة. وكلما كانت الكرة أسرع أو المضرب أخف، فمن المُفترَض أن تضرب الكرة المضرب في موضع أقرب إليك.

أتصوَّر أن بيب روث كان يبتسِم ابتسامة عريضة حين كان يرى كرة بطيئة وهي تُقذَف نحوه. إن ضرب الكرة خارج الملعب يعتمد بالأساس على التحكُّم في المضرب أثناء الأرجحة، وعلى التقدير الدقيق للمَوضع الذي سيتحرَّك فيه المضرب عبْر لوحة الضارب. وكانت الكرة البطيئة تَمنح بيب روث فرصة كبيرة لضبط موضع الأرجحة وتوقيتها.

(٢٤) تمريرات قانونية في الرجبي

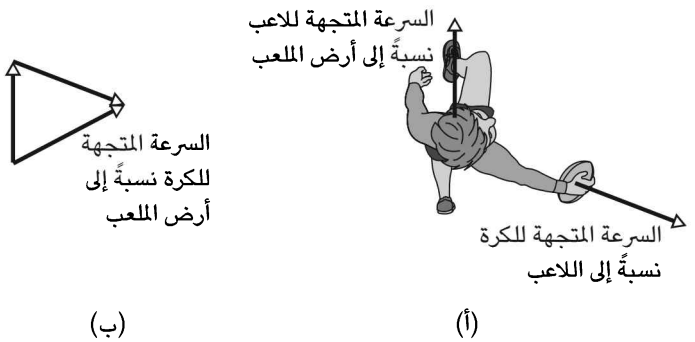
في لعبة الرجبي، يَستطيع أحد اللاعبين أن يُمرِّر الكرة بصورة قانونية إلى زميله، بشرط ألَّا تكون التمريرة إلى الأمام. فإذا كان اللاعب المُمسك بالكرة يركُض في اتجاه مرمى الخصم، ففي أيِّ اتجاهٍ مسموح له بتمرير الكرة؟ هل يُمكن أن يُلقي الكرة إلى الخلف نسبةً إليه، ومع ذلك تكون تمريرة غير قانونية إلى الأمام؟

الجواب: تتعلق المشكلة بالسرعة المُتجهة للاعب. فعندما يُلقي اللاعب الكرة إلى الخلف، قد تكون السرعة المتَّجهة للكرة في حقيقة الأمر إلى الأمام نسبةً إلى أرض الملعب. على سبيل المثال، في (شكل ١-٧أ)، السرعة المتَّجهة للكرة نسبةً إلى اللاعب موجهة إلى الخلف، لكن بمجرَّد إضافتها إلى السرعة المتَّجهة للركض، تصير موجهة إلى الأمام (شكل ١-٧ب).

إذا كان حكَم المباراة يركض بينما يُشاهد التمريرة، فسيرى زاوية السرعة المتجهة للكرة في اتِّجاهٍ مختلف تمامًا، وذلك بسبب سُرعته المُتجهة. وحدَهم المشاهدون الساكنون سيَرَون على نحوٍ صحيح ما إذا كان مسار الكرة قانونيًّا أم غير قانوني إلى الأمام.

(٢٥) التقاذُف

الرقم القياسي العالَمي الحالي لتقاذُف الحلقات هو ١١ حلقة، وفي حالة الأجسام الأخرى تكون الأرقام القياسية أقلَّ من ذلك. من الواضح أنَّ تقاذُف الأشياء يحتاج إلى تآزُر جيد



شكل ١-٧: البند ١-٢٤: تمريرة الرجبي إلى الخلف جهة اليسار ربما تبدو قانونية نسبةً إلى اللَّاعب (أ)، لكنها في الحقيقة تمريرة إلى الأمام من منظور أرض الملعب (ب).

بين العينَين واليدَين، وتدريب على إلقاء الأشياء والإمساك بها، لكن هل ثمَّة عامل آخر يَحُدُّ من عدد الأشياء التي يمكن تقاذُفها؟

الجواب: بطبيعة الحال تفرض الجاذبية حدًّا على الأمر. فإذا أردتَ أن تزيد عدد الأشياء التي تتقاذَفُها، فسيتعيَّن عليك أن تُلقيها لارتفاع أعلى حتى يُتاح مزيد من الوقت للأشياء الجديدة. ومع ذلك، دائمًا ما يكون المكسب الزمني صغيرًا. فإذا ألقَيْتَ جسمًا لارتفاع مُضاعَف مقارنةً بما سبق، فلن تجنيَ إلَّا زمنًا يُعادل نحو ٤٠ بالمائة من زمن رحلته. علاوةً على ذلك، سيتعيَّن عليك أن تُلقِيَه بسرعة أكبر بنسبة ٤٠ بالمائة، وهذا يَعني أنَّ مِن الأرجح أن تتَّسم عملية التقاذُف بالعشوائية.

(٢٦) القفز بالزَّانة

أحدثت الزانات المصنوعة من الألياف الزجاجية ثورةً في لُعبة القفز بالزانة في أوائل ستينيَّات القرن العشرين. قبل ذلك الوقت كانت الزَّانات تُصنَع من الخيزران، ثم صارت الزانات المصنوعة من الصُّلب والألمونيوم شائعة في خمسينيَّات القرن العشرين. لكن لم تَستَطِع أي مادة التفوُّق على الزانات المصنوعة من الألياف الزجاجية، وبمجرَّد أن بدأ استخدامها، ارتفع الرقم القياسي من ٤٫٨ أمتار إلى ٥٫٨ أمتار. ويقول البعض إنَّ الرقم القياسي من

المُفترَض أن يزيد عن الستة أمتار بمسافة مُعتبَرة. لماذا لعبت الزانات المصنوعة من الألياف الزجاجية مثل هذا الدور الهائل في رفع الرقم القياسي؟

الجواب: كانت الزانات المصنوعة من الصلب أكثر مُرونةً بكثير من الزانات السابقة المصنوعة من الخيزران أو الصُّلب أو الألمونيوم. وهذه المرونة منحت لاعبي القفز بالزانة مزيتَين؛ إذ صار بمقدور اللاعب أن يُحوِّل بصورة أفضل طاقة الحركة الخاصة بالركض إلى طاقة الوضع المرِنة الخاصة بالزانة وهي منثنِيَة. (الطاقة المُخزَّنة تأتي من الركض، وليس من الجهد العضلي المبذول من اللاعب في ثَني الزانة.)

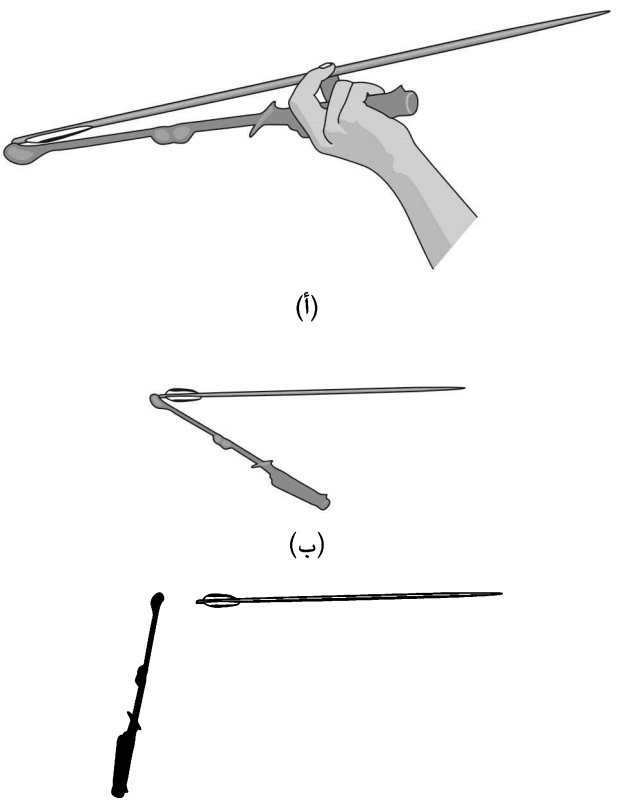
ربما يكون كل ما سبَق بديهيًّا، لكن ثمة جانب أكثر تعقيدًا يتمثَّل في أن مرونة الزانة تؤخِّر عملية تحويل طاقة الوضع المرِنة إلى طاقة الحركة الخاصَّة باللاعب الآخِذ في الصعود. وهذا التأخير يُمكِّن اللاعب من إعادة ضبط وضعية جسده بحيث إنَّ مكسب الطاقة الآتي وقتَها من الزانة الآخِذة في الاستواء يؤدِّي إلى حركة إلى الأعلى بدلًا من الحركة إلى الأمام وحسب.

ومن أجل تنفيذ قفزة جيدة، على اللاعب ألا يَركض بسرعة وحسب نحو مكان القفز كي يضمن وجود قدرٍ كبير من طاقة الحركة التي ستُستخدَم، وإنما يجِب عليه أيضًا أن يَقيس خطواته بحيث يضَع الطرف البعيد للزَّانة داخل «الصندوق» الموضوع على الأرض على النحو الصحيح. وحين تُصيب الزَّانة الصندوق، على اللاعب أن يَقفز إلى الأمام حتى يُحافظ على الحركة الأمامية ويَثني الزانة على النحو الصحيح. وبينما تَنثني الزانة، فإنها تُخزِّن بعضًا من طاقة الحركة الأولية الخاصَّة باللاعب. وخلال هذا الانثناء والاستواء اللاحِق عليه، يضمُّ اللاعب ساقَيه ويَميل إلى الوراء حتى يُدير الساقَين والجسم نحو الاتجاه العمودي. ومن أجل المساعدة في فرد الزانة بهدف الحصول مجدَّدًا على مزيدٍ من الطاقة، ومن أجل المساعدة في إعادة توجيه الجسم، يدفع اللاعب يدَه العُليا إلى الأمام بينما يجذب يدَه السُّفلى إلى الوراء. وإذا أُحسِنَ توقيت كلِّ شيء، فإن الزانة المفرودة تُعيد ضخَّ طاقتها المُخزَّنة بحيث تدفع اللاعب إلى الأعلى.

(٢٧) رامية الرِّماح ولِسان الضفدع

ابتكرت عدَّة حضارات قديمة، مثل حضارة الآزتك والقبائل في أقصى شمال أمريكا الشمالية، آلية إطلاق يَندفِع منها رُمح (أو سَهم) بواسطة عصًا خشبية تُجذَب بسرعة إلى الأمام حتى

يَنطلِق الرُّمح من العصا (شكل ١-٨). لماذا تُعطي رامية الرِّماح سرعة أكبر ممَّا لو أُلقي الرُّمح يدويًّا بكل بساطة إلى الأمام؟ كانت السرعة كبيرة بما يَكفي بحيث كان الرمح يَنطلِق لمسافة ١٠٠ متر ثم يُمزِّق درع أحد الغزاة الإسبان الذين يُقاتلون أهل حضارة الآزتك. لماذا كان يُربَط حجَر عادةً إلى آلة الإطلاق؟



شكل ١-٨: بند ١-٢٧: إطلاق رمح باستخدام رامية الرِّماح.

وأيضًا، كيف تستطيع الضفادِع أن تُخرج لِسانها بسرعة خاطفة ولمسافة مُذهِلة كي تُمسك بذبابة؟

الجواب: عند إطلاق الرُّمح بطريقة تقليدية، يتزوَّد الرمح بطاقة حركية من خلال المجهود الذي تبذُله يدُكَّ لتحريكه إلى الأمام لمسافة مُحدَّدة. وتزيد آلة الإطلاق، التي ابتكرتها الحضارات القديمة، المسافة التي يَنطلِق خلالها الرمح وتزيد كذلك الطاقة. وميزة ربط حجَر إلى آلة الإطلاق غير مفهومة. وتُشير التجارب بالتأكيد إلى أن الكُتلة المُضافة تُسفِر عن إبطاء سرعة إطلاق الرُّمح قليلًا.

ويبدو أن الضفادع تلتقط فرائسها بألسنتها باستخدام آلية مشابهة لآلة إطلاق الرماح. فعندما يرصد الضفدع فريسته، فإنه يدفع على الفور لسانه نحو الفريسة، غير أنَّ الجزء الخارجي من اللسان يظلُّ مطويًّا إلى الداخل ناحية باقي اللسان (المتيبِّس في تلك اللحظة). وما إن يقترب اللسان من الفريسة، فإن الجزء الخارجي مِن اللسان يُبسَط إلى الأمام لينقضَّ على الفريسة. هكذا، من خلال بسط الجزء الخارجي إلى الأمام، يُضيف الضفدع إلى الطاقة الحركية الخاصة بالجزء الخارجي. وهذه الطاقة الإضافية تزيد احتمالية أن تعلَق الفريسة في الجزء الخارجي من اللسان حتى وإن كانت مُستلقية على سطحٍ ما يتحرَّك (مثل ورقة الشجر) حين يصطدم اللسان بالفريسة. وبمجرَّد أن تعلَق الفريسة، يسحب الضفدع اللسان والفريسة بسرعة إلى داخل فمه.

(٢٨) المِقْلاع

يستَطيع شخص ماهر إلى حدٍّ ما في استخدام المقلاع أن يقذف حجرًا يزِن ٢٥ كيلوجرامًا بسرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة (أي حوالي ٦٠ ميلًا في الساعة) ليُصيب هدفًا على بُعد ٢٠٠ متر أو أكثر. كيف يكتسِب الحجَر سُرعة كبيرة كهذه؟ والأهم من ذلك، كيف يكتسِب مثل هذا الزخم؟ في بعض معارك الماضي، ثبت أنَّ لهذا السلاح قيمة أكبر من السهم نفسه؛ لأنه حتى إذا ارتدى جندي من الأعداء درعًا جلديًّا، فإن اصطدام الحجَر به قد يتسبَّب في إصابة داخلية مُميتة، بينما قد يرتدُّ السهم عن الهدَف وحسب. وإذا كان الجندي لا يَملك درعًا، فمن السهل أن تخترق الحجارة جسده. كان المقلاع أدقَّ من السهم في إصابة الهدف ويُمكِن أن يقطع مسافةً أطول عادةً. ولهذا السبب، كان رُماة الأحجار يجتمعون عادةً خلف رماة الأسهم، الذين تحتَّم عليهم أن يكونوا على مقربة أكثر من العدو ليَكونوا فعَّالين.

وأشهر معركة استُخدِم فيها المقلاع كانت المعركة القصيرة التي دارت بين داود وجالوت. فعلى مدار أربعين يومًا، تحدَّى جالوت — الفلستي العملاق — بني إسرائيل، ولكن لم يَجرؤ أحدٌ منهم على خوض المعركة ضدَّه حتى جاء داود. اختار داود خمسة حجارة ملساء من جدول مياه ثم سار إلى جالوت حتى صار في نطاق مِقلاعه. ظلَّ داود محافظًا على سلامته لأنَّ سيف جالوت كان لا طائل منه على هذه المسافة الفاصلة. أمسك داود بأول حجَر من جرابه ورشَقه بالمقلاع نحوَ جالوت العملاق. ارتطم الحجَر بقوة دافعة واخترق جبين العملاق.

الجواب: تُوضَع الأحجار، التي ربما تكون حقيقية أو مصنوعة من الصلصال أو المعدن، داخل جراب مرن مُثبَّت به حزامان. يُمسَك الطرفان المُتقابلان للحزامَين باليد اليُمنى إن كان المرء يستخدِم يدَه اليُمنى. يلتفُّ أحد الحزامين حول عدة أصابع، بينما يُوجَد بالآخر عقدة تستقرُّ بين إصبعَي الإبهام والسبابة.

يُشَدُّ الحزامان باليد اليسرى ويُرفَع المقلاع كلُّه فوق رأس الشخص. بعد ذلك تترك اليد اليُسرى الحزامَين وتضغط اليد اليُمنى على الحجَر من خلال جذب الجراب نحو الجزء الخلفي، ثم لأسفل ونحو الجزء الأمامي. هذه الحركة تُنفَّذ عمومًا بالمِعصم بدلًا من أن تُنفَّذ بالذراع بأكملها. ثم يُلَفُّ الحجَر في دائرة عمودية لثلاث أو أربع مرَّات لتتراكم طاقتُه الحركية. وحين يصل الحجر إلى قاع الدائرة الأخيرة، ينفكُّ الحزام المعقود، مُطلِقًا الحجَر الذي يطير بدَوره نحوَ الهدف.

الميزة في هذا السلاح هو أنَّ الجهد يُمكن أن يُبذَل لإلقاء الحجَر لمسافةٍ أطول ووقتٍ أكبر ممَّا لو أُلقي الحجَر إلى الأمام باليد مثلما تُلقى كرة البيسبول. ويلعب نصف قُطر الدائرة دورًا لأنه كلما زاد نصف القُطر، كانت سرعة انطلاق الحجَر أكبر وكذلك مداه. في العصور الماضية، كان بعض الجنود يحملون معهم عدة مقاليع ذات أحزمة بأطوال مختلفة ليرشقوا الحجارة في نطاقات مختلفة.

(٢٩) الفئوس

ربما يكون الشخص الماهر في إلقاء فأس التوماهوك بحيث يَنغرس النَّصل الحاد للفأس في الهدف، هو مجرَّد شخص مُتمرِّس في ذلك، ولكن هل تُوجَد أيُّ قاعدة عِلمية لهذه المهارة؟ وإذا عرفت تلك القاعدة، هل ستكون قادرًا على إصابة الهدَف من المُحاولة الأولى؟

الجواب: لكي تُصيب هدفًا بفأس التوماهوك، فإنك تُمسك بمقبض الفأس بشكلٍ متعامد مع ساعدك، وتسحب ذراعك فوق رأسك، ثم تدير ساعدك وفأسَك إلى الأمام حول مرفقك، مُحرِّرًا الفأس بحيث تُصبح سرعتها المتَّجهة أفقية وأمامية. هكذا، يدور النصل حول مركز كتلته (الموجودة في رأس الفأس الثقيل) في أثناء طيرانه في الهواء.

وما لم تكن مُتمرسًا في إلقاء الفأس، فعلى الأرجح سيكون للفأس سرعة انطلاق مختلفة ومُعدَّلُ دوران مختلفٌ في كلِّ مرة تضربه. وهذا يعني فيما يبدو أن إصابة هدفٍ ما على بُعد مسافة مُعيَّنة سيتطلَّب ضربة حظ. ورغم ذلك، تُوجَد سِمة غريبة في عملية إلقاء الفأس ألا وهي أنَّ النسبة بين سرعة الإطلاق ومعدَّل الدوران مُستقلة عن مدى سرعتك في تحريك ساعدك إلى الأمام. وهذا الاستقلال يعني أنه بصرف النظر عن كيفية إطلاقك للفأس، فإنها ستدور وتكون في اتجاه إصابة الهدف بالنصل على بُعد مسافات محدَّدة منك. ولذا، من أجل إصابة هدفٍ ما، كلُّ ما عليك فعله هو أن تقف على واحدة من تلك المسافات المحدَّدة (التي ستُحدِّدها من خلال الملاحظة أو من خلال عملية حسابية) وتُلقي الفأس. وقد تنجح على الأرجح من المحاولة الأولى.

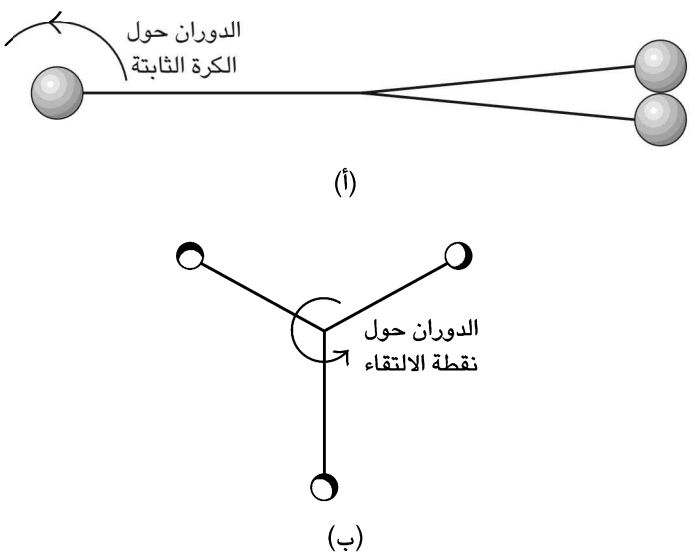
وبالطبع، حين كانت فئوس التوماهوك تُستخدم كأسلحة في الأيام الأولى من تاريخ الولايات المتحدة، لم يكن في مقدور المحارب أن يضبط مسافته الفاصلة عن هدفٍ ما قبل أن يُلقي فأسه. وبدلًا من ذلك، كان المُحارب يضبط سريعًا المسافة الفاصلة بين يده ورأس سلاحه. وهذه المسافة الفاصلة بين يد الرَّامِي ورأسه تُحدِّد قيمة المسافة بين الفأس والهدف الذي ستُصَوَّب باتِّجاهه. ولكي تقوم بهذا التعديل لأي مسافة فاصلة بينك وبين هدَفٍ ما في وضع قتال، لا بدَّ أن يكون مقبض الفأس طويلًا، وبالطبع كانت الفئوس الأولى تُصنَع بمقابض طويلة.

(٣٠) سلاح البولا

يتكوَّن سلاح البولا من ثلاث كُرات ثقيلة مُتَّصلة عند نقطة التقاء بسلاسل متينة ذات أطوال مُتماثلة (شكل ١-٩أ). ولإطلاق هذا السلاح، الذي استخدمه السكان الأصليُّون لأمريكا الشمالية فيما مضى، تَرفع بيدك كُرة من الكُرات الثلاثة فوق رأسك، ثم تُدير تلك اليد حول رسغها لكي تدور الكُرتان الأُخرَيان في مسارٍ أفقي بالقُرب من اليد. وبمجرَّد أن تتحكَّم في الدوران بالقدر الكافي، تلقي السلاح كي تصيب هدفًا ما. وفي أثناء رحلة انطلاق

السلاح، يَزداد معدَّل دَوَرانه، وحين يصِل إلى الهدف، تلتفُّ السلسلة حوله حتى تصطدِم الكُرات به. لماذا يَزداد معدَّل دوران الكُرات أثناء الانطلاق؟

الجواب: لنفترِض أن «ط» هو طول السلسلة الواصلة بين أيِّ كرة من الكرات الثلاث ونقطة الالتقاء التي تَربط الكُرات جميعًا. بينما تُدير سلاح البولا بيدِك مُمسكًا بإحدى الكرات. تدور الكُرتان الأخريان في مدار (معًا) حول الكرة الثابتة على مسافة «٢ط». ولكن بمجرَّد أن تُطلق السلاح ويَطير بحرية عبْر الهواء، يتغيَّر هذا الترتيب الخاص بدوَران الكُرتَين حول الكرة الثالثة، وسرعان ما يَدور السلاح حول نقطة التقاء السلاسل الثلاث، على مسافة «ط» وتترتب الكرات الثلاث على نحو مُتناسق حول نقطة الالتقاء تلك (شكل ١-٩ب)، وهذا التغيير في الترتيب يُقلِّل من توزيع كتلة سلاح البولا. ونظرًا لأنَّ سلاح البولا يطير في الهواء بحُريَّة، فإنه لا يمكن تغيير زخمه الزاوي. هكذا، ومع تناقُص توزيع الكتلة، لا بدَّ أن يتزايد معدَّل الدَّوَران. الموقف أشبَهُ بمُتزلِّج الجليد الذي يدور حول نفسه وهو ثابت في مكانه ويضمُّ ذراعَيه ليُقلِّل توزيع الكتلة؛ ومِن ثمَّ يزيد معدَّل الدوَران.



شكل ١-٩: بند ١-٣٠: سلاح البولا عند (أ) إطلاقه و(ب) عند طيرانه في الهواء.

(٣١) مُعدَّات الحِصار

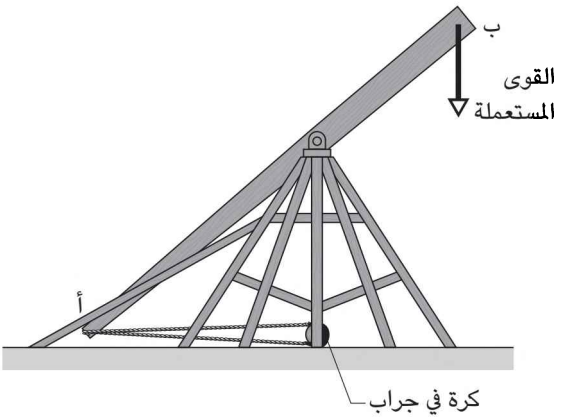
لنَفترِض أنك تَفرِض حصارًا على قلعة شديدة التحصين في أحد القرون الوسطى. أنت لا تُريد أن تَقترِب كثيرًا من القلعة لأنَّ رُماة الأسهم مُتربِّصون فوق جدران الحصن. كيف يُمكنك شنُّ هجوم على الجدران من مسافة بعيدة؟

الجواب: يُوجَد نوعان رئيسيَّان لمُعدَّات الحصار كانا يُستخدَمان لشنِّ هجوم على الجدران المُحصَّنة؛ ألا وهما: المنجنيق والمِقذاف. والمنجنيق عبارة عن قَوس يُطلِق سهمًا أو صخرة (ربما تزن ٢٥ كيلوجرامًا). كانت الآلة أكبر كثيرًا من قَوس السهم، فربما كان طول السهم يَصِل إلى مترَين، وكان وتَر القوس يُسحَب إلى الوراء ليتسنَّى له تخزين قدْرٍ كبير من الطاقة، ثم تَنتقِل هذه الطاقة إلى السهم في أثناء انطلاقه. ورغم ذلك، لا تُحدِث الأسهم أضرارًا كبيرة بالجدار الصخري؛ لأن طاقة السهم وقوَّته الدافعة ليستا كبيرتَين.

كان المِقذاف مُدمِّرًا أكثر من ذلك بكثير، وبعض الطرازات كان يُمكنها أن تقذف صخورًا تزن ١٣٠٠ كيلوجرام، وكان يُمكنها أيضًا أن تقذف الأحصنة النافِقة أو حتَّى الجُثَث البشرية. وكانت الأخيرة تُستخدَم عندما يفترس الموت الأَسْوَد الجيش المُهاجِم ويرغَب في إرسال المرَض إلى الحصن ليَنقل المرض إلى المُدافعين. وفي المواقف الهزلية أكثر، تُستخدَم المقاذيف الحديثة لقذف آلات البيانو بل والسيَّارات الصغيرة.

ويوضِّح شكل ١-١٠ التصميم الأساسي للمِقذاف. حيث تُربَط القذيفة الموجودة في الكيس بطرَف عارضةٍ خشبية طويلة، الطرف «أ». وفجأة تضغط قوة كبيرة لأسفل على الطرف «ب» بحيث تدور العارضة الخشبية حول مِحوَر ويَرتفع الكيس بسُرعة إلى أعلى ثم يطير من فوق الآلة. وما إن يمرُّ الكيس والقذيفة مِن فوق الآلة، تَنفلِت العقدة التي تربط الكيس بالعارضة من خطَّاف، ثم تَطير القذيفة عبْر الهواء. هكذا، تأتي الطاقة التي تَكتسبها القذيفة من القوَّة المبذولة على الطرف «ب».

ويُمكِن بذْل تلك القوة من خلال الجذب المُنسَّق إلى أسفل على أيدي عدة رجال. ورغم ذلك، كان يُستعان في المقذاف — الذي قد تُقذَف به أجسام كبيرة لمسافاتٍ بعيدة — بثقلٍ مُضادٍّ ثقيل عند الطرف المقابل؛ عندئذٍ كانت القوة المَبذولة هي قوة الجاذبية التي تُؤثِّر على الثقل المُضاد. يرفع الرجال الثقل المُضاد تدريجيًّا باستخدام سقَّاطة، ثم يُترَك الثقل المُضاد ليسقط بحيث يُمكن للرجال أن ينقلوا قدرًا من طاقة الجذب الكامنة إلى الطاقة الحركية الخاصَّة بالقذيفة. وتكون الطاقة الحركية والقوة الدافعة الخاصة بالقذيفة كبيرتين للغاية، أما إذا كانت القذيفة صخرةً، فيُمكنها أن تُحدِث صدعًا في جدار الحصن. وبمجرَّد أن صار



شكل ١-١٠: بند ١-٣١: المقذاف.

استخدام المقذاف واسع الانتشار، أُعيد تصميم جدران القلاع لكي يُمكنها الصمود أمام القذيفة على نحوٍ أفضل. على سبيل المِثال، صُمِّمت بعض الجدران لتكون مائلةً بدلًا من أن تكون رأسية بحيث تتدحرَج القذيفة عبْر الحائط بقدرٍ ما بدلًا من اختراقه مُباشرة.

(٣٢) المدفع البشري

بدأت الفقرة الاستعراضية بالسيرك، والتي يُقذَف فيها شخص في الهواء عبْر مدفع أو آلة غريبة، في أوائل سبعينيَّات القرن التاسع عشر حين قُذِفَ شخص لمسافة قصيرة والتقطَه أحد المساعدين وهو يقِف على أرجوحة. وحين قدَّم الأخَوان زاكيني الفقرة الاستعراضية عام ١٩٢٢، قرَّروا أن يُقدِّموا حركات أكثر جرأةً بأن يطير المؤدِّي عبْر الهواء ويسقط على شبكة. استندت المدافع الأولى على زنبركات لرفع مؤدِّي الاستعراض لأعلى، ولكن بحلول عام ١٩٢٧ تمَّت الاستعانة بالهواء المضغوط.

وفي سَعيِهم لزيادة عنصر الإثارة في الفقرة الاستعراضية، شرع الأخَوان في أداء الاستعراض الطائر من خلال دواليب الهواء. بدآ بتقديم الاستعراض باستخدام دولاب

هواء واحد، ولكن بحلول عام ١٩٣٩ أو عام ١٩٤٠ بلَغا أقصى حدٍّ للسلامة البالغة حين حلَّق إيمانويل زاكيني فوق ثلاثة دواليب هوائية وعبر مسافةٍ أفقية بلغت ٧٠ مترًا.

وفقرة المدفع البشري هي على الأرجح واحدة من أكثر الفقرات المُثيرة التي تُبيِّن آلية حركة القذائف، نظرًا لأنها تتضمَّن بوضوح احتمالية أن يقع مُؤدِّي الاستعراض بعيدًا عن شبكة الأمام. هل تنطوي هذه الفقرة على المزيد من المخاطر الدقيقة؟

الجواب: كي يستعدَّ مُؤدِّي الاستعراض للانطلاق، فإنه يضَع ساقيه داخل «سروال معدني» على مكبسٍ داخل البرميل الخاص بالمدفعية. يتمُّ ضبط مقاس السروال ليكون قريبًا من شكل الساقين وهو مطلوب لتقديم الدَّعم عند دفع المكبس إلى أعلى فجأة. تمثَّلت الخطورة الدقيقة في تلك الدفعة؛ لأنَّ السرعة المطلوبة لأداء حركة طويلة كانت شديدة جدًّا لدرجة أن مُؤدِّي الاستعراض قد يفقد الوعي للحظة. وتَمثَّل جزء من تدريب مؤدي الاستعراض في استعادة الوَعي في أثناء الدفعة بحيث يُمكنه أداء لفَّةٍ محكمة والنزول على شبكة الأمان. فإذا كان النزول غير مُحكَم، فقد يتسبَّب الاصطدام والارتداد على الشبكة بكل سهولة في كسْر أطراف المُؤدِّي أو رقبَتِه. وزعم الأخَوان أن سرعة الفوَّهة التي يَنطلِق منها مُؤدي الاستعراض كانت تصِل إلى ٦٠٠ كيلومتر في الساعة، لكن الأقرب إلى التصديق هو أن السرعة كانت أقل من ١٦٠ كيلومترًا في الساعة.

وتمثَّلت مُخاطرة دقيقة أخرى في مقاومة الهواء التي يُواجِهُها مُؤدِّي الاستعراض. فحجم مقاومة الهواء يعتمِد على اتجاه الجسم في أثناء طيَرانه عبْر الهواء؛ حيث تكون المقاومة أقلَّ إذا كان الجسم مُوجَّهًا نحوَ اتجاه الانطلاق، وتكون أكبر إذا كان الجسم مُوجَّهًا على نحوٍ عَمودي على ذلك الاتجاه (وهو ما قد يحدُث أثناء الهبوط). ومقاومة الهواء الأقل تزيد مسافة الانطلاق، والمقاومة الأكبر تُقلِّلها. ونظرًا لأنَّ اتجاه جسم المُؤدِّي يتفاوَت من انطلاقةٍ إلى أخرى، ينبغي على المرء أن يحسب (أو يُخمِّن) تقريبًا المدى الذي قد يقطعه مؤدِّي الاستعراض ثم يزيد من حجم الشبكة بما يكفي لتغطية التفاوتات المُحتمَلة بسبب مقاومة الهواء.

(٣٣) تصويبات كرة السلَّة

تَعتمِد لعبة كرة السلة، بطبيعة الحال، على كلٍّ من المهارة والحظ. هل تُوجَد طريقة مُثلى لرمي الكرة على نحوٍ يَزيد من احتمالية تسجيل نقاط؟ على سبيل المثال، هل من الأفضل

أن تُلقي الكرة في رميَةٍ عالية مقوَّسة أم تُلقيها عبْر مسارٍ مُستَوٍ أكثر؟ متى تكون حركة استدارة الكرة مُفيدة ومتى تكون غير مُستحبَّة؟

في «الرمية الحرة» (حيث يتسنَّى للاعب أن يُصوِّب الكرة على السلَّة من مسافة ٤٫٣ أمتار دون أن يَعترض طريقه أحد من الفريق الخصم)، قد يستعين اللاعب بتقنية «التصويبة الفوقية»، التي تُدفَع فيها الكرة فوق الرأس، من ارتفاع الكتِف تقريبًا ثم تُلقى من هذا الموضع. بدلًا من ذلك، قد يستعين اللاعب بتقنية «التصويبة التحتيَّة»، التي تُرفع فيها الكرة إلى مستوى خطِّ الخصر ثم تُلقى من هذا الموضع. التقنية الأولى هي الاختيار السائد بين أغلب اللاعبين المُحترفين، ولكن اللاعب الأسطوري ريك باري حطَّم الرقم القياسي في الرميات الحُرَّة باستخدام تقنية التصويبة التحتية. هل تُتيح تقنية واحدة فرصةً أفضل في تصويب الكرة؟

الجواب: من أي موقع داخل الملعب، تُوجَد مجموعة كبيرة من الزوايا التي يُمكنك من عندها أن ترمي الكرة داخل السلة، بشرط أن تَمنح الكرة السرعة المناسبة. ورغم ذلك، حقيقة أنَّ قُطْر الكرة أصغر من قُطر السلة تُتيح هامشًا معينًا للخطأ فيما يتعلَّق بسُرعة الرمية. فإذا وقع اختيارك على التسديد من زاوية منخفضة، يكون هامش الخطأ ضئيلًا ويجِب أن تكون دقيقًا للغاية. ويجِب عليك أيضًا أن تمنح الكرة سرعة كبيرة، الأمر الذي يتطلَّب منك المزيد من القوة وهو ما يتعارَض مع عنصر الدقة. أما إذا وقع اختيارك على زاوية متوسِّطة، فإن هامش الخطأ يكون أكبر فيما يتعلَّق بالسرعة، وتكون السرعة والقوى أقل. ومِن ثَمَّ يتوفَّر لك فرصة أفضل للتصويب. وبالنسبة إلى الزوايا الأكبر، يكون هامش الخطأ مُماثلًا تقريبًا، إلَّا أنَّ السرعة المطلوبة والقوة اللازمة تكونان أكبر، ممَّا يجعل الزوايا الأكبر غير مُستحَبَّة.

وعادة ما يرمي اللاعبون المُبتدئون الكرة عبْر مسار مُستوٍ على نحوٍ مُبالغ فيه؛ بينما يتعلَّم اللاعبون المُحنَّكون من خلال الممارسة أن يُصوِّبوا الكرة داخل السلَّة برمية مقوَّسة. وكلما كانت الرمية أعلى، تعيَّن أن تكون سرعة الانطلاق المطلوبة أبطأ، وهو ما يستفيد منه اللاعبون ذَوو القامات الطويلة. وميزة طول القامة قوية جدًّا لدرجة أن بعض اللاعبين يَختارون رميَ الكرة أثناء القفْز حتى في حال عدَم تعرُّض لاعب من الفريق الخصم لهم. فإذا جعلتَ الكرة تدور دورانًا خلفيًّا أثناء الرمية، وحدَث أن اصطدمت الكرة بلَوح السلة بدلًا من السلة نفسها، تُولِّد الاستدارة احتكاكًا قد يتسبَّب في ارتداد الكرة إلى السلة مرةً أخرى. وإذا كانت التصويبة من الجانب، فإنَّ الاستدارة الجانبية للكرة قد تُفيد أيضًا.

وفرصة نجاح التصويبة التحتيَّة الخالية من الاعتراض أكبر من فرصة نجاح التصويبة الفوقية، غير أنَّ الأسباب لا تزال محلَّ بحث وجدال. وربما يعود سبب النجاح إلى أن التصويبة التحتية أسهل في تنفيذها، ولكن يبدو أنَّ هناك ميزة أكبر تَكمُن في حقيقة أن الرمية تُتيح للَّاعب أن يجعل الكرة تدور دورانًا خلفيًّا بدرجة أكبر، وهو ما يُمكن أن يُصحِّح وضعية رمية غير دقيقة عند اصطدام الكرة بلَوح السلة.

قصة قصيرة

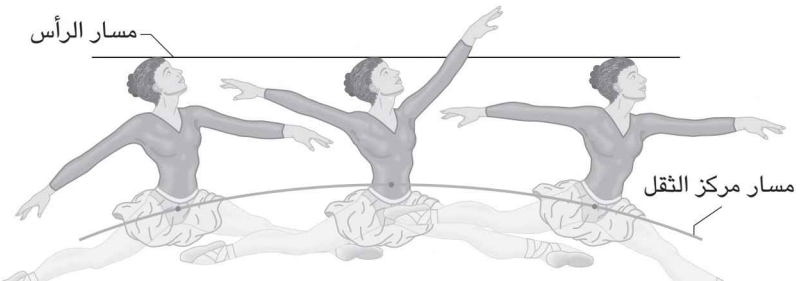
(٣٤) أرقام قياسية للرَّميات الحُرة

في عام ١٩٧٧، حقق تيد سانت مارتن رقمًا قياسيًّا عالميًّا في الرميات المُتتالية الناجحة من منطقة الرمية الحُرة حيث سدَّد ٢٠٣٦ مرة. وفي العام التالي، حقَّق فريد إل نيومان رقمًا أغرب. فبينما كان معصوب العينين، سجل ٨٨ رمية مُتتالية ناجحة من منطقة الرمية الحُرة. وبعد مرور عدة سنوات، وعلى مدار ٢٤ ساعة، وبدون أن يعصب عينيه، استطاع نيومان أن يسجل ١٢٨٧٤ رمية من إجمالي ١٣١١٦ محاولة.

(٣٥) زمن التعلُّق في الهواء في كرة السلة والباليه

يَبدو بعض لاعبي كرة السلة البارعين وكأنَّهم عالقون في الهواء في أثناء القَفز نحو السلة، ممَّا يُتيح لهم المزيد من الوقت لنقل الكرة من يدٍ إلى يدٍ ثم إلى داخل السلة. وعلى نحوٍ مُماثل، تبدو بعض راقِصات الباليه المُحترفات وكأنهنَّ طافيات فوق خشبة المسرح أثناء القفزة المعروفة باسم «القفزة الكبيرة». بالتأكيد ليس في مقدور أحد أن يُلغي الجاذبية الأرضية أثناء القفز أو الوَثْب، إذن ما تفسير هذين المثالَين على التعلُّق الظاهِري في الهواء؟

الجواب: التعلُّق في الهواء بالنسبة إلى كلٍّ من لاعبي كرة السلة وراقصات الباليه هو خدعة بصرية. ففي لعبة كرة السلة، يكون الخداع البصري راجعًا — في المقام الأول — إلى قُدرة اللاعب على أداء الكثير من المناوَرات أثناء القفز. وفي القفزة الكبيرة لراقصة الباليه، يأتي الخداع البصري من الحركة التبادُلية لذراع الرَّاقصة وساقَيها أثناء القفزة؛ إذ تَرفع ذراعيها وتُمدِّد ساقَيها أفقيًّا بمجرَّد أن ترفعهما من خشبة المسرح. وهذه الحركات تُغيِّر مركز الكتلة نحوَ الأعلى عبْر جسدها (شكل ١-١١). وعلى الرغم من أن مركز الثقل يتبَع بدقَّة مسارًا على شكل قطع مُكافئ (مسارًا منحنيًا) عبْر خشبة المسرح كما تَقتضي



شكل ١-١١: بند ١-٣٥: مسار مركز الكتلة أثناء قفزة كبيرة.

الجاذبية الأرضية، فإنَّ حركته قياسًا إلى الجسم تُقلِّل من الارتفاع الذي قد يَصِل إليه الرأس والجذع في قفزةٍ مُعتادة. النتيجة هي أنَّ الرأس والجذع يَتبعان مسارًا شِبهَ أفقي في منتصف القفزة. وهذا المسار يبدو غريبًا للجمهور الذي يتوقَّع، من واقع التجربة المُعتادة، مسارًا على شكل قَطعٍ مُكافئ حتى وإن كان يجهل المصطلح.

ويستطيع لاعب كُرة السلة أن يجعل مسار الرأس أثناء القفز عبْر المَلعب مسطحًا بطريقة مُماثلة؛ وذلك إذا سحب اللاعب الساقَين إلى أعلى ورفع الذِّراعَين والكرة. ورغم ذلك، لا أظنُّ أنَّ اللاعبين يُخطِّطون لفعل ذلك عمدًا. وعلى الرغم من أنَّ اللاعب يرفع الذراعَين والكرة نحو السلة أثناء القفز بالقُرب منها، فإنه نادرًا ما يَرفع الساقَين. ويبدو أن المسار الناتج المسطح قليلًا الذي يَسلكه الرأس يخدَع لاعب الدفاع الذي يقفِز بجوار لاعب الهجوم.

(٣٦) لعب الجولف

كيف يَنبغي عليك أن تُؤرجِح مضرب الجولف كي تَضرب الكرة على النحو الأمثل خلال ضربة طويلة المدى؟ على سبيل المثال، هل ينبغي عليك أن تؤرجِح المضرب لأسفل بأقصى

ما تستطيع من قوَّة وكأنك تُهاجم أحدًا بهراوة في أثناء عراك؟ بدلًا من ذلك، إذا كان ينبغي عليك أن تزيد مجهودك أو تُقلِّله أحيانًا أثناء أرجحة المضرب، فهل تُؤثِّر مرونة قضيب مضرب الجولف حين تُجري ذلك التغيير؟

لماذا يكون ضرب الكرة ضربةً قصيرة لمسافة مترٍ أصعب كثيرًا من ضربها لمسافة نصف متر؟ هل يكون ضرب الكرة لمسافة ٣٫٥ أمتارٍ أصعب كثيرًا من ضربها لمسافة ٣ أمتار؟ لماذا قد تتدحرج الكرة ناحية الحفرة مباشرةً ولا تدخل في الحفرة؟

الجواب: عندما تُؤرجِح مضرب الجولف لأسفل أثناء ضربة طويلة المدى للكرة، فأنت تبدأ حركة التأرجُح برفع الرسغين بحيث يكون المضرب في زاوية ٩٠ درجة تقريبًا على ذراعَيك. وإذا أرجحتَ المضرب كما تفعل في عراكٍ ما فستُتيح لرسغَيكَ بشكلٍ تلقائي أن يَنثنِيا أثناء الأرجحة، وإذا قاوَمْتَ ذلك الانثناء من خلال تقليل العزم الذي تُمارسه على المضرب أثناء أرجحته، فسيَكتسِب رأس المضرب سرعةً أكبر عند اصطدامه بالكُرة. والتوقيت الذي يَنبغي فيه ثَنْي الرسغَين تتعلَّمه من واقع التجربة. وبمجرَّد أن ينثني الرسغان، يتأرجَحُ المضرب حول الرسغَين بينما يتأرجحان حول الكتفَين، مما يُسفر عن تزايُد سرعة رأس المضرب.

ويعتقد كثير من اللاعبين أن مُرونة قضيب المضرب تُؤثِّر على رحلة انطلاق الكرة؛ لأنها تُحدِّد الزاوية التي يَصطدم عندها رأس المضرب بالكرة. وتستند الحجَّة إلى أن القضيب الذي يَمتاز بمرونة أكبر ينثني إلى الخلف أولًا أثناء الأرجحة ثم يَنطلِق إلى الأمام قبل أن تُضرَب الكرة أكثر ممَّا يَفعل القضيب الأقل مرونة؛ ومن ثَم ينقل مزيدًا من الطاقة إلى الكرة. ومع ذلك، تُوضِّح الدراسات أن مرونة المضرب لها تأثير ضئيل للغاية على رحلة انطلاق الكرة. وفي الواقع قد تُسفِر درجة المرونة الأكبر عن تناقُص الطاقة المنقولة إلى الكرة لأنَّ الضربة تجعل المضرب يتأرجح. وبذا يَصير المضرب الجامد مرغوبًا فيه أكثر لأنه يُتيح تحكُّمًا أكبر لضرب الكرة بإحكام.

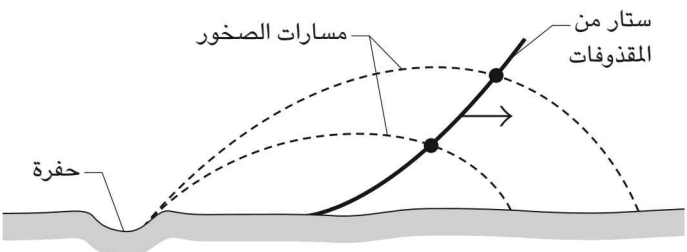
وإحدى معايير الصعوبة المُتعلِّقة بالضربة القَصيرة هي الزاوية التي تشغلها الحفرة من منظور الكرة. فإذا أبعدت الكرة عن الحفرة، تتناقَص الزاوية بسرعة مبدئيًّا، مما يَعني أن صعوبة تسديد الضربة تزداد سريعًا. ومع ذلك، وعلى بُعد مسافة تَزيد عن المتر تقريبًا، تبدأ الزاوية في التناقُص ببطء، مما يَعني أن الصعوبة المقترنة بذلك تبدأ في الازدياد ببطءٍ نسبيًّا. بالطبع، هذا التحليل البسيط يُغفِل الصعوبات الأخرى المُرتبطة بالضربة طويلة المدى مثل عدد التفاوُتات المُتزايد في ملمَس العشب وانحدار الأرضية على طول المسار نحو الحفرة.

إذا كانت الكرة تَتدحرج مباشرة ناحية الحفرة، فإنها لن تسقُط في الحفرة إذا تجاوزت السرعة قيمةً حرجة مُعينة حين تمرُّ بالقُرب من حافة الحفرة. هذه الكرة تمرُّ عبْر فتحة الحفرة، وتنخفِض أثناء مرورها، غير أنَّ السقوط غير كافٍ ليَمنع الكرة من الارتداد خارج الحفرة بمُجرَّد أن تصطدم بالجدار الموجود على الجانب البعيد للحُفرة.

قصة قصيرة

(٣٧) ستار الموت الناتج عن اصطدام نيزك بالأرض

في كل مرة يَصِل كُوَيكب فِلِزِّي إلى الأرض (بدلًا من أن يَحترق في الغلاف الجوي)، يصنع حفرةً من خلال إلقاء الصخور في الهواء. ورغم ذلك، لا تخرج «المَقذوفات» — كما يُطلَق عليها — عشوائيًّا، وإنما تميل الصخور التي تتحرَّك على نحوٍ أسرع إلى أن تُقذَف إلى الأرض بزوايا حادَّة أكثر. ولو قُدِّرَ لك أن تُشاهد هذه المقذوفات تطير نحوَك، سترى أنها في أي لحظةٍ تُكوِّن ستارًا رقيقًا مُقوَّسًا (شكل ١-١٢): إذ تُقذَف الجسيمات الموجودة في الجزء الأعلى من الستار بسرعات وزاويا أكبر من الجسيمات الموجودة في الجزء الأدنى من الستار. تَصطدِم الصخور التي تتحرَّك على نحوٍ أبطأ بالأرض في وقتٍ أبكر من اصطدام الصخور الموجودة في الجزء الأعلى بالأرض، وهكذا فإنك ترى وتسمَع قصفًا ثابتًا للأرض مع تحرُّك الستار نحوَك.



شكل ١-١٢: بند ١-٣٧: صخور مُتناثِرة من جراء اصطدام نيزك بالأرض.

(٣٨) القفز العالي والقفز الطويل

قد يُحاول المُستجدُّ في مُمارسة رياضة القفز العالي أن يَثِب فوق العارضة الأفقية من خلال إلقاء ساقٍ من فوق العارضة ثم سحْب الأخرى فوقَها، في حين يَنثني إلى الأمام عند الخصر. وثمَّة قفزة أنجح هي «قفزة الامتطاء»، وفيها يَقلب المرء جسدَه فوق العارضة ليكون وجهُهُ لأسفل وطول جسده موازيًا للعارضة.

عندما فاز ديك فوسبري بمسابقة القفز العالي في دورة الألعاب الأولمبية لعام ١٩٦٨ في مكسيكو سيتي، ابتكر ما بدا وكأنها طريقة غريبة للقفْز. هذا الأسلوب يُعرَف الآن باسم «قفزة فوسبري» ويستخدِمه مُمارسو رياضة القفز العالي على نطاقٍ عالمي تقريبًا. ولتنفيذ هذه القفزة، يركض المُتسابِق بسرعةٍ محسوبة مُتَّجهًا إلى العارضة ثم يلتفُّ في اللحظة الأخيرة، ليمُرَّ بظهره من فوقها ووجهه لأعلى. ما ميزة الاستعانة بمثل هذا الأسلوب في القفز؟ لماذا يكون الاقتراب من العارِضة الأفقية بسرعة محسوبة؟ من المؤكَّد أنَّ الاستعانة بسرعة أكبر قد يَمنح اللاعب الرياضي طاقة أكبر ليَقفِز مسافة أعلى.

أُقيمَت واحدة من أكثر الفعاليات إثارةً للذهول في تاريخ مُسابقات ألعاب القوى في دورة الألعاب الأولمبية بمدينة مكسيكو سيتي؛ ففي مُنتصَف ظهيرة يوم الثامن عشر من شهر أكتوبر، استعدَّ بوب بيمون للمحاولة الأولى من أصل ثلاث محاولات مسموح بها في رياضة القفز الطويل بقياس خطواته على طول منطقة ركضة الاقتراب. ثُمَّ استدار وركض عائدًا مسافة المنطقة كلها، ووصَل إلى منصَّة الانطلاق، ثم حلَّق في الهواء. كانت القفزة طويلة للغاية لدرجة أنَّ جهاز الرصد البصري المُستخدَم لقياس طول القفزات لم يَستَطِع رصد القفزة وتعيَّن إحضار شريط قياس. قال أحد الحكَّام لبيمون الذي جلس في حالة ذهول على جانب المضمار: «مذهلة، مذهلة.» كانت قفزة مدهشة لمسافة ٨,٩٠ أمتار، وضرب بها الرقم القياسي السابق الذي سجل مسافة ٨,١٠ أمتار (بفارق قدَمَين تقريبًا).

بالتأكيد، ما ساعد بيمون هو اتِّجاه الرياح الآتية من خلفه؛ لأنها كانت قد وصلت إلى الحدِّ الأعلى المسموح به بواقع ٢,٠ متر في الثانية. هل استفاد من ارتفاعات وانخفاضات مدينة مكسيكو سيتي، بمعنى: هل كانت أمور مثل كثافة الهواء وقوة الجاذبية هي السبب في قفزته المُدهِشة؟

تُقاس مسافة القفز الطويل من مَوضِع غرْس كعب حذاء الشخص الواثِب في الرمال؛ وذلك عند نزوله على الأرض، ما لم تَنزل مُؤخِّرته وتَطمس آثار الكعب. فإذا مُسحت هذه

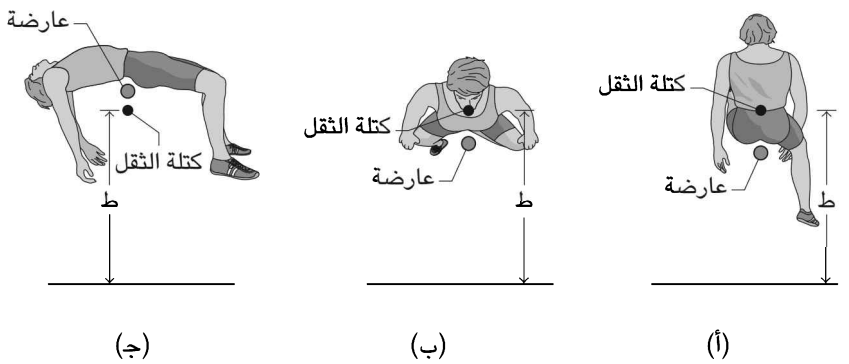
الآثار، تُحسب مسافة القفزة من عند حافة الحفرة التي تركتها المُؤخِّرة على الرمال. ولذا، من المهم أن تهبط أثناء القفز الطويل بالاتجاه المناسب.

عندما ينطلِق لاعب القفز الطويل، من الموضِع الأخير للقدَم على منصة الانطلاق، يكون الجذع في وضعٍ عمودي تقريبًا، وتكون ساق الانطلاق وراء الجذع، والأخرى تَمتدُّ إلى الأمام. وعندما يهبط اللاعب على الأرض، ينبغي أن تتحرَّك الساقان معًا وتَمتدَّان إلى الأمام بزاوية لكي يترُك كعب الحذاء أثره على الرمال لأكبر مسافة دون أن يُتيح للمؤخِّرة أن تَطمس ذلك الأثر. كيف يستطيع اللاعب أن ينتقل من اتجاه الانطلاق إلى اتجاه الهبوط في أثناء رحلة القَفز؟

وفي القفز الطويل دون ركض بالألعاب الأولمبية القديمة، لماذا كان بعض الرياضيِّين يقفزون مُمسكين بأيديهم «أثقالًا» وصلتْ كُتلتها إلى عدَّة كيلوجرامات؟

الجواب: الارتفاع الذي يُسجَّل في القفز العالي هو ارتفاع العارضة الأفقية، وليس أقصى ارتفاع لرأس اللاعِب أو أي جزء من جسده. لنفترض أنه في أثناء القفزة، يستطيع اللاعب الرياضي أن يرفع مركز الكتلة إلى الارتفاع «ط». فإذا وثب اللاعب فوق العارضة [مستخدمًا قفزة الحاجز]، لا بدَّ أن تكون العارضة أدنى من الارتفاع «ط» بمقدار كبير إذا كان من الضروري ألا يَلمسها الجسد؛ ومِن ثَمَّ لا يكون ارتفاع القفزة كبيرًا جدًّا (شكل ١-١٣أ). وفي قفزة الامتطاء، يكون الجسد في وضعيةٍ أُفقية وقد يمرُّ فوق العارضة مع اقتراب العارضة كثيرًا من مركز الثِّقَل، ومِن ثَمَّ من المُمكن أن تكون العارضة أعلى (شكل ١-١٣ب). وفي قفزة فوسبري، انحناء الجسد حول العارضة يخفِض مركز الكتلة حتى نقطة أدنى من الجسد، ويستطيع اللاعب أن يمُرَّ فوق العارضة على ارتفاعٍ أكبر ممَّا يُحقِّقه بقفزة امتطاء (شكل ١-١٣ج). والالتفاف في اللحظة الأخيرة والقفز إلى الخلف هو ما يُعطي انطلاقةً أقوى في قفزة فوسبري.

تكون ركضة الاقتراب بطيئةً مقارنة مثلًا بالعَدْو القصير؛ لأنَّ مفتاح الفوز يتمثَّل في تنفيذٍ خالٍ من الأخطاء؛ ومِن ثَمَّ يكون اختيار التوقيت المُناسب ضروريًّا. وعند نهاية ركضة الاقتراب، يَغرس اللاعب قدَم الانطلاق في موضعٍ مُتقدِّم على مركز كتلة الجسم، وبينما تَنثني الساق المُتقدِّمة، يدور الجسد حول تلك القدَم. يُتيح هذا التصرُّف تخزين بعضٍ من الطاقة الحركية للركض في الساق المَثنية. وبينما تضغط ساق اللاعب على الأرضية، فإنها تدفع اللاعب إلى أعلى، لتنقل بذلك بعضًا من الطاقة المُختزَنة، وكذلك طاقة إضافية مُكتسبة من المجهود العضلي، إلى انطلاقة القافز.



شكل ١-١٣: بند ١-٣٨: (أ) قفزة الحاجز. (ب) قفزة الامتطاء. (جـ) قفزة فوسبري.

لم يساعد الموقع الجغرافي والرياح بيمون في قفزته الطويلة إلَّا بقدرٍ ضئيل. فمدينة مكسيكو سيتي تقع على ارتفاع ٢٣٠٠ متر فوق سطح البحر، وهو ارتفاع أعلى بكثيرٍ من عدة أماكن أُقيمت بها الألعاب الأولمبية. والارتفاع الشاهق يعني أنَّ كثافة الهواء كانت ضئيلة؛ ومِن ثمَّ كانت مقاومة الهواء المُعيقة للقفزة أقلَّ ممَّا لو كانت القفزة في موقِع ذي ارتفاع أقل. كما أن الارتفاع الشاهق يعني أنَّ تَسارُع الجاذبية كان أقلَّ ومِن ثَمَّ كانت قوة الجاذبية، التي اعترضت انطلاق بيمون وجذبتْهُ في النهاية إلى الأرض، ضئيلة. كما انخفضت درجة التسارُع والقوة أكثر بسبب تأثير قوَّة الطرْد المركزي «الفعَّالة» على بيمون بسبب دوران الكرة الأرضية. وتكون تلك القوة الفعَّالة أكبر على الارتفاعات الأقل؛ لأن مثل تلك الأماكن تتحرَّك أسرع أثناء الدوران.

وعلى الرغم من ذلك، كل هذه العوامل لم تلعب سوى دورٍ صغير في القفزة. إذن، ما الذي جعل بيمون يقفز كلَّ هذه المسافة؟ السبب الأساسي هو أنه اصطدم بمنصَّة الانطلاق أثناء الركض سريعًا. مُعظَم لاعبي رياضة القفز الطويل يَقتربون ببطء أكثر ليتجنَّبوا أن تتعدَّى خطوتُهم الأخيرة منصَّة الانطلاق، الأمر الذي قد يؤدِّي لعدم احتساب القفزة. كما أنهم يرغبون في تجنُّب الانطلاق من أمام المنصة وفقْد الدعم القوي الذي تَمنحه المنصة أثناء الانطلاق وكذلك خسارة مسافة من مسافة القفزة؛ حيث إن القفزة تُحسب بدءًا من المنصة. ونظرًا لأن طول المنصة ٢٠ سنتيمترًا فقط، لا بدَّ أن تكون الخطوة الأخيرة محسوبة.

وفيما يبدو فقد قرَّر بيمون، الذي اشتُهر بالقفزات غير المُحتسَبة، أن يُغامر بمحاولته الأولى وركَضَ إلى المنصة، وتجنَّبت خطوته الأخيرة بالكاد تَخطِّي المنصة. ولو أنه تخطَّى المنصة، لكان من الأرجح أن يُنفِّذ القفزتَين التاليتَين بإبداء اهتمامٍ أكبر للمنصَّة ولإبطاء السرعة.

على مدار ثلاثةٍ وعشرين عامًا تالية لم يَقفز أحد لمسافة تُعادل المسافة التي قفزها بيمون، وحتى بيمون نفسه لم يفعلها ثانيةً. ثم أخيرًا، وفي بطولة العالم لألعاب القوى، قفز مايك باول مسافة ٨,٩٥ أمتار؛ أي لمسافة أبعد ببوصتَين من بيمون. نفَّذ باول هذه القفزة في طوكيو بدون الاستفادة من الارتفاع العالي للمدينة مع هبوب رياح خفيفة من خلفه بسرعة ٠,٣ متر في الثانية. وأثبت باول على نحوٍ مذهل أن تأثيرات الارتفاع والرياح هي أمور ثانوية مُقارَنةً بالقُدرة الرياضية.

ولفهم تبديل اتجاه القفزة الطويلة أثناء الانطلاق، تخيَّل أنَّ القفزة ناحية اليمين من منظور رؤيتك. في أثناء الانطلاق من المنصة، تتسبَّب القوة الصادرة عن الساق المُتقدِّمة من المنصة في دوران الجسد في اتجاه عقارب الساعة؛ وهو ما يُفضي إلى جعل جذْع الجسد يتحرَّك إلى الأمام والساق المُتقدِّمة تتحرَّك إلى الخلف. تزداد هذه النزعة للدَّوَران في اتجاه عقارب الساعة عندما تتقدَّم الساق المُتأخِّرة استعدادًا للنزول على الأرض؛ والسبب في ذلك أن القافز يكون بعيدًا عن الأرض، ولذا يجِب أن يظلَّ الزخم الزاوي لجسده ثابتًا. هكذا، حين تلتفُّ الساق المُتأخِّرة في عكس اتجاه عقارب الساعة لتتقدَّم إلى الأمام، يميل باقي الجسد إلى الدَّوران في اتجاه عقارب الساعة.

ومن أجل تقليل الدَّوَران في اتجاه عقارب الساعة، بحيث يكون القافز في الاتجاه الصحيح للنزول على الأرض، يتأرجَح الذراعان بسرعة في اتجاه عقارب الساعة حول الكتفَين. بالإضافة إلى ذلك، ربما تُواصل الساقان التحرُّك كحركتهما في الركض، مع مدِّ الساق إلى الخلف عند دوَرانها مع اتجاه عقارب الساعة وسحْبها إلى الأمام عند دوَرانها في عكس اتجاه عقارب الساعة. (لا تؤثِّر أيٌّ من هذه الحركات على مسافة القفزة، ولكن تُؤثِّر على اتجاه الجسد.) وعادةً ما يفشل القافزون المُستجدُّون في أرجحة الذراعَين بالقدر الكافي، أو ما هو أسوأ من ذلك، يؤرجِحون ذراعًا واحدةً أو كِلتا الذراعَين في الاتجاه الخطأ. لا يكون الجذع والذراعان في أفضل اتجاه، وتكون القَفزة قصيرة لأنَّ آثار الكعب تكون قريبةً أو لأن المؤخِّرة طمسَتْ آثار الكعب.

وقد تَزيد الأثقال، التي استخدمها لاعبو رياضة القفز في الألعاب الأولمبية القديمة، من مسافة القَفزة. وقد يُؤرجِح اللاعب الأثقال في يدَيه إلى الأمام والخلف استعدادًا للقفز، ثم يُؤرجِحُها أثناء الجزء الأول من القفزة، وفي النهاية يؤرجِحها إلى الخلف استعدادًا للنزول على الأرض. وعند الاستعانة بهذا الأسلوب على نحوٍ صحيح، قد يُضيف هذا الأسلوب في القفز مسافة ١٠ سنتيمترات أو ٢٠ سنتيمترًا إلى طول القفزة لسببَين؛ أولًا: مع تحرُّك مركز الكتلة لمنظومة اللاعب والثِّقَل في الهواء، فإنَّ الحركة الأخيرة إلى الخلف تُغيِّر اتجاه الأثقال إلى الخلف نسبةً إلى مركز الثقل؛ ومِن ثَمَّ يتحرَّك اللاعب إلى الأمام نسبةً إلى مركز الثقل. ثانيًا: في أثناء الانطلاق، أرجحة الأثقال إلى الأمام تزيد من قوَّة الاتجاه إلى أسفل الواقعة على نقطة الانطلاق، مما يُعطي مِن ثَمَّ قوة انطلاق أكبر للاعب. (في الواقع، كان اللاعب يستعين بعضلات الكتفَين والذراعَين بالإضافة إلى عضلات الساق أثناء الانطلاق.) وقد يزيد طول القفزة قليلًا إذا ما قذَف اللاعب الأثقال إلى الخلف في أثناء الجزء الأخير من الانطلاقة، مُطلِقًا الجسد إلى الأمام بفعالية. يَهبط مركز كتلة منظومة اللاعب والثِّقل عند النقطة نفسها، إلَّا أنَّ اللاعب يكون مُتقدِّمًا قليلًا على تلك النقطة.

(٣٩) حبَّات الفاصوليا النطَّاطة

إذا أمسكت فتاة صغيرة تَجلس داخل بطانية بالأطراف الأربعة للبطانية وسحبَتْها إلى أعلى بقوَّة بالِغة، فهل تستطيع أن ترفع نفسها؟ حسنًا، بالتأكيد لا تستطيع ذلك، رغم أنَّني أعرف فتاةً حاولت فِعل هذا بكلِّ قوَّتها. إذن، كيف تستطيع حبَّات الفاصوليا النطَّاطة أن تقفز في الهواء؟

الجواب: تحتوي حبَّة الفاصوليا على دُودة صغيرة تَضغط على الجزء السُّفلي من الحبَّة ثم تصطدم بالجزء العلوي، دافعةً حبَّة الفاصوليا إلى أعلى. وتكون القوة الخارجية المسئولة عن الحركة (القوى الآتية من خارج منظومة الدُّودة والفاصوليا) قوَّة مُتَّجِهة إلى أعلى واقعة على الدُّودة عندما تشرَع في القَفز.

(٤٠) شقلبة الخُنفساء المُطَقطِقة وهجوم جمبري السرعوف

إذا وكزتَ خنفساء مُطَقطِقة مُستلقيَةً على ظهرها، فإنها تَثِب سريعًا وترتفع في الهواء لمسافةٍ تصِل إلى ٢٥ سنتيمترًا، مُصدِرةً طقطقة ملحوظة. وفي أثناء القفزة، قد تنقلِب بحيث تستقرُّ على الجانب الأيمن لأعلى. وتتضمَّن الانطلاقة تَسارُعًا كبيرًا يصل إلى ٤٠٠ مرة

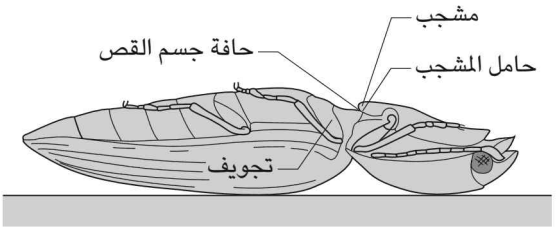
قدْر عجلة الجاذبية الأرضية، ويَستلزم طاقة قد تصِل إلى ١٠٠ مرة قدر الطاقة المُمكنة لأيِّ عضلة في جسم الخنفساء. كيف تُنتج الخنفساء مثل هذه الطاقة الهائلة التي لا يُمكن عزوها بالطبع إلى أرجلها لأنها تَصدُر وهي مُستلقية على ظهرها؟ أحد مفاتيح الإجابة هي الطقطقة والآخَر هو حقيقة أنَّ الخنفساء لا يُمكنها أن تُكرِّر الحركة على الفور.

يُهاجم جمبري السرعوف فريسته من خلال اللفِّ السريع لزائدة التغذية حولَها. لا تصطدم زائدة التغذية بالفريسة وإنما تُطلِق فقاعات هوائية ينتُج عنها موجة صوتية مُدمِّرة حين تَنفجِر هذه الفقاعات فجأة. وقد يصِل التسارُع عند الطرف الخارجي للزائدة إلى ١٠٠٠٠ مرة قدْر عجلة الجاذبية الأرضية. كيف يستطيع الجمبري أن يُحقِّق مثل هذا التسارُع العالي؟

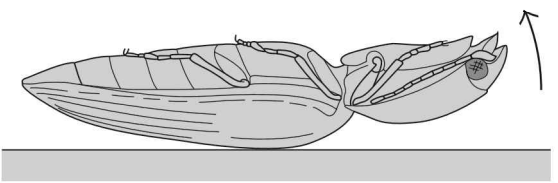
الجواب: قفزة الخنفساء أشبَهُ نوعًا ما بمصيدة فئران يتمُّ نصبُها — فكلاهما يندفع كالمدية بقوةٍ إلى أعلى. تتقلَّص ببطءٍ عضلة في الجزء الأمامي من جسم الخنفساء وتتحرَّك جزئية أشبَهُ بمِشجب فوق «جسم القص» إلى أن يَعلق ثقب، موجود في جزء المِشجَب (حامل المشجب)، بـ «حافة» جسم القص مُسبِّبًا تقوُّس الخنفساء (شكل ١-١٤أ). وبعد حدوث شدٍّ في العضلة، ينزلق المِشجَب فجأةً فوق الحافة وينحدِر إلى أسفل داخل تجويف. يدفع الانزلاق المُفاجئ الجزء الأمامي من مؤخِّرة الخنفساء إلى التقوُّس لأعلى ويتسبَّب في انقباض الجزء الخلفي من المؤخِّرة نحو الأرض (شكل ١-١٤ب). هذه الدفعة تقذِف الخنفساء إلى أعلى، ويُتيح الدوران — الناتج من انزلاق المِشجَب — للخنفساء أن تدور حول مركز ثقلها في الهواء. وربما تدور الخنفساء بالقدْر الكافي لدرجة أنْ تَستقرَّ على أرجُلها. وتنتج الطقطقة الصادرة عن الخنفساء إما من انزلاق حامل المشجب فوق الحافة أو من التوقُّف المُباغِت للمشجب بعد دخوله التجويف.

الانقباض الأوَّلي البطيء للعضلة يَسمح للخنفساء بأن تختزن الطاقة، والإطلاق المُباغِت لتلك الطاقة يكون مسئولًا عن القوة العالية الخاصَّة بالقَفزة. وقبل أن تتمكَّن الخنفساء من تكرار القفزة، يجِب اختزان الطاقة مرة أخرى، الأمر الذي يَستغرِق بعض الوقت. وتستعين الكثير من الحيوانات بهذا النوع من اختزان الطاقة وإطلاقها للقيام بحركات مُباغتة؛ إمَّا من أجل الإمساك بفريسة أو تجنُّب الوقوع كفريسة.

ويَستعين جمبري السرعوف بإجراءٍ مُشابه؛ فالزائدة المُستخدَمة في الهجوم تَلتصق بإحكامٍ بالجسد بينما يتعرَّض عضوٌ أشبَهُ بالسرج للشدِّ ببطءٍ مثل الزنبرك الذي يُمكن



(أ)



(ب)

شكل ١-١٤: بند ١-٤٠: (أ) خنفساء مُطَقطِقة مُستلقية على ظهرها، مع تعلُّق حامل المِشجَب وشدِّ العضلة. (ب) انغلاق التجويف بمجرَّد التعلُّق وتقوُّس الخنفساء إلى أعلى.

الضغط عليه. وتُثبَّت الزائدة في موضعها بسقَّاطة، وما إن يتعرَّض هذا العضو إلى الحدِّ الأقصى للشد، تَنطلِق السقَّاطة ويتحكَّم العضو في الدوَران السريع الخاص بالزائدة.

قصة قصيرة

(٤١) بعض الأرقام القياسية في رفع الأثقال

في رياضة رفع الأثقال، كثيرًا ما تُكسَر الأرقام القياسية، إلَّا أن الرقم القياسي لأكبر وزنٍ على الإطلاق حقَّقه بول أندرسون عام ١٩٥٧. استخدم أندرسون أسلوب «رفعة الظهر»؛ حيث انحنى أسفل منصَّة خشبية مُدعومة بحوامل قوية. وأمامه وُضِع كرسي قصير كان

بإمكانه أن يستخدِمَه لتثبيت نفسه والضغط لأسفل. وفوق المنصة وُضِعَت أجزاء من سيارات وخزانة مملوءة بالرصاص. وبمَجهود مُذهِل من الذراعَين والساقَين رفَع المنصة، كان إجمالي الوزن المجمع ٦٢٧٠ رطلًا (٢٧٩٠٠ نيوتن)!

وربما تحقَّقت رفعة أثقال مُذهلة على نحوٍ مماثل — حسبما ذُكر — من جانب السيدة ماكسويل روجرز من مدينة تامبا بولاية فلوريدا في أبريل ١٩٦٠. فما إن اكتشفَت السيدة روجرز سقوط سيارة من فوق مصدِّ دعم السيارات على ابنها الذي كان يعمل أسفلها، حتى رفعت أحد أطراف السيارة حتى يَستطيع أحد الجيران إنقاذ ابنها. كانت السيارة تزن ٣٦٠٠ رطل (١٦٠٠٠ نيوتن)، رفعت السيدة روجرز ٢٥٪ من وزن السيارة على الأرجح. وكنتيجة لذلك، كُسِرت لها عدَّة فقرات. (تظهر روايات لهذا النوع من الحوادث من آنٍ لآخر. في نوبات الذعر، يستطيع شخص غير مُدرَّب أن يرفع شيئًا يفوق وزنه زيادة مهولة، ولا يُمكنه بأيِّ حال أن يحمله في مُلابَسات أهدأ حالًا.)

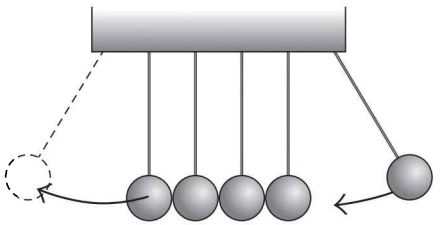
(٤٢) سلسلة تصادُمات

إذا اصطدمت كُرة بكُرة ثابتة، فما الظروف التي تكتسب فيها الكرة الثانية أكبر قدْر من الطاقة؟ وهل تكون نفس الظروف لازمة إذا أردْنا للكُرة الثانية أن تَكتسِب أكبر سرعة؟ ماذا ستكون الإجابات إذا اصطدَمَت الكرة بسلسلةٍ من الكُرات الثابتة في البداية؟

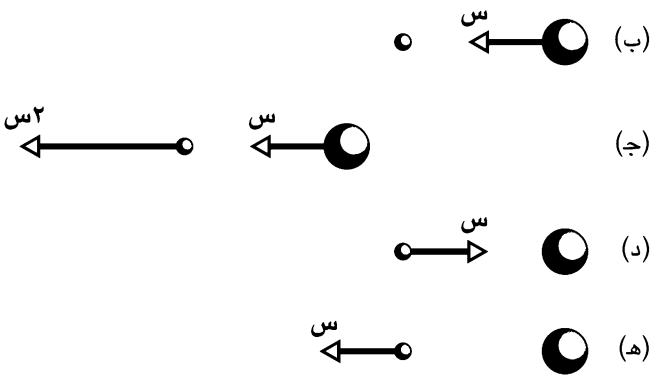
تخيَّل أنه يُوجَد مبدئيًّا كرة كبيرة تتحرَّك وكرة أصغر ثابتة. هل يُمكنك أن تزيد الطاقة التي تكتسبها الكرة الأصغر من خلال إضافة المزيد من الكُرات بين الاثنين؟ إذا كان الأمر كذلك، فكم ينبغي أن تكون كُتَل الكُرات الموجودة في المنتصف؟

تخيل كُرة جولف تطير في الهواء نحوَ رأسك. إذا كنت تُريد أن تُقلِّل الطاقة التي ستنتقل إلى رأسك، فهل ينبغي عليك أن تَحمي رأسك بإحدى يدَيك بحيث تصطدم اليد برأسِك؟

ثمَّة لعبة شهيرة تتكوَّن من صفٍّ من الكُرات المُتجاوِرة التي يُمكن أن تتأرجح مثل بندول الساعة (شكل ١-١٥أ). الكرات مَرِنة؛ بمعنى أن قدرًا ضئيلًا فقط من الطاقة يُهدَر عندما تصطدم الكرات بأجسامٍ أخرى. هكذا، أنت تسحَب كرة من على الطرف ثم تتركها لترتطِم بالكرة التالية. لماذا لا تتحرَّك أي كرة سوى الكرة الأخيرة الموجودة على الطرف المُقابل من صفِّ الكرات؟



(أ)



شكل ١-١٥: بند ١-٤٢: (أ) تُطلَق الكرة الأولى، وتُدفَع الكرة الأخيرة جانبًا. (ب) قبل و(جـ) بعد اصطدام كرة كبيرة للغاية بكرة صغيرة للغاية. (د) قبل و(هـ) بعد التصادم من جهة الكرة الكبيرة.

أَعِد ترتيب الكرات بحيث تترك مسافة صغيرة بينها، ثم اضرب الكرة الأولى بالكرة الثانية بزاوية مائلة قليلًا عن الصف. على الرغم من أنَّ الاصطدامات الأولية تكون مائلة، فإن الخلل يَختفي تدريجيًّا مع استمرار الاصطدامات. ورغم ذلك، إذا زِدْتَ المسافة الفاصلة بين الكُرات بالدرجة الكافية وكرَّرتَ التجربة، فإنَّ الخلل يزداد مع كلِّ تصادُم يحدُث. وربما تتوقَّف الاصطدامات إذا ما دُفعَت كرة واحدة جانبًا بدرجةٍ كبيرة جدًّا لدرجة أنها تُخفِق في الاصطدام بالكرة التالية. لماذا يتوقَّف سلوك الاصطفاف المُنتظِم-غير المنتظم على المسافة الفاصلة بين الكرات؟

الجواب: تكتسب الكرة الثانية أكبر قدْرٍ من الطاقة حين تتوافَق كُتلتها مع الكرة الأولى، إذا كانت الكرات العالية المرونة، تنقل الطاقة بالكامل تقريبًا، وفي هذه الحالة، السرعة النهائية للكرة الثانية تتساوى مع السرعة الأولية للكرة الأولى، وتتوقَّف الكرة الأولى.

وتكتسِب الكرة الثانية أكبر قدْر من السرعة حين تكون كُتلتها أقلَّ بكثيرٍ من كتلة الكرة الأولى. لنفترِض أنَّ «س» تُمثِّل سرعة الكرة الأولى (شكل ١-١٥ب). إذا كانت نسبة الكتلة كبيرة للغاية والتصادُم مَرِنًا للغاية، قد تكتسب الكرة الثانية سرعةً تُعادل «٢س» (شكل ١-١٥جـ). قد يبدو هذا غير دقيق، ولكن خُذ للحظة مكان الكرة الأولى، كما لو أنك تلك الكرة. تَقترب الكرة الثانية منك بسرعة «س» (شكل ١-١٥د)، وترتدُّ بمرونة، ثم تَبتعِد عنك بسرعة «س» (شكل ١-١٥هـ). الآن، عُدْ مرة أخرى إلى موقِعك الأصلي. تَبتعِد الكرة الثانية عن الكرة الأولى بسرعة نِسبية تُقدَّر بـ «س». كيف تتحرَّك الكرة الأولى؟ نظرًا لأنَّ الكرة الثانية ذات كتلة ضئيلة فعلًا، لا يُغيِّر التصادُم سرعة الكرة الأولى على نحوٍ ملحوظ ولا تزال سُرعتها «س» (تقريبًا)؛ ومِن ثَمَّ لا بدَّ أن تكون السرعة «س + س»، أو «٢س». فإذا كان يُوجَد سلسلة من التصادُمات هكذا، فإن السرعة التي يَنقلها كل اصطدام تكون (تقريبًا) ضعف السرعة المَنقولة بالاصطدام السابق.

عندما يقع اختيارك بالفعل على الكرات الموجودة عند طرف السلسلة وتريد أن تُحسِّن انتقال الطاقة إلى الكرة الأصغر حجمًا، أضِف كرات في المُنتصَف بحيث يكون لكلٍّ منها كُتلة تُساوي المتوسط الهندسي لكُتَل الكُرات الموجودة على الطرف المقابل من سلسلة الكرات. (والمتوسط الهندسي للكُتَل هو الجذر التربيعي لناتج كتلتَين.) تُحسِّن الخيارات الأخرى لكتلة الكرات الموجودة في المنتصف من انتقال الطاقة ولكن ليس بقَدْر كبير.

وهذا الاستنتاج يُجيب عن السؤال الخاص بكُرة الجولف. فإذا قُمتَ بحماية رأسك بيدك، فربما تزيد بذلك من انتقال الطاقة إلى رأسك؛ لأنَّ لِيَدِكَ كتلة تتوسَّط كتلتَي الكرة ورأسك. ورغم ذلك، من الحِكمة أن تَحمي رأسك بيدك لأنها عريضة وستنشر الطاقة التي سيستقبلها رأسك.

عادةً ما تُفسَّر لعبة سلسلة كرات البندول من منطلق الزخم والطاقة الحركية لأول كرة مُتحركة. والطريقة الوحيدة لعدم تغيُّر تلك الكميات أثناء انتقالها عبْر سلسلة الكرات هي أن تَنتهي الحال باستقبال الكرة الأخيرة لكلٍّ الزخم والطاقة الحركية. هكذا، وفي النهاية، تتحرَّك الكرة وحدَها. ورغم ذلك، فإنَّ التفسير بسيط على نحوٍ مُضلِّل لأنَّ أداء الكرات الموجودة في المُنتصَف قد يكون مُعقَّدًا للغاية إذا ما بدأت الحركة من عندِها.

وفي التجربة، حين تَصطدِم الكرة الأولى بالكرة الثانية بزاوية مائلة، تكون النسبة بين المسافة الفاصلة «م» بين الكرات ونصف قطر الكرة «نق»، ذات أهمية. فإذا كانت نسبة «م/نق» أقلَّ من ٤، فإن اختلال الكرات يقلُّ أثناء التصادُم؛ لأنَّ التصادُمات تتغيَّر تدريجيًّا إلى الداخل وتصير مُباشِرة أكثر. وإذا كانت النسبة أكبر من ٤، يزداد اختلال الكرات؛ لأن التصادُمات تتحرَّك تدريجيًّا إلى الخارج على الأسطح المُنحنية للكُرات.

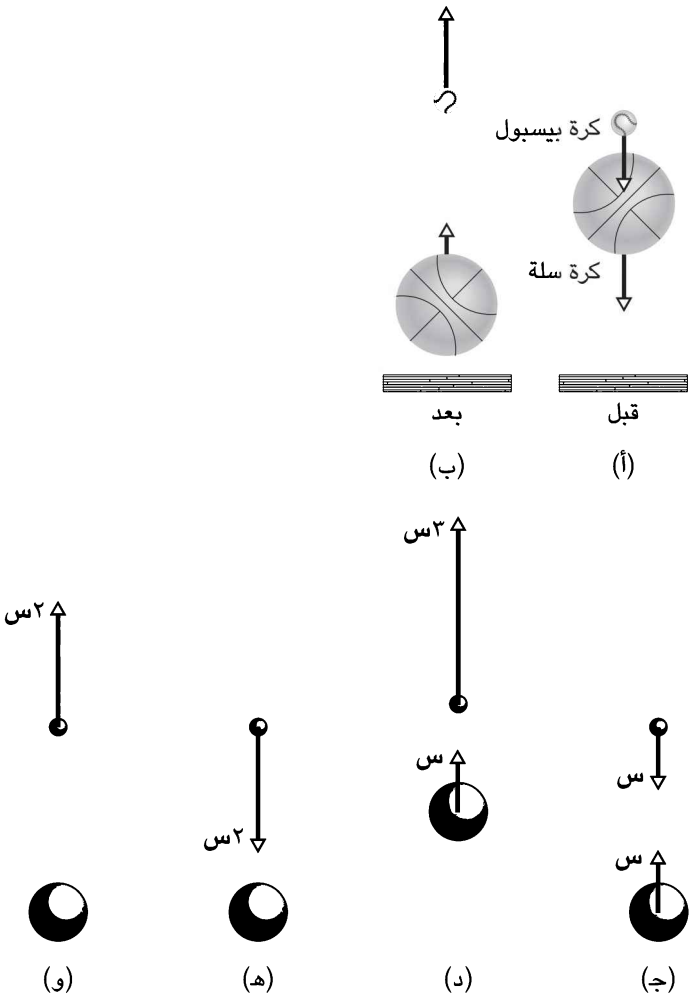
(٤٣) إسقاط مجموعة كُرات من ارتفاع

أمسِك بكرة بيسبول فوق كرة سلَّة تمامًا وبينهما مسافة فاصِلة صغيرة، ثم أسقِط الكُرتَين من عند ارتفاع الخصر تقريبًا (شكل ١-١٦أ). على الرغم من أنَّ أيًّا من الكرتَين لن ترتدَّ ارتدادًا كبيرًا لأعلى وحدَها، فإنَّ الجمْع بين الكرتَين يُعطي نتيجة مذهلة؛ إذ تسقط كرة السلَّة بلا حَراك تقريبًا على الأرض وربما ترتدُّ كرة البيسبول إلى السقف (شكل ١-١٦ب). والارتفاع الذي تصِل إليه كرة البيسبول أكبر من مجموع ارتفاع الكُرتَين إذا ما ارتدَّت كلُّ كرةٍ على حِدة. (كن حَذِرًا. إذا ما غاب اصطفاف الكرتَين على خطٍّ واحد، فإنَّ كرة البيسبول تَنحرِف جانبًا بسرعة بالِغة وقد تُصيبك أو تصيب شخصًا مُجاورًا.) وإذا كرَّرتَ التجربة، ولكن مع إضافة كُرة مَرِنة صغيرة على رأس المجموعة، فإنَّ الكرة الثالثة تَنطلِق مثل الصاروخ، بل وقد ترتدُّ لمسافةٍ أعلى من كرة البيسبول، على الرغم من اكتسابها قدرًا أقلَّ من الطاقة.

من الناحية النظرية، إذا ما اختيرت الكُرات على نحوٍ ملائم، فقد تَصِل الكرة العُلوية في المجموعة المكوَّنة من كُرتَين إلى ارتفاع يَبلُغ تسعة أضعاف الارتفاع الذي أسقطت من عنده المجموعة. ومع وجود ثلاثِ كُرات، واختيارها على نحوٍ ملائم وتحت الظروف المثالية، قد تَصل الكرة العلوية إلى ارتفاع يصِل إلى ٤٩ ضعف مسافة السقوط.

ولعلَّك تودُّ أن تُجرِّب مجموعة متنوعة من الكُرات، مثل كرة تنس طاولة أو كرة «سوبر بول» (وهي كُرة مرِنة للغاية، تصنعها شركة وام-أوه) أو كرة تنس. كيف يَنبغي اختيار كرات بحيث ترتدُّ الكرة العلوية لمسافةٍ عالية، ولماذا تَنطلِق بعيدًا للغاية؟

الجواب: عند إسقاط مجموعة تتكوَّن من كُرتَين، ترتدُّ الكرة السُّفلية لأعلى من الأرض ثم تصطدِم بالكرة الثانية التي ما تزال في سبيلها إلى السقوط. ينقل التصادُمُ الطاقةَ إلى الكرة العلوية ويُعطيها سرعة مُتَّجِهَةً إلى أعلى. افترِض أنك ترغَبُ في زيادة انتقال الطاقة بحيث تتوقَّف الكرة السفلية عن الحركة تمامًا. إذا كانت الكُرات مَرِنة، يحدُث أفضل انتقال



شكل ١-١٦: بند ١-٤٣: (أ) قبل و(ب) بعد إسقاط كرة بيسبول وكرة سلة معًا على أرضية صلبة. و(ج) قبل و(د) بعد اصطدام كرة كبيرة للغاية بكرة صغيرة للغاية. (هـ) قبل و(و) بعد التصادُم من جهة الكرة الكبيرة.

للطاقة حين يكون حجم الكرة السُّفلية ثلاثة أو أربعة أضعاف الكرة العُلوية، كما هي الحال مع كرة السلة وكرة البيسبول.

وبدلًا من ذلك، إذا أردتَ أن تَرتفِعَ الكُرة العُلوية لأعلى ارتفاعٍ مُمكن، ينبغي أن تختار كُرةً أخفَّ بكثيرٍ من الكرة السُّفلية. ويتوقَّف الارتفاع الذي تصِل إليه الكرة العلوية على مربَّع السرعة المُتَّجِهة التي تكتسبها الكرة من التصادم. وإذا كانت كتلة الكرة العلوية أصغرَ بكثيرٍ من كتلة الكرة السفلية، تكتسب الكرة العلوية مُربَّع سرعةٍ متَّجهة كبيرًا، وقد تصِل إلى ارتفاع يُقدَّر بتِسعة أضعاف مسافة السقوط.

ولكي ترى النتيجة، ادرُس أولًا سرعات الكُرات قبل التصادم مباشرة. فالكرة العلوية تسقط بسرعة «س» بينما الكرة السفلية تتَّجِه إلى أعلى بنفس سرعة «س» (شكل ١-١٦ج). فإذا كان التصادُم مرنًا للغاية، فربما تكتسب الكرة الثانية سرعةً تصل إلى «٣س» (شكل ١-١٦د). قد يبدو ذلك خطأً، ولكن خُذ مكان الكرة الأولى لدقيقة، كما لو أنك أنت تلكَ الكرة. الكرة الثانية تقترِب منك فيما يبدو بسرعة تُقدَّر بـ ٢س (شكل ١-١٦هـ)، ثم ترتدُّ بمرونةٍ وتتَّجه بعيدًا عنك بسرعة تُقدر بـ ٢س (شكل ١-١٦و). الآن، عُد مرة أخرى إلى موقعك الأصلي. تبتعِد الكرة الثانية عن الكرة الأولى بسرعةٍ نسبية تقدَّر بـ ٢س. كيف تتحرَّك الكرة الأولى؟ نظرًا لأن الكرة الثانية ذات كتلةٍ ضئيلة فعلًا، لا يُغيِّر التصادُم سرعة الكرة الأولى على نحو ملحوظ ولا تزال تحتفِظ بسرعتها «س» (تقريبًا)؛ ومِن ثَمَّ لا بدَّ أن تكون السرعة «س + ٢س»، أو «٣س».

إذا كنتَ تَلعَب بمجموعةٍ أكبر من الكرات، يتعيَّن عليك أن تُعيد ترتيب الكرات حسب أوزانها لتَتناقصَ تصاعديًّا في المجموعة. عندما ترتدُّ الكُرة السُّفلية، تصطدم بالكرة الثانية وتنقل بعض طاقتها. وبمجرَّد أن يُعاد توجيه الكرة الثانية إلى الأعلى، تصطدم بالكرة الثالثة المُتَّجهة لأسفل، وتنقل بعض طاقتها إليها، ثم تعكس الكرة الثالثة اتجاهها وتصطدِم بالكرة الرابعة وهلمَّ جرًّا. ولو كانت المجموعة كبيرة بالقدْر الكافي، يُمكنك — من الناحية النظرية — أن تُطلق الكرة العلوية حتى مدار الأرض.

قصة قصيرة

(٤٤) تجربة اصطدام

عندما كان جون ماكبرايد طالبًا بجامعة هيوستن في سبعينيَّات القرن العشرين، أجرى هو واثنان من زملائه الطلَّاب تجربة على فيزياء الكرات المُتساقطة من خلال إلقاء كرة بيسبول ليِّنة وكرة سلَّة من الطابق الثالث لَممرٍّ يَربط بين بِنايتَين للسكن الجامعي. سقطت الكرة بلا

حَراك على الأرض وارتفَعَت كرة البيسبول الليِّنة لأعلى فوق رءوسهم، لمسافة ١٠ أمتار فوق الأرض على الأقل. كان الأمر مُمتعًا للغاية حتى المُحاولة الأخيرة وفيها انحرَفَ اصطفاف الكُرتَين واصطدمت كرة البيسبول بنافذة مُشرِف السكن الجامعي، ليَتناثر الزجاج في كلِّ مكانٍ داخل الغرفة. بلَغَت تكاليف تصليح النافذة ٢٥٠ دولارًا، ولكن كان من الممكن أن تكون الغرامة أعلى من ذلك بكثيرٍ لو كان مُشرف السكن الجامعي موجودًا في غرفته في ذلك الوقت.

(٤٥) لعبة الكاراتيه

تأمَّل لكمةً أمامية في لعبة الكاراتيه؛ حيث يبدأ اللاعب وقبضتُه مضمومة وراحة يده مُتجهة لأعلى بجوار الحزام ثم يدفعها إلى الأمام وراحة يدِه متجهة لأسفل. لماذا تُعلَّم هذه الحركة بإجراءَين وقائيَّين: تقدَّم بطول ذراعٍ كاملة ولكِن ليس أبعد من ذلك (أنت لا تَميل إلى الأمام)، اشتبك مع خَصمِك حين تَفرِد يدَكَ لتقطع ٩٠٪ من المسافة (بحيث تُصوِّب لَكمتك على بُعدِ ١٠٪ من المسافة الفاصلة عن جسد الخصم)؟ لماذا يدور الفَخذان والجذع في مرحلة مُبكِّرة من اللَّكمة؟

لماذا تُنَفَّذ اللَّكمة والضربة والركلة وغيرها من المناورات الحركية على مسافة اشتباك قصيرة؟ ما مدى السُّرعة التي يستطيع أن يُحرِّك بها الشخص المُحترِف قبضته أو قدَمه، وما مقدار القوة والطاقة التي يُمكن توفيرها؟ عندما يَكسِر مُحترف لعبة الكاراتيه عظمةً لدى خَصمِه، لماذا لا تُكسَر أيضًا عظمةٌ لدَيه؟ عندما تُكسَر مجموعة من الأشياء مثل ألواح خشبية، لماذا يُفصَل بين هذه الأشياء باستخدام أقلام رصاص؟

لم أكسر قطُّ ألواحًا في دروس الكاراتيه، ولكن حين بدأتُ التدريس رأيتُ أنَّ كسْر الألواح قد يكون تجربةً حيَّةً على القوى المشاركة في التصادم. وذات يوم بينما كنت أسارع للَّحاق بمحاضرة، أمسكتُ في عُجالة بلوحَين من خشب الصنوبر وجدتُهما في المعمل. وفي المحاضرة، اخترت طالبًا ضخم الجثة ليُمسك باللَّوحَين في وضع رأسي لكي أتمكَّن من لَكمهما، ضاربًا إياهما بمِفصلي أول إصبعين من قبضتي اليمنى. لسُوء الحظ، تراجع الطالِب إلى الوراء حين ضربتُ اللَّوحَين، فلم يَنكسِرا. وضربتُهما مرارًا وتكرارًا ولكن دون أن يُحالفني الحظ. وبعد أن غُطِّي اللَّوح الأمامي بالدماء جزئيًّا وتورَّم مِفصَلي أول إصبعين لبضعة مليمترات، استسلمتُ وخرجتُ من قاعة المحاضرات. حاليًّا، أستخدِم

«قرميد رصف» يستند إلى ركائز صُلبة عند كلِّ طرف، وأضرب القرميد بالجزء السُّفلي من قبضتي المضمومة. لماذا نجَحَت الاستراتيجية الجديدة أكثر من الاستراتيجية السابقة؟

الجواب: ينبغي ألا تميل إلى الأمام أثناء تسديد اللكمة؛ وذلك لسببَين على الأقل؛ فأنت تريد أن تكون مُستقرًّا لكي يُمكنك تسديد ضربة أخرى على الفور، وتريد اتِّخاذ وقفة مناسبة بحيث لا تَكسر القوَّةُ التي تتعرَّض لها أحدَ عظامك. يستطيع مُحترفو لعبة الكاراتيه أن يُسدِّدوا وابلًا من الضربات التي تتَّسم بالسرعة البالِغة لدرجة أنك تَعجز عن رؤيتِها بوضوح. كان رون ماكنير، أحد رُواد الفضاء الذين قُتلوا في حادثة تحطُّم مكوك الفضاء تشالنجر، لاعب كاراتيه مُحترفًا. وكان بإمكانه أن يُسدِّد عدَّة ضربات مُتلاحقة باليدَين والقدَمين والركبتَين والمِرفقَين بسرعة بالغة لدرجة أنه بدا وكأنه سائل يتدفَّق حول خصمه.

عندما تُمارس لعبة الكاراتيه، يَجدُر بك الاشتباك مع خَصمِك حين تَنطلِق قبضتك بأقصى سرعة لها، لأنها حينئذٍ تتمتَّع بأكبر قوَّة دافعة؛ ومن ثَم ستُوفِّر أنت أكبر قدر من القوة والطاقة. وتلك النقطة المثالية تتحقَّق حين تقطع قبضة يدك ٩٠٪ من المسافة، وهكذا تقيس ذهنيًّا مساحة اللكمة كما لو أن قبضة يدك ستَصِل إلى طول الذراع كاملًا نحو جسد الخصم قبل نحو ١٠٪ من المسافة؛ فإذا اشتبكتَ في وقتٍ مُبكر أو متأخِّر للغاية، تقلُّ قوى التصادُم وطاقته.

ينبغي أن تضرِب بجزءٍ صغير من جسدِك لكي تكون القوى الواقعة على كلِّ وحدة مساحة من جسم الخَصم أكبر وتَنقل الطاقة لجزءٍ صغير من جسد الخصم. وقد تَنثني الضربة وتكسر عظمة لدى الخصم. وهذا الأسلوب من شأنه أيضًا أن يَحميَك. فعندما تُسدِّد الضربة بشكلٍ مناسب، كأن تَستخدِم مِفصلَي أول إصبعَين أو جانب يدٍ مفتوحة وجامدة أو طرف القدم، وتقوم بتوجيه نفسك على النحو الصَّحيح، فإن القوى الناجمة من التصادُم لا تَكسِر أي عَظمة من عظامك.

وتتَّضح حقيقة أنَّ الانثناء أمرٌ مُهم لكْسر شيء ما عندما يضرب لاعب كاراتيه مُحترف لوحة أو كتلة خرسانية تمتدُّ فوق ركيزتَين. تُوضَع كلتا الركيزتَين عند طرفي الجسم المُراد ضربه بحيث حين تُسدَّد الضربة إلى مركز الدعامة، تخلق القوى عزم دوَرانٍ كبيرًا حول كلِّ نقطة ارتكاز. يُدير عزم الدَّوران الشقَّ الأيسر والأيمن حول نُقطتَي الارتكاز، ويَنثني الجسم نحو الأسفل. وإذا انثنى بالقدْر الكافي، يحدُث شرْخ عند السطح السُّفلي ويندفع لأعلى، وينكسر الجسم تمامًا.

عندما تُكسَر مجموعة من الأجسام التي بَينها فواصل، يكسر لاعب الكاراتيه المُحترِف الجسم الأول في المجموعة، ثم تَكسِر أجزاؤه الجسم الثاني، وهلمَّ جرًّا. ويَنتقِل الكسر عبر المجموعة أسرع من انتقال اللاعب المُحترف. وتُعدُّ ألواح خشب الصنوبر الأبيض وقراميد الرصف الخرسانية أغراضًا نموذجية لإثبات مثل هذه التجارب. يُقطَع خشب الصنوبر ويُلصق بعضه ببعض مع جعل تعرُّقات الخشب عبْر قطاع عرضي قصير؛ ومثل هذا اللَّوح يكون أضعف — ويَسهُل كسرُه — ممَّا لو كانت تعرُّقات الخشب بالطول. وعادةً ما يتمُّ تجفيف قراميد الرصف داخل الفرن مسبقًا لكي يتمَّ التخلُّص من المياه بداخلها؛ لأن الماء قد يزيد من قوة القرميد.

يَستغرق التصادُمُ بلوحٍ خشبي أو قرميد عادةً مدة ٠٫٠٠٥ ثانية. وقد تصل سرعة القبضة في اللكمة الأمامية إلى ١٠ أمتار في الثانية. قد تكون الركلات والضربات التحتيَّة أسرع. وقد تصِل قوة ضربة مُنفَّذة بالقبضة إلى ٤٠٠٠ نيوتن عند كسر لَوح تقليدي. وتكون القوة أكبر عندما لا يُكسَر اللوح لأنَّ اليد لا تخترق عبْر اللوح بالقوة الدافعة المُتبقية. وبدلًا من ذلك، لا بدَّ أن تتوقَّف اليد أو حتى ترتد، وأيٌّ من هذين الإجراءَين يستلزم أن تكون القوة في التصادُم أكبر من القوة المُستخدَمة لكسر اللوح.

عندما تراجَع الطالب في محاضرتي إلى الوراء، أتاحَ للوحَين أن يتحرَّكا نحوه. وهذا التصرُّف زاد من المدَّة المُستغرَقة في التصادم؛ لأنَّ قُوَّتي في التصادم اعتمدت على تلك المدة على نحو عكسي، وقد قلَّل هذا من قوَّتي وصارت غير كافية لكسر اللوحَين. تتميَّز تجربة القراميد بكونها مُثيرة أكثر ولكنها مضمونة أكثر لأنَّ القرميد مُثبَّت بصلابةٍ ومدة التصادُم به قصيرة. وهي أكثر أمانًا أيضًا لأنَّ الجزء السُّفلي السمين من القبضة يُستخدَم للضرب بدلًا من استخدام مفاصل الأصابع، التي تكون بطبيعتها ضعيفة، وأي شخص سدَّد للخصم لكمةً في ذقنه بمفاصل أصابع عارية يستطيع أن يشهد بذلك.

(٤٦) لعبة الملاكمة

لماذا تجعل القفازات — على وجه التحديد — لعبة الملاكمة أكثرَ أمانًا؟ ورغم هذه التدابير الوقائية، لماذا تتسبَّب هذه الرياضة في إصابة للمخ على المدى البعيد، بل وتُسبِّب الوفاة أحيانًا؟

الجواب: في وقتٍ سابق، عندما كان الرجال يتلاكمون بدون قفازات، كان احتمال وقوع الإصابات والوفيات أكبر؛ فمِن شأن القفازات أن تُوزِّع القوة على مساحة أكبر، ممَّا

يُقلل احتمال وقوع الإصابات لكِلا المُلاكمَين؛ فالقفازات تُخفِّف من وقع الضربة لأن المادة المُصنَّعة منها يجِب أن تكون مضغوطة أثناء التصادم، وهذا الإجراء يزيد مدَّة التصادم؛ ومِن ثَمَّ يُقلِّل القوة المُستخدَمة في التصادم. ورغم ذلك، ربما تكون القوة الصادرة عن الملاكِمين الأقوياء — خاصة في فئة الوزن الثقيل — بالغةً بل ومُميتة.

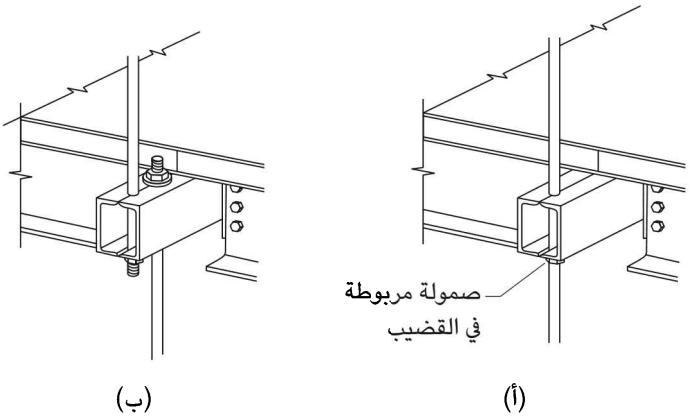
والمُلاكم البارع يعرف كيف «يُراوغ لكمة» موجَّهة نحو رأسه؛ أي يُحرك رأسه إلى الوراء. ولو أنه أبقى رأسه ثابتًا، أو الأسوأ من ذلك، حرَّكه مع اتجاه اللكمة، لكانت قوة التصادم أكبر. وتأتي أخطر الأوقات في مباراة الملاكمة أثناء الجولات الأخيرة حين يكون الملاكمان مُنهكَين وعاجزين عن توقُّع اللكمات والردِّ عليها من خلال التراجُع إلى الخلف.

وأخطر لكمةٍ هي تلك اللَّكمة المُسدَّدة إلى الذقن أو الجبهة، ولا سيما حين تكون اللكمة بزاوية مائلة، لأنها تدير الرأس إلى الوراء، لتضغط بذلك على جذع الدماغ وتُمزِّق أنسجة الدماغ (تحاول جعْل جُزء من الدماغ ينزلق فوق جُزء آخر). حتى وإن لم يسقط الملاكم أرضًا بسبب الضربة القاضية، فإنَّ الدماغ يُصاب حتمًا بتلَف من اللكمة لأن الجمجمة تصطدم به ممَّا يتسبَّب في تحرُّكه إلى الوراء. يعيق التصادم تدفُّق الدم في منطقة التصادم ويسبب سحجات في سطح الدماغ. والتمزق الناتج عن دوران الرأس إلى الوراء يُتلِف الجزء الداخلي من الدماغ. ويقع ضرَر آخر في الدماغ على الجهة المقابلة من اللكمة لأنه حين تتحرك الجمجمة إلى الوراء، لترتجَّ بعيدًا عن المخ، يقلُّ ضغط الموائع الموجودة في المسافة الفاصلة بين الجمجمة والمخ، ممَّا يتسبَّب في تمزق الشعيرات الدموية.

ومع تكرار الضرر، تتراجع قدرة الملاكم على التفكير والتذكُّر والتحدُّث، ثم يُصاب بـ «اللكام» على نحوٍ مزمِن. ربما تكون لعبة الملاكمة هي لعبة للبالغين، إلَّا أنها تُضعف قدرات اللاعبين حتى تصِل إلى مستوى قدرات الأطفال الرُّضَّع.

(٤٧) انهيار الممرَّات المُعلقة

في السابع عشر من يوليو عام ١٩٨١، بمدينة كانساس سيتي، كان فندق حياة ريجينسي، الذي افتُتح مؤخرًا، مكتظًّا بجمهور يستمع إلى أنغام فرقة موسيقية تعزف أغانيَ مفضَّلة من فترة أربعينيَّات القرن العشرين ويتراقَص عليها. تجمهر الكثير من الناس عند الممرات التي كانت معلَّقة كجسور عبْر الردهة الشاسعة. فجأة انهار ممرَّان من الممرات المعلَّقة ليسقطا على الجمهور الصاخب الموجود في الطابق الرئيسي، مما تسبَّب في مقتل ١١٤ شخصًا وإصابة ٢٠٠ آخرين تقريبًا.



شكل ١-١٧: بند ١-٤٧: (أ) التصميم الأصلي. (ب) التصميم الفعلي المُعدل والمُستخدَم لدعم الممرَّات المُعلقة.

ما الذي سبب هذا الانهيار؟ بالتأكيد وزن الحشود الواقفة على الممرَّات المُعلقة كان أحد العوامل، ولكن هل كان يُوجَد خطأ في تصميم المَمرات بالأساس؟ بعد مرور عدة أيام على التحقيقات، أشارت إحدى الجرائد بكانساس سيتي إلى تغيير جزئية تفصيلية بالتصميم الأصلي أثناء البناء والتشييد؛ ففي التصميم الأصلي، كان من المُفترَض أن يُعلَّق طرف ثلاثة ممرات على قضيب واحد يتدلَّى من السقف. ومن شأن الصَّمُولة والحلقة المعدنية المربوطة بالقضيب أسفل الممر مباشرةً أن تتحمَّلا وزن الممر (شكل ١-١٧أ).

وفيما يبدو أدرك أحد المسئولين عن البناء الفعلي أن تنفيذ مثل هذا النظام للتعليق أثناء البناء أمر شِبه مُستحيل، وبدلًا من أن يمرَّ قضيب واحد عبْر المَمر، استُخدم قضيبان يمتدَّان من الممر (شكل ١-١٧ب). كيف من شأن تغيير بسيط ومنطقي كهذا أن يُسفر عن عددٍ مأساوي من القتلى والجرحى أثناء الاحتفالات المُقامة في تلك الأمسية من يوم الجمعة؟

الجواب: ضعْ في اعتبارك الطريقة التي عُزِّزَ بها الوزن الموجود عند طرف الممرِّ الأعلى ارتفاعًا؛ ففي التصميم الأصلي، من شأن الوزن الخاص بالمَمرِّ والأشخاص الواقفين عليه أن تدعمه الصَّمُولة التي كان من المُقرَّر ربطها في القضيب في ذلك المكان. ماذا عن التصميم المُعدَّل الذي استُخدم فيه صمُّولتان؟ فوق الممر العلوي، كان من المُفترَض أن تدعم الصَّمُولة

الموجودة في القضيب المُمتدِّ نحو الأسفل وزن كلٍّ من الممرين السُّفليَّين والواقفين عليهما. والأخطر من ذلك، كان من المفترض أن تدعم الصَّمُولة الموجودة في القضيب الممتدِّ نحو الأعلى وزن الممرات الثلاثة وجميع الواقفين. وبدا أنه حين اكتظت الممرَّات بالزحام، فإن الوزن المُشترَك مزَّق أو كسر بعضًا من هذه الصواميل وتسبب في انهيار الممرَّات. تغيير بسيط أدَّى إلى فارق مأساوي.

(٤٨) انهيار مركز التجارة العالمي

حسب قوانين الفيزياء، لماذا انهار بُرجا مركز التجارة العالمي إثرَ اصطدام طائرتَين بهما في الحادي عشر من سبتمبر عام ٢٠٠١؟

الجواب: ثمَّة تفسيران أساسيَّان لانهيار بُرجَي التجارة العالمي.

(١) أدَّى التصادُم واشتعال وقود الطائرة إلى اندلاع حريق تجاوَزت درجة حرارته ٨٠٠ درجة مئوية. ونظرًا لأنَّ التصادم أزال العَزل الحراري الموجود على الأعمدة الفولاذية الرأسية، تسبَّبت الحرارة العالية في تليين الأعمدة ثم التوائِها تحت وطأة جميع الطوابق العُليا في المبنى. ثم، فجأة، سقطت الكثير من الأعمدة الرأسية وانهار الجزء العلوي من المبنى فوق الطابق الأسفل منه. حتى وإن لم تتأثَّر أعمدة الطابق السُّفلي بالسخونة، فإنَّ هذا الاصطدام المفاجئ والهائل تسبَّب في الْتواء الأعمدة الداعمة للمبنى؛ ومِن ثَمَّ هبطت الطوابق عموديًّا إلى أسفل.

(٢) أدى الاصطدام واشتعال الوقود إلى اندلاع حريق، ولكن درجة الحرارة كانت أقل من القدر اللازم لتليين الأعمدة الرأسية الداعمة. (وكما علَّل بعض الباحثين، لم تحظَ الطوابق التي دمَّرتْها الطائرة بالقدْر الكافي من التهوية للتنفيس عن حريق كبير ولم يَدُلَّ الدخان المتسرِّب من الفتحة التي خلفتها الطائرة على اندلاع حريق كبير.) وعوضًا عن ذلك، تسبَّب الحريق في تمدُّد طابق واحد أو أكثر وعوارضها الأفقية (الجمالونات). ونظرًا لأنَّ هذه الطوابق والعوارض الأفقية كانت مضغوطة، لم يكن بالإمكان أن تتمدَّد إلَّا من خلال الالتواء، وهو ما ضغط الأعمدة الرأسية الداعمة إلى الداخل. كان بالإمكان تعزيز هذا الضغط إلى الداخل، لو أن الأعمدة والعوارض الأفقية قد تمَّ تليينها بالحريق. وبمجرَّد أن تنضغط الأعمدة الرأسية إلى الداخل، فإنها لم تَعُد تدعم الجزء العلوي من المبنى الذي انهار بعد ذلك.

(٤٩) السقوط من ارتفاعات قياسية

فبراير ١٩٥٥: وقع جندي من قوات المظلَّات من ارتفاع ٣٧٠ مترًا (١٢٠٠ قدم) من طائرة طراز سي-١١٩ دون أن يتمكَّن من فتح مظلَّته. وسقط على ظهره في الجليد، مُحدِثًا حفرة وصَل عُمقها إلى مترٍ واحد. وعلى أثر هذا تمَّ نقلُه جوًّا إلى أحد المستشفيات، وتبيَّن إصابته بعدَّة كسور طفيفة وبضع كدمات فقط.

مارس ١٩٤٤: اكتشف الرقيب نيكولاس ألكيماد، ضابط المدفعية بالسلاح الجوي الملكي على متن قاذِفة قنابل طراز لانكاستر أثناء غارة جوية على ألمانيا، أنَّ طائرته مُشتعلة، وأنه غير قادر على الوصول إلى مظلَّته. وعقب قفزه من ارتفاع ٥٫٥ كيلومترات، اصطدم بشجرة ثم سقط على الجليد، ورغم ذلك لم يُصَب إلَّا بخدوش وكدمات.

الحرب العالمية الثانية: قرَّر آي إم شيسوف، ملازم أول بالقوات الجوية السوفيتية، أن يقفز من طائرته بمظلَّة حين هاجمته مجموعة طائرات ماسرشميت. ونظرًا لأنه لم يكن راغبًا في الوقوع كـ «فريسة سهلة» أمام الطيَّارين الألمان، قرَّر تأجيل القفز بمظلَّته حتى صار أسفلَهم مباشرةً. ولسُوء الحظ أنه فقد الوعي أثناء السقوط من ارتفاع ٧ كيلومترات. ولكن لحُسن الحظ أنه اصطدَم صدفةً بوادٍ مُغطًّى بالثلوج. وعلى الرغم من إصابته بسبب الاصطدام، عاد إلى الخدمة العسكرية بعد أقلَّ من أربعة أشهر.

وربما الأكثر غرابةً من ذلك هو الفقرة الاستعراضية التي قدَّمها هنري لاموث لفترة طويلة؛ حيث كان يسقُط ببطنِه من ارتفاع ١٢ مترًا في مغطس يصل عمق المياه به إلى ٣٠ سنتيمترًا فقط، ليصطدم بقوة تبلغ ٧٠ مرة ضعف وزنه. (الفقرة الاستعراضية خطيرة للغاية وينبغي ألا تُكَرَّر. وقد سمعتُ عن شابٍّ أحمق حاول أن يؤدِّي هذه الفقرة وانتهت به الحال بالإصابة بشلل امتدَّ من الرقبة حتى أسفل قدَمَيه.)

من الشائع أن تَتناقل وسائل الإعلام قصصًا عن الناجين من السقوط من ارتفاعات شاهقة (والكثير من الأخبار عن ضحايا هذا السقوط). السؤال هنا: لماذا يَنجو الناجون؟

الجواب: العامل الفتَّاك في السقوط هو، بالتأكيد، القوة التي تَكتسِبها الضحية أثناء الاصطدام بالأرض (أو غيرها من الأسطح الصُّلبة). وتتناسَب القوة طرديًّا على نحوٍ مباشر مع زخم الضحية قبل التصادم مباشرة وعكسيًّا مع مدة الاصطدام. يتوقَّف الزخم على سرعة الضحية وكُتلتها. وحين يكون السقوط من ارتفاع شاهق، تصِل الضحية إلى «سرعة حدِّية» أحيانًا أثناء السقوط. وعلى الرغم من أنَّ الجاذبية الأرضية تُواصِل الجذب نحوَ الأسفل بالتأكيد، فإنَّ تسارُع الضحية يُقلِّل حدَّتَه مُقاومةُ الهواء التي تتوافَق مع قوَّة

الجاذبية الأرضية. وحجم السرعة الحدِّية مَرهون باتجاه جسم الضحية؛ فوضعية فرد الساقَين والذراعَين تُسبِّب مقاومة هواء أكبر من السقوط بالقدَم أو بالرأس؛ ومِن ثَمَّ تكون السرعة الحدِّية أقل. ورغم ذلك، بالكاد يمنح السقوط إلى الأرض بوضعية فرد الساقين والذراعين أيَّ مميِّزات.

والوقت الذي يستغرقه الاصطدام هو عامل أكثر أهمية؛ فإذا كان التصادُم «شديدًا»، فقد يَستمر من ٠٫٠٠١ إلى ٠٫٠١ ثانية، والقوة المُعيقة للضحية هي بالتأكيد قوَّة قاتلة. ولكن إذا كان الاصطدام «أخف» وطأة (أي إذا استغرقت الضحية وقتًا أطول للتوقُّف)، تكون القوة أقلَّ وقد تنجو الضحية من الموت. والسقوط على طبقة عميقة من الجليد قد يُطيل الاصطدام بالقدْر الكافي لتقليل القوَّة حتى مستوى النجاة. ويبدو أن عُمق ٣٠ سنتيمترًا من المياه كان كافيًا بالنسبة إلى لاموث لكي ينجو من الموت أثناء الغطس.

والضحية التي تسقُط برأسها على الأرض أكثر عُرضةً للموت مُقارنةً بأيِّ وضعية سقوط أخرى، وهذا بسبب الهشاشة الشديدة للعمود الفقري وجِذع الدماغ والدماغ.

(٥٠) إنقاذ جريء بالمظلَّة

في أبريل ١٩٨٧، أثناء القفز بالمظلَّات، لاحظ جريجوري روبرتسون أن رفيقتَه في القفز بالمظلَّة ديبي ويليامز قد فقَدت الوعي نتيجة اصطدامها بقافِزٍ آخَر وتعذَّر عليها فتح مظلَّتها. استطاع روبرتسون، الذي كان أعلى ويليامز بمسافةٍ كبيرة والذي لم يَفتح مظلته للقفز حتى ارتفاع ٤ كيلومترات، أن يَلحَق بويليامز ثم أمسك بها، بعد أن واكَب سُرعتها. فتح روبرتسون مظلَّتَها ثم حرَّر مظلَّتَها ومظلتَه قبل الاصطدام مباشرةً بعشر ثوانٍ. أُصيبَت ويليامز بإصابات داخلية شديدة بسبب انعِدام سيطرتها على الهبوط إلَّا أنها نجَت من الموت. كيف استطاع روبرتسون أن يُمسِك بويليامز؟

الجواب: استطاع روبرتسون أن يُنقِذ ويليامز من خلال استغلال مُقاوَمة الهواء لـ «أعلى» التي شهِدَها أثناء سقوطه لصالحه. عندما يَشرع القافز بالمظلَّة في السقوط تزداد السرعة المُتَّجِهة لأسفل، وتزداد تلك القوة، المناقضة لقوة الجاذبية التي تضغط على القافز إلى أسفل، حتى تتوافَق مقاومة الهواء مع قوة الجاذبية. وبمجرَّد أن يحدُث هذا التوافق، يسقط القافز بسرعة ثابتة، لنَقُل إنها «السرعة الحدِّية». ويتوقَّف حجم السرعة الحدِّية على مساحة المقطع العرضي التي يحظى بها القافز عبْر الهواء الذي يمرُّ به. يحظى القافز

بمساحة مقطع عرضي أقلَّ وسرعة حدِّية أكبر حين ينزل بوضعية رأسه لأسفل أو قدَمَيه لأسفل مقارنة بنزوله أفقيًّا بوضعية فرد الساقَين والذراعَين في الهواء.

عندما لاحظ روبرتسون الخطر الذي يُهدِّد ويليامز، أعاد توجيه جسدِه بحيث يكون رأسُه متَّجهًا لأسفل وذلك لتقليل مقاومة الهواء ضدَّه؛ ومِن ثَمَّ يزيد سُرعته المتجهة إلى أسفل. وصلَتْ ويليامز التي كانت فقدَتْ سيطرتها أثناء السقوط مع وجود قدرٍ كبير من مقاومة الهواء ضدَّها، إلى سرعة حدِّية بلغت ١٩٠ كيلومترًا في الساعة. بلغ روبرتسون، بوضعيَّته الانسيابية، سرعة مقدارها ٣٠٠ كيلومتر في الساعة، ليلحق بويليامز وبينما كان يقترِب منها اتَّخذ وضعيةً أفقية بفرْد الساقَين والذراعَين لزيادة مقاوَمة الهواء ضدَّه وتقليل سُرعته لتصِل إلى سرعة ويليامز.

(٥١) سقوط القطط من ارتفاعات عالية

نادرًا ما ينجو البشَر من السقوط من ارتفاعات عالية، ولكن يبدو أنَّ للقطط حظًّا أوفر في النجاة. أُجريَت دراسة منشورة عام ١٩٨٧ على ١٣٢ قطة وقعَتْ عن طريق الخطأ من ارتفاعٍ يتراوَح بين طابقَين و٣٢ طابقًا (٦ أمتار إلى ٩٨ مترًا)، معظمها هبطت على سطحٍ خرساني. نجَت حوالي ٩٠٪ من القطط من المَوت ونجَت حوالي ٦٠٪ من الإصابة. والمُثير للاستغراب أنَّ درجة الإصابة (مثل عدد كسور العظام أو عدد الوفيات المؤكدة) تقلُّ مع زيادة الارتفاع، وذلك إذا كان السقوط من ارتفاع أكثر من سبعة أو ثمانية طوابق. (القطة التي سقطت من ارتفاع ٣٢ طابقًا لم تُصَب إلَّا بإصاباتٍ طفيفة في منطقة القفص الصدري وسنٍّ واحدة وأُطلِقَ سراحها بعد البقاء ٤٨ ساعة تحت الملاحظة.) لماذا تَحظى القطة التي تسقُط من ارتفاع أكبر بفرصة نجاة أكبر؟ (لا يُمكن ضمان النجاة من الموت بأي حال من الأحوال، ولذا إذا كنتَ تعيش في شقَّةٍ بناطحة سحاب، فاحرص على إبعاد قطتك عن أي نافذة مفتوحة.)

الجواب: إذا سقطت قطة ناعِسة عن طريق الخطأ من حافة النافذة، فإنها تُعيد توجيه جسدِها بسرعة وعلى نحوٍ غريزي حتى تكون سيقانُها أسفل منها. تستعين القطة بمرونة سيقانها لتمتصَّ صدمةَ الهبوط على الأرض؛ فالمرونة تُطيل الوقت المُستغرَق في الهبوط على الأرض ومِن ثَمَّ تُقلِّل القوة الواقعة على القطة.

وحين تسقط القطة، تزداد قوَّة مقاومة الهواء الضاغطة إلى أعلى والواقعة على القطة. وإذا كان السقوط من عند حافة النافذة إلى الأرضية، لا تكون مقاومة الهواء كبيرة مُطلقًا.

ولكن إذا كان السقوط لمسافة أطول، فربما تَصير مقاومة الهواء كبيرة بالقدْر الكافي لتقليل تَسارُع القطة نحوَ الأسفل. في الواقع، إذا كان السقوط من ارتفاعٍ أكثر من ستة طوابق، فقد تصير مقاومة الهواء كبيرة بالدرجة الكافية لتعادُل قوة الجاذبية الضاغطة إلى أسفل والواقِعة على القطة. تسقط القطة بعد ذلك بدون تَسارُع وبسرعة ثابتة تُسمَّى «السرعة الحدية».

وما لم تصل القطة إلى السرعة الحدية، فإنها ستَخاف من تَسارُعها وستُحافِظ على وضعية سيقانها أسفل جسدِها، استعدادًا للنزول على الأرض. (جسدك أيضًا حسَّاس للتسارُع أكثر من السرعة.) ولكن إذا وصلت القطة إلى السرعة الحدِّية، فإن التسارُع يَختفي وتسترخي القطة نوعًا ما، وتمدُّ سيقانها إلى الخارج على نحوٍ غريزي (من أجل زيادة مقاومة الهواء الواقعة عليها) إلى أن يتوجَّب عليها في النهاية الاستعداد للنزول على الأرض.

وبمجرَّد أن تفرد القطة أطرافها الأربعة، تزداد مقاومة الهواء تلقائيًّا، وهو ما يُقلِّل من سرعة القطة. وكلما زادت مسافة السقوط، قلَّت السرعة، إلى أن تصل إلى سرعة حدِّية جديدة ومخفَّضة تُقدر بحوالي ١٠٠ كيلومتر في الساعة. ولذا، فإن القطَّة التي تسقط من مسافة ١٠ طوابق مثلًا تصِل إلى الأرض بسرعةٍ أقلَّ ممَّا لو كانت تسقط مسافة ٥ طوابق وسيكون لها حظٌّ أوفر في النجاة من الإصابات الخطيرة.

(٥٢) الغَوص الأرضي والقفز بالحِبال

في جزيرة بنتوكوست في نيوهبريد، من اختبارات الرجولة المحلية القفز من منصَّة مُرتفعة نحوَ الأرض، مع الثِّقة في أنَّ حبلًا من أغصان الكروم مربوطًا حول كاحِلَي القافِز ومُثبَّت في أعلى المنصَّة سيوقِف السقطة قبل الوصول إلى الأرض. في مايو ١٩٨٢ أقدَم شابٌّ يافع على قفزة كهذه من ارتفاع يزيد عن ٨١ قدمًا. وقبل أن يُوقِفه الحبل المصنوع من أغصان الكروم، بلغت سُرعتُه نحو ٥٥ كيلومترًا في الساعة. وقد قُدِّرَ التسارُع الذي مرَّ به أثناء التوقُّف بـ ١١٠ مرات قدْر الجاذبية الأرضية. ولا تُوجَد تقارير عن الكيفية التي استطاع بها السَّير بعد ذلك.

ثمَّة نُسخة ألطف حِدَّة من القفز بأغصان الكروم، لكنها قد تؤدِّي إلى إصابات خطيرة أو إلى الموت، وهي القفز بالحِبال المعروف باسم قفز البانجي، وفيه يقفز الشخص من منصَّة مرتفعة وثمَّة حبل مطاطي مربوط بكاحِلَيه وبالمنصَّة. بدأت هذه الممارسة في الأول من أبريل (بالطبع!) عام ١٩٧٩ حين قفَز أعضاء بنادي الرياضات الخطيرة من فوق أحد

الجسور في بريستول، بإنجلترا. إذا فرضْنا أنك أحد القافزين بالحبال (وبالطبع أنك توقَّفت عن السقوط قبل الوصول إلى ما يُوجَد بالأسفل، وهو ما لا يحدُث دائمًا)، فأين ستشعُر بالقدْر الأكبر من القوة والتسارُع؟ وإذا كنت خائفًا من التجربة وقررتَ استخدام نِصف طول حبل البانجي وحسب، فهل سيقلُّ القدْر الأكبر من القوَّة والتسارُع بمقدار النصف؟

الجواب: ستَشعُر بالقدْر الأكبر من القوَّة والتسارُع، وكلاهما إلى الأعلى، حين تصِل إلى النقطة الأكثر انخفاضًا؛ حيث يعكس حبل القفز حركتك وتتوقَّف لحظيًّا. إذا أمكنَنا أن نُعامِل الحبل على أنه زنبرك مثالي على النحو المُستخدَم في الكتب الدراسية، فإن قيمتَي القوة والتسارُع الكبريين ستكونان حينها مُستقلَّتَين عن طول الحبل ومِن ثَمَّ مُستقلَّتَين كذلك عن المسافة التي ستسقطها. فرغم أن السقطة الأقصر ستَمنحك سرعة أقلَّ إلى الأسفل يتعيَّن على حبل القفز أن يَكبحها، فإنَّ الحبل الأقصَر الذي ستستخدِمه سيكون أشدَّ صلابة (مثل زنبرك أقصر ومِن ثَمَّ أشدَّ صلابة) وسيُقلِّل سرعتك الأقل إلى الصِّفر بالتسارُع نفسه الذي سيُقلل به الحبل الأقل صلابةً السرعة الأكبر إلى الصفر.

التسارُع إلى الأعلى الذي يُوقِف القافز يكون أحيانًا كبيرًا بما يكفي بحيث يؤذي القافز. والعينان مُعرَّضتان للخطر بشكلٍ خاص لأنه في ظلِّ اندفاع الرأس إلى الأسفل خلال التوقُّف يُمكن لضغط الدم المتزايد في العينين أن يُسبِّب نزيفًا.

(٥٣) الاحتجاز داخل حُجيرة مصعد ساقط

يحدُث الأمر على حين غرَّة؛ فأنت في مصعد قديم غير مُزوَّد بأي منظومة دعم احتياطية، ويَنقطِع الكابل، ويسقط المصعد. ما الذي عليك فِعله كي تَزيد فُرَص بقائك حيًّا، حتى إن كانت هذه الفرص واهية؟ على سبيل المثال، أينبغي عليك أن تقفِز إلى الأعلى قبل ارتطام المصعد بقاع البئر؟

الجواب: النصيحة الأفضل هي أنه ينبغي عليك الاستِلقاء على أرضية المصعد. قد تظنُّ أن هذا الفعل مُستحيل نظرًا لأنك أنت والأرضية تسقُطان، لكن من المؤكَّد وجود قدْر من المُقاومة واقِع على الحُجيرة من قضبان التوجيه التي تنزلِق على امتدادها ومن الهواء الذي تسقُط عبره؛ ومِن ثَمَّ يمكنك السقوط على الأرضية. وهناك عليك أن تفرد جسَدَك، ومن الأفضل أن تستلقي على ظهرك. الفكرة هي توزيع القوة، التي تُوشِك على التأثير عليك، على أكبر قدر مُمكن من مساحة السطح.

لا يُنصَح بالبقاء واقفًا؛ لأنَّ حينَها ستكون القوَّة موزَّعة على مساحة صغيرة، كمساحة المقطع العرضي لكاحِلَيك. وإذا كان الاصطدام عنيفًا فسينهار كاحِلاك ويَرتطِم جزعك بالأرضية.

أما عن القفز في اللحظة الأخيرة (بالتأكيد من المُستحيل تحديد التوقيت الصحيح وأنت في حُجيرة مُغلقة) فربما يُعدُّ أسوأ ما يُمكن فعله. فإذا قفزت إلى الأعلى في وقتٍ ما خلال السقوط، فستُقلِّل على الأرجح سُرعة هبوطك. افترض أن الحُجَيرة ارتدَّت من قاع البئر، حينها سيكون اتجاه حركتك إلى الأسفل بينما اتجاه حركة الحجيرة إلى الأعلى، وبعد ذلك ... حسنًا، لا داعي للخَوض في تفاصيل مُرعِبة.

قصة قصيرة

(٥٤) ارتطام قاذفة قنابل بمبنى إمباير ستيت

في التاسعة وخمسٍ وأربعين دقيقة من صباح يوم السبت، ٢٨ يوليو ١٩٤٥، ارتطمت قاذفة قنابل تابعة للجيش الأمريكي من طراز بي-٢٥ بالطابقَين ٧٨ و٧٩ من مبنى إمباير ستيت بمدينة نيويورك بينما كانت تطير عبْر ضبابٍ كثيف. قُتل رُكاب الطائرة الثلاثة وعشرة عمال كانوا داخل المبنى، وجُرِح ٢٦ شخصًا آخرون. ولو وقَعَ الحادث في أحد أيام العمل العادية لكانت الحصيلة أعلى بكثير.

تسبَّب الاصطدام في انتزاع جناحَي القاذفة ودفْع بدنها ومُحرِّكَيها داخل المبنى، وهناك اشتعل الوقود وكان ساطعًا لدرجة أنَّ المشاهدين الموجودين في الشارع أمكنهم رؤيته رغم الضباب. مرَق أحد المُحرِّكَين من المبنى تمامًا وخرج من الجانب الآخر ليسقُط على سطح مبنًى من اثنَي عشر طابقًا، وهناك أشعل حريقًا آخر.

وحين ارتطمت القاذفة بمبنى إمباير ستيت فإنها ضربت واحدة من العوارض في منطقة المصاعد وأتلفتها هي وبعض كابلات المصاعد أيضًا. تسبب انفجار الطائرة في دفع واحدة من عاملات تشغيل المصاعد، كانت قد فتحت الباب للتوِّ في الطابق الخامس والسبعين، خارج المصعد ثم أمسَكَت بها النار بفعل الوقود المُحترِق الذي كان يتدفَّق نزولًا داخل بئر المصعد. أطفأ زميلان لها النار التي أمسكت بها، وبعد منحها الإسعافات الأولية رافقاها إلى مصعدٍ آخر، حيث وافقت زميلة لها من مُشغِّلي المصاعد على اصطحابها إلى الطابق الأول للحصول على مزيدٍ من المساعدة الطبية. وبمجرَّد إغلاق باب المصعد سُمعَت

كابلات المصعد وهي «تنقطع مُصدِرةً صوتًا أشبَهَ بطلقة البندقية»، وسقطت حجيرة المصعد إلى قَبو المبنى.

كان عمال الإنقاذ الذين وصلوا إلى قَبو المبنى بعد وقتٍ قصير يتوقَّعون أن يجدوا شاغلتَي المصعد ميِّتَتَين. لكن بعد أن أحدثوا فتحةً في جدار القبو للوصول إلى الحُجيرة، وجدوا كِلا المرأتَين على قيد الحياة، وإن كانتا تُعانيان من إصابات جسيمة. لقد سقطت المرأتان أكثر من ٧٥ طابقًا، لكن يبدو أن أجهزة الأمان بالمصعد قد أبطأت سرعة الهبوط بما يَكفي بحيث تُقلِّل أثر الاصطدام بقاع البئر. لا تُوجَد تقارير عمَّا فعلته المرأتان خلال السقوط، لكن بسبب الخوف والارتجاج، أشكُّ أنهما ظلَّتا واقِفَتَين.

(٥٥) السقوط خلال الألعاب القتالية والهبوط خلال القفز بالمظلات

حين يُطرَح أحدهم أرضًا خلال ممارسة لعبة الجودو أو الآيكيدو، كيف يَنبغي عليه الهبوط من أجل تقليل احتمالات تعرُّضه للإصابة؟ وكيف يتمكَّن المصارِعون المُحترِفون من تجنُّب الإصابة حين يُلقُون بأنفسهم أو يلقي بعضُهم بعضًا على حلبة المصارعة؟ في أيٍّ من هذه الحالات، لو لم يسقُط الشخص بصورة سليمة، ثمَّة احتمال كبير أن تتعرَّض عظامه للكسْر أو تتعرَّض أعضاؤه الداخلية للإيذاء.

كيف ينبغي على المِظَلِّي أن يهبط بحيث يُقلِّل خطر تعرُّضه للإصابة؟ فرغم أنَّ المظلَّة تُقلِّل كثيرًا من سرعة الهبوط إلا أن هذه السرعة لا تزال ملحوظة، وهي تعادل القفز من نافذة بالطابق الثاني.

الجواب: ينبغي عليك السقوط بطريقةٍ تزيد منطقة التلامُس مع الأرض بأكبر قدْر ممكن. هذا الأسلوب يُقلِّل القوة الواقعة على كلِّ وحدة مساحة لجُزء الجسم الذي يضرب الأرض، ويُقلِّل احتمالات تعرُّض إحدى العظام للثَّني أو الالتواء وصولًا إلى نقطة الانكسار، أو تعرُّض أحد الأعضاء الداخلية للضغط وصولًا إلى درجة التمزُّق. وإذا طُرحتَ أرضًا في لعبة الجودو أو الآيكيدو، فعليك أن تضرِب الأرضية بذراعَيك بينما يرتطِم بها جذعك. إن الذراعَين تزيدان مساحة الاتصال، كما يساعد ضربُ الأرضية بذراعيك في رفع الجسم وتقليل قوة الاصطدام على القفَص الصدري. المصارعون المُحترِفون يكونون عادة في حالة بدنية ممتازة، ويُمكنهم تحمُّل سقطات عالية (كما يحدُث حين يقفز أحدهم من أعلى الحبال على خَصم راقدٍ على الحلبة). كما أنهم يتقاتَلون على أرضية تتَّسم بالمرونة الشديدة.

وحين يَهبِطون عليها فإنَّ مدة الاصطدام تطول بفعل هذه المرونة؛ ومِن ثَمَّ تَنخفِض قوة الاصطدام.

يتدرَّب المظلِّي على السقوط والتدحرُج، أولًا عن طريق لمس الأرض بأخمصَي القدم، ثم ثنْي الركبتَين والاستدارة بحيث يَهبط على جانب الساق، وفي النهاية على الجانب الخَلفي للصدر. لهذا الإجراء مزيتان؛ فهو يُطيل مدَّة الاصطدام (ومن ثَم يُقلِّل القوة المؤثِّرة على المظلِّي) كما ينشر قوة الاصطدام على مساحةٍ كبيرة. وإذا هبط المظلِّي واقفًا، فمن المُرجَّح أن يؤدِّي الضغط الواقع على عظام الكاحِلين إلى كسر العظام.

(٥٦) فِراش المسامير

أدخلتُ عرض فراش المسامير في تعليم الفيزياء بعد أن رأيتُه كجُزء من عرض نظري للعبة الكاراتيه. تتألَّف نُسختي من العرض من جزأين؛ في الجزء الأول أرقد عاريَ الجذع بين فِراشَين من المسامير يقِف أعلاهما شخصٌ أو شخصان. ورغم أن المسامير تُؤلم فإنها نادرًا ما تخترق جسدي. ما العامل الذي يُقلِّل خطر الاختراق؟

في الجزء الثاني أستلقي مُجدَّدًا بين فِراشَين من المسامير ويضع مساعدٌ لي قالبًا خرسانيًّا على الفِراش العلوي ثم يُحطمه بمطرقةٍ ثقيلة. هذا الجزء خطير لعدَّة أسباب؛ أحدُها هو الحطام الذي يمكن أن يُصيب العينَين أو الأسنان. (ذات مرة قدَّمتُ «عرض السيرك الجوال» وكان عرض فِراش المسامير هو الفقرة الختامية فيه، غير أنَّ مُساعدي المُعتاد لم يتمكَّن من الحضور؛ ومن ثَمَّ استعنتُ بالأستاذ الذي كان قد وجَّه لي الدعوة. وقد ضرب المطرقة بقوةٍ لكنَّه ارتطم بالقالب الخرساني بزاويةٍ جعلت مُعظم قطع الخرسانة تندفع نحو وجهي. اخترقتْ إحدى القطع ذقني وحين نهضتُ مترنِّحًا كي أُلقي تعليقاتي الختامية كان الدم يتدفَّق بغزارةٍ على جسدي وبنطالي وحذائي. لم يَحدُث مطلقًا أن مررتُ بنهايةٍ درامية لأحد أحاديثي كهذه النهاية، أو بمثل هذه الاستجابة من الجمهور.) لماذا يكون استخدام قالبٍ كبير أكثر أمانًا من استخدام قالبٍ صغير؟

الجواب: حين يقف الناس عليَّ، فإن وزنَهم يتوزَّع على عددٍ كافٍ من المسامير في الفراش العلوي بحيث إنَّ القوة الآتية من كلِّ مسمار تكون في المعتاد غير كافية لاختراق جلدي. تكون القوة الآتية من المسامير الضاغطة على ظهري أكبر، لأنها تتحمَّل وزن جسدي أيضًا. وعبر التجربة اكتشفتُ مقدار الوزن الذي يمكن أن يكون عليه الأشخاص

الذين سيَقِفون فوقي قبل أن تخترق المسامير جسدي. (لا تظن أنَّ الأمر غير مُؤلِم؛ لأن هذا العرض يُؤلِم كثيرًا.)

إن القالب الكبير الذي يُهَشَّم لا يضيف بريقًا مسرحيًّا إلى العرض وحسْب، وإنما يزيد أيضًا من الأمن بثلاث طرق: (١) إذا كنتُ سأُضغَط بشدة، فإن القالب الموضوع بالأعلى يجب أن يَتسارع حينها بقوة إلى الأسفل، والقالب الأكبر سيُقلِّل التسارُع بسبب كتلته الأكبر. (٢) أغلب طاقة المطرقة الثقيلة تعمل على تَفتيت القالب ولا تدخل في حركة الفراش. (٣) حقيقة تفتُّت القالب تعني أنَّ وقت الاصطدام يكون أطول مما عليه الحال لو لم يكن القالب موجودًا؛ ومِن ثم تكون القوة في عملية الاصطدام أصغر ممَّا ستكون الحال عليه خلاف ذلك. حين قدمت عرض فراش المسامير للمرة الأولى في الفصل الدراسي استخدمتُ قالبًا صغيرًا بدلًا من قالب كبير. وقد تسبَّبت صدمة المطرقة التي ضربها مساعدي في رقودي مصعوقًا من الألم على الأرض لعدة دقائق.

(٥٧) ملاعق مُعَلَّقَة

نظِّف ملعقة خفيفة ونظِّف جلد أنفك، ثم ازفر برفقٍ في السطح الداخلي للمِلعقة ثم ضعها بحيث يرتكز ذلك السطح على أنفك. اختبر الالتصاق عن طريق تغيير وضعية المِلعقة ثم التخلِّي عنها جزئيًّا. حين تشعُر أنها التصقَت اترُكها. وهكذا صار لدَيك ما أردتَه دومًا؛ ملعقة تتدلَّى من فوق أنفك. من يستطيع مقاومتك الآن؟

لماذا تتعلَّق المِلعقة؟ كيف يساعد الزفر فيها أولًا؟ هل يُمكنك تعليق ملاعق على أجزاء أخرى من وجهك، أو على أجزاء أخرى من جسدك إذا كنتَ ممَّن يُفضِّلون ذلك الأمر؟

كم من الوقت تَستطيع إبقاء المِلعقة مُعلَّقة على أنفك؟ طالما زعمتُ أن رقمي القياسي هو ساعة و١٥ دقيقة، وحققتُه في مطعم فرنسي في تورونتو. ومع ذلك، فالحقيقة هي أن ذلك كان في استراحة للشاحنات في يونجستاون بولاية أوهايو؛ حيث اقترح عليَّ عضو ضخم الجثة بعصابة للدرَّاجات النارية أن المِلعقة ستُعلَّق على نحوٍ أفضل لو أنه أعاد تشكيل ملامح وجهي.

الجواب: لو كانت المِلعقة وأنفك خاليَين من الدهون، فمن المُمكن أن يُوجد مقدار كافٍ من الاحتكاك بين الملعقة وبشرتك يُثَبِّت الملعقة في موضعها. تظلُّ الملعقة ثابتة بشرط أن يكون مركز توزيع الكتلة الخاص بها واقعًا على امتداد خطٍّ عمودي عبْر المنطقة التي تلتصِق بها على أنفك. إذا لم يتحقَّق هذا فستُدير الجاذبية المِلعقة حين تَتركها من يدك،

وهذه الحركة قد تُسبِّب انزلاق الملعقة. التكثُّف الناتج عن زفيرك الرطب يُساعِد في التصاق الملعقة بأنفك. ورغم أن طبقة الماء تعمل عمل المادة المُزلقة حين تكون سميكة نسبيًّا، فإن الطبقة الرقيقة للغاية تعمل عمَل المادة اللاصقة بسبب التجاذُب الكهربي بين جُزيئات الماء والسطحَين القريبَين للملعقة والجلد.

(٥٨) آثار الصخور المُتحركة

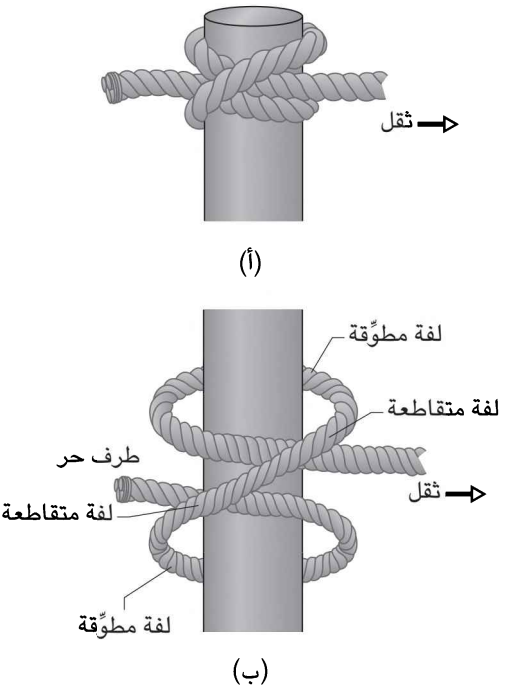
أحيانًا تترك الصخور الموجودة في قِيعان البُحيرات الجافة المُنتشرة في ولايتي كاليفورنيا ونيفادا آثارًا طويلة تمتدُّ عبْر أرضية الصحراء اليابسة. ربما تمتدُّ الآثار لمسافة عشرات الأمتار، وقد تصِل كتلة الصخور إلى ٣٠٠ كيلوجرام. ما سبب هذه الآثار؟ هل تُحاول الصخور صُنع مخرجٍ للهروب من كازينوهات القمار الموجودة في لاس فيجاس؟ هل يُدحرجها شخص غريب الأطوار على طول الطريق؟ بصرْف النظر عن السبب، من الصعب حتمًا صنع هذه الآثار لأنَّ الاحتكاك بين الصخرة والأرض الصحراوية كبير بلا شك.

الجواب: تُحاول نظريَّات كثيرة تفسير الطريقة التي تترك بها الأحجار آثارًا على الأرض. تضمَّنت إحدى هذه النظريات التجمُّد النادر لمياه الأمطار؛ إذ تتعرَّض الصخور المحصورة في طبقة رقيقة من الجليد بالصُّدفة لِهبوب عواصف من الرياح وتتخلَّف عن ذلك آثار في الأرض الصحراوية حين تكون الرياح قوية بالدرجة الكافية لتحريك الصخور وطبقة الجليد.

ثمة نظرية أخرى تقول إنَّ الصخور تترك أثرًا حين تدفعها الرياح أثناء هبوب عاصفة مُمطرة نادرة على المنطقة. وبمجرَّد أن تصير الأرض زلِقة بفعل المياه، تستطيع عاصفة الرياح أن تدفع أو تُدحرج الصخر على الأرض بحيث يترك أثرًا. يكون الاحتكاك بين الصخر والأرض في أقلِّ مستوياته حين تكوِّن المياه طبقة رقيقة من الطين فوق أساس صُلب. وربما تَدفع عاصفة من الرياح على نحوٍ مُفاجئ صخرة من وضعيَّتها المُعتادة. وبمجرَّد أن تتحرَّك الصخرة، ستحتاج إلى قوة أقلَّ لمواصلة التحرُّك.

(٥٩) العُقَد

لعُقْدَةِ الوَتَد المبيَّنة في شكل (١-١٨أ) طرفان؛ طرف حرٌّ غير مُقيَّد وطرف مقيَّد بثقل. إذا زاد وزن الثقل، فهل تنفكُّ العقدة؛ بمعنى هل يُمكن للطرف الحرِّ أن ينفلِتَ من العقدة ومِن ثَمَّ تنحلُّ العقدة؟ أم هل تكون العقدة ذاتية التثبيت؟



شكل ١-١٨: بند ١-٥٩: (أ) عقدة الوتد. (ب) عناصر عقدة الوتد.

الجواب: يمكن تحليل قوى الاحتكاك والضغط في العقدة من الناحية الرياضية لتحديد ما إذا كانت العقدة ستشتدُّ أم ستنفكُّ تحت وطأة ثقل كبير على نحوٍ اعتباطي. سنجري هنا تحليلًا بسيطًا، بدءًا بالطرف الحُر الذي لا يُمارَس عليه أي ضغط (شكل ١-١٨ب). يمرُّ الحبل من فوق جزءٍ آخر في «لفة متقاطعة» — حيث يَضغط الجزء العلوي على الجزء السُّفلي. إذا لم يمرَّ الطرف الحرُّ بسهولة عبْر اللفة المُتقاطعة، يجِب ألا يكون الاحتكاك الناتج عن ذلك الضغط أقلَّ من حدَّة الضغط المبذول لجذب الطرف الحُرِّ عبْر اللفة المتقاطعة.

وفي عقدة الوتَد، يلتفُّ الحبل حول العصا في «لفَّتَين مُطوَّقتَين». يقع طرف الجزء الملفوف الأقرب إلى الطرف الحُر تحتَ ضغطٍ ضئيل، بينما يقع الطرف الآخر تحت ضغطٍ

أكبر. وإذا كان هذا الجزء ثابتًا، يجِب أن يكون الاحتكاك بين الحبل والعصا كبيرًا بالدرجة الكافية لتحمُّل الفارق في الضغط بين الطرَفَين.

في النهاية، يمرُّ الحبل عبْر لفَّة مُتقاطعة أخرى. وعلى الجانب الآخر، يقع الحبل تحت وطأة ضغط، أيًّا ما كانت درجته، يتسبَّب فيه الثقل. فإذا كان الجزء العلوي من اللفة المُتقاطعة يضغط على الجزء السفلي بالقوة الكافية، تكون اللفة المتقاطعة ثابتة.

هكذا، تُوجد ثلاثة شروط للاحتكاك الواقع على النقاط الموجودة على طول الحبل المُستخدَم في عقدة الوتَد. فإذا كانت اللفَّات المُتقاطعة أو المطوِّقة قوية بشكلٍ خاص، فإن العقدة ستشتدُّ بوجود أيِّ ثقل. ولكن إذا كان أيٌّ منها ضعيفًا، ستنفكُّ العقدة إذا كان الثقل كبيرًا بالقدْر الكافي. تنفكُّ أنواع أخرى من العُقَد بسبب الثقل الكبير رغم قوَّة اللفَّات المُتقاطعة واللفَّات المُطوِّقة، بينما تشتدُّ بعض العُقَد تلقائيًّا لتتوافق مع أيِّ ثقل، حينئذٍ لا يمكن أن تنفكَّ إلا إذا قُطِع الحبل الموجود بين العُقدة والثقل.

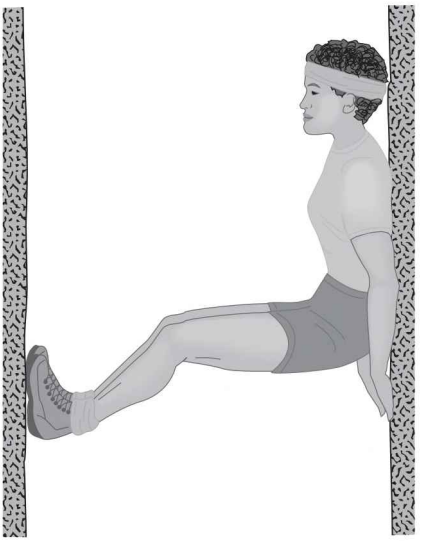
(٦٠) تسلُّق الصخور

عند تسلُّق صدْع كبير على جانب أحد الجبال، ربما يُمكنك الاستعانة بأسلوب «تسلُّق المداخن» من خلال ضغط كتفَيك على جدار وضغط قدمَيك على الجدار المُقابل (شكل ١-١٩). ستكون مُستقرًّا ما دام الضغط المبذول على الصخرة كبيرًا بالدرجة الكافية، ولكن هذا الأسلوب مُتعِب ومُنهِك. هل تُوجَد مسافة عمودية مُعيَّنة بين قدميك وكتِفَيك تُقلِّل من الضغط الذي تحتاج إلى بذلِه؟

يمكن تسلُّق صدع عمودي ضيِّق تَبرُز فيه الصخور على جانبٍ واحد أكثر من بروزها على الجانب الآخر باستخدام أسلوب «الاستلقاء على الظهر»، وفيه تَعتلي الجانب المقابل للصخور البارزة، وتُمسِك بيدَيك جانب الصدع القريب، وتَضغط قدمَيك على الجانب المقابل. هذا الأسلوب مُرهق للغاية بسبب الشدِّ العضليِّ الذي تشعُر به في ذراعَيك. فإذا كنت ترغب في تقليل الشد، فإلى أيِّ مدًى يَنبغي عليك أن تخفض قدَمَيك بعيدًا عن يدَيك؟

وإليك بضعًا من أسئلة كثيرة مُحتمَلة:

(أ) إذا وجدت، أثناء تسلُّق سطحٍ صخري عمودي، ممرًّا صخريًّا ضيقًا عند مستوى القدم، فهل ينبغي عليك أن تضغط مُقدِّمة حذاء التسلُّق أم جانب الحذاء على هذا السطح؟



شكل ١-١٩: بند ١-٦٠: أسلوب تسلُّق المداخن.

(ب) افترِض أنك تُواجِه كتلةً صخرية مُنحدِرة بشدَّة يمكنك الوقوف عليها مُنتصبًا. هل تكون أكثر ثباتًا إذا انحنَيت ووضعت يدَيك على الكتلة الصخرية لتولِّد قدرًا من الاحتكاك على يدِك؟

(ج) إذا التقتْ كُتلتان مائلتان بزاويةٍ حادَّة، فهل من الأسلم أن تتسلَّق مباشرة كتلةً واحدة من الكُتلتَين أم تتسلَّق عبْر نقطة الالتقاء؟

(د) كيف يُمكنك أن تتشبَّث بشقوق رأسية بالصخور دون أن تستعين بأسلوب الاستلقاء على الظهر؟

(هـ) لماذا يَغمِس المُتسلِّقون أصابعهم مرارًا في كيسٍ موجود بأحزمتهم ليُغطُّوا أصابِعَهم بالطباشير؟

(و) في أثناء التسلُّق باستخدام الحبل، يمرُّ الحبل عبْر حلقة تسلُّق أو أكثر (وهي عبارة عن حلقات معدنية مُثبتة في الصخور) لتيسير الطريق على مُتسلِّق آخر. هل ينبغي عليك أن تستخدِم حبلًا يتَّسِم بقدرٍ كبير من المُرونة أم حبل يكاد يخلو من المرونة؟

(ز) تتمثَّل ميزة استخدام حلقات التسلُّق في أنَّ المُتسلِّق يُمكنه السقوط لمسافة مُعيَّنة فقط إلى الحلقة التالية مباشرة. ورغم ذلك، ثمَّة خطورة طفيفة مُتمثِّلة في احتمالية تمزُّق الحبل وهو يتمدَّد أثناء الهبوط. يعتقد الكثير من مُتسلِّقي الصخور المُبتدئين أنَّ هذه الخطورة مرهونة بارتفاع المُتسلِّق فوق آخِر حلقة قبل الهبوط مباشرةً؛ فكلَّما كان هذا الارتفاع كبيرًا، تمدَّد الحبل أكثر وصار خطر تمزُّق الحبل أكبر. لماذا يُعتبَر هذا الاعتقاد خاطئًا؟

(ح) بعض أنواع العناكب تستخدِم في تسلُّقها خيط أمان من الحرير، يُسمَّى خيط السَّحب، والذي من شأنه أن يُساعدها في الهبوط بأمان. ومن المُثير للدهشة أن خيط السَّحب هذا يتَّسم بقدرٍ قليل من المرونة ولا بدَّ أن ينقطع حتى وإن هبط العنكبوت بسرعة مُعتدلة. لماذا، إذن، ينتج العنكبوت خَيط السَّحب؟

(ط) يُعاني الكثير من المُتسلِّقين المحترفين آلامًا مُزمنة على طول أصابعهم، وبعض المُتسلِّقين يُعانون أيضًا من تورُّمٍ ملحوظ في راحة اليد ناحية الإصبع المُصاب؛ وذلك عند تحريك الإصبع ناحية راحة اليد. ما الصِّلة التي تربط بين التورُّم والألم وفيزياء التسلُّق؟

الجواب: أولًا: إليك تحذير مهم: يَجِب عدم تجربة أيٍّ من الأمثلة الواردة لتسلُّق الصخور دون توجيهات الخبراء، نظرًا لوجود الكثير من المُتغيِّرات والافتراضات بما يجعل هذه التفسيرات تقريبية وحسب.

في أسلوب «تسلُّق المداخن»، ثمَّة موضع أفضل للأقدام إذا كنتَ ترغب في تقليل الضغط اللازم من جانب القدمَين والكتِفَين على الصخرة. وبوجهٍ عام، يُمكنك أن تُحقِّق هذا من خلال وضع قدمِك في وضعية مُنخفِضة نوعًا ما ثُمَّ تقلِّل الضغط الذي تبذُله حتى تكون قدماك على وشْك الانزلاق. وإذا رفعتَ قدمَيك بينما تُواصِل قدماك الانزلاق، فأنت تُقلِّل بهذا الضغط اللازم بدرجةٍ أكبر. ورغم ذلك، فهذا التصرُّف يزيد الاحتكاك المطلوب اللازم عند الكتِفَين لأنَّ الاحتكاك عند القدَمَين صار الآن أقل، ويجِب أن يكون إجمالي قوى الاحتكاك مُساوية دومًا لوزنِك إذا كنتَ لا تُريد أن تَسقُط. إذا واصلتَ تبديل قدمَيك لأعلى حتى يَصير كتفاك على وشْك الانزلاق، تكون بذلك قد وصلتَ إلى الوضعية التي تستلزِم أقلَّ ضغطٍ على الصخر.

ولأسلوب التسلُّق بالاستلقاء على الظهر موضعٌ أفضل للقدَمَين بحيث يقلُّ الشدُّ العضلي في الذراعين. ابدأ بوضع القدَمَين في مكانٍ مُرتفِع واخفضهما تدريجيًّا أثناء تقليل الضغط.

وعندما تخفضهما بالقدْر الكافي حتى تكونا على وشْك الانزلاق، يكون الضغط في أقلِّ مُستوياته.

إجابات بقية الأسئلة بالترتيب:

(أ) يُكتسَب أقلُّ قدرٍ من الجهد باستخدام جانب الحذاء. ومن أجل تَثبيت القدَمين، لا بدَّ أن تقاوِم عضلات الساقَين عزم الدوَران من خلال القوى المبذولة على السطح الصخري. ويكون عزم الدوَران أكبر عند استخدام مُقدِّمة الحذاء لأنَّ المسافة بين إصبع القدم وعظمة الساق أكبر من المسافة بين جانب القدَم وعظمة الساق.

(ب) كقاعدة عامَّة، ستكون أكثر ثباتًا إذا وقفتَ مُنتصبًا. بكل بساطة قد يتطلَّب الانحناء الكثير من الاحتكاك عند القدَمَين؛ ومِن ثَمَّ قد تنزلقان. كما أنك تكتسِب قدرًا يسيرًا من الاحتكاك من خلال يدَيك، إذا ما بالغتَ في الانحناء إلى الأمام، قد يتسبَّب الاحتكاك المتولِّد عليهما في انزلاقهما لأسفل على المُنحدَر وهو ما يُؤثِّر على ثباتهما.

(ج) تسلَّق من عند نقطة الالتقاء لأنها بالضرورة أقلُّ ميلًا من أيٍّ من الكُتلتَين.

(د) قد يُوفِّر الكثير من الشقوق الرأسية الدعم والارتكاز إذا أمكنَك تثبيت أصابعك أو يدِك أو ذراعِك أو قدمِك أو ساقِك عليها ثم الضغط على الجانبَين.

(هـ) يَستخدم المُتسلِّقون الطباشير لامتصاص الرطوبة من أطراف الأصابع وهو ما يُوفِّر لهم مسكًا مُحكمًا للسطح الصخري. ثمَّة اعتقاد شائع مَفادُه أن الرطوبة تقلِّل الاحتكاك الثابت (الاستاتيكي) بين الأصابع والصخرة، وهكذا ينبغي أن يُعيد الطباشير الاحتكاك مرة أخرى إلى قيمة البشرة الجافة. ورغم ذلك، كشفت إحدى الدراسات أنَّ الطباشير «يُقلِّل» فعلًا الاحتكاك لسببَين؛ أولًا: عند تجفيف البشرة، يُقلِّل الطباشير تَقَيُّد أطراف الأصابع. ثانيًا: تنساب ذرَّات الطباشير من طبقةٍ زلقة بين أطراف الأصابع والصخرة. ومع ذلك، لا يزال الطباشير خيارًا مُفضَّلًا بشدَّة بين مُتسلِّقي الصخور؛ ولكن الأمر يتطلَّب المزيد من الدراسات.

(و) يستخدم مُتسلِّقو الصخور (على النقيض من مُكتشفي الكهوف) حبلًا يتمدَّد على نحوٍ كبير تحت الضغط، بحيث إذا وقَعْت، لا تتوقف فجأة عند نهاية مسافة السقوط ولا تكون القوة المُعيقة لك هائلة؛ فحين يبدأ الحبل يتمدَّد، تحكُّ بعض المواد المصنِّعة للحبل بعضها بعضًا وتَصير أكثر دفئًا، ومُعظم طاقة الوضع والطاقة الحركية التي تَفقِدها أثناء السقوط ينتهي بها المطاف بالتخزين كطاقةٍ حرارية داخل الحبْل.

(ز) يعرف المُتسلِّقون المُتمرِّسون أنَّ خطورة تمزُّق الحبل تتوقَّف على «معامل الهبوط» «٢أ/ط»؛ حيث إنَّ «أ» هو ارتفاع المُتسلِّق فوق أعلى حلقةٍ معدنية و«ط» هو طول الحبل بين المُتسلِّق والموضع الذي يُثبت فيه الحبل، عند «ممسك حبل السلامة» على الأرجح. وبناءً على قيمة كلٍّ من «أ» و«ط»، ربما يكون معامل الهبوط عاليًا على نحوٍ خطير حين يكون «أ» قليلًا و«ط» قليلًا أيضًا. وعندما يهبط المُتسلِّق وتزداد قيمة (ط)، لا تكون قيمة (أ) على نفس القدْر من الخطورة.

(ح) عندما يصِل العنكبوت إلى طرف خَيط السَّحب أثناء الهبوط، فإن القوة الواقعة عليه من خَيط السحب تجذب المزيد من النسيج من المِغزال الموجود في العنكبوت. والقوة الواقعة على العنكبوت من خَيط السحب ليسَت شديدة للغاية لتمزُّق خيط السحب عند وصول العنكبوت لنقطة توقُّف.

(ط) يُصيب الكثير من مُتسلِّقي الصخور أصابعهم عندما يُمسكون بها في وضعية «التشبُّث»؛ حيث يضغط المُتسلق بأصابعه الأربعة ليُحكِم مَسكته بنُتوء علوي مَحدود. وحين يكون وزن المُتسلِّق مدعومًا بأكمله بهذه الطريقة، قد تتضرَّر الأصابع. ولا سيما حين تُمسك الأصابع بالمكان من خلال الأوتار التي تمرُّ عبْر الغُمَد الإرشادية، التي يُطلَق عليها الغُمَد الوَتريَّة، المُتَّصلة بعظام الإصبع. فإذا كان الوزن بالكامل مدعومًا بالأصابع، فإن القوى المطلوبة من هذه الأوتار قد تُمزِّق الأوتار عبْر الغُمَد الوَتريَّة. بعد ذلك، لا يُعاني المُتسلِّق من ألَمٍ في الأصابع وحسب، بل ويُعاني أيضًا من تورُّمٍ ملحوظٍ عندما تتشبَّث الأصابع لأنَّ الأوتار لم تَعُد مشدودةً لتكون مُلتصقة بالعظام.

(٦١) كباش الجِبال الصخرية وتسلُّق الصخور

يَرتدي مُتسلِّقو الجبال أحذيةً ذات نعالٍ خاصَّة لاكتساب قوًى احتكاكية كبيرة بين الحذاء والصخور التي يتسلَّقون عليها. وإذا كانت الصخور مُبتلَّة، يمكن أن يصير التسلق خطيرًا. بالطبع، يُواجِه الكثيرون منا صعوبة أثناء السير على أرضية مُبتلَّة دون حدوث انزلاق. لا تَرتدي كباش الجبال الصخرية أحذيةً ذات نِعال خاصة إلا أنها تستطيع تسلُّق المنحدرات الصخرية بدون حِرصٍ بالغ حتى وإن كانت الصخور مُبتلَّة أو مُغطَّاة بالطحالب. فكيف تتشبَّث الكباش بالصخور؟

الجواب: السائر يَلمس الأرضية بكعب قدَمه أولًا. فإذا كانت الأرضية مُبتلَّة، يُواجه الكعْب قدرًا قليلًا من قوة الاحتكاك التي تُوقِفه عند أول نقطة للتلامُس وقد يَنزلِق الكعْب مُتسبِّبًا في سقوط الشخص. يَلمس كبش الجبال الصخرية الصخر من خلال الجزء الخلفي من الظلف، عند نقطة التِقاء إصبعَي الحافر. يتَّسِم هذا الجزء بكونه ضيِّقًا بالقدْر الكافي لاختراق الطحالب أو أيِّ شيءٍ آخَر يُغطِّي الصخور. وبينما يضغط الوزن على الحافر، تَلتصِق الإصبعان أكثر بالصَّخْر وينزلق كلٌّ منهما بعيدًا عن الآخر ليُكوِّنا منطقة تماسٍّ مع الصخرة على شكل الحرف V. ومن خلال الانزلاق بهذه الطريقة، يحكُّ إصبعا الحافر الصخر ليُزيلا بذلك المواد التي قد تكون زلِقة ويُقحِم الإصبعان نفسيهما في أيِّ مناطق وعرة موجودة بالصخور، وبذلك يُمنَع الحافر من الانزلاق إلى الأمام حين يَضغط الوزن عليه.

(٦٢) نَقْل التماثيل بجزيرة القيامة

نحَتَ أهل جزيرة القيامة القدماء مئات التماثيل الحجرية الضخمة في محاجرهم الخاصة ونقلُوها إلى مواقع أثرية في مختلف أنحاء الجزيرة. كيف تمكنوا من القيام بذلك باستخدام وسائل بدائية؟

الجواب: نَقَل أهل الجزيرة القدامى التماثيل الحجرية الضخمة — التي تُشتَهر بها جزيرة القيامة — من خلال تثبيت كلِّ تمثال على زلَّاجة خشبية ثم سحب الزلاجة عبْر «ممر» يتكوَّن من جذوع خشبية مُتماثلة تقريبًا لتقوم مقام العجلات الصغيرة. وعلى الرغم من أنَّ سحْب الزلَّاجة تطلَّب جهدًا هائلًا من جانب أهل الجزيرة (أي قدرًا هائلًا من الطاقة)؛ فقد كان أسهل كثيرًا من سحب التماثيل عبْر الأرض، والذي سيتطلَّب التغلُّب على الاحتكاك الناتج عن الأرض. وفي مشهد لإعادة تمثيل استخدام تقنية النقل بالعجَلات في العصر الحديث، استطاع ٢٥ رجلًا أن ينقلوا تمثالًا مماثلًا لتماثيل جزيرة القيامة يزن ٩ آلاف كيلوجرام مسافة ٤٥ مترًا على أرض مستوية في دقيقتَين.

(٦٣) نَصْب ستونهنج الأثري

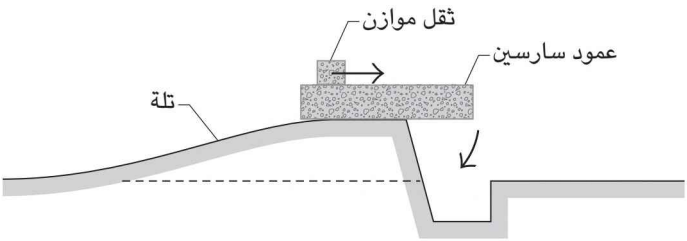
كيف نُقلت ورُفعت الكتل الحجرية لنَصب ستونهنج الأثري، الصرْح الميغليثي الموجود بسهل ساليسبري بإنجلترا، إلى موقعه الحالي؟ أعمدة «السارسين» هي الكتل الحجَرية الضخمة المُنتصِبة؛ و«الأعتاب» هي الكتل الحجرية الأصغر حجمًا التي تُباعِد بين عمودَين من السارسينز.

الجواب: من المُستبعَد أن تكون الكتل الحجرية قد نُقلَت لمسافة تزيد عن ٥ إلى ١٠ كيلومترات بالرغم من الحكايات الخيالية والخطط العبقرية التي تُنسَب لها. أُتيحَت جميع الكتل الحجرية للبنَّائين القُدامى، ربما بعد أن نُقلت من المنبع بفعل التدفُّق الجليدي أثناء العصور الجليدية المُبكِّرة، وذلك قبل فترةٍ طويلة من بناء نصب ستونهنج. ومن أجل تحريك كُتلة حجرية، ربما صنع البنَّاءون جسمًا مُتدحرِجًا منها عن طريق توثيق جذوع وكتل حجريَّة أصغر حجمًا حول الكتلة الأساسية بُغية تكوين أسطوانة (على نحوٍ تقريبي). وبعد ذلك، من خلال مجموعات من الأفراد تجذب الحبال، أمكن دحرجة الأسطوانة على أرض مستوية أو حتى سحبها أعلى مُنحدَرات سهلة. وقد حرك بعض الهواة في العصر الحديث كتلًا حجرية بهذه الطريقة.

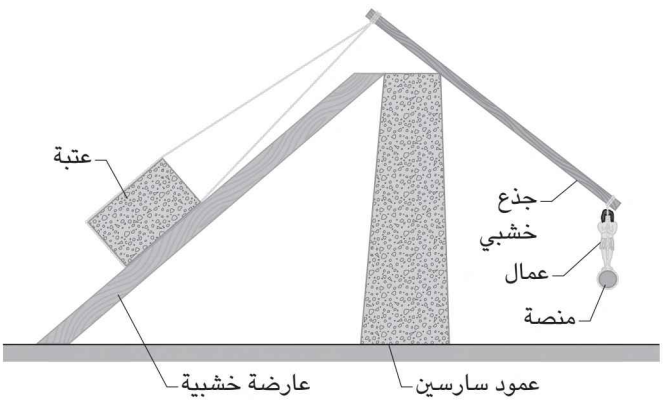
ثمَّة إجراء من المُرجَّح أكثر أنَّ البنَّائين القُدامى قد استعانوا به وتمثَّل في رفع كتلة حجرية على مِزلَجة مكوَّنة من جذوع خشبية مربوطة معًا. ثم يَجرُّ المزلجةَ مجموعات من الأفراد أو حيوانات السُّخرة التي تجذب الأحبال، ويُيَسِّر إحراز التقدم في هذا الصدد سكب الشحم على الأرضية أمام مجرى المِزلَجة. وقد حرَّك بعض الهواة في العصر الحديث كتلًا حجرية بهذه الطريقة أيضًا.

ومن المُحتمَل أنَّ رفع أعمدة السارسين الموجودة في موقع البناء تمَّ من خلال سحب المِزلَجة أعلى تلَّة تنتهي على نحو مُباغِت بفتحة (شكل ١-٢٠أ). تُوضَع على الأرجح كتلة موازِنة أعلى مؤخِّرة عمود السارسين في أثناء سحب العمود فوق حافة التلَّة المُطلَّة على الفتحة. قام الثقل الموازن بدور ضابط حركة عمود السارسين كما أنه أتاح للنقطة المركزية بعمود السارسين أن تُسحَب فوق الحافة. ومع موازنة عمود السارسين، يُجذَب الثقل الموازِن إلى الأمام حتى يدور العمود ويقع في الفتحة. وتُشدُّ الأحبال الموجودة حول الجزء العلوي من عمود السارسين المائل لكي يَنتصِب العمود في وضع رأسي.

تمَّ تجربة إحدى الطُّرق المُمكنة لرفع عتبةٍ أعلى عمودي سارسين مُتجاوِرَين في العصر الحديث ببلدة تشيكية صغيرة؛ فتمَّ سحْب كتلة خرسانية (تزن ٥١٢٤ كيلوجرامًا) على طول عارضتَين من خشب البلُّوط ذات أسطح مُفرَّغة ومُزلَّقة بشحم (شكل ١-٢٠ب). كل عارضة من هاتَين العارضتَين اللَّتَين يبلُغ طول الواحدة منهما ١٠ أمتار تمتدُّ من فوق الأرض إلى قمَّةِ واحد من العمودين المُنتصِبَين اللذَين سيُرفَع عليهما الكتلة الخرسانية. سحب الكتلة كان من خلال الأحبال الملفوفة حولها وحول أعلى طرفَي الجِذعَين من خشب الصنوبر. ثُبِّتَت منصة عند الطرف المقابل لكل جذع، عندما كان يجلس أو يقِف عددٌ



(أ)



(ب)

شكل ١-٢٠: بند ١-٦٣: (أ) نصب عمود سارسين في نصب ستونهنج الأثري. (ب) رفع عتبة.

كافٍ من العمال على المنصة، كان يدور جذع الصنوبر المربوط عند قمة العمود المُنتصِب ويَسحب طرف الكتلة على إحدى العارضتَين لمسافة قصيرة. وبمجرَّد أن تتحرَّك الكتلة، تُوضَع المصدَّات عند الطرف السُّفلي لمنع انزلاقها لأسفل مرةً أخرى عند تَصحيح وضْع المنصة لسحب الكتلة مرة أخرى. ومن خلال دحرجة الكتلة أعلى عوارِض خشَب البلُّوط (التحرُّك على جهة ثم على الجهة الأخرى)، لم يتطلَّب الأمر سوى توافُر ثمانية أو تسعة أشخاص فقط على المنصة.

(٦٤) رفْع أحجار الأهرامات المصرية

تَعيَّن على بناة الأهرامات المصرية نقل الأحجار (التي يَزن الواحد منها في المتوسط ٢٣٠٠ كيلوجرام وبلغ وزن بعضها ١٤٠٠٠ كيلوجرام) من المَحْجر إلى المزالج، التي تتحرَّك بعد ذلك إلى خارج المَحجَر. كيف أمكن نقلُ الأحجار دون الاستعانة بماكينات أو أنظمة بكرات أو أدوات مزوَّدة بعجلات؟

ربما لعِبَت الطريقة التالية دورًا في الأمر: يُثبَّت الحجر بوتدٍ إلى أعلى لتُتيح لعدة أعمدة مَرِنة أن تُوضع أسفل منه، بحيث تمتدُّ إلى خارج جانبَي الحجَر المُتقابلَين. ثم يُرفَع الطرف الظاهر لعمود أو أكثر لمسافة ضئيلة (لنقل نصف سنتيمتر) ويُثبَّت في المكان بمادة قوية تُدَسُّ تحت الأطراف. ويُكرَّر الإجراء بعد ذلك مع أكثر من عمود، إلى أن تُرفَع جميع الأعمدة بالقدْر نفسه. وبذلك يكون الحجَر على ارتفاعٍ أعلى. كيف أتاح هذا الأسلوب لبضعة أشخاصٍ أن يرفعوا وزنًا ضخمًا، ولماذا تُمثِّل مرونة الأعمدة أهمية؟

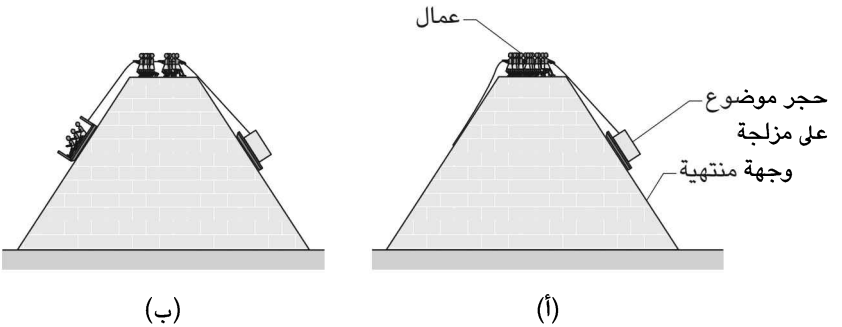
في موقع الأهرامات، كيف استطاع العمَّال أن يرفعوا الأحجار إلى موضعها على الهرَم؟ بالأحرى، هل استُخدِمَت مُنحدَرات ترابية؟

الجواب: رفع كتلة حجرية كبيرة باستخدام أعمدة مَرِنة أسهل كثيرًا من رفعها بأعمدة صُلبة. لنفترض أنَّ الأعمدة الصُّلبة هي المُستخدَمة في رفع الأحجار. لرفع الطرف الظاهر لواحدة من الأعمدة، عمود واحد عند طرف الحجَر مثلًا، قد يَضغط العمال على الطرف بقوة متزايدة تكاد تتوافق مع وزن الحجَر. ويرجع السبب إلى أنه حين يُرفَع الحجَر بواسطة ذلك العمود، فإنه يتحرَّر (ومن ثَمَّ يفقد الدعم) من جميع الأعمدة باستثناء واحدٍ من الأعمدة الأخرى؛ ومن ثَمَّ سيتعيَّن على العمَّال أن يُقدِّموا ذلك الدعم الهائل.

بينما يمكنك، باستخدام الأعمدة المرِنة، أن ترفع طرف أيِّ عمود من الأعمدة بقوةٍ أقلَّ كثيرًا من وزن الحجَر. ويرجع السبب في ذلك إلى أنه حين يُرفَع الطرف، لا يتحرَّر الحجَر من الأعمدة الأخرى التي تُواصِل دعمه.

ولرفع الحجارة في موضعها على الهرَم، ربما استعان العمال بمُنحدَرات تُرابية، إما على جانب الهرم مباشرةً أو حول الهرم في مسار حلزوني. فمن المُرجَّح أنَّ مجموعة من الرجال سحبوا الحجارة لأعلى المُنحدَر باستخدام الحبال، مُستخدِمين المياه لتقليل الاحتكاك بين الحجارة ومسارها. قد يُقلِّل الصعود التدريجي القوة اللازمة ومِن ثَمَّ يُقلِّل العدد اللازم من الرجال لرفع حجَر. وعلى الرغم من ذلك، وبقدْر ما تبدو تلك الحقيقة مُغرية، ربما

كانت المُنحدَرات ضخمة (يبلغ طولها حتى ١,٥ كيلومتر) وسحب حجر ضخم عند زاوية منحدر حلزوني ربما كان بطيئًا ومُجهدًا.



شكل ١-٢١: بند ١-٦٤: إعدادَان لسحب كتلة حجرية أعلى الهرم.

والأكثر ترجيحًا أنَّ الحجارة سُحبَت على مزالج موضوعة على جانب الهرَم مباشرة، مع استخدام جانب الهرَم كمنحدر (شكل ١-٢١أ). ومع الانتهاء من بناء كل طبقة من الهرم، يَرفع العمال الأحجار على السطح الخارجي ثم يقومون بتسويتها (تمليسها). وقد تُواجه المِزلجة — التي تُسحَب على طول الوجهات الحجَرية المستوية مع وجود مياه لتُزلِّق مجرى المزالج — قدرًا قليلًا من الاحتكاك. وتُشير الحسابات إلى أنَّ فريقًا من ٥٠ رجلًا بإمكانه أن يرفع حجرًا مُتوسِّط الوزن خلال بضع دقائق، وهو مُعدَّل من شأنه أن يُتيح بناء الهرَم في غضون الفترات الزمنية المُسجَّلة تاريخيًّا. بل إنَّ بناء الأهرامات سيَستلزم عددًا أقلَّ من الرجال لو أُدلِيَت الحبال فوق موقع البناء وصولًا إلى مِزلجة على الجانب المُقابل من الهرم (شكل ١-٢١ب). تلك المِزلجة والرجال الذين بإمكانهم الركوب عليها من شأنها أن تقوم مَقام الثقل الموازن. وما إن يُحرِّك الرجال، الواقفون أعلى موقع البناء، المِزلجة المُتَّجهة إلى أعلى، فإن المِزلجة المتجهة إلى أسفل من شأنها أن تُساعد في سحبِها إلى أعلى. ولهذا النظام ميزة تمثَّلت في أنَّ المزالِج الفارغة تعود إلى الأرض بحيث يمكن إعادة تحميلها.

(٦٥) لعبة اللفائف المُتَّصِلة (سلانكي)

لعبة اللفائف المُتَّصِلة هي لعبة يدَوية حركية شهيرة من إنتاج شركة بووف سلانكي، يُمكن أن تجعلها تتحرَّك إلى أسفل (لعلَّ تَقفِز لأسفل هو الوصف الأدق) لعدَّة درجات من السُّلَّم. فأنت تضع اللفائف عند أعلى درجة، وتجذِب أولى حلقات اللفائف إلى أعلى ثم إلى أسفل لتَنتقِل الحركة إلى الدرجة الثانية، ثم تتركها. تهبط اللفائف إلى أسفل حتى تصِل إلى آخر درجةٍ بشرط أن تكون أبعاد الحلقات مُلائمة. والوقت الذي تَستغرقه لعبة اللفائف المُتَّصِلة لتصل إلى آخر درجة بالأسفل يتوقَّف على عدد الحلقات (ولعلك تُرتِّب اللفائف لتتجاوز درجتَي سُلَّم في كلِّ مرة) ولكن الوقت لا يتوقَّف على ارتفاع كلِّ درجة سُلَّم. (فاللفائف تتحرَّك لأسفل عبْر درجاتٍ عالية ودرجات مُنخفِضة في الوقت نفسه.) كيف تُحقِّق لعبة اللفائف المُتَّصلة هذه الحركة؟

الجواب: عندما تَجذِب اللفائف إلى أعلى ثُمَّ إلى أسفل نحوَ الدرجة الثانية الأدنى، فأنت بذلك تُرسل موجةً على طول اللفائف. وأثناء انتقال الموجة، تتحرَّك المزيد من اللفائف نحوَ الدرجة الثانية من خلال التحرُّك أولًا نحو الأعلى ثُمَّ عبْر قَوس كامل من الحلقات، ثم إلى أسفل نحوَ الدرجة الثانية. وعندما تصِل الموجة إلى آخر اللفائف الموجودة بالدرجة الأُولى، تُجذَب تلك اللفائف بالسرعة الكافية على طول القوس لدرجة أنها تتخطَّى الدرجة الثانية (بشرط أن تكون أبعاد الدرجات مُلائمة) وتستقرُّ عند الدرجة الثالثة. ثم تُكرَّر العملية بأسرِها.

ويُعزى نجاح لعبة اللفائف المُتصِلة في نزول درجات السلم (وبالبطء الكافي الذي يُمكِّنك من رؤية الحركة التنازلية) إلى المقطع العرضي المُستطيل الخاص بسلك اللفائف. ويُقلِّل ذلك التصميم — المُسجَّل كبراءة اختراع باسم ريتشارد تي جيمس في عام ١٩٤٧ — النسبة بين صلابة الحلقات وكتلتها مُقارنة بالسلك ذي المقطع العرضي الدائري؛ فالنسبة الأقل تُسفِر عن سرعةٍ أقلَّ للمَوجة التي أطلقتها على طول الحلقات. واللفائف البلاستيكية، ذات النسبة المختلفة، ومِن ثَمَّ سرعة الموجة المُختلفة، تتحرَّك بنصف سرعة لفائف السلك الفولاذي.

وبالنسبة لأيٍّ من النَّوعين، يتحدَّد الوقت الذي تستغرقه لعبة اللفائف في هبوط درجات السلم من خلال نسبة الصَّلابة إلى الكتلة، لا ارتفاع درجة السلم. ففي الدرجات القصيرة، تنتقل المَوجة ببطء، وفي الدرجات العالية تَنتقِل الموجة على نحوٍ أسرع، والوقت

الذي تستغرقه الموجة لقطع مسافة لعبة اللفائف بأكملها هو نفس الوقت المُستغرق لقطع مسافة درجتي سلم.

(٦٦) بُرج المُكعَّبات المائل

باستخدام المُكعَّبات أو الكتب أو قطع الدومينو أو البطاقات أو العُملات المعدنية أو أيِّ مجموعة أخرى من الأغراض المُتماثلة، كوِّن كومة تمتدُّ بداية من حافة الطاولة. بالنسبة لأي عدد من الأغراض، ما الترتيب الذي يضمَن أقصى تعلُّق في الهواء (المسافة الأفقية بداية من حافة الطاولة وحتى أبعد نقطة على الكومة)؟ افترض أنَّ الكومة مكوَّنة من قطع الدومينو بارتفاع «ط». كم عدد القطع اللازمة لتكوين كومة معلَّقة في الهواء بارتفاع «ط»؟ وماذا عن كومة بارتفاع «٣ط»؟

وبالاستعانة بمجموعة كاملة تتكوَّن من ٢٨ قطعة دومينو، قُم ببناء قنطرة تملأ الفراغ بين طاولتَين لهما ارتفاعَان مُتماثلان. ما الترتيب الأمثل الذي يضمن أقصى استغلال للمساحة؟

مكعَّبات الليجو (حقوق الطبع والنشر محفوظة لشركة وام-أوه) هي لعبة مكعَّبات بلاستيكية صغيرة. على طرفٍ واحد من الجوانب الفسيحة للمكعَّب تُوجَد أربع فتحات وعلى الجانب المقابل تُوجَد أربعة نتوءات قصيرة. ويُمكن رصُّ مكعَّب واحد فوق آخر بحيث تَلتصِق الجوانب الأربعة كلٌّ منها بالآخر، أو يُمكن إزاحة المُكعَّب العُلوي حتى نصف طول المكعَّب السُّفلي بحيث يلتصِق جانبان فقط من الأربعة. افترض أن «س» هو نصف طول المكعب، و«ع» هو عدد المُكعَّبات الموجودة لدَيك. كم عدد الأبراج الثابتة (القائمة بذاتها) التي يُمكنك أن تُكوِّنها من جميع أعداد المكعَّبات «ع»؟

تخيَّل برجًا كلُّ مكعَّب فيه، باستثناء المكعب الأدنى، مرصوص إما مباشرة فوق مكعب آخَر أو تمَّت إزاحته ناحية يَمين المكعَّب الموجود أسفل منه. ما هو الحد الأدنى لعدد المكعَّبات اللازم لتكوين بُرج مُعلَّق مكوَّن من «٤س» مثلًا؟ هل تُوجَد طريقة أكفأ لرصِّ المُكعَّبات للحصول على نفس البُرج المعلَّق؟

الجواب: تكون الكومة ثابتة إذا كان الخطُّ العمودي الذي يمرُّ عبْر مركز كُتلتها يمتدُّ عبْر الطاولة. هكذا، ومن أجل بناء بُرج معلَّق كبير، عليك أن تجعل الخطَّ يمرُّ عبْر حافة الطاولة. وتعتمد إحدى الطرُق الشائعة لبناء برج معلَّق كبير على «المُتسلسلة المتناسِقة» (شكل ١-٢٢أ). هبْ أنك تَستخدِم قطع الدومينو. لكي تُوازِن قطعة دومينو واحدة، ستضع

مركزها فوق الحافة وتُكوِّن برجًا معلقًا بارتفاع «ط/٢». ثم يُمكنك أن تستعيض عن حافة الطاولة بحافة قطعة أخرى من الدومينو وتُرتِّب الأمر بحيث يكون مركز كتلة قطعتَي الدومينو فوق حافة الطاولة. الآن يكون البرج المُعلَّق عبارة عن (ط/٢) (١ + ١/٢). بعد ذلك، تستعيض عن حافة الطاولة بقطعة ثالثة من الدومينو لتكون فوق حافة الطاولة. والآن يَصير البرج المعلَّق عبارة عن (ط/٢) (١ + ١/٢ + ١/٣). ومع ترتيب عدد «ع» من قطع الدومينو بهذا الأسلوب، تنتج برجًا معلقًا مكونًا من (ط/٢) (١ + ١/٢ + ١/٣ + ... + ١/ع)؛ حيث يكون التعبير الرياضي داخل الأقواس الهلالية هو المتسلسلة المُتناسِقة. وفيما يَلي بعض النتائج:

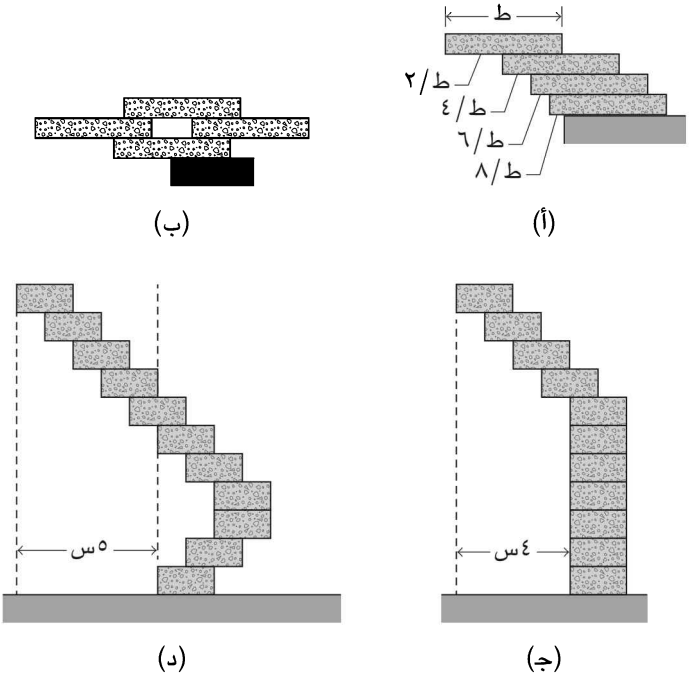
ارتفاع البُرج المعلَّق	عدد قطع الدومينو المطلوبة
ط	٤
٢ط	٣١
٣ط	٢٢٧
٤ط	١٦٧٤

لا تُوجَد حدود من الناحية النظرية لهذا الترتيب الخاص بقطع الدومينو، وإنما حدود عملية وحسب.

تَستخدِم ترتيباتٌ أكثر اقتصادًا قطعَ الدومينو لمُوازنة القطع المُمتدَّة إلى الخارج من عند الحافة. على سبيل المثال، في إحدى ترتيبات رصِّ قطع الدومينو، تُكوِّن أربع قطع دومينو برجًا معلقًا أطول قليلًا من «ط» (شكل ١-٢٢ب)، ويَستخدِم ترتيبٌ آخر لقطع الدومينو ٦٣ قطعة فقط لتكوين بُرج مُعلَّق بطول «٣ط».

ويساعد الثقل الموازِن أيضًا إذا كنت ترغب في بناء قنطرة بمجموعة كاملة مكوَّنة من ٢٨ قطعة دومينو. فإذا كان الجانبان الأيسر والأيمن مدعومَين ذاتيًّا، فقد تصِل المساحة إلى حوالي «٣,٩٧ط»، إلا أنه يُوجَد تصميم واحد على الأقل لا يكون فيه الجانبان مدعومَين ذاتيًّا على نحوٍ مُستقل ويشغل مساحة «٤,٣٥ط» تقريبًا.

وجميع الأبراج المُعلَّقة والقناطر يُمكن التوسُّع فيها إذا رتَّبت قطع الدومينو في خطوط قُطرية، بدلًا من ترتيبها على حوافها الطويلة، بحيث تكون مُتعامِدة على حافة الطاولة.



شكل ١-٢٢: بند ١-٦٦: ترتيبات رص (أ) و(ب) مكعبات عادية و(جـ) و(د) مكعبات الليجو.

وبالاستعانة بثلاثة مكعَّبات ليجو، يُمكنك أن تبني خمسة أبراج مُختلفة (باستثناء ترتيبات الصورة المعكوسة) وأربعة منها تكون ثابتة تمامًا. يكون بُرج واحد ذا ثباتٍ هامشي، وأقلُّ اضطراب يُطيح به لأنَّ مركز الكتلة يقَع على خطٍّ يمرُّ عبْر حافة المكعَّب الأدنى. والحد الأقصى لارتفاع البُرج المُعلَّق هو «٢س» (طول المكعب) ذلك بالنسبة إلى البرج ذي الثبات الهامِشي، و«س» بالنسبة إلى الثلاثة الأبراج الأخرى، وصفر بالنسبة إلى أكثر الأبراج ثباتًا (والمَبنية على خطٍّ مُستقيم).

تُحدِّد القواعد — التي تُبنى وفقًا لها الأبراج المائلة — الاستراتيجية المناسبة لتحقيق الحدِّ الأقصى للتعلُّق في الهواء. افترِض أنك بصدَد تجنُّب أيٍّ من الأبراج ذات الثبات الهامشي

ولا بدَّ إما أن تضع مُكعَّبًا فوق الآخر مباشرة أو تُزيحه ناحية اليمين وحسب. تتمثَّل أكثر الترتيبات اقتصادًا في بناء بُرج على خطٍّ مستقيم باستثناء المكعَّبات الأخيرة التي تُرَص على هيئة سلالم مُتجِهة نحوَ اليمين. على سبيل المثال، من أجل بناء برج مُعلَّق في الهواء بارتفاع «٤س»، أنت بحاجة إلى ١١ مكعبًا على الأقل مع رص الأربعة مكعَّبات العلوية على هيئة سلالم (شكل ١-٢٢ج). ومن أجل بناء برج معلَّق بارتفاع «ع س»، أنت بحاجة إلى حدٍّ أدنى ٠٫٥ ع (ع + ١) + ١، بقمَّةٍ ذات ارتفاع «ع» على هيئة سلالم. ومن أجل بناء بُرج ذي ثباتٍ هامشي، تخلَّص من المُكعَّب الأدنى.

تستلزم الحاجة عددًا أقلَّ من المُكعَّبات لبناء بُرج معلَّق إذا كنتَ ستبدأ البناء من ناحية اليسار ثم تتَّجه ناحية اليمين. على سبيل المثال، يُمكن لـ ١١ مكعبًا أن تُكوِّن برجًا مُعلَّقًا ثابتًا بطول «٥س» (شكل ١-٢٢د).

(٦٧) بُرج بيزا المائل

بدأ البرج الشهير في مدينة بيزا، بإيطاليا، يَميل ناحية الجنوب خلال تشييده الذي استغرَق قرنَين من الزمان. وأخيرًا عندما أُضيفت غُرفة جرس الكاتدرائية أعلى المبنى، وُضِعَت في وضْع عمودي على أمَل أن تُوقِف ميل بقية المبنى. (إذا رأيتَ البُرج نفسه أو صورة فوتوغرافية له، فستُلاحظ أن غرفة جرس الكاتدرائية تُعطي للبُرج شكل ثمرة الموز.)

أغلق البُرج أبوابه أمام السيَّاح لسنواتٍ عديدة بعد انهيار بُرج آخر بمدينة بافيا؛ مُسفرًا عن مقتل أربعة أشخاص. ولكن هل كان بُرج بيزا على وشْك الانهيار فعلًا؟ على أيِّ حال، كان البرج يَميل نحو الجنوب بزاوية أكثر قليلًا من خمس درجات، وعلى الرغم من أن الميل كان يزداد سنويًّا، فإنَّ الزيادة لم تتعدَّ ٠٫٠٠١ درجة في كلِّ عام. فإذا كان البرج سينهار، أفلا يعني هذا حتميَّة تحرُّك مركز كتلة البُرج بعيدًا عن القاعدة؟ وهذا لن يحدُث قبل مرور فترة طويلة.

الجواب: على الرغم من أن درجة مَيل البُرج كانت ضئيلة دومًا، وأن مركز كتلة البرج يقَع فوق منطقة ارتكاز قاعدته مباشرة، وذلك قبل تنفيذ أعمال الترميم في العصر الحديث، فإنَّ درجة المَيل قد نقلت نقطة ارتكاز وزن البرج إلى الجدار الخارجي جهة الجنوب. وهذا النقل جعل الجزء السُّفلي من الجدار الجنوبي واقعًا تحت ضغط هائل، وهو ما هدَّد بانبعاج الجدار إلى الخارج وانهياره انهيارًا مُدوِّيًا. وقد زاد الخطر بسبب وجود درَج مُتصاعِد حول الجزء الخارجي من البرج، مما يُضعِف متانة الجدار من الناحية البنائية.

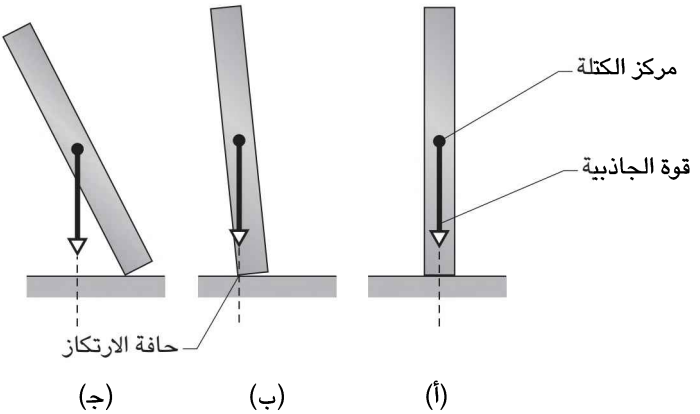
في البداية، كان المَيل بسبب هبوط التُّربة أسفل البرج، وازداد الأمر سوءًا مع هطول الأمطار الغزيرة. ومن أجل استعادة توازُن البرج وضبط درجة مَيله جزئيًّا، أقام المهندسون شبكةَ صرفٍ صحي لتقليل منسوب المياه في التربة وحفَروا التربة أسفل الجهة الشمالية من البُرج.

(٦٨) إسقاط قِطَع الدومينو

بمجرَّد أن تَسقط القطعة الأولى على القطعة الثانية في صفٍّ طويل مُنتصِب من قطع الدومينو، التي تفصل بينها مسافات منتظمة، تنتقل حركة السقوط كالمَوجة عبْر الصف. بعد أن تبدأ الموجة في الحركة، كم عدد قطع الدومينو التي تتحرَّك في أيِّ لحظة بعَينها وما الذي يُحدِّد سرعة الموجة؟ من الواضِح أنه لا ينبغي فصل قِطَع الدومينو بعضها عن بعض بمسافة تزيد عن طول قطعة الدومينو نفسها، ولكن هل يُوجَد حدٌّ أدنى للمسافة الفاصلة؟ لماذا لا يسقط صفٌّ من مكعبات أطفال بنفس الطريقة التي تسقُط بها قطع الدومينو؟ هل يمكنك أن تُحدِث تفاعلًا تسلسُليًّا عبْر صفٍّ من قِطَع الدومينو حيث تكون القطعة الأولى صغيرة جدًّا وتزداد كل قطعة تدريجيًّا عن القطعة التي تسبقها في الحجم بنسبة مُعيَّنة؟

الجواب: قطعة الدومينو المُنتصِبة لها وضعان للثبات أو «التوازن»: الوضع الأول تُحقِّق فيه قطعة الدومينو التوازن حين تُثَبَّت على قاعدتها السُّفلية (شكل ١-٢٣أ) والوضع الثاني حين تُوضَع قطعة الدومينو بزاوية بحيث يكون مركز ثقلها فوق حافتها الداعمة مباشرة (شكل ١-٢٣ب). وفي كِلا الوضعَين، تضغط قوَّة الجاذِبية، التي نَفترض تأثيرها على مركز ثقل قطعة الدومينو، لأسفل على نقطة الارتكاز. ومع ذلك، يُقال إنَّ الوضع الثاني هو وضعيَّة «التوازن المُتزعزِع» لأنَّ أبسط حركة مُضطربة ستقلِب قطعة الدومينو، لتتغيَّر بذلك قوة الجاذبية المُتجهة إلى أسفل ناحية يسار حافة الارتكاز أو يمينها. فإذا كانت ناحية اليمين كما هو في شكل ١-٢٣ج، تنقلب قطعة الدومينو.

عندما تُسقِط أول قطعة دومينو في الصف، تَلتفُّ القطعة حول وضع الاتزان المتزعزع ثم تسقُط لتصطدم بالقطعة الثانية. وإذا وكَزْتَ قطعة الدومينو الأولى برفق، حينها تنشأ طاقة الاصطدام من سقوطها من وضْع الاتزان المُتزعزع. وعندما تكون قِطَع الدومينو مُتقاربة للغاية، تكون مسافة السقوط قصيرة للغاية بحيث يتعذَّر توفير الطاقة الكافية لإسقاط القطعة الثانية. تزداد احتمالية السقوط مع وجود مسافة فاصلة أكبر بين قِطَع الدومينو، شريطة ألا تتعدَّى المسافة طول قطعة دومينو واحدة. والأمر ينطبِق على بقية



شكل ١-٢٣: بند ١-٦٨: قطعة دومينو تمر بوضعية التوازن المتزعزع.

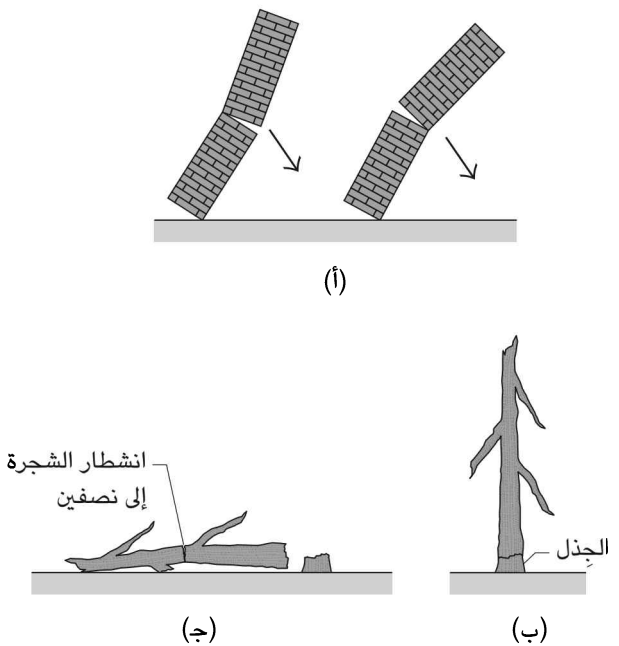
قطع الدومينو الموجودة على طول الصف. (بالتأكيد، يُمكنك أن تضرب بعُنف القطعة الأولى في صفِّ الدومينو ولا تقلق حيال المسافة الفاصلة، ولكن هذا ليس مُمتعًا على أيِّ حال.)

وفي أيِّ لحظة بعينها، قد تتحرَّك خمسُ أو ستُّ قِطَع دومينو. تكتسب الموجة سرعة أثناء تحرُّكها على طول الصف، مع وصول السرعة إلى قيمة مُعيَّنة تتوقَّف على المسافة الفاصلة بين قِطَع الدومينو ودرجة الاحتكاك بين قِطَع الدومينو ومدى ارتداد بعض قطع الدومينو عن بعض. وعندما تكون المسافة الفاصلة بين قِطَع الدومينو أصغر، تتحرَّك المَوجة على نحوٍ أسرع وتكون الخشخشة الصادرة عن التصادُم أكثر حدَّة.

وصف لورن وايتهيد — من جامعة كولومبيا البريطانية بمدينة فانكوفر — كيف أنَّ التفاعُل التسلسُلي ينتشر عبْر صفٍّ قِطَع الدومينو الذي يتدرَّج بنسبة ١,٥ (من جميع الأطراف) من قطعة دومينو إلى أخرى. وعندما أسقط القطعة الأولى من خلال «وكزِها بعصًا طويلة رفيعة» تتضخَّم الطاقة الموجودة في التفاعُل التسلسُلي بمقدار حوالَي ٢ مليار مرة عند سقوط القطعة رقم ١٣ والأخيرة. ووفق حساباته فإنه مع وجود الترتيب المناسب لِقِطَع الدومينو، فإنَّ الأمر سيتطلَّب صفًّا مُكوَّنًا من ٣٢ قطعة فقط لإسقاط قطع دومينو بطول مبنى إمباير ستيت (وهو أكثر ممَّا يستطيع كينج كونج أن يفعله).

(٦٩) سقوط المداخن والأقلام الرصاص والأشجار

عندما تسقط مدخنة طويلة، فمن المُرجَّح أنها ستتصدَّع عند نقطة ما على طولها. ما سبب حدوث الصدع وأين يحدُث وأي اتجاهٍ تَميل ناحيته المدخنة بعد حدوث الصدع (شكل ١-٢٤أ)؟ يمكنك أن تُراجع إجابتك بإسقاط كومة من مكعَّبات الأطفال وملاحظة الاتجاه الذي تَنحني فيه الكومة أثناء السقوط. يُمكنك أيضًا أن ترُصَّ كَومة من الأسطوانات القصيرة الجوفاء المربوطة معًا داخليًّا بشرائط مطاطية.



شكل ١-٢٤: بند ١-٦٩: (أ) في أي اتجاه ستَقع المدخنة؟ شجرة عجوز (ب) في البداية و(جـ) عندما ترتطم قمة الشجرة بالأرض وتنشطر الشجرة إلى نصفين.

إذا أوقفت قلمَ رصاصٍ في وضعية عمودية ثم تركته ليسقط، فهل يتحرَّك الطرف المُستدقُّ في اتِّجاه السقوط أم في الاتجاه المعاكس؟

عندما تسقُط شجرة، في أي اتجاه يتحرَّك الطرف السُّفلي؟ وما الشكل الذي تتَّخِذه الشجرة في أثناء السقوط؟ هل يُمكن أن تنكسِر الشجرة مثل المدخنة؟ لماذا تبدو الشجرة أحيانًا وكأنها تطفو فوق السطح قبل أن تَرتطم بالأرض؟ لماذا ترتطم أرومة الشجرة أحيانًا بالجِذْل بشدَّة بالغة إلى درجة تكاد يُقتلع معها الجذر؟

(تخيَّل أنك حطَّاب خرَج إلى الغابة وتشهَدُ سقوط أول شجرة كبيرة تقطعُها بيدِك. أنت لستَ أحمق؛ فأنت تُفكِّر في الاتجاه الذي ستَسقُط عنده الشجرة؛ ومِن ثَمَّ تقِف عند الجهة المُقابلة. ولكن بعد أن اصطدمت الشجرة بالأرض، ارتَدَّت ناحيتك لتنتقِم، لتصطدِم بصدرك وتكسر لك ثلاثة ضلوع. حان الوقت لتضع الفأس جانبًا.)

الجواب: حين تدور المدخنة حول قاعدتها، يميل الجزء السُّفلي للاستدارة على نحوٍ أسرع من الجزء العلوي، وتشرع المدخنة في الانثناء إلى الخلف. وإذا كانت المدخنة عبارة عن أُسطوانة مُتساوية الأجزاء، يحدُث أكبر قدرٍ من الانثناء عند ثُلث ارتفاع المدخنة؛ ومِن ثَمَّ فهذا هو الموضع الذي من المُرجَّح أن تنكسِر عنده المدخنة. وإذا كانت المدخنة لها أي شكل آخر، فإن الكسْر سيكون عند موضعٍ آخر. يَسري الكسر عبْر المدخنة بالعرض من عند الجهة الأمامية للجدار، إلَّا أن الضغط على الجانب الخلفي يؤدي إلى هبوط الصدع إلى أسفل قليلًا. وأحيانًا يَحدُث كسْر ثانٍ عند نقطة أدنى على طول المدخنة لأن الجزء العلوي يميل إلى الانزلاق إلى الخلف فوق الجزء السفلي، وبذا يسقط في اتجاهٍ معاكس ناحية السطح العلوي للجُزء السُّفلي.

يتوقَّف الاتجاه الذي يتحرَّك فيه الطرف المُستدقُّ للقلم الرصاص عند سقوط القلم الرصاص، على قدر الاحتكاك بين سنِّ القلم والسطح الذي يتلامَس معه. فإذا كان الاحتكاك ضئيلًا، يتحرَّك الطرف المُستدقُّ في عكس اتجاه السقوط. ومع وجود قدرٍ أكبر من الاحتكاك، يتحرَّك الطرف المُستدقُّ مع اتجاه السقوط، حتى وإن تحرَّك أولًا في عكس ذلك الاتجاه.

وتَميل الشجرة المُجتثَّة إلى الانثناء إلى الخلف مثل المدخنة، ولكنها لا تَنكسِر إلَّا إذا كانت مَيِّتة ومُتعفِّنة. إذا حدَث الكسْر في وقتٍ مبكِّر من السقوط، فقد يسقط الجزء العلوي في عكس اتِّجاه الجزء السُّفلي، مما يَزيد الموقف خطورة إذا كنت بالقُرب من المكان. وإذا قطعتَ شقًّا في جانب واحد من شجرة حيَّة ثم قطعت شريحة أفقية عبْر الجهة المُقابِلة، فستقَع الشجرة في اتجاه الجانب المشقوق، فيَنكسِر المِفصَل وتدفع الأرومة إلى أعلى ثم تَجذبها ناحية اتجاه السقوط. وإذا كانت الشجرة بها فروع وفيرة، ستَنضغِط حين تَرتطِم

الشجرة بالأرض، وارتدادها قد يدفع الأرومة نحوَ الجِذْل. ويأتي إحساس الطفو من مقاومة الهواء الذي تُواجِهه شجرة مُورقة حين تقترِب من الأرض.

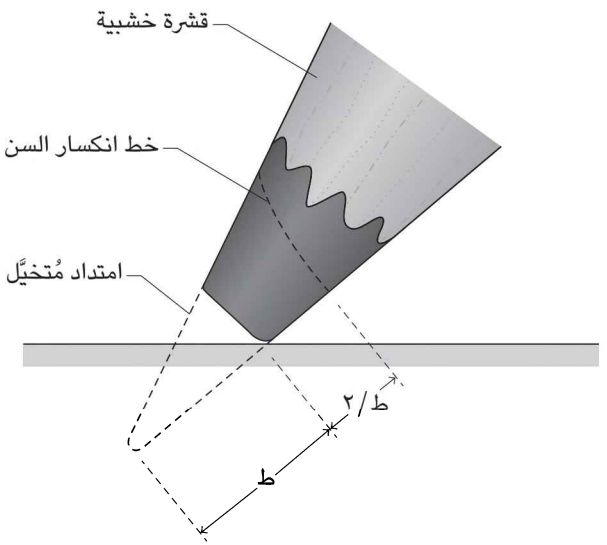
وتَنتهي الحال ببعض الأشجار بالسقوط مُتناثِرة في قطعٍ على الأرض بسبب طريقة اصطدامها بالأرض. فإذا كان الكسر الأوَّلي بسبب الرياح العاتِية، مثلًا، ويَحدُث عند قمَّة جِذْلٍ قصير (شكل ١-٢٤ب)، فقد تصطدم قمَّة الشجرة بالأرض أولًا. وفي تلك الحالة، قد يَنشطِر الجزء المُتساقِط إلى نِصفَين (شكل ١-٢٤ج). ويتخلَّف عن هذا جزء أقصر يصطدِم بالأرض بعدَها مباشرة؛ ويَنشطر أيضًا إلى نِصفَين. وقبل أن تصطدم القطعة الأخيرة بالأرض، ربما تكون أجزاء الشجرة قد انشطَرت إلى نصفَين عدة مرات.

(٧٠) كسْر سنِّ القلم الرصاص

غالبًا ما يَنكسِر سنُّ القلم الرصاص عندما أكتب بحماس. أين يكون موضع الكسر بالضبط؟ لماذا تزداد احتمالية كسْر السنِّ إذا كان القلم حادًّا وتقلُّ هذه الاحتمالية إذا كان السنُّ كليلًا من كثرة الاستخدام؟

الجواب: عندما تكتُب شيئًا بقلم رصاص، فأنت تضغط على سنِّ القلم مع إمساك القلم بزاوية مائلة. يخلُق هذا التصرُّف قُوة تُحاوِل ثَني قطعة الرصاص المكشوفة من خلال استطالة الجزء السُّفلي (الجزء الذي يُواجِه الورقة) والضغط على الجزء العلوي. ويُعَدُّ عمود الرصاص أضعف من الصمود أمام محاولة الاستطالة؛ ومِن ثَمَّ يبدأ في التكسُّر عند الجزء السُّفلي. وبينما يمتدُّ التكسُّر بعرْض عمود الرصاص، فإنه يمتدُّ إلى القشرة الخشبيَّة نظرًا لأن أحد جانبي الصدْع يحاول الانزلاق على الجانب المُقابل.

يبدأ الصدْع من عند النقطة التي تكون فيها محاولة الاستطالة على أشدِّها. ومن أجل العثور على تلك النقطة، تَخيَّل الشكل الكامل للمخروط الذي يُمثِّل سِنُّ القلم جزءًا منه (شكل ١-٢٥). إذا كان الطول المفقود هو «ط»، إذن يبدأ الصدع بـ «ط/٢» من عند سن الكتابة أو «٣ط/٢» من عند الطرف المُتخيَّل للمخروط المُكتمل. وتلك الحقيقة تعني أن الصدع يبدأ عند النقطة التي يبلغ فيها قُطر عمود الرصاص ٣ / ٢ قُطر سنِّ الكتابة، وهي نتيجة يمكن اختبارها إذا رغبتَ في التضحية بعدَدٍ من الأقلام الرصاص. (ينبغي عليك أن تفعل ذلك على انفراد لأنَّ تكرار كسْر سِنِّ الأقلام الرصاص إشارة على السلوك غير السوي على الأرجح؛ يُدعى هذا السلوك مُتلازمة كسْر القلم الرصاص أو شيء من هذا القبيل.)



شكل ١-٢٥: بند ١-٧٠: خط انكسار سن القلم الرصاص.

عندما يكون سِنُّ القلم حادًّا، يَحدُث التكسُّر عند جزءٍ ضَيِّق؛ ومِن ثَمَّ لا يتطلَّب إلا قوة ضئيلة لبدئه. وإذا كان السنُّ كليلًا على نحوٍ أكبر فإن أقصى حدٍّ للانثناء يحدُث في موضع أعلى من عمود الرصاص وعند قطاعٍ أوسع، وتكون القُوى المطلوبة أكبر. وفي تلك الحالة، يقلُّ احتمال كسْر سِنِّ القلَم تحت ظروف الكتابة العادية. وإذا كان سِنُّ القلم كليلًا جدًّا لدرجة أن نُقطة الحدِّ الأقصى للانثِناء تكون في إطار القِشرة الخشبية، يكون التفسير غير مُلائم في هذا الموضع، ولا يُمكِن كسْر السنِّ إلا إذا ضغطَت على السِّنِّ بعُنفٍ على سطح الورقة (وهو بالتأكيد علامة على السلوك غير السوي).

(٧١) انهيار جزء من الجسر

في الساعة ١:٢٨ من صباح يوم الثامن والعشرين من يونيو عام ١٩٨٣، ببلدة جرينيتش، ولاية كونيتيكت، بالولايات المتحدة الأمريكية، انهار جسْر طوله ٣٠ مترًا يمرُّ فوق نهر

ميانوس على الطريق آي-٩٥. وبسبب الظلام، أخفق سائقو سيارتَين ومقطورة جرارة وشاحنة في تعيين حدود الجزء المفقود في الوقت المناسب، وساروا عبْر الحافة المكشوفة وسقطوا في النهر من ارتفاع ٢٠ مترًا، وعلى إثر ذلك تُوفِّي ثلاثة أشخاص وأُصيب ثلاثة آخرون.

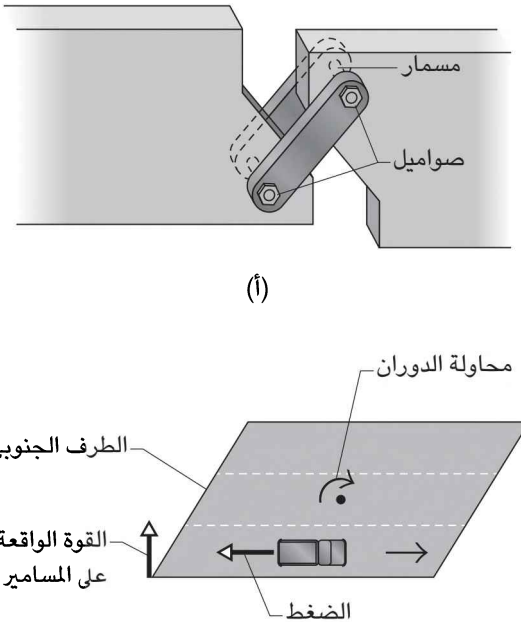
أحيانًا تنهار الجسور بسبب التقادُم أو الحاجة إلى الصيانة، ولكن بدا الجسر الموجود على طريق آي-٩٥ في حالة جيدة. هل ثمَّة شيء غريب في تصميمه أو طريقة مرور السيارات على الجسر ربما أدَّى إلى وقوع مأساة؟

إليك بعض الأفكار: بسبب اقتراب الطريق السريع من النهر بزاوية، فإنَّ أجزاء الجسر على شكل ألماسة. كان كلٌّ جزء مدعومًا عبْر حافتَين. وعلى طول الحافة الجنوبية للجزء المنهار، كان الجسر مدعومًا بمفصلَي توسيع، مِفصل عند كلِّ زاوية (شكل ١-٢٦أ). ويتكوَّن كلُّ مفصل من قضيبَين فولاذيَّين يمرُّ من خلالهما مسامير فولاذية، وعند طرفَي كلِّ مسمار، تمَّ تثبيت ولحام صَمُولة كبيرة لتثبيت المسمار.

أتاح المِفصلان بعض المُرونة عند وصلة الجسر بحيث يتسنَّى له الاستجابة للاهتزازات الناجمة عن حمولة السيارات ولأيِّ تغيير في الطول بسبب تغيُّر درجة الحرارة. ويبدو أنَّ إحدى الصواميل الموجودة في الزاوية بعيدًا عن مركز الجزء الموصول قد انحلَّت وتحرَّر المسمار المربوط بها، ممَّا تسبَّب في سقوط هذا الجزء في النهر. ما القوة الجانبية التي حرَّرت المسمار؟ أثبتَت الإجابة أنها تستحقُّ الدراسة إذا ما أردْنا تجنُّب وقوع مثل هذه الكوارث.

الجواب: تخيَّل شاحنة تسير في الحارة الخارجية أثناء عبورها على وصلة الجسر. لكي تُحافظ الشاحنة على سُرعتها، لا بدَّ أن تضغط إطاراتها باستمرار على وصلة الجسر، مما يخلُق عزم دوَران يُحاول إدارة وصلة الجسر حول مركزها (شكل ١-٢٦ب). تولِّد محاولة الدوَران قوة جانبية على مجموعتَي المسامير والصواميل الداعمة عند الطرف الجنوبي، ولكن القوة كانت على أشدِّها عند الزاوية البعيدة بسبب ابتعادها كثيرًا عن المركز.

وبعد قدر كبير من الاهتزاز والضغط، تحرَّرت إحدى الصواميل الموجودة عند تلك الزاوية وانزلق مسمارها من مكانه، مما تسبَّب في سقوط الزاوية. وتسبَّب تناقُص الدعم لذلك الجزء من الجسر في جعل الحمل يزيد على باقي نقاط الارتكاز وتسبَّب في انهيار وصلة الجسر. ولو كان شكل الجزء على هيئة مربَّع بدلًا من شكل الماسة، لشاركت جميع الزوايا الأربع في مقاومة الدوَران على نحوٍ مُتساوٍ؛ ومِن ثمَّ لصار انهيار إحدى الزوايا مستبعدًا أكثر.



شكل ١-٢٦: بند ١-٧١: (أ) مفصل توسيع يوصل بين وصلتي الجسر. (ب) اتجاه الدوران بسبب الشاحنة.

(٧٢) تقوُّس القطار

حين يَصطدم قطار مُصادفةً بجسم ضخم ويَخرج عن القضبان إثر ذلك، لماذا يتقوَّس القطار والعربات عادةً بدلًا من الانحراف بالكامل على جانبٍ واحد من القضبان؟ لماذا لا يتعدَّى التقوُّس العربات القليلة الأولى الموجودة في المقدِّمة؟

الجواب: لنفترض أن الوجهة الأمامية للقطار اصطدمت بجسم ضخْم ممَّا تسبَّب في تداخل المسار جزئيًّا. تدبَّر القوة الواقعة على القطار في جزأين؛ القوة الموازية للقضبان تعمل على إبطاء سرعة القطار، والقوة العمودية على القضبان تتسبَّب في خروج القطار إلى أحد جانبي القضبان. تتسبَّب القوة العمودية أيضًا في تدوير القطار حول مركز كُتلته.

ولنفترض أن الوجهة الأمامية للقطار تنحرف إلى يمين القضبان. حينها ستتسبَّب الاستدارة في انحراف مُؤخِّرة القطار نحو يسار القضبان. ونظرًا لأن مؤخرة القطار مُرتبطة بالعربة الأولى، لا يُعدُّ الانحراف ناحية اليسار على نفس قدْر انحراف مقدمة القطار ناحية اليمين.

وبينما تَنحرف مُقدمة العربة الأولى ناحية اليسار، تميل العربة إلى الاستدارة حول مركز كتلتها ممَّا يتسبَّب في انحراف مؤخِّرة العربة الأولى ناحية يمين القضبان. ونظرًا لارتباط العربة الأولى بالعربة الثانية تَنحرِف مقدمة العربة الثانية أيضًا ناحية اليمين، ورغم ذلك فإنَّ هذا الانحراف أقلُّ مقارنة بانحراف محرِّك القطار أو مقدمة العربة الأولى. وهذا هو التفسير.

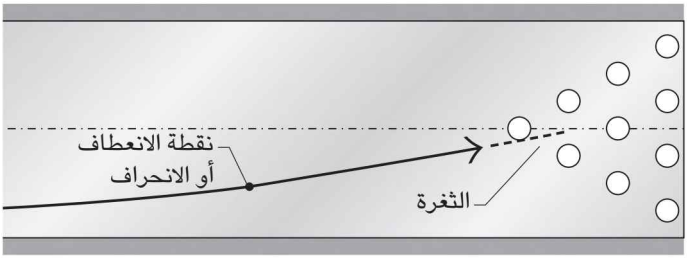
(٧٣) رميات البولينج

في لعبة البولينج ذات القوارير العشر (شكل ١-٢٧)، كيف يَنبغي عليك أن تقذف الكرة لتزيد من فُرَص إسقاط القوارير جميعًا من الرمية الأولى؟ يَستهدف لاعبو البولينج المُبتدئون إسقاط القارورة الأمامية (القارورة الوسطى والمُتصدِّرة باقي القوارير) من عند وسط حارة اللعب، أما اللاعبون المُحترفون فيَقذِفون الكرة عند أحد جانبَي حارة اللعب مع وضع الكرة في حالة دوران جانبي. تبدو الكرة وكأنها «تنعطف» أو «تنحرف» (أي تُغيِّر مسارها على نحوٍ مفاجئ) عند نقطةٍ ما على طول حارة اللعب ثم تَنطلِق نحو القوارير عبْر مسارٍ مائل. من الناحية المثالية، يَنبغي أن تخترق الكرة صفَّ القوارير من عند جانبٍ واحدٍ للقارورة الأمامية لتخترق ما يُطلَق عليه «الثغرة» (عادةً ما تكون عبْر الجانب الأيمن إذا قُذفت الكرة من عند يمين حارة اللعب).

هل يكون الانعطاف حقيقيًّا أم وهميًّا؟ هل استراتيجية اللاعبِين المُحترفين الخاصَّة بتوجيه الكُرة بزاوية مائلة داخل صفِّ القوارير استراتيجية مضمونة النتائج فعلًا؟

الجواب: يصعُب إسقاط جميع القوارير من ضربةٍ واحدة بخطة اللاعبين المُبتدئين لسببَين على الأقل. ربما تخترق الكرة الصفَّ ولكن القوارير الموجودة أدنى جهة اليسار واليمين أكثر عُرضةً للصمود. وإذا ما قُذِفَت الكرة على نحوٍ غير دقيق بعض الشيء، فاصطدامها بالقارورة الأمامية قد يُطيح بالكرة إلى جانب حارة اللعب بدرجةٍ شديدة للغاية لدرجة أنَّها تَفشل في إسقاط باقي القوارير.

وإذا اخترقت الكرة صفَّ القوارير عبْر مسارٍ مائل من خلال الثغرة، تقلُّ كثيرًا احتمالية الارتداد على نطاقٍ واسع؛ ومِن ثَمَّ تسقُط المزيد من القوارير. وإذا مال المسار



شكل ١-٢٧: بند ١-٧٣: مسار كرة البولينج.

بمقدار عدَّة درجات على المِحور المركزي لحارة اللعب، وإذا اصطدمت الكرة بجانب القارورة الأمامية بشكلٍ صحيح، تسقُط القوارير الخارجية على كلا جانبي المصفوفة المثلَّثة الشكل مثلما تسقط قِطَع الدومينو وتصطدم الكرة بقارورتَين داخليَّتَين، مما يتسبَّب في إسقاط قارورة مقابل الأخرى.

تتوقَّف زاوية اقتراب الكرة من الثغرة على النسبة المبدئية بين الدوَران الجانبي والسرعة المُتَّجهة إلى الأمام وعلى زيادة احتكاك الكرة أثناء تحرُّكها على طول الممر. من الطبيعي أن تكون مساحة الـ ٥٠٪ الأولى من الحارة، أو نحو ذلك، مشحَّمة بالزيت لتقليل الاحتكاك. وبعد إلقاء الكرة مباشرة، تَنزلِق على الممرِّ المُشحَّم بالزيت وتتحرَّك في مسارٍ مُنحَنٍ نحو القوارير. وعندما تشرع الكرة فجأة في التدحرُج بدلًا من الانزلاق، عند نقطة ما على المنطقة الجافَّة (غير المشحمة) من الممر، يستقيم مسارها. وانحراف الكرة هو عبارة عن مسار مُنحنٍ بشدَّة تَسير فيه الكرة قبل أن يبدأ التدحرُج مباشرةً. وتعتمد قُدرة اللاعب على قذف الكرة بزاوية مُنحرفة على تغيُّر درجة الاحتكاك على طول مسار الكرة، كما تَعتمِد أيضًا نوعًا ما على حقيقة أنَّ الكرة ليست مُنتظمة الشكل بسبب الثقوب الموجودة بها.

(٧٤) لعبة البلياردو وضرْب الكُرات

ما الموضِع الذي ينبغي أن تصطدِم عنده عصا البلياردو بالكرة البيضاء لتُحقِّق النتائج التالية، وما تفسير ذلك؟

(١) تدحرج الكرة على الفور بدون أن تنزلق.

(٢) تصطدم الكرة بكرة هدَف ثابتة، ثم بعد ذلك بفترة قصيرة، تتبع تلك الكرة، فيما يُعرف باسم «الضربة التابعة».

(٣) تَصطدم الكرة على نحوٍ مُشابهٍ بكرة هدف ولكنها ترتدُّ ناحيتك بعد ذلك، فيما يُعرف باسم «الضربة المرتدَّة».

(٤) تصطدم الكرة على نحوٍ مُشابهٍ بكرة هدف ولكنها تتوقَّف بعد التحرُّك لمسافة قصيرة وحسب.

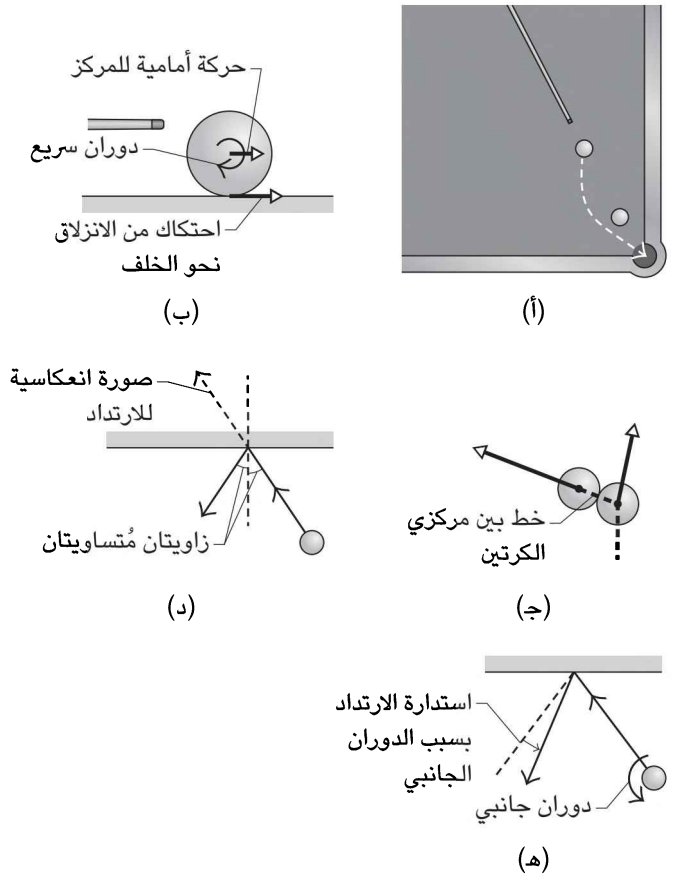
عندما تصطدم عصا البلياردو بالكرة البيضاء في أيِّ موضعٍ على امتداد محور عمودي يمرُّ عبْر مركز كتلتها ثم تصطدم بالكرة الهدف، ما الزاوية بين مسارَي الكرتَين؟ إذا اصطدمت الكرة البيضاء بالحاجز (الجانب البارز من الطاولة) بزاوية مُعينة، ففي أي اتجاهٍ سترتد؟ إذا اصطدمت العصا بالكرة نحو أيٍّ من جانبَي المحور العمودي المار عبْر مركز الكتلة ثم اصطدمت بالحاجز، كيف يَختلف اتِّجاه ارتدادها؟

قد تُرسل «الضربة العمودية» الكرة البيضاء بحيث تلتفُّ حول الكرة الهدَف التي تُمثل عائقًا أمام المسار المباشر للكرة المُستهدَفة (شكل ١-٢٨أ). كيف تُنفَّذ الضربة وما الذي يَصنع المسار المُنحني الذي تقطعه الكرة؟ (الضربة محظورة بقوانين اللُّعبة في مُعظم صالات اللعب لأنها تزيد احتمالية تمزُّق غطاء اللبَّاد الذي يُغطِّي الطاولة.)

لماذا يكون ارتفاع حاجز الطاولة ٧ / ٥ نصف قطر الكرة (نق)؟

الجواب: تشتمل المواقف من (١) إلى (٤) اصطدام الكرة البيضاء بموضعٍ ما على مِحوَرٍ عمودي مارٍّ بمركز كتلة الكرة. وبالنسبة إلى المَوقفَين (١) و(٤)، اضرب الكرة عند ارتفاع ٧ / ٥نق (أي ٢ / ٥نق فوق المركز). وبالنسبة إلى الموقف (٢)، اضرب الكرة في مكانٍ فوق المركز، وبالنسبة إلى الموقف رقم (٣)، اضرب الكرة أسفل المركز.

تتضمَّن الإجابات الطريقة التي تُدير بها عصا البلياردو الكرة. إذا ضُربَت الكرة عند ارتفاع ٧ / ٥نق، يولد التصادُم «دوَرانًا علويًّا» بالقدْر الكافي الذي يجعل الكرة تتدحرَجُ إلى الأمام دون أن تنزلِق فوق الطاولة. إذا اصطدمت الكرة البيضاء بالكرة الهدف، تَنتقِل الطاقة المُرتبِطة بالحركة الأمامية إلى الكرة الهدف، وتدور الكرة البيضاء في مكانها لفترةٍ قصيرة حتى يمتص الاحتكاك طاقة حركتها الدَّوَرانية. (يكون الاحتكاك في الاتجاه الأمامي وقد يدفع الكرة لمسافةٍ قصيرة في ذلك الاتجاه قبل توقُّف الكرة عن الدوران.)



شكل ١-٢٨: بند ١-٧٤: (أ) الضربة العمودية. (ب) ضربة عالية تُسفر عن قوة احتكاك في اتجاه أمامي. (جـ) اصطدام مائل. ارتداد الكرة من عند الحاجز (د) بدون دوران جانبي (هـ) بدوران جانبَي ناحية اليسار.

وإذا ضُربَت الكرة عند موضعٍ ما فوق مركزها، يكون دوَرانها في الاتجاه المُناسب لتَتدحرج إلى الأمام، إلَّا أن مُعدَّل الدوران إما يكون كبيرًا للغاية أو صغيرًا للغاية؛ ومِن ثَمَّ تَنزلق الكرة مبدئيًّا. يولِّد الانزلاق احتكاكًا، مما يَجعل الدوَران والحركة إلى الأمام مُتزامنَين؛ ومِن ثَمَّ تتدحرج الكرة بسلاسة إلى الأمام.

على سبيل المثال، هبْ أنك ضربت الكُرة عند مُستوًى أعلى من ٧ / ٥نق. حينئذٍ يكون معدَّل دوَرانها كبيرًا للغاية، ولذا تَنزلق أدنى نقطة لها نحوَ الخلف، ممَّا يولِّد احتكاكًا إلى الأمام (شكل ١-٢٨ب). هكذا يُقلِّل الاحتكاك معدَّل الدوران ويزيد السرعة الأمامية حتى يتسنَّى للكرة أن تتدحرج بسلاسة. وإذا اصطدمت الكرة البيضاء بالكرة الهدَف قبل تلك المرحلة، تَنقل حركتها الأمامية وتدور في مكانها لوقتٍ قصير، إلَّا أن الاحتكاك الشديد الواقِع عليها يَدفعها إلى مُلاحقة الكرة الهدَف.

إذا ضُربت الكرة عند موضعٍ ما أسفل المركز، يكون «دوَرانها الخلفي» في الاتجاه الخطأ للتدحرُج بسلاسة، ويكون الاحتكاك كبيرًا وفي الاتجاه الخلفي. وسرعان ما تُعكَس حركة الدوَران بفعل الاحتكاك وكذلك يُبطئ الاحتكاك من حركة الكرة إلى الأمام؛ ومِن ثَمَّ تتدحرَج الكرة بسلاسة. وإذا اصطدمت الكرة البيضاء بالكرة الهدَف قبل بلوغ تلك المرحلة، تَنتقِل الحركة الأمامية وتدور الكرة البيضاء في مكانها لوقتٍ قصير قبل أن يتسبَّب الاحتكاك الشديد الواقع عليها في تدحرجها إلى الوراء ناحيتك.

وعندما تَصطدِم الكرة البيضاء بالكرة الهدف عبْر مسارٍ مائل، تنحرف الكرة الهدف إلى جانب الطاولة على طول الخط المُمتدِّ عبْر مركز كتلة الكُرتَين في لحظة الاصطدام (شكل ١-٢٨ج). وترتد الكرة البيضاء في الجهة المقابلة. عادةً ما تُقدَّر الزاوية بين المسارين النهائيَّين بأنها ٩٠ درجة، إلا أنها لا تصِل إلى تلك القيمة إلا عندما يحدُث الاصطدام عند أقصى طرف للكرة الهدَف. (المسار المبدئي للكرة البيضاء يكون مُنحنيًا لأنها تَنزلق على الطاولة بعد التصادُم مباشرة، ولكن الجزء المُنحني قصير بدرجة شديدة تعُوق ملاحظتها عادةً.)

إذا تدحرجَت الكرة البيضاء نحوَ حاجز الطاولة بسلاسة، تتوافَق زاوية اقترابها مع الزاوية التي ترتدُّ إليها (وهي أشبَهُ كثيرًا بشُعاع ضوء مُنعكِس من المرآة). وإحدى الطرق لتخيُّل الارتداد هي تصوُّر أنَّ الهدف (الجيب أو الكرة الهدف) يقع على الجهة المقابلة من حاجز الطاولة، وأنه يَبعُد عن الحاجز من الجهة المقابلة بنفس مسافة ابتعادِه عن الجهة القريبة (شكل ١-٢٨د). حينئذٍ تبدو الصورة وكأنها «داخل» مرآة. اضرب الكرة البيضاء نحو تلك الصوة وسترتدُّ الكرة على النحو المناسب ناحية الحاجز لتصطدم بالهدف.

ورغم ذلك، إذا قامت الكرة بـ «دوران جانبي» (أي تدور حول محور رأسي أو محور مائل بالإضافة إلى الدوَران حول محور أفقي للتدحرُج)، تتغيَّر زاوية الارتداد. وينتج الدوَران الجانبي عندما تصطدم الكرة يَسار خط الوسط أو يمينه. من منظورك يَقلب

الدوَران الجانبي جهة اليسار (حيث تُضرب الكرة من جهة اليسار) اتجاه الارتداد ليكون مع اتجاهِ عقارب الساعة (شكل ١-٢٨هـ)، والدَّوَران الجانبي جهة اليمين يقلب اتجاه الارتداد ليكون عكس اتجاه عقارب الساعة.

تُنفَّذ الضربة العمودية بضرب جانب الكرة البيضاء نحوَ الأسفل. وعلى أثر الضربة تَندفِع الكرة نحو الدوَران كما لو أنها تقوم بحركة عبارة عن مزيج من الارتداد والدوَران الجانبي. تدفع الضربة أيضًا الكرة في اتجاهٍ واحد، ولكن الاحتكاك الناجم من الدوَران يجعل المسار مُنحنيًا.

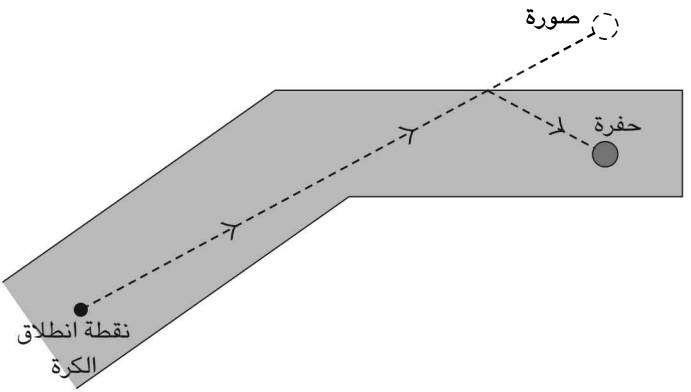
يتمُّ اختيار طول الحاجز بحيث إنَّ اصطدام الكرة بالحاجز لا يتسبَّب في انزلاق الكرة فوق الطاولة وخسارة طاقتها بسبب الاحتكاك. وعوضًا عن ذلك، تتدحرج الكرة بسلاسة بعد اصطدامها فورًا.

(٧٥) لعبة الجولف المُصغَّرة

في لعبة الجولف المصغَّرة، تُضرَب كرة الجولف عبْر ملعب صغير مُحاط بجدران قصيرة الارتفاع. الفكرة هي أن تُسدِّد الكرة داخل الحفرة بأقل عدد من الضربات. عادةً ما تكون الحفرة خلفَ عائق ما أو عند زاوية المَلعب، ومن أجل الوصول بأقصر الطرق المُمكنة، يجِب على اللاعب أن يجعل الكرة ترتدُّ بعيدًا عن الجدار. كيف يَنبغي أن تُسدِّد الكرة داخل الحُفرة باستخدام ضربةٍ واحدة فقط؟

الجواب: عندما ترتدُّ كرة الجولف من الجدار، تَنعكِس الكرة كما يَنعكِس شعاع ضوء من المرآة إلى حدٍّ كبير؛ إذ تَتساوى زاوية انعكاسها مع زاوية اقترابها. وتلك الحقيقة تُتيح لك تخيُّل ضربة خادِعة كما لو أنها تتضمَّن انعكاس شعاع ضوء على سطح مرآة. يوضح شكل ١-٢٩ نموذجًا تصطدم فيه الكرة بالجدار وتسقط داخل الحفرة. تظاهر بأنَّ الجدار عبارة عن مرآة تعكس صورة الحفرة. تفصل تلك الصورة عن الجدار، التي تبدو خلف الجدار، نفس المسافة الفاصلة عن الحفرة. وإذا ضربت الكرة نحوَ موضع صورة الحفرة، ستنعكس من الجدار وتسقط داخل الحفرة.

يستطيع اللاعبون المُحترِفون للعبة الجولف المُصغَّرة (ولعبة البولة — ضرب من البلياردو — التي يَحدُث فيها ارتداد الكرات على نحوٍ مُماثل) تخيُّل سلسلة من مثل هذه الارتدادات. بالتأكيد بعض الأمور العملية، مثل درجة خشونة أرضية الملعب ومَيلها وتفاصيل الاصطدام الفِعلي بالجِدار، تُفسد هذا التحليل البسيط، ولذا تتطلَّب لعبة الجولف المُصغَّر قدرًا من الحظ السعيد.



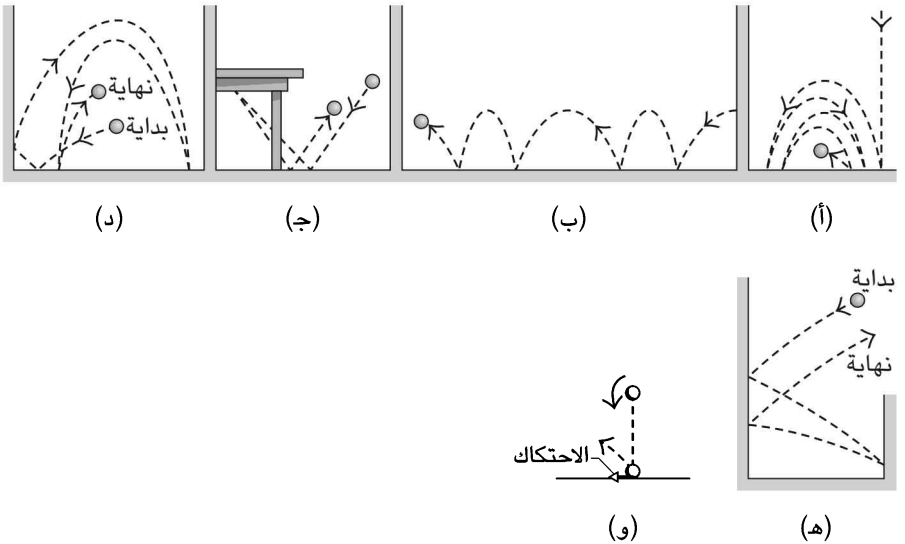
شكل ١-٢٩: بند ١-٧٥: منظر علوي لحفرة بملعب الجولف المُصغَّر.

(٧٦) خُدَع الكرة المطاطية

إذا قُذِفتْ كرة سوبر بول المطاطية (وهي كرة عالية المرونة تصنعها شركة وام-أوه)، فإنها ترتدُّ مباشرة تقريبًا إلى يدِك مرة أخرى. هبْ أنك تَقذف الكرة لأسفل مباشرة وتجعلها تدور. أين تتَّجه الكرة إذن؟

وإذا قذفت الكرة لأسفل بزاوية وبـ «دوَران خلفي»، فإنها تَثِب على الأرض ذهابًا وإيابًا بين نقطتَين (شكل ١-٣٠أ). بدلًا من ذلك، إذا جعلت الكرة تدور في وضعيَّة «الدوَران الأمامي»، فإنها تثِب بالتبادُل وَثَباتٍ طويلةً وقصيرة في أثناء الابتعاد عنك (شكل ١-٣٠ب). (قد يبدو ارتفاع الوَثَبات مُتغيرًا بين انخفاضٍ وعلو، إلَّا أنَّ الانطباع وهمي.) إذا جعلت الكرة تدور دوَرانًا خلفيًّا في أثناء قذفِها أسفل طاولة مُستوية، فربما لا تستمرُّ أسفل الطاولة وتَنطلِق نحوَك (شكل ١-٣٠جـ). وإذا قذفت الكرة نحوَ واحد من جدارَين رأسيَّين مُتوازيَين مُتقاربَين إلى حدٍّ ما، سترتدُّ الكرة إليك مرَّة أخرى على الأرجح (شكل ١-٣٠هـ). ما تفسير مثل هذا السلوك الغريب والجامح، ولماذا تثِب كرة السوبر بول المطاطية على نحوٍ أفضلَ كثيرًا من الكرة المطاطية العادية؟

الجواب: عندما تدور الكرة، فإنَّ سطحها الخَشِن يَلتصِق بالأرضية للحظة، والاحتكاك الذي يتولَّد يقذِف الكرة في اتِّجاه مُباغت. يُغير الاحتكاك كذلك من اتِّجاه دوَران الكرة، ولذا ربما تكون الوَثْبة التالية مختلفةً جدًّا.



شكل ١-٣٠: بند ١-٧٦: خدع كرة السوبر بول مع (أ) و(ب) سطح واحد أو أكثر أفقي و(هـ) سطحَين رأسيَّين مُتقاربَين. (و) الاحتكاك الواقع على كرة دوارة أثناء التصادم.

على سبيل المثال، إذا أُلقيَت الكرة نحوَ الأسفل بدوَران في اتِّجاه عقارب الساعة كما تراها من أحد الجانبَين، يكون الاحتكاك ناحية اليمين (شكل ١-٣٠و). تواجه الكرة أيضًا قوَّة مُتَّجِهة إلى أعلى آتية من الأرضية وذلك أثناء التصادُم. يُوجِّه مزيج القوَّتَين الكرة إلى أعلى ناحية اليمين. وعندما تُلقى الكرة إلى أسفل بزاوية وبحركة دائرية، فقد تَثِب بعيدًا عنك أو إلى أعلى مباشرة أو ترتدُّ ناحيتَك بناءً على اتجاه الدوَران وحجمه، الأمر الذي بدَوره يُحدِّد اتجاه الاحتكاك وحجمه.

تأتي خدعة تغيُّر ارتفاع الوثبة من الاختلاف في درجة انحدار المسار الذي تقطعه الكرة. فبينما تُبدِّل الكرة بين الوَثبات القصيرة والطويلة، فإن زاوية الوثْب تتغيَّر أيضًا. (الخدعة مغرية للغاية لدرجة أنَّني أكَّدتُ على صحَّتها مرَّتَين في كتاباتي رغم أنَّني جادلت بأنه يتعذَّر تغيُّر الارتفاع.)

تثِب كرة السوبر بول المطاطية على نحوٍ جيد للغاية بسبب الاهتزازات التي يولِّدها الاصطدام داخلها. عندما تُقذَف كرة مطاطية عادية، يتسبَّب الضغط المفاجئ على الجهة السفلية في اهتزاز الكرة. والوقت الذي تستغرقه الهزَّة يتوقَّف على المادة المصنوع منها الكرة. والأرجح أنَّ الوقت يختلف عن الوقت المطلوب لحدوث الاصطدام الكامل، وفي تلك الحالة تواصِل الكرة اهتزازها بعد ارتفاعها عن الأرضية. تتطلَّب الاهتزازات طاقة؛ ومِن ثَمَّ تكون طاقة الكرة قليلةً بحيث يتعذَّر دفعها إلى أعلى ولا ترتفع إلى حدٍّ كبير.

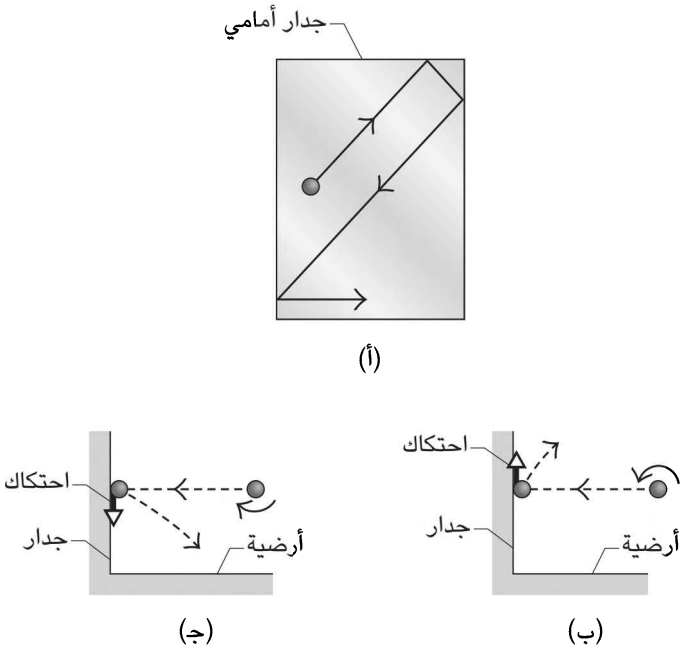
تتكوَّن كرة السوبر بول من لُبٍّ مُحاط بقشرة من مادة مختلفة. تُغيِّر التركيبة الاهتزازات بحيث يتساوى الوقت الذي تستغرقه أول هزَّة مع وقت مكوث الكرة على الأرضية. وعندما يعكس الجزء السفلي من الكرة الجانب الواقع عليه الضغط وترتدُّ الكرة بقوَّة من الأرضية، يكون الاهتزاز إلى الخارج بعيدًا عن الأرضية؛ ومِن ثَمَّ يُساعد في قذف الكرة. وكنتيجة لذلك، تعود طاقة الاهتزاز إلى حركة الكرة المُتَّجِهة إلى أعلى، مما يُتيح للكرة الارتفاع إلى أعلى.

ومن أجل تحديد الاتجاه الذي تَقفز فيه كرة السوبر بول، إليك وصفة نابِعة من الحاجة إلى الحفاظ على ثَبات الطاقة الحركية للكرة والزخم الزاوي في أثناء الوَثب. تُقلَب السرعة المتَّجهة الرأسية وكذلك تُقلَب السرعة الأفقية لأدنى نقطة في الكرة، ولكن يَصعُب تخيل الأمر لأنه يَشتمِل على دوران الكرة والسرعة المُتَّجهة الأفقية لمركزها. وإذا جمعت اتِّجاهي السرعة المُتَّجِهة الرأسية والسرعة المُتَّجِهة الأفقية بعد التصادُم مباشرة، حينئذٍ ستتوصَّل إلى الاتجاه الذي تَثِب فيه الكرة.

(٧٧) ضربات كُرة الراح

تُحدَّد قفزة كرة الراح — وهي كرة مطاطية إلى حدٍّ معقول — جزئيًّا حسب اتجاه دوران الكرة حول نفسها. ويُمكنك أن تجعل الكرة تدور حول نفسها من خلال ضرب الكرة بالمضرب عند الجزء العلوي أو الجزء السُّلفي منها. أو يُمكنك أن تضرب الكرة نحو الجدار أو السقف بحيث يولد الاصطدام دوَرانًا. وبمجرَّد أن تدور الكرة حول نفسها، فإن الاستدارة قد تجعل الكرة تَثِب لدرجةٍ تُربك معها خصمك. على سبيل المثال، ماذا يحدُث للكرة إذا اصطدمت أفقيًّا بالجدار إما بضربة ملتفَّة أمامية أو ضربة ملتفَّة خلفية؟

وواحدة من أروع الضربات في كرة الراح هي الضربة المُتعرِّجة أو ضربة الحرف Z، التي تمَّ ابتكارها في سبعينيَّات القرن العشرين. وكما هو موضَّح في (شكل ١-٣١أ)،



شكل ١-٣١: بند ١-٧٧: (أ) الضربة المتعرجة أو ضربة الحرف Z بلعبة كرة الراح. (ب) ارتداد الكرة من عند الجدار بدوران أمامي و(ج) دوران خلفي.

تُضرَب الكرة من الجانب الأيمن من الملعب. وبعد أن تضرب جزءًا عاليًا من الجانب الأيسر للجدار الأمامي ثم الجزء الأمامي من الجدار الأيسر، ترتدُّ الكرة لأسفل عند الجزء الخلفي من الجدار الأيمن. بعد ذلك تتحرَّك الكرة بمُحاذاة الجدار الخلفي وعلى مقرُبة بالِغة منه لدرجة أن خَصمك يواجه صعوبة بالغة في ردِّ الضربة. يرجع أحد الأسباب إلى أن الكرة تتحرَّك بعرض الملعب بأكمله، وهو موقف استثنائي خلال المباراة. ويرجع السبب الآخر إلى أنَّ الكرة قريبة جدًّا من الجدار لدرجة أنَّ خصمك يعجز عن مُلاحقتها وردِّها إلى الأمام. الأمل الوحيد هو ضرب الكرة بعنف ناحية الجدار الخلفي بما يكفي لارتدادها إلى الجدار الأمامي.

ما تفسير المسار الذي تتَّخِذه الكرة عند استخدام الضربة المُتعرِّجة؟

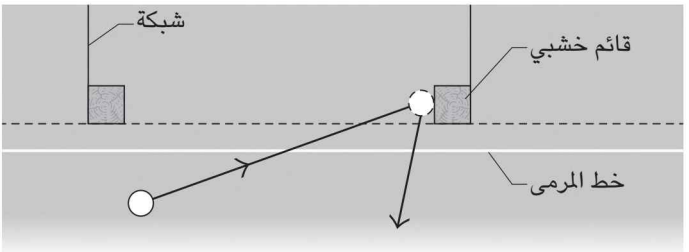
الجواب: شرحنا دور الاحتكاك والدوران بالنسبة للكرة الواثِبة في البند السابق. إذا ضُربت الكرة بعنف أفقيًّا بضربة ملتفَّة أمامية (دوران علوي) على الجدار الأمامي، تقفز الكرة عاليًا ثم تهبط لأسفل على أرضية الملعب (شكل ١-٣١ب). وبدلًا من ذلك، إذا ضُربت الكرة ضربة ملتفَّة خلفية (دوران خلفي)، فإنها ترتدُّ لأسفل بالقُرب من الجدار الأمامي (شكل ١-٣١جـ). (وهكذا، من خلال الاستعانة بالدوَران يمكنك أن تجعل خصمك يركض في الملعب ذهابًا وإيابًا.)

في الضربة المُتعرِّجة أو ضربة الحرف Z، أنت تضرب الكرة بدون أن تجعلها تدور، ولكنها تدور مع اتجاه عقارب الساعة (كما تراها من منظور علوي) مع أول قفزتَين لها. وعندما تَقفِز الكرة للمرة الثالثة، يتسبَّب الاحتكاك الناجم عن الدوَران في تحرُّك الكرة إلى الخلف، ويدفع الاصطدام الكرة لتتحرَّك في مسار عمودي على الجدار الأيمن. أول لاعب اكتشف هذه الضربة أذهل خصومه؛ لأنَّ المسار النهائي للكرة كان مُستحدثًا للغاية لدرجة أنهم عجزوا عن توقُّعه من واقع خبرتهم في اللعب.

قصة قصيرة

(٧٨) هدف مُثير للجدال

في نهائي كأس العالم للُعبة الهوكي الأرضي عام ١٩٧٥، أحرزت الهند هدفًا احتسَبَه الحكم لأنَّ الكرة اجتازت خطَّ المرمى، واصطدمت بالقائم الخشبي الموجود ناحية يمين المرمى (وكادت أن تدخُل خطَّ المرمى)، ثم ارتدَّت مرة أخرى إلى الملعب (شكل ١-٣٢، وهو عبارة عن منظر علوي صورة تقريبية وليس بالأبعاد الحقيقية). وعلى الرغم من أن هذا الارتداد مُستبعَد تمامًا وغير مألوف بالتأكيد في تاريخ الرياضة، فقد يحدُث إذا اتخذت الكرة زاوية مُعيَّنة نحو المرمى في أثناء دورانها حول نفسها أيضًا. وتكون الاستدارة مطلوبة بدرجةٍ أقلَّ إذا كانت التسديدة القادمة من ناحية يَسار المرمى. فإذا كانت الزاوية نحو المرمى (ما بين المسار القادم وخط المرمى) تزيد عن ٢٥ درجة، فمن المستحيل أن ترتدَّ الكرة إلى الوراء. لا يستطيع أحد تذكُّر التفاصيل الدقيقة الخاصة بالتسديدة في المباراة، ولكن كان قرار الحكَم مقبولًا على الأقل.



شكل ١-٣٢: بند ١-٧٨: منظر من أعلى ملعب الهوكي لكرة تصطدم بقائم المرمى وترتدُّ مرة أخرى إلى الملعب.

(٧٩) لعبة التِّنس

عند أي موضع من رأس مضرب التِّنس ينبغي ضرب الكرة إذا أردت (أ) أكبر سرعة للكرة، (ب) أقل قوة واقعة على يدك بسبب التصادُم، أو أقل محاولة من مِقبض المضرب ليدور خارج سيطرة قبضتك أثناء التصادُم أو (جـ) أقل اهتزازات من جانب المضرب بسبب التصادُم (ومِن ثَمَّ أقل اهتزازات من جانب مقبض المضرب مُقابل يدِك)؟

هل ثبات قبضتِك يؤثر على سرعة ارتداد الكرة؟ هل يُوجَد حقًّا شيء كالملعب السريع أو الملعب البطيء؟

الجواب: عندما تضرب الكرة، ينبغي أن تسعى إلى جعل التصادُم على طول المحور الطولي للمضرب، فبهذه الصورة لن تُمنح الكرة سرعة أكبر وحسب؛ وإنما ستَتفادى أيضًا التِواء المضرب في قبضتِك. غير أنَّ الموضع الذي ينبغي أن تضرب الكرة به على طول ذلك المحور يتوقَّف على نوعيَّة المضرب وعلى أي هدف بالضبط من الأهداف المذكورة في السؤال تُريد تحقيقه. كل منطقة على خيوط المضرب تحقق أي هدف من تلك الأهداف يُطلق عليها «النقطة المُثلى»؛ ومِن ثَمَّ تكون هذه التسمية مُحيِّرة عادةً ما لم نُحدِّد الهدف معها.

النقطة المُثلى الأولى هي المنطقة التي يُعطي التصادم عندها أكبر سرعة للكرة. وهذه النقطة المُثلى قريبة من المنطقة مثلَّثة الشكل الموجودة في المضرب، لا ناحية مركز رأس المضرب كما قد تظن. والموضع مُرتبِط بالطاقة المفقودة في التصادُم. أثناء التصادُم، يَنبعِج كل من المضرب والكرة ثم يَعودان إلى شكلهما الأصلي مرة أخرى. والطاقة المُتولِّدة من

انبِعاج المضرب لا تعود إلى الكرة مرة أخرى لأنَّ الكرة تُغادر خيوط المضرب قبل أن يرتدَّ المضرب مرة أخرى. ولذا، من أجل تقليل فقد الطاقة، ينبغي أن تُضرَب الكرة من أقرب نقطة للمنطقة المثلَّثة الشكل حيث يكون إطار المضرب أكثر صلابةً بسبب المقبض القريب من هذه المنطقة. وعلى الرغم من ذلك، الطاقة المفقودة بسبب انبعاج الكرة تُحرِّك النقطة المُثلى إلى أعلى بعيدًا عن المنطقة المثلَّثة قليلًا. هذا الفقد في الطاقة يكون أكبر بالقُرب من المنطقة المثلثة حيث تكون الخيوط مُتصلبة أكثر؛ ومِن ثَمَّ توفِّر بنية أكثر صلابة بالنسبة للكرة مقارنة بالخيوط الأقرب إلى المركز. ومِن ثَمَّ، تكون النقطة المُثلى الأولى قريبة من المنطقة المثلَّثة بسبب صلابة المضرب عند هذه النقطة، لكنها فوق المنطقة المثلَّثة بسبب الخيوط المرِنة أكثر عند هذه المنطقة.

النقطة المُثلى الثانية هي المنطقة التي لا يُولِّد عندها التصادم قوة واقعة على اليد المُمسِكة بمقبض المضرب. وعلى الرغم من أن التصادُم يَميل إلى دفع كلٍّ من المضرب واليد إلى الخلف، فإنه يَميل إلى إدارة المضرب. وعندما يَحدث التصادُم عند النقطة المُثلى الثانية، فإن اندفاع اليد إلى الخلف تعادله الحركة الأمامية لمقبض المضرب نتيجة لدورانه. وإذا ضُربت الكرة عند مسافة بعيدة من اليد وأبعد من النقطة المُثلى الثانية، يتسبَّب دوران المضرب في انسلات المقبض من اليد. وإذا ضُربت الكرة من عند مسافة قريبة من اليد وأقرب من النقطة المُثلى، يتسبَّب الدوران في تحرك المقبض ناحية اليد.

والنقطة المُثلى الثالثة هي المنطقة التي يتسبَّب عندها التصادم في اهتزاز المضرب (ومن ثم يتسبَّب في اهتزاز بسيط لليد عند المقبض). وإذا اصطدمت الكرة بالمضرب في موضعٍ آخر، فإنه يهتزُّ لفترةٍ وجيزة وربما يهتزُّ بقوة، مثلما يهتزُّ اللوح الخشبي الموجود على آلة الإكسليفون عند العزف عليها.

كما تُوجَد أيضًا نقطة مُثلى رابعة غير محدَّدة جيدًا وفيها يُحدِّد اللاعب بصفة شخصية أفضل موضعٍ للتصادُم لأي عدد من الأسباب.

وعلى الرغم من أن بعض مُدرِّبي التِّنس يَنصحون اللاعبين بإحكام الإمساك بالمضرب في أثناء اصطدام الكرة بالمضرب بُغية زيادة سرعة ارتداد الكرة، فإنَّ الأبحاث تُبين أن سرعة الارتداد لا تتأثَّر بإحكام المسكة. ويبدو أنَّ الميزة الأساسية لإحكام المسكة هو تحقيق سيطرة أفضل على استدارة المضرب التي تحدُث عندما يحيد التصادُم عن المحور الطولي للمضرب. والعَيب الأساسي لإمساك المضرب بإحكام هو أنَّ قوة التصادم والاهتزازات

الناجمة عن ذلك تَنتقِل أكثر إلى الذراع، وهو ما قد يُساهم في الإصابة المعروفة باسم «مرفق لاعب التنس». ومن أجل تقليل هذا الانتقال، يُرخي اللاعب المُحترف قبضته عن المضرب قبل اصطدامه بالكرة مُباشرة من خلال التوقُّف عن تسريع المضرب.

وقد تؤثِّر المادة التي تُغطِّي الملعب (الملاعب المُغطَّاة بالطَّفل والخشب والعشب والأغطية بمُختلف أنواعها) على السرعة الأفقية للكرة التي تُضرَب على ارتفاعٍ مُنخفِض فوق الشبكة وتصطدِم بالملعب، لتَنزلِق عبْر الملعب قبل ارتدادها. إنَّ القدْر المُتبقِّي من طاقة السرعة الأفقية للكرة بعد الضربة يُحدِّد ما إذا كان الملعب من النوع السريع أم البطيء؛ ففي الملعب السريع، يكون الاحتكاك قليلًا ويتمُّ الاحتفاظ بقدْرٍ أكبر من السرعة الأُفقية. وفي الملعب البطيء، يكون الاحتكاك كبيرًا ويتمُّ الاحتفاظ بقدْرٍ أقلَّ من السرعة الأفقية. وعندما تُضرَب الكرة ضربة مُنحنية عالية، تهبط الكرة بزاوية مائلة بما يَكفي لتتدحرَج (بدلًا من أن تَنزلِق) فوق الملعب، وتفقد الكرة دومًا حوالي ٤٠٪ من سرعتها الأفقية بصرْف النظر عن المواد التقليدية التي يُغطَّى بها الملعب.

(٨٠) الدرَّاجات الهوائية والدراجات النارية

لماذا تكون الدرَّاجة الهوائية أو النارية المُتحرِّكة مُستقرة نسبيًّا، حتى وإن كنت تقودُها بدون استخدام المِقوَد؟ كيف تَنعطِف بالدرَّاجة على الطريق؟ هل يُمكنك أن تَنعطِف بدون استخدام المِقوَد؟ لماذا صار التصميم الحديث للدراجات أكثر استقرارًا من التصميمات السابقة بدرجةٍ كبيرة؟ على وجه الخصوص، لماذا تكون الدرَّاجات الهوائية الحديثة مزوَّدة بماسك العجلة الأمامية الذي يَنحني بعيدًا عن الراكب؟ ما ميزة الدرَّاجة ذات مركز الكتلة المُنخفِض في السباقات؟

الجواب: لطالَما خضع السؤال عن سبب ثبات الدراجة الهوائية أو البخارية المُتحرِّكة لنقاش طويل. ويؤيد بعض الباحثين فكرة أن العجلتَين تقومان مقام المدوار (الجيروسكوب)؛ حيث إنهما تُقاومان أي ميلٍ عارِض بسبب الزخَم الزاوي. وعلى الرغم من ذلك، يؤكِّد الباحثون على أنَّ التأثير ضئيل، لا سيما بالنسبة إلى الدراجات الهوائية. وثمَّة قول آخَر مَفاده أنك تُدير العجلة في اتِّجاه الانحراف، وحركتك أنت والدراجة في اتجاه أمامي تُصحِّح من وضعية الدراجة الهوائية. ولكن هذا ليس التفسير الكامل للأمر كما يَعلم أيُّ شخصٍ يقود الدراجة دون أن يلمس المِقوَد. وفشل كلا التفسيرَين في توضيح كيف يمكن للراكب أن يحافظ على استقامة الدراجة حتى حين تكون الدراجة ثابتة.

ويبدو أن أفضل تفسير يتضمَّن «أثر» العجلة الأمامية؛ أي المسافة الفاصلة بين التقاء الخط الرأسي المار عبْر المِحوَر الأمامي بالأرض والتقاء الخطِّ التخيُّلي لمحور التوجيه بالأرض. فإذا امتدَّ الأثر إلى الأمام من عند إطار العجلة (كما هي الحال مع معظم — وربما جميع — الدراجات)، فحينئذٍ عندما تميل ميلًا عارضًا، تنحرِف العجلة الأمامية تلقائيًّا، متسبِّبةً في تقليل درجة الميل. إذا ساهمت في إدارة العجلة، فإنك قد تُساعد في تصحيح المسار، ولكنَّك لستَ مُضطرًّا إلى ذلك. وإذا تركتِ الدرَّاجة أثرًا يمتد نحو الخلف بدلًا من الأمام، فإنَّ العجلة الأمامية لن تتحرَّك تلقائيًّا لتصحيح الميل العارض؛ ومن ثَم قد يتعيَّن عليك أن تُصحِّح هذا الميل بنفسك؛ الأمر الذي يجعل ركوب الدراجة في هذه الوضعية صعبًا.

لطالما خضع السؤال عن كيفية الانعطاف بالدراجة الهوائية أو البخارية المُتحرِّكة لنقاشٍ طويل أيضًا، وجزء من السبب يرجِع إلى أنَّ التفسير الصحيح يبدو خاطئًا. فإذا أردتَ أن تنعطف بالدراجة ناحية اليمين مثلًا، يجِب أن تدير العجلة الأمامية نحوَ اليسار وهذا ما يُطلق عليه «التوجيه المُضاد». حينئذٍ أنت وهيكل الدراجة والعجلة الأمامية تَميلون تلقائيًّا ناحية اليمين؛ أي نحوَ الانعطاف المنشود. هذا المَيل يَخلُق عزم دوَران يقاوم التوجيه المُضاد، ليجعلك تنعطِف أنت وهيكل الدرَّاجة والعجلة الأمامية ناحية اليمين، ثم تستقيم الدرَّاجة بعد ذلك.

وفي سباق الدرَّاجات حيث يكون الراكب في وضعية مستقيمة ويَضغَط على الدوَّاسات بسرعة، تتمايَل الدرَّاجة ناحية اليسار واليمين بقوة، لتدور حول نقاط التَّماس على الطريق أو الأرضية. وكلما كان مركز ثقل الدراجة مُنخفِضًا، صارت نقاط الارتكاز أقرب، وصار من الأسهل الاهتزاز يمينًا ويسارًا بالنسبة إلى الراكب.

(٨١) قفزات طويلة بالدرَّاجات البخارية

قام المؤدِّي البارع إيفل كنيفل بالكثير من القفزات المُذهلة في فترة الستينيَّات والسبعينيَّات من القرن العشرين؛ حيث قاد الدرَّاجة البُخارية عبْر مُنحدَر وطار في الهواء فوق سيَّارات أو شاحنات عديدة ثم هبَط على مُنحدَر آخر أقصى الناحية الأخرى. كان إيفل كنيفل ينجح عادةً في أداء القفزات، ولكنه في بعض الأحيان كان يَفقِد السيطرة على الدرَّاجة البخارية في أثناء الهبوط على الأرض، وأُصيب بإصابات خطيرة إثر ذلك. وفي عام ١٩٧٨، حاول شابٌّ أداء قفزة مُشابهة فوق جناحَي طائرة من طراز دوجلاس دي سي ٣ ولكنه ارتكب خطأً

قاتلًا؛ ألا وهو ترك مِقوَد الوقود مفتوحًا على آخِره في أثناء الطيران في الهواء. لماذا أدَّت تلك الغلطة إلى وفاته؟

الجواب: عندما تجتاز العجلة الخلفية المُنحدَر الأول، يَختفي فجأة الاحتكاك الذي يُعيق حركتها. وإذا كان مِقوَد الوقود لا يزال مفتوحًا بحيث يُواصِل المُحرِّك تشغيل العجلتَين، فإن العجلة تدور على نحوٍ أسرع مما لو كانت مُلامِسة للمنحدر مباشرة. ونظرًا لأن الدراجة البخارية والراكب كانا محمولَين جوًّا ولا يخضعان لأي عزم دوَران خارجي، لا يُمكن أن يتغيَّر زخمهما الزاوي؛ ومن ثَم حين تشرع العجلة الخلفية في الدوَران على نحوٍ أسرع، لا بدَّ أن تدور الدرَّاجة البخارية والراكب في الاتجاه المعاكس للحفاظ على الزخم الزاوي المبدئي. يتسبَّب الدوَران في رفع الجزء الأمامي من الدراجة البخارية لأعلى، ربما بدرجة تصِل إلى ٩٠ درجة مئوية، ممَّا يجعل الهبوط على المنحدَر البعيد أمرًا مُستحيلًا تقريبًا. وإغلاق مِقوَد الوقود لحظة الانطلاق قد يحول دون حدوث الدوَران الخطير. وربما يكون من المُستحسَن إبطاء العجلة نوعًا ما لأنه قد يُوجِّه الجزء الأمامي من الدرَّاجة البخارية نحوَ الأسفل، ممَّا يؤهِّل الدرَّاجة للهبوط.

(٨٢) لوح التزلُّج

لماذا يَسهُل عليك التوازُن على لوح التزلج أثناء تحرُّكه أكثر مما لو كان ثابتًا؟ كيف يُمكِنُك القفز بلَوح التزلُّج (وبنفسك) من فوق حاجزٍ ما، وهي مُناوَرة شهيرة في الشوارع تُعرف باسم «التزلُّج الهوائي»؟

الجواب: يأتي عدم استقرارك من الميل ناحية اليسار أو اليمين حتمًا. أوضحَ أحد الباحثين أنه في النموذج البسيط لِلَوح التزلُّج، يتمُّ تصحيح الميل تلقائيًّا من خلال تحريك اللَّوح إلى الأمام ما لم تتخطَّ سرعتُك قيمةً حرجةً مقدارها حوالي ٠٫٨ متر في الثانية. وأي ميل عارضٍ يُغيِّر اتجاه العجلتَين الأماميَّتَين والخلفيَّتَين ويتسبَّب في قدْرٍ ضئيل من الاهتزاز ناحية اليسار واليمين بدون إسقاطك من على اللَّوح. ويَزداد تواتُر الاهتزاز مع زيادة السرعة.

وفي النماذج الأكثر تعقيدًا، اكتشف الباحثون أنه عندما تتعدَّى السرعة قيمةً حرجة ثانية، يختل اللَّوح ويميل ميلًا عارضًا ويتطلَّب خفَّةً ورشاقة من الراكب. ورغم ذلك، يبدو أنه يتمُّ استعادة الاستقرار والثبات إذا تخطَّت السرعة قيمةً حَرِجة ثالثة، إلا أنَّ هذه السرعة عالية على نحوٍ غير مُعتاد في هذه الرياضة.

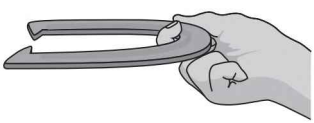
ولكي تُنفِّذ حركة التزلُّج الهوائي أثناء تزلُّجك على الرصيف واقترابك نحو عائقٍ ما، عليك اتِّباع النمط التالي. في اللحظة المناسبة، تَنزلِق قدمك الأمامية نحوَ الخلف، وتخفض نفسك ثم تندفِع بكل قوةٍ إلى أسفل على لَوح التزلُّج لتدفَع نفسك إلى أعلى. ونظرًا لأن قدمك الخلفية موجودة على الجزء الخلفي من لَوح التزلُّج، خلف العجلتَين الخلفيَّتَين، يتسبَّب الضغط لأسفل في جعْل الجزء الخلفي من لَوح التزلُّج يصطدم بالرصيف. يدفع التصادُم لوحَ التزلُّج إلى أعلى ويجعله يدور حول مركز كُتلته. وبينما يرتفع لَوح التزلُّج ويدور، تضمُّ كلتا ساقيك إليك لكيلا تعوق ارتفاع اللوح، إلا أنك تجعل قدمك الأمامية تنزلق نحو الأمام لتتحكَّم في الدوران. وإذا نجحت، ستَرفعُ قدمُك الأمامية لوحَ التزلج على مَقربة من قمَّة ارتفاع لَوح التزلج. ثم تُجهز نفسك بعد ذلك للهبوط، بحيث تسمَح لساقَيك أن تَنثنيا بسبب التصادُم؛ وذلك لكي تُخفِّف من وقْع الصدمة.

(٨٣) لعبة رمي الحلقات

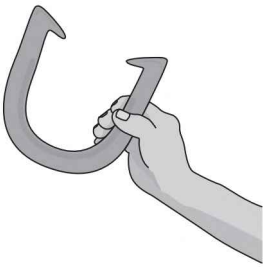
في لعبة رمي الحلقات، تُلقي الحلقة المعدنية (وهي حلقة أشبَهُ بحدوة الحصان) على قضيب معدني على بُعد ١٢ مترًا. في أثناء الرمية، تخفض ذِراعك لأسفل وتُرجعها إلى الخلف، ثم تُؤرجِحُها بسرعة إلى الأمام، محرِّرًا الحدوة بمجرَّد أن تكون ذراعك في مستوًى أفقي. عندما تسقُط الحدوة على الأرض، أنت ترغب في أن تستقرَّ وهي مُحيطة بالقضيب. ربما تَنتهي بها الحال في ذلك المَوضع إذا ما ارتطمَتْ بالأرض أولًا، ولكن يكون أمامك فرصة أفضل إذا اصطدمَت الحدوة بالقضيب أثناء طيرانها في الجوِّ وهبطت في المكان المنشود.

وإذا كنتَ غير مدرَّب على مُمارسة اللعبة، لعلك تميل إلى رمي الحدوة بوضعيةٍ تُعرف باسم «الأرجحة»، بحيث تُمسِك الحلقة من نقطة المنتصَف كما هو موضَّح (شكل ١-٣٣أ). عندما تقذف الحدوة، يكون مستواها أفقيًّا ويكون اتجاه طرفَي الحدوة مصوَّبًا نحو القضيب. وأثناء ترك الحدوة في الهواء، تؤرجحها أنت بحيث تدور حول نفسها أفقيًّا أثناء الطيران.

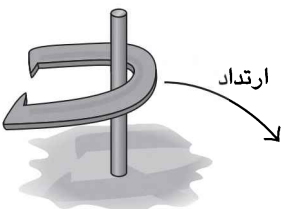
كانت الأرجحة أسلوب الرمي الأكثر شُيوعًا، إلَّا أن اللاعبين المُتمرِّسين اتَّبَعوا طرقًا أخرى لإمساك الحلقة وتوجيهها وتدويرها؛ ففي أحد الأساليب، تُمسك الحدوة من أحد طرفَيها، مع جعل فتحة الحدوة بعيدةً عنك ومائلة على المستوى الرأسي، بحيث يكون اتجاه طرفَيها إلى أعلى (شكل ١-٣٣ب). وبناءً على سرعة أرجحتك للحدوة، تدور $\frac{٣}{٤}$ لفة أو



(أ)



(ب)



(جـ)

(د)

شكل ١-٣٣: بند ١-٨٣: (أ) رمْي الحلقة بأسلوب الأرجحة. (ب) رمية أفضل. (جـ) ارتداد الحدوة بعيدًا عن القضيب. (د) تسديدة طنانة.

١ ٢/٤ لفة أو حتى ٢ ٢/٤ لفة قبل أن تسقط داخل القضيب. وفي أسلوب آخر، تكون الفتحة بعيدة عن المركز، ولكن طرفَي الحدوة مُوجَّهَان نحو الأسفل وتدور الحدوة ١/٤ لفة أو ١ ١/٤ لفة

أو ٢ ¼ لفة. لماذا تُولِّد هذه الأساليب الأحدث المزيد من «التسديدات الطنانة» (تصطدم الحلقة بالقضيب وتُطوِّقه ثم تسقط ملتفَّة حوله مُصدرةً طنينًا) أكثر مما تفعل الأرجحة؟

الجواب: إذا اصطدم الجزء الداخلي من الحدوة بالقضيب من خلال الأرجحة التقليدية، فمن المُرجَّح أن ترتدَّ الحدوة ناحيتك وتسقط بعيدًا عن القضيب (شكل ١-٣٣جـ). وفي أساليب الرَّميات الحديثة، يكون جزء من دوَران الحدوة حول محور رأسي. وعندما يَصطدم الجزء الداخلي من الحدوة بالقضيب، يستمرُّ ذلك الجزء من الدوَران، مُتسبِّبًا في دوَرانها حول القضيب. وبسرعة يَعلَق الجزء المَثنيُّ من طرف الحدوة بالقضيب، فتظلُّ مُلتفَّةً حوله، وتستقرُّ في النهاية في المكان المُخصَّص (شكل ١-٣٣د). وجاءت تسمية «التسديدات الطنانة» على الأرجح من الطنين الصادر عن الحدوة وهي تدور حول القضيب أو من القعقعة الصادرة عن دوران الحدوة.

(٨٤) تدوير طوق الهولا والوَهق

كيف يُحافظ المرء على وضعية طَوق الهولا (وهو طوق تُنتِجه شركة وام-أوه) لأعلى وهو يدور حول الجسم في مُستوى أفقي؟ وكيف يُجيد رعاة البقر تحريك الوهق على نحوٍ مُشابه؟

الجواب: كِلا نَوعي الحركة ناتج عن القوة الواقعة على الجسم المُتحرِّك حركة دائرية والناشئة عند نقطة الارتكاز. بالنسبة إلى طوق الهولا، تكون القوة عند نقطةِ تَلامُس الطوق بالجسم. وبالنسبة إلى الوَهَق، تكون القوة نتيجة لليد التي تجذِب الطرف القصير من الحبل الموجود بين اليد والعقدة. وفي كلتا الحالتَين، تتحرك نقطة الارتكاز في دائرة صغيرة وتندفع أو تنجذِب إلى خارج الطوق أو الوَهَق الذي يتحرك بشكل دائري، وتعمل القوة على جعل مستوى الجسم قريبًا من المستوى الأفقي. ومن أجل الحفاظ على الحركة الدائرية، لا بدَّ أن يكون طواف نقطة الارتكاز مُتقدمًا على الحركة الدائرية للجسم بقدرٍ ما.

(٨٥) لُعبة اليويو

عندما تُقذَف لعبة اليويو إلى أسفل بالطريقة المُعتادة، كيف يكتسِب دوَرانها الطاقة اللازمة للحفاظ على الحركة؟ لماذا تزداد حركتها إلى أسفل في البداية ثم تَتناقص بعد ذلك؟ لماذا «ترقد» — أي تُواصِل الدوَران لأسفل عند طرف الخيط — بعض أنواع لعبة اليويو في حين

أن البعض الآخر يَصعد مباشرة على طول الخيط بمجرَّد أن يصل إلى طرف الخيط؟ كيف تُحفِّز لعبة اليويو الراقدة لتُبادر بالصعود لأعلى؟ لماذا تصعد بوهن أكثر، أو لا تَصعد على الإطلاق، إذا ما تركتَها راقدةً لفترةٍ أطول مما ينبغي؟ عندما تكون لعبة اليويو قريبة من يدك، لماذا يدُور سطحُها حول الخيط (وهي حركة يُطلَق عليها المبادرة)؟ لماذا من المُستبعَد كثيرًا أن تُبادر لعبة اليويو الراقدة في الحركة مرة أخرى؟

ويمكن أداء عددٍ من الخُدَع باستخدام لعبة اليويو، بما في ذلك خدعة «حول العالم» و«تمشية الكلب». في الخدعة الأولى، تدور لعبة اليويو المُتحرِّكة في دائرة رأسية كبيرة وفي الوقت نفسه تكون عند طرف الخيط. وفي الخدعة الثانية، تَنخفِض لعبة اليويو الراقدة لتَصِل إلى الأرض؛ حيث تُدحرَج في ذلك المكان. إذا ظلَّ الخيط مشدودًا وكان كذلك في وضعية أفقية، ما الاتجاه الذي ستتحرَّك فيه لعبة اليويو إذا اهتزَّ الخَيط فجأة؟

تُوجَد مجموعة مُتنوِّعة من أشكال اليويو إلا أنَّ أروعَها على الإطلاق نفَّذها معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا عام ١٩٧٧. وصل طول الخيط (وهو عبارة عن خيط من النايلون) إلى ٨١ مترًا؛ وكان هيكل لعبة اليويو عبارة عن عجلتَي درَّاجة هوائية قُطرهما ٦٦ سنتيمترًا مُرتبطان أحدهما بالآخر من خلال عمود فولاذي؛ وأُسقطت اليويو من ارتفاع مبنًى مكوَّن من ٢١ طابقًا.

بل والأكثر إثارة من ذلك كانت لعبة اليويو التي بلَغ وزنها ١١٦ كيلوجرامًا والتي ألقاها توماس كون عام ١٩٧٩ من فوق رافعةٍ على ارتفاع ٣٠ مترًا ليسجل بذلك رقمًا قياسيًّا في أثقل لعبة يويو. كان طول لعبة اليويو ١,٣ متر وعرضها ٠,٨٠ متر وبهذا كانت الأبعاد مُتناسبة مع لعبة اليويو القياسية.

لعبة اليويو في الفضاء: أحيانًا يلعب رائد الفضاء لعبة اليويو في الفضاء. لماذا يصعب إرقاد لعبة اليويو في مثل هذه البيئة؟

الجواب: هَبْ أنك أسقطت لعبة اليويو بدلًا من أن تُلقي بها إلى أسفل. عندما تُسقط جسمًا ما عادةً، تتحوَّل طاقة الوضع إلى طاقة حركية ويتحرك الجسم على نحوٍ أسرع تدريجيًّا مع الهبوط. يعود اختلاف لعبة اليويو إلى سببَين: أنها تدور وأن معدَّل الدوران يعتمد على سُمك الخيط الملفوف على عمود اليويو. وعندما تهبط لعبة اليويو إلى أسفل وتُفكُّ طبقات الخيط مع كلِّ لفَّة، تدور اللعبة على نحوٍ أسرع وأسرع، وهذا لا يُتيح إلا قدرًا قليلًا من الطاقة للهبوط في حدِّ ذاته. وكنتيجةٍ لذلك، يَزداد المعدل الذي تهبط به لعبة اليويو أولًا ثم يتراجع عند منتصف المسافة إلى أسفل. وعندما تصل لعبة اليويو إلى نقطة النهاية لأسفل ويُفرَد الخيط بالكامل، ترتدُّ لعبة اليويو.

إذا كان الخَيط مربوطًا بالعمود الأوسط (عادة من خلال ثُقبٍ فيه)، تلفُّ لعبة اليويو على الفور مرَّةً أخرى حول العمود، وذلك دون أن يتغيَّر اتجاه دوران لعبة اليويو. عوضًا عن ذلك، إذا كان الخيط معقودًا حول العمود الأوسط ولم يكن الارتداد شديدًا، ترقُد لعبة اليويو. ويُمكنك أن تُعيدها إلى الحركة من خلال هزِّ الخَيط إلى أعلى. تجذب تلك الهزَّة لعبة اليويو إلى أعلى وتُحرِّر الضغط الواقع على الخَيط لفترة قصيرة. ونظرًا لأن لعبة اليويو تتحرك، فإنها تعلَق بجزء من الخيط المتدلِّي من العمود. وإذا توفَّر القدْر الكافي من الاحتكاك، يظلُّ الجزء العالِق من الخَيط ملفوفًا، ثم تُجبَر لعبة اليويو على لفِّ المزيد من الخيوط، مما يجعلها تصعد لأعلى. وإذا انتظرتَ طويلًا لتحفيز اليويو الراقدة، يُفقَد قدْر كبير جدًّا من الطاقة بسبب الاحتكاك بين العمود الأوسط والعقدة الموجودة حوله، ولن تتمكَّن لعبة اليويو من الصعود مرة أخرى إلى يديك.

في الفضاء، تتعطَّل الجاذبية الأرضية نظرًا لأنَّ كلًّا من رائد الفضاء واليويو يَكونان في حالة سقوط حُر. وبالنسبة إلى لعبة اليويو، يجب أن يُلقي رائد الفضاء لعبة اليويو لأنها لن تسقط من تلقاء نفسها. وعندما تصِل اليويو إلى طرف الخيط، يَجعلها التوقُّف المفاجئ تَثِب، ومن المُرجَّح أكثر أن تعلَق بالخيط المُتراخي وتُجبَر على العودة مرة أخرى. ولجعل لعبة اليويو ترقد، يجِب أن يجذب رائد الفضاء الخيط برفق أثناء الوثب بحيث يَمنع الشدُّ تراخي الخيط. وبإمكان رائد الفضاء عندئذٍ أن يُؤرجِحَ اليويو في دائرة للحفاظ على الشد.

تَميل الاضطرابات العارضة إلى تحرُّك لعبة اليويو في حركة مبادرة، إلا أنه لا يمكن تقدير المبادرة عادةً إلَّا عندما تكون لعبة اليويو بالقُرب من اليد؛ حيث تدور ببطء. وعندما ترقد لعبة اليويو، تخلق السرعة العالية للدوَران قدرًا كبيرًا من الزخم الزاوي يثبت اليويو في مقابل الاضطرابات. حينئذٍ تكون اليويو أشبَهَ بجهاز الجيروسكوب (المدوار).

سأترك لك تحليل خُدَع حركة اليويو، ولكن بالنسبة إلى خُدعة «تمشية الكلب» لعلك ترغب في التفكير في بعض التنويعات الخاصَّة باتجاه الخيط كما هو مُشار إليه في البند التالي.

(٨٦) إرخاء خيط اليويو

هب أنك أرخيتَ خيطًا قصيرًا من لعبة اليويو، ووضعت اليويو على طاولة بحيث يَرتخي الخيط عند أسفل المحور المركزي، ثم جذبتَ الخيط أفقيًّا نحوك. هل ستتحرك اليويو ناحيتك أم بعيدًا عنك، أم ستدور في مكانها؟ ماذا ستفعل إذا جذبتَها إلى أعلى بزاوية عند

سطح الطاولة؟ كيف تتصرَّف اليويو إذا قمتَ بإدارتها بحيث يرتخي الخيط من عند قمة المحور المركزي؟ قبل أن تُجرب اليويو، خمِّن الإجابات. وإن لم يكن لديك يويو، يمكنك الاستعاضة عنه بأنواع عديدة من البَكَر، مثل بكرة الخيوط.

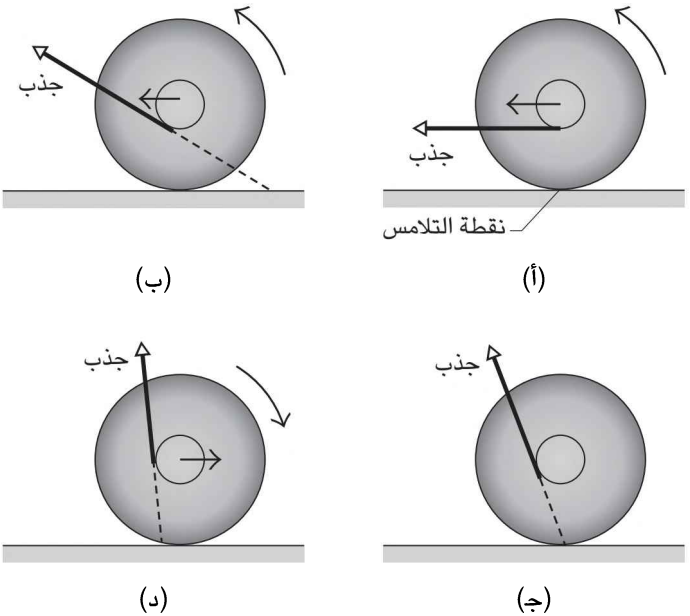
أسند درَّاجة إلى طاولة، وأعد الدوَّاسة لتكون في أدنى وضعية لها، ثم اسحب الدواسة نحو مؤخرة الدراجة. هل ستتحرَّك الدراجة، وإذا تحركت فعلًا، في أي اتِّجاه ستكون حركتها؟

الجواب: تفسير حركة لعبة اليويو يصير أيسر إذا اعتبرت نقطة التلامُس بين لعبة اليويو والطاولة هي النقطة التي من المُقرر أن يُحتسَب عندها عزم الدوَران. ونظرًا لأن الاحتكاك الواقع على لعبة اليويو من جانب الطاولة يعمل عند تلك النقطة، فإن الاحتكاك لا يولِّد أي عزمٍ لتدوير لعبة اليويو. ولتحديد الاتجاه الذي تتحرَّك فيه لعبة اليويو، حينئذٍ عليك أن تفكر في عزم الدوران الناشئ من الخيط. إذا كان عزم الدوَران في اتجاه عقارب الساعة (انظر الأشكال)، لا بدَّ أن يتخطَّى مركز اليويو نقطة التلامُس في اتجاه عقارب الساعة؛ ومِن ثمَّ في اتجاهك. وإذا كان عزم الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة، تكون الحركة معكوسة.

هبْ أن الخيط يَرتخي عند الجزء السفلي للمِحور. عندما تجذب الخيط على نحوٍ أفقي، يكون اتجاه عزم الدوران، الناشئ من الجذْب عند نقطة التلامُس، مع عقارب الساعة وتتحرَّك لعبة اليويو ناحيتك (شكل ١-٣٤أ). لترى ما يَحدث حين تجذب إلى أعلى بعض الشيء، قُمْ بمدِّ خطٍّ متَّجه القوة من الخيط إلى الوراء حتى يصل إلى الطاولة. إذا كان التمديد يمرُّ يسار نقطة التلامُس كما في هو مُوضَّح في شكل ١-٣٤ب، يظلُّ عزم الدوران في اتجاه عقارب الساعة وتظل لعبة اليويو تتحرك باتجاهك. وإذا كان التمديد يمرُّ عبْر نقطة التلامس (بحيث يكون الجذب بزاوية ميل أكبر)، يتراجَع عزم الدوران وتدور لعبة اليويو في مكانها (شكل ١-٣٤جـ). إذا كان اتجاه خط التمديد يَمين نقطة التلامُس (بحيث يكون الجذب بزاوية مَيلٍ أكبر)، يكون عزم الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة وتتحرَّك لعبة اليويو بعيدًا عنك (شكل ١-٣٤د).

وعندما يَرتخي الخَيط من أعلى، تدور اليويو ناحيتك في أيِّ زاوية من زاويا الجذب نظرًا لأن التمديد يكون يسار نقطة التلامُس دومًا.

أما بالنسبة إلى خُدعة الدراجة، فتدور الدراجة إلى الخلف نتيجة جذبك لها. تؤثر القوى الاحتكاكية المُتجِّهة إلى الأمام على العجلتَين، على الرغم من أنها أصغر من قوة



شكل ١-٣٤: بند ١-٨٦: (أ)–(د) اتجاه الجذب يحدد اتجاه تدحرج لعبة اليويو.

جذبك، وتعمل عند نصف قطر كبير وتُسيطِر على الدَّوَران، ممَّا يتسبَّب في تدوير الدوَّاسة إلى الأمام في عكس اتجاه الجذْب.

(٨٧) القيادة عبْر حاجز الصوت

في عام ١٩٩٧، سجلت سيارة نفَّاثة من طراز ثراست سوبرسونك رقمًا قياسيًّا لأقصى سرعة للمركبات في صحراء بلاك روك بولاية نيفادا. بلغت سرعة السيارة ١٢٢٢ كيلومترًا في الساعة (أو ٧٥٩ ميلًا في الساعة) في أحد الاتِّجاهين وبلغَت سرعتها في الاتجاه المعاكس ١٢٣٣ كيلومترًا في الساعة. تخطَّت كلتا السُّرعتَين سرعة الصوت في ذلك الموقع (١٢٠٧ كيلومترات في الساعة)، وبعثت السيارة مَوجات صادمة (دوي اختراق حاجز الصوت) عبْر الصحراء وصولًا إلى المشاهدين. كان تسجيل رقم قياسي لأقصى سرعة لمَركبةٍ تسير على

الأرض أمرًا في غاية الخطورة لأسباب مُتنوِّعة كثيرة؛ مثل احتمالية أن يرفع ضغط الهواء من أسفل مُقدِّمة السيارة ويتسبَّب في انقلابها إلى الوَراء (أثناء السير على نحوٍ أسرع من الصوت). وكان ثمة خطَر أكثر غموضًا مُرتبطًا بعجلات السيارة. هل يُمكنك تخمين ذلك الخطر؟

الجواب: بالنسبة إلى السيارة التي تتجاوَز سُرعتها سرعة الصوت في الصحراء، يدور كل إطار من الإطارات أكثر من ٦٨٠٠ دورة في الدقيقة بتسارع جذب مركزي هائل يصل إلى ٣٥٠٠٠ ضعف عجلة الجاذبية الأرضية عند حافة الإطار. وعلى الرغم من أن الإطارات مَطليَّة بمادة الألومنيوم، فإنَّ التسارُع القطري يجعل المادة المصنوع منها الإطارات تصِل إلى أقصى درجة تحمُّل لها دون أن تَنفجِر. وتُمثِّل العامل المجهول في المسافة التي تقطعها تلك المادة أثناء سَير الإطارات عبْر الصحراء. ولو أنَّ الإطار اصطدم بجسم صغير، فإن الصدمة ستَجعل الإطار يَنفجِر وتتحطَّم السيارة. ونظرًا لأن تلك المنطقة من الصحراء كانت مُستخدَمة لتدريبات سلاح المدفعية، تَعيَّن على طاقم العمل أن يَفحصوا الطريق سيرًا على الأقدام من أجل تفقُّد دانات المدفعية المدفونة والركام المُشابِه قبل أن تتمكَّن السيارة من قطع طريقها.

قصة قصيرة

(٨٨) انفجار وحدة فحص الدوَران

تُفحَص أجزاء الماكينات الكبرى، التي تَخضع لسرعة دوران عالية ولفترة طويلة، أولًا لتقييم إمكانية الفشل داخل «وحدة فحص الدوران». وفي هذه الوحدة، يتمُّ «تدوير» جزء من الماكينة (حتى يصل إلى سرعة عالية) داخل أسطوانة من القراميد الرصاصية وحاوية مبطَّنة، جميعها داخل هيكل فولاذي مُحاط بغطاء مُحكَم بشدَّة. وإذا تسبَّب الدوَران في تهشُّم الأجزاء، من المفترَض أن تحجز القراميد الرصاصية الملساء القطع لتخضع لتحليلٍ لاحِق.

في مطلع عام ١٩٨٥، أُجري فحص دوران لجزء دوار فولاذي (أسطوانة) ذي كتلة بلغت ٢٧٢ كيلوجرامًا ونصف قطر بلغ ٣٨ سنتيمترًا. وحين وصلت العينة إلى سرعة زاوية بلغت ١٤٠٠٠ دورة في الدقيقة، سمِع مهندسو الفحص دويًّا مكتومًا صادرًا من غرفة الفحص التي تشغل مساحة تمتدُّ من الطابق الأسفل منهم إلى الغرفة التي تعلوهم.

وبعد المُعاينة، اكتشفوا أن قراميد الرصاص تناثرَتْ في الردهة المؤدِّية إلى غرفة الفحص، وأن الباب المؤدِّي إلى الغرفة طار إلى موقف السيارات المُتاخِم، واندفع قرميد رصاصي من موقع الفحص ليَخترق حائط مطبخ الجيران، وانهارت العوارِض الهيكلية لمبنى الفحص، وهبطت الأرضية الإسمنتية أسفل حجرة الدوران مسافة ٠٫٥ سنتيمتر، واندفع الغطاء الذي يزن ٩٠٠ كيلوجرام مخترقًا السقف ثم وقع مرة أخرى على أدوات الفحص. وبفعل الحظ الحسَن وحدَه لم تخترق شظايا الانفجار غرفة مهندسي الفحص.

(٨٩) قوارب الكاياك

تخيَّل أنك تُبحِر في المياه الصافية عند مُنحدرات نهرية وانقلب بك قارب الكاياك الذي تركبه. وحين تُدرك أنه ليس من الحكمة أن تواصل رحلتك بقاربٍ مقلوب رأسًا على عقب تُحاول تعديل وضع القارب دون أن تترُك قَمرة القيادة التي تحميك بعض الشيء. كيف تفعل ذلك؟

الجواب: إليك إحدى الاستراتيجيات. وأنت تنقلب بالقارب انحَنِ إلى الأمام وانشُر مجدافك نحوَ سطح المياه الموجودة في اتجاه الانقلاب. بعد ذلك اجذب المِجداف برشاقة لأسفل بحيث تُولِّد المقاومة التصاعدية — التي يواجهها المجداف — عزم دوران يجعل التجديف مُستمرًّا ويُعيدك إلى السطح. وبدلًا من ذلك، لعلك تُميل مستوى المِجداف وتَجذِبه بالتوازي مع طول قارب الكاياك. في تلك الحالة، تأتي القوة التصاعُدية الواقعة على المجداف من المسار المُنحرِف الذي تَسلُكُه المياه قسرًا بفعل المجداف.

قبل أن يظهر جسدك على السطح، فإنه يواجه قوَّة الطفو التي تُلغي وزنك فعليًّا. ورغم ذلك، وبينما يتحرك جسدك نحوَ السطح، يَكتسِب وزنك أهمية ويُمكن أن يوقف الدوران بسهولة. ومن أجل تجنُّب التوقُّف، حافظ على مُستوى جسدك في المياه لأطول فترة مُمكنة من خلال الانحناء على جانبٍ واحدٍ ثم اترُك قارب الكاياك يُواصل الدوران في وضعية عمودية بينما تُواصِل أنت جذْب المجداف لأسفل أو إلى الوراء. وما إن يصير قارب الكاياك في وضعٍ قائم، اجلِس بظهرٍ مفرود.

يَستعين بعضُ قائدي قَوارب الكاياك بأسلوب «تحريك مِفصَل الورك» في أثناء مرحلةٍ عكس اتجاه القارب. ومن خلال تحريك مفصل الوركَين في الاتجاه المعاكس للتجديف، يدور قارب الكاياك قسرًا. وهذا الإجراء مُفيد للغاية عند ضياع المجداف ولا يُمكن الاستعانة بشيء عِوَضًا عنه إلَّا الأذرُع المَمدودة.

(٩٠) رياضة الكيرلنج

في رياضة الكيرلنج، يُدفَع «الحجَر» الدوَّار كي يَنزلق عبْر حلبة جليدية نحو المنطقة المُستهدفة. يكون الحجر، وهو جسم ثقيل، مدعومًا بحزام دائري مُحكَم. يكون المسار الذي يسلكه الحجَر في البداية مُستقيمًا ولكن يبدأ تدريجيًّا في التقوُّس نحو أحد جانبَي الحلبة، ويَزداد التقوُّس حين يَقترب الحجَر من نهاية المسار. على سبيل المثال، إذا انطلَقَ الحجَر في حركةٍ دائرية في اتجاه عقارب الساعة كما يُرى من أعلى، فإنه يَنحرِف جهة اليمين. ويستغلُّ اللاعبون المُحترِفون التقوُّس كي تلتفَّ حجارتهم حول حجَرٍ آخر قد يَحجب الهدف. لماذا يتقوَّس مسار الحجَر؟

عادةً ما تُمارَس لعبة الكيرلنج على جليد مُحبَّب (جليد ذي نتوءات مُتَّجهة لأعلى) تتكوَّن عندما تُرَشُّ المياه على الحلبة، ربما لأنَّ هذا السطح يُتيح المزيد من الانحراف. يعتقد الكثير من اللاعبين أنَّ كنس الجليد بحماسةٍ أمام الحجر يُضيف إلى طول المسار وكذلك يَزيد الانحراف. ما تفسير هذه التأثيرات؟

الجواب: يكون انحراف الحجَر جانبًا (تقوُّس مسار الحجر) بسبب الاحتكاك الواقع على الحزام الداعم المُحكَم حول الحجر. لا يكون الاحتِكاك «احتكاكًا جافًّا» بين الحزام والجليد؛ وإنما «احتكاك رطب» بين الحزام وطبقة رقيقة من المياه الذائبة من الجليد بسبب فرك الحزام. وقَدْر الاحتكاك لا يكون مُتماثلًا حول الحزام؛ لأنَّ الاحتكاك عند أيِّ نقطة يتوقَّف على سرعة هذه النقطة. إذا انزلق الحجَر بدون دوَران، فستكون سرعة كلِّ النقاط مُتماثلة وستُواجه القدْر نفسه من الاحتكاك. وعلى الرغم من ذلك، أثناء اللعب، يَنزلق الحجر بقدرٍ من الدَّوَران. ويعني المزيج من الحركة الأمامية والدوَران أن نقاطًا مختلفة على الحزام تتحرَّك بسرعات مُختلفة ومِن ثَمَّ تواجه كميَّات مختلفة من الاحتكاك. ونتيجةُ هذا التوزيع غير المُتساوي للاحتكاك الواقع على الحزام هي محصلة القوى الواقعة على الجانب، ممَّا يتسبَّب في انحراف الحجَر. إذا كان الحجر يَدور في اتجاه عقارب الساعة، تكون مُحصِّلة القوة والانحراف ناحية اليمين. وهذا التوزيع غير المُتساوي للاحتِكاك هو المسئول عن حركة الحجَر عند نهاية مساره؛ فبعد بُرهة من الوقت تتوقَّف حركته الأمامية ويدور حول جانبٍ واحد كما لو أنه علَق في ذلك الجانب.

ومسألة الجليد المُحبَّب غير مُفسَّرة، وأحيانًا يُستهان بمُمارسة الكنس دون وجهِ حق؛ فالسطح المُحبَّب قد يُعزِّز اعتماد الاحتكاك على السرعة. بالتأكيد، يُزيل الكنس الحبيبات

الخشِنة ونُدفَ الثلج التي قد تُعيق الحجر، ولكنه قد يزلق حركة الحجَر من خلال إذابة الجليد ولو جزئيًّا.

(٩١) السَّير على الحبال

كيف يُساعد عمود طويل وثقيل السائر على الحبال في الحفاظ على توازُنه، ولا سيما إذا كان العرض في الهواء الطلْق ومع هبوب رياح مُعتدلة؟

وبعض عروض السَّير على الحبال تبدو خطيرة للغاية؛ ففي عام ١٩٨١ سار ستيفن ماكبيك على سلك يَربط بين قِمَّتَين بجبال تسوجشبيتسه، الواقعة على الحدود بين النمسا وألمانيا، وأثناء جزءٍ من استعراض السَّير، كان ماكبيك على ارتفاع كيلومتر فوق سطح الأرض. وفي اليوم نفسه سار على كابل تستخدمه عربات التلفريك بين قِمَم الجبل. واستطاع بطريقةٍ ما أن يتغلَّب على درجة مَيلٍ تجاوزت ٣٠ درجة.

وفي عام ١٩٧٤ سار فيليب بيتي فوق سلك يربط بين بُرجَي مركز التجارة العالمي بمدينة نيويورك على ارتفاع ٤٠٠ متر من مستوى الأرض. كان قد مدَّ السلك بين البُرجَين باستخدام سهمٍ وقَوس. وبعد أن عَبر المسافة بين البُرجَين ٧ مرات على الأقل، قامت الشرطة باعتقاله بجريمة التعدِّي على مُمتلكات الغَير. يبدو أنهم لم يَستطيعوا التفكير في أيِّ أسبابٍ أخرى لمنعه؛ نظرًا لأنَّ المُشرِّعين لم يتوقَّعوا احتمالية إدراج السَّير على الحبال تحت بند الجرائم الجنائية.

الجواب: يتمُّ الحفاظ على التوازُن إذا بقِيَ مركز الكتلة — في المتوسط — فوق الحبل. وإذا بالَغ السائر في مَيله نحو أحد الاتجاهَين، لا بدَّ أن يَنحني الجسد في الاتجاه المُعاكس لتصحيح الوضع. والعمود الثقيل يُساعد؛ فإذا ما مال السائر نحو اليسار، مثلًا، يَميل العمود نحو اليمين بحيث يتمُّ الاحتفاظ بمركز كتلة السائر والعمود فوق الحبل. ولا بدَّ من تنفيذ هذا الإجراء بسرعة قبل أن يميل السائر أكثر مما يَنبغي. لن يُفيد كثيرًا استخدام عمود خفيف؛ ففي ظلِّ وجود كتلة ضئيلة سيتطلب الأمر تناقلها مسافة بعيدة كي يكون الأمر عمليًّا.

(٩٢) ركوب الثِّيران

لماذا يُعَد ركوب الثِّيران أو الماشية غير المروَّضة في رياضة الرودِيو (أو ركوب الثور الآلي في الحانات، كما كان شائعًا في سبعينيَّات القرن العشرين) أمرًا في غاية الصعوبة؟ هل

يُوجَد أيُّ شيءٍ يستطيع الراكب المُحنَّك أن يفعله لكي يَبقى على ظهر الثَّور بخلاف التشبُّث بالطَّوق المربوط حول صدْر الحيوان؟

الجواب: ثبات الراكب يتوقَّف على موضع الثور أسفل منه، غير أنَّ الثور يتلوَّى ويَرتجُّ ويركض ويتوقَّف فجأة. ومع كل حركة مفاجئة من الثور، يَميل الزَّخَم والزَّخَم الزاوي الخاص بالراكب إلى زعزعة ثباته أو قلب وَضعِه. فإذا أمسك بالطَّوق بكلتا يدَيه، لا بدَّ أن يستعين بقوَّته لإيقاف حركة الجزء العلوي من جسده المُترنِّح.

ويستطيع الراكب أن يُحسِّن أداءه إذا فرد إحدى ذراعَيه في حين أمسك بالطَّوق بالذِّراع الأخرى. ثم يُمكنه بعد ذلك أن يفرد ذِراعه في اتجاهٍ يقاوم أيَّ دوَران مُفاجئ لجسم الراكب نتيجةً لحركة الثور أسفل منه. ولا بدَّ أن يفرد الذراع الطليقَةَ عاليًا بدلًا من أن تكون على مستوًى مُنخفِض؛ بحيث تكون كُتلتها بعيدة عن المركز الذي يَميل الراكب أن يدور حوله في أيِّ لحظة. حينئذٍ فقط تستطيع حركة الذراع الطليقة أن تُقاوم بفعالية دوران الجزء العلوي الأضخم من الجسم. وإذا أمسك الراكب بقُبَّعة كبيرة في يدِه الطليقة، قد تَزيد مُقاومة الهواء الواقعة على القبَّعة في أثناء التلويح بها من قدْر المقاومة لدوران الجزء العُلوي من الجسم.

ويفعل المُتزلِّج حديث العهد بالتزلج بحذاء ذي نصل أو عجلات، شيئًا مُشابهًا لحلِّ مُشكلة فقْد التوازُن ولو جزئيًا. ففي أثناء مُحاولتِي الأولى للتزلُّج على الجليد، عندما اختلَّت الزلاجات، أدرتُ ذراعي تلقائيًّا على هيئة دوائر رأسية من فوق كتفي (مثل الطاحونة الهوائية) لكي أُحافظ على وضعية مركز الكتلة فوق الزلَّاجات؛ ومِن ثمَّ أحافظ على توازُني وما تبقَّى من كرامتي.

(٩٣) تمزيق ورق التواليت

يتمثَّل أحد إحباطات الحياة، حتى وإن كان ثانويًّا، في سحْب لفافة ورق التواليت المُجزَّأ، لينتهي بك الأمر بسحْب مُربَّع واحد فقط، وهو بالتأكيد لن يَفي بالغرض. تقتصر المشكلة على اللفافات الجديدة، ونادرًا ما تحدُث هذه المشكلة مع اللفافات التي أوشكَت على النفاد. لماذا تكون لفافات ورَق التواليت الجديدة مُزعِجة جدًّا في هذا الصدد؟ هل للزاوية التي تسحب بها ورق التواليت أهمية؟ وهل تسُوء المشكلة إذا كان الورق يُسحَب من أعلى اللفافة أم من أسفلها، إذا كان وضع اللفافة معكوسًا؟

الجواب: تُولِّد القوة التي تبذُلها على الطرف السائب لورق التواليت عزمَ دوران يجعل اللفافة تدور. ويُقاوم عزمُ دورانك عزمَ دوران متولِّد من الاحتكاك بين الجزء الداخلي للكارتون المُقوَّى الخاص باللفافة والقضيب المعدني الذي تُعلَّق عليه لفافة الورق. عندما يكون السَّحب قصيرًا، يكون الاحتكاك كافيًا لمنع اللفافة من الدَّوران. وعندما تزيد من السحب، يزداد الاحتكاك حتى يصل إلى الحد الأقصى. والسحب القوي يُجبِر اللفافة على الدوَران، وبمجرَّد أن يحدُث إفلات، يتناقص الاحتكاك فجأة. ولكن إذا كان السحب المطلوب مبالغًا فيه، يتمزَّق الورق.

عندما تكون لفافة الورق جديدة، يضغط وزنها على القضيب المعدني ويجعل الحد الأقصى للاحتكاك كبيرًا، وهو ما يعني أن السَّحْب المطلوب لتدوير اللفافة سيَقطع الورق بالتأكيد. وعندما تُوشِك اللفافة على النفاد ويكون وزنها أقل، يكون الحدُّ الأقصى أقل؛ ومِن ثَمَّ يُمكِنُك أن تتغلَّب على الاحتكاك بجذبةٍ بسيطة، وبدون أن يتمزَّق الورق على الأرجح. إذا كنت تسحَب في اتجاه علوي، كما هي الحال عادةً إذا كان الطرف السائب أسفل اللفافة، فأنت تُساعد في دعم اللفافة؛ ومن ثَمَّ يكون الحد الأقصى للاحتكاك أقل. هكذا تقلُّ احتمالية تمزُّق الورق. (في هذا التفسير، تجاهلت الدور الذي تلعبه أذرع عزم الدوران؛ أي المسافة بين محور الدوران ونقطة الضغط. ولعلَّك ترغب في مُراجعة نتائجي من خلال النظر في مدى تغيُّر ذراع عزم الدوران عند سحْب ورق التواليت عندما توشك اللفافة على النفاد.)

مع الأسف، لا مفرَّ من الفيزياء حتى داخل الحمام.

(٩٤) قذف الحجارة والقنابل

كيف يُمكنك أن تقذف حجرًا مسطحًا على سطح المياه؟ هل يُمكنك زيادة عدد وثبات الحجَر فوق سطح المياه من خلال زيادة السرعة أو الدوَران الذي تُلقي به الحجَر؟ كيف يتقافَز الحجَر فوق الرمال المُبتلَّة ولماذا يترك زوجًا من الآثار الغائرة المُتقارِبة التي تفصلها مسافات مُتباعِدة على طول مساره؟

في أثناء الحرب العالمية الثانية، ألهم قذف الحجارة فوق المياه فكرة ابتكار أحد الأسلحة المُستخدَمة في سلاح الجوِّ الملَكي. قرَّر سلاح الجو الملَكي تدمير عدَّة سدود حيوية في ألمانيا، ولكن كانت السدود مَتينةً للغاية لدرجة استحالة تدميرها إلَّا إذا وُضعت المُتفجِّرات بالقُرب من القاع؛ ومِن ثَمَّ فإنَّ تدمير الأسطح العلوية لن يُفيد، وكانت الطوربيدات التي تسقطها الطائرات في المياه تَعلَق في الشباك المُنتشرة بالقُرب من السدود. وتزايَدت صعوبات المهمة

بحقيقة أنَّ السدود كانت تقع في وديان عميقة وضيِّقة قد تُعيق الهجوم الجوي، وأي هجوم لا بدَّ أن يُشَنَّ في ليلة ظلماء إذا كان مُقدَّرًا للطائرة أن تتفادَى هجوم المدفعية التي تحمي الوديان.

ومن أجل إيجاد حلٍّ للمشكلة، ابتكَر سلاح الجوِّ الملَكي قنبلة أسطوانية بطول ١,٥ متر وقُطر أصغر قليلًا من ذلك. وحين كانت الطائرات تقترب من السد، كان المُحرِّك يُطلِق قنبلة بقدرٍ كبير من الدوَران الخلفي (بحركة علوية مُعاكسة لاتجاه حركة الطائرة)، وقُذفت قُنبلة من ارتفاع ٢٠ مترًا فوق سطح الماء. (كانت الطائرة مزوَّدة بمِصباحَين ساطعَين يصدُر منهما أشعة مائلة بحيث يلتقي الشعاعان على بُعد ٢٠ مترًا أسفل الطائرة. ومن خلال العثور على الارتفاع الذي يُعطي أصغر بُقعة من الضوء على سطح المياه، تُمكِّن الطيار من وضع الطائرة على الارتفاع المناسب.)

ماذا حدَث حين وصلتِ القُنبلة إلى المياه؟ هل كان لدوَران القنبلة أيُّ استخدامات أخرى عند السد؟

الجواب: من أجل قذْف الحجَر على نحوٍ جيد عليك أن تجعل الحجَر يتقافَز فوق سطح المياه بحيث يكون كلٌّ من مستواه ومسار اقترابه أفقيًّا تقريبًا. ينبغي عليك أيضًا أن تُدير الحجَر بأكبر قدرٍ مُمكن لأنَّ الدوران يُوازن اتجاه الحجر، مثلما يُوازن الدوَران جهاز الجيروسكوب. عندما يصطدم الحجَر بالمياه على نحوٍ مُناسِب، تظهر موجة صغيرة على السطح أمام الحافة الأمامية، ثم يرتدُّ الحجَر من عندها في الاتجاه الأمامي. تُحدِّد السرعة الأولية للحجَر المسافة بين القفزات. ويُحدَّد عدد القفزات من خلال فقد الطاقة مع كلِّ قفزة. لا يفقد الحجَر الطاقة حين يصنع موجة وحسْب، وإنما حين يحتكُّ بسطح المياه لفترة قصيرة أيضًا.

ويُعدُّ قذف الحجارة هوايةً قديمة، ولكن في السنوات الأخيرة استُحدِث «حجر» صناعي يتكوَّن من الرمال والجص. يكون سطحه السُّفلي مقعَّرًا لكي يُقلِّل الاحتكاك بالمياه وكذلك يُقلِّل فقْد الطاقة. بينما وصل الرقم القياسي العالمي للحجَر الطبيعي حوالي ٣٠ قفزة، فإن الحجَر الصناعي يصِل إلى ٣٠ أو ٤٠ قفزة.

ومن أجل تفسير مسار الحجَر فوق الرمال، هبْ أنَّ الحجَر اصطدم أولًا عبْر حافته الخلفية، تُحفَر حفرة ضحلة في الرمال، ويَقلِب الاصطدام الحافة الأمامية بسرعة لتحفُر بذلك حفرة قريبة. بعد ذلك يدفع الاصطدام الثاني الحجَرَ عبْر الهواء وكذلك يُعيد توجيهه بحيث يَنغرِس زَوج آخر من الآثار على طول الشاطئ وهكذا.

عندما اصطدمت قُنبلة سلاح الجوِّ الملَكي بالمياه، فإن حركة الدوَران الخَلفي جعَلَت القنبلة تَقفز بسبب الحركة السريعة للسَّطح السُّفلي في مقابل المياه. الفقد التدريجي للطاقة أثناء قفْز القُنبلة قلَّل من مسافة كلِّ قفزة، إلا أن القفزة ظلَّت كبيرة بالدرجة الكافية لتَجتاز شباك الطوربيد. وعندما اصطدمت القنبلة بحائط السد، أجبر الدوران الخلفي أسطوانة القنبلة على التدحرُج أسفل الحائط. بعد ذلك أشعلت شُحنة هيدروستاتيكية، مجهَّزة على عمق ١٠ أمتار، فتيل القُنبلة. وقال أحد المعلِّقين: «كانت فكرة بسيطة وجميلة لوضع قُنبلة تزن حوالي ١٠ آلاف رطل على بُعد بضع أقدام.»

طُورت قنبلة مُشابهة، ولكنها أصغر حجمًا وكروية الشكل، لإغراق السفن. كان لا بدَّ من تدوير قُنبلتَين لتدُورا دوَرانًا خلفيًّا بمعدل ١٠٠٠ دورة في الدقيقة ثم تسقُطان مِن ارتفاع ٨ أمتار وعلى بُعد حوالي ١,٥ كيلومتر من الهدف. تمثَّلت الفكرة في أنهما ستَتقافَزان فوق سطح المياه مثل الأسماك الطائرة؛ ومِن المُرجَّح أن تَتفاديا الشباك والقنابل التي تحمي الهدَف. وبمجرَّد أن تَصطدما بالهيكل، تتدحرَجان إلى أسفل على عُمقٍ تَنفجِر عنده الشُّحنة التي تزن ٦٠٠ رطل. ويُمكِن الاستعانة بهذه القنابل أيضًا لاختراق الأنفاق الطويلة؛ فمن خلال إطلاقها عبْر فتحة النفَق، قد تَتقافَز على طول مسافةٍ عميقة من النَّفَق قبل الانفجار. ولأسبابٍ شتَّى، لم تُستخدَم القنابل الأصغر حجمًا مُطلَقًا لأيٍّ من هذَين الغرضين. (على الرغم من أنَّ عِلم الفيزياء مُمتعٌ دومًا، فإنَّ تطبيقاته تكون مُروِّعة أحيانًا.)

(٩٥) دوران المُتزلِّج حول نفسه

إنَّ دوَران المُتزلِّج حول نفسه على أطراف الأصابع هي طريقة معهودة للحفاظ على الزَّخَم الزاوي. فعندما يضمُّ المُتزلِّج ذراعَيه إلى جسده، تدور الزلَّاجة على نحوٍ أسرع. وترجع الزيادة في الحركة الدائرية إلى حقيقة أنه لا يُوجَد عزم دوَران خارجي واقِع على المُتزلِّج، ومن ثَمَّ لا يُمكن لحركته أن تُغيِّر من زخمه الزاوي. هكذا، ونظرًا لأنه يُحرِّك جزءًا من كُتلتِه (الذراعَين وساقًا واحدة على الأرجح) نحو المِحوَر الذي يدور حوله، لا بدَّ أن يَزيد معدَّل دورانه. هذا الرأي صحيح بالتأكيد، ولكن ما القوة التي تجعله يدور على نحوٍ أسرع، وما سبب زيادة طاقتِه الحركية بالضبط؟

الجواب: يُمكن الإجابة عن كِلا السؤالَين من منظور «قوَّتَين تخيُّلِيَّتَين» يتعرَّض لهما المُتزلِّج. وُصفت القوَّتان بأنهما تخيُّلِيَّتان لأنهما غير مُتواجدتَين في الحقيقة من منظورنا الثابت، على الرغم من وضوحهما للغاية للمُتزلِّج من منظوره المُتحرِّك، والقوَّتان ليستا قوَّتي

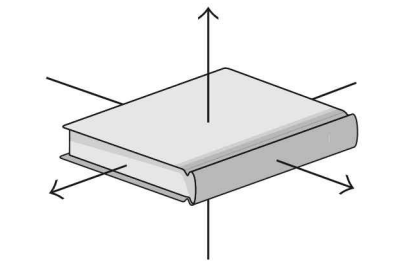
شدٍّ أو جذب حقيقيَّتَين. وعوضًا عن ذلك، تكون هاتان القوتان تفسيرًا لما يَشعُر به المُتزلِّج. إحدى هاتَين القُوَّتين تكون مُتَّجِهة إلى الخارج باتجاه قُطري؛ وهي «قوة طرْدٍ مركزي». وعندما يضمُّ المُتزلِّج ذراعَيه وساقه، يجب عليه أن يُقاوم تلك القوة الخارجية الظاهرة. ويُضيف مجهوده إلى طاقته الحركية المُتزايدة. القوة الأخرى، وهي «قوة كوريوليس»، تدفعه فيما يبدو نحوَ المِحوَر الذي يدور حوله. وبينما يضمُّ المُتزلِّج ذراعَيه وساقَيه، يَشعُر كما لو أنَّ قوةً غير مرئية تضغط عليه، مما يَجعلُه يدور على نحوٍ أسرع.

(٩٦) دوران الكتاب

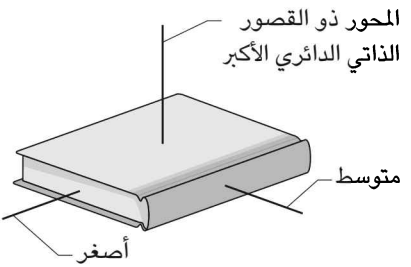
اربط شريطًا مطاطيًّا حول كتاب لتُبقيَه مُغلقًا ثم اقذِفْه في الهَواء أثناء لفِّه حول واحدٍ من المَحاوِر الثلاثة الأساسية المُبيَّنة (شكل ١-٣٥أ). بالنسبة إلى اختيارَين من الثلاثة، يكون الدوَران مُستقرًّا. لماذا يَتمايَل الكتاب على نحوٍ ملحوظ عند دوَرانه حول المِحوَر الثالث؟ يمكن ملاحظة حالات عدم استقرار مُشابهة عند قذف مطرقةٍ أو مضرب تنس أو مجموعة متنوِّعة من الأشياء الأخرى في الهواء.

الجواب: تتميَّز المَحاور المارَّة عبْر الكتاب بالقصور الذاتي الدَّوَراني المُرتبِط بها. والقصور الذاتي الدَّوراني مُرتبط بالطريقة التي تتوزَّع بها الكتلة فيما يخصُّ المِحوَر الذي يدور حوله الكتاب. وبالنسبة لأحد المحاور، الكتلة مُوزَّعة بعيدًا عن المحور (بحيث يكون «القصور الذاتي الدَّوَراني» في أكبر صورِه)، بينما مع محورٍ آخر تكون الكتلة قريبة من المِحوَر (بحيث يكون «القصور الذاتي الدوَراني» في أصغر صوره) (انظر شكل ١-٣٥ب). عندما يدور الكِتاب حول أيٍّ مِن هذين المِحورَين، يكون الدوران مُستقرًّا.

المحور المُثير للمشكلة هو المحور الذي يكون عنده توزيع الكتلة والقصور الذاتي الدوَراني مُتوسِّطًا. لو أنك رميتَ الكتاب حول ذلك المحور على نحوٍ مثالي، فإنه سيدور على نحوٍ مستقر. لكن تتمثَّل المشكلة في أنه لا يُمكِنُك أن تُنفِّذ مثل هذه الرمية المثالية. أنت ستُخطِئ حتمًا، وحينئذٍ سينتج عن الخطأ اهتزاز يَزداد سريعًا. وَفق أحد التفسيرات، يُولِّد الخطأ في الترتيب الأوَّلي قوةَ طردٍ مركزي فعَّالة (قوة مُتخيَّلة متَّجهة نحو الخارج باتجاه قطري) واقعة على الكتاب والتي تجعله يدور حول المحور ذي القصور الذاتي الدوَراني الأكبر. والاهتزاز الذي تراه هو عبارة عن مزيجٍ من الدَّوَران الذي بدأته أنت والدوران الإضافي الناتج عن قوة الطرد المركزي.



(أ)



(ب)

شكل ١-٣٥: بند ١-٩٦: (أ) ثلاثة محاور تمرُّ عبْر الكتاب. (ب) القصور الذاتي الدائري المُرتبِط بالمَحاور.

ويظهر المِحوَر المُعقَّد المُثير للمشكلة وذو التوزيع المتوسِّط للكتلة في جميع أنواع الأجسام. ورغم ذلك، إذا كان أيٌّ من المِحورَين يتمتَّع بقصورٍ ذاتيٍّ دوَرانيٍّ مُتساوٍ، يكون الدوَران حول أيٍّ من المَحاور غير مُستقر، وربما يتحوَّل الدوران إلى لفَّةٍ بطيئة حول المحور بدلًا من أن يكون اهتزازًا واضحًا. بالإضافة إلى ذلك، إذا كانت مقاوَمة الهواء الواقعة على الجسم المُتحرِّك كبيرة، يكون الدوران — حول المحور ذي توزيع الكتلة والقصور الذاتي الدوَراني الكبيرَين — غير مُستقر. ومن أجل توضيح هذه الخاصيَّة، اقذِف بطاقة مُستطيلة في الهواء بينما تجعلها تدور حول ذلك المحور، تفيد الاحتمالات بأن الأمر سينتهي بالبطاقة وهي تدور حول المحور ذي القصور الذاتي الدوَراني الأقل.

(٩٧) سقوط القطط وحركات روَّاد الفضاء وقفزات الغَوص

إذا سقطت قطَّة من ارتفاع متر أو أكثر بوضعيَّةٍ مقلوبة رأسًا على عقب، فإنها تعدل نفسها سريعًا لكي تهبط أرضًا على مخالبها. ويبدو أنَّ هذه الفعلة تَخرق قانونًا صارمًا في علم الفيزياء؛ ألا وهو: عندما يَغيب عزم الدَّوَران الواقع على جسمٍ ما، فإنه لا يُمكن تغيير الزخم الزاوي لهذا الجسم. في هذه الحالة، يَنطبق هذا على جسم القطة. تبدأ القطة السقوط من دون دوَران؛ ومِن ثَمَّ يكون الزخم الزاوي لها صفرًا، ويغيب عزم الدَّوران الواقع عليها. ورغم ذلك، يُوحي دورانها أن زخمها الزاوي لا يَبقى صفرًا. السؤال: هل تخرِق القطة القانون؟

داخل المركبة الفضائية المُتحرِّكة، كيف يستطيع رائد الفضاء أن يَدور يسارًا أو يمينًا، في حركة «مُنعرجة»، دون أن يلمس شيئًا؟ كيف يُمكن أن «ينعرج» رائد الفضاء، بمعنى أنه يدور إلى الأمام أو الخلْف حول مِحور أفقي يتنقل يَمنةً ويسارًا؟ هل «اللفَّة»، بمعنى الدوَران حول محور أفقي يمتدُّ من الأمام إلى الخلف، مُمكنة؟ (في هذه الحالة، يكون للجسم زخم زاوي صفري القِيمة ويَغيب عزم الدوران الواقع عليه، ورغم ذلك يدور بشكلٍ ما.)

يختلف الوضع مع قفزَة الغطَّاس من على متْن سفينة أو منصَّة لأن السقوط يبدأ عادة بقدْر من الزخم الزاوي عندما يَدفع الغطَّاس نفسه من المنصَّة أثناء القفز. في أبسط قفزات الغطس، ينقلب الغطَّاس بحيث تكون يداه أول شيء يدخل الماء. لماذا يَزداد معدَّل الدوَران عندما يقفز الغطاس بقفزة الغطس بفرْد الساقَين وتحويطهما بالذِّراعَين (قفزة بايك) أو بقفزة الغطس بانثناء الوِرك والرُّكبتَين (قفزة تاك) قبل الاعتدال للدخول في المياه؟ الدوَران السريع مطلوب إذا أراد الغطَّاس أن يلفَّ في الهواء عدة مرات قبل أن يصِل إلى المياه.

كيف يستطيع الغطَّاس أن يلفَّ قبل الغطس؟ على سبيل المثال، ربما يقوم الغطَّاس بثلاث لفاتٍ هوائية في حركة الشقلبة الأمامية. هل يجِب أن تأتيَ الحركة الملتفَّة نتيجة لدفعة مُعينة من المنصَّة أم هل يستطيع الغطَّاس أن يَنطلِق من المنصَّة في حركة شقلبة خالصة ثم يلفَّ في الهواء؟ الكثير من التقنيات الفيزيائية التي يستعين بها الغطَّاسون يستخدمها المُتزلِّجون أثناء «المناورة الهوائية» (أداء مناوَرات بارعة في الجو) ولاعبو الجمباز ومُتزلِّجو الألواح والمشاركون في سباق الدرَّاجات بي إم إكس.

وبعض قفزات الغطس والقفزات على منصَّة الترامبولين مشابهة لسقوط القطة من ارتفاع من حيث إنها تبدأ بدون زخم زاوي. ولكن، بدون ميزة عزم الدَّوَران الناتج من الدفع على المنصَّة، يستطيع الغطاس أو مؤدِّي الترامبولين أن يؤدي حركاتٍ دائريةً في الهواء.

الجواب: قبل قرن من الزمان، قُدِّمت التفسيرات المُتعلِّقة بكيف تتقلَّب القطة في الهواء، ورغم ذلك لا يزال الجدَل مُستمرًّا. وهنا سأُقدِّم تفسيرَين (كلٌّ منهما مدعوم بأدلَّة تصويرية)، ولكن ضعْ في الاعتبار أنَّه نظرًا لأن القطط لا تدرُس علم الفيزياء، فلن تَستعين جميعها بالتقنية نفسها.

تفسير ١: تخيَّل أنَّ القطَّة تتكوَّن من نصفَين مُتَّصِلين بمفصل مَرِن عند منتصف عمودها الفقري. يمرُّ محور عبْر كلِّ نصفٍ وكلا المِحورَين يلتقيان بزاوية لأنَّ الجسم مُحدَّب إلى أسفل. وبمجرَّد أن تسقط القطة، يدور النِّصفان حول محورَيهما المُستقلَّين في الاتجاه «نفسه»، في حين يدور المفصل حول محور أفقي في الاتجاه «المعاكس». على سبيل المثال، إذا كان النِّصفان يدوران في اتجاه عقارب الساعة من منظور خلفي، فإن المِفصَل يدور عكس اتجاه عقارب الساعة. (تذكَّر أنه نظرًا لأنَّ النصفَين يدوران معًا، فإن جسم القطة لا يتلوَّى.) يتضمَّن الدَّوران زخمًا زاويًّا، ولكن علامة الزخم الزاوي المتَّجه مع عقارب الساعة تكون سالبة، في حين أنَّ علامة الزخم الزاوي المُتَّجه عكس عقارب الساعة تكون مُوجبة. ومِن ثَمَّ إجمالي الزخم الزاوي الخاص بالقطة أثناء دوَرانها يظلُّ صفرًا، وهي القيمة التي تبدأ القطة بها سقوطها.

تفسير ٢: مرة أخرى، ألقِ نظرة من منظور خلفي. تسحب القطة ساقَيها الأماميَّتَين إلى الداخل، وتُبقي ساقَيها الخلفيَّتَين ممدودتَين، وتحرك ذيلها في عكس اتجاه عقارب الساعة. هذه الحركة تجعل كلًّا من الرأس والجسم يدوران مع عقارب الساعة، ولكن مع سحْب الساقَين الأماميَّتَين، يدور النصف الأمامي من القطة أكثر من النصف الخلفي. (لاحظ أنه في هذا التفسير، جسم القطة يتلوَّى.) وبينما يواصل الذَّيل دورانه، تمد القطة ساقيها الأماميتَين وتسحب ساقيها الخلفيتَين. يتسبَّب هذا التعديل في دوَران النصف الخلفي مع اتجاه عقارب الساعة على نحوٍ أسرع من النصف الأمامي؛ ومن ثَمَّ يتناقَص التِواء الجسم. في النهاية، تصحح القطة من وضعها وتهبط وهي متشبِّثة بالأرض بمخالبها الأمامية. (إذا كانت القطة بلا ذيل، تقوم إحدى ساقيها الخلفيَّتَين بدَور الذيل.) وكما هي الحال مع التفسير الأول، يظلُّ إجمالي الزخم الزاوي أثناء السقوط صفرًا.

ولو كنت أنت رائد الفضاء المذكور في البند، إليك طريقة لكي تَخلُق زاوية انعراج. افرِد ساقك اليُمنى إلى الأمام وساقك اليسرى إلى الخلف. ثم ضُم ساقيك مرة أخرى بعد اندفاع ساقك اليُمنى ناحية اليمين والخلف وساقك اليسرى ناحية اليسار والأمام. وكما تُرى من

أعلى، تتحرَّك الساقان في اتجاه عقارب الساعة. وأثناء تحرُّكهما، لا بدَّ أن يدور جذعك في عكس اتجاه عقارب الساعة لكي يَبقى إجمالي الزخم الزاوي الخاص بك صفريَّ القيمة.

لكي تُنفِّذ حركة منعرجة، ارفع ذراعَيك لأعلى يسارًا ويَمينًا ثم حركهما في دوائر في الاتجاه نفسه، كما لو أنك تَسبَح. يدور جذعُك في الاتجاه المعاكس، ومرة أخرى يظلُّ إجمالي الزخم الزاوي الخاص بك صفرًا، وتأتي اللفَّة من مزيجٍ من الحركة المُنعرجة والتأرجُح. (أين تنتهي بك الحال إذا ما تعرَّضتَ لسلسلةٍ من الانعراجات ناحية اليسار وحركة مُنعرجة أمامية ثم انعراج نحوَ اليمين؟ ماذا عن سلسلةٍ من الحركات المُنعرِجة وانعراج نحوَ اليمين ثم حركة مُنعرِجة خلفية؟ من المُثير للدهشة أنَّ الأمر ينتهي بك في نفس الاتجاه، رغم أنك تُشبِهُ في أيٍّ من هذه الحالات فردًا من فرقة المُهرِّجين الثلاثة.)

إذا نفذت قفزة الغطس بفرْد الساقين أو انثناء الورك والركبَتَين أثناء الشقلبة الهوائية، يزداد معدَّل دورانك لأنك تجذِب الكتلة نحوَ المحور الذي تدور حوله. (في هذه الحالة تُشبِهُ المُتزلِّج الذي يضمُّ ذراعَيه وساق واحدة أثناء الدَّوَران حول نفسه على أطراف أصابعه.) يُقلِّل الجذب الداخلي توزيع الكتلة خاصَّتك. ولا يتغيَّر الزخم الزاوي الخاص بك الناتج عن ذلك التوزيع ومعدَّل دورانك.

وإذا حرَّكتَ ذراعك اليُمنى إلى أعلى وذراعك اليُسرى إلى أسفل أثناء الشقلبة الهوائية، فإنَّ حركتهما تُجبِر جذعك على الدوَران مع تحرُّك رأسك نحو اليمين. لا تُغير الحركة الزخم الزاوي الخاص بك ولكنها تتسبَّب في عدم استقامة المحوَر الذي تتشقلب حوله من اتجاه الزخم الزاوي، وتتمثَّل النتيجة في حدوث الْتِواء. وهكذا، لستَ بحاجة إلى بدء حركة التِواء من خلال دفع منصَّة الغطس ولكن يُمكن تنفيذ حركة الالتواء في الهواء.

(٩٨) الشقلبة الرباعية

في العاشر من يوليو عام ١٩٨٢، بمدينة توسان بولاية أريزونا، الولايات المتحدة الأمريكية، أفلَتَ لاعِب الأكروبات الهوائي، ميجيل فاسكيز، قبضتَه من قضيب أرجوحته أثناء أداء فقرةٍ في سيرك ذا رينجلينج براذرز آند بارنوم آند بيلي، وثَنى رُكبتَيه وتشقلَبَ أربع مرَّاتٍ كاملة ثم أمسكَ بيد أخيه، خوان، الذي كان مُتدلِّيًا من فوق أرجوحة أخرى. كانت هذه هي المرة الأولى التي تؤدَّى فيها شقلبة «رباعية» أمام جمهور السيرك، على الرغم من أن المحاولة بدأت منذ عام ١٨٩٧ حين نُفِّذت أول شقلبة ثلاثية. ما الذي يجعل الشقلبة الرباعية صعبةً للغاية (وبالتَّبعيَّة، يجعل الشقلبة أربع مرَّاتٍ ونصف مُستحيلة)؟

الجواب: من أجل الإعداد للقفزة، يتأرجَح لاعب الأكروبات الهوائي وشريكه على أرجوحة بهلوان. عندما يتحرَّك لاعب الأكروبات إلى أعلى نحوَ شريكه، يَنطلِق من على أرجوحته ويتَّخذ على الفور وضعية انثناء الوِرك والرُّكبتَين ثم يتشقلَب. وعندما ينهي الدورة الرابعة له، لا بدَّ أن يُمدِّد جسده لكي يتمكَّن شريكه من أن يُمسِك بذراعَيه. ومِن ثَمَّ للقفزة شرطان أساسيَّان: (١) لا بدَّ أن يدور لاعب الأكروبات بسرعة كافية ليُكمل أربع دورات في الوقت الذي يَنطلِق نحوَ شريكه. (٢) لا بدَّ أن يكفَّ عن الدوران بمجرد أن يصِل إلى شريكه وإلَّا سيدور بسرعة بالغة يتعذَّر معها الإمساك به.

ومن أجل استيفاء الشرط الأول، يقفز لاعب الأكروبات وهو يثني وركه وركبتَيه ليُقرِّب كتلته من مركز الكتلة الذي يدور حوله. وهذه الحركة تزيد معدَّل الدَّوَران مثلما يزداد المعدل عندما يضمُّ المتزلِّج ذراعَيه وإحدى ساقيه إلى الداخل أثناء الدوران حول نفسه. ورغم ذلك لا يستطيع معظم لاعبي الأكروبات أن يضمُّوا أنفسهم بإحكام كافٍ ليَحصُلوا على معدل الدوران المطلوب للشقلبة الرباعية.

ومن أجل استيفاء الشرط الثاني، لا بدَّ أن يلاحظ لاعب الأكروبات الأجواء على نحوٍ جيد بما يَكفي لمعرفة عدد اللفَّات التي قام بها، لكي يخرج من الدَّوَران في الوقت المناسب للإمساك به. ورغم أن سرعة الدوران الخاصة بالقفزة الرباعية (ومِن ثَمَّ القفزة ذات الأربع لفَّات ونصف) تكون كبيرة للغاية لدرجة أن الأجواء المُحيطة تكون غير واضحة بالنسبة إلى لاعب الأكروبات لكي يُقدِّر الدوَران على نحوٍ صحيح؛ ومِن ثَمَّ يستحيل تقريبًا الإمساك به.

(٩٩) سقوط الخُبز المحمَّص

تُوجَد قطعة خُبز محمَّص، الجزء العلوي منها مدهون بالزبد، على طاولة المطبخ، ثم تمَّ الاصطدام بالطاولة بدون قصد لتسقط قطعة الخبز على الأرضية. هل الاعتقاد السائد بأن الخبز المحمَّص سيَسقط دومًا على الجزء المدهون بزبدة حقيقيًّا (باعتباره مثالًا توضيحيًّا لقانون ميرفي الذي ينصُّ هنا على أنه إذا كان «من المُمكن» وقوع الفوضى، فإنها «ستقع» حتمًا)؟

الجواب: إذا دُفعَت قطعة الخبز المحمَّص (بدلًا من أن يتمَّ الاصطدام بها بشدَّة) فوق الطاولة، يُمكننا توقُّع الجانب الذي ستسقط عليه فوق الأرضية إذا عرفنا ثلاث كميات؛ ارتفاع الطاولة، وقدْر الاحتكاك بين قطعة الخبز وحافة الطاولة، وتدلِّي قطعة الخبز المحمَّص على نحوٍ مبدئي (إلى أي مدًى يبعد مركز قطعة الخبز عن حافة الطاولة

عند بدء السقوط). عند الاصطدام بالطاولة بشدة، يجتاز مركز قطعة الخبز المحمص حافة الطاولة وتبدأ قطعة الخبز في الدَّوَران حول تلك الحافة. كما أنها تَنزلِق على طول الحافة. ويُحدِّد كل من الدوران والانزلاق المُعدَّل الذي تدور به قطعة الخبز أثناء سقوطها من ارتفاع الطاولة وصولًا إلى الأرضية. وإذا كان المعدَّل كافيًا لتدوير قطعة الخبز بين ٩٠ درجة و٢٧٠ درجة أثناء السقوط، فإنها تسقط على الجانب المدهون بالزبد. بالنسبة إلى ارتفاع الطاولة القياسي وقدْر الاحتكاك والخبز المحمَّص المعتاد، تؤدي مجموعة من القِيَم الصغيرة والكبيرة الخاصة بمستوى التدلي إلى وقوع الخبز على الجانب المدهون بالزبد؛ بينما تؤدي القِيَم المتوسطة إلى سقوط قطعة الخبز على الجانب الآخر. يُمكنك الآن أن تُجرِّب بنفسك.

(١٠٠) فن الباليه

يُعزى جمال ورونق فن الباليه جزئيًّا إلى الألاعيب الفيزيائية الدقيقة والخفية وراء هذا الفن. إذا كانت راقصة الباليه ماهرةً، فإنك لن تُلاحظ أبدًا فيزياء حركتها. وبدلًا من ذلك، سترى حركات يبدو بها خلل غريب، كما لو أنها تتحدَّى بعض قوانين الفيزياء، ورغم ذلك فربما تعجز عن تحديد وجه غرابتها. إليك مِثالَين:

في حركة «تور جوتيه» (أو القفزة الدورانية)، تقفز الراقصة من على الأرضية بدون دوران ظاهري ثم تستدير بلفَّة كاملة في الهواء. (لا تؤدي الراقصة حركات دائرية كتلك التي يؤدِّيها رائد الفضاء كما هو مُبيَّن في بندٍ سابق، فمن الصعب اعتبار هذه الحركات ذات رونَق جمالي، وعلى الأرجح ستتطلَّب وقتًا طويلًا.) وقبل أن تهبِط الراقصة على الأرض مباشرة، تتوقَّف عن الدَّوَران.

حركة «فوتيه» (أو الدوران على ساق واحدة) هي عبارة عن سلسلة من الحركات الدَّوَرانية تؤدِّيها راقصة الباليه على ساق واحدة في حين تمدُّ الساق الأخرى إلى الخارج ثم تضمُّها إلى الداخل على فترات مُنتظِمة. وأحد الأمثلة الصعبة على حركة «فوتيه» في الباليه الكلاسيكي موجود في الفصل الثالث من باليه «بحيرة البجعة» عندما يتعيَّن على البجعة السوداء أداء ٣٢ لفة.

في كلا المِثالَين، كيف تُنفَّذ الحركة؟

الجواب: في حركة «تور جوتيه»، تُعزى خدعة أداء اللَّفَّة ثم التوقُّف عنها في الهواء إلى الطريقة التي تُحرِّك بها الراقصة ذراعَيها وساقيها إلى الداخل ثم إلى الخارج في أثناء

القفز. تلك النقلة تُغيِّر «القصور الدَّوَراني» الخاص بها، والمُرتبِط بكُتلة الراقصة وكيفية توزيع كتلتها فيما يختصُّ بالمحور الذي تدور حوله. ينشأ «الزخم الزاوي» لراقصة الباليه من قصورها الدَّوَراني والمعدَّل الذي تدور به. وفي أثناء قفزتها، لا تستطيع راقصة الباليه أن تُغيِّر زخمها الزاوي. تبدأ راقصة الباليه القفز بذراعَيها وساق واحدة مفرودة وبمُعدَّل دوران ضئيل، ضئيل للغاية لدرجة يتعذَّر على الجمهور مُلاحظتها. وبمجرَّد أن تكون الراقصة في الهواء، تُحرِّك ذراعَيها وساقها إلى الداخل بخفَّة لتُقلِّل من قصورها الدَّوَراني. ونظرًا لأنه لا يُمكن تغيير زخمها الزاوي، يزداد معدَّل دَوَرانها؛ ومِن ثَمَّ يكون ملحوظًا بالنسبة إلى الجمهور، ويبدو بالنسبة لهم أنها تدور بطريقةٍ سحرية بعد أن ترتفع عن خشبة المسرح. وبينما تُعِدُّ نفسها لتهبط، تمدُّ ذراعيها وساقها مرة أخرى وتستعيد قصورها الدَّوَراني الأوَّلي. ومرة أخرى يكون معدَّل دورانها ضئيلًا للغاية لدرجة أنه يتعذَّر على الجمهور ملاحظته، ويبدو أنها تتوقف عن الدوران أثناء وجودها في الهواء.

في حركة «فوتيه»، تضغط راقصة الباليه على الأرضية لتبدأ الدوران ثم تَرتفِع «على أطراف أصابع» قدم واحدة. ثم تضم الساق الأخرى نحو محور الجسد لتزيد الدوران. وعندما تستدير نحو الجمهور، تمدُّ ساقها الطليقة بحيث تستغلُّ تدريجيًّا الزخم الزاوي لبقية الجسم، وللحظةٍ تُواصل الساق الدَّوران حول مِحور الجسد بينما لا يدور باقي الحسم. ويُتيح التوقُّف القصير للراقصة أن ترتخي للحظة من وضعية الوقوف على أطراف الأصابع وتضغط على الأرضية بقدمها لتدور مرةً أخرى.

(١٠١) التزلُّج على الجليد

تُوجَد مجموعة مُتنوِّعة من الطرق التي يُمكنك أن تدور بها أثناء التزلُّج على مُنحدَر، ولكن ما الذي يجعلك تدور بالضبط؟ في حركة «أوستريان تيرن»، تهبط بجسدك نحو الزلَّاجات ثم ترتفع بسرعة مع الاستدارة بالجزء العلوي في الاتجاه المعاكس لاتجاه الدوران المنشود.

ثمة أسلوب آخر يتطلَّب منك أن تُحافظ على الزلَّاجات في وضعية مُستوية على الجليد بينما تُحرِّك ثقلك نحوَ الأمام أو الخلف. ويتوقف الاتجاه الذي تدور نحوه على زاوية انحراف مسارك نزولًا على المُنحدَر. يُسمَّى مسار النزول المباشر على المنحدَر «خط الهبوط». فإذا تحرَّكتَ إلى يسار الخط ونقلتَ ثقلك إلى الأمام، ستلفُّ مع اتجاه عقارب الساعة كما تُرى من أعلى. ونقل ثقلك إلى الخلف يُسفِر عن دوَران عكسي. وتكون النتائج عكسية إذا تزلَّجتَ على يمين خطِّ الهبوط.

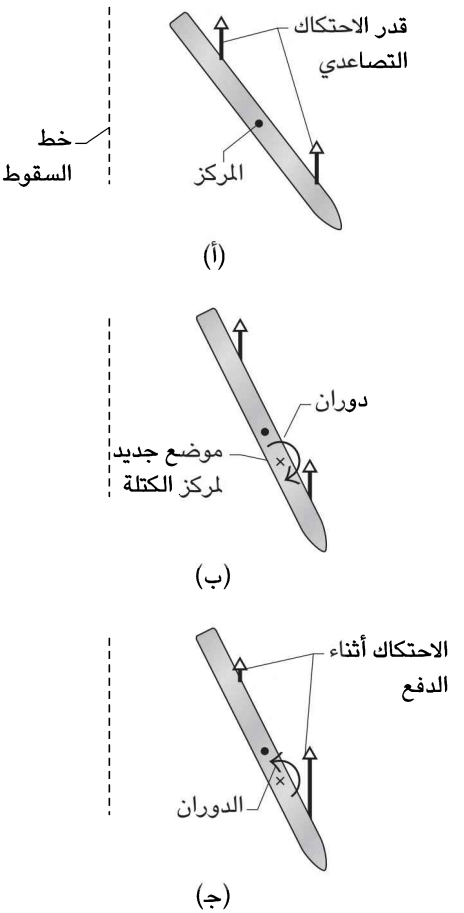
ويمكن القيام بالحركات الدَّوَرانية إذا «دفعت» الزلَّاجات تدريجيًّا؛ بمعنى أنك تقوم بإمالتها بحيث تَنغرِس الحافة المُرتفعة في الجليد. على سبيل المثال، إذا نقلتَ ثقلك نحوَ الأمام أثناء الدفع بحدَّة بينما تتزلَّج يسار خط الهبوط، فأنت تستدير عكس اتجاه عقارب الساعة. لاحظ أنه مع الاندفاع، يُسبِّب نقل الثقل دوَرانًا يكون معاكسًا للاتجاه الذي تسلُكه حين تُبقي الزلَّاجات في وضعية مستوية.

لماذا تتقوَّس الحافة الخارجية لزلَّاجة السباقات من الأمام إلى الخلف؟ لماذا يفضل بعض المُتزلِّجين الزلَّاجات الطويلة بدلًا من القصيرة؟ عندما تتزلَّج نزولًا على خط الهبوط، لماذا يجب عليك أن تميل إلى الأمام بحيث يكون جسدُك مُتعامدًا على المنحدر؟ وإذا قرَّرتَ، في حماقة، أن تبقى منتصبًا، فلماذا تسقط؟

في عام ١٩٧١، سُجِّلَت طريقة مُبتكرة للدوَران في أثناء التزلُّج على يد ديريك سوينسون من جامعة نيومكسيكو. فبدلًا من استخدام عَصَوَي التزلُّج، حمل سوينسون إطار درَّاجة ثقيلًا، مُمسكًا إيَّاه بمحور مُزوَّد بمقبضَين. كان مستوى الإطار عموديًّا وكان الجزء العلوي منه يدور بعيدًا عن سوينسون. وعندما أراد أن يَستدير ناحية اليمين، كان يخفِض يدَه اليُمنى ويرفع يدَه اليسرى. وتطلَّبَت الاستدارة ناحية اليسار ترتيبًا عكسيًّا. ما سبب الحركات الدورانية؟

الجواب: تُعدُّ حركة «أوستريان تيرن» مُشابهة للحركات الدَّوَرانية التي تمَّت مناقشتُها في البنود السابقة. فعندما ترفع جسدك سريعًا، أنت بذلك تُقلِّل التلامُس بين الزلَّاجات والجليد، مما يُؤدِّي للحظة إلى إقلال أو منع الاحتكاك الواقع على الزلَّاجات. حينئذٍ تكون قيمة زخمك الزاوي صفرًا، ونظرًا لأنَّ الاحتكاك لم يَعُد قائمًا، فإنه لا يُمكن أن يتولَّد عزم دوران ومِن ثَمَّ لا يُمكن أن يتغيَّر الزخم الزاوي. وهكذا، إذا أدرت الجزء العلوي من جسدك نحو اليَسار، لا بدَّ أن يدور الجزء السُّفلي من جسدك والزلَّاجة ناحية اليمين. وعندما تَستعيد ثقلك على الزلَّاجة مرة أخرى ويعود الاحتكاك، يُتيح لك الاحتكاك أن تُدير الجزء العلوي من جسدك ليواجه اتجاه الحركة الجديد.

ومن أجل التعرُّف على آلية عمل تقنيات الدوران، فكِّر في الحالة التي تتزلج فيها ناحية يسار خطِّ الهبوط وافترض أن وضعيتك الطبيعية تجعل ثقلك فوق مركز الزلَّاجة. كذلك افترض أن الاحتكاك الواقع على الزلَّاجة موزَّع بالتساوي على طول الزلَّاجة. الاحتكاك على طول الجزء الأمامي من الزلَّاجة يكون صاعدًا نوعًا ما ويولِّد عزم دوران يُحاول أن يُديرك



شكل ١-٣٦: بند ١-١٠١: القوى الواقعة على الزلَّاجة (أ) من وضعيَّة طبيعية (ب) وضعية أمامية (جـ) وضعية خلفية.

جهة اليسار حول مركز كتلتك (شكل ١-٣٦أ). والاحتكاك الموجود عند الجزء الخلفي يُقابِله عزْم دوَران يُحاول أن يُديرَك جهة اليمين. وفي كلِّ حالة، تتوقَّف كمية عزم الدوران على قدْر الاحتكاك الموجود وكيفية توزيعه فيما يتعلَّق بمركز الكتلة الخاص بك. والاحتكاك

الواقع على نُقطة بعيدة عن مركز كتلتك يَخلُق عزم دوران أكبر من الاحتكاك الواقع على النقطة القريبة. ومع توافُر كِلا الكميَّتَين والتوزيع المُتكافئ بين الجزء الأمامي والخلفي للزلَّاجة، تجد نفسك لا تدور.

إذا نقلت مركز كُتلتك نحوَ الأمام، فأنت تُخِلُّ بتوازُن عزم الدوران (شكل ١-٣٦ب). في تلك الحالة، يكون جزء أكبر من الزلَّاجة خلف مركز كتلتك وجزء أقلَّ أمامها؛ ومِن ثمَّ يكون إجمالي الاحتكاك الخلفي أكبر من إجمالي الاحتكاك الأمامي. وكذلك يكون الاحتكاك عند نقاطٍ كثيرة على طول الجزء الخلفي بعيدًا عن مركز كتلتك، في حين أن معظم الاحتكاك الموجود في الجزء الأمامي يكون بالقُرب منه؛ ومن ثَم يغلب عزم الدوران الخَلفي وتَستدير جهة اليمين.

إذا دفعت الزلَّاجة تدريجيًّا أثناء الانتقال إلى الأمام، يزيد الانغراس في الجليد حجم الاحتكاك عند الجزء الأمامي ويُقلِّله عند الجزء الخلفي (شكل ١-٣٦ج). في هذه الحالة، يغلِب عزم الدَّوَران الأمامي، ومن ثَم تَستدير جهة اليسار.

تتقوَّس حافة الزلَّاجة قليلًا لكي تُيسِّر عليك الحركات الدَّورانية أكثر. عندما تضغط بحافة الزلَّاجة لأسفل نحوَ الجليد، تُواجِه الزلَّاجة أقلَّ مقاومة من خلال الانزلاق عبْر مسار يُعتبَر امتدادًا للمنحنى.

تهتزُّ الزلَّاجات القصيرة بسهولة بالغة على المسار الوعر لدرجة أنك قد تفقد توازنك. وعلى الرغم من أنَّ الزلَّاجات الطويلة أصعب في التحرُّك والمراوغة بها، فإنها تهتزُّ على نحوٍ أقل.

لتُدرك لماذا يجِب عليك أن تَنحني إلى الأمام في أثناء التزلُّج أسفل خط السقوط، تخيَّل أنَّ وزنك يُمثله مُتَّجه يمرُّ بمركز كتلتك. يُمكن تقسيم المُتَّجه إلى «عنصرَين» أو جزأين؛ عنصر يُشير إلى أسفل المُنحدَر ومسئول عن حركتك، وعنصر ثانٍ يُشير مباشرة إلى المنحدَر. إذا أردتَ أن تستقر، لا بدَّ أن يُشير العنصر الثاني نحوَ قدمك. إذا قرَّرت أن تتزلَّج أثناء اتِّخاذ وضعية عمودية، فإنَّ العنصر الثاني سيَخلُق عزم دوَران حول قدمك ويُديرك إلى الخلف نحوَ الجليد.

وفي تجربة سوينسون، هبْ أن الاحتكاك الواقع على الزلَّاجة يُمكن تجاهله، بمعنى أن سوينسون والإطار في معزِل عن أي عزم دوران خارجي، ثم تخيَّل أنك تُلقي نظرة من أعلى. نظرًا لأن الإطار يدور في البداية حول محور أفقي، لا تُلاحظ دوران أيٍّ من

الإطار أو سوينسون بالقُرب من مجال رُؤيتك. وهذا يعني أنه لا يُوجَد زخم زاوي للإطار ولسوينسون حول المِحوَر الرأسي، وهي حالة لا يُمكن تغييرها بسبب غياب أي عزم دوران خارجي. فإذا أخفض سوينسون المِقبَض الأيمن ورفع الأيسر، سترى حينئذٍ الإطار يدور عكس اتجاه عقارب الساعة، الأمر الذي يعني أنه يتمتَّع الآن بقدْر من الزَّخم الزاوي الرأسي. ومن أجل الحفاظ على إجمالي الزخم الزاوي صفرًا كما كان في البداية، لا بدَّ أن يَستدير سوينسون مع اتجاه عقارب الساعة من منظور رؤيتك؛ ومن ثَمَّ تديره حركته إلى يمينه.

(١٠٢) التِّيه وسط الجليد

تخيَّل أنك استيقظتَ لتجد نفسك مفقودًا وسط بِركة كبيرة مجمَّدة تتكدَّس فوقها طبقات الجليد لدرجةٍ تجعلها زلِقة بدرجة بالغة بحيث لا يُمكنك أن تمشي أو تزحف فوقها. كيف يُمكنك الهروب؟

هبْ أنك مُستلقٍ على بطنِك فوق الجليد، وبينما تُفكِّر في الهروب، قررتَ أنه يجِب عليك أن تنقلب على ظهرك لتحميَ نفسك من التجمُّد حتى الموت. كيف يُمكنك أن تَنقلِبَ على ظهرك؟

الجواب: ألقِ حذاءً أو أيَّ شيءٍ آخر في اتِّجاهٍ ما؛ وتحرَّك أنت في الاتجاه المعاكس (على الرغم من أنه تحرُّك بطيء). نظرًا لأنه لا تُوجَد أيُّ قوًى واقعة عليك من جانب الجليد، لا بدَّ أن يَبقى إجمالي الزخم الزاوي الخاص بك والشيء الذي ألقيتَه صفرًا. فعندما تُعطي زخمًا للشيء، فأنت تُعطي لجسدك نفس القدْر من الزَّخَم في الاتجاه المعاكس.

وتسري قوانين الفيزياء نفسها إذا حاول شخص أن يَقذف كرة بولينج أثناء التزلُّج بحذاء مزوَّد بعجلات ذات قدْرٍ ضئيل من الاحتكاك واقعٍ على دوَران العجلات. لقد حاولتُ فعل ذلك، وعلى الرغم من أن حذاء التزلُّج تحرَّك إلى الوراء، لم يتحرَّك جذعي العلوي ولم أستطع تجنُّب الوقوع على وجهي إلَّا من خلال التشبُّث بأقرب شخصٍ يقِف بجواري.

ولكي تنقلِب على سطحٍ جليدي زلِق للغاية، ارفع ذراعًا واحدة، ثم اضرب بها، وهي ممدودة، الجليدَ على نحوٍ مُنظَّم. وعلى الرغم من أنه قد لا يُوجَد احتكاك واقع على يدِك من جانب الجليد الزلِق، فإنه تُوجَد قوة واقعة على يدِك من الجليد متجهة رأسيًّا لأعلى. وتلك القوى تُتيح لك أن تستدير بجذعك لكي تستلقيَ على ظهرك.

قصة قصيرة

(١٠٣) ترتيب الحركات الدَّوَرانية مُهم

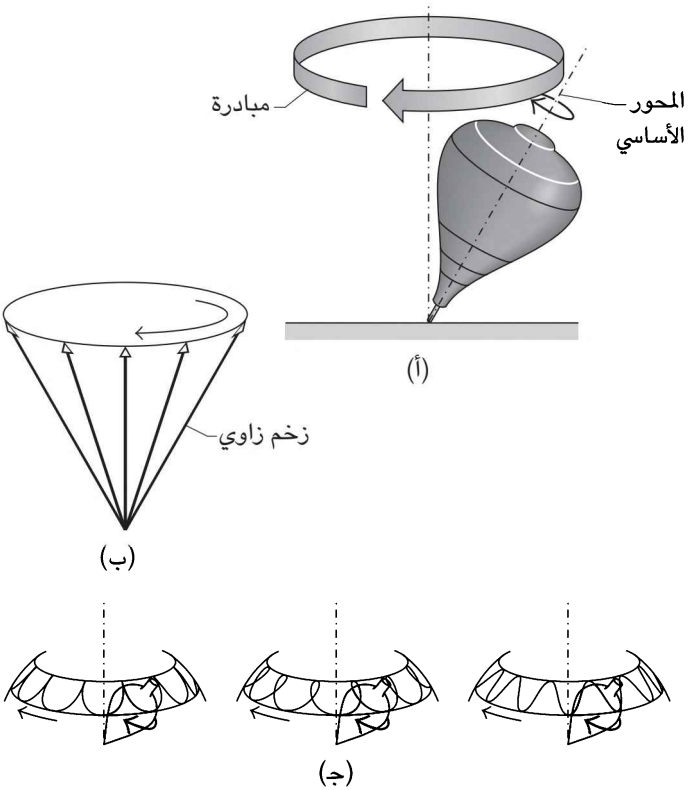
إذا سرتَ مسافة ٣ أمتار ناحية الشمال، ومسافة ٣ أمتار ناحية الشرق، ومسافة ٣ أمتار ناحية الجنوب، ستنتهي بك الحال بالوقوف عند النقطة نفسها بصرف النظر عن اختيارك لترتيب تلك المسافات الثلاثة. ربما يكون الدَّوَران مختلفًا. ثبِّت ذراعك اليمنى إلى أسفل، ووجِّه راحة يدِك نحوَ فخذك. ومع الحفاظ على ثبات معصمك، ارفع أولًا ذراعك حتى تكون في مستوًى أفقيٍّ وأمامي. ثانيًا: حرِّكها أفقيًّا إلى أن تُشير ناحية اليمين. ثالثًا: اخفِضها إلى جانبك، بحيث تكون راحة يدك موجَّهة نحو الأمام. إذا بدأت مرة أخرى، ولكنَّك عكست الحركة؛ أي اتجاه ستكون راحة يدك موجهة نحوَه؟

(١٠٤) أوضاع لعبة النحلة الدوَّارة

لماذا تُواصل لعبة النَّحلة الدوَّارة الدَّوران حتى حين تميل عن المستوى العمودي بشكل ملحوظ؟ لماذا ترقُد بعض أنواع النحلة الدوَّارة في البداية — أي تَبقى في وضعٍ عمودي — بينما يتحرَّك البعض الآخر في حركة «مبادرة» (بحيث يدور المحور الأساسي للعبة النحلة حول خطٍّ عمودي كما هو مُبيَّن في شكل ١-٣٧أ)؟ لماذا تَشتمِل حركة المبادرة عادةً على «تمايل»؛ أي اهتزاز أعلى المحور الأساسي للعبة النَّحلة وأسفله؟ هل تُوجَد أنواع مميَّزة لحركة التمايُل؟ لماذا تتوقَّف بعض أنواع النحلة الدوَّارة بسرعة في حين تترنَّح أنواع أخرى قبل أن تتوقَّف؟

الجواب: في المعتاد، عندما تُبذَل قوةٌ ما على جسمٍ ما، يتحرَّك الجسم في نفس اتِّجاه القوة. ولكن إذا كان الجسم يدور بسرعة، فإن القوَّة قد تجعله يتحرَّك عموديًّا على اتِّجاه القوة. تبدو تلك الحركة غير صحيحة تمامًا، وهذا أحد الأسباب وراء اعتبار لعبة النَّحلة الدوارة لعبة رائعة للغاية. حتى وإن كان الطفل لا يَفقه شيئًا عن قوانين الفيزياء، فإنه يُدرك أن لعبة النحلة المائلة لا بدَّ أن تَنقلِب على جانبها، لا أن تلفَّ في دائرة.

يتضمَّن التفسير التقليدي لحركة المبادرة الزخم الزاوي للعبة النحلة. تشتمل هذه الكمية على المُعدَّل الذي تدور به لعبة النحلة حول المحور على طول امتدادها. وعلاوةً على ذلك، فهي كمية مُتَّجهة تُشير على طول ذلك المِحوَر. تخيَّل لقطة فوتوغرافية للعبة نحلة



شكل ١-٣٧: بند ١-١٠٤: (أ) حركة مبادرة لعبة النَّحلة حول محور رأسي عبْر نقطة التماس (ب) يتحرَّك مُتَّجه الزخم الزاوي للعبة النحلة حول المحور الرأسي (جـ) التمايل أثناء حركة المبادرة.

مائلة بعض الشيء وتدور بسرعة عكْس اتجاه عقارب الساعة كما تُرى من أعلى. في شكل ١-٣٧ب، يُمَثَّل الزخم الزاوي للعبة النحلة بمتَّجه يُشير إلى أعلى على طول المحور الأساسي.

نظرًا لأن قوة الجاذبية تجذب لعبة النحلة إلى أسفل، فإنها تَخلق عزم دوَران واقع على لعبة النَّحلة، ممَّا يجعلها تدور على رأسها المُدبَّب على الأرضية ومِن ثَمَّ تتسبَّب في سقوطها.

في الواقع، لو لم تدُرْ لعبة النحلة، فإنها تَسقط. ورغم ذلك، ونظرًا لأن لعبة النحلة تدور ولها زخم زاوي بالفعل، يُغيِّر عزم الدوران الاتجاه الخاص بالزخم الزاوي وحسْب، مما يَجعل المتَّجه يدور حول طرفه بحيث يتَّخذ شكلًا مخروطيًّا. ونظرًا لأن الزخم الزاوي يكون على طول المِحوَر الأساسي للعبة النحلة، فإنَّ المحور الأساسي يتَّخذ شكلًا مخروطيًّا أيضًا.

وبمجرَّد أن تَنطلِق لعبة النَّحلة الدوَّارة، يهبط مركز كُتلتها قليلًا، وأثناء ترنُّحها، لا بدَّ من اتِّباع قاعدتَين: لا بدَّ أن يبقى كلٌّ من زخمها الزاوي حول المحور الرأسي وإجمالي طاقتها ثابتَين. ونظرًا لأنَّ الهبوط يُحرِّك دوران لعبة النحلة بعيدًا عن المحور الرأسي، لا بدَّ أن تكون حركة المبادرة سريعة بالدرجة الكافية للحفاظ على ثبات إجمالي الزخم الزاوي حول المحور الرأسي. وتأتي الطاقة الحركية للمُبادرة من هبوط مركز الكتلة الخاص بلعبة النحلة وما يترتَّب عليه من انخفاض في طاقة الوضع.

لا تستطيع لعبة النحلة الدوَّارة أن تواصِل السقوط وتتبع كلتا القاعدتَين؛ ومِن ثَمَّ يصل مركز الكتلة إلى أدنى نقطة، وبعد ذلك يَرتفِع مرة أخرى وتتباطَأ حركة المُبادرة. إن الاهتزاز لأعلى وأسفل بين أقصى نُقطتَين، حسبما تَقتضي القاعدتان، هو التمايُل المُتراكِب على حركة المبادرة. يأتي التمايُل في ثلاثة أشكال يُميِّزها وضعية مركز الكتلة عند أعلى نقطة. وربما توقف لعبة النحلة الدوَّارة حركة المبادرة خاصَّتها للحظة، ثم تُواصِل الحركة في الاتجاه نفسه مثلما تفعل عند أدنى نقطة، أو تتحرَّك عكس ذلك الاتجاه لبرهة (شكل ١-٣٧ج). تتوقَّف نوعية التمايل الذي يحدث على حركة المبادرة التي تَنطلِق بها لعبة النَّحلة في البداية؛ فربما تكون في نفس الاتجاه عند توليد حركة المبادرة بفعل الجاذبية، أو في عكس الاتجاه، أو لعلَّك لا تُطلِق لعبة النحلة بحركة مبادرة أوليَّة.

إذا أطلقت لعبة النحلة بقدْر كافٍ من الدَّوَران، فستُحافظ النحلة على الوضعية الرأسية بدون حركة مبادرة أو تمايُل. ولكن عندما يَستنزف الاحتكاك ومقاومة الهواء، عند الطرف، الطاقةَ بالتدريج، ينخفض الدوَران ليصل إلى قيمةٍ حَرِجة، ثم تبدأ لعبة النحلة في السقوط والمبادرة والتمايل. ومع استنزاف الطاقة أكثر، تَميل لعبة النحلة أكثر، وتدور أسرع وتتمايَل على نحوٍ أكبر، حتى تصطدم في النهاية بالأرضية.

«التوقُّف» هو وضعية تكون فيها لعبة نحلة دوَّارة ذات تصميم يُتيح لها الدوَران بقيمةٍ حَرِجة أكبر تَكفي لحدوث الاحتِكاك عند الطرف كي تدور لعبة النحلة عموديًّا بحيث تقِف مُنتصبة. عادةً تكون لعبة النحلة الدوَّارة عريضة ولها طرف غير حاد، إلا أن سطح

الأرضية يُعتبَر عاملًا أيضًا. يحدُث الاحتكاك لأنَّ الطرف يَنزلق أثناء دوَرانه ويتحرَّك كذلك في دائرة على الأرضية بسبب حركة المبادرة.

قصة قصيرة

(١٠٥) حقيبة مسكونة بالعفاريت

يُقال إن روبرت وود، أستاذ الفيزياء الشهير بجامعة جونز هوبكنز، مزح مع حمَّال الحقائب في أحد الفنادق. ووفقًا لما جاء في القصة، أدار وود حدَّافة ضخمة ثُم أغلق الحقيبة عليها قبل وصول حمَّال الحقائب. وعندما سار الحمَّال بالحقيبة في الرواق، لم يُلاحظ شيئًا سوى الوزن. ولكن عندما حاول أن يَنعطِف، أبتِ الحقيبة أن تَنعطِف معه على نحوٍ غامض. كان حمال الحقائب خائفًا للغاية لدرجة أنه ترَك الحقيبة «المسكونة» وفرَّ هاربًا.

(١٠٦) لعبة النَّحلة ذات السَّاق

يُوجَد نوع مُميَّز من لعبة النحلة الدوَّارة، يُطلق عليه «النحلة ذات الساق»، يتكوَّن من جزء كروي الشكل ذي ساق تحلُّ محلَّ الجزء المُفرغ. تدور اللعبة من خلال تدوير الساق بين إصبعي الإبهام والسبابة، مُطلقًا إيَّاها مع توجيه الجزء الكروي (الأثقل وزنًا) إلى أسفل. وبشرط أن يكون هناك قدْر كافٍ من الاحتكاك بين لعبة النحلة الدوَّارة والأرضية، تُصحِّح النحلة الدوَّارة وضعها ثم تدور حول الساق. فيما يتعلَّق بالنسبة إليك، اتِّجاه الدوَران لا يتغيَّر، وبالنسبة إلى لعبة النَّحلة الدوَّارة الاتجاه ينعكس.

يمكنك أن تُلاحظ نفس وضعية الانتصاب إذا جعلت كرة قدم أو بيضة مسلوقة أو خاتم التخرُّج المُطعَّم بحجَر أملس يدور. في كل حالة، لماذا يتحرَّك مركز كتلة الجسم إلى أعلى في عكس اتجاه الجاذبية الأرضية؟

الجواب: لا يُوجَد تفسير بسيط لحركة لعبة النحلة ذات الساق، بل تُوجَد فقط تفسيرات رياضية عويصة. ورغم ذلك، العنصر الأساسي هو الاحتكاك الواقع على جزء النحلة المُلامس للأرضية. وبطريقةٍ ما يخلُق الاحتكاك عزم دوَران يقود إلى تصحيح الوضع، إلَّا أن تفاصيل العملية تبقى مُبهمة. إليك فرضية بسيطة: يعمل الاحتكاك على زيادة حركة المبادرة (انظر ما سبق)، وهو ما يجعل مركز الكتلة يتحرَّك إلى أعلى، مِثلما يحدُث مع الأنواع الأخرى للعبة النحلة الدوَّارة.

(١٠٧) البيضة الدوَّارة

يُمكنك أن تُحدِّد ما إذا كانت البيضة نيِّئة أم مسلوقة بدون أن تُقشِّرها؛ وذلك إذا قمتَ بإدارتها على جانبها. فالبيضة النيِّئة تدور بوهَن، بينما البيضة المسلوقة تدور جيدًا. إذا قُمتَ بإدارة بيضة مسلوقة بسرعة كافية، فإنها تقِف على أحد طرفَيها. وإذا لمستَ أعلى مركز بيضة نَيِّئة تدور على جانبها، يبدأ الدَّوَران مرة أخرى بعد لمسها، ولكن في حالة البيضة المسلوقة، تُقلِّل هذه اللمسة أيَّ حركة لاحقة. هل يمكنك أن تفسر هذه الحركات؟

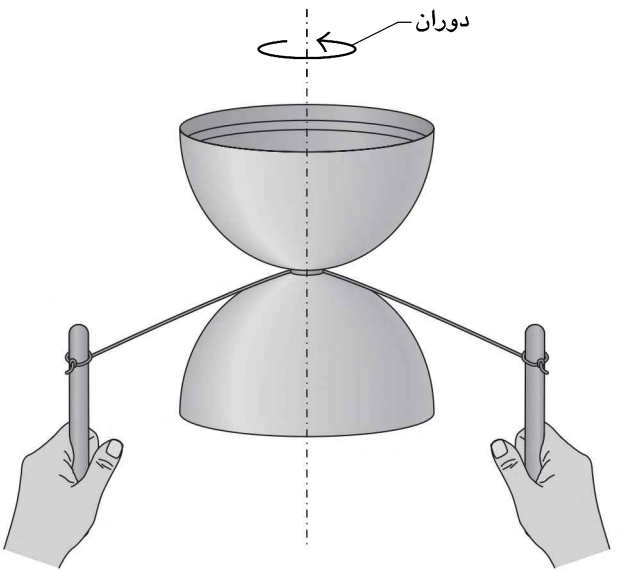
الجواب: الفرق بين البيضتَين، بالتأكيد، هو أنَّ واحدة تَمتلئ بسائل يرتجُّ داخلها، في حين أنَّ البيضة الأخرى جامدة. يتداخل ارتجاج السائل مع دوَران البيضة النيِّئة، فتدور مرةً أخرى عندما تلمسها أنت لبُرهة وتُوقفها. وعندما تدور البيضة المسلوقة بسرعة كافية، فإنها تتحرَّك مثلما تتحرَّك لعبة النحلة ذات الساق (انظر البند السابق) بحيث تَنتصِب على أحد طرفَيها.

(١٠٨) لعبة الديابولو

الديابولو لعبة قديمة تتكوَّن من مغزل له طرفَان مخروطيَّان مُتصلان عند نقطة ضيقة (شكل ١-٣٨). تُلَف اللعبة بواسطة خيط يمرُّ عبْر النقطة الضيقة ومربوط به مقبضان. أنت تبدأ بوضع اللعبة على الأرضية وتُنزل يدَك اليُمنى لأسفل (إذا كنتَ تستخدم يدَك اليمنى) وترفع يدك اليسرى لأعلى. ثم تشدُّ الخيط من خلال رفع يدِك اليُمنى بخفَّة وترك الخيط يسحب يدك اليُسرى إلى أسفل. والاحتكاك المتولِّد بين الخَيط والنقطة الضيقة يجعل لعبة الديابولو تدور.

يُمكنك أن تزيد السرعة من خلال إرخاء الخيط بعض الشيء، وترك لعبة الديابولو تهبط، وتعديل وضعية يدَيك، ثم تكرار العملية مرة أخرى. وإذا وُلِّدت سرعة كافية، تدور لعبة الديابولو حول الخيط بثبات. ومن خلال رفع كلتا يدَيك بسرعة، يُمكنك أن تقذِف اللُّعبة في الهواء ثم تَلتقطها مرة أخرى على الخيط أثناء نزولها.

لماذا يجعل الدَّوَران السريع لعبة الديابولو ثابتة؟ (فمن دون هذا الدوران تفلت اللعبة من فوق الخيط وحسْب.) وإذا بدأت اللعبة تتمايَل، كيف يُمكنك أن تُحافظ على توازُنها؟ على سبيل المثال، إذا بدأ الطرف البعيد يَنخفِض، كيف يُمكنك أن تُعيدَه إلى أعلى؟ كيف يُمكنك أن تدير لعبة الديابولو ناحية اليسار أو اليمين؟ (ابحث على شبكة الإنترنت عن مواقع تذكر وتُوضِّح خدع لعبة الديابولو وذلك بكتابة كلمة Diabolo في مربع البحث.)



شكل ١–٣٨: بند ١–١٠٨: منظر علوي للعبة ديابولو دوَّارة.

الجواب: إذا أمسكت بلعبة الديابولو من عند الخيط دُون أن تَجعلها تلفُّ، فمِن المُستبعَد أن تتوازَن اللعبة على الخَيط ومِن ثَمَّ ستقَع من عليه. عوضًا عن ذلك، أنت تقوم بإدارة اللعبة بسُرعة، وتَمنحُها زخمًا زاويًّا يجعلها تُوازِن وضعيَّتَها. يُعتبر الزخم الزاوي مُتَّجهًا يمتدُّ على طول المِحوَر الأساسي للعبة. وعند إطلاق اللعبة بالطريقة الموصوفة في هذا البند، يكون المُتجه أفقيًّا ويُشير نحوك. ولعبة الديابولو التي تدور تكون ثابتة؛ لأنه لا يستطيع أي شيء أن يُغيِّر اتجاه الزخم الزاوي للعبة إلا عزم الدوران. وإذا توازَنَت لعبة الديابولو على الخيط، يكون مركزها فوق الخيط مباشرة، ويكون اتجاه قوة الجاذبية الأرضية الواقعة على لعبة الديابولو نحو الأسفل عبْر الخيط، ولا تولد عزم دوران على الخيط؛ ومن ثَمَّ لا يُمكن تغيير الزخم الزاوي.

وإذا كانت لعبة الديابولو مُتوازِنة بشكل تقريبي، فإن قوة الجاذبية الواقعة على الجزء الأثقل وزنًا تولِّد عزم دوران ضئيلًا وتمنَحُ اللعبة قدرًا إضافيًّا ضئيلًا من الزخم

الزاوي المتَّجه الذي يُشير ناحية اليسار أو اليمين. وكنتيجة لذلك، لا تَنقلِب لعبة الديابولو بسبب الجاذبية، ولكنها «تبادر» نحو اليسار أو اليمين؛ بمعنى أن محورها الأساسي يلفُّ ناحية اليسار أو اليمين. (يولد الاحتكاك مع الخيط عزم دوران، ولكن إذا كان الخيط مُتمركزًا بشكلٍ تامٍّ أو تقريبي، فإنَّ عزم الدوران سيُبطئ الدوَران تدريجيًّا وحسب.)

إذا بدأ الطرف البَعيد في الانخفاض، يمكنك أن تستغلَّ الخيط لتولد عزم دوران يجعل الطرف يرتفع مرة أخرى. اجذب الخيط بيدك اليمنى ناحيتك وعكس اتجاه الجانب الأيمن من اللعبة. إن الضغط عكس الجانب الأيمن يُولِّد عزم دوران نحو الأسفل وهذا يُعيد متَّجه الزخم الزاوي الخاص باللعبة إلى المستوى الأفقي مرةً أخرى.

ولكي توجِّه اللعبة نحو اليمين، باعد بين يدَيك ثم اجذبهما نحوك. فإما أن يجذب الخيط الجانب السُّفلي من اللعبة أو أنه يَنزلِق نحوك، مما يجعل الطرف البعيد للعبة الديابولو أثقل من الطرف القريب. إذا لم ينزلق الخيط، يولد الضغط على الجانب السُّفلي للعبة عزم دوران يجعل اللعبة تدور. وإذا انزلق الخيط، فإن عزم الدوران الناشئ من الجاذبية الواقعة على الجانب الأثقل وزنًا يجعل اللعبة تدور.

(١٠٩) لعبة النحلة الدوَّارة البيضاوية

النحلة البيضاوية هي نوع لافت للانتباه من لعبة النحلة الدوارة ذات جزء سُفلي بيضاوي مقوَّس. والأنواع المُباعة منها كلعبة لا تدور إلا في اتجاهٍ واحد فقط. وإذا أدرْتَها في الاتجاه الآخر، تتوقَّف سريعًا، وتهتزُّ لأعلى وأسفل، ثم تدور في الاتجاه الذي تَنشُده. بعض أنواع النحلة البيضاوية المصقولة تتصرِف على نحوٍ مماثل. ولعلك تجد نوعية نادرة تعكس دورانها عدَّة مرات قبل أن تنفَد طاقتها. لماذا تعكس النحلة البيضاوية اتجاهها؟

الجواب: يصعب كثيرًا تفسير حركة النحلة البيضاوية؛ إلَّا إن سبب انعكاس دوَرانها يعود إلى أنَّ الجزء السُّفلي منها بيضاوي الشكل ولا يتناسَب مع الشكل العام للعبة. بمعنى أن المِحوَرَين الطويل والقصير لا يتناسبان مع طول النحلة البيضاوية وعرضها. وعندما تلفُّ النحلة حول المحور الرأسي في الاتجاه «الخطأ»، فإن عدَم المواءمة يزعزع الدوَران ومِن ثَمَّ تتمايل. إنَّ الاحتكاك الواقع على اللعبة من سطح الطاولة ينقل الطاقة من الدوَران إلى التمايُل والتذبذُب. وعندما يُوشِك الانتقال على الاكتمال، يعكس الاحتكاك اتجاه الانتقال، ولكن في هذه المرة تدور اللعبة في الاتجاه المعاكس. ومع بعض أنواع النحلة البيضاوية،

يكون الدوَران في الاتجاه «الصحيح» مُتزعزعًا بعض الشيء، وفي تلك الحالة يظهر التمايُل مرة أخرى وينقلب اتجاه الدوَران.

(١١٠) قذف العملات المعدنية والزُّجاجات في الهواء

انقُرْ عملة معدنية بإصبعك لتجعلها تدور فوق سطح الطاولة، ثم شاهِدْها واسمع صوت حركتها. مع بدء استقرارها على الطاولة، تَتناقَص حدَّة صوت اصطدامها ثم تزداد. هل تدور على نحوٍ أسرع؟ كلا، إذا ألقيتَ نظرةً عليها، تكون النقوش عليها مُبهَمة بسبب الحركة، ثم تصير واضحة بما يكفي للتعرُّف عليها.

وازِن زجاجة على حافة سطحٍ ما ثم اجذِبها في اتجاهات مُعاكسة مُستخدِمًا يدًا عند كل جانب، واجعلها تدور. في أثناء الدوران تتحرَّك الزجاجة تدريجيًّا نحو المحور الرأسي وتزداد حدة صوت اصطدامها. يُمكنك أيضًا أن تلفَّ زجاجة في وضعٍ أفقي تقريبًا، إلا أن البدء يكون أصعب. إذا كان بإمكانك أن تُغيِّر اتجاه البدء، فستتَّخذ الزجاجة وضعًا أفقيًّا بالتدريج أثناء اللف، لكن على عكس العملة المعدنية، تقلُّ حدَّة صوت الاصطدام أثناء النزول.

هل يُمكنك أن تُفسِّر هذه الحركات؟

الجواب: تدور العملة حول مِحورها الأساسي ولكن المحور يُدفَع في الاتجاه الرأسي أيضًا، وهي حركة يُطلق عليها «المبادرة». تأتي المبادرة من عزم الدوَران المُتولِّد من وزن العملة المعدنية، الذي يُمكن اعتبار أنه يؤثر عند مركز العملة المعدنية. أثناء استنزاف الطاقة تدريجيًّا بفعل الاحتكاك ومقاومة الهواء، تشرَع العُملة في الاستقرار إلى أسفل والدوَران حول محورها الأساسي على نحوٍ أبطأ، ممَّا يُسهِّل أكثر رؤية نقوشها. في البداية، يُقلِّل استنزاف الطاقة حركة المبادرة ولكن هبوط مركز الكتلة يُحوِّل طاقة الوضع إلى طاقة حركية إضافية لحركة المبادرة. والخشخشة التي تسمعها تكون بسبب حركة المبادرة حيث تَصطدم حافة العملة المعدنية بالطاولة. وتزداد حدَّة صوت الاصطدام مع زيادة مُعدَّل حركة المبادرة.

عند تدوير زجاجة في وضعٍ رأسي تقريبًا، فإنها تُبادر أيضًا. وبينما يتحرَّك محورها الأساسي في الاتجاه الرأسي تدريجيًّا، يهبط مركز كُتلتها، وتُستنزف الطاقة مرة أخرى في شكل حركة مُبادرة وتزداد حدَّة الصوت. وعند تدوير الزجاجة في وضعٍ أفقي تقريبًا، تقلُّ

حركة المبادرة لأنَّ الزجاجة تهبط إلى أن تصِل حركة المبادرة إلى قيمة نهائية ضئيلة. ثم تستلقي الزجاجة وتتدحرج على الطاولة.

(١١١) الجودو والآيكيدو والمصارعة الأولمبية

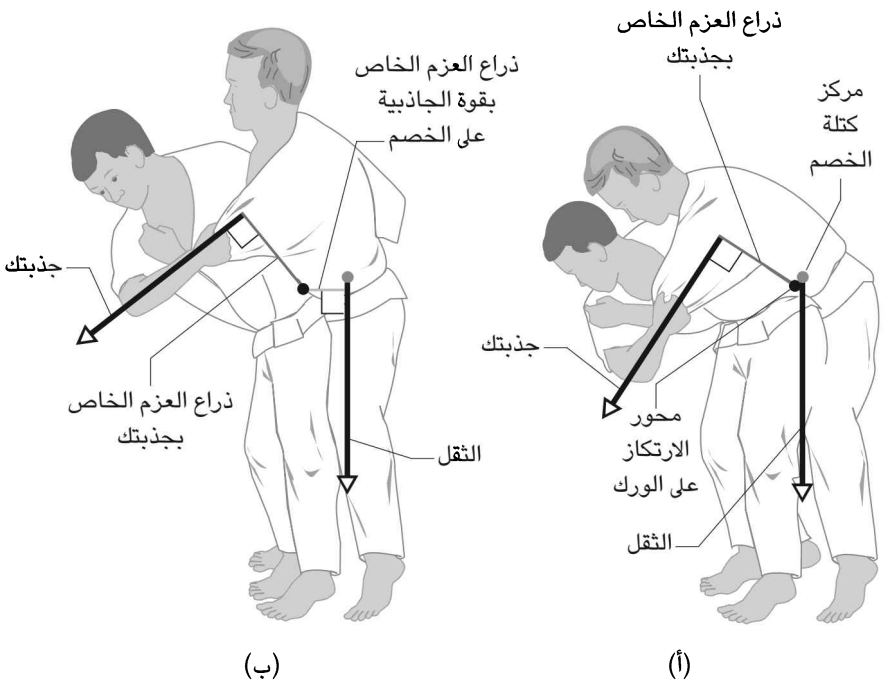
كثيرًا ما تَعتمِد لعبة الكاراتيه على القوة وعلى الاصطدام بقوة كبيرة، غير أن الجودو والآيكيدو والمصارعة الأولمبية توظِّف عادةً أساليب يمكنك من خلالها أن تجعل خصمك يفقد توازنه بما يكفي بحيث يسقُط أرضًا. أشهر الحركات هي رمية الورك الأساسية في الجودو؛ وفيها تجعل خصمك يدور حول وركك من الخلف بحيث يَسقُط على البساط. وربما تندهِش إذا علمتَ أنك إذا لم تتدبَّر الرمية جيدًا من منظور الفيزياء، فمن المُرجَّح أن تفشل، خاصَّة لو كان خصمك أكبر منك حجمًا وأقوى. كيف ينبغي إذن أن تنفذ رمية الورك؟

تدبَّر أيضًا المثال التالي من لعبة الآيكيدو. يُمسك بك الخصم من الخلف، وتلتفُّ ذراعاه حول ذراعيك وتُمسك يداه رسغَيك بإحكام. كيف يُمكنك أن تُلقيَه على البساط؟

يتضمَّن الآيكيدو القتال بالعِصي، والذي يُمكِن أن يحدُث فيه السيناريو التالي. يُهاجمك الخصم بطرف عصًا طويلة، ويكون الخصم قريبًا بحيث لا يُمكنك الإمساك بالعصا وجذبها إلى الأمام أكثر، علاوة على ذلك فإنَّ هذه الخطة ستُواجه القوة بالقوة. فهل ثمَّة سبيل أفضل لإسقاط خصمك؟

الجواب: من أجل تأدية رمية الورك، انتظر إلى أن يتقدَّم خصمك إلى الأمام بقدمه اليُمنى، ثم تقدَّم أنت إلى الأمام بحيث تكون قدمُك اليمنى بين قدميه، ثم اجذبه نحوَ جانب سترته الأيمن كي يتقوَّس جسده إلى الأمام ويتحرَّك مركز كتلته بعيدًا عن سُرَّته، وفي الوقت ذاته دُر نحو يسارك وقرِّب وركك من جسده.

عندئذٍ سيكون مركز كتلته فوق وركك الأيمن تقريبًا (شكل ١-٣٩أ). وعن طريق جذب الكتِف الأيمن لسُترته، يُمكنك بسهولة أن تُديره حول وركك الأيمن وتُسقطه على البساط. ثمة عنصر محوري هنا يتمثَّل في إمالته إلى الأمام خلال الحركة الأولى. وإذا لم تفعل هذا، فسيظلُّ مركز كتلته مغمورًا داخل جسده (شكل ١-٣٩ب). وإذا قُمتَ بالالتفاف حينها وحاولتَ أن تُديره فوق وركك، فسيتعيَّن عليك أن تقاوم ثِقَله، وهو ما يَخلق عزمًا يُقاوِم عزمك وكذلك محاولتَك للَّف. وفي هذه الحالة ستتطلَّب رميتُك قدرًا من القوة لأنه سيتعيَّن عليك أن ترفعه بالأساس، وإذا كان خصمك ثقيل الوزن فستَفشل على الأرجح.



شكل ١-٣٩: بند ١-١١١: رمية الورك في الجودو (أ) التنفيذ الصحيح، (ب) التنفيذ الخاطئ.

في سؤال الآيكيدو الأول، ينبغي عليك أن تضمَّ يدَيكَ سريعًا إلى صدرك (كي تَحبِس ذراعَي خصمك) بينما تُحرِّك قدمَك اليُمنى إلى الأمام أيضًا، وتسقط أرضًا وأنت تدور بجسدك إلى اليمين. حين تفعل هذا ستجعله يميل إلى الأمام ويُحرِّك مركز كتلته إلى نقطة دوران أعلى ظهرك. حينها لن يستطيع أن يمنع نفسه من أن يُلقى على البساط.

القتال بالعِصيِّ أمر صعب الإتقان، والإجابة التي سأُقدِّمها هنا شديدة الإيجاز بحيث يصعُب أن تفسِّر هذا الفن. حين يَندفِع خصمك إلى الأمام ينبغي عليك أن تخطو إلى يَمين العصا، وأن تستدير بحيث تستطيع يدُك اليُمنى الإمساك بالجزء الخارجي للعصا، وتستطيع يدك اليمنى الإمساك بالجزء الواقع بين يدَيه. بعد ذلك تَرفع العصا سريعًا وإلى الوراء فوق رأسه، بحيث يَسقط إلى الوراء. من المُهم أن تبدأ حركتك بينما تَندفِع العصا إلى

الأمام، لأنَّ في ذلك الحين سيكون خصمك مُلتزمًا بالعزم الأمامي الذي أحدَثه ولن يَستطيع مُقاوَمة تحريكك للعصا إلى الأعلى.

(١١٢) دوران الرصاصة حول نفسها وتمريرات الكرة الطويلة

لماذا تكون البُندقية مزوَّدة بحزوز (ثُلمات حلزونية على امتداد الجزء الداخلي لماسورة البندقية) تُسبِّب دوران الرصاصة حول نفسها؟ وحين تكون الطلقة طويلة ومقوَّسة، ما الذي يجعل الرصاصة تميل بمُقدِّمتها إلى الأسفل بحيث تَضرب الهدف بمُقدِّمتها أولًا؟

في كرة القدَم الأمريكية، لماذا على الظهير الربعي أن يُدير الكرة بقوة حول نفسها لو أراد لها الطيران في الهواء بسلاسة وأن تَهبط خلال النصف الثاني للتمريرة؟ هذا الإجراء لا يجعل الكرة تطير لمسافة أبعد وحسب؛ ولكن أيضًا يجعل التقاطها أسهل. يقوم الراكل بركل الكرة بقدْرٍ من الدوران من أجل جعْلها تطير في نفس المسار السلس، لكن لماذا؟ ألا يجعل هذا الكرة أسهل في الإمساك من طرف لاعبي الفريق المنافس؟

الجواب: لو مُنِحَت الرصاصة أو الكرة المقذوفة أو المركولة قدرًا كافيًا من الدوَران حول محورها الطولي، فستسلك سلوك الجيروسكوب من حيث إنها ستنحو إلى الحفاظ على اتجاهها بدلًا من أن تتشقلَب في الهواء، وهذه الشقلبة مِن شأنها أن تُخلَّ بتحليقها في الهواء وتجعله قصيرًا. بينما تتحرَّك الكرة على امتداد مسارٍ مُنحنٍ نتيجة لقوة الجاذبية فإنها تواجه مقاومة الهواء على جانبها السُّفلي. يُمكن النظر إلى هذه المقاومة بوصفها مُتركزة عند نقطة تقع أمام مركز الجسم. وإذا كان اللف كبيرًا بما يَكفي، فسيكون الجسم وقتها أشبهَ بالنحلة الدوَّارة ويُحاول تعديل وضعه بمُحاذاة القوة التي يَستشعِرُها، تحديدًا مقاومة الهواء. وبهذا بينما يقطع الجسم مسارًا مائلًا، فإنه يميل بمُقدِّمته إلى الأسفل.

بعض الأظهرة الربعية لا يَقدرون إلَّا على إرسال تمريرات متذبذبة لأنهم يفشلون في لفِّ الكرة حول محورها الطولي فقط. فاللفُّ الإضافي حول محور قصير يمرُّ بعرض الكرة يُنتج التذبذُب، والذي يُعَدُّ مثالًا على المبادرة الحركية؛ بحيث إنَّ المحور الطولي الذي تدور الكرة حوله يدور حول دائرة. يكون اللف والمُبادرة في الاتجاه ذاته (على سبيل المثال في اتجاه عقارب الساعة لو كان الظهير الربعي يَستخدِم اليد اليُمنى)، ويبلغ معدَّل المبادرة ثلاثة أخماس معدَّل اللف.

إذا نجح الظهير الربعي في لفِّ الكرة حول نفسها خلال التمريرة، فلن يَجعلها هذا تَنتقِل لمسافة أبعدَ بسبب توجيهها الانسيابي وحسْب، وإنما سيتمكَّن أيضًا المُتلقِّي من أن

يُحدِّد بصورة أفضل بكثيرٍ الموضع الذي ستَهبط الكرة فيه. وحين يجعل الراكل الكرة تدور حول نفسها فإن الهدَف عادةً يكون جعْل الكرة تَنتقِل لمسافة أبعد، لكن ثمَّة هدف ثانوي يتمثَّل في الإبقاء على الكرة في الهواء لفترةٍ أطول حتى يتسنَّى لأعضاء فريق الراكل قطْع مسافة كبيرة من الميدان قبل أن تَهبط الكرة. إن الوقت الذي تقضيه الكرة في الهواء يُسمَّى «زمن التعلُّق» في الهواء، وحين تُركَل الكرة من دون لفٍّ أو حين تُرمى بصورة عشوائية مُتذبذبة فإنَّ مقاومة الهواء تُزيل سريعًا الطاقة الحركية من الكرة، ويقلُّ زمن التعلُّق.

حين تُطلَق الرصاصات إلى الأعلى مباشرة، فإنها أحيانًا تُحافظ على ثباتها خلال الرحلة، وتعود إلى الأرض بقاعدتها أولًا. ورغم أنَّ هذا لا يُصيب في مقتلٍ على الأرجح؛ فمِن المُمكن أن يتسبَّب في جرْح شخصٍ ما. وإذا انقلبَت في أثناء سقوطها أرضًا فستَهبِط بسرعة أبطأ من سُرعتها عند مُغادَرة الفوَّهة، وتكون احتمالات الإصابة أقل. ومع ذلك، إذا بدأ شخص إلى جوارك في إطلاق الرصاص في الهواء، يَجدُر بك أن تَختبِئ بدلًا من أن تقِف في العراء مُتفرِّجًا على ما يحدُث.

(١١٣) إطلاق أُرجوحة الملاعب

كيف «تُحرِّك» الأرجوحة بحيث تصعد عاليًا؟ إذا كانت الأرجوحة في حالة سكون في البداية، كيف تُحرِّكها من دون أن تدفع الأرض بقدمَيك أو تجعل أحدًا يدفعك؟

الجواب: تتمثَّل إحدى الطرُق في الوقوف على الأرجوحة ودفعها من خلال جلوس القرفصاء عند أعلى نقاطٍ من المنحنى والوقوف مُنتصبًا عند أدنى نقطة. يزيد الوقوف من سرعتك، ويُمكنك أن تفسِّر الزيادة في السرعة من خلال تفسيرات متعلِّقة إما بالطاقة أو الزخم الزاوي. فمن خلال الوقوف، أنت تَرفع مركز كتلتك وتبذُل جهدًا لمواجهة قوة الطرد المركزي التي تَشعُر بها. والجهد يُضيف إلى طاقتك الحركية ويزيد من سُرعتك. ومن خلال الوقوف، أنت تَنقل مركز كتلتك نحو النقطة التي تدور حولها. هذه الحركة أشبَهُ بحركة المُتزلِّج على الجليد الذي يدور على أطراف أصابعه أثناء ضمِّ ذراعَيه إلى الداخل نحوَ جسمه؛ إذ تعني حقيقة أنه لا يُمكِن تغيير زخمه الزاوي أنَّ سرعة دوَرانه لا بدَّ أن تزيد. وعلى الأرجوحة، تزداد سرعة دورانك أيضًا. وبالنسبة إلى أيٍّ من التفسيرَين، تضيف السرعة المُتزايدة عند أدنى نقطة إلى ارتفاع المنحنى. وعلى الرغم من أن ارتفاع جسدك يُؤثِّر على مُعدَّل بذل الطاقة أثناء الأرجحة، فإنَّ كتلتك لا تُؤثِّر على ذلك.

يُمكنك أن تُحرِّك الأرجوحة من خلال جذب الأحبال حين تتحرَّك إلى الأمام ودفعها حين تتحرَّك إلى الخلف. فالحركة التي تُولِّدها في الأحبال تُنتج قوى في يدَيك تدفعك إلى الأمام حين تجذب وإلى الخلف حين تدفع.

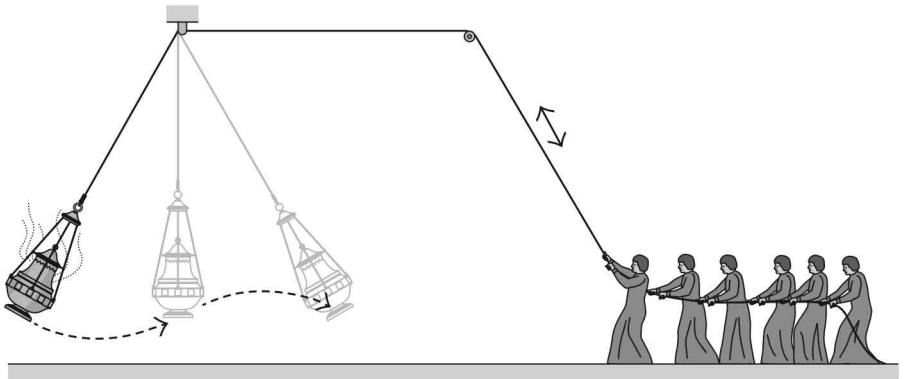
وإحدى الطرق لتحريك الأرجوحة هي الوقوف أو الجلوس مُنتصبًا ممسكًا بالأحبال بيدَيك بينما ذراعَاك مُنثنيتان، ثم تميل بسرعة إلى الخلف حتى تُفرَد ذراعاك عن آخرهما. يدور مركز كتلتك حول مقعد الأرجوحة، في حين يدور المقعد حول القضيب الذي يدعم الأرجوحة. يمدُّ سقوطك اللحظي الأرجوحة بالطاقة الحركية وكذلك زخمها الزاوي.

(١١٤) أرجحة مِبخَرة عملاقة

على مدار الـ ٧٠٠ سنة الأخيرة، شهدت المراسم الدينية في كاتدرائية سانتياجو دي كومبوستيلا في شمال غرب إسبانيا أرجحةَ مِبخرَةٍ عطورٍ ضخمة تتدلَّى من ارتفاع ٢٠ مترًا من الحامل الخاص بها. تُعلَّق المِبخرَة، التي يصِل وزنها إلى وزن رجلٍ نحيف، بحبل يلتفُّ حول الحامل وتتدلَّى إلى أسفل حتى مستوى الأرض حيث يتحكَّم فيها مجموعة من المتطوِّعين (شكل ١-٤٠).

بعد أن تبدأ حركة المبخرة الأشبه بحركة البندول بدفعةٍ من أحدهم، يُؤرجِح الرجال المبخَرَة من خلال جذب الحبل بشدَّةٍ حين تصل المبخَرَة إلى أدنى نقطة لها، ثم يُرخي الرجال شدَّة الجذب حين تصل المبخرة إلى أعلى نقطة لها. يُقلِّل الجذب الشديد طول حركة البندول مسافة حوالي ثلاثة أمتار، وتَخفيف الجذب يُعيد الطول. وبعد ١٧ جذبة، تَستغرِق أقلَّ من دقيقتَين، تتأرجح المبخرة إلى أعلى بـ ٩٠ درجة تقريبًا، مُقتربة من السقف. إن انتقالها السريع عبْر أدنى نقطة يؤجِّج الفحم والبخور الذي يَحترق داخل المبخَرَة. لماذا تُضيف الحركة المحسوبة لفريق الرجال طاقةً إلى الحركة البندولية للمِبخرة؟

الجواب: تُضاف الطاقة إلى أرجوحة المبخرة بنفْس آلية حركة الوقوف وجلوس القرفصاء المُستخدَمة في البند السابق. عندما يُقلِّل الرجال طول البندول، تتحرَّك المبخرة بسرعة عبْر أدنى نقطةٍ لها في المُنحنى الدائري الخاص بها؛ ومِن ثَمَّ يتعيَّن عليهم أن يجذبوا بشدَّة بالغة. هكذا يبذل الرجال جهدًا كبيرًا على المبخرة لتقليل طول البندول، وهذه الطاقة تَنتقِل على هيئة طاقة حركية للمبخرة. وعندما يستعيد الرجال الطول عند أعلى نقطة لحركة البندول، تتحرَّك المبخرة ببطء أو تتوقَّف لبُرهة.



شكل ١-٤٠: بند ١-١١٤: أرجحة مِبخرة عملاقة.

(١١٥) البندول والحفرة

في واحدة من أروع قصص الرعب لإدجار ألان بو بعنوان «الحفرة والبندول»، وجد سجين نفسه طريحًا على الأرض يتدلَّى من فوقه بندول على ارتفاع يتراوَح ما بين ٣٠ و٤٠ قدمًا. في البداية، يبدو البندول ساكنًا بلا حَراك، ولكن فيما بعد عندما نظر السجين إلى أعلى مرة أخرى، اكتشف أنه يتأرجَح في حدود مسافة ياردة ويبدو أنَّ المسافة بينه وبين البندول تَتناقص. وما أفزعه أنه أدرك أن الطرَف السُّفلي عبارة عن «هلال فولاذي لامع ... والطرف السُّفلي منه حادٌّ مثل شفرة الحلاقة ...»

وساعةً تلوَ الأخرى، صارت حركة البندول باعثةً على التنويم؛ إذ يهبط الهلال تدريجيًّا وتزداد مسافة الأرجحة، لتصِل إلى «ثلاثين قدمًا أو أكثر.» ويَصير هدفه واضحًا: يمرُّ برشاقة مباشرة أمام قلب السجين. «إلى الأسفل؛ يزحف البندول بثبات إلى الأسفل. كنت أجد مُتعة جنونية في مقارنة سرعته نحوَ الأسفل بسرعته الأُفقية. نحو اليمين، نحو اليسار — في كل اتجاه — بصرخة رُوح ملعونة! ... إلى أسفل، إلى أسفل بلا هوادة!»

هَبْ أن الهلال يتدلَّى من حبل يَنفلِت تدريجيًّا. لماذا يَزداد مدى الأرجحة مع هبوط الهلال؟

الجواب: يزداد مدى الأرجحة لأن البندول يَهبط، وتتحوَّل طاقة الوضع خاصته إلى طاقة حركية بالتدريج. ورغم ذلك، تُظهر الحسابات أنه بالوضع في الاعتبار الارتفاع المبدئي والأرجحة المبدئية كما وصفها بو وصفًا تصويريًّا في القصة، فمن المُستبعَد أن يتأرجَح البندول يسارًا ويَمينًا لمسافة أكثر من ١٠ أقدام حين يصل إلى السجين، وليس ٣٠ قدمًا أو أكثر كما جاء في أحداث القصة. (من الصعب أن يُمثل هذا التفاوت الحسابي أي عزاءٍ للسجين في قصة بو.)

(١١٦) البندول المعكوس وراكبو الدراجة الأُحادية

إذا تمَّ عكس اتجاه بندول عادي، يكون مزعزعًا وسيَسهل سقوطه. ومع ذلك، إذا تأرجح الحامل الخاص به رأسيًّا وبسرعة، وإذا كان يوجد قليل من الاحتكاك بين البندول والحامل، لماذا يقف البندول منتصبًا؟ يكون البندول مستقرًّا للغاية لدرجة أنك لو وَكَزته جانبًا، فإنه سيَستعيد وضعه المُنتصِب سريعًا.

وعوضًا عن ذلك، إذا تذبذب حامل البندول على نحوٍ أفقي، يتأرجَح البندول حول المحور الرأسي وهو مقلوب رأسًا على عقب، كما لو أنَّ اتجاه الجاذبية الأرضية مَعكوس. يستغلُّ راكب الدرَّاجة الأُحادية قانونًا فيزيائيًّا مشابهًا. عندما يشرع الراكب في السقوط — إلى الأمام مثلًا — يَستعيد التوازُن مرة أخرى لفترة قصيرة من خلال توجيه العجلة إلى الأمام بعض الشيء. وعندما يَشرع الراكب في السقوط إلى الخلف، يُوجِّه العجلة إلى الخلف.

هل يُمكن رصُّ عدة قضبان متَّصِلة بعضها ببعض في مجموعة؛ بحيث تقف منتصبةً مثل البندول المعكوس، إذا ما اهتزَّ القضيب السُّفلي على نحوٍ رأسي؟ هل يُمكن جعل سلك طويل يقف منتصبًا بنفس الطريقة؟ والسؤال الأهم من بين كلِّ الأسئلة: هل يُمكن جعل حبلٍ يقف منتصبًا مثلما يحدُث في الخدع الكلاسيكية الهندية المُستخدَم فيها الحبال التي فيها يمتدُّ الحبل إلى أعلى بدون أيِّ وسيلة للدعم عند الطرف المُعلَّق في الهواء؟

الجواب: أثناء الاهتزازات الرأسية، يقِف البندول مُنتصبًا تقريبًا إذا تجاوز التسارُع الناتج عن الاهتزازات تسارُع الجاذبية الأرضية. وفي بعض الحالات، لا يتسنَّى للبندول أن يسقُط لأنه يُجذَب إلى أسفل بسرعة وعلى نحوٍ مُنتظم ومن ثَمَّ ينتصِب. وإذا كان الحامل يهتزُّ أفقيًّا بالسرعة الكافية، فلن يتمكن البندول من السقوط. وكما هي الحال مع

استراتيجية دعم راكب الدراجة الأحادية، بمُجرَّد أن يشرع البندول في السقوط نحوَ اتجاهٍ واحد، يتحرَّك الحامل أسفل منه في ذلك الاتجاه ويتوقَّف السقوط.

ويمكن جعل عدَّة قضبان، مُرتبطة بعضها ببعض في سلسلة، تقف منتصبة إذا اهتزَّ القضيب السفلي عموديًّا وبسرعة كافية. ويمكن جعل سلك طويل للغاية يقف منتصبًا بمفرده (ينثني السلك تحت وطأة وزنه) إذا اهتز. ورغم ذلك، لا يمكن جعْل حبلٍ ينتصب لأنه مرن جدًّا؛ ومن ثَمَّ خدعة الحبال الهندية ما هي إلَّا خدعة بصرية.

(١١٧) مُوازنة حمولة كبيرة فوق الرأس

في بعض الثقافات، كما هي الحال في الثقافة الكينية، يستطيع الأفراد (ولا سيما النساء) وضع حمولاتٍ ضخمة فوق رءوسهم. لعلهم يتمتَّعون بعضلات رقبة قوية وقُدرة بالغة على التوازُن، إلَّا أن السِّمة المُثيرة للدهشة فعلًا تتمثل في الجُهد اليسير المطلوب للقيام بذلك. على سبيل المثال، ربما يكون في مقدور امرأةٍ أن تحمل وزنًا يصل حتى ٢٠٪ من وزنها دون أن تُضطرَّ إلى اللهاث (في الواقع، دون بذْل أي جهد إضافي من جانبها)، في حين أنه يصعب جدًّا على السيدات الأوروبيَّات أو الأمريكيات اللاتي يتمتَّعن بالصحة والقوة نفسها أن يحملنَ مثل هذه الحمولة. ما السرُّ وراء الأشخاص البارعين في موازنة الأحمال فوق رءوسهم؟

الجواب: أثناء المشي، يتحرَّك مركز كُتلة الشخص لأعلى وأسفل بصورة دَورية. وتأتي أعلى نقطة حين يرتكز الجسم على قدَم واحدة في حين تتحرَّك القدم الأخرى مُتجاوزة الأولى، نحو الأمام. وتأتي أدنى نقطة حين تكون كلا القدَمين على الأرض وينتقل وزن الشخص من القدَم الخلفية إلى القدَم الأمامية. وهذه الحركة الرأسية المُتكرِّرة لمركز الكتلة، بالإضافة إلى تحرك نقطة الارتكاز أفقيًّا أسفل مركز الكتلة بشكل دوري، أشبَهُ بحركة راكب الدراجة الأحادية الذي يتحرك ذهابًا وإيابًا للحفاظ على التوازن. وعلى وجه الخصوص، جزء من طاقة الشخص يتنقل بين طاقة الوضع (المتعلقة بارتفاع مركز الكتلة) والطاقة الحركية (السرعة التي يتحرَّك بها مركز الكتلة إلى الأمام). وعادة ما يَفتقِر المرء إلى القدرة على نقل الطاقة لمدة ١٥ ملي ثانية تقريبًا بعد بلوغ أعلى نقطة؛ بمعنى أنه مع هبوط مركز الكتلة لا تتحوَّل طاقة الوضع بأكملها إلى طاقة حركية، ومن ثَمَّ تُستخَدم العضلات لدفع الشخص إلى الأمام.

تسير النسوة البارعات في موازنة الأحمال على رءوسهن، في كينيا مثلًا، بهذه الطريقة المُعتادة والقاصِرة قليلًا حين «لا يحمِلنَ» شيئًا فوق رءوسهن.

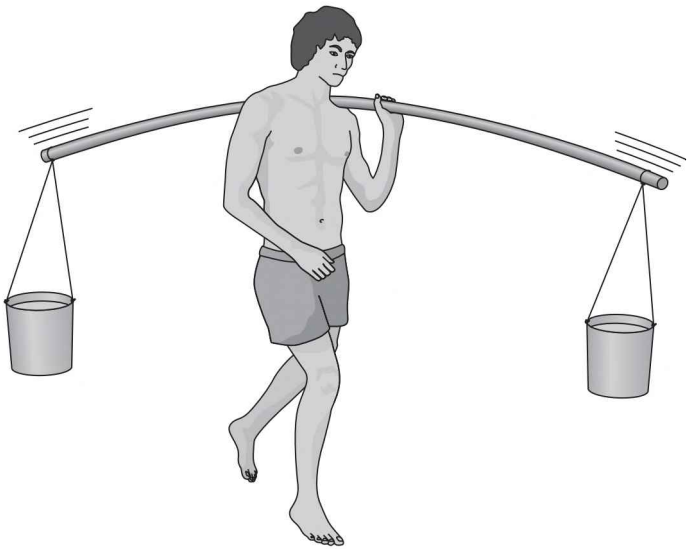
ولكن حين تضع النساء الأحمال فوق رءوسهن، يكون زمن قصور المشية بعد الوصول إلى أعلى نقطة أقل. في الواقع، ربَّما لا يتطلَّب حَمل ثقل معقول (٢٠٪ من وزن الجسم) بذل جهد أكبر من المُعتاد للسَّير بدون أثقال على الإطلاق، ربما لأنَّ الثقل يجعل السيدة تُغير طاقة الوضع إلى طاقة حركية بكفاءة أكثر من المُعتاد. وإذا كان الثقل يتعدى ٢٠٪ من وزن الجسم، فلا بدَّ أن تبذُل السيدة طاقة أكبر مما لو كانت لا تَحمل أثقالًا، حتى وإن كانت تبذل طاقة أقلَّ من السيدة الأوروبية، مثلًا، التي تسير بشكل مختلف.

(١١٨) موازَنة الأحمال على عارضة مُهتزَّة

في آسيا، يحمل بعض الأشخاص أحمالًا ثقيلة إلى حدٍّ ما من خلال ربطها على طرفَين مُتقابلَين لعارضة مطاطية مثل عود خيزران (شكل ١-٤١). وأثناء سير الشخص أو ركضه، تهتزُّ الأحمال والعارضة على نحوٍ رأسي، فهل هذا الترتيب يُوفِّر أيَّ ميزة لحَمل الأثقال؟

الجواب: الاهتزاز الرأسي لجذع الشخص الذي يَحمل العارضة والأثقال يتسبَّب في اهتزازهما رأسيًّا. هب أن الشخص يحمِل على كتفَيه عارضة صُلبة. عندما يتحرَّك الجذع إلى أعلى، لا بدَّ أن يبذل الكتِف قوَّة كبيرة ليَحمِل العارضة والأحمال المُعلَّقة بها. وعندما يتحرَّك الجذع إلى أسفل، يبذُل الكتِف قوَّةً ضئيلة لأن العارضة والأحمال المُعلَّقة بها تهبط مع الكتف؛ مِن ثَمَّ قد يُوجَد تبايُنٌ كبير في القوة الواقعة على الكتِف في أثناء سير الشَّخص أو ركضه.

الهدَف الأساسي وراء استخدام عارضة مطاطية هو تخفيف حدَّة التبايُن في القوة الواقعة على الكتف. السرُّ هو أنه بمجرَّد أن تحدُث الاهتزازات على طول العارضة، تهتزُّ الأحمال في عكس اتِّجاه مركز العارضة؛ فعندما تتحرَّك العارضة إلى أعلى، يتحرك المركز إلى أسفل، والعكس صحيح. يهتزُّ المركز على نحوٍ معاكس للكَتِف؛ فعندما يتحرَّك الكتف إلى أعلى، يتحرك المركز إلى أسفل؛ ومِن ثَمَّ تتوافَق حركة الكتف مع الأحمال، مما يؤدي إلى بذل قوة شِبهِ مُستمرة من جانب الكتف. عندما يتحرَّك الكتف إلى أعلى، فإن اهتزاز العارضة يجعل الأحمال تتحرَّك إلى أعلى. وعندما يتحرك الكتف إلى أسفل، تساعد حركة مركز العارضة إلى أعلى في دعم حركة الأحمال إلى أسفل.

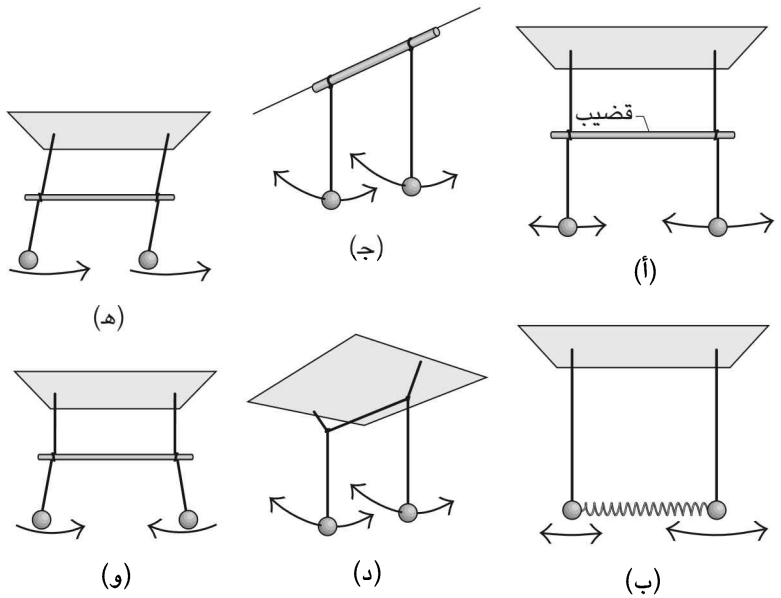


شكل ١-٤١: بند ١-١١٨: أحمال ثقيلة تُحمَل بواسطة عارضة مهتزَّة.

(١١٩) البندولان المُقترنان

اقرن بندولَين معًا من خلال ربط خيطَين مُتساويَين في الطول إلى حاملٍ ثم لُفَّ الخيط مرة واحدة حول قضيب أفقي (شكل ١-٤٢أ). أضف جسمَين مُتماثلَين إلى طرف كل خيط، ضع القضيب عند ثلث المسافة من أعلى. أمسك أحد الجسمَين، وحرك الآخر إلى جانبٍ واحدٍ مُوازٍ للعمود، ثم اترك كِلا الجسمَين في الهواء. لعلك تظنُّ أن البندول المُزاح هو البندول الوحيد المقدَّر له الأرجحة، إلا أنَّ الحركة تَنتقِل تدريجيًّا إلى البندول الثاني. وبمجرَّد أن يكتمِل انتقال الحركة، يَصير البندول الأول ساكنًا، وتنعكس الحركة. وبعد ذلك تَنتقِل الحركة بين البندولَين على نحوٍ دوري.

يُبيِّن شكل ١-٤٢ نفس الحركة في الأوضاع الأخرى. في شكل ١-٤٢ب، يربط زُنبرك بين بندولَين. وفي الوضع الثالث (شكل ١-٤٢جـ)، البندولان مُرتبطان معًا بواسطة أنبوب ضيِّق يُمكِن أن يدور حول خيط أفقي، ويتأرجَح البندولان على نحوٍ عمودي مع الأنبوب.



شكل ١-٤٢: بند ١-١١٩: (أ)–(د) بندولان مُقترنان. (هـ)–(و) نمطان عاديان للحركة.

وفي الوضع الرابع (شكل ١-٤٢د)، يتأرجَح البندولان على نحوٍ عمودي مع الخيط القصير الذي يَربطهما معًا.

ربما من المُثير للدهشة أنه يُمكن رؤية انتقال الاهتزازات من خلال بوصلتَين مُتماثلتَين. ضعْ واحدة على الطاولة، ثم ضع الثانية إلى جوارها بعد هزِّها لجعل الإبرة تهتز. تتأرجَح الاهتزازات ذهابًا وإيابًا بين البُوصلتَين.

ما السبب وراء هذه الحركة؟

الجواب: هيا نتأمَّل الوضع الأول المذكور فقط. انتقال الحركة يأتي من انتقال الطاقة أثناء اندفاع وانجذاب البندولين أحدهما نحو الآخر عن طريق القضيب. ولو قُمتَ بأرجحة البندول بأيٍّ من الطريقتين الخاصتين، المعروفتين باسم «النمطين العاديين» للتذبذُب، فلن يكون هناك انتقال للحركة. وفي أحد هذَين النمطَين، يتأرجح البندولان في توافُقٍ معًا (شكل ١-٤٢هـ)، بحيث يُساهم الخيط بأكمله في الحركة ويكون التأرجُح ذا تردُّدٍ مُنخفِض.

وفي النمَط العادي الآخر، يتأرجح البندولان على نحوٍ غير مُتوافِق تمامًا (شكل ١-٤٢و). الحركة المُتعارِضة تمنع الخيط فوق القضيب من المشاركة في الحركة؛ ومِن ثمَّ الطول الفعلي للبندولين أصغر مما كان في النمط الأول ويكون التأرجُح ذا تردُّد أعلى.

إذا حركتَ بندولًا واحدًا، يظهر كِلا النمطان ويتنافَسان معًا. بعد ذلك، يتأرجَح البندولان بتردُّد يُمثِّل مُتوسِّط التردُّدات المُرتبطة بكلِّ نمَط. تتفاوَت السَّعة (الخاصة بالتأرجح) وفقًا لمعدل مُساوٍ لاختلاف التردُّدات الخاصَّة بالنمطَين. وبينما تتضاءل السعة الخاصة بأحد البندولَين، تزداد السعة الخاصَّة بالبندول الآخر، ثم تنعكس التغيُّرات. يحدث تبادُل مُماثِل للحركة بالنسبة إلى البوصلتَين لأن الإبرتَين تهتزَّان حول اتجاه الشمال المغناطيسي مثلما يهتزُّ البندولان حول اتجاه الجاذبية.

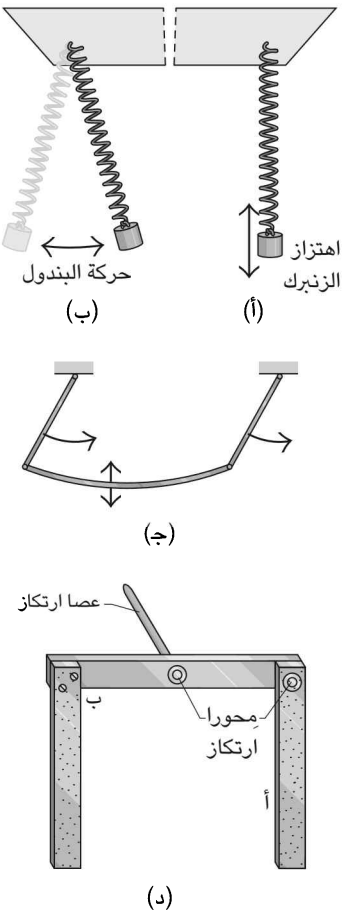
(١٢٠) البندول الزُّنبركي

ثبِّت زُنبركًا صلبًا قليلًا من أحد طرفيه ثم اربط جسمًا في الطرف الآخر بحيث يتمدَّد الزنبرك بمقدار ٣/٤ طوله الأول. اجذب الجسم إلى أسفل ثم اتركه. في البداية، يهتزُّ الجسم رأسيًّا (شكل ١-٤٣أ) ولكن سرعان ما تحلُّ حركة البندول محلَّ الاهتزاز (شكل ١-٤٣ب). وبمجرَّد أن يَختفي الاهتزاز، تَختفي حركة البندول تدريجيًّا ويظهر الاهتزاز مرة أخرى. بعد ذلك، تتأرجَح الحركة ذهابًا وإيابًا دوريًّا بين النوعَين. يُمكنك أيضًا أن تُحرِّك البندول بالنمطَين العاديَّين للحركة إذا بدأتَ بحركة البندول بدلًا من الاهتزاز.

يظهر تبادُلٌ مُشابه للحركة على الجهاز المُبيَّن في شكل ١-٤٣جـ. البندولان مرتبطان معًا عن طريق عارضة مَرِنة تهتزُّ بضِعف تردُّد أيٍّ من البندولَين لو كانا غير مُتَّصِلَين. في هذه الحالة، يَجري تبادل الطاقة بصفة دورية بين حركة البندول واهتزازات العارضة.

يُوضِّح شكل ١-٤٣د مثالًا على نفس القدر من التعقيد. يُمكن لقضيبٍ أفقي أن يدور حول عصا الارتكاز. عند أحد طرفي القضيب، يُثبَّت قضيب رأسي، في حين عند الطرف الآخر يُوضَع قضيب رأسي آخر غير مُثبَّت ليتأرجح حول محور. يُوجد هنا بندولان؛ بندول (أ) هو القضيب الرأسي الثاني، وبندول (ب) هو مزيج من القضيب الأفقي والقضيب الرأسي المثبت. إذا عُدِّلَ طول القضيبَين بحيث يكون مقدار تردُّد أرجحة القضيب (أ) ضعف القضيب (ب)، فسيظهر تبادل دوري للحركة بمجرَّد أن تبدأ أرجحة بندول (أ) باليد (كما مُبيَّن في شكل ١-٤٢أ).

في هذه الأمثلة، ما تفسير التبادُل الدوري للحركة؟



شكل ١-٤٣: البند ١-١٢٠: الاهتزاز يتنقل بين (أ) اهتزاز الزنبرك و(ب) اهتزاز البندول. (جـ) الاهتزاز ينتقل بالتبادل بين البندول والاهتزاز الرأسي للعارضة الواصلة. (د) الاهتزاز يتنقل بالتبادل بين الجزء (أ) والجزء (ب).

الجواب: هيا نتأمَّل الوضع الأول. إذا استطعتَ أن تَجذب الجسم إلى أسفل ثم تتركه ليتحرَّك رأسيًّا على نحوٍ مثالي، فإن الجسم يهتز، إلا أنه لا يُرجَّح حدوث مثل هذه الحركة

المثالية لأنك من المؤكد ستدفع الجسم بحركة جانبية قليلًا. وعندما تختار حركة الجسم كما هو مُبيَّن، تكون حركة الاهتزاز الخالصة ذات تردُّد يُساوي ضعف تردُّد حركة البندول الخالصة.

هبْ أنه في لحظة ما يهتزُّ الجسم في البداية. حينئذٍ تبدأ الطاقة في الانتقال من حركة الاهتزاز إلى حركة البندول. يكون الانتقال بسبب تغيُّر طول البندول في أثناء الاهتزاز. الموقف أشبَهُ بطفلٍ يقف ويجلس القرفصاء مرَّتَين أثناء كلِّ هزة كاملة لأرجوحةٍ ما. يُغير الطفل الطول الفعلي للأرجوحة، ويزود هذا التصرُّف حركة الأرجوحة بالطاقة ومِن ثَمَّ ترتفع عاليًا.

وبمجرَّد أن يكتمِل انتقال الطاقة، يُعكَس الاتجاه بسبب جذب الجسم المعلَّق للزُّنبرك في كل مرة يتأرجح فيها الجسم ليصل إلى أقصى نقطة. يحدُث الجذب مرتين أثناء كل مرة يتأرجَح فيها البندول بالكامل، ومن ثَمَّ يتوافق تردُّده مع تردُّد حركة الاهتزاز الخالصة ويظهر الاهتزاز مرة أخرى. وعندما تسُود حركة الاهتزاز مرة أخرى، تعود الطاقة إلى حركة البندول. وهكذا دواليك.

(١٢١) الجرس الذي لا يصدُر عنه صوت

عندما وُضع جرس كاتدرائية كولونيا لم يدقَّ عند أرجحتِه لأنه كان يتأرجح على نحوٍ مُتوافِق مع لسان الجرس في اتجاه واحد؛ ومِن ثَمَّ لم يَصطدِم لسان الجرس بالجزء الداخلي من جسم الجرس. ما الذي يُمكِن فِعله حيال هذه المشكلة، باستِثناء إلقاء الجرس من بُرج الكاتدرائية والتخلُّص منه؟

الجواب: عندما يتَّصِل بندولان معًا، ويكون أحدُهما أقصر وأقل ضخامة من الآخر، فإنهما يتأرجَحان على نحوٍ مُتوافِق في اتجاه واحد. في الكاتدرائية، كان الجرس أطول وشكَّل بندولًا أكبر حجمًا ولسانُ الجرس أقصر وشكَّل بندولًا أقل حجمًا. كان لسان الجرس بالِغ القِصَر. بعد أن اصطدم الجرس باللسان، انحرف اللسان عن الجرس وانسجمت حركته مع حركة الجرس؛ ومِن ثَمَّ تأرجَح الاثنان معًا في نفس الاتجاه، دون أن يحدُث المزيد من التصادُمات. ومن أجل منع الحركة المُتزامنة، تمَّت إطالة لسان الجرس ومِن ثَمَّ صار أثقل وزنًا. وهكذا، عندما اصطدم الجرس باللسان، كان لسان الجرس أبطأ في حركته ولم يواكِب حركة الجرس. وبهذا بينما يتأرجَح الجرس ذهابًا وإيابًا، فإنه سيتصادَم مع لسان الجرس.

(١٢٢) تأثير الاسباجيتي

ماذا تَنثُر قطرات الصلصلة على نطاق واسع أثناء شفْط شرائط المكرونة الاسباجيتي الطويلة إلى داخل فمك؟ هذا التأثير ليس مُمتعًا فقط على مائدة الطعام، وإنما يُمثل اهتمامًا أيضًا بالنسبة إلى مُعدات التصميم التي يستخدمها المهندسون والتي تسحَب الأوراق (التي تُعاني من «تأثير الاسباجيتي») أو تخرج الأوراق (التي تعاني من «تأثير الاسباجيتي العكسي»).

الجواب: إليك أحد التفسيرات. لنفترِض أنه حين ترتفع شرائط المكرونة الاسباجيتي بعيدًا عن الصحن، تكون لها حركة جانبية. وبينما تشفط شرائط المكرونة إلى داخل فمك بمعدَّل ثابت وتُقلِّل طول الأجزاء المتدلِّية، تتركز الطاقة الحركية المُرتبِطة بالحركة الجانبية في كتلة أقل. وما لم تتغيَّر كمية الطاقة الحركية، يجِب أن تزداد سرعة الحركة الجانبية. وعندما تقترِب أطراف شرائط المكرونة من فمك، تصير السرعة كبيرة بالدرجة الكافية لتسيل قطرات الصلصة من شرائط المكرونة إلى الخارج.

ثمَّة تفسير مُناسب يشتمل على عنصر الزخم الزاوي. إذا التفَّ الطرف المُتدلِّي لشريط المكرونة حول فتحة فمك، لا بدَّ أن يلتفَّ على نحوٍ أسرع كلما اقترب من تلك الفتحة. الأمر أشبَهُ نوعًا ما بمتزلِّج الجليد الذي يدور في البداية على أطراف أصابعه بذراعَين مفرودتَين إلى الخارج ثم يضمُّهما إلى الداخل.

يمكن ملاحظة تأثير الاسباجيتي في شريط القياس المعدني الذي يُسحَب إلى داخل الحاوية تلقائيًّا عند الضغط على الزر. فعندما يقترِب طرف شريط القياس من فتحة الحاوية، فربما ينحرف الطرف ويصيبك. وتُوصي التعليمات أن تسحب الجزء الأخير ببطء لتتجنَّب الوقوع في هذه المشكلة.

(١٢٣) العنكبوت والذُّبابة

كيف يَجلس العنكبوت وسط الشبكة الدائرية واثقًا من أنَّ الذبابة تشابَكَت أو علَقَت في الشبكة؟ لماذا لا تَنهار الشبكة إذا اخترقتها الذُّبابة؟ بعد الاصطدام بالشبكة، لماذا لا تطير الذُّبابة لتهرُب بكلِّ سهولة؟

الجواب: تُرسِل الذُّبابة، بسبَبِ اهتزازها، موجات على طول الخيوط، بما في ذلك بعض الخيوط الشعاعية التي يجلس عليها العنكبوت. ويُمكن تقسيم المَوجات الموجودة

على الخيوط الشُّعاعية إلى ثلاثة أنواع وفقًا لاتجاه الاهتزازات الواقعة على الخيوط. بالنسبة إلى نوعَين، تكون الاهتزازات مُتعامدة على الخيط، إما في مستوى الشبكة أو مُتعامِدة على هذا المستوى. وفي النوع الثالث، تكون الاهتزازات موازية للخيط، وهذا النوع الثالث يُنبِّه العنكبوت. إذا شعَر العنكبوت بذلك الاهتزاز الواقع على خيطَين أو ثلاثة خيوط مُجاورة، يُمكنه أن يُحدِّد سريعًا اتجاه الذبابة؛ لأنَّ الخيط الذي يمتدُّ نحو الذبابة يحمل أقوى الاهتزازات. حتى وإن كانت الفريسة الواقعة في الشباك لا تهتزُّ طويلًا لتحديد مكانها، يستطيع العنكبوت أن يُحدِّد مكانها من خلال النقْر على الخطوط الشعاعية بأرجله، وأي خطٍّ مُثقل بوزن الفريسة سيهتزُّ على نحوٍ مختلف ممَّا لو كان الخيط غير مُثقَل بوزن، ممَّا يُرشد العنكبوت إلى اتجاه الفريسة وربما المسافة الفاصِلة بينهما كذلك. (توجد بعض الأدلَّة التجريبية التي تُشير إلى قُدرة المرء على تحديد المسافة الخاصة بحمولة مربوطة بحبل مشدود من خلال هزِّ الحبل بدون النظر إليه.)

وبعض العناكب تَنسُج شباكها بطريقةٍ تُتيح لها ضبط التوتُّر الواقع على الخيوط. وعندما تكون العناكب جائعة للغاية، تزيد التوتُّر بحيث إنَّ الاهتزاز الصادر عن الفريسة الصغيرة الحجم يَبعث موجاتٍ محسوسة عبْر الشبكة. وعندما تكون العناكب غير جائعة، فإنها تُقلِّل التوتُّر بحيث لا تنبعث الموجات المحسوسة إلَّا بسبب اهتزاز الفرائس الكُبرى.

في عام ١٨٨٠، وصف سي في بويز (الفيزيائي المعروف بكتابه الشهير عن أغشية الصابون الرقيقة) كيف أنه استطاع أن يَجذِب انتباه عنكبوت الحدائق من خلال مسِّ حافة شبكة العنكبوت أو أيِّ شيء يدعم الشبكة باستخدام شوكة رنانة مُهتزَّة (الرنين أ). كان بإمكان العنكبوت أن يُميِّز مكان الشوكة بكلِّ سهولة بشرط أن يُوجَد في منتصف الشبكة. ورغم ذلك، إذا لم يكن العنكبوت موجودًا في منتصف الشبكة، فعليه أن يتوجَّه إلى المنتصف أولًا قبل أن يتمكَّن من العثور على مكان الشوكة. عندما وضع بويز الشوكة بالقُرب من العنكبوت بدلًا من وضعها على جزء من الشبكة بعيدًا عن العنكبوت، ميَّز العنكبوت الاهتزازات باعتبارها خطرًا وبسرعةٍ نزل من الشبكة باستخدام خَيطٍ مَتين.

يُقال إنَّ ثمَّة نوعية مُعينة من العناكب الاستوائية تعيش على سرقة طعام العناكب الأخرى لأنها لا تَنسج الشباك الخاصَّة بها، ولكنها تسرق الفرائس من العنكبوت المُضيف صاحب الشبكة. ومن أجل مُراقبة الشبكة، يمدُّ العنكبوت السارق خيوطًا (لمسافة ٢٠ أو ٣٠ سنتيمترًا) من موقع رقوده إلى مِحور الشبكة والخيوط الشعاعية للشبكة. ومتى أوقعت شبكة العنكبوت المضيف ذبابة، مثلًا، تُرسَل الاهتزازات على طول الخيوط المُراقبة. ومن

خلال نمَط الاهتزازات، يستطيع العنكبوت السارق أن يُحدِّد موضع الذبابة الحبيسة التي سيأكلها العنكبوت المُضيف لاحقًا. إذا كان الأمر كذلك، فإنَّ العنكبوت السارق سُرعان ما يتسلَّل إلى داخل الشبكة ليسرِق الفريسة الحبيسة.

تقوم الشبكة مقام الفلتر للإيقاع بالفريسة الطائرة التي تكون في نفس حجم العنكبوت تقريبًا أو أصغر من خلال امتصاص الطاقة الحركية والزخم الزاوي للفريسة. والشبكة مصمَّمة بحيث تنهار (تتفسخ) إذا كانت الفريسة أكبر من العنكبوت لأنها حينئذٍ تستطيع أن تُؤذِي العنكبوت.

عندما تَصطدم الفريسة بالشبكة، تتمدَّد الخيوط ولكنها تقوم مقام سائل لزِج تحتفظ داخلها بمُعظم طاقة التصادُم؛ ومن ثَمَّ لا تستطيع الفريسة الفكاك من الشبكة بسهولة. بالإضافة إلى ذلك، تُوضَع القطرات اللاصقة (التي تكون أشبه بخرَز بالغ الصغر) على طول بعض الخيوط (الخيوط الآسرة) لحبْس الفريسة. (يفصل الخرَز مسافة كافية تُمكِّن العنكبوت من اقتفاء أثره على طول الخيط بدون أن يوقع نفسه في شراك الخيط.) ستُصارع الفريسة ولكن نظرًا لأن الخَيط يتمدَّد بسهولة بالغة، فإنها تَعجز عن العثور على أيِّ شيء يُمكنها من تحرير نفسها من القطرات.

(١٢٤) اهتزاز جسور المُشاة وقاعات الرقص

في عام ١٨٣١، كان جنود سلاح الفرسان يَعبُرون جسرًا معلقًا بالقرب من مانشستر، بإنجلترا، وحسب المُفترض فإنهم كانوا يَخطُون على نحوٍ متوافق مع الاهتزازات التي أحدثوها على الجسر. انهار الجسر حين تداعى أحد المسامير التي تُثبته، وسقط أغلب الرجال في الماء أسفل الجسر. ومنذ ذلك الحين يُؤمَر الجنود بأن «يكسروا إيقاع الخطوات» حين يعبرون أحد الجسور الخفيفة. كيف يُمكن للسَّير في خطوات مُتجانسة أن يسبب انهيار جسْر؟

في عام ٢٠٠١ افتُتح جسر أنيق مُنخفِض على نهر التايمز في لندن بهدَف ربط معرض «تيت مودرن» للفن الحديث بمنطقة كاتدرائية القديس بولس كاحتفال بالأَلفية الجديدة. ومع ذلك فعندما بدأت أولى حشود المُشاة السير فوق الجسر، بدأ جسر الألفية، كما أُطلِق عليه، في الاهتزاز بشدَّة لدرجة أن بعض المُشاة اضطرُّوا إلى الحفاظ على توازُنهم عن طريق الإمساك بالحاجز الجانبي. فما الذي سبَّب الاهتزازات؟

لماذا يُمكن أن تحدُث اهتزازات مُشابهة في قاعة الرقص أو في أثناء حفل صاخِب لموسيقى الروك؟

الجواب: يتمثَّل الخطر في أنه لو سار الجنود على نحوٍ متزامن مع الاهتزازات التي أحدثوها داخل الجسر، فقد تزداد قوة الاهتزازات بحيث ينهار جزء من دعامات الجسر. (لا أستطيع الجزم بأن هذا ما حدَث فعلًا في مثال جسر مانشستر.) وعن طريق كسر إيقاع الخطوات فإن الدقَّ الواقع على الجسر بفعل خطوات المشاة لا يَصير مُتجانسًا (متناغمًا) ومِن ثَمَّ لا تَزداد الاهتزازات.

كان كلُّ شخص، عند السير على جسر الألفية، يُنتج قوةً مؤثرة على الجسر، ولم يكن اتجاه القوة إلى الأسفل وحسب وإنما إلى اليسار أو اليمين كذلك. وهذه القوة تحدُث لأن أي شخص يسير في المُعتاد عن طريق تحريك جسده إلى اليسار وإلى اليمين. هذه القوة المتَّجهة من اليسار إلى اليمين والعكس صغيرة، لكنها على الجسر وقعت بتردُّد (مقداره نصف هرتز أو نصف وحدة في الثانية) كان يَتوافَق على نحوٍ تقريبي مع التردُّد الذي يُمكن أن يَتمايل به الجسر إلى اليسار وإلى اليمين. هذا التوافق في التردُّد يُقال إنه أحد شروط «الرنين»، وتنحو الاهتزازات حينها إلى أن تزداد قوة، كما يَحدُث عندما تزداد أرجحة الطفل الذي يركب أرجوحة في ملعب الأطفال قوةً إذا دفعتَهُ بتردُّدٍ يَتوافق مع تردُّد الأرجوحة.

في البداية كان المُشاة يَسيرون على نحوٍ غير مُتجانس، فكانت حركتهم غير متناغِمة بالأساس؛ ومِن ثمَّ لم تزدَدِ الاهتزازات إلَّا ببطء. لكن سرعان ما صارَت الاهتزازات كبيرة بما يَكفي لدرجة أن بعض المُشاة لم يستطيعوا الحفاظ على توازُنِهم إلا عن طريق السير بصورة مُتناغِمة معها. ومع زيادة عدد المُشاة الذين يسيرون في تناغُم معها، زادت الاهتزازات قوة، وهو ما جعل السير أصعب وحث المزيد من المُشاة على السير على نحو مُتناغم معها. وفي النهاية، كان حوالي ٤٠ بالمائة من المشاة على الجسر يَسيرون بصورة مُتجانسة وكانت الاهتزازات المُتَّجهة من اليسار إلى اليمين والعكس ملحوظة، بل وأدَّت إلى اهتزازاتٍ من أعلى إلى أسفل والعكس. ومن أجل إصلاح الجسر، ركَّب المُهندسون جهازًا لتشتيت الطاقة المُتولِّدة من تأرجُح الجسر من اليسار إلى اليمين، وبهذا منعوا المُشاة من السير على نحوٍ مُتجانِس معها.

يُمكن أن تحدُث اهتزازات مشابهة، لكنها بالأساس ناتجة عن تأثيرات رأسية، في أرضيات المكاتب وصالات الألعاب الرياضية وقاعات الرقص. وهي تكون ملحوظةً بوجهٍ خاص حين يقفِز المشاهدون على نحوٍ متناغم كما يحدُث في بعض أنماط الرقص مثل رقصة «البوجو». أيضًا يمكن أن تحدُث الاهتزازات في منطقة مقاعد المُشاهِدين بحفل موسيقي إذا دقَّ المشاهدون بأقدامهم على الأرض أو حتى إذا صفَّقوا بأيديهم بقوَّة في تناغُم مع

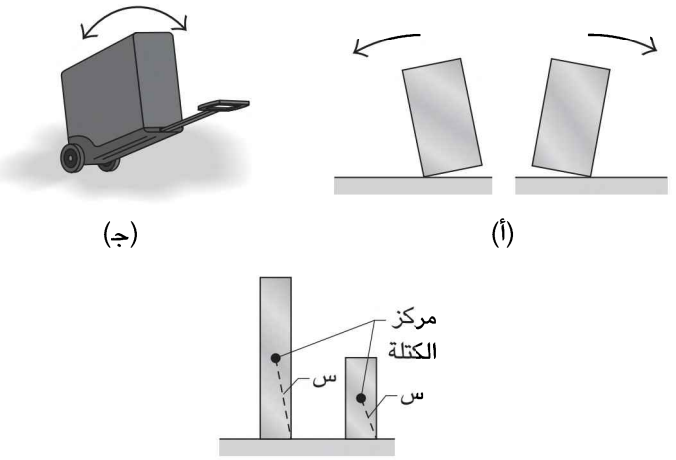
الموسيقى. يتراوَح في المُعتاد تردُّد هذا النشاط الذي يقوم به المشاهدون بين ١ هرتز و٣ هرتز. وإذا اقتربت القيمة من أدنى تردُّد رنين لقاعة الرقص أو منطقة المقاعد، فمن المُمكن أن ينشأ الرنين، وحينها لا تكون شدَّتُه وسرعته ملحوظة وحسب لدى المشاهدين وإنما تكون مُخيفة. ومن أجل تجنُّب الرنين والضَّرَر المُحتمَل للبناء أو انهياره، توصي قوانين التشييد والبناء عمومًا بألَّا تقِلَّ أدنى قيمة لتردُّد الرنين الخاص بالبناء عن ٥ هرتز.

(١٢٥) المباني الآيِلة للسقوط والصخور المُتزعزِعة

في أثناء بعض الزلازل، انهارَت مبانٍ مُستقرَّة أشبه بالكتل الحجرية بفعل الهزة الأرضية، في حين بقِيَت مبانٍ، أشبَهُ بالأعمدة وتبدو مُتزعزعة، مُنتصِبةً فوق الأرض. وحتى المنشآت مثل خزَّانات المياه المشتركة المصنوعة على شكل كُرة جولف مُتوازنة على حامل الكرة البلاستيك تَصمُد أمام الهزَّات الأرضية في حين أن الخزانات الأسطوانية الشكل لا تصمد. ما سبب استقرار المباني التي تبدو مُتزعزعة؟ هذا السؤال ذو أهمية واضحة في تصميم المباني الحديثة في المناطق التي يكون بها نشاط زلزالي. كما أنه ذو أهمية أيضًا في الحفاظ على المنشآت القديمة مثل التماثيل الكلاسيكية والأعمدة الموجودة في أماكن مثل اليونان.

وفي المناطق التي تَنتشِر فيها الصخور؛ حيث تكون الصخور مُعرَّضة لعوامل التعرية بسبب التجوية، تستطيع الصخور أن تكشف ما إذا كان من المقدَّر حدوث نشاط زلزالي في المنطقة. على سبيل المثال، الصخور الموجودة في بعض المناطق بولاية كاليفورنيا، والقريبة من فالق سان أندرياس الشهير بمسافة ٣٠ كيلومترًا، تُشير إلى عدم وجود نشاط ملحوظ للزلازل خلال بضعة آلاف من الأعوام الماضية. ما الأدلَّة البسيطة الموجودة في الصخور التي يُمكنها أن تدلَّ على غياب النشاط الزلزالي؟

الجواب: قد تتسبَّب الهزَّة الأرضية (هزَّة واحدة أو سلسلة من الهزَّات أو اهتزاز مُتذبذب) في جعل المبنى غير المُستقرِّ يتأرجَح فوق أطرافه (شكل ١-٤٤أ). إذا كان مركز كتلة المبنى يتحرَّك فوق الحافة، فسينهار المبنى. إذا حاولتَ إسقاط مبنًى من خلال دفعه من الأعلى (مثلما قد تسقط قطعة دومينو مُنتصِبة)، يزداد عدم استقرار المبنى كلَّما زاد طوله. ورغم ذلك يُعدُّ السقوط إثر التعرُّض لهزَّة أرضية آلية مُختلفة للغاية لأنَّ الدفع يأتي من أسفل المبنى. هكذا، يعتمد استقرار المبنى على المسافة «س» من مركز كتلة المبنى حتى الحافة (شكل ١-٤٤ب)، وهذا يعني أنه كلَّما زاد طول المسافة «س» بوجهٍ عام، صار الاستقرار أكبر. وعلى الرغم من أنَّ تأثير الهزَّة الأرضية يَعتمِد على عددٍ كبيرٍ من المُتغيِّرات،



شكل ١-٤٤: بند ١-١٢٥: (أ) مكعبان يتأرجَحان إثر هزة أرضية. و(ب) تتوقَّف خطورة السقوط على المسافة «س». (جـ) حقيبة سفر ذات عجلتَين قد تهتزُّ ثم تسقط.

فعمود طويل ذو مسافة «س» كبيرة قد يكون أكثر استقرارًا من عمود قصير ذي مسافة «س» صغيرة عند تأرجُح كلٍّ منهما إثر الهزَّة الأرضية.

ولعلَّك لاحظتَ اهتزازًا مشابهًا إذا سحبتَ حقيبة سفر ذات عجلتَين عبْر صالة المطار (شكل ١-٤٤جـ). إذا سرت ببُطء لكي تَسحب بثبات يدَ الحقيبة، تكون الحقيبة مُستقرَّة (وتَبقى في وضعٍ مُنتصِب). ولكن إذا سرتَ بسرعة، وجذبتَ اليد بوتيرة مُنتظمة، قد تهتزُّ الحقيبة إلى اليمين واليسار على عجلتَيها. وإذا كان الاهتزاز كبيرًا بالدرجة الكافية، ستَنقلِب الحقيبة، حتى إذا حاولتَ أن تُسيطِر على السقوط من خلال إدارة اليد في الاتجاه العكسي.

في بعض المناطق التي تَتناثَر فيها الصخور، تترك تجوية الصخور بعض الصخور تتوازَن على قاعدة ضيِّقة من المواد المُتبقية. وهذه «الصخور المُتزعزِعة» (كما يُطلَق عليها) قد تَسقُط عادةً باليد وقد تتساقَط بهزَّة أرضية متوسِّطة أثناء نشاط زلزالي؛ ومِن ثَمَّ تَعني حقيقة أن الصخور لا تزال صامدة لآلاف السنين أن المنطقة لم يَظهر فيها نشاط زلزالي ملحوظ أثناء تلك الفترة.

(١٢٦) غرق الغوَّاصة النووية «كورسك»

في أغسطس عام ٢٠٠٠، بينما كان الأسطول الشمالي الرُّوسي يجري مناورات ببحر بارنتس شمال روسيا، غرقت الغوَّاصة النوَوية «كورسك» على نحوٍ غامِض. ومع انتشار خبر فقدانها، لاحظ خبراء الزلازل من مُختلف أنحاء نصف الكرة الأرضية الشمالي أنهم في يوم غرق الغوَّاصة «كورسك» سجَّلوا موجاتٍ اهتزازية غريبة صادرة من بحر بارنتس. وأشار تحليل البيانات إلى السبب وراء غرق الغواصة. والمُثير للدَّهشة أكثر، أنه كشف العمق أيضًا. كيف يُمكن تحديد العُمق من قياسات أُجريَت من مكانٍ بعيد للغاية؟

الجواب: الموجات الاهتزازية هي موجات تَنتقِل إما عبْر باطن الأرض أو فَوق الأرض. يتمُّ إنشاء محطات رصد الزلازل بالأساس من أجل تسجيل الموجات الاهتزازية الناجمة عن الهزَّات الأرضية، إلا أنها تُسجِّل أيضًا الموجات الاهتزازية الناجمة عن انبعاث قدْرٍ كبير من الطاقة بالقُرب من سطح الأرض، مثلما يَحدث عند وقوع انفجارات. وعندما تمرُّ المَوجات الاهتزازية عبْر إحدى المحطات، فإنها تهزُّ مؤشِّر تسجيل ويرسُم المؤشر رسمًا بيانيًّا. تكوَّنت الرسومات، التي تُعزى إلى الغواصة «كورسك»، من مجموعة أولى من الاهتزازات ذات السعة الصغيرة، وبعد مرور ١٣٤ ثانية، بدأت الاهتزازات ذات السَّعة الأكبر.

ومن خلال هذه الرسومات، استنتج المُحلِّلون أن المجموعة الأولى من الموجات الاهتزازية كانت ناجمةً عن انفجار حدَث على متْن الغوَّاصة، ربما بسبب طوربيد فشل في الانطلاق عند إطلاقه. اخترق الانفجار بدَن الغوَّاصة واشتعلَت النيران وغرقت الغواصة. وبعد ذلك تولَّدت موجات اهتزازية أقوى بكثير بعد غرق الغواصة وتولَّدت على الأرجح حين تسبَّبت النيران في انفجار عدَّة صواريخ (خمسة على الأرجح) شديدة الانفجار موجودة على متن الغواصة في آنٍ واحد. وصلت هذه الموجات الأقوى إلى محطات رصْد الزلازل على هيئة ذبذبات بفاصلٍ زمني حوالي ٠,١١ ثانية.

ومن خلال ذلك الفاصل الزمني، استطاع المُحلِّلون أن يُقدِّروا العمق الذي وصلت إليه الغوَّاصة الغارقة. وقع الانفجار الأقوى عندما وصلَتِ الغواصة إلى قاع المُحيط؛ إذ أرسلت ذبذبة إلى قاع البحر وذبذبة إلى أعلى عبْر المياه. «ارتدَّت» الذبذبة المنتقلة عبر المياه عدَّة مرات بين سطح المياه وقاع البحر. وفي كلِّ مرة كانت الذبذبة تصطدم بقاع البحر، كانت تُرسِل ذبذبة أخرى إلى اليابسة، ورصدت محطات رصد الزلازل هذه الذبذبات عند وصولها إلى اليابسة واحدةً تلوَ الأخرى؛ ومِن ثَمَّ كان الفاصل الزمني المُقدَّر بـ ٠,١١ ثانية بين أي ذبذبتَين أرضيَّتَين مُتعاقبتَين مُساويًا للزمن الذي تستغرقه الذبذبة المائية كي تَرتفع إلى

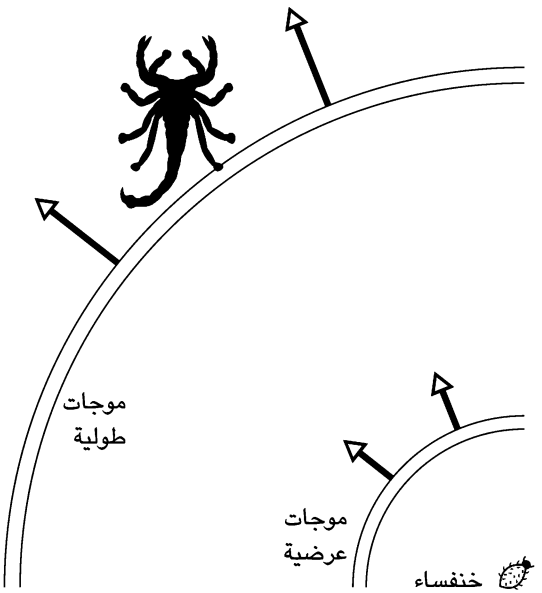
سطح المياه وتعود إلى قاع البحر مرةً أخرى. ومن خلال الاستعانة بذلك الفاصل الزمني، استنتج المُحللون أنَّ الغواصة غرقت على عمق ٨٠ مترًا تقريبًا، في الواقع، اكتُشف فيما بعدُ أن الغوَّاصة غرقت على عُمق ١١٥ مترًا، وهو عُمق قريب بدرجة كبيرة من العُمق المحسوب.

ولقد سجَّل خبراء الزلازل انفجاراتٍ كبرى أخرى، مثل انفجار الشاحنة المُلغَّمة في نيروبي بكينيا، عام ١٩٩٨، في هجوم إرهابي شُنَّ على السفارة الأمريكية. وفي عام ١٩٨٩، سجَّلوا موجات زلزالية صادرة عن موجة صدمية (صوتية) تولَّدت من إطلاق المكوك الفضائي «كولومبيا» أثناء تحليقه فوق لوس أنجلوس في رحلة عودته (الناجحة) إلى قاعدة إدواردز الجوية. وفي ١١ سبتمبر ٢٠٠١، سجَّل خبراء الزلازل اصطدام الطائرتَين المخطوفتَين بِبُرجَي مركز التجارة العالمي وما تلاه من انهيار للبُرجَين.

(١٢٧) آلية التعقُّب لدى عقرب الرمال

عندما تتحرَّك خنفساء على الرمال وفي نطاق بضع عشرات السنتيمترات من العقرب فإنه يلتفُّ على الفور ناحية الخنفساء ويندفع إليها (كي يَلتهمها). يستطيع العقرب فعل ذلك دون أن يرى الخنفساء (فهو كائن ليلي) أو يَسمعها. كيف يستطيع العقرب أن يُحدِّد بدقةٍ بالغة موقع فريسته؟

الجواب: يُحدِّد عقرب الرمال اتجاه الفريسة ومسافتها من الموجات التي تُرسلها حركة الفريسة على سطح الرمال. بالنسبة إلى أحد أنواع الموجات، الموجات العرضية، تتحرَّك الرمال الموجودة عند السطح رأسيًّا ومِن ثَمَّ على نحوٍ عمودي على اتجاه انتقال الموجة. وبالنسبة إلى النوع الآخر، الموجات الطولية، تتحرَّك الرمال بالتَّوازي مع اتجاه سَير الرمال. تَنتقِل الموجات الطولية أسرع بثلاث مرَّات من الموجات العرضية. يَعترِض العقرب، بأرجله الثماني المُنفرِجة في دائرة يصل قُطرها إلى حوالي ٥ سنتيمترات، الموجات الطولية الأسرع أولًا ويَكتشِف اتجاه الخنفساء؛ إذ تكون في اتجاه الرِّجل التي اعترضَت الأمواج في وقتٍ أبكر (شكل ١-٤٥). يَستشعِر العقرب بعد ذلك الفترة الزمنية الفاصلة بين الاعتراض الأول والاعتراض الخاص بالموجة العرضية البطيئة ويستغلُّها ليُحدِّد المسافة التي تَفصله عن الخنفساء. على سبيل المثال، إذا كان الفاصل الزمني بين وصول الموجات بنوعيها ٠,٠٠٤ ثانية فإنَّ هذا يعني أن الموجات صادرة عن خنفساء تبعُد بمسافة ٣٠ سنتيمترًا. وبهذه الطريقة، يُحدِّد العقرب على الفور اتجاه فريسته والمسافة الفاصلة بينهما.



شكل ١-٤٥: بند ١-١٢٧: موجات تُنبِّه العقرب بحركة الخنفساء.

(١٢٨) موجات الجليد

لماذا يُمكن لخطوةٍ واحدة على حقلٍ جليدي، في ظروف نادرة كما هو واضح، أن تُثير «هزة جليدية» تنتقل بعيدًا عن الموقع، بصوت سقوطٍ منخفض التردُّد عادةً؟

الجواب: الهزَّة الجليدية هي عبارة عن انخفاض مُطَّرد في سطحٍ جليدي بسبب انهيار طبقة رقيقة بنيويًّا من بلُّورات الصقيع الموجودة أسفل الجليد (ومِن ثَمَّ المُختبئة). تتسبَّب هذه الخطوة في انهيار طبقة البلُّورات الموجودة أسفل منها مباشرة، وهذا الانهيار يسقط ويزعزع الطبقة البلورية المُحيطة، التي تنهار حينئذٍ، وهكذا دواليك. وبينما تَنهار الطبقة البلورية، ينهار الجليد إلى أسفل بصوت غطس وانغِمار في المياه، مما يَجعل الصوتَ أشبَهَ بتساقُط الجليد من فروع الشجر إلى طبقات الجليد المُتراكِمة على الأرض.

(١٢٩) موجات ملاعب كرة القدم

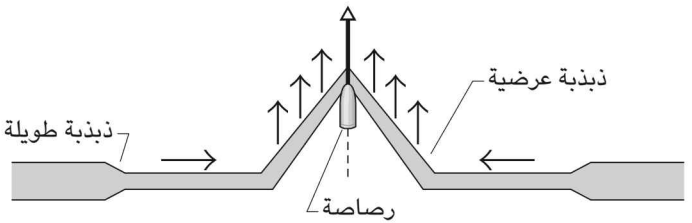
موجات ملاعب كرة القدم هي عبارة عن ذبذبة يَصنعُها المُشجِّعون وتَنتقِل عبْر ملعب كبير ومكتظٍّ بالمُتفرِّجين في أثناء المناسبات الرياضية. في البداية، حظيَ التأثير باهتمام واسع النطاق أثناء كأس العالم لكرة القدم عام ١٩٨٦ في المكسيك؛ ومِن ثَمَّ عادةً ما يُطلق عليها «الموجة المكسيكية» أو «لا أُولا» (La Ola). ومع انتقال الموجة عبْر الملعب، يقِف المُتفرِّجون رافعين أيديهم ثم يَجلسون مرة أخرى. كيف تبدأ الموجة (لا تُوجَد إشارة للبدء من المذيع مثلًا) وما مَدى سرعة انتقالها؟

الجواب: لا يُمكِن أن تبدأ الموجة إلا إذا كانت ملحوظة. فلا يكفي لبدء الموجة وقوف شخص واحد أو عدَّة أشخاص وجلوسهم مرة أخرى؛ لأن مثل هذه الحركة ستفقد تأثيرها وسط الحركة العادية للمُتفرجين. وبدلًا من ذلك، تحتاج الموجة إلى عدد ضخم من المتفرِّجين يقفون ويجلسون معًا في تناغم. ومِن ثَمَّ لا يُمكن أن تبدأ الموجة إلا إذا نَسَّق شخص مبادِر أو أكثر من شخص لبدء الموجة وتنظيم أول مجموعة مكوَّنة من ٢٠ أو ٣٠ مشاركًا مثلًا. ويستطيع المُبادِرون أن يَلتفتوا ليُوجِّهوا المجموعة ويلفتوا الانتباه باستخدام أحد الأعلام مثلًا. بعد ذلك قد تلفت الحركة المتزامنة للمجموعة الأولى انتباه مجموعة الأفراد المُجاوِرين الذين قد يقفون ويجلسون في تناغم، وهكذا دواليك. تُوضِّح الدراسات أن الموجة تَنتقِل عادة مع اتجاه عقارب الساعة عبْر الملعب (كما يُرى من أعلى)، ولكني لا أستطيع تفسير السَّبب وراء ذلك. وتُقدَّر السرعة بـ ١٢ مترًا في الثانية تقريبًا، وهو ما يتوقَّف على الوقت اللازم للمُتفرِّج لكي يستجيب ويقف بعد رؤية المجموعة المُجاوِرة من المُتفرِّجين يقفون.

(١٣٠) السُّترات الواقية من الرصاص

كيف تعوق نوعية نسيج السترات الواقية ذخائر الأسلحة الخفيفة (رصاص المسدَّسات وشظايا القنابل أو القذائف)؟ ولكنها لا تعوق اختراق سكين؟

الجواب: عندما تخترق قذيفة عالية السرعة سُترة واقية، يعوق النسيج القذيفة ويحُول دون اختراقها للسُّترة؛ وذلك من خلال نشر طاقة القذيفة عبْر مساحة كبيرة سريعًا. وهذا النشر يحدُث من خلال ذبذبات طولية وعرضية تتحرك على نحوٍ شُعاعي من نقطة التصادم؛ حيث تُحدِث القذيفة انبعاجًا على شكل مخروط داخل النسيج. تجعل



شكل ١-٤٦: بند ١-١٣٠: انبعاج في سُترة واقية نتيجة مقذوف.

الذبذبة الطولية، المُخترقة لألياف النسيج على نحوٍ أسرع من حدوث الانبعاج، الألياف تتمدَّد وترقق؛ وذلك مع انسياب المادة إلى داخل الانبعاج. يوضح شكل ١-٤٦ أحد هذه الألياف الشعاعية. ينتقل جزء من طاقة القذيفة إلى هذه الحركة والتمدُّد الحادث. تُعزى الذبذبة العرضية، التي تتحرَّك بسرعة أقل، إلى الانبعاج. وبينما تَزيد القذيفة عُمق الانبعاج يزداد نصف قطر الانبعاج، مما يتسبَّب في تحرُّك المادة الموجودة في الألياف في نفس الاتجاه الذي تتحرك فيه القذيفة (عمودي على اتجاه سَير الذبذبة العرضية)، وينتقل جزء من طاقة القذيفة إلى هذه الحركة. يتبدَّد بعض من الطاقة من خلال احتكاك الألياف في المناطق التي تتعامَد فيها بعضها على بعض في الموجة أو داخل السُّترة الواقية التي تتكوَّن من طبقات مُتعدِّدة، من خلال تمديد الألياف واختراقها.

والسُّترة الواقية لا تعوق السكِّين لأن نصل السكين يمكن أن يخترق بسهولة الألياف الموجودة بين الأنسجة، ويُمكن للنصل الحاد أن يَقطع الألياف في أثناء تحرُّك السكين إلى الأمام. ولعلك تعتقد أن درع الزرد، الدرع المرن الذي كان الفرسان يرتدونه أيام القتال، سيُجدي نفعًا أكثر، إلا أنه مُصمَّم لصدِّ الضربة العريضة للسيف، لا الاختراق المُركَّز لنصل السكين.

(١٣١) إشكالية رامي السهام

بصرف النظر عن دقَّة توجيه السهم، بمجرَّد أن يَنطلِق السهم ويبدأ في التحرك بعيدًا عن جذع القوس، فإنه يحيد عن الهدف بنحو ٧ درجات. ورغم ذلك، فإنه يتوجَّه نحو نقطة

الهدف. ويكون انحراف السهم أكثر غرابة إذا تمَّت مُتابعة السهم بالحركة البطيئة؛ فعلى الرغم من أنه يَستنِد إلى الجذع عند الاستهداف، لا يلمس السهم الجذع مرة أخرى أبدًا بمُجرَّد أن ينطلق. وبدلًا من الانزلاق على طول الجذع، فإنه يتلوَّى حوله. ما تفسير هذا السلوك، وكيف يجد السهم سبيله؟

عندما يُستخدَم القوس الطويل في القتال، لماذا كان السهم يُجهَّز بوضْع كرة من شمع العسل على رأس السهم؟

الجواب: لنَفترض أنَّ السهم على الجانب الأيسر من جذع القوس. فور إطلاقه، يدفع الوَتر والجذع طرفي السهم ناحية اليسار، فيَلتوي السهم ثم يبدأ في الاهتزاز يمينًا ويسارًا. تُتيح الاهتزازات للسهم أن يتلوَّى حول الجذع دون أن يفقد أي قدرٍ من الطاقة من خلال الاحتكاك وبدون أن يصطدم الطرَف ذو الريش بالجذع. وعلى الرغم من أن رأس السهم لا يُشير دومًا نحوَ الهدف أثناء الاهتزاز، إلَّا أن رحلته تكون في ذلك الاتجاه. وبعد أن يُغادر السهم القوس، تَخفُت الاهتزازات ثم يشير الرأس إلى الجهة المنشودة.

ولكي يلتفَّ السهم حول الجذع بشكل صحيح، لا بدَّ أن يمرَّ باهتزازٍ كامل لمرة واحدة في اللحظة التي يُغادر فيها الوتر، ويتطلَّب هذا الشرط قدرًا مُعيَّنًا من مرونة السهم. فإذا كان السهم مرنًا أكثر مما ينبغي، تكون الاهتزازات بطيئة للغاية ويَصطدم الطرف ذو الريشة بالجذع. وإذا كان السهم جامدًا أكثر ممَّا ينبغي، فإن الاهتزازات تكون سريعة للغاية أو يكون مدى الحركة الجانبية صغيرًا للغاية؛ ومِن ثَمَّ لا ينطلق السهم من القوس بطاقته الكاملة بسبب الاحتكاك أو اصطدام الطرف ذي الريشة.

يُقال إنَّ كرة شمع العسل كانت توضع على رأس السهم بحيث يخترق السهم درع الجندي على نحوٍ أفضل. ويرجع السبب في ذلك إلى أن الكرة تَصطدم بالدرع أولًا، ويتسبَّب الاصطدام في جعل السَّهم مُتعامدًا أكثر على الدرع حالَما يصِل رأس السهم إلى الدرع. وهكذا، ليس من المُرجَّح أن يصطدم السهم بالدرع ويَحيد عنه، بل من المُرجَّح أكثر أن يخترقه.

(١٣٢) النباتات المهتزَّة

يمكن أن تُكسَر شجرة أو تُقتلَع إذا انثنَت بسبب هبوب عاصفةٍ أو إعصار استوائي. كيف يمكن أن تُعرَّض لِمثل هذا الخطر في العواصف الأصغر أيضًا؟

الجواب: أيُّ شجرة ستهتزُّ وفق ما يُطلَق عليه «تردُّدها الخاص»؛ حيث تكون القاعدة ثابتة في مكانها، وتهتزُّ القمَّة بأشدِّ ما يكون، وتهتز النقاط الوسطية بقدْرٍ متوسِّط. وقيمة التردُّد الخاص تتوقَّف على طول الشجرة، ومتانة المادَّة النباتية (قُدرتها على الانثناء)، ومقاومة الهواء على فروعها وأوراقها. وعلى الرغم من أنَّ هبَّةً واحدة من الرياح يمكن أن تجعل الشجرة تتمايل، فسرعان ما تتلاشَى الحركة ومن المُستبعَد أن تَنثني الشجرة بالدرجة الكافية لكَسْرها أو اقتلاعها. تأتي هذه المخاطر حين تصطدم سلسلة من هبَّات الرياح بالشجرة بمُعدَّلٍ يَقترِب من تردُّد الشجرة الخاص، وهي حالة يُطلق عليها «الرنين». والموقف أشبَهُ بكونك تَدفع بقوة مُتوسِّطة أرجوحة تحمِل طفلًا. فإذا دفعت الأرجوحة بتردُّدها الخاص، يُمكنك أن تُراكم مدى الأرجحة تدريجيًّا. فبالنسبة إلى العواصف والأشجار، يُمكن مُراكمة الأرجحة.

بالطبع، لا تهبُّ الرياح بمُعدَّلٍ ثابت؛ ولكن إذا اقترب مُتوسِّط تردُّدها من تردُّد رنين الشجرة، ربما يكون التَّمايُل كافيًا لكسر الشجرة أو اقتلاعها. ورغم ذلك، إذا كانت الشجرة مُحاطةً بأشجار أخرى، فلا تُحمى الشجرة من العواصف بصورة جزئية وحسب، وإنما تَفقد طاقة حركتها تدريجيًّا أثناء احتكاك فروعها بفروع الأشجار الأخرى. وأيُّ شجرة، سواء وسط أشجار أُخرى أو مَعزولة، ستَفقِد أيضًا طاقةً بسبب مقاومة الهواء الواقعة على أوراقها وتمدُّد جذوعها وانضغاطها.

ونباتات المحاصيل عُرضة أيضًا للتأرجُح الرنَّان بسبب هبَّات الرياح؛ ومِن ثَمَّ يمكن أن تنكسر أو تُقتلَع بسبب هبوب الرياح المُتواصِل بمعدَّلٍ يقترب من تردُّد الرنين. بالنسبة إلى سيقان الذُّرة، يبلغ هذا التردُّد من ١ إلى ٢ هرتز؛ أي إنه أعلى من تردُّد الأشجار.

(١٣٣) اهتزاز المباني العالية

قد يتسبَّب اصطدام الرياح بمبنًى عالٍ في اهتزاز المبنى، وهو أمر قد يُثير ضِيق سكان المبنى أو حتى غثيانهم. وليس من العملي أو الاقتصادي جعل المبنى أكثر صلابةً لتقليل التمايُل بسبب الرياح. كيف يمكنك أن تُقلِّل الاهتزازات إلى مستوًى مقبول؟

الجواب: إحدى الطُّرق لتقليل الاهتزازات هي وضع جهاز مُزوَّد بكتلة زُنبركية فوق السطح، مع وضع الزُّنبرك بمُحاذاة الاتجاه السائد للرياح. يكون أحد طرفَي الزنبرك مُتَّصِلًا بالسطح، والطرف الآخر مُتصلًا بكتلة يُمكنها التحرُّك عبْر مسار مُوازٍ للزُّنبرك. يتمُّ تعديل

التردُّد الذي تهتزُّ به الكتلة بطبيعة الحال عند طرف الزُّنبرك إلى أن يتوافَق مع التردُّد الذي يتأرجَح به المبنى بشكلٍ طبيعي؛ فعندما يتأرجح المبنى، يتمدَّد الزُّنبرك، مما يتسبَّب في اهتزاز الكتلة بنفس التردُّد. ورغم ذلك، يتأخَّر اهتزاز الكتلة عن اهتزاز المبنى ومِن ثَمَّ يكون الاهتزازان في اتِّجاهَين مُختلفين تمامًا. على سبيل المثال، عندما يتأرجَح المبنى ناحية اليسار، يتأرجَح الحائط ناحية اليمين؛ ومن ثَمَّ ينحو إلى مُوازنة تَمايُل المبنى.

بعض المباني مزوَّدة بمُولِّد ذبذبة زُنبركي مزدوَج، بحيث يُوضَع مُولِّد ذبذبة فوق الكتلة الخاصة بالمولد الزنبركي الأكبر. يتمُّ تعديل ذبذبات المولد الأصغر باستخدام دائرة إلكترونية ترصد اهتزازات المبنى. تُوجَد مبانٍ أخرى مُزوَّدة بمولد ذبذبات مائي حيث تتذبذب المياه من جانبٍ لآخر على نحوٍ غير مُتجانِس مع المبنى. ومن أجل تقليل تمايل بُرجَي بتروناس بكوالالمبور، ماليزيا، وارتفاعهما ١٠١ طابق (٥٠٨ أمتار)، وُضع بندول بكرة تزن ٦٨٠ ألف كيلوجرام عند الطابق الثاني والتسعين.

(١٣٤) الغطس من فوق المنصَّة المُتحرِّكة

في رياضة الغطس من فوق المنصَّة المُتحرِّكة، يُدرك الغاطس المُحترف كيف يؤدِّي القفزة من وضعية العَدْو؛ ففي البداية يأخذ الغاطس ثلاثَ خطوات سريعة على طول المنصَّة ليبدأ اهتزاز المنصَّة ثم يَقفز نحو الطرف المعلَّق في الهواء بحيث يندفع عاليًا في الهواء. يستطيع الغاطس المُستجدُّ أن يُقلِّد تلك الحركة ولكنه يفشل فشلًا ذريعًا في الاندفاع عاليًا ولعلَّه يصطدم في النهاية بالمنصَّة. ما «السر» وراء ارتفاع الغاطس المُحترِف عاليًا؟

الجواب: في المُسابقات تكون منصَّة الوثب بها نقطة ارتكاز على بُعد ثُلث المسافة من الطرف المُثبَّت للمنصَّة. وفي القفزة من وضعية العَدْو، يأخذ الغاطس ثلاث خطواتٍ سريعة على المنصَّة، ويتخطَّى نقطة الارتكاز لكي يجعل الطرف المُعلَّق في الهواء يتَّجِه إلى أسفل. ومع ارتداد المنصَّة مرة أخرى إلى وَضعِها الأفقي، يَقفز الغاطس إلى أعلى نحوَ الطرف المُعلَّق في الهواء. ويتدرَّب الغاطِس المُحترِف على الهبوط على الطرف المُعلَّق في الهواء بحيث تَهتزُّ المنصة هزَّتين ونصف هزَّة أثناء القَفز. وفي مثل هذا التوقيت، يَهبِط الغاطس بينما يتحرَّك الطرف المُعلَّق إلى أسفل بأكبر سُرعة؛ ومن ثَمَّ يؤدِّي الهبوط إلى نزول الطرف المُعلَّق إلى أسفل بقوة، ويجعل الارتداد الغاطس يندفع لأعلى في الهواء.

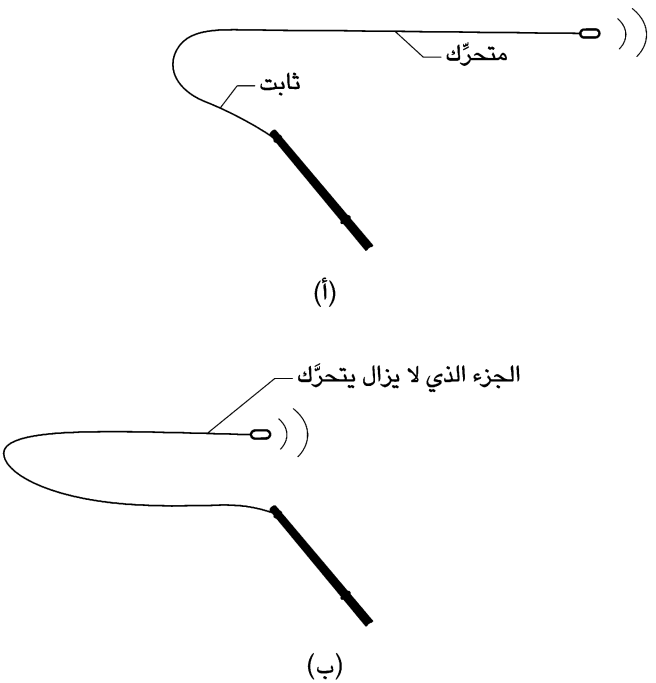
(١٣٥) إلقاء الطُّعْم لصيد السَّمك

إذا ألقيتَ طُعْمًا اصطناعيًّا في الهواء بأقصى قوة لدَيك، فإنه لا يَقطع سوى مسافة قصيرة بسبب مُقاوَمة الهواء. إذن، كيف يُمكنك إلقاء الطُّعم لمسافة كبيرة باستخدام صنارة وبكَرة؟ بالتأكيد، تكون المُهمَّة أصعب لأن الصنارة تُواجِه أيضًا مقاومة الهواء، ورغم ذلك يُتيح هذا الإجراء سرعة كبيرة للطُّعْم.

الجواب: لكي تَرمي الصنارة، عليك أن تَرفع العصا لأعلى وتتخطَّى المستوى الرأسي لتُلقي بالطُّعْم وخيط الصنارة إلى الخلف، ثم تَجذب العصا بقوة إلى الأمام لتَقذف بها إلى الأمام. وتكون قوتك الواقعة على الطُّعْم والصنارة موجودة فعليًّا عند طرف العصا. ولو كنتَ بصدد إلقائهما بيدَيكَ بقوة مُماثِلة، فمِن شأنك أن تَبذُل بعض المجهود وتَمنحهما قدرًا قليلًا من الطاقة الحركية؛ لأنَّ المسافة التي تتحرَّكها يدُك صغيرة. ونظرًا لأنَّ طرف العصا يتحرَّك عبْر مسافة أكبر، فإن الجهد والطاقة اللذين تَمنحُهما إلى الطُّعم والصنارة يكونان أكبر.

وبمجرَّد أن يكون طرف العصا مُوجَّهًا إلى الأمام وثابتًا (شكل ١-٤٧أ)، تزداد طاقة الطُّعم الحركية وسرعته على الرغم من أنك لم تَعُد تبذُل أي جهد. ولكي تُلاحِظ الزيادات، لاحظ أولًا شكل خَيط الصنَّارة (شكل ١-٤٧ب): يمتدُّ الخيط نحوَ الأمام من طرف العَصا، ويتقوَّس لأعلى ونحو الجزء الخَلفي، ثم يَمتدُّ إلى الخلف على نحوٍ أفقي تقريبًا بالنسبة إلى الطُّعم. الجزء الأول ثابِت لأنَّ العصا ثابتة، في حين أنَّ الجزء الأخير يتحرك بالطُّعم. وبينما يتحرَّك الطُّعْم إلى الأمام، يقع الجزء الأكبر من الخَيط في الجزء الثابت؛ ومن ثَمَّ تتركَّز الطاقة الحركية في الطُّعم وفي طول الخيط الذي لا يزال يتحرَّك. وعندما يَصِل الطُّعْم إلى أبعد نقطة أمامية، يَكتسب كل الطاقة الحركية اللازمة ويتحرَّك بسرعة، على نحوٍ أسرع ممَّا لو ألقيتَه بيدك. وإذا كنتَ تُمسك بالخيط على نحوٍ مُتراخٍ حينئذٍ، فإن الطُّعم يسحبُه ومِن ثَمَّ ينتقل لمسافةٍ بعيدة فوق المياه.

تُقيد مقاومة الهواء المسافة التي يَقطعها خيط الصنارة. وهذا هو السبب الذي يَجعل الصيادين يبحثون عن حلقةٍ صغيرة في الخيط بحيث تنتقل الحلقة في قدرٍ أقلَّ من الهواء. كما أنهم يَبحثون أيضًا عن حلقةٍ غير منتظمة الشكل ذات جزء علوي مُشيرٍ إلى الأَمام وجزء سُفلي أقلَّ تقوسًا. وتُنتِج مُقاومة الهواء الواقعة على الجزء السفلي من هذه الحلقة



شكل ١-٤٧: بند ١-١٣٥: صنارة تُقذَف إلى الأمام. (أ) أغلب الخيط يتحرَّك. (ب) قدر أقل من الخيط يَتحرَّك.

رفعة أفقية على الخيط تُتيح رميةً أطول. وهذا الأسلوب يَستخدِمه الصيادُون في مسابقات الصيد بالطُّعم الاصطناعي.

يُؤمن بعض الصيادين بأن انثناء العَصا في الرمية الخلفية التمهيدية هو المصدر الأساسي للطاقة التي يَكتسبها الطُّعم أثناء الرمية الأمامية، ولكن الدِّراسات أثبتَت أن لهذا الأمر مساهمةً ضئيلة. ورغم ذلك، مرونة العصا لها أهمية في تصويب الرَّمية والتعامُل مع السمكة. تُقاس صلابة العصا من خلال وزن الحمولة اللازمة عند طرف العصا لجعلها تنثني بقدرٍ مُعيَّن. وعادةً يَختار الصيَّادون عصًا أصلبَ عند صيد الأسماك الأكبر حجمًا؛ لأنَّهم لا يُريدون العصا أن تنثني. يُقاس تردُّد العصا من خلال المُعدَّل الذي تَهتزُّ به عندما

يُثبت الطرف المُستهدَف في المكان ويحيد الرأس في البداية بقدْرٍ ضئيل ثم يَنطلِق. إن العِصيَّ ذات التردُّد العالي، التي تُوصَف بـ «الرشاقة»، عادةً ما تكون مفضَّلة في الرميات الطويلة. وتُقدِّم العِصيُّ ذات التردُّد المُنخفِض تَحكُّمًا أكبر وتُستخدَم في وضع الطُّعْم بدقَّة في المكان المراد.

(١٣٦) معركة جزر فوكلاند، مدفع بيج بيرثا

في أثناء الحرب العالمية الأولى، اشتبَكَت القوات البحرية البريطانية بالقوات البحرية الألمانية في معركة بالقُرب من جزر فوكلاند، التي تقع على دائرة عرض ٥٠ درجة جنوبًا. وعلى الرغم من أنَّ الطلقات البريطانية كانت مُسدَّدة بدقَّة، فإنها كانت تَستقِرُّ على نحوٍ غامِض على بُعد مئات الأمتار يسار الأهداف. هل كانت أجهزة التصويب مُعطَّلة عن العمل؟ كلا، لا تبدو كذلك؛ لأنها كانت مُصنَّعة بدقَّة في إنجلترا. إذن، ما العَيب؟

في أثناء القصف الألماني لباريس في تلك الحرب، قصَف مدفعٌ ثقيل — لُقِّب باسم «بيج بيرثا» — قنابل على المدينة من مسافة ١١٠ كيلومترات. ولولا أنَّ الألمان وضعوا في الحُسبان المبادئ العِلمية، لأخفقوا في تسديد ضرباتهم إلى الهدَف بمسافة كيلومترين تقريبًا.

عندما شرَع الألمان في فحْص المدفع البعيد المدى، تفاجئوا باكتشاف أنه إذا قُذِفَت القنبلة بزاوية كبيرة، أكبر من ٤٥ درجة، فإنها تَنطلِق لمسافة أبعد كثيرًا، ربما الضعف، ممَّا لو أُطلقت بزاوية ٤٥ درجة. مع الوضع في الاعتبار أنه في الكثير من المواقف الشائعة تُنتج زاوية الإطلاق التي تساوي ٤٥ درجة أقصى مدًى للضربة، لماذا كانت القنابل تنطلق لمسافةٍ أكبر عند إطلاقها بزاوية أكبر؟

الجواب: نحن عادةً ما نَبتكِر قوةً وهمية، تُسمَّى تأثير كوريوليس، لتبرير الانحراف الظاهري لقنبلة طويلة المدى بسبب دوَران الكرة الأرضية خلال رحلة قصف القنبلة. يكون الانحراف الظاهري نحوَ اليمين في نصف الكرة الشمالي ونحو اليسار في نصف الكرة الجنوبي، ويكون أكبر عند دوائر العرض الأكبر ويُساوي صفرًا عند خط الاستواء.

وعندما تُقصف قنبلة بعيدة المدى، فإنها لا تكتسب السرعة فقط بسبب القصف وإنما يكون قدْر مُعيَّن من السرعة بسبب دوَران الكرة الأرضية عند موقع القصف. وفي أثناء رحلة القنبلة في الهواء، يُواصل الهدف الدوَران حول محور الكرة الأرضية بسبب الدوَران. وإذا لم تُوضَع حركة الهدف في الحسبان، فإنَّ القنبلة تُخطئ الهدف. على سبيل المثال، في نصف الكرة الأرضية الشمالي، هَبْ أن الهدف يُوجد إلى شَمال موقع قصف القنبلة. فإن

كلًّا من الهدف وموقع القصف يدُوران نحو الشرق حول محور الكرة الأرضية، إلَّا أن الهدف، نظرًا لوجوده عند دائرة عرض أكبر، يتبع دائرة أصغر ممَّا يَتبعُها موقع القصف. ونظرًا لأنَّ كلا المَوقعَين لا بدَّ أن يَستكمِلا دائرة كاملة خلال يوم، يتحرَّك الهدف على نحوٍ أبطأ من مَوقع القصْف. وعندما تقصف القنبلة نحو الشمال، فإنها تَنطلِق أيضًا بنفس السرعة نحو الشرق مثلَما يَحدُث مع مَوقِع القصْف. وفي أثناء رحلتها في الهواء، تَنتقِل نحو الشرق على نحوٍ أسرع من الهدف؛ ومن ثَمَّ تَنتهي بها الحال شرق الهدف. ومن منظور شخص موجود في موقع القصف، تَنحرِف القنبلة نحوَ الشرق، بمعنى أنها تَنحرِف نحوَ يمين الهدف.

يضبط جنود المدفعية مقدار الانحراف من خلال التجربة والخطأ، إلَّا أن ضبط جهاز تصويب المدفعية يعتمِد على دوائر العرض ويكون اتجاهه في نصف الكرة الأرضية الشمالي مُعاكِسًا لاتجاهه في نصف الكرة الجنوبي. كانت المدفعية الإنجليزية مضبوطة بدقَّة وَفق دائرة عرض إنجلترا، ولكنها للأسف خاطئة بالنسبة إلى دائرة عرض جنوبي جزر فوكلاند. وبالنسبة إلى الرحلة الطويلة لانطلاق القنابل من مدفع بيج بيرثا، كان الألمان على درايةٍ بضرورة تصحيح الانحراف الناجم عن تأثير كوليوليس؛ بمعنى أنه في أثناء رحلة انطلاق القنبلة في الجو، كانت باريس تتحرَّك.

عندما قصَفَ الألمان قنابل طويلة المدى بزاويةٍ أكبر من ٤٥ درجة، انتقلت القنابل عبر الامتدادات الرقيقة للغِلاف الجوي، مما قلَّل مقاومة الهواء الواقعة عليها؛ ومِن ثَمَّ قطعت القنابل مسافة أبعد على نحوٍ مُذهل.

(١٣٧) جاك وشجرة الفاصوليا المتَّجهة إلى الفضاء

هل تُوجَد أيُّ طريقة لوضع قمرٍ صناعي في مداره ثم إسقاط حبل منه إلى الأرض لكي يُمكن رفع لوازم ضرورية إلى القمَر الصناعي؟ هل تُوجَد أيُّ طريقة يُمكن بها تَحريك القمر الصناعي بعيدًا ثم إبقاء الحبل المقطوع في مكانه؟ (ربما يكون لدَيك الآن «شجرة فاصوليا» ولكن ليس لدَيك عملاق.)

الجواب: إذا كان القمر الصناعي عند مدار استوائي وعند دائرة العرض المناسبة بحيث يدور حول الكرة الأرضية بنفس سُرعة دوران الكرة الأرضية حول ذاتها، يُمكِنُنا من الناحية النظرية إذن إسقاط حبلٍ إلى الأرض وتنصيب نظامِ مَصاعِد مُلحَق به. إذا كان القمر الصناعي أعلى، فإنَّ قوة الطرد المركزية الفعَّالة الواقعة عليه ستَسحَبُ الحبل،

وحينئذٍ سيكون هذا الترتيب أشبَهَ بـ «خُطاف الرفع» الذي يُمكنه أن يرفع لوازم ضرورية عن طريق حبل دون الحاجة إلى نظام مَصاعد. وربما يُترك حبل متين خفيف الوزن مُعلَّق في الهواء مثل القصة الخيالية لشجرة الفاصوليا، إذا تعادلت قوة الطرْد المركزي الفعَّالة مع وزن الحبل، إلَّا أن الحسابات أظهرت أنه سيتعيَّن أن يبلغ طول الحبل ١٤٣ مليون متر، وهو طول مُبالَغ فيه بعض الشيء.

إذا كان القمر الصناعي موجودًا في مدار يَترك الطرف السُّفلي للحبل يحفُّ سطح الكرة الأرضية، وإذا كان الحبل مَرِنًا، فإنه بذلك قد يُوفِّر وسيلة نقل شِبهَ مجانية. يُمكن ربط مقصورة ركَّاب في الطرف السُّفلي من الحبل، وبينما يتمدَّد الحبل بسبب قوة الجذب الصادرة عن القمر الصناعي، فإنَّ المقصورة ستَقفِز في الغلاف الجوي ثم تهبط مرة أخرى بعد قطع مسافة بعيدة. وعلى الرغم من أنه في أثناء الصعود، جذب المقصورة مقابل القمر الصناعي قد يُقلِّل طاقة القمر الصناعي، فستعود أغلب الطاقة أثناء النزول حين تجذب المقصورة القمر الصناعي على طول مداره. ومن أجل إتاحة فقدان الطاقة الحَتمي، قد يُزوَّد القمر الصناعي بصاروخ صغير.

(١٣٨) الاعتدال الربيعي وإيقاف البَيض على أطرافه

حاول أن تَجعل صفًّا من البيض يقِف على أطرافه. تُفيد الاحتمالات بأنه سيَسقط على الفور. هل لدَيك فرصة أفضل لجعل البيض يَقف على أطرافه أثناء يوم الاعتدال الربيعي كما يعتقد البعض؟

الجواب: لفهم الاعتدال الربيعي، تخيَّل سطحًا يمتدُّ عبْر خط الاستواء وصولًا إلى الشمس. تخيَّل أيضًا أنَّ الشمس تدور حول الكرة الأرضية، بدلًا من العكس. وفي هذا الترتيب المُفترَض، يكون مدار الشمس مائلًا بالنسبة إلى السطح المُمتد، وتمرُّ الشمس عبْر السطح مرَّتَين في العام. في أحد هذَين اليومَين، يَحدُث الاعتدال الربيعي. ووفقًا للشائعات، فإنَّ الجاذبية الواقعة على الأرض من الشمس والواقعة على الأشياء الموجودة على سطح الكرة الأرضية، لا سيما البيضة، تكون مُختلفةً بعض الشيء في ذلك اليوم. وهذه الشائعات غير صحيحة تمامًا.

إذن، لماذا استمرَّت الشائعات حتى يومِنا هذا؟ ربما يعود أحد الأسباب إلى أن عددًا قليلًا من الأشخاص يَبذلون جهودًا مُتضافِرة في يوم الاعتدال الربيعي، في ذلك اليوم بالذات، لإيقاف البيض على أطرافه. (ولا بدَّ أن هؤلاء الأشخاص يَشعرون بالملل الذي

يدفعهم للقيام بذلك.) وإذا حقَّقُوا نجاحًا مُتواضِعًا في ذلك اليوم، حينئذٍ يدَّعون أنَّ هناك شيئًا مميزًا بخصوص الجاذبية الأرضية في ذلك اليوم. ولو أن الفكرة صحيحة، ستشعُر بالفارق بكلِّ تأكيد؛ فكُتلتك أكبر من كتلة البيضة؛ ومن ثَمَّ ينبغي أن تشعُر بالجذب المُستقرِّ من الشمس أكثر بكثير من البيضة. وغنيٌّ عن القول أنك لن تَشعُر بالفارق في يوم الاعتدال الربيعي وعلى الأرجح لن تعرِفَ حين يمرُّ عليك هذا اليوم.

وإذا وجدتَ بيضةً تقف على طرفها، فعلى الأرجح ستجد أن طرفها مسطَّح قليلًا، على الرغم من أن ذلك قد يكون عند منطقة صغيرة. وفيما يلي طريقة خادِعة لإيقاف أيِّ بيضة على طرفها: اصنَع كومة صغيرة من الملح، واضغَط برفقٍ الطرف الحادِّ للبَيضة لأسفل فوق الكومة، اضبط وضعَ البيضة بحيث تكون مُنتصبة، ثم انفخ الملح بحذَر بعيدًا عن البيضة. فبلُّورات الملح القليلة المُتبقيَّة تَنحسِر بين البيضة والطاوِلة وتُوفِّر الدعم الكافي للحفاظ على البيضة في وَضعيَّةٍ مُنتصِبة. ربما لا يرى الشخص الذي يَجهل ما قمتَ به توًّا بلورات الملح المُتبقِّية؛ ولعلَّك تعزو انتصاب البيضة إلى دَفقٍ مُتزايدٍ للأشعة الكونية مثلًا (ولِمَ لا؟ فالأمر منطقي تمامًا مثل عزو وَقفِ النموِّ إلى الاعتدال الربيعي). يُمكنك أيضًا أن تتحايَل على الأمر من خلال تسوية طرَف البيضة باستخدام ورق السنفرة.

إليك طريقة أخرى تُؤتي ثمارها أحيانًا. رُجَّ البيضة لكي تُمزِّق الغشاء المُحيط بالصفار. ثم أمسك البيضة في وضعٍ عمودي على الطاولة لبضع دقائق لتُتيح للصفار أن يستقرَّ عند القاع؛ ومِن ثَمَّ تخفض مركز كتلة البيضة. حينئذٍ ربما تُواصل البيضة المُثقلة عند الطرف الوقوف منتصبةً حين تتركها.

يبدو أن عادةَ إيقاف البيض على أطرافه في أول يومٍ من فصل الربيع بدأت في الصين قبل آلاف السنين. ومنذ ذلك الحين، يتمُّ إيقاف عددٍ لا حصر له من البيض في ذلك اليوم بالذات. ولعلك تظنُّ أنَّ هذا النجاح يُثبت أنَّ هذا اليوم استثنائي. حسنًا، الأمر ليس كذلك؛ فاليوم الأول من فصل الربيع في التقويم الصيني يأتي قبل يوم الاعتدال الربيعي بتسعين يومًا.

(١٣٩) تأثير القمر

يؤمن أغلب الناس أن عدد المواليد وحوادث السيارات وحالات دخول غُرفة الطوارئ بالمُستشفيات والأعمال العدوانية وعددًا كبيرًا من الأنشطة الإنسانية الأخرى يَزداد عند

اكتمال القمر. كيف يُمكن للقمر أن يُحدِث هذا التأثير الجنوني؟ هل سبب هذا التأثير هو قوَّة الجاذبية الخاصَّة بالقمر، أم هو تأثير نفسي؟ أم أنه لا وجود له من الأساس؟

الجواب: هل يُمكن للجاذبية أن تكون هي السبب؟ كلَّا، قوة الجاذبية الواقِعة عليك بسبب القمر صغيرة بشكلٍ غير ملحوظ. ولو كانت ملحوظة بدرجة كبيرة، لشعرتَ حينها بتأثير القمر حين يَرتفِع البدْر في السماء؛ ومِن ثَمَّ تكون أقرب بعض الشيء منه؛ ممَّا يتسبَّب في زيادة قوة الجاذبية الواقعة عليك بسبب القمر. هل تشعُر بأنك أخفُّ مع صعود القمر في كبد السماء؟ بالطبع لا.

هل يُمكن أن يكون تأثير المدِّ والجزر الناتج عن الجاذبية هو السبب؟ بالتأكيد للقمر تأثير ملحوظ ويَسهُل رؤيته على المُحيطات، ويتسبَّب في حدوث المدِّ والجزر. هل يَستجيب الناس إلى التأثير نفسه؟ كلا، يُعزى المدُّ والجزر إلى تفاوت قوَّة الجاذبية للقمر (والشمس) عبْر جميع أنحاء الكرة الأرضية. وهذا التفاوُت على مساحة شاسعة يُسفِر عن تجميع المياه. وأثناء دوَران الكرة الأرضية، تدور بعض مناطق المُحيطات عبْر هذا التجميع ويَحدُث عندها مدٌّ وجزر. وتفاوُت تأثير قوة جاذبية القمر على عرض الشخص (أو طوله) هو تفاوت ضئيل للغاية؛ بحيث لا يُسفِر عن أي تأثير مُشابِهٍ للمدِّ والجزر. من ثَمَّ هذه أيضًا ليست الإجابة.

ولكن لماذا نضع الجاذبية في الحسبان؟ فالقمر البدْر يعني أن وجه القمر الكامل (من منظورنا) تُنيره الشمس. وامتداد هذه الإنارة لا يُؤثِّر بأيِّ حال من الأحوال على قوة الجاذبية الواقِعة علينا بسبب القمر. ومن ثَمَّ قد يَعتقِد المرء أن تأثير القمر هو تأثير نفسي؛ بمعنى أن الناس يَهتاجون بشكلٍ أو آخر بسبب الإضاءة الزائدة في المساء، حتَّى وإن كانوا يَعيشون في مدينة ساطعة الإضاءة أو لا يَخرُجون في المساء.

للأسف، إذا سجَّلتَ أرقام المواليد أو حوادث السيارات أو حالات دخول غرفة الطوارئ في المُستشفيات أو الأعمال العدوانية أو أي نشاط إنساني آخر حسب أطوار القمر، فلن تجد أيَّ مُبالغة عند اكتمال القمر. وتأثير القمر ما هو إلَّا أسطورة، حتَّى في أوساط العاملين بقطاع الصحَّة الذين يَجدُر بهم أن يَعرِفوا الحقيقة أكثر من غيرهم.

(١٤٠) تل الجاذبية

تَنتشِر حول العالم أماكن تبدو فيها الجاذبية وكأنها تَسحب السيارة على مُنحدَر أحد التِّلال صعودًا. أحد هذه الأماكن يقع على حدود مدينة منتور بولاية أوهايو. فعندما أُوقِف

سيارتي عند سَفح التل دون تعشيق ناقل الحركة، تبدأ السيارة في إبطاء حركتها تدريجيًّا حتى تتوقَّف ثم تبدأ في الاتجاه نحوَ قمَّة التل. هل يُمكِن للجاذبية أن تجذب السيارة إلى أعلى في مثل هذه الأماكن؟ (إذا زُرتَ واحدًا من هذه التلال، كن حذرًا للغاية كي لا تَصطدِم بك سيارة أخرى؛ فالسائق لن يتوقَّع وجود سيارة متوقِّفة أو تتحرَّك ببطء.)

الجواب: هذا التأثير خادِع، إلَّا أنه قد يكون مُقنعًا للغاية لدرجة أن تتحوَّل التجربة إلى تجربة مُثيرة للأعصاب. (عندما صادفت هذا التأثير الخادع لأول مرة بالقُرب من مدينة منتور، كانت إحدى بناتي، التي كانت حينها طفلة، معي في السيارة. وعلى الرغم من أنها كانت تعرف القليل عن الجاذبية، فإنها كانت تَعرف ما يكفي لتَنفجِر في البكاء أثناء صعود السيارة التل.) إذا مددتَ بصركَ على سطح الطريق، يَختفي التأثير الخادع وسترى المُنحدَرات الحقيقية للطريق. ولعلَّك تكتشف أنه يُوجَد انخفاض بسيط في مُنحدَر التل. (احترس من السيارات الأخرى.) فعندما تسير السيارة إلى الخلف ونحوَ القمَّة، فإنها تسير نحو الانخفاض. وعندما تجلس في السيارة، يكون الانخفاض غير ملحوظ ويكون التأثير الخادع لصعود التل قويًّا. وإذا كانت الأشجار على جانبَي الطريق مائلةً بشكلٍ مناسب، فإنها قد تُعزِّز هذا التأثير الخادع.

أحيانًا يرجع التأثير الخادع بوجود مَيلٍ كاذب إلى وجود مَيلٍ أكثر حدَّة للطريق قبل وبعد الجزئية التي يظهر فيها التأثير. في أحد الأمثلة، إذا كان الجزء القريب والبَعيد مِن الطريق مُنحدِرَين بشدَّة والجزء الأوسط مُنحدِرًا على نحوٍ مُعتدِل وحسب، قد يبدو الجزء الأوسط وكأنه يصعد أعلى التل. قد يُؤثر المستوى الأفقي أيضًا على إدراكِك للمَيل؛ على سبيل المثال، تخيَّل طريقًا أفقيًّا يَنعطِف نحو اليسار عند سفْح التل مباشرة والذي يُخفي الأفق الحقيقي من ورائه. يتكوَّن لدَيك الانطباع بأن الطريق يَقترب من التل، وينعطف إلى أسفل؛ لأنَّ الأفق الظاهر يكون عند قمَّة التل؛ ومن ثَمَّ يكون عاليًا.

(١٤١) السقوط عبْر مركز الأرض

تخيَّل ثقبًا يمتدُّ عبْر محور دوَران الكرة الأرضية من أحد القُطبَين إلى القطب الآخر. لو قُدِّرَ لك السقوط داخل هذا الثُّقب، كم ستَستغرِق حتى تَصِل إلى الجهة المقابلة، وإذا لم تجد مَهربًا بطريقة أو أخرى، ما الذي سيَحدُث لك؟ هل ستكون الأمور مختلفة بأيِّ حالٍ من الأحوال إذا كان الثُّقب يمرُّ عبْر الكرة الأرضية من موضعٍ آخر؟

اقتُرحت نسخة أقصر من هذا النفق للتنقُّل عبْر المناطق التي تتَّسِم بالكثافة المرورية، كما هي الحال بين مدينة نيويورك وواشنطن العاصمة. كان مِن المُقرَّر حفْر نفَقٍ مُباشِر بين المدينتَين ووضع مسارٍ للسكك الحديدية. وعندما يَنطلِق قطار على طرف مسار السكة الحديدية، فإنه لا يكاد يَستلزِم أيَّ طاقةٍ من المُحرِّك ليَصل إلى الطرف المقابل من المسار. ما الذي يَدفعه، وكم تَستغرِق الرحلة؟

في رواية «من القطب إلى القطب»، وهي مِن أوائل روايات الخيال العلمي للروائي جورج جريفيث، حاول ثلاثة أشخاص القيام برحلة عبْر الكرة الأرضية من خلال حفرة طبيعية (خيالية بالطبع) تمتدُّ بين القُطبَين الشمالي والجنوبي. وابتداءً من عند القطب الجنوبي، هبطَت كبسولتهم أولًا نحوَ مركز الأرض بينما أبطأتها بالونات تَمتلِئ بالهليوم أو الهيدروجين. وحسب سَير أحداث القصة، صارت قوة الجاذبية الواقعة على المُسافرين كبيرة على نحو مُفزِع أثناء اقترابهم من مركز الأرض، وعند المركز تحديدًا، تَختفي قوَّة الجاذبية بشكلٍ مؤقَّت.

ثم جاء الصعود نحوَ القطب الشمالي أبطأ ممَّا هو مُتوقَّع، واستخدموا البالونات مرةً أخرى لَيَرتفِعُوا؛ إلَّا أن حسابات العالم الموجود على متْن الكبسولة كشفَت عن أنَّ الكبسولة لن تصِلَ إلَّا لارتفاع مُعيَّن وحسْب وسيكون هناك توقُّف تدريجي، مما يَتسبَّب في وضع الركاب في حالة حصار، وحتى التخلُّص من الماكينات الثقيلة يَفشل في تخفيف الحمل بالدرجة الكافية. ومِن فرْط شعوره باليأس، انحنى العالم بنفسه عبْر كوَّة سُفلية، وتشبَّث بيدَيه لفترةٍ وجيزة، ثم سقَط بعيدًا عن الكبسولة. وكان فقْد كُتلته كافيًا لجعل الكبسولة تصل إلى نهاية النَّفق حيث فرَّ الراكبان الآخران. (عادةً ما يُضحِّي العلماء بأنفسهم لصالح الآخرين.) هل القصة منطقية؟

الجواب: هَبْ أنك سقطتَ داخل ممرٍّ يَربط مباشرة بين القُطبَين. جمِّد الصورة بعد أن تسقط لمسافة نصف قُطرٍ مُعيَّنة من المركز. تخيَّل كرة لها نصف القُطر نفسه ومركزها هو مركز الأرض. الكتلة الموجودة داخل الكرة تَسحبُك ولكن الكتلة خارجها لا تفعل؛ لأنه في مقابل السَّحب إلى الخارج من الجزء الخارجي لجانب الأرض، يُوجَد سحب داخلي مُماثِل من الجزء الخارجي الآخر للجِهة المقابلة من الأرض.

الآن، واصِل السقوط. بينما تَقترِب من المركز، يقلُّ نصف القُطر الخاص بمَوقِعك وحجم الكُتلة المُتبقِّية والمحصورة في الكرة؛ ومِن ثَمَّ تقلُّ أيضًا قوة الجاذبية الواقعة عليك. وعندما تمرُّ عبْر المركز، تُساوي الجاذبية صفرًا بشكل مؤقَّت. والصعود عبْر باقي المَمرِّ

هو عكس الهبوط. وبافتراض تَوافُر الظروف المِثالية، مثل غياب مقاومة الهواء والمسافة المُتساوية بين الصعود والهبوط والفكرة الإعجازية المُتمثِّلة في قدرتك على تحمُّل الحرارة والظروف الفتَّاكة الأخرى الموجودة في مركز الأرض، ستتوقَّف عند وصولك إلى الفتحة الموجودة عند نهاية طريق الصعود.

ويُقَدَّر الوقت المُستغرق لقطع الممرِّ كاملًا بـ ٤٢ دقيقة تقريبًا. (وتفترض هذه النتيجة أنَّ كثافة الأرض مُتجانسة. وإذا كان اللبُّ أكثر كثافةً من باقي الأرض، يكون الوقت أقل بمقدار عدَّة دقائق.) وإذا لم تجِد مَخرجًا، فلسوف تقطع الممرَّ ذهابًا وإيابًا إلى الأبد.

ولو كان الممرُّ موجودًا في مكانٍ آخر، فلا بدَّ أن يكون مائلًا لو أردتَ تفادي التصادم بجانبَي الممر. تتمثَّل المشكلة في أنك تبدأ الهبوط بسرعة الدوران التي تحظى بها الأرض عند فتحة الممر. وبينما تسقط نحوَ المركز، تمرُّ على أجزاء ذات سرعة دوران أقل وستَصطدِم بجانب الممر.

يكون الممر الرابط بين مدينتَين أقربَ إلى مركز الأرض عند المنتصف. سيهبط القطار في النصف الأول من مسار السكك الحديدية ثم يَصعد النصف الثاني. ولن تكون هناك حاجة إلى طاقة إضافية إلَّا من أجل التغلُّب على الاحتكاك ومقاومة الهواء. ستَستغرِق الرحلة ٤٢ دقيقة، كما هي الحال مع الممر الرابط بين القُطبَين.

سأترك التفاصيل الخاصَّة بقصَّة الخيال العلمي لتحليلك أنت.

(١٤٢) تمدُّد أكياس التسوُّق البلاستيكية

عندما تملأ كيس تسوُّق بلاستيكيًّا بلوازم البقالة ثم تَحمل الكيس من عند الفتحتَين الموجودتَين في الجزء العلوي من الكيس، لماذا تَصمد الفتحتان أمام الحمولة، وبعد مرور بضع دقائق، يبدأ الكيس في التمدُّد، ربما ليصِل إلى حدِّ التمزُّق؟

الجواب: إذا علَّقْتَ حمولةً في الطرف السُّفلي لزُنبرك يتدلَّى من السقف، فسيتمدَّد الزُّنبرك بدرجةٍ مُعيَّنة ثم يبقى مُتمدِّدًا. أما البلاستيك، الذي يحتوي على البوليمرات، فهو مختلف. وإذا علقت حمولة من الجزء السُّفلي لكيس بلاستيكي، فسيتمدَّد الكيس في البداية مثلما يحدُث مع الزنبرك ولكن بعد ذلك سيتمدَّد أكثر بالتدريج فيما يُطلق عليه اسم «زحف المرونة اللزِجة». وقد تختلف آلية الزحف هذه من بوليمر إلى آخر، لكن إليك التفسير المُبسَّط: يتكوَّن البوليمر من عدَّة جزيئات طويلة ومُتشابِكة، وهي أشبَهُ بكَومة من شرائط المكرونة الاسباجيتي. وعندما يُوضَع البوليمر تحت ضغْط، تَنفكُّ هذه

الجزيئات تدريجيًّا لأنها تُسحَب في اتجاه الحمولة. وإعادة توجيه الجزيئات تدريجيًّا يجعل البلاستيك يتمدَّد تدريجيًّا. وإذا تمدَّد البلاستيك بالدرجة الكافية، فإنه قد يَضيق عموديًّا على اتجاه الحمولة وهو ما يُطلق عليه «التعنُّق». ويُمكنك أن تُلاحظ بسهولة تعنُّق الحاوية البلاستيكية لصندوق المشروبات. مزِّقِ الحاوية البلاستيكية من على المشروبات ثم اجذِبها بيدِك في الاتجاه المُعاكس حتى تَضيق كالعُنق.

(١٤٣) ممرُّ العمالقة وأعمدة النشا

ممرُّ العمالقة بأيرلندا الشمالية عبارة عن طبقة من الحمم البركانية (البازلت) ويتكوَّن الآن من أعمدة بازلتيَّة ذات ارتفاعات مُختلفة. الأعمدة مُذهِلة لأنها تبدو من مقطع عرضي مُتعدِّدةَ الأضلاع، والكثير منه مسدَّس الأضلاع. كيف يُمكن لحمم بركانية، كانت مائعة فيما مضى، أن تتشكَّل على هيئة أعمدة رأسية مُتعدِّدة الأضلاع؟ يُمكِنُك أن تصنع أعمدة مُشابهة بخليطٍ من المياه ونِشا الذُّرة المُجفَّف بمصباح حراري.

الجواب: بينما تبرد الحِمَم البركانية تدريجيًّا، تنشأ شقوق (تصدُّعات) في أماكن عشوائية عند السطح العلوي ثم تمتدُّ لتصل إلى جسم الحِمَم البركانية. تحدُث الشقوق لأنه عندما تبرُد الحِمَم البركانية، فإنها تَنحو إلى الانكماش، وهو ما يضع الحِمَم البركانية تحت «ضغط» (النزوع إلى التمزُّق). عندما يكون الضغط كبيرًا للغاية لدرَجة أنَّهُ يتجاوَز قوَّة الحِمَم البركانية، تَنقسِم الحمم البركانية إلى صدوع؛ مما يُقلِّل حدَّة الضغط. وأينما يحدُث تمدُّد لصدع مُتنامٍ نحوَ صدْعٍ موجود بالفعل، فإن الضغط الواقع على الصَّدْع الموجود يُوجِّه الصدع المُتنامي ليُحدِث تقاطُعًا مُتعامدًا.

بعد هذه المرحلة الأولى من تكوين الصَّدع، يَنشأ تكوين ثانوي من الشقوق داخل الحمم البركانية. وقد يبدأ كلُّ شقٍّ من هذه الشقوق في خطٍّ مُستقيم ولكن أثناء توغُّل الشقوق في جسم الحِمَم البركانية، فإنها تَنحو إلى الانشقاق (أو «التشعُّب»). واستنادًا إلى المُعدَّل الذي تبرُد به الحِمَم البركانية، يُسبِّب تقاطُع الشقوق الثانوية مع شقوق المرحلة الأولى تفسُّخ الحِمَم البركانية إلى أعمدة خماسية أو سداسية الأضلاع.

يُمكنك أن تُلاحِظ شقوق مرحلة أولى وشقوق ثانوية مُشابهة في مواقف كثيرة، مثل طبقات الطين الجاف. يُمكنك أيضًا أن تتأمَّل تكوُّن الشقوق في تجربة مُحكَمة باستخدام خليطٍ من المياه ونشا الذُّرة. وبينما تنتشر (تتغلغل) المياه عبْر المزيج ثم تتبخَّر، يشرع الخليط في الانكماش ومِن ثَمَّ يتعرَّض للضغط وينحو إلى تكوين شقوق. واستنادًا إلى

المُعدَّل الذي تتبخر به المياه، يُمكن أن ينتُج عن الشقوق الثانوية أعمدة من نشا الذُّرة ذات أشكالٍ خماسية وسداسية الأضلاع.

(١٤٤) الأظافر المكسورة

إذا كُسِر ظُفرك، فلماذا ينحو الكسر إلى الانحراف يسارًا أو يَمينًا بعَرض الظُّفر بدلًا من التوغُّل على طول الظفر؟

الجواب: بعد أن يُكسَر ظُفرك من عند الطرف العلوي، يَميل الشقُّ نحوَ الاتجاه الذي يتطلَّب أقلَّ قدرٍ من الطاقة لفصل الخلايا بعضها عن بعض. يتكوَّن الظفر من ثلاث طبقات؛ الطبقة السفلية وهي عبارة عن كرياتين صُلب بعض الشيء، والطبقة الوسطى الأغلَظ وهي عبارة عن كرياتين أصلب، والطبقة العلوية وهي عبارة عن كرياتين أطرى. تتحدَّد قوة الظفر بدرجة كبيرة من خلال الطبقة الوسطى، التي تتكوَّن من خلايا طوليَّة ضيِّقة تمتدُّ يسارًا ويمينًا عبْر الظفر. يَستلزم فصل صفَّين من هذه الخلايا أحدهما عن الآخر طاقةً أقل (حوالي النصف تقريبًا) مُقارنة بكسر عدَّة صفوف من هذه الخلايا. ومِن ثَمَّ ينحو الشقُّ إلى الانحراف يَمينًا أو يسارًا بدلًا من التوغُّل بطول الظفر.

(١٤٥) تجعيد الورق على هيئة كُرة

خُذ قطعة ورق وجعِّدها بين يدَيك، واضغطها على هيئة كرة. سرعان ما تَصِل إلى نقطة لا يُمكنك عندها عصر الكرة أكثر. ورغم ذلك فإنَّ نسبة ٧٥٪ من الكرة عبارة عن هواء؛ فما الذي يعُوقك عن ضغط الكرة أكثر؟

الجواب: عندما تُجعِّد الورقة، فأنت تصنع «نتوءات مُنحنية» (ثنايا) ونقاطًا مخروطية (قِمَمًا). ويتطلَّب الأمر منك طاقة لإعادة ترتيب ألياف الورق في هذه التشكيلات الجديدة، وكذلك يتطلَّب منك بذْل قوة للتغلُّب على الاحتكاك بين الألياف وبين قِطَع الورق التي يحتكُّ بعضها ببعض. إليك طريقة أخرى لتفسير الأمر كله: تُختزَن الطاقة في الأماكن التي يُضغَط فيها الورق، وإذا قُمتَ بفرْد الورقة، يمكنك أن ترى الخطوط والأجزاء التي حدَث فيها تشوُّه دائم بسبب الضغط.

من أجل اعتصار كرة مُجعَّدة بدرجة أكبر، عليك أن تَعتصِر النتوء الموجودة وكذلك تصنع نتوءات جديدة؛ ممَّا يَستلزِم منك المزيد من الطاقة. وتصير الآن عملية إعادة ترتيب

الألياف أكثر صعوبة. وفي النهاية، تصِل إلى مرحلة يتطلَّب فيها المزيد من الاعتصار قدرًا من الطاقة والقوَّة أكبر مما يُمكنك تقديمه. ولو صادف أنك وضعتَ الكرة تحت حمولة ثقيلة، ستَنهار تدريجيًّا في غضون الأسابيع القليلة التالية أو حتى السنوات القليلة القادمة؛ فالألياف تتحرَّك تدريجيًّا في «انسِياب لَدِن» كما لو أنها داخل بلاستيك ساخن مائع بعض الشيء.

(١٤٦) الخدعة وراء المُتفجِّرات المأساوية

ذات يومٍ مرَّ آر في جونز، الأستاذ بجامعة أبردين، على دورق مياه خارج أحد المعامل بمدينة أكسفورد وهو يَحمِل مُسدَّسًا. وبغرَض التسلية، أطلق النار على الدَّورق، مُتوقعًا أن يتناثَرَ في كومة من الشظايا كما ينبغي أن تكون الحال عند إطلاق رصاصة على الدَّورق. وبدلًا من ذلك، اختفى الدَّورق تمامًا. وقد ألقى محاضرة عن السَّبب في وقتٍ لاحِق.

وبعد مرور سنوات، عزَم سلاح المهندسين المَلكيِّين بأبردين على إسقاط مدخنةٍ صناعية طويلة باستخدام قوانين الفيزياء التي جاءت في مُحاضرة آر في جونز. ومِن ثَمَّ، وضعوا عبوةً متفجِّرة داخل الجزء السُّفلي من المدخنة المَبنيَّة بالقرميد ثم مَلئوا المدخنة بالمياه لارتفاع مِترَين. وتوقَّعوا أن الانفجار من شأنه أن ينسِفَ الأساس ويُساوي المدخنة بالأرض. حسنًا، كانوا مُحقِّين جزئيًّا؛ إذ انفجر الجزء السفلي — بمسافة مِترَين — من المدخنة، ولكن على نحوٍ مُرتَّب للغاية لدرجة أنَّ باقي المدخَنة سقط بعناية وثبات على بقايا الأساس القديمة. عندئذٍ واجه المُهندِسون مشكلةً أسوأ بين أيديهم.

لماذا نُسِفَ الدورق والمتران السُّفليان من المدخنة تمامًا؟

تُظهر مجموعة من الصور المُدهِشة — بعض الصور الوامِضة المُبكِّرة التي التقطها «دكتور» إدجيرتون من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا — استجابة مِصباح عادي لاختراق رصاصة له. عندما تَخترق رصاصة بُصَيلة المصباح الكهربائي، فإنها تُحوِّل الزجاج عند نقطة الاختراق إلى مسحوق ويَندفِعُ جزء من المسحوق نحوَ السلاح مرة أخرى. ألا يَنبغي أن تستلزم اعتبارات القوة والزَّخم أن يُرسَل المسحوق في الاتجاه الذي تسلكه الرصاصة وحدَه؟

عندما اغتيل الرئيس جون كينيدي، تناثَرت بعض أجزاءٍ من دماغه إلى الجزء الخلفي من سيَّارته في اتِّجاه لي هارفي أوزوالد، الذي يظنُّ أغلب المُحقِّقين أنه من أطلق الرصاصة القاتلة. ورغم ذلك، يظنُّ بعض المُحقِّقين أنَّ تناثُر أجزاء من الدماغ نحو الخلف هو في

الحقيقة دليل على أن ثَمَّةَ رصاصة أخرى لا بدَّ أنها انطلقت من قناصٍ ثانٍ فوق ربوةٍ على بُعد مسافة قصيرة من مُقدِّمة السيارة. هل الأمر كذلك حتمًا؟

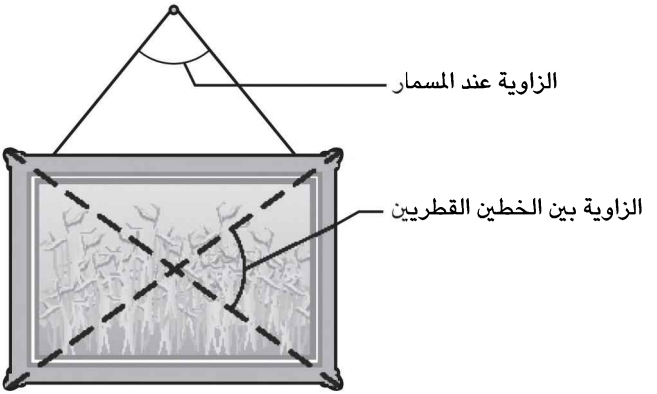
الجواب: عندما تَصطدِم رصاصة بدورق فارغ، يتحطَّم الزجاج الموجود حول نقطتَي الاختراق والخروج ويتحوَّل إلى مسحوق، في حين أنَّ بقية الزجاج يتحطَّم إلى أجزاء أكبر حجمًا عندما تتوغَّل خطوط الكسر عبْر مُختلِف جوانب الدَّورق. وإذا كان الدورق مُمتلئًا بالمياه، لا تَستطيع المياه أن تتمدَّد لأعلى بسرعة كافية لملء الفراغ اللازم للرصاصة ومواجهة التأثير الذي خلَّفته مَوجتُها الصدامية؛ ومِن ثَمَّ تضغط المياه على جُدران الدورق، لتُحوِّل الزجاج إلى مسحوق يتناثَر في كلِّ مكان وتدفع الحُبيبات بعيدًا في جميع الاتجاهات. هذا ما حدَث مع القراميد الموجودة على بُعدِ مترَين من أسفل المدخنة حين استلزمَتِ العبوة الناسفة حجمًا إضافيًّا فجأة.

يُعزى تناثُر مسحوق الزجاج إلى الخلف في تجربة إدجيرتون إلى تمدُّد المائع؛ أي كمية الغاز الضئيلة التي يَحتويها المصباح الكهربائي. أنا هنا لا أقصد الاستهانة بمقتل الرئيس كينيدي أو حتى نزع الجانب العاطفي من الحدَث، إلَّا أن تناثُر أجزاء الدماغ في الجزء الخلفي من السيارة يرجِع على الأرجح إلى استجابة السائل الموجود في الدماغ للاصطدام المُباغِت لرصاصة أوزوالد.

(١٤٧) لماذا تَميل الصور المُعلَّقة؟

إذا علَّقتَ صورة ذات حبلٍ قصير على حامل، مسمار مثلًا، فعلى الأرجح ستَميل الصورة. ما الذي يجعلها مُتزعزعة؟ هل يُوجَد أي شيء يُمكنك القيام به لتثبيتها بدلًا من ربط الحبل حول المسمار أو استخدام مسمارين مُتباعدَين؟

الجواب: عندما يكون الحبل قصيرًا، تكون الصورة المُعلَّقة مُتزعزعة لأن أي اضطراب مُحتمَل سيُتيح لها خفض توزيع مركز كُتلتها من خلال الميل. يُمكنك أن تُقلِّل التزعزع من خلال الاستعاضة عن الحبل القصير بآخَر طويل. ويتضمَّن الحدُّ الأدنى للطول الزاوية بين جزئَي الحبل المُعلَّق على المسمار والزاوية الموجودة يمينًا ويسارًا بين الخطَّين القُطريَّين المارَّين عبْر الصورة (شكل ١-٤٨). عندما تكون الزاوية بين الخطَّين القطريَّين أقلَّ من الزاوية الموجودة عند المسمار، تكون الصورة مُزعزَعة. ومن خلال الاستعاضة عن الحبل القصير بآخَر طويل، أنت تُقلِّل بذلك الزاوية الموجودة عند المسمار. فعندما تكون الزاوية



شكل ١-٤٨: بند ١-١٤٧: الزوايا مهمة لثبات الصورة.

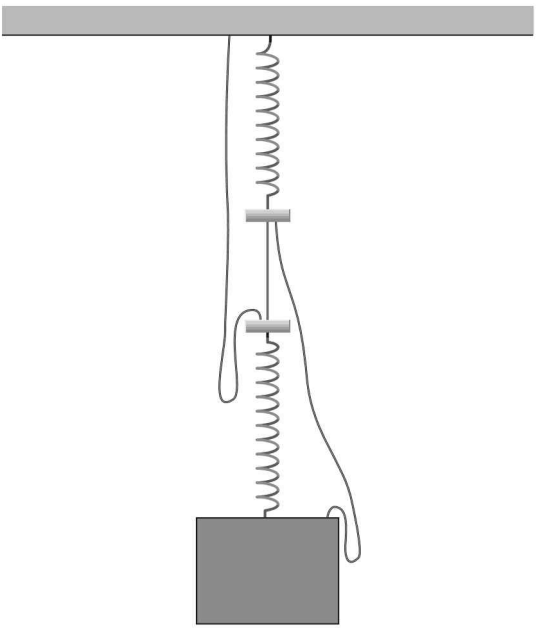
أصغر من تلك الموجودة بين الخطَّين القطريين المُتقاطِعَين، لا يُمكن أن تخفض الصورة مركز الكتلة من خلال الميل ومِن ثَمَّ تكون متوازنة.

(١٤٨) مفاجأة الزُّنبركَين

أحضِر زنبركَين مُتساويَين في الطول والمَتانة تقريبًا واربطهما بخيوطٍ ذات ثلاثة أطوال مُختلفة لدعم قالبٍ كما هو مبيَّن في (شكل ١-٤٩). أحد هذه الخيوط يربط بين الزُّنبركين ويكون واقعًا تحت شد. والخيطان الآخران لهما طولان مُتساويان ولكنهما أطوَلُ كثيرًا بعض الشيء للمساعدة في دعم القالب ومِن ثَمَّ يكونان مُتراخِيَين.

إذا قطعتَ الخيط القصير الرابط بين الزُّنبركين بحيث يُساهم الخَيطان الأطول في دعم القالب، فهل سيهبط القالب إلى أسفل؟

الجواب: عندما تقطع الخَيط القصير، هناك عاملان يُحدِّدان مستوى الارتفاع الجديد للقالب. أحد هذين العاملين هو أنَّ القالب يتدلَّى الآن من الخَيطَين الأطول؛ ونظرًا لأن هذين الخَيطَين مُتراخيان في الأصل ويقعان الآن تحت شد، ينحو القالب إلى الاتجاه إلى أسفل أكثر. والعامل الثاني مُرتبِط بالمقدار الذي يتمدَّد به الزنبركان. في الترتيب الأصلي، يدعم كل خيط وزن القالب بالكامل، ولكن في الترتيب الجديد كلٌّ منهما يدعم نصف الوزن فقط.



شكل ١-٤٩: بند ١-١٤٨: زُنبركان يربط بينهما خَيطان مُتدلِّيان.

ومِن ثَمَّ في الترتيب الجديد، يتمدَّد الزنبركان بقدْرٍ أقل، وهو ما يَنحو إلى تحريك القالب إلى أعلى. وبشرط ألَّا يكون الخَيطان الأطول مُفرطَين في الطول، فإن الفوز من نصيب العامل الثاني وتنتهي الحال بالقالب ليكون أعلى ممَّا كان عليه في البداية.

(١٤٩) ثبات عبوة المشروب الغازي

تُقاس درجة ثبات عبوة المشروب الغازي أو عبوة الجعة على الطاولة من خلال الطاقة اللازمة لإمالة العبوة من وضع الثبات المُعتاد إلى حيث يقع مركز كُتلتها مباشرةً فوق حافة الطاولة. هل العبوة المُمتلئة أكثر استقرارًا أم أقل من العبوة الفارغة؟ وهل تكون العبوة مُستقرَّة أكثر إذا وُجِد بها السائل عند ارتفاع معيَّن؟ ربما يكون السؤال مُهمًّا إذا صادف

وجود الطاولة على متن رحلة طيران أو على متن قطار متحرِّك أو إذا حاول ساقي الحانة أن يدفع العبوة عبْر سطح طاولة الحانة.

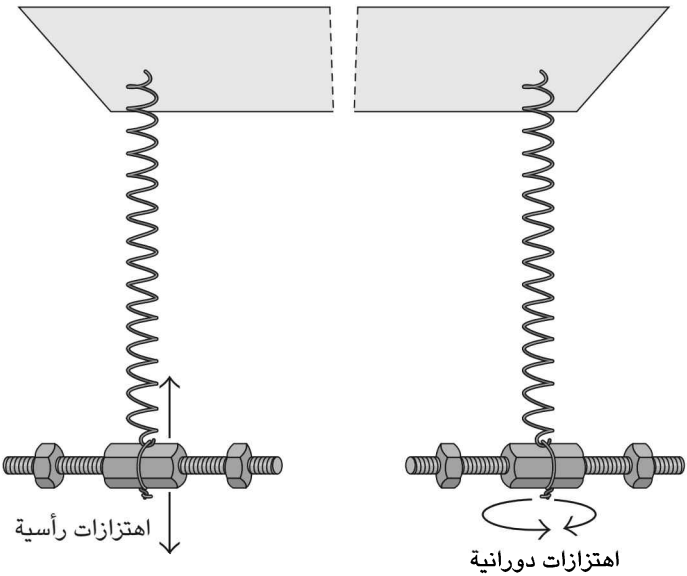
الجواب: العبوة المُمتلئة بالكامل أكثر ثباتًا من العبوة الفارغة. وعلى الرغم من أنَّ مركز الكتلة يكون على ارتفاعٍ متوسط في كلتا الحالتَين، فإنَّ الكتلة الإضافية تعني أن المزيد من الطاقة سيلزم لإمالة العبوة إلى الحدِّ الذي تقترب عندَه من السقوط على جانبها.

إذا صببتَ سائلًا من عبوة تدريجيًّا، فإنَّ ثمَّة ثلاثة عوامل تؤثر على ثبات العبوة. ينخفض مركز الكتلة إلى أن يَصِل سطح السائل إليه، ثم يَبدأ مركز الكتلة في الارتفاع. تقلُّ كتلة السائل عندما يَتناقَص. وعندما تَميل العبوة، ينساب السائل المُتبقِّي بحيث يَبقى سطحه العلوي في مستوًى أفقي. وأخذ هذه العوامل في الاعتبار يُوضِّح أن عبوة الجعة أو المَشروب الغازي تكون أكثر ثباتًا عندما يكون ارتفاع السائل أكبر قليلًا من نصف قطر العبوة.

(١٥٠) بندول ويلبرفورس

سُمِّي البندول الغريب الموضَّح (شكل ١-٥٠) على اسم العالم إل آر ويلبرفورس، الفيزيائي الإنجليزي الذي بحَث في هذا الأمر في عام ١٨٩٤. ويتكوَّن البندول من زُنبرك مُرتبط بجسمٍ صغير ذي ذراعَين قابلتَين للتعديل. عندما يُجذَب الزنبرك إلى أسفل ويُترك، يهتزُّ الجسم إلى أعلى وأسفل أولًا، ولكن سرعان ما يحلُّ محلَّ هذا الاهتزاز حركة دائرية للجسم. وبعد ذلك، يتمُّ تبادُل الحركة بشكل دوري بين الحركات الزنبركية والحركات الدائرية. والذراعان الموجودتان على الجسم ضروريتان لأننا إذا أردنا حدوث هذه الحركة التبادُلية، يجب أن يتوافَق تردُّد الاهتزازات الزنبركية الخالصة مع تردُّد الحركة الدائرية الخالصة. ولكي يحدُث هذا الأمر، لا بدَّ أن تكون الذراعان قابلتَين للتعديل. لماذا يتحرَّك بندول ويلبرفورس بهذه الصورة العجيبة؟

الجواب: بندول ويلبرفورس هو بندول مُشابِه للبندولين المُقترنَين المذكورَين في بندٍ سابق. هنا نمطا الحركة يتمثلان في اهتزازات الزنبرك ودوران الجسم. والنمطان مُقترنان لأنه عندما يهتزُّ الزنبرك ويتغيَّر طوله، يتطلَّب الْتِفاف الزُّنبرك وانفكاكه أن يدور أيضًا. يكون الدوران في البداية بسيطًا ولكن سرعان ما يَكتسب الطاقة بأكملها. وبينما يدور الجسم، فإنه يجعل الزنبرك يلتفُّ وينفك، وهو ما يُغير طول الزنبرك. يكون التباين في



شكل ١-٥٠: بند ١-١٥٠: بندول ويلبرفورس يُبادِل بين الاهتزازات الرأسية والاهتزازات الدورانية.

البداية طفيفًا ولكن سرعان ما يستحوذ على الطاقة بأكملها. ثم تُكرَّر عملية التنقُّل بين نمطَي الحركة نفسها.

(١٥١) سباق التسارُع

في سباق التسارُع، ثمَّة عاملان لقياس عنصر التشويق في مسار الربع ميل؛ ألا وهما: السرعة النهائية والزمن المُستغرَق. من أجل الاستعداد للسباق، لماذا يزيد السائق سرعة المُحرِّك فجأة بحيث تدور العجَلتان الخلفيَّتان؟ لماذا هذا الإجراء يُقلِّل الزمن المُستغرَق لقطع المسار، ولكنه لا يَزيد السرعة النهائية بشكل ملحوظ؟

الجواب: يدور الإطاران الخلفيَّان بحيث يذوب جزء من المادة المُكوِّنة للإطارات. وبعد أن تبرُد المادة لبضع ثوانٍ تصير لزِجة، وهذا يزيد من الاحتكاك الالتصاقي للإطارات عند

بدْء السباق. ويُتيح الاحتكاك المتزايد قدرًا كبيرًا من التسارُع الأوَّلي ومِن ثَمَّ يُقلل الزمن المُستغرَق في قطع المسار؛ إلَّا أن السرعة النهائية يُحدِّدها حدُّ قوة المُحرِّك؛ أي أقصى معدَّل للطاقة يُمكن للمُحرِّك أن يُوفِّره.

(١٥٢) هل ينبغي أن تَنعطِف أم تتوقَّف؟

من الصعب أن تجد عمليات فيزيائية واقعية أكثر من التصادُمات التي تتضمَّن احتمالية مقتلك. على سبيل المثال، هَبْ أنك اكتشفتَ فجأة أنك تقود مباشرة نحوَ حائطٍ من القرميد عند تقاطُع طرُق. هل ينبغي عليك أن تَضغط على المكابح بالكامل، أم تنعطِف ناحية اليسار أو اليمين بأقصى سرعة، أم تنعطف أثناء الضغط على المكابح؟

هبْ بدلًا من ذلك أنك رأيتَ صندوقًا أمامك على امتداد الطريق السريع. لكي تتفادى الاصطدام بالصندوق، هل ينبغي عليك أن تضغط على المكابح بالكامل أم تُحاول أن تتفادى الصندوق من خلال الانعطاف بالسيارة حوله؟

وإذا كانت سيارتك وسيارة أخرى تتَّجهان نحوَ تقاطُع على طول شارعَين متعامدَين وبسرعتَين مُتماثلتَين، هل ينبغي عليك وعلى قائد السيارة الأخرى أن تَضغطا على المكابح بالكامل دون أن تُغيِّرا الاتجاه؛ أم ينبغي على كلِّ واحدٍ منكما أن ينحرف بعيدًا عن الآخر بحيث تَفترق السيارتان عند التقاطع على طول الطرق المجاورة؟

الجواب: دعنا نتجاهل جميع الاعتبارات العملية؛ مثل: تراجُع قوة المكابح وزمن الاستجابة وأحوال الطرق المتغيرة. وفقًا لإحدى الدراسات، الضغط على المكابح أثناء مواصلة السير نحوَ الحائط هو الخيار الأفضل. تأمَّل الموقف الذي تصل فيه قوة الاحتكاك على الإطارات إلى أقصى حدٍّ بحيث تتوقَّف السيارة أمام الحائط مباشرة قبل الاصطدام به. قد تتطلَّب الاستدارة نحوَ الشارع الجانبي بذل قوَّةٍ مضاعَفة على الإطارات؛ لأنَّ القوة الإضافية لازمة لجعل السيارة تنعطف بعيدًا عن مسارها المبدئي. إذن، إذا اخترت أن تنعطف، فإنَّ القوة قد تفوق الاحتكاك، وقد تنزلق وتدور وفي النهاية تصطدم بالحائط. حتى وإن ضغطت على المكابح أثناء الاستدارة، فلسوف تصطدم بالحائط أيضًا.

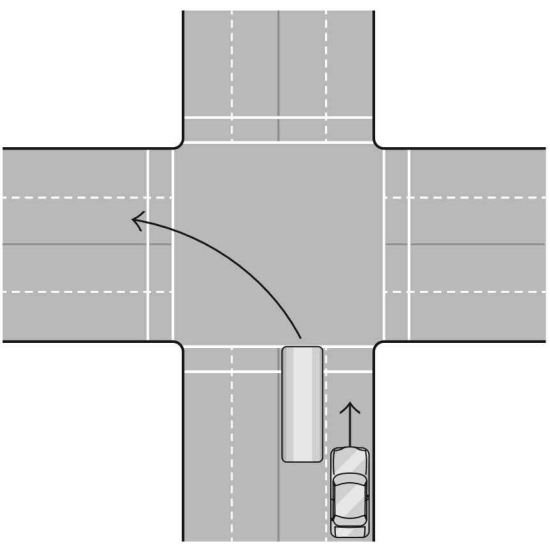
وتتوقَّف إمكانية تفادي الصندوق على النسبة بين عرض الصندوق والمسافة التي تَفصلك عنه حين تشرع في الاستجابة. الحد الفاصل هنا هو حين يكون عرض الصندوق يُساوي حوالَي نصف المسافة. فبالنسبة إلى الصناديق الأعرض، تُشير الدراسات إلى أنه

ينبغي عليك أن تضغط على المكابح بالكامل أثناء توجُّهك مباشرة إلى الصندوق. وبالنسبة إلى الصناديق الأصغر حجمًا، يُمكنك أن تتفادى الصندوق بالقيادة حوله.

وفي حالة وجود سيارتَين على وشْك الاصطدام عند تقاطع الطرق، لعلَّ من الأفضل بالنسبة لقائدي السيارتَين أن ينحرفا. ورغم ذلك، لا يقلُّ الخطر كثيرًا لأنَّ السيارتَين ستتركان الطريق وتَشقَّان طريقهما عبْر أيِّ شيءٍ في طريقهما.

(١٥٣) المرور بجوار حافلة

تتباطأ الحافلة لكي تَنعطِف عند تقاطُعٍ ما، إلا أنه تُوجَد مساحة كافية في حارتك المُجاوِرة لحارة الحافلة تُمكِّن سيارتك من المرور بجوارها (شكل ١-٥١). هل من الحِكمة أن تفعل ذلك؟



شكل ١-٥١: بند ١-١٥٣: سيارة تمرُّ بجوار حافلة تنعطف.

الجواب: بينما تَنعطِف الحافلة، يدور الجزء الخلفي للحافلة حول العجلتَين الخلفيَّتَين ويتأرجَح في اتجاهٍ معاكس لاتجاه الانعطاف. وما لم يكن الانعطاف تدريجيًّا، فلربَّما يتحرك

الجزء الخلفي من الحافلة نحوَ حارتك مسافة مترٍ أو نحو ذلك؛ ومِن ثمَّ يصطدم بسيارتك إذا حاولت أن تمرَّ بجوارها. وكلما انعطفت الحافلة بحدَّة أكثر، زادت مسافة توغُّل الجزء الخلفي داخل حارتك.

(١٥٤) الجزء المُتجعِّد على الشريط اللاصق

بالنسبة للكثير من أنواع الشرائط اللاصقة، بينما تجذِب الشريط من البكرة، يتجعَّد جزء صغير من الشريط (حيث ينضغط الشريط على نحوٍ ملحوظ ويتجعَّد حول البكرة) عند الطرف الواصل بين الشريط والبكرة. ولعلك ترى الجزء المُتجعِّد على نحوٍ أفضل إذا لصقتَ شريطَين أحدهما بالآخر ثم نزعتَهما على نحوٍ تدريجي. ما السبب وراء انضغاط هذا الجزء من الشريط اللاصق؟

الجواب: بينما تجذب الشريط اللاصق من البكرة، يلتفُّ الجزء المُنفصل بعيدًا عن البكرة، بالقُرب من الخط الفاصل بين الشريط والبكرة. يكون الشريط مشدودًا بالقدر الكافي من أجل لفِّ الجزء المُنفصِل ممَّا يتسبَّب في اقتراب هذا الجزء من الانفصال، وهذا يتسبَّب في انضغاط الجزء اللاصق الدبِق أسفل منه حول البكرة. وعندما تتوقَّف عن فصل الشريط عن البكرة، أنت تُقلِّل بذلك الدوران؛ ومِن ثَمَّ يختفي التجعُّد.

(١٥٥) التزلُّج في منحنًى

في رياضة التزلُّج الجماعي، يكون الهدَف بالتأكيد هو إتمام الجولة بدايةً من قمَّة المضمار وحتى أدنى نقطة فيه في أقلِّ وقتٍ مُمكن. وعادةً ما يُحَدَّد الفائز بناءً على كسور من الثانية، وهو هامش زمني قد يَصل إلى جزءٍ واحد فقط من الألف. عند الأجزاء المُستقيمة من المضمار، الهدَف هو أن تَنزلِق بأكبر قدر مُمكِن من الإنسيابية. ما الاستراتيجية التي ينبغي اتِّباعها للانعطاف؟ عندما تدخُل المُنعطَف، هل ينبغي لك أن تقود الزلَّاجة بسرعة عالية فوق المُنحدَر أم تُبقيها في أدنى مستوًى بقدْر الإمكان؟ هل ثمَّة خطورة للسقوط (ومِن ثَمَّ الاصطدام والتحطُّم) في كلتا الحالتَين؟

الجواب: تخيَّل أنك تسلك منعطفًا دائريًّا على مضمارٍ مسطَّح. من أجل سلوك المنعطف، لا بدَّ أن تقع تحت وطأة قوَّة جذبٍ مركزي تُوجِّهك نحو مركز الدائرة. وكلَّما انعطفتَ بسرعة أكبر، فلا بدَّ أن تكون قوة الجذب المركزي أكبر. تأتي تلك القوة من الاحتكاك

الواقع على الزلَّاجة والذي يُقاوم نزعة الزلَّاجة إلى الانزلاق إلى الجانب. (إن الاحتكاك المُتعامِد على الحامِلات المعدنية للزلَّاجة والواقع على الزلَّاجة نفسها، لا الاحتكاك بطول الزلَّاجة، هو ما يُبطِّئ سرعة الزلَّاجة.) وإذا دخلتَ المنعطف بسرعة مُبالغٍ فيها، يتمُّ التغلُّب على قوَّة الاحتكاك وتنزلِق إلى جانب المضمار وتصطدم به.

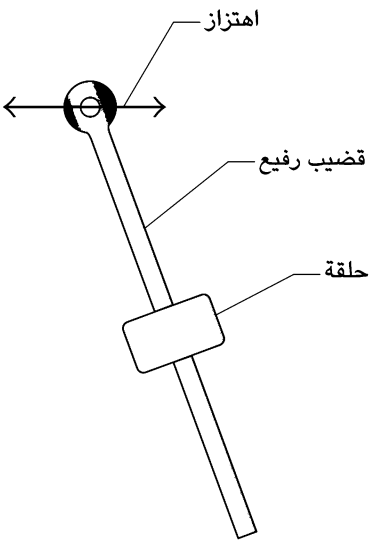
تكون المُنعطَفات على مضمار التزلُّج الجماعي مائلة بحيث يُمكن للسرعة أن تكون عالية. هذا الميل يجعل القوة الداعِمة الواقعة عليك تَميل وتجعل الزلَّاجة تميل فوق السطح الجليدي. يكون المَيل نحوَ مركز الدائرة لكي تُوفِّر القوة الداعمة المزيد من قوة الجذب المركزي. الآن، يُمكنك أن تنعطف بسرعةٍ دون أن تنزلق إلى جانب الطريق، شريطة أن تصعد فوق السطح المائل للمنعطف.

ورغم ذلك، أنت لا تُريد أن تتسلَّق المنعطف المائل أكثر ممَّا يلزم؛ وذلك لثلاثة أسباب. أولًا، كلما صعدْتَ إلى أعلى أكثر، لا بدَّ أن تسير لمسافةٍ أبعد لتُكمِل الجولة؛ ومِن ثمَّ تزيد من زمن الرحلة. ثانيًا: إذا صعدْتَ لأعلى، يستغرق الاحتكاك على طول الحاملات المعدنية للزلَّاجة ومقاومة الهواء وقتًا أطول؛ ومِن ثمَّ تخرج من المنعطف بسرعةٍ أقلَّ ممَّا لو أبقيتَ الزلَّاجة في مستوًى منخفض. ثالثًا، إذا صعدتَ لأعلى بسرعة أقلَّ ممَّا ينبغي قد يتسبب ذلك في السقوط بسبب المَيل.

(١٥٦) الانزلاق بسرعةٍ بالغة

تتكوَّن الأداة المُبتكَرة في شكل ١-٥٢ من حلقة مُتحرِّرة تَنزلِق على طول قضيب معدني. الطرف العلوي من القضيب (عند المحور) يُجبَر على الاهتزاز أفقيًّا عبْر مسافة صغيرة. وإذا كانت الاهتزازات بطيئة، تنزلق الحلقة المعدنية وتخرج من القضيب، ولكن إذا كانت سريعة، تظلُّ الحلقة على القضيب رغم وزنها. ما الذي يُعلِّقها بالقضيب؟

الجواب: لو كان المِحوَر ثابتًا أو يهتزُّ ببطء، فإن الجاذبية ستجذب الحلقة بعيدًا عن القضيب. ولكن عندما تكون الاهتزازات سريعة، تفقد الجاذبية الفرصة. يتحرَّك المحور بأبطأ سرعةٍ بالقُرب من أقصى طرفَي الاهتزازات وبأسرع ما يكون عند المنتصف. ولذا، أغلب الوقت يكون القضيب في وضعٍ مائل. هبْ أن الميل ناحية اليسار (يكون المحوَر أقصى اليسار). على الرغم من أنَّ الجاذبية تُحاول أن تُمرِّر الحلقة المعدنية أسفل القضيب ونحوَ اليمين آنذاك، قبل أن تستطيع الحلقة أن تتحرَّك، يَنتقِل المحور إلى اليمين ويَميل القضيب



شكل ١-٥٢: بند ١-١٥٦: يستطيع الاهتزاز أن يَحتفِظ بالحلقة داخل القضيب المعدني.

نحوَ اليمين. الآن، تسعى الجاذبية إلى تحريك الحلقة نحوَ الأسفل وجهة اليسار، ولكن قبل أن تستطيع الحلقة أن تتحرَّك، يُغيِّر القضيب اتجاهه.

(١٥٧) منزل الأمير الصغير

يُحكى أن الزائر الغامض الذي ظهَر في الحكاية الساحِرة بعنوان «الأمير الصغير» أتى من كوكبٍ لا يَكاد يكون أكبر من بيت. كيف يُمكن أن تبدو الحياة على مثل هذا الكوكب؛ على سبيل المثال، هل بإمكان الأمير الصغير أن يتمشَّى فوق الكوكب؟

الجواب: الفيزيائي جيه ستراند هو مصدر هذا البند العجيب، وهو يَعتبِر أن الكوكب أكبر نوعًا ما من الكوكب المذكور في القصة، ويجد أنَّه حتى المشْي فوق الكوكب سيكون صعبًا للغاية بسبب قوة الجاذبية الضئيلة. لو تحرَّك الأمير بسرعةٍ تَزيد عن ١١ سنتيمترًا في الثانية، فإنه قد يَنطلِق إلى الفضاء، ولا يستطيع العودة، وإذا تحرَّك على نحوٍ أبطأ ولكن بسرعة تزيد عن ٨٠ مليمترًا في الثانية، فإنه سيُرسَل في مدار حول الكوكب. يومًا ما سيتعيَّن

على روَّاد الفضاء أن يواجهوا مثل هذه الظروف، إذا ما اكتشفوا كُويكبات بمساحة البيوت الصغيرة.

(١٥٨) الهبوط بثمرة قرع

في عام ١٩٨٧، وكفقرةٍ استعراضية في عيد الهالوين، أخذ اثنان من قَفَّازي المظلات يَتقاذفان ثمرة قرع بينهما ذهابًا وإيابًا في الجوِّ أثناء قيامهما بفقرة سقوطٍ حُر غرب شيكاجو. كانت الفقرة الاستعراضية مُمتعة للغاية إلى أن فتح آخِرُ قافزٍ مُمسِك بثمرة القرع مظلَّته. تَسبَّب هذا التصرُّف في انفلات ثمرة القرْع من يدَيه. وللأسف، هبطت ثمرة القرع عموديًّا مسافة كيلومتر، واخترقَت سطح أحد المنازل، وارتطمت بأرضيَّة المطبخ، وتناثرت في أرجاء المطبخ الذي تمَّ تجديده مؤخرًا. ما الذي جعل القافز بالمظلَّة يفقد السيطرة على ثمرة القرع؟

الجواب: عندما فتح القافز بالمظلَّات مظلَّته، بذلت المظلَّة قوَّةً مفاجئة كبيرة لأعلى عليه من أجل تقليل سُرعته إلى أسفل. وكانت القوَّة أكثر من كافية لإفلاتِ ثمرة القرع التي سقطَتْ على ذلك المنزل الموجود غرب شيكاجو.

(١٥٩) صيد سمكة مشاكسة

إذا كانت السمكة صغيرة، لعلَّ في مقدورك أن تَسحبَها من خلال تدوير بكرة الصنارة بكلِّ بساطة وجذب خَيط الصنارة، ولكن إذا كانت السمكة كبيرة وكثيرة الحركة والمقاومة، ما الذي ينبغي عليك القيام به لتسحبَها؟

الجواب: تتضمَّن عملية اصطياد السمكة معركة عزْم دوَران. فعندما تُوجِّهُ عصا الصنارة نحو سمكةٍ قوية وكثيرة الحركة، لا بدَّ أن تبذُل قوةً كبيرة على يدِ الصنارة إذا كنتَ بصدَد توليد عزم دوران كافٍ لتدويرها. المشكلة تتمثَّل في ذراع الرفع القصير الذي تستخدِمه؛ ألا وهي المسافة الفاصلة بين يد الصنارة والمركز الذي تدور حوله. سيكون مِن الأسهل عليك إذا ما أمسكتَ بالعصا فوق البكرة وجذبتَ بحيث تُدير العصا حول طرفها الأدنى. فإذا كانت السمكة قوية، يُمكنك أن تدعم الطرف الأدنى بتَثبيتِه فوق مِحوَرٍ ثم تجذب بكلتا يدَيك. في كلتا الحالتَين، أنت تستخدِم ذراع رفع أكبر، وهذا يستلزم منك قوةً أقل. وبعد أن ترفع طرف العصا، ستَخفِضها تدريجيًّا مرة أخرى أثناء سحْب الخَيط لأعلى.

وإذا أردتَ أن تُنهك قوى السمكة، فإنَّ الإمساك يكون أسهل باستخدام العصا التي تَنثني؛ لأنك في تلك الحالة تُقصِّر المسافة بين يدَيك وبين طرف العصا وتُقلِّل عزم الدَّوران الذي تُنشئه السمكة. بعد ذلك، أنت في حاجةٍ إلى عزم دوران أقلَّ من يدَيك لتُبقيَ العصا في موضعها الصحيح.

(١٦٠) لعبة العصا والحلقة

هي لعبة تتكوَّن من حلقةٍ بلاستيكية تدور حول عصًا خشبية. إذا أمسكتَ بالعصا في وضع رأسي مع تثبيت الحلقة عند القمَّة ثم قمتَ بإدارة الحلقة، فإنها ستتحرَّك تدريجيًّا إلى أسفل العصا. لماذا يتباطأ مُعدَّل نزولها ويزداد دوَرانها أثناء السقوط؟ وإذا قلبت العصا قبل أن تصِل الحلقة إلى القاع، يُمكِنُك أن تحافظ على استمرار الحركة إلى ما لا نهاية.

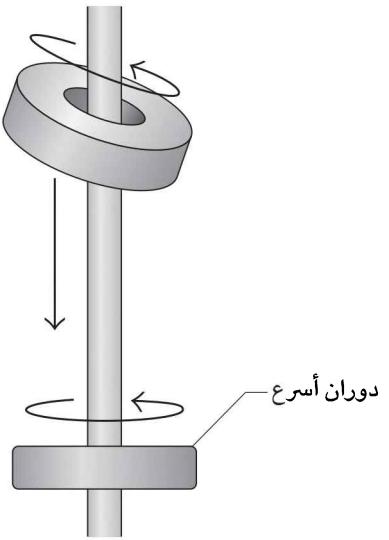
الجواب: إذا سمحتَ للحلقة أن تنزل إلى أسفل بمستوًى مائل، فإنها تدور بسرعة مُطَّردة في أثناء نزولها، وتأتي الطاقة المتزايدة للدوران من طاقة الوضع المتناقِصة. تدور الحلقة حول العصا إلى أسفل بالطريقة نفسها، ولكن على السطح الداخلي من الحلقة بدلًا من السطح الخارجي. وفي أيِّ لحظة، تكون الحلقة مائلة، مع وجود جزءٍ من سطحها الداخلي يُلامِس العصا. وفي اللحظة التالية، تتحرَّك نقطة التلامس حول العصا وإلى الأسفل أيضًا (شكل ١-٥٣). وتُواصِل نقطة التلامُس النزول إلى أسفل العصا. وبينما تهبِط الحلقة إلى أسفل، فإنها تُحوِّل طاقة الوضع إلى طاقةٍ حركية من أجل الدوران.

ويُحَدَّد معدَّل الهبوط بناءً على درجة مَيل الدوَّامة، وهي ثابتة بسبب الاتجاه المائل للحلقة. وبينما تدور الحلقة على نحوٍ أسرع، تصير أفقية أكثر، ويقلُّ كلٌّ من ميل الدوَّامة ومعدَّل الهبوط.

إذا دارت حلقتان بالقُرب من قمَّة العصا، قد يُصادف أن تلحق الحلقة العلوية بالحلقة السفلية. وعندما تتلامَسان، تقفز الحلقة العلوية إلى أعلى نتيجة التصادُم، صاعدةً إلى أعلى.

(١٦١) المروحة الدوَّارة على عصًا مُثقَّبة

ثمَّة لعبة بسيطة — تُثير جدلًا حتمًا — تتكوَّن من مروحة دوَّارة على عصًا مُسنَّنة وعصًا ثانية تحتكُّ بالثقوب (شكل ١-٥٤). يدعم المروحة الخشبية دبُّوس يمرُّ خلال فتحة في المروحة وعبر أحد طرفَي العصا المثقَّبة. ومن خلال وضع إصبع السبابة على أحد جانبي



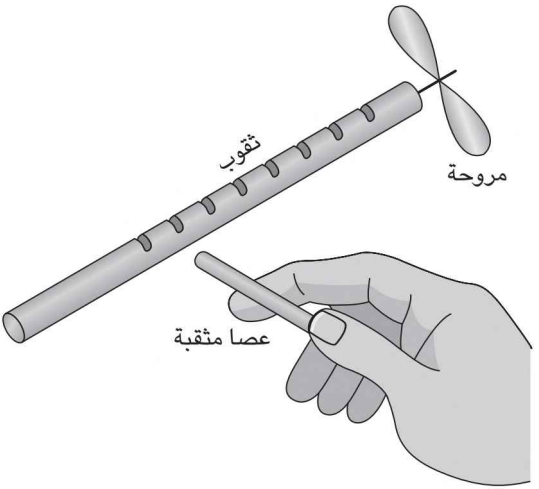
شكل ١-٥٣: بند ١-١٦٠: تكون الحلقة مائلة في البداية وتدور ببطء. إلى الأسفل أكثر، تكون الحلقة أقلَّ ميلًا وتدور على نحوٍ أسرع.

العصا المُثقبة وإصبع الإبهام على الجانب المُقابل، تدقُّ أنت العصا الثانية فوق الثقوب. إذا ضغطتَ بشدَّة بإصبع السبابة، تدور المروحة في اتجاهٍ واحد؛ وإذا ضغطتَ بشدَّة بإصبع الإبهام، تدور المروحة في الاتجاه المعاكس.

عندما تَعرض اللعبة على شخصٍ يجهلها، يمكنك أن تنقل الضغط بين إصبعَي الإبهام والسبابة خلسةً لتَعكِس الدوَران. ولا يُوجد حدٌّ للأسباب التي يُمكنك أن تعزو إليها تغيير الاتجاه، مثل تبايُن حدَّة الأشعة الكونية.

ما هي آلية عمل اللعبة؟

الجواب: إذا لم تضغَط على جانبَي العصا المُثقَّبة، فإنَّ الذبذبات تجعل المروحة تهتزُّ وحسب. ولكن عندما تضغط على جانبٍ واحد، يعوق الضغط استجابة ذلك الجانب إلى الذَّبذبات. وعدَم تماثُل استجابة الجانبَين يُجبر الدبُّوس على الحركة عبْر مسارٍ بيضاوي، ثم يتسبَّب الاحتكاك بين المروحة والدبُّوس في جعل المروَحة تدور في الاتجاه نفسه. وعندما



شكل ١-٥٤: بند ١-١٦١: تدور المروحة على طرف الدبوس بعد أن تهتزَّ العصا.

تَنقل الضغط إلى الجانب المُقابل من العصا، يسير الدبُّوس في مسار إهليجي في الاتجاه المعاكس؛ ومِن ثَمَّ ينقلب دوَران المروحة.

(١٦٢) دفع الجُلَّة والإطاحة بالمِطرقة

ما الزاوية التي ينبغي عليك أن تدفع بها الجُلَّة لتُحقِّق أقصى مدًى؟ هل هي ٤٥ درجة كما تدَّعي بعض الكُتب الدراسية؟ إن لم يكن الأمر كذلك، فهل يكون الانحراف بسبب مُقاومة الهواء التي تُواجِهها الجُلَّة أثناء الطيران في الهواء؟

ما الزاوية التي ينبغي عليك أن تُطيح بها بالمِطرقة في رياضة الإطاحة بالمطرقة؟ لماذا يدور اللاعب الرياضي حول نفسه قبل أن يُطيح بالمطرقة، بينما يتحرَّك إلى الأمام أيضًا؟ وقُبَيل الإطاحة مباشرةً، لماذا يجذِب اللاعب المِطرقة نحوَ جسده؟

الجواب: إذا دفعتَ ماكينة الجُلَّة عند مستوى الأرض، فستكون الزاوية المِثالية من الناحية النظرية ٤٥ درجة. لو استُخدِمَت ماكينة لدفع الجُلَّة عند ارتفاع نموذجي في

رياضة دفع الجُلَّة، تكون الزاوية المثالية من الناحية النظرية ٤٢ درجة. ورغم ذلك، فمُعظم اللاعبين يُفضِّلون زاويةً أصغر، ربما زاوية صغيرة تصِل إلى ٢٩ درجة؛ لأنَّ الدفع حينئذٍ يكون أكثر فعاليةً حسب قوانين الفيزياء وتُدفَع الجُلَّة بسرعةٍ أكبر. وعلى الرغم من أنَّ الزاوية الأصغر تنحو إلى تقليل نطاق دفع الجُلَّة، فإن السرعة الأكبر للدَّفع تُعوِّض ذلك الانخفاض كثيرًا (لمقاومة الهواء تأثير طفيف).

ومن أجل مُراكمة الطاقة الحركية للمِطرقة قبل الإطاحة بها، يُدير اللاعب المطرقة عدة مرات (مع تثبيت قدمَيْه على الأرض)، ثم يبدأ في الدوران عدة مرات مع المطرقة أثناء التحرك عبْر دائرة الإطلاق؛ وذلك من أجل زيادة سُرعة المطرقة. وحركة المطرقة لا تكون أفقية. بدلًا من ذلك، ترتفع المطرقة إلى نقطة عالية عندما يُواجِه اللاعب الاتجاه المراد الإطاحة بالمطرقة فيه، ثم تنخفض المطرقة إلى نقطة مُتدنِّية في الاتجاه المعاكس تمامًا. وأثناء السقوط يجذِب اللاعب، وهو يُثبِّت كلتا قدمَيْه بشكلٍ مؤقَّتٍ على الأرض، في اتجاه حركة المِطرقة ومن ثَم يزيد الطاقة الحركية.

وبينما يُتمِّم اللاعب آخِرَ لفَّةٍ ويصل إلى حافة دائرة الإطلاق، يجذب المِطرقة فجأةً ناحية جسده ليزيد من سُرعتها (الموقف أشبَهُ بالمُتزلِّج على الجليد الذي يضمُّ ذراعَيه وساقيه ناحية جسده أثناء الدوران على أطراف أصابعه؛ فهذه الحركة تزيد من مُعدَّل الدوَران)، ثم تُطلَق المطرقة عند مستوى الكتِف. وهكذا، ينبغي الإطاحة بالمِطرقة بزاويةٍ أقلَّ من ٤٥ درجة بسبب هذا الارتفاع المبدئي للإطلاق.

(١٦٣) القفز أثناء سباقات تزلُّج المُنحدَرات

إذا كان المُتزلِّج المُتمرِّس ينزل منحدرًا ولاحظَ أنَّ المنحدَر يزداد انحدارًا على طول الطريق، فسيجثو المُتزلِّج ثم يقفز إلى أعلى ليرفع ساقَيه ويُحلِّق في الهواء قبل أن يصل إلى جزءٍ مُرتفعٍ من المنحدَر. لماذا لا ينتظر المُتزلِّج حتى يصل إلى الجزء المرتفع من المنحدر ليستعين به في التحليق في الهواء؟

الجواب: إذا لم يقفِز المُتزلِّج قبل أن يصل إلى الارتفاع المُفاجئ للمنحدَر، ولكن بدلًا من ذلك استغلَّ ذلك الجزء المُرتفع من المُنحدَر ليُحلِّق في الهواء، فسيُحلِّق المُتزلج عندئذٍ عبْر الهواء لمسافةٍ أبعد ثُمَّ يهبط على الجليد بعدَ مسافةٍ أطول. يُسفِر السقوط الأطول عن هبوطٍ حادٍّ أكثر، وهو ما قد يُسفِر عن سقوط المُتزلِّج بسهولة.

(١٦٤) شدُّ مفرَش المائدة من أسفل الأطباق

تُعَدُّ عملية شدِّ مَفرش المائدة من أسفل مجموعة من الأطباق تجربة مدرسية كلاسيكية. عندما كنتُ أُواعد الفتيات كنتُ أجد صعوبةً في بدء حوار في المُواعدة الغرامية الأولى، وكثيرًا ما كنتُ أُقدِّم عرضًا استعراضيًّا أمام الفتاة، ولكني لم أَكن أستعين بأطباقٍ أو أوانٍ زجاجية عادية، وإنما بدلًا من ذلك كنتُ أستعين بكئوس المُختبَر وقوارير بها نبيذ. كان هذا الأداء هو ما يجعل الحوار يستمرُّ دومًا. ورغم ذلك، إذا كان عليك أن تؤدِّي التجربة في واحدةٍ من مواعداتك الغرامية، فاعلم أن تأدية التجربة ليستْ كافية. فلكي تُحافظ على استمرار الحوار، عليك أن تشرح آلية عمل التجربة. فما هي آلية عمل التجربة؟

الجواب: إذا جذبتَ مفرش المائدة بسلاسة وسرعة، فأنت تُقلِّل على الفَور الاحتكاك بين المفرش والأطباق. وهذا التقليل شائع؛ فعندما ينزلِقُ سطحان أحدهما فوق الآخر، يكون الاحتكاك بينهما أقلَّ عندما يكونان على وشْك الانزلاق. وفي حالة مَفرش المائدة، ينشأ تقليل الاحتكاك، كله أو جزء منه، من القفزة التي تقوم بها الأطباق. ونظرًا لأنها لا تُلامس المفرش تمامًا طوال الوقت، يكون الاحتكاك الواقع عليها ضئيلًا، وقد ينزلق المفرَش من أسفل منها. ورغم ذلك، فإنَّ هذا الاحتكاك الأقلَّ سيُحرِّك الأطباق في اتجاهك. وكلما جذبتَ لفترةٍ أطول، تحرَّكت الأطباق أكثر، وهذا سبب آخر لكي تسحبَ المفرش بسرعةٍ وتُقلِّل ذلك الوقت المُستغرَق.

قصة قصيرة

(١٦٥) الجرُّ باستخدام الأسنان

في الرابع من أبريل عام ١٩٧٤، استطاع جون ماسيس، من بلجيكا، أن يَجُرَّ سيارتَي رُكَّاب على طريق السكك الحديدية لونج أيلاند ريلروود بنيويورك بعد أن أطبق أسنانه على شكيمة مربوطة بالسَّيَّارتَين بحبل، ثم مال إلى الخلف وضغط على عوارض السكة الحديدية باستخدام ساقَيه. بلغ وزن السيارتَين ٨٠ طنًّا، أو ٧٠٠ ألف نيوتن، ولكن نظرًا لأن ماسيس لم يحمل السيارتَين، فإنَّ كتلة السيارتَين مثَّلت أهميةً بالغة؛ فلقد استطاع بطريقةٍ ما أن يُحرِّك كتلةً بلغتْ حوالي ٧١ ألف كيلوجرام عبْر مسافةٍ قابلة للقياس. (في محاضرات الفيزياء، أحيانًا يكون مفهوم الجهد — باعتباره حصيلة القوة والمسافة التي يقطعها الجسم — مملًّا، إلَّا أنَّ ماسيس غرس روحًا جديدة، رغم غرابتها، في المفهوم.)

(١٦٦) الكرسي المُهتز

إذا كنت تجلس على كرسي فوق أرضيةٍ عادية ومستوية، يمكنك أن تُحرك نفسك وتحرك الكرسي فوق الأرضية من خلال مجموعة هزَّات ومن دون أن تلمس الأرضية بقدمَيك. لكن لا يمكن تحريك الجسم الساكن في البداية (المقصود هنا أنت والكرسي) ما لم تكن هناك قوة «خارجية» (دخيلة) واقعة عليه. فما القوة التي تدفعك أنت والكرسي؟

الجواب: لكي تُحرِّك نفسك والكرسي الذي تجلس عليه، تضغط يدَاك فجأةً وبقوةٍ إلى الأسفل ونحوَ الجزء الخلفي من الكرسي. القوة المُتَّجِهة إلى أسفل تزيد الضغط على الكرسي فوق الأرضية؛ ممَّا يُتيح المزيد من الاحتكاك بين الكرسي والأرضية، وهو ما يَحُول دون انزلاق الكرسي إلى الخلف. وقيامك بالضغط على الكرسي يدفع جسدك أيضًا إلى الأمام. وبمجرَّد أن تتحرَّك، اجذِب الكرسي فجأةً إلى أعلى ونحو الأمام. يُقلل الجذب إلى أعلى الضغط الواقع من الكرسي على الأرضية؛ ومِن ثَمَّ يُقلل الاحتكاك بين الكرسي والأرضية؛ ممَّا يُتيح للكرسي أن ينزلِق إلى الأمام. هكذا، تتمثَّل القوة الخارجية التي تُحرِّكك في الاحتكاك الذي واجهته في المرحلة الأولى من العملية.

(١٦٧) رفع شخص باستخدام الأصابع

لعلَّك رأيتَ الفقرة الاستعراضية التالية من العروض السحرية: يختار الساحر ثلاثة أشخاص من الجمهور ليُساعدوه في رفع شخصٍ رابع، شخص ثقيل إلى حدٍّ ما من الجمهور أيضًا. تتطلب الفقرة الاستعراضية من الساحر والمساعدين الثلاثة أن يرفعوا الشخص الرابع من فوق الكرسي في حين يستخدِم كلُّ شخصٍ منهم إصبع السبابة فقط. يضع الساحر إصبعه تحت إبط الشخص الجالس، ويضع كلُّ واحدٍ من المُساعِدين إصبع السبابة بالطريقة نفسها: واحد تحت الإبط، وواحد أسفل الركبة اليسرى، وواحد أسفل الركبة اليمنى. وبجهدٍ عظيم، يحاول الساحر والمُساعدون الثلاثة أن يرفعوا الشخص الجالس، بلا طائل لأنه ثقيل للغاية.

ومن أجل إضفاء عنصر السحر على الأمر، يضع الساحر والمُساعدون أيديهم فوق رأس الشخص الجالس ثم يضغطون قليلًا. من المفترض أن يُقلِّل هذا الضغط من وزن الشخص الجالس. ويتمُّ تغيير وضع الأصابع من أجل الرَّفعة المرهونة بإشارة من الساحر. في هذه المرة، يتم رفع الشخص الجالس بسهولة.

ما الذي يحدُث؟ بالتأكيد، لو كان ضغطٌ بسيط إلى أسفل على رأسي يُمكن أن يقلِّل وزني، لما كنتُ أقلق بشأن كوني زائدَ الوزن.

الجواب: في أثناء المحاولة الأولى للرفع، يُصادِف أن الساحر والمُساعدين الثلاثة يرفعون الشخص الجالس بأسلوبٍ يفتقر إلى التنسيق، مع بذْل بعض أجزاءٍ من القوى في وقتٍ أبكر من غيرها. بكلِّ بساطةٍ القوى غير المُتساوية الواقعة على النقاط الأربع من جسد الشخص الجالس تُميل ذلك الشخص نحوَ جانبٍ واحدٍ بسبب عزم الدوران الناجم عن تلك القوى غير المُتساوية؛ ومن ثَم تُوجَد فرصة ضئيلة لإمكانية إتمام الرَّفعة. وبالتأكيد، يستطيع الساحر أن يُسهم في بَدء هذه الإمالة.

وفي أثناء المحاولة الثانية، تُبذَل القوى الأربع في آنٍ واحد، بسبب الإشارة التنسيقية التي يُصدِرها الساحر. حينئذٍ لا يكون هناك عزم دوران واقع على الشخص الجالس، والآن مع تقاسُم وزن الشخص بالتساوي بين الأشخاص الأربعة، يُمكن رفع الشخص بجهدٍ معقول.

(١٦٨) الصواريخ ومشكلة القارب الجليدي

هبْ أنَّ صاروخًا ثابتًا في البداية تمَّ إشعاله أثناء وجوده في الفضاء. هل يمكن أن يصل إلى سرعةٍ أكبر من السرعة الصادرة عن الدَّافع الخاص به؟ هل سرعته النهائية مُتوقِّفة على ما إذا كان الوقود يُحرَق ببطءٍ أم بسرعة؟ لماذا الصواريخ المُنطلقة من الأرض مُصمَّمة بحيث تُطلَق على مراحل؟ (نشأت الفكرة في الصين في حدود سنة ١٠٠٠ ميلادية.) هل يُوجَد عدد مِثالي للمراحل؟ هل يُمكن أن يكون الصاروخ الوحيد المرحلة مُصمَّمًا ليكون قويًّا بالدرجة الكافية لإطلاق قمَرٍ صناعي في المدار أو إرسال البشَر إلى سطح القمر؟ إلى أيِّ مدًى يمكن تنفيذ الخطَّة التي وردَتْ في إحدى روايات جول فيرن؛ حيث أُطلقَتْ كبسولة تحمل بشَرًا كقذيفة مُنطلقةٍ من مدفعٍ كبير غائص في الأرض؟

تخيَّل أنك تجلس في مركبٍ جليدي صغير فوق رقعة جليدية زَلِقة للغاية وتريد اجتيازها، وحول الشاطئ الجليدي تتناثر الأحجار. قررتَ أنت أن تحمل بعضًا من هذه الأحجار على متن القارب لكي تستطيع أن تدفع القاربَ عن طريق إلقاء الحجارة من متْن القارب ونحوَ الشاطئ، إلَّا أنه لا يُوجَد إلَّا مساحة محدودة لكتلة إجمالية مُحدَّدة من الحجارة فقط. من أجل توفير أكبر سُرعة نهائية للقارب الجليدي، هل ينبغي عليك أن تنتقي عددًا كبيرًا من الحجارة الصغيرة الحجْم أم عددًا أقلَّ من الحجارة الأكبر حجمًا؟ بعبارةٍ أخرى، هل ينبغي عليك أن تُلقي كتلةً كبيرةً أم صغيرة مع كلِّ قذفة؟ ولكي تستقيم

الحجَّة، هبْ أنك تقذف الحجارة، الكبيرة أو الصغيرة، بنفس السرعة التي تتناسَب معك ومع القارب.

الجواب: يُمكن تصميم الصاروخ لينطلق على نحوٍ أسرع من سرعة المادة الصادرة عنه شريطةَ أن تتعدَّى نسبة الكتلة المبدئية للصاروخ إلى كتلتِهِ النهائية ٢,٧٢ (المساوية لأس الرقم ١). والمُعدَّل الذي يُحرَق به الوقود لا يُحدِث فارقًا بالنسبة إلى السرعة النهائية للصاروخ. ولا يمكن أن يُطلِق الصاروخ ذو المرحلة الواحدة حمولةً من الأرض إلى الفضاء؛ لأنه لا يمكن أن يصل إلى السرعة النهائية اللازمة التي تُقدَّر بـ ١١,٢ كيلومترًا في الثانية. ومِن ثَمَّ، تُصمَّم الصواريخ على هيئة مراحل. فعندما تستنزف أدنى مرحلة وقودَها، يتمُّ التخلُّص منها؛ لأنه لا حاجة لحمل كتلتها لأعلى، ثم تُشْعَل المرحلة التالية. ويُوجَد رقم مثالي للمراحل، وهو حوالي أربع أو خمس مراحل للصواريخ العادية، نظرًا لتكاليف المراحل الإضافية.

في رواية فيرن، كان يُمكن أن يُقتل الأشخاص بسبب التسارُع الذي شهدوه.

ستُوفِّر للقارب الجليدي سُرعة نهائية أكبر إذا ما ألقيتَ عددًا كبيرًا من الحجارة الصغيرة بدلًا من أن تُلقي عددًا أقلَّ من الحجارة الكبيرة. لتفهَم المغزى وراء ذلك، فَكِّر أولًا في إلقاء حجَرٍ واحدٍ كبير ثم فَكِّر في إلقاء حجرَين أصغر حجمًا، كتلة كلٍّ منهما نصف كتلة الحجَر الأكبر حجمًا. وفي الخطة الثانية، الحجَر الأول يوفِّر قدرًا مُحدَّدًا من السرعة الأمامية للقارب، وكذلك الحجَر الثاني الذي لا تزال ممسكًا به. وهذا يعني أنك حين تُلقي بالحجر الثاني، تكون الزيادة في سُرعة القارب أكبر ممَّا لو ألقيتَ الحجر الأول.

قصة قصيرة

(١٦٩) من الأرض إلى الزُّهرة

خرجَتِ المحاولة الأولى لإرسال البشَر إلى كوكب الزُّهرة من مدينة بالتيمور بولاية ميريلاند، عام ١٩٢٨. صمَّم روبرت كوندت ومساعدان آخران صاروخًا من الحديد المزوي وقماش الأشرعة. وكان يعمل بالجازولين الذي يتبخَّر ويُرَشُّ داخل أنابيب فولاذية ثم يشتعِل من خلال شمعات الاحتراق.

كان من المُقرَّر أن يقوم كوندت بالرحلة بمفرده، حاملًا معه الطعام والشراب ومصباحَين وحقيبة إسعافات أولية. لم يُمثِّل التوجيه مشكلة لأنه خطَّط لتوجيه المركبة

بحِرص عند الإقلاع. وحين يصِل إلى كوكب الزهرة، كان يعتزم فتح مظلَّة حريرية على ارتفاع ٢٥ قدمًا ليُبطِّئ عملية نزوله. أما طريقة عودته فلم تكن واضحة تمامًا، ولكن إذا لم يكن هناك طعام أو شراب على سطح الكوكب، فلن يعتزم البقاء طويلًا على أيِّ حال.

وفي يوم تجربة الانطلاق، تسلَّق كوندت المركبة وأدار المُحرِّك ليرتفع مسافة رُبع ميل، فقط ليتفقَّد الأمر. انبعثتْ سحُبٌ كبيرة من النار والدُّخان من الأنابيب الفولاذية، ولكن الصاروخ لم ينطلِق. زاد كوندت من تدفُّق الجازولين، وصارت النيران لافتةً للنظر حتى إنَّ حركة المرور في الشارع توقَّفَت. ورغم ذلك، لم ينطلق الصاروخ. أخذ كوندت يُجرِّب حتى نفدَ الوقود في النهاية.

لم يصل كوندت إلى كوكب الزهرة قط، وإلَّا كنتَ تعرف قصته الآن.

(١٧٠) انتقاء المِطرقة

لكي تحفُر في الخشب أو في حجَرٍ أملس باستخدام أزميل، هل ينبغي عليك أن تستخدِم مطرقةً خشبيَّة أم فولاذية؟ ما الأفضل إذا كنتَ ستحفُر في شيءٍ أصلبَ بكثير، مثل الجرانيت؟ لماذا يُفضَّل استخدام مطرقة فولاذية بدلًا من المطرقة الخشبية لدقِّ مسمارٍ في خشب؟

الجواب: عندما تكون المادة ليِّنة ولا تستلزم إلَّا قوة ضئيلة للاختراق، تتمثَّل الفكرة في نقل أكبر قدْرٍ ممكن من الطاقة لعملية الحفر. وفي تلك الحالة، يكون من الأفضل استخدام مطرقة خشبية؛ لأنه على الرغم من أنها توفِّر قوة متوسطة للنَّصْل وكذلك إلى المادة، فإنها تنقل قدرًا كبيرًا من طاقتها. وعندما تكون المادة صلبة، يصير الحفر أكثر صعوبة، ومن ثَم تزيد أهمية القوة. وتوفر المطرقة الفولاذية طاقة أكبر؛ لأنها ضخمة ولأنها ترتدُّ من النَّصْل. ورغم ذلك، تكون الضربة من المطرقة على النَّصْل مرِنة. بعبارة أخرى، ينتقل قدْر قليل من الطاقة وأغلبها يبقى في المطرقة.

وبالتأكيد، المطرقة الفولاذية هي الخيار المناسب لدقِّ المسامير؛ إذ تتشوَّه المِطرقة الخشبية عند استخدامها لدقِّ رأس مسمار، ممَّا يتسبَّب في إهدار جزء من طاقة المطرقة.

(١٧١) مُنظِّم الضغط

يتكوَّن وعاء الضغط التقليدي من قِدْرٍ مُغلق بإحكام باستثناء أنبوب مركزي تعلوه أسطوانة مُثبتة على نحوٍ غير مُحكم. يُوجَد بالأسطوانة ثلاثة ثقوب محفورة على جانبها،

وكلُّ ثُقب له قطر مُختلف. أُحدِّد درجة الضغط داخل القِدْر عن طريق اختيار أيِّ ثُقب يُعشَّق داخل الأنبوب. ولكن كيف يُؤتي هذا الإجراء ثماره؟ على أي حال، وزن الأسطوانة لا يتغيَّر بتغيُّر الثُّقب الواقع عليه الاختيار.

الجواب: يضغط البخار المُتولِّد داخل القِدْر إلى أعلى على وزن الأسطوانة. والضغط المحفوظ داخل القِدْر يتناسَب تقريبًا مع الضغط اللازم لدعم الأسطوانة. وعندما يُصبِح ضغط البخار كبيرًا للغاية، فإنه يرفع الأسطوانة ويُتيح للبخار أن ينفذ لكي يعود الضغط داخل القِدْر إلى المستوى المرغوب. إذا اخترتَ ثقبًا واسعًا في الأسطوانة، ينتشِر وزن الأسطوانة على قطاع مُستعرَض كبير من الثقب، ومن ثَم الضغط اللازم لرفع الأسطوانة يكون ضئيلًا. وكلَّما كان الثُّقب صغيرًا صار الضغط أكبر داخل القِدْر.

(١٧٢) انزلاق العصا فوق إصبعَين

ضع عصًا فوق إصبعَي السبَّابة في وضعٍ أفقي، مع وضع الإصبعَين عند طرفَي العصا، ثم حرك إصبعَيك بشكلٍ مُتجانس إحداهما نحوَ الأخرى. هل تنزلق العصا بشكلٍ مُتجانس؟ كلا، إنها تنتقل بين الانزلاق على إحدى الإصبعَين إلى الإصبع الأخرى، لتتغيَّر عدَّة مرات قبل أن تصل الإصبعان إلى مُنتصف العصا. لماذا يحدُث هذا؟

الجواب: على الرغم مما يبدو ظاهريًّا، لا تكون الأوضاع الأولية على الإصبعَين مُتناظِرة. فأنت حتمًا تجذب بإصبعٍ واحدة على نحوٍ أقوى قليلًا، الإصبع اليُمنى مثلًا، وتتغلَّب على الاحتكاك الاستاتيكي (الثابت) الواقع على الإصبع من جانب العصا، ومن ثَم تَشْرَع الإصبع في الانزلاق تحت العصا. ومن ثَم، يصير الاحتكاك الواقع عليها «احتكاكًا ديناميكيًّا»، الذي يكون في البداية أصغر من «الاحتكاك الاستاتيكي» الواقع على الإصبع اليُسرى. ولكن أثناء تحرُّك الإصبع اليُمنى نحوَ المنتصف، يزداد وزن العصا الذي تتحمَّله الإصبع، وكذلك يزداد الاحتكاك المُنزلق، إلى أن يفوق الاحتكاك عند هذا الموضع الاحتكاك الواقع على الإصبع اليُسرى. ثم تتوقَّف الإصبع اليُمنى وتبدأ الإصبع اليُسرى في الانزلاق. وسرعان ما تدعم الإصبع اليُسرى الكثير من الوزن حتى إنه يتوقَّف وتبدأ الإصبع اليُمنى في التحرُّك مرة أخرى. وتتكرَّر الدورة إلى أن تقترِب إصبعاك من منتصف العصا، ثم تنحو العصا إلى السقوط من فوق إصبعَيك.

قصة قصيرة

(١٧٣) شدُّ الحبل العملاق

في مدينة هاريسبرج، بنسلفانيا، ١٣ يونيو ١٩٧٨، حاول نحو ٢٢٠٠ طالب ومدرس أن يسجلوا رقمًا قياسيًّا عالميًّا في لعبة شدِّ الحبل. بلغ طول الحبل النيلون المجدول ٦٠٠ متر، وسُمكه ٢٫٥ مليمتر وصُمِّمَ لتحمُّل قوة تبلغ ٥٧ ألف نيوتن (١٣ ألف رطل). ورغم ذلك، وبعد مرور فترةٍ وجيزة على بَدء المسابقة، تمزَّق الحبل فجأة. فقد أرخى المُتسابقون المَوجودون بالقُرب من المنتصف أيديهم عن الحبل وواصل المُتسابقون الأبعد مسافةً جذب الحبل؛ ومِن ثمَّ انزلق الحبل سريعًا عبْر بعض الأيادي. وفقد ما لا يقلُّ عن أربعة طُلَّاب أصابعهم أو أطراف أصابعهم من الاحتكاك.

(١٧٤) التصويب عبْر المُنحدَر

هبْ أنك ضبطتَ جهاز تصويب بندقية لمسافة مُعينة أثناء وجودك في نطاق التصويب. إذا صوبت على هدفٍ على بُعد نفس المسافة ولكنك إما أعلى مُنحدَر أو أسفله، فهل ستستقرُّ الطلقات في الهدَف تمامًا أم أعلى ممَّا ينبغي أم أدنى مما ينبغي؟

الجواب: ربما من المُثير للدهشة أنَّ الرصاصات ستستقرُّ أعلى ممَّا ينبغي عندما تُصوِّب البندقية إمَّا أعلى المنحدَر أو أسفله. ومن أجل ضبط جهاز التصويب، لا بدَّ أن تضرب المسافة الفاصلة عن الهدَف في جيب زاوية المنحدَر نسبةً إلى المستوى الأفقي.

(١٧٥) تشغيل سيَّارة على طريق زَلِق

عندما يكون الطريق زلقًا وتكون السيارة يدوية التحكُّم، هل ينبغي أن تضع ناقلَ الحركة على السرعة الأولى أم الثانية؟

الجواب: نظرًا لأنَّ الطريق زلِق، فإن الاحتكاك الواقع على الإطارات يتمُّ التغلُّب عليه بسهولة، وفي هذه الحالة تنزلق الإطارات. ومن أجل تفادي الانزلاق، أنت تُريد في البداية قدرًا قليلًا من عزم الدوران ليقع على العجلات. لعلك تكون قادرًا على استخدام السرعة الأولى إذا ما جذبتَ ناقلَ الحركة بسلاسة وحذَر؛ وإلا ينبغي عليك أن تنقل إلى السرعة الثانية لتقليل عزم الدوران.

(١٧٦) مُوازنة الإطارات

عند وضع إطارٍ جديد حول عجلةٍ ما، يجب «موازنته»، وهو إجراء يتمُّ فيه ربط ثقلٍ صغير، وهو كتلة من الرصاص، إلى حافة الإطار. إذا لم يكن الإطار متوازنًا، فلن يتدحرَجَ الثقل بسلاسة وإنما سيهتزُّ أو يرتطم بإطار التثبيت. تُعزى كلتا المُشكلتَين إلى حقيقة أن كتلة العجلة لا تنتشر بالتساوي حول المركز، كما لو أن العجلة لها كتلة إضافية عند موضعٍ ما بداخلها. وعندما تتوازَن العجلة، فإن كتلة الرصاص تُوازِن الكتلة الإضافية، وبعد ذلك تسير العجلة على نحوٍ أكثر سلاسة.

إحدى الطرق لموازنة العجلة هي أن تضعها على حامل طاولة مائل مُزوَّد بميزان الاستواء. يكون الحامل والعجلة أشبَهَ بأرجوحة التوازُن الموجودة في ملعب الأطفال حيث تُسبِّب الكتلة الإضافية مَيلًا نحوَ اتجاهٍ واحد. ستضع كتلة من الرصاص على الجانب المقابل من المَيل ثم تُوازِن الثقل باستخدام قواطع إلى أن يستوي الحامل، وهو ما سيدلُّ عليه ميزان الاستواء. وهذه التقنية يُطلَق عليها «التوازن الاستاتيكي».

أما في «التوازن الديناميكي»، فالعجلة تدور أفقيًّا حول مركزها. تتسبَّب الكتلة الإضافية على جانبٍ واحد في جعل العجلة تترنح، ولكن عند إضافة ثقل إلى الإطار وتشذيبه على نحوٍ ملائم يختفي الترنُّح.

هل تقنِيتا التوازُن مُتماثلتان؟ بعبارة أخرى، هل كلتا التقنيتَين تمنعان الاهتزاز والاصطدام؟

الجواب: تقنيتا التوازُن غير مُتماثلتَين؛ فالتوازُن الاستاتيكي يُقلِّل الاصطدام، في حين التوازُن الديناميكي يُقلِّل الاهتزاز. وعلى الرغم من أن الثقل قد تنتهي به الحال في المَوضع نفسه، فإنه سيَتشذَّب بأحجامٍ مختلفة في التقنيتَين.

لكي ترى الاختلاف، تأمَّل أولًا التوازُن الاستاتيكي في وضعية أرجوحة التوازُن. يخلق الوزن الإضافي عند أحد جانبَي العجلة عزْم دوران يحاول أن يُدير العجلة في اتجاهٍ واحد حول مركزها. ويتوقف حجم عزم الدوران على حجم الكتلة الإضافية وعلى المسافة الأفقية الفاصلة بين المركز. وتخلق الكتلة عزم دوران في الاتجاه المُعاكس. ونظرًا لأنه لا بدَّ أن يكون عزم الدوران واقعًا على إطار تثبيت العجلة، فإنَّ المسافة الفاصلة بين المركز تكون ثابتة. هكذا، لكي تُوازِن عزمَي الدوران، تبدأ بكتلة رصاص ثم تُشذِّبها حتى يتناسَب عزم

دوَرانها مع عزم الدوران الآخر. وعندما تُرَكَّب العجلة في السيارة، فإنها لن تصطدم بإطار التثبيت الخاص بها.

ويتوقَّف الاهتزاز على العُمق الذي تقبع عنده الكتلة الإضافية داخل العجلة. مرة أخرى تأمَّل العجلة حين تكون في وضعٍ أفقي، فإذا كان لها أن تدور بسلاسة، فلا بدَّ أن تدور حول المحور الرأسي المار عبْر مركزها. ورغم ذلك، فالكتلة الإضافية المدفونة داخل العجلة تجعلها تدور حول المحور المائل بعيدًا عن الخط الرأسي؛ ومِن ثمَّ تهتزُّ العجلة. ومن أجل تعديل محور التدوير، تُرْبَط كتلة إضافية في موضعٍ ما على حافة الإطار كما كان في السابق، ولكنها الآن لا بدَّ أن تكون ذات حجمٍ مختلف، وربما يختلف موضعها أيضًا. وعلى الرغم من أنَّ ذلك الإجراء يُقلِّل الاهتزاز، فإنه لم يعُد يُوازن عزمَي الدَّوَران المُتأرجِحين، ولا يزال يُوجَد قدْر من الاصطدام. ونظرًا لأنَّ الاصطدام المُتبقِّي يكون صغيرًا عادةً، يُعتبر التوازُن الديناميكي هو التقنية الأفضل من بين تقنيتَي التوازن.

(١٧٧) لعبة التصويب على الزجاجات

أثناء التجوُّل في المهرجانات الاحتفالية، قد تُصادِفك لعبة التصويب على الزجاجات باستخدام ثقل بندول يتدلَّى في مستوى الزجاجة. يُوضِّح لك الشخص المسئول عن اللعبة أنه غير مسموح لك أن تؤرجِح الثقل مباشرةً نحوَ الزجاجة، وبدلًا من ذلك، عليك أن تعمل على ضرب الزجاجة بالثقل في أثناء أرجحة العودة. لا يبدو الأمر شديد الصعوبة. أليس كذلك؟ فمن خلال التدريب قليلًا على الأرجحة، من المُفترَض أن تفوز بالجائزة. أليس كذلك؟

الجواب: إنها لعبة مُضلِّلة؛ لأنَّ الثقل دومًا سيلتفُّ حول الزجاجة إذا مرَّ دون أن يلمسها أثناء أرجحة الانطلاق. ومن أجل أن يصطدم الثقل بالزجاجة أثناء أرجحة العودة فقط، فمن شأن الزَّخم الزاوي الخاص بالثقل أن يتغيَّر أثناء الرحلة، ورغم ذلك فلا يقع عليه عزم دَوران يرغمه على حدوث ذلك. ومع ذلك، ربما تحتال على الموقف وتلوي الحبل قبلَ أن تُطلِق الثقل. ومِن ثَمَّ، يلتفُّ الثِّقَل حول مركزه أثناء الأرجحة، وقد يُواجِه قوًى مُنبعثة من الهواء المار مماثلة للقوى التي تُواجهها الكرة أثناء الرمية المُنحنية في لعبة البيسبول. وتلك القوى يُمكن أن تُغير من أرجحة العودة بحيث يصطدم الثقل بالزجاجة.

(من الأفضل أن تتوخَّى الحذر؛ لأنه ليس من دواعي سرورك أن ترى المسئول عن اللعبة غاضبًا.)

(١٧٨) الكأس المُعلَّقة، على وشْك التحطُّم

اربط كأسًا زجاجيةً أو شيئًا آخر ثقيلًا نوعًا ما إلى جسمٍ أصغرَ أو أخفَّ وزنًا، مثل مِمحاةٍ مطاطية، بواسطة حبلٍ يبلغ طوله مترًا. امسك قلمًا في مستوًى أُفقي، ولفَّ الحبل حول القلم، ثم اجذِب الجِسم الأخفَّ وزنًا ناحية اليسار أو اليمين حتى تصير الكأس أسفل القلم مباشرة والجسم الأخف وزنًا في مستوًى أفقي تقريبًا مع القلم. إذا ما تركتَ الجسم الأخفَّ وزنًا، ما الذي سيحدُث؟ أعرف أنه سؤال سخيف. ستجذب الكأس الثقيل الحبل (وفي النهاية الجسم الأخفَّ وزنًا) من فوق القلم أثناء السقوط، حتى يتهشَّم الكأس على الأرضية. أليس كذلك؟

الجواب: بمجرَّد أن تترك الجسم الأخف وزنًا، فإنه يبدأ السقوط في حين ينجذب أيضًا نحوَ القلم بواسطة الحبل وذلك بسبب الكأس المُتساقطة. والحركة المُقترِنة تعني أن الجسم الأخف وزنًا يلتفُّ حول القلَم بنصف قُطر مُتناقص. الموقف أشبه نوعًا ما بالمُتزلِّج على الجليد، الذي يضمُّ ذراعَيه أثناء الدوران على أطراف أصابعه، بحيث تزداد سرعة الدوران من أجل الحفاظ على الزخم الزاوي. هنا يجب الحفاظ على الزخم الزاوي؛ لأنه لا يُوجَد عزم دوران لتغييره. ومن ثَم، يزداد مُعدَّل دوران الجسم الأخف وزنًا، وهو ما يزيد الشدَّ الواقع على السلك، ويُبطِّئ سقوط الكأس. وبمجرَّد أن يُلفَّ الجسم الأخف وزنًا عدَّة مرات حول القلم، تكون القوة الواقعة على الكأس كافيةً لإيقاف هبوط الكأس؛ ومِن ثمَّ لا تصل الكأس إلى الأرضية مطلقًا.

(١٧٩) كسْر سِنِّ المِثقاب

إذا خُفِضَ سنُّ مثقابٍ عالي السرعة بشدَّة بالغة أثناء العمل به على سطحٍ ما، لماذا ينكسر السن؟

الجواب: القوى الواقعة على طرف السن تنحو إلى ثني السنِّ قليلًا. إذا كانت سرعة الدوران أكبر من قيمةٍ حرجةٍ مُعينة، فإن هذا النتوء البسيط سرعان ما يزداد ليصل إلى حدِّ انكسار السن.

(١٨٠) الساعات المُتأرجِحة

كانت ساعة الجيب، التي انتشرت في عصورٍ سابقة، تُحافظ على التوقيت المضبوط عند ارتدائها، لا حين تتدلَّى من سلسلة. فعندئذٍ قد تُقدِّم الساعة أو تؤخِّر ١٠ دقائق أو أكثر كل يوم، بينما تتدلَّى أيضًا بغموض كالبندول. وروى أحد المُحقِّقين في هذا الأمر مشهدًا غريبًا لحائطٍ مليء بساعات تتدلَّى من سلاسل وتتأرجح بخفَّة. ما سبب هذا التصرُّف الذي يعكس تذبذب التوقيت؟

الجواب: تحدُث حركة البندول بسبب الاهتزازات الدورانية الخاصَّة بعجلة الميزان (جزء من ماكينة الساعة) عندما يقترب تردُّد اهتزازات العجلة من التردُّد الخاص بأرجحة جسم الساعة. وعندما يكون تذبذب العجلة أقلَّ نوعًا ما من تردُّد الأرجحة، لا تكون الحركتان مُنسجمتَين ومِن ثَمَّ يتقدَّم توقيت الساعة. وعندما يكون تذبذب العجلة أعلى بعض الشيء من تردُّد الأرجحة، يتأخَّر التوقيت.

قصة قصيرة

(١٨١) تسطيح جسر البوابة الذهبية

في عام ١٩٨٧، واحتفالًا بالذكرى السنوية الخمسين لبناء جسر البوابة الذهبية، استقبل الجسر جموعًا من المُشاة ساروا عليه بمناسبة الاحتفال بالجسر المَهيب. وقد ظهرت أعداد غفيرة من الأشخاص على الجسر. وعندما احتشد ٢٥٠ ألف شخصٍ على الجسر، تسطح الجزء الأوسط منه بدلًا من أن يتقعَّر كالمُتوقَّع، وتراخَت بعض الحوامل الداعمة، وبدأ الجسر يتأرجَح يمينًا ويسارًا (كما حدَث مع جسر الألفية في لندن عام ٢٠٠١). وتحوَّل يوم الاحتفال هذا إلى اختبارٍ مُفاجئ لمتانة جسر البوابة الذهبية. ولحُسن الحظ فقد اجتاز الاختبار.

(١٨٢) ترنُّح عربات القطار

في التصميم التقليدي للقطارات، تكون العجلات «مخروطية» (مائلة)، ومُقيَّدة من خلال فلانشة داخلية لتبقى على القضبان، ومُتَّصِلة في أزواجٍ من خلال محور العجلة. وعادةً ما تكون القضبان — ذات القمَّة المُستديرة — مائلة إلى الداخل قليلًا. عندما يتحرَّك القطار

على طول مسارٍ مُستقيم، لماذا تتأرجح المقصورات أو العربات يمينًا ويسارًا، وهي حركة يُطلَق عليها «الترنح»؟

والترنُّح لا يحدُّ من سرعة القطار وحسب، وإنما ينحو أيضًا إلى تشويه القضبان وأرضية السكة الحديدية. ونظرًا لأنَّ التآكُل الناجم عن ذلك لا يكون مُتساويًا على الجانبَين الأيسر والأيمن، تميل العربات التي تجرُّها القاطرة لكي تُوازِن التآكل على الجانبَين.

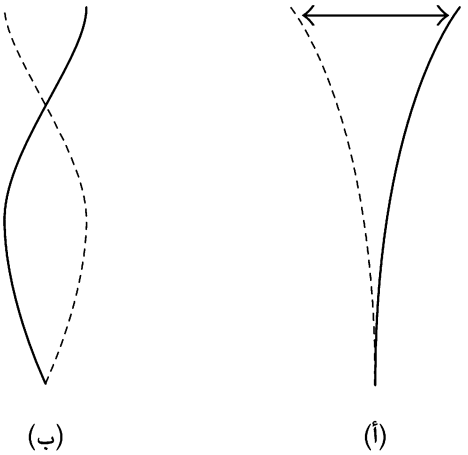
الجواب: إذا تحرَّكت العربة ناحية اليمين مثلًا، تقطع العجلة الموجودة ناحية اليمين نصفَ قطرٍ كبيرًا، في حين أنَّ العجلة الموجودة ناحية اليسار تقطع نصف قطرٍ أصغر، بسبب الشكل المائل لكلِّ عجلة. ونظرًا لأنَّ العجلات مُرتبطة بعضها ببعض بإحكام، فإنَّها تنعطِف بالمُعدَّل نفسه، ولكن التبايُن في مسافة الانعطاف يعني أن العجلات الموجودة ناحية اليمين تقطع مسافةً على المسار أطول من العجلات الموجودة ناحية اليسار في نفس الفترة الزمنية. يتسبَّب الاختلاف في السرعة على طول المسار في انحراف محور العجلة وتسير العربة مُعوجَّة على طول المسار إلى أن تصير على يسار المركز. وحينئذٍ ينعكس الموقف. إذا استمرَّت الاهتزازات يُوصَف القطار بأنه «يتأرجح» بمعنى أنه «يسعى» إلى موضعٍ مُستقر.

وقد يتسبَّب انحراف عارض في بدء حركة الترنُّح، إلا أن قوى الاحتكاك الناجمة عن اعوجاج القضيب والعجلات بسبب وزن القطار يمكن أن تتسبَّب في الاهتزاز. فإذا كانت سرعة القطار أقل من قيمةٍ حرجة معينة، تختفي الاهتزازات الناجمة من الانحراف. ولكن إذا كانت السرعة أعلى تزداد الاهتزازات، والفلانشات وحدَها هي التي تحمي القطار من الخروج عن المسار. وأحيانًا تكون الاهتزازات شديدة جدًّا حتى إن العجلة تخرج من القضبان رغم وجود الفلانشات.

(١٨٣) اهتزاز هوائي السيارة

ربما تهتز بعض أنواع الهوائيات الرأسية الخاصة بالسيارات، ولا سيما الأنواع الشبيهة بالسوط، أثناء قيادتك للسيارة. لماذا يهتزُّ الهوائي بالنَّسَق الموضح في شكل ١-٥٥أ بسبب السرعات المنخفضة والمتوسطة، وبالنسق المُوضَّح في الشكل ١-٥٥ب بسبب السرعات الأعلى؟

الجواب: لو ثبَّتْنا الهوائي بملزمةٍ وجعلناه يهتزُّ بطريقة أو أخرى، فإنه سيهتزُّ بنسق تردُّد يُطلق عليه «النسق (أو النمط) الرنيني» عند «تردُّدات رنينية». ونحن نُنشئ «الرنين»



شكل ١-٥٥: بند ١-١٨٣: هوائي مهتز (أ) بسرعة منخفضة و(ب) بسرعة أعلى.

عندما تحدُث الاهتزازات بأحد هذَين النمطين. يُطلق على النسق الأبسط «نسق التردُّد الأساسي»، الذي يهتز بأقل تردُّدٍ رنيني (شكل ١-٥٥أ). وفي هذا النسق لا يتحرك الجزء السفلي من الهوائي (لأنه مُثبَّت في مكانه)، في حين يتحرَّك الجزء العلوي بأقصى حد، وأما الأجزاء الوسطى فتتحرك لمسافات متوسطة. والنسق التالي الأكثر تعقيدًا، «النسق التوافقي الأول»، به جزء خالٍ من الاهتزازات يقع في مكانٍ ما أسفل الجزء العلوي. عندما يكون الهوائي على سيارة مُتحرِّكة، ينحو الهواء المُتحرك إلى خلق دوَّامات على الجزء الخلفي من الهوائي. والتفاوت في ضغط الهواء بسبب هذه الدوَّامات يجعل الهوائي يهتز. عند السرعات المنخفضة وحتى المتوسطة، يكون نسق التردُّد هو النسق الأساسي. وعند السرعات الأكبر، حينما تكون الدوَّامات التي يكونها الهوائي ذات مُعدَّل أكبر، يظهر النسق التوافُقي الأول.

(١٨٤) صهريج منع التمايل في السفن

عادةً ما يكون تمايُل السفينة أمرًا مُقلقًا جدًّا، ولكن إذا ضربت الأمواج جانب السفينة بنفس تردُّد التمايُل الذي تشهده السفينة، يُمكن أن يشتدَّ التمايُل ليصِل إلى درجةٍ خطيرة.

(هذا التوافُق في التردُّد هو مثال على «الرنين»، ويمكنك أن تلاحظ تراكمًا مُشابهًا للاهتزازات إذا دفعتَ طفلًا يجلس على أرجوحة في كلِّ مرة يتأرجح عائدًا إليك.) ومن أجل تقليل درجة الخطورة، كانت بعض السفن في الماضي تُزَوَّد بصهريجٍ يمتدُّ بعرض السفينة وكان جزء منه يُملأ بالمياه. كانت أبعاد الصهريج تُحَدَّد بحيث يكون لخضخضة المياه داخل الصهريج نفس تردُّد تمايُل السفينة. ألا يبدو هذا خطأً تمامًا، أليس الخضخضة ستزيد من درجة التمايل؟

الجواب: هبْ أنَّ الأمواج تصطدم بالجانب الأيمن من السفينة بنفس التردُّد الرنيني للسفينة. تمايل السفينة لا يكون فوريًّا، وإنما يتأخَّر بمقدار ربع خطوة، بسبب كتلة السفينة، بمعنى أنه يتأخَّر بمقدار رُبع الحركة الكاملة للتمايُل يسارًا ويمينًا. وعلى نحوٍ مُماثل، تتأخَّر خضخضة المياه في الصهريج عن حركة تمايل السفينة بمقدار رُبع خطوة أخرى، وهو ما يجعلها تتأخر نصف خطوة بعد اصطدام الموجة بالسفينة. ومِن ثَمَّ، عندما تحاول الأمواج أن تُميل السفينة ناحية اليسار، تحاول حركة الخضخضة داخل الصهريج أن تُميل السفينة ناحية اليمين؛ ومِن ثمَّ تبقى السفينة في وضعٍ معتدل.

اسْتُخدمت صهاريج منع التمايل أولًا في السفن الألمانية وذلك في مطلع القرن العشرين. وعلى الرغم من أنها حقَّقت نجاحًا في الطرق البحرية المعتادة، فإنها أثبتت عدم جدارتها عند اشتداد الأمواج، حتى إنها في بعض الحالات كانت تعزز التمايل أكثر.

(١٨٥) تموُّج الطرُق

الكثير من أسطح الطرق غير الممهدة تكون سَلِسَة في البداية، ولكن سرعان ما يظهر عليها تعرُّجات مرتفعة ومنخفضة غير عميقة، تفصلها مسافات تتراوَح ما بين نصف متر ومتر كامل، على طول الطرُق التي تقطعها السيارات. لا يُمكن أن تكون هذه التعرُّجات المنتظمة بسبب التعرية المناخية كما هي الحال مع حفر الطريق المعتادة. فما سبب هذه التعرُّجات؟ ولماذا لا تختفي هذه التعرُّجات ويصبح الطريق ممهدًا بسبب اصطدام العجلات بالأجزاء المرتفعة؟ يمكن ملاحظة تموُّجات مشابهة على قضبان القطارات والترام والمسارات المُنحدِرة التي يقطعها المُتزلِّجون؟ هل تتنقل التعرُّجات على طول الطريق والقضبان والمسارات؟

الجواب: تبدأ التعرُّجات المُتموِّجة على الطريق بمجرَّد أن يظهر أيُّ نتوءٍ على الطريق الممهَّد في البداية. عندما تصطدم الإطارات بهذا النتوء بسرعة كافية، فإنها قد تثِب قليلًا

ثم تنغرس في الطريق حين تهبط مرة أخرى. وحتى إن لم تكن الإطارات ترتفع حقًّا عن سطح الطريق، فإن النزوع إلى الوثْب يُخفِّف من الوزن الواقع على الإطار لفترةٍ وجيزة أولًا ثم يجعل العجلة تهبط على الطريق بشدَّة بالغة. يتسبب الضغط لأسفل في حفرة ضحلة يتعيَّن على الإطارات الخروج منها ومِن ثَمَّ تنحو إلى الوثب مرة أخرى. ومع زيادة عدد السيارات المسافرة على الطريق، تتعزَّز التعرُّجات وتتمدَّد على طول الطريق، ولكنها لا تنتقل إلى مكانٍ آخر.

(١٨٦) رؤية جانب واحد فقط من القمر

لماذا لا نرى سوى جانبٍ واحد فقط من القمر؟ (يوجد تبايُن فيما نرى، ولكن ليس كثيرًا.) نظرًا لأن القمر يدور حول الأرض، ألا ينبغي لنا أن نرى السطح بأكمله؟

الجواب: تختلف قوة مجال الجاذبية الأرضية باختلاف المسافة الفاصلة عن الأرض. وذلك يعني أن مجال الجاذبية الواقع على الجانب البعيد من القمر أضعف من الجانب القريب. وهذا التفاوُت يخلق بروزًا مَدِّيًّا على سطح القمر، على الجانب البعيد وعلى الجانب القريب، ومن ثَم لا يكون القمر كرويًّا. وبسبب هذه البروزات، يجعل مجال الجاذبية الأرضية القمر يدور حول مركزه كما يدور حول الأرض. والنتيجة هي أن نفس الجانب (تقريبًا) من القمر يكون مُواجهًا للأرض. والكثير من الأقمار الطبيعية في المجموعة الشمسية تُواجِهُ الكواكب التي تدور حولها بالجانب نفسه.

(١٨٧) أقمار الاستطلاع

عند رصد الأنشطة في منطقةٍ ما على سطح الكرة الأرضية من الفضاء الخارجي، تُصوِّر أقمار الاستطلاع المنطقة. وتُضبَط الأقمار الصناعية بتوقيتٍ مُعيَّن بحيث إذا توقَّف قمر ما عن رصد المنطقة، يتولَّى قمر آخر المهمة. أليس من الأسهل تخصيص قمر صناعي واحد لرصد المنطقة، ليدور في مدارٍ بنفس السرعة التي تدور بها المنطقة محلُّ الرصد والاهتمام حول محور دوران الأرض؟ ربما تبدو تلك الاستراتيجية أفضل، ولكن من المستحيل ترتيب هذا الأمر بالنسبة لمعظم المناطق على سطح الكرة الأرضية. لماذا تؤتي الاستراتيجية الأسهل ثمارها، وأين يكون ذلك؟

الجواب: يظلُّ القمر الصناعي يدور في المدار بسبب قوة الجاذبية الواقعة عليه من الأرض. وتلك القوة موجهة دومًا نحوَ مركز الأرض؛ ومِن ثَمَّ لا بدَّ أن يكون المدار حول

المركز. وتلك الحقيقة تستبعد احتمالية بقاء القمر الصناعي فوق مدينة نيويورك، مثلًا؛ لأنَّ المدار سيكون حينئذٍ حول النصف الشمالي من الكرة الأرضية بدلًا من مركز الأرض. ورغم ذلك، يستطيع القمر الصناعي، «القمر الثابت بالنسبة للأرض» مثلًا، أن يبقى فوق نقطة ما على خط الاستواء؛ لأن المدار سيكون حول المركز. لا بدَّ أن يُوضَع القمر الصناعي على ارتفاع مناسب (حوالي ١ / ١٠ المسافة إلى القمر) لكي يدور بنفس السرعة التي تدور بها النقطة الموجودة على خط الاستواء حول محور دوران الأرض. وبالنسبة لأي نقطة أخرى على سطح الكرة الأرضية، لا بدَّ أن يلتقط قمر الاستطلاع الصور على امتداد خطٍّ مائل.

(١٨٨) مقاومة الهواء وسرعة القمر الصناعي

معظم الأقمار الصناعية تدور حول الأرض عبْر طبقاتٍ رقيقة من الغلاف الجوي وتواجه قدرًا ضئيلًا من مقاومة الهواء. من المُفترَض أن تُبطِّئ المقاومة القمر الصناعي مثلما تُبطِّئ مقاومة الهواء الواقعة على سيارة متحركة من سرعة السيارة. وعلى الرغم من ذلك، في حالة القمر الصناعي، فالمقاومة تزيد من السرعة. كيف تستطيع قوة مُعيقة أن تتسبب في زيادة السرعة ومن ثم الطاقة الحركية؟

الجواب: تُقلِّل مقاومة الهواء الطاقة الكلية للقمر الصناعي، التي تتكوَّن من الطاقة الحركية وطاقة الوضع، ويهبط القمر الصناعي تدريجيًّا إلى مدارٍ أصغر. ومع الهبوط، تنقُص طاقة الوضع للقمر الصناعي، ويتحوَّل نصف هذا النقصان إلى طاقةٍ حرارية عن طريق الاحتكاك بالغلاف الجوي، ويتحوَّل النصف الآخر إلى طاقة حركية، ومن ثَم تصير زيادة السرعة ضرورية بسبب المدار الأصغر حجمًا. وبدراسة الأمر، ربما لا تكون النتيجة مُدهشة؛ فبطبيعة الحال حين تسقط الأجسام نحوَ الكرة الأرضية تزداد سرعتها.

(١٨٩) مسار سفينة الفضاء المُتجهة إلى القمر

عند إرسال سفينة فضاء إلى القمر، لماذا يُشبِهُ مسارها شكل الرقم ثمانية باللغة الإنجليزية، 8، بدلًا من شكل بيضاوي يضمُّ الكرة الأرضية والقمر؟

الجواب: يستلزم المسار، الذي يُشبه شكل الرقم ثمانية باللغة الإنجليزية، طاقةً أقلَّ من جانب سفينة الفضاء؛ لأنها تبقى قريبة من الخط الواصل بين مركزَي الأرض والقمر

أغلب وقت الرحلة. ونظرًا لأنه على طول ذلك الخط تتنافس قوى الجاذبية الخاصة بالأرض والقمر، تكون مُحصِّلة القوى الواقعة على سفينة الفضاء في ذلك المسار أقلَّ ممَّا عليه الحال إذا اتخذت السفينة مسارًا بيضاويًّا. وبالتبعية، تتطلَّب السفينة طاقةً أقلَّ للتغلُّب على محصلة القوى.

(١٩٠) جاذبية الأرض والشمس الواقعة على القمر

نظرًا لأنَّ القمر يدور في مدارٍ حول الأرض، لا بدَّ أن تتغلَّب قوة الجاذبية الأرضية الواقعة عليه على جاذبية الشمس. أليس كذلك؟ حسنًا، الإجابة لا؛ لأن جاذبية الشمس تزيد عن ضعف جاذبية الأرض. إذن، لماذا لا نفقد القمر؟

الجواب: لا تُهيمن قوَّة الشمس على حركة القمر؛ فالقمر يدور حول الشمس. والقوَّة الأصغر من جانب الأرض تشوِّش على الحركة الأساسية وتتسبَّب في تكوين حلقات داخل المدار. يُمكننا أن نستوعب الحركة بالقول بكلِّ بساطة: «إن القمر يدور حول الأرض، وتدور الأرض حول الشمس.»

(١٩١) تأثير الاندفاع بالجاذبية

إذا اقتربت كبسولة فضائية من كوكبٍ ما بالقدْر الكافي، ربما تواجه «مساعدة الجاذبية» أو «تأثير الاندفاع بالجاذبية»؛ ومِن ثمَّ تكتسب طاقة. ولكن أليست هذه الفكرة خاطئة؟ تخيَّل أنك ترصد الكبسولة من فوق الكوكب. بينما تقترِب الكبسولة، من المُفترَض أن تكتسب طاقة بسبب قوة جاذبية الكوكب، ولكن ألا تُفقَد الطاقة مع ابتعاد الكبسولة؟

الجواب: تكمن المشكلة، حسب التفسير المقدَّم، في موقعك؛ فالكوكب الذي تُوجَد عليه يتحرَّك. من تلك الزاوية، لن تكتسب الكبسولة طاقة فيما يبدو. ولكن انظر من زاوية شخصٍ مَوضعُه ثابت بالنسبة إلى الشمس. هذا الراصد سيشاهد الكبسولة تنجذِب إلى الكوكب بجاذبيةٍ هائلة. وإذا مرَّت الكبسولة بالقُرب من الكوكب عند حافة مدار الكوكب، فسيسحب الكوكب الكبسولة على طول المدار فعليًّا ومِن ثَمَّ تكتسب الكبسولة طاقة. يفقد الكوكب قدرًا مُساويًا من الطاقة، ولكن التغيير غير قابل للقياس بسبب كتلة الكوكب الضخمة، في حين أنَّ زيادة طاقة الكبسولة تكون ملموسة بسبب كتلة الكبسولة الأصغر بكثير.

(١٩٢) رسم خريطة الهند

في الماضي، حين أُجري مسح أراضٍ للهند، قيل إن القياسات لم تكن دقيقةً بعض الشيء؛ لأن خيط الشاقول لم يكن يتدلَّى بالضبط على امتداد خطٍّ رأسي، لا سيما في الجزء الشمالي من البلاد. لماذا يُحتمَل أن تكون هذه القصة حقيقية؟

الجواب: كتلة الطرف السُّفلي من خيط الشاقول يمكن أن تنجذِب نحوَ جبال الهيمالايا بمقدار عدَّة ثوانٍ قوسية بسبب قوَّة الجاذبية الآتية من كتلة الجبال. في مناطق أخرى، أدَّى توزيع الكتلة غير المُتساوي إلى أخطاء مُشابهة.

(١٩٣) الحلاقة بشفرة مزدوَجة

إذا حلق أحدهم باستخدام ماكينة حلاقة ذات شفرة مزدوجة، هل تُوجَد سرعة مثالية ينبغي له أن يسحب بها الشفرة على الجلد، أم هل ينبغي أن يسحب الشفرة بأسرع ما يُمكن أو بأبطأ ما يمكن؟

الجواب: عندما تلُامِس الشفرة الأولى الشعرة النابتة من الجلد، فإنها تُمزِّق الشعرة عند سطح الجلد ثُمَّ تسحب الشعرة عبْر الجلد في اتجاه حركة الشفرة، لتنتزع بذلك الجزء المدفون من الشعرة تحت الجلد إلى الأعلى من موضعها الأصلي. وعند مرحلةٍ ما من عملية النزع هذه، تقطع الشَّفرة الأولى الشَّعرة الممتدَّة فوق سطح الجلد.

يرتدُّ باقي الشعرة إلى اتجاهها الأصلي وتبدأ في الانكماش إلى داخل الجلد. وإذا لامست الشفرة الثانية الشعرة بعد أن ارتدَّت وقبل أن تنكمِش، تستطيع الشفرة أن تنتزع جزءًا أكبر من الشعرة، ومن ثَم تُؤجِّل الحاجة إلى الحلاقة المرة القادِمة. ومن أجل إجراء حلاقة دقيقة، لا ينبغي تحريك ماكينة الحلاقة بسرعة بالِغة لدرجةٍ لا يحدُث معها ارتداد الشعرة أو ببطءٍ بالغ لدرجة أن الانكماش يحدُث بالكامل. تُقدر السرعة المثالية بـ ٤ سنتيمترات في الثانية الواحدة، ولكن القِيمة ستختلف من ماكينة حلاقة لأخرى بسبب اختلاف خصائص البشرة والشعر (لا سيما المرونة).

(١٩٤) سيطرة التعرية النهرية

ثمَّة حجج تؤيد أن الضفة اليُمنى من الأنهار الواقعة في نصف الكرة الأرضية الشمالي تُعاني من التعرية أكثر من الضفَّة اليسرى، والعكس الصحيح في نصف الكرة الجنوبي.

لماذا قد تكون هذه الفكرة صحيحة، على الرغم من أنَّ التأثير ضئيل بالتأكيد وتُخفيه عوامل أخرى؟

الجواب: قد يتسبَّب دوران الأرض في انحرافٍ واضح للأنهار المُتدفِّقة، ناحية اليمين في نصف الكرة الشمالي وناحية اليسار في نصف الكرة الجنوبي. والانحرافات ليست انحرافات حقيقية؛ لأنَّنا نُشاهد الأنهار من سطحٍ دوَّار. ورغم ذلك، فقد تظهر واضحةً تمامًا في الحركات واسعة النطاق، مثل تدفق الهواء في المنظومات الجوية، مُسبِّبةً الدَّوَران عكس عقارب الساعة الذي تشتهر به الأعاصير في نصف الكرة الشمالي. وقد يظهر الانحراف واضحًا على تدفُّق المياه في الأنهار الكبرى، مثل نهر المسيسيبي.

الفصل الثاني

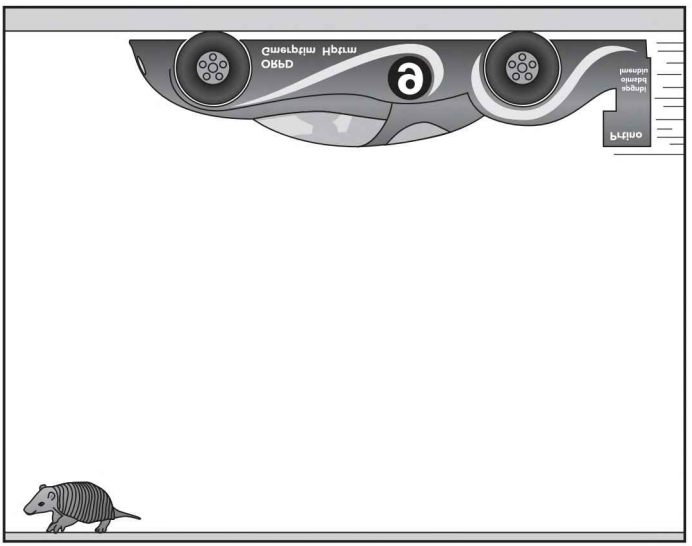
الموائع

(١) سيَّارات السباق على السَّقف

تعتمد السيارة التي تنطلِق في منعطفٍ مستوٍ في سباق سيارات الجائزة الكبرى على الاحتكاك كي تبقى في المُنعطف. أما إذا كانت السيارة مسرعة للغاية، فإن الاحتكاك يتوقَّف وتنزلق السيارة من على المنعطف. في السابق، كان لزامًا على السيارة أن تقطع المنعطفات المستوية ببطءٍ نسبي. إلا أن سيارات السباق الحديثة مُصمَّمة بحيث تندفِع إلى الأسفل على المضمار حرفيًّا كي تمنح الإطارات قدرةً جيدة على التمسُّك بالطريق. وفي الحقيقة، هذا الدفع السُّفلي، أو ما يطلق عليه «الرفع السالب» قوي للغاية حتى إن بعض السائقين يتفاخرون بأنهم يستطيعون قيادة السيارات مقلوبةً رأسًا على عقب على سقْفٍ طويل. فما الذي يُسبِّب الرفع السالب؟ وهل من الممكن حقًّا قيادة سيارة سباق مقلوبة رأسًا على عقب كما حدث خياليًّا مع سيارة سيدان في أول أفلام «رجال ذوي بزات سوداء»؟

يمكن الاعتماد على الرفع السالب عندما تكون السيارة هي السيارة الوحيدة التي تقطع أحد المُنعطفات، كما هي الحال في التجارب التأهيلية، غير أنَّ السائق الماهر يعرف أن الرفع السالب يُمكن أن يختفي أثناء السباق. فما الذي يجعله يختفي؟

الجواب: حوالي ٧٠ في المائة من الرفع السالب في السيارة ناتج عن جناحٍ واحد أو أكثر يعكسون اتجاه الهواء المار فوقها. يُطلَق على بقية الرفع السالب «تأثير الأرض» ويتعلَّق بتدفُّق الهواء أسفل السيارة. وكلما زادت سرعة السيارة، زاد كلا النوعَين من الرفع السالب. في حالة السرعات العالية المُعتادة في سباقات السيارات مثل سباق الجائزة



شكل ٢-١: بند ٢-١.

الكبرى يكون الرفع السالب أكبر من تأثير قوة الجاذبية على السيارة. ولذلك، إذا تحرَّكتِ السيارة من مضمارٍ طبيعي إلى السقف (دون إبطاء السرعة)، فإن الرفع السالب العُلوي حاليًّا سيُوازِن قوة الجاذبية السُّفلية ويزيد. ومِن ثَمَّ، فإن السيارة يمكن بالفعل قيادتها رأسًا على عقِب كما حدَث في فيلم «رجال ذوي بزات سوداء».

ينتج تأثير الأرض عن التدفُّق الضيِّق للهواء أسفل السيارة. فعند ضغط الهواء في ممرٍّ صغير أسفل السيارة، تزداد سرعته على حساب ضغطه. ولذلك، يُوجَد ضغط هواء أقلُّ أسفل السيارة مقارنةً بأعلاها، والاختلاف في الضغط يُثَبِّت السيارة على المضمار. في السباق، يمكن للسائق تقليل المقاومة الهوائية في السيارة باتِّباع سيارة أخرى عن كثَب، ويُعرَف هذا الإجراء باسم «التعقُّب». رغم ذلك، تستطيع السيارة القائدة قطع تدفُّق الهواء المُنتظِم أسفل السيارة المُتعقِّبة، فتمنع تأثير الأرض عليها. وإذا لم يتوقَّع سائق السيارة المُتعقِّبة منع تدفُّق الهواء ومن ثَم يُبطِّئ من سرعته، فمن المُحتمَل أن ينزلق من على المضمار.

كانت «تشابرال ٢ جيه» أول سيارة سباق تستخدِم تأثير الأرض. كان لدَيها مروحتان في المُؤخِّرة لامتصاص الهواء أسفل السيارة من فتحات في المقدمة. كما كانت مزوَّدة برفرفٍ سفلي قريب من الطريق على كلا الجانبَين منع هواء الجانبَين من الدخول إلى التدفُّق. كان الضغط المُنخفِض أسفل السيارة يُبقي السيارة على المضمار عند المنعطفات السريعة، وقلَّلَ تدفُّق الهواء من المروحتَين من تكوُّن الدوَّامات المعتادة خلْف السيارة، فقلَّل مقاومة الهواء في السيارة. ونتيجة لذلك، كانت السيارة سريعة على نحوٍ معقول في أجزاء المضمار المستقيمة وسريعة على نحوٍ لا نظير له في المنعطفات. لقد كانت جيدة جدًّا في واقع الأمر حتى إنها مُنعت من السباقات.

(٢) التعقب

يستفيد سائقو سيَّارات السباق، باختلاف أساليب السباق، بعضهم من بعض عن طريق التعقُّب، حيث تكون السيارة المُتعقِّبة خلف السيارة القائدة على نحوٍ شبه مباشر. من الواضح أن هذا الأمر خطير. فما الفائدة التي يُقدِّمها؟

الجواب: على الرغم من التصميم الديناميكي الهوائي لسيارة السباق، فإنها تواجه مقاومةً كبيرة. أحد مصادر هذه المقاومة هو الاختلاف في الضغط بين مقدمة السيارة ومؤخِّرتها؛ ففي المقدمة يخلق تأثير الهواء ضغطًا عاليًا، وفي المؤخِّرة يتكسَّر تدفُّق الهواء إلى دوَّامات تُقلِّل من ضغط الهواء. ومِن ثَمَّ، فإن فرق الضغط بين المقدمة والمُؤخِّرة يعمل على إبطاء السيارة، مما يجعل السيارة في حاجةٍ إلى استهلاك قدْر أكبر من الوقود كي تُحافِظ على سرعتها العالية.

وإذا سارت السيارة المُتعقِّبة خلف السيارة القائدة، فإنَّ الفائدة ستعود على كلتا السيارتَين؛ فالسيارة المُتعقِّبة تمنع تكوُّن الدوامات عند مؤخرة السيارة القائدة، ويقلُّ فرق الضغط بين مُقدِّمة السيارة القائدة ومؤخِّرتها. يقلُّ تأثير الهواء على مقدمة السيارة المُتعقِّبة؛ ومِن ثمَّ يقلُّ فرق الضغط بين مقدمة السيارة المُتعقِّبة ومؤخِّرتها.

يمكن أن يَستخدِم سائق السيارة المُتعقِّبة أسلوب «اجتياز المقلاع» للدوَران حول سائق السيارة القائدة؛ حيث يتراجع السائق المُتعقِّب نسبيًّا عن السيارة القائدة فيسمح ببدء تكوُّن الدوَّامات خلف السيارة القائدة. تعمل دوَّامات الضغط المُنخفِض على إبطاء السيارة القائدة وسحب السيارة المُتعقِّبة للأمام. وباختيار التوقيت الدقيق يستطيع السائق المتعقب الاندفاع نحوَ منطقة الدوَّامة ثم الالتفات إلى جانب السيارة القائدة.

ويُقال إن جونيور جونسون كان أول من استخدم هذه الأساليب الديناميكية الهوائية في سباق دايتونا ٥٠٠ ناسكار عام ١٩٦٠، الذي ربِحَه رغم أن سيارته صُنِّفت أبطأ سيارة بين سيارات السباق.

ويُستخدَم التعقُّب في رياضات أخرى أبرزها سباق الدراجات. بالإضافة إلى ذلك، فالحيوانات أيضًا تُمارِسه كما يحدُث حين تقود البطَّة الأم صغارها في طابور عبْر البحيرة. بطبيعة الحال لا يتحرك البطُّ بسرعة كافية للقلق بشأن الديناميكا الهوائية، لكن صغار البط يستفيدون من الأثر الهادئ الذي تترُكه البطة الأم خلفَها وهي تتقدَّم الطريق.

(٣) الديناميكا الهوائية للقطارات العابرة

يُنتج القطار فائق السرعة الذي يتحرك بسرعة ٢٧٠ كيلومترًا في الساعة أو أسرع، موجةَ ضغطٍ أثناء اندفاعه في الهواء، فيُجبر الهواء على التدفُّق حول جانبَي القطار وفوقه. ماذا يحدث عندما يسير القطار في نفق؟ ماذا يحدُث عندما يمر قطاران بالمواصفات نفسها مُتقاربَين في اتجاهَين مُتضادَّين؟ إذا مر قطار فائق السرعة أمام شخص يقف بالقُرب من خط السكة الحديدية (مثلما يمكن أن يحدث في محطة لا يتوقَّف فيها القطار)، هل سيكون هذا الشخص مُعرضًا للخطر؟

الجواب: عندما يدخل قطار أحد الأنفاق مُسرعًا، يُمكننا تبسيط الصورة إذا افترضنا أنَّ القطار ساكن وأن الهواء يتدفق مارًّا به. بينما يُجبر الهواء على الاندفاع داخل المكان الضيق المحصور بين القطار وجدار النفق فإن سرعته تزداد. قد يشعر المسافر داخل القطار بانخفاض هذا الضغط في أُذنَيه؛ لأن الهواء المحبوس داخل الأذن يضغط إلى الخارج على طبلة الأذن. (هذا الإحساس شبيه بما تشعر به عندما ترتفع بك الطائرة بسرعة.)

عند مرور قطارَين متجاورَين يقلُّ أيضًا الضغط الموجود بينهما. وإذا كان القطاران داخل نفق، فمن الممكن أن ينخفض الضغط أكثر. في السابق، عندما كانت سرعة القطارات آخذةً في الزيادة، كانت النوافذ تنخلع من القطارات أثناء مرورها في بعض الأحيان.

وسواء أكان المرور في نفق أم في الهواء الطلق، فإن تدفق الهواء حول قطارَين يقترب كلٌّ منهما من الآخر، ويمر أحدهما إلى جوار الآخر ثم يغادر أحدهما الآخر، إنما هو عملية معقدة وتتطلب محاكاة حاسوبية. رغم ذلك، فمن الممكن أن نستخدم توضيحًا بسيطًا لانخفاض الضغط. إن كل قطار يقاوم الهواء من المساحة الموجودة بينهما؛ ومِن ثمَّ ينخفض الضغط بسبب قِلَّة الهواء.

وفي حالة مرور قطار فائق السرعة أمام شخص، فإن موجة الضغط الصادرة عن مقدمة القطار وتدفُّق الهواء الشديد الاضطراب الناتج يمكن أن يُسقِطا الشخص أرضًا، أو يُسقِطاه نحو القطار أو على السكة الحديدية (وهو الاحتمال الأسوأ).

(٤) انهيار جسر تاكوما ناروز القديم

يُظهِر أحد أكثر الفيديوهات الفيزيائية إثارةً الالتِواء العنيف الذي أصاب الجسر القديم في بلدة تاكوما ناروز في السابع من نوفمبر عام ١٩٤١. كانت الرياح معتدلة في ذلك الصباح (حيث بلغت ما يقرب من ٦٨ كيلومترًا في الساعة؛ أي ما يعادل ٤٢ ميلًا في الساعة)، إلا أن الجسر المتين للغاية تَدَمَّرَ في غضون ساعاتٍ قليلة بعد بدء حركات التأرجُح الملتوية.

أثناء تشييد الجسر، أطلق عمَّال البناء عليه اسم الفرس الراكض بسبب مَيله إلى التأرجُح، ممَّا جعل الجسر يُشبه مسار القطار الأفعواني. في الواقع، بعد افتتاح الجسر رسميًّا كان السائقون يتجمَّعون على الجسر بسبب غرابة حركات التأرجُح التي كانت كافيةً في بعض الأحيان لجعل العربات تختفي من زاوية رؤية السائق. وعلى الرغم من أنَّ كثيرًا من الناس أرجعوا انهيار الجسر إلى مَيله إلى التمايُل الشديد، فمن الواضح أنَّ التمايُل ليس له علاقة بانهيار الجسر. فما الذي سبب الانهيار؟

الجواب: كانت عارضة الجسر على شكل حرف H سميك، ومزوَّدة بدعامة تقوية تمتدُّ على طول كل جانب. عندما واجهت الرياح الواجهة المُصمتة لجانب الجسر المُواجه للرياح، تكونت الدوَّامات فوق الجزء الأفقي من الجسر وأسفله. ومع اندفاع هذه الدوَّامات على طول الجزء الأفقي كان الجسر يضطرب حيث تأرجح رأسيًّا مثل العلَم الذي يرفرف في الرياح. كان تصميم الجسر مَعيبًا (وإن لم يكن باستطاعة أحد معرفة هذا الأمر في ذلك الوقت) حيث كان هيكله ضعيفًا في مقاومة كلٍّ من ذبذبات الاهتزاز والالتِواء التي يمكن أن نراها في فيديو انهيار الجسر.

وعندما أصبحت الذبذبات عنيفة (ومخيفة) اضطر شخصان إلى الزَّحف على أطرافهم الأربعة للنزول من الجسر. وصعد أحد أساتذة الجامعة الجسر لإنقاذ كلبٍ تُرِكَ وحدَه في سيارة مهجورة، لكنه تراجع عندما حاول الكلب المذعور عَضَّه. يُوضِّح الفيديو أنه عاد من السيارة محاولًا السير على الخط المركزي المُستقِر نسبيًّا الذي كان الجسر يلتوي حوله. بعد فترة قصيرة، سقط جزء من الجسر وكفَّ الجزء المُتبقي عن التأرجُح، لكن بعد ذلك بدأ التأرجُح من جديد، وسقط جزء كبير من الجزء المُتبقي من الجسر المُمتد على النهر.

رغم أن كثيرًا من مُعلمي الفيزياء استخدموا انهيار الجسر كمثالٍ مُثير على الرنين، فإن انهيار الجسر كان بسبب التأرجُح والالتِواء وليس بسبب الرنين والتمايُل. في الواقع، كان سبب الانهيار رياحًا مُستقِرة نسبيًّا، وليس رياحًا متقطِّعة مُتوافقة مع تردُّد رنين الجسر. أطلق الجسر دوَّامات على نحوٍ شديد الشبَه بالكبل المُعلق في الرياح. ويمكن أن تتسبب هذه الدوامات في تمايل الجسر إذا كان تردُّد ظهورها يساوي تردد رنين اهتزاز الكبل. ورغم ذلك، فلم يكن من شأن التمايل أن يتَّسم بالقوة الكافية لتدمير الجسر.

(٥) الديناميكا الهوائية للمباني

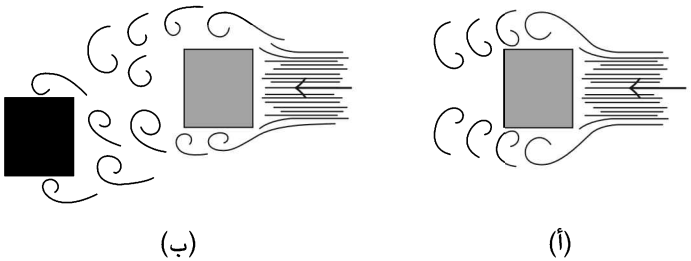
في الأيام التي تكثُر فيها الرياح، لماذا تكون الرياح عاصفة جدًّا بالنسبة للأشخاص الذين يسيرون قريبًا من المباني؟ إذا أردتَ أن تتجنَّب الرياح العاصفة وكنت مُضطرًّا إلى البقاء قُرب المبنى، فأين يجِب أن تقف؟ لماذا تتمايل بعض المباني في الرياح؟ بعض المباني بها منطقة مفتوحة في الدور الأرضي إمَّا للسيارات أو للمُشاة. فلماذا يمكن أن تكون الرياح في هذه المنطقة المفتوحة شديدة القوة؟

الجواب: تدور الرياح حول المبنى وتتكسَّر إلى دوَّامات (أو دوَّارات) عند اجتياز أركان المبنى. (شكل ٢-١٢أ). لذلك سيجد الشخص الذي يسير على الرصيف أنَّ الرياح شديدة للغاية عند هذه الأركان أو قريبًا منها. ستكون الرياح في أقلِّ مستويات الشدَّة خلف المبنى؛ حيث يمكن أن يسود هناك هدوء نسبي. ومن المُحتمَل أن يكون ضغط الهواء في تلك المنطقة أقل، ممَّا يمكن أن يُسبِّب نتوء النوافذ للخارج. وفي الظروف القصوى يمكن أن تنخلع النوافذ.

بالإضافة إلى ذلك، ستصبح الرياح العاصفة أقلَّ شِدةً عند النقطة الواقعة على الجانب المُواجِه للرياح؛ حيث تنقسِم الرياح إلى نصفَين، بحيث يلتفُّ النصف حول المبنى من جانب ويلتفُّ النصف الآخر حول الجانب المُقابل.

وإذا كان المبنى له ممر مفتوح — يمكن للرياح أن تسير فيه — فسوف تزداد سرعة الرياح؛ لأنها تمرُّ عبْر ممرٍّ ضيق. وهذه الزيادة في سرعة الرياح تُسفر عن نتيجتَين؛ أولًا: يمكن أن تُسبب الرياح انحناء المُشاة (بل تطرحهم أرضًا)، ويمكن أن يكون من الصعب فتح الأبواب المُطلَّة على هذا الممر إذا كان لا بدَّ أن تتمايل في الرياح القادمة. ثانيًا: يقلُّ ضغط الهواء في الممرِّ نظرًا لتغيُّر الطاقة لمواجهة الزيادة المطلوبة في سرعة الرياح. لذلك

تُصبح النوافذ والأبواب المُطلة على الممر بارزةً للخارج في الممر. وفي بعض الحالات تتكسَّر النوافذ ويتعذَّر إغلاق الأبواب.



شكل ٢-٢: بند ٢-٥: (أ) منظر علوي لرياح تتكسَّر إلى دوَّامات عند اجتياز أركان المبنى. (ب) المنطقة الواقعة بين المباني المُتعاقبة يمكن أن تكون عاصفة جدًّا.

عندما تتجمع العديد من المباني المُرتفعة يمكن أن يكون تفريق الرياح وتكوين الدوَّامات مُعقدًا. على سبيل المثال، إذا هبَّت الرياح على مبنيَين وكان المبنى الموجود في اتجاه الرياح على مستوًى مائل عن المبنى الموجود عكس اتجاه الرياح، فإن منطقة الضغط المنخفض الواقعة خلف المبنى الموجود عكس اتجاه الرياح يمكن أن تسحب الرياح بعيدًا عن وجه المبنى الموجود في اتجاه الرياح (انظر شكل ٢-٢ب). وفي مواقف أخرى، عندما تكون المباني المرتفعة مُتجمِّعة في شكل مُستطيلات مع وجود شوارع بين التجمعات، فإن الشوارع الموازية للرياح يمكن أن تُصبح أنفاق رياح فعليًّا. وعندما تسير من الجانب المَحميِّ من الرياح الخاص بأحد هذه المباني مُتوجهًا إلى أحد هذه الشوارع التي تحوَّلت إلى أنفاق رياح، فمن الممكن أن تُطرَح أرضًا. علاوة على ذلك، نظرًا لأنَّ الرياح مُوجَّهة إلى الشارع، فإن ضغط الهواء هناك يقلُّ ويجعل النوافذ المواجهة للشارع تبرُز للخارج.

يمكن أن يتسبَّب اختلاف ضغط الرياح عند جانب المبنى المُواجه للرياح في ترنُّح المبنى أو تأرجُحه، وتصبح قمة المبنى هي الجزء الأكثر حركة. يمكن لهذا الترنُّح أن يصيب السكان بالغثيان، ويمكن أن يُصابوا بالغثيان من صوت الهبوب ذي الموجات دون الصوتية والموجات الصوتية المسموعة الذي تُحدِثه الرياح القوية عندما تصنع دوامات

عند زوايا المبنى. والمباني المرتفعة المُعرَّضة للترنُّح في الرياح الشديدة تكون مزوَّدة عادة بأجهزة مُضادة للترنُّح، مثل الكتلة المركبة على النوابض المُثبَّتة فوق السطح بحيث تتحرك الكتلة الثقيلة في اتجاهٍ معاكس لحركة المبنى.

يمكن للرياح الشديدة الناتجة عن إعصارٍ استوائي أو إعصارٍ قمعي أن تُسقط منزلًا أو أي مبنًى كبير نسبيًّا. ويمكن أيضًا أن تقتلِع السقف إما عن طريق الهبوب عليه تحت الحافة المواجهة للرياح أو عن طريق تقليل ضغط الهواء الجوي للغاية فوق السقف بحيث تشدُّ الرياح أجزاءً منه للأعلى وتسحبها بعيدًا. بالإضافة إلى ذلك، فهذه الرياح العاتية لا تستطيع فقط ضرب النوافذ الموجودة في المبنى الموجود على الجانب المواجه للرياح، بل تستطيع أيضًا اقتلاع النوافذ على الجانب المُعاكس للرياح أو على جوانب تكوُّن الدوَّامات.

(٦) الطائرات الورَقية

ما الذي يجعل طائرةً ورقية تُحلق عاليًا؟ وما الذي يحدد الطيران المُستقر مقارنة بالطيران الفوضوي الذي تستمرُّ فيه الطائرة الورقية في الدوَران والرفرفة؟

الجواب: الطائرة الورقية المُثلثة هي سطح مرِن يقابل الرياح وهو مائل بزاوية يُطلَق عليها «زاوية الهبوب». تؤثر على الطائرة الورقية أربعة عوامل: (١) قوة الجاذبية تسحبها للأسفل بطبيعة الحال. (٢) نظرًا لأنَّ وجه الطائرة الورقية يعكس الرياح لأسفل فإنَّ الطائرة تشهد «رفعًا» لأعلى. (٣) تُنتج الرياح أيضًا قوة مقاومة في اتجاهها. (٤) يُصدر الحبل قوةً هابطة في اتجاه الرياح.

وإذا كانت الطائرة الورقية لا تطير طيرانًا مُتزنًا، فإن عزم الدوران الناتج عن هذه القوى يجعل الطائرة تدور تلقائيًّا حول «نقطة الزمام» (نقطة افتراق الحبل الطويل الأساسي إلى خيوطٍ مُتجهة إلى نقاطٍ مُتعدِّدة على إطار الطائرة الورقية). يُغيِّر الدوَران زاوية هجوم الطائرة الورقية ومِن ثَمَّ يُغير الرفع والمقاومة. نتيجة لذلك، لا تدور الطائرة فحسب بل تتحرَّك رأسيًّا أيضًا. تُغير الحركة الرأسية زاوية سحب الحبل لنقطة الزمام ومِن ثَمَّ السحب الأفقي والرأسي للحبل.

يحدُث الطيران المُتزن إذا اختفت ثلاث كميات: (١) عزم الدوران. (٢) القوة العمودية الصافية. (٣) القوة الأفقية الصافية. ولكي تختفي هذه الكميَّات فلا بدَّ من

التوجيه الصحيح للطائرة، بالإضافة إلى ضرورة سحْب الخيط بالزاوية الصحيحة وبالقوة الصحيحة، عندها تُصبح الطائرة في «حالة اتزان». يمكن أن تُوجد أكثر من حالة اتِّزان على أي سرعةٍ من سرعات الرياح. وإذا تغيَّرت سرعة الرياح يجب تغيير كلٍّ من توجيه الطائرة وزاوية الخيط كي تصير الطائرة الورقية في حالة اتزان جديدة.

(٧) القفز التَّزَلُّجي

لماذا يستطيع مُمارس القفز التزلُّجي قطع ٢٠٠ متر تقريبًا إذا قفز في هيئةٍ جيدة، بينما يقطع مسافةً أصغر بكثيرٍ إذا قفز بهيئة سيئة؟ لماذا تنتهي بعض القفزات بسقوطٍ خطير، وكيف يتجنَّب القافز السقوط؟

الجواب: يرجع الطيران الطويل للقافز المُتزلِّج إلى قوة الرفع الواقعة على جِسمه وعلى الزلَّاجة، اللذَين يتِّخذان شكل حرف V مفتوح في مواجهة الهواء القادم. إذا تمَّت القفزة بطريقةٍ صحيحة، فإن القافز المُتزلِّج ينزلق في الهواء مثل الدبور الورقي. ومع ذلك، فإن قوة الهواء المار تُشكِّل خطرًا بالغًا؛ لأن الهواء من المُمكن أن يُحدِث فجأةً ارتفاعًا في مُقدِّمة الزلَّاجة يفوق ارتفاع مُؤخِّرتها. يتسبب انعدام التوازن بين القوى في خلق عزم دوران يُسبب بالتبعية دوران القافز، وسرعان ما يُصبح عدم التوازن أسوأ ويفقد القافز السيطرة ويبدأ في السقوط. ومن الممكن أن يؤدي الهبوط الخارج عن السيطرة إلى الوفاة.

يعرف القافز الماهر كيف يُوجِّه جسده والزلَّاجة سريعًا على النحو الصحيح لزيادة الرفع مُبكرًا في بداية القفزة. يكمُن السرُّ في القفزة العلوية عند نهاية مُنحدَر الإقلاع. يجب أن تُنتج تلك القفزة دورانًا إلى الأمام لجعل القافز والزلَّاجة في اتجاه الهبوط الصحيح، بحيث تتَّخِذ الزلَّاجة والجسم الزاوية الصحيحة في مواجهة الهواء المار. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن يضبط القافز توقيت الدوَران للأمام بحيث يختفي العزم الواقع على الزلَّاجة والجسم لحظة وصول القافز إلى الاتجاه الصحيح. كل هذه المناورات ضرورية لقفزة جيدة آمنة، لكن ما يُصعِّبها هو الاعتماد على كثافة الهواء، التي تُحدِّد جزئيًّا شدَّة الهواء الذي يواجهه القافز. فإذا كان القافز معتادًا على كثافة الهواء عند ارتفاعٍ منخفض على سبيل المثال وحاول القفز عند ارتفاعٍ مُرتفِع حيث كثافة الهواء أقل فمن المُمكن أن يحدُث خطأ في التوقيت والقفزة.

(٨) سرعة المُتزلِّج على المُنحدرات الثلجية

السرعة هي هدف الكثير من مسابقات التزلُّج على المُنحدرات، لا سيما بالنسبة للمُتزلِّجين الساعِين إلى تحطيم الرقم القياسي العالمي في سرعة التزلُّج (أسرع من ٢٤٠ كيلومترًا في الساعة). ومقاومة الهواء هي العقبة الرئيسة في هذه المنافسات، وهي في واقع الأمر أكثر أهميةً من الاحتكاك الواقع على الزلَّاجة. فكيف يمكن للمُتزلِّج تقليل مقاومة الهواء؟

الجواب: إليكم بعض الأمور التي يفعلها المُتزلِّج لتقليل مقاومة الهواء: تكون البذلة ضيِّقة جدًّا للتقليل من رفرفة الملابس. لا تتَّخِذ الخوذة شكلًا انسيابيًّا لتفريق الهواء المار فحسب، بل إنها تُوضَع أيضًا فوق الكتِفَين بحيث لا يجد الهواء ارتفاعًا مُفاجئًا عند الكتِفَين أو الظهر؛ ومِن ثَمَّ لا يتكسَّر الهواء إلى دوَّامات أسفل مؤخِّرة الخوذة. (قد يستطيع المُتزلِّج ضئيل الحجم إخفاء معظم الكتِفَين تحت الخوذة.) أما الساقان فيُقابلان الهواء بواقٍ مُصمَّم لتفريق الهواء وتجنُّب تكسُّر الدوَّامات خلف الساقين. هذه الدوَّامات نقاط ضغط مُنخفض. ومِن ثَمَّ ففي وجود ضغط مرتفع عند مقدِّمة الساقَين وضغط مُنخفض خلفهما من الممكن أن يشكل اختلاف الضغط مقاومة هوائية كبيرة. وتنحني عَصَوَا التزلُّج حول الجسم بدلًا من أن تَبرُزا في مواجهة الهواء المار. كما يُقَرْفِص المُتزلِّج في «وضعية البيضة» ليُقلِّل المنطقة الأمامية المواجهة للهواء القادم.

ومن الصعوبات الكثيرة لسباقات سرعة التزلُّج على المُنحدرات الثلجية ضرورة بذل جهد للحفاظ على الساقَين في الوضعيَّات الصحيحة. فنظرًا لدخول الهواء بين الفخذَين، فإن سرعة الهواء تكون أكبر ممَّا عليه الحال خارج الفخذَين. تأتي الطاقة المطلوبة لزيادة السرعة من ضغط الهواء. وهكذا يكون ضغط الهواء بين الفخذَين أقلَّ مقارنةً بخارجهما، ويميل الفخذان إلى الالتصاق. يجِب أن يقاوم المُتزلِّج هذا المَيل باستمرار.

(٩) البومرانج

لماذا يرتدُّ البومرانج؟ بعض عِصِي البومرانج قد تقوم بجولة دائرية لمسافة ٢٠٠ متر، وبعضها يمكن أن تقوم بعدة دورات قبل الهبوط. حيت تُلقى عصا البومرانج وسطحها شِبه عمودي؛ فلماذا يميل السطح للأسفل عادةً أثناء الطيران؟ لعِصي قطع البومرانج أشكالٌ مُتعددة إلى جانب شكلها التقليدي الذي يُشبه الموزة المَحنيَّة. فهل من الممكن أن تُصبح عصًا مستقيمةً عصَا بومرانج؟

الجواب: يُشبه ذراعا البومرانج «الجناح الحامل» التقليدي (الشكل المُميز لجناح الطائرة قديمة الطراز). إنَّ الحافة الأمامية كليلة فتخترق الهواء والحافة الخلفية أرفع، والسطح العلوي مُحدَّب والسطح الخلفي مُسطح. وعندما يطير البومرانج، يُغيِّر هذا الجناح الحامل اتجاه الهواء المار ونتيجة لذلك يرتفع البومرانج في الاتجاه المعاكس.

كي تُلقي البومرانج بيدك اليُمنى أمسِكْه أولًا بالقُرب من رأسك مع جعل السطح المحدَّب مواجهًا لك وجعل سطح البومرانج مائلًا قليلًا إلى اليمين على المستوى العمودي. بعد ذلك مُدَّ ذراع القذف للأمام سريعًا مُحركًا يدَك بقوة حول معصمك. عندئذٍ تنشأ قوة رفع على البومرانج إلى أعلى وإلى يسارك، والجزء العلوي من القوة هو ما يُبقِي البومرانج طائرًا.

يعتمد حجم قوَّة الرفع الواقعة على ذراع البومرانج على سرعة مرور الهواء بالذراع. ونظرًا لأنَّ الذراع العلوية تلفُّ دائمًا للأمام (في نفس اتجاه طيران البومرانج نفسه) والذراع السُّفلية تلفُّ للخلف، فإن قوة الرفع على الذراع العلوية تكون أكبر دائمًا من تلك الواقعة على الذراع السُّفلية.

نظرًا لوجود قوة رافعة إلى أعلى على الذراع العلوية فإنها تَخْلُق، على مسافة من مركز البومرانج، عزمَ دورانٍ يحاول لَفَّ سطح البومرانج. ولأنَّ البومرانج يدور سريعًا، فإن عزم الدوران يلفُّ المحور الذي يدور حوله البومرانج بحيث يُشير المحور نحوَكَ أكثر، وترى قدرًا أكبر من الوجه العُلوي للبومرانج. مع دوَران البومرانج ينحني مسار طيرانه، والنتيجة مسار مُنْحَنٍ يجعل البومرانج يعود إليك.

ويُمكن تحويل العصا المُستقيمة إلى بومرانج إذا أُلقِيَت بالطريقة التي يُلقى بها البومرانج. يكون الدَّوَران المبدئي حول المحور القصير المار بالمركز غير مُستقر، ويتحوَّل الدوَران إلى المحور الطويل المُمتدِّ على طول العصا. هذا التحوُّل يعيد توجيه العصا، لكن الاتجاه الذي تدور حوله العصا لا يتغيَّر. وأثناء طيران العودة يغير الدوَران اتجاه تيار الهواء العابر إلى الأسفل، وهذا يؤدِّي إلى رفع العصا.

(١٠) رمي البطاقات

ارْمِ بطاقة ائتمان (أو غيرها من البطاقات الصُّلبة) مع جعل حافتها الطولية للأسفل وعلى مستوًى أفقي (اجعل وجهَيْها صوب اليسار واليمين). لماذا لا تنزلق البطاقة ببساطة عبر الهواء لتصطدم بالأرض أسفل نقطة الرمي مباشرةً؟

من الخدع الشائعة إلقاء بطاقات اللعب على صندوق مفتوح من أعلى. أستخدمُ بطاقات الائتمان البلاستيكية. وإذا ألقيتُها عشوائيًّا، فإنها تترنَّح على الفور تقريبًا، وتتوقَّف ثم تسقط على الأرض. هل من طريقة لتحقيق التوازُن للبطاقة أثناء طيرانها في الهواء بحيث أحظى بفرصة جيدة في إصابة الهدَف؟

الجواب: من الصعب للغاية تفسير طيران بطاقة مقذوفة وحافتها الطولية للأسفل، وأُجْرِيَتْ محاولات رياضية لفعلها منذ عام ١٨٥٤. من المُمكن أن يكون الطيران عشوائيًّا لكن من المُمكن أن تظهر الأنماط التالية: (١) «الرفرفة»، وذلك عندما تنزلق البطاقة عبْر الهواء، وتُبدِّل ما بين الانزلاق صوب اليسار والانزلاق صوب اليمين. (٢) «التدحرُج»، ويحدُث ذلك عندما تدور البطاقة حول محورٍ مع انزلاقها أيضًا إما صوب اليسار أو صوب اليمين. ويعتمد حدوث أيِّ سلوك من السلوكَين على أبعاد البطاقة. تتدحرَج بطاقة اللعب العادية باستمرار عادةً، مع الانحراف بزاوية مُعيَّنة على المستوى العمودي. وبداية من الاتجاه العمودي المبدئي يُغيِّر الرمي اتجاه الطرف السُّفلي إما صوب اليسار أو صوب اليمين. ومع انزلاق البطاقة بزاوية على المستوى العمودي، يخلُق تدفُّق الهواء المُواجه لها نقطة ضغط مرتفع أسفل الطرف الأمامي وأعلى الطرف الخلفي. هذه المناطق مُرتفعة الضغط تجعل البطاقة تدور حول المحور المركزي على طولها. وعندما تصِل البطاقة للاتجاه الذي يكون الوجه فيه لأسفل، يتباطأ سقوطها لكن يستمر الدوران حتى تقترب البطاقة من استعادة الوضع العمودي. في هذه الأثناء، تنزلق البطاقة في الهواء بمزيدٍ من السهولة؛ ومِن ثمَّ تزداد سرعتها الهابطة. ثم تتكرَّر العملية.

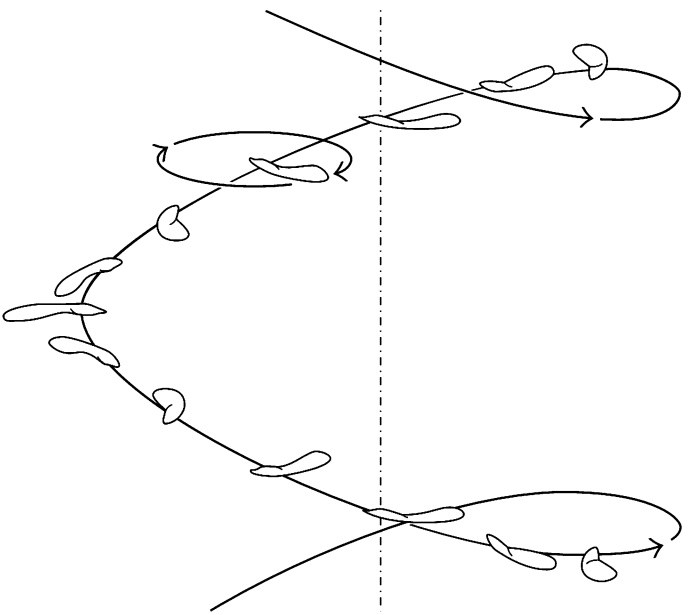
الحيلة في رمي البطاقة تكمُن في موازنة البطاقة بحيث لا تتعرَّض للرفرفة أو التدحرُج. ومن الطرق الشائعة لتحقيق ذلك مَسْك البطاقة ووجهُها إلى الأسفل ووَضْع الإبهام أعلاها، والسبابة على الحافة الطولية، ووضع الإصبع الوسطى بالأسفل. بثني الرسغ ترجع البطاقة للوراء إلى أن تلمس قاعدة راحة اليد. ثم بدفع الرسغ للأمام تنطلق البطاقة مع الدوَران حول محورٍ عمودي. القوة المؤثرة على البطاقة من الهواء تجعلها تدور بحيث تُصبح عمودية، وتدور حول محورٍ أفقي. في هذه الحالة يُمكن أن يكون الطيران مُستقيمًا على نحوٍ مذهل، ويمكن للبطاقة أن تُصيب الهدف بقوة. في الواقع، يجِب أن تتوخَّى الحذر كي لا تُصيب البطاقة عين أحد الأشخاص.

بعض المؤدِّين ماهرون للغاية في رمي بطاقات اللعب على الجمهور في المسرح، وصولًا إلى قسم الشرفات، أو حتى جعلها تدور كالبومرانج.

(١١) البذور الدوَّارة

كيف تتمكن بذور شجر المران والدردار والقيقب من البقاء في الهواء لفترة طويلة قد تسمح للنسيم بحمْلها بعيدًا عن الشجرة الأم؟

الجواب: تطير بذرة أيٍّ من هذه الأشجار وتطيل مدة سقوطها من خلال الدوَران. على سبيل المثال، تدور الثمرة الجناحية لشجرة القيقب حول مركز الكتلة (مركز توزيع كتلتها)، الذي يُوجَد بين الجزء الناتئ والجزء ذي الجناح المُسطح. قد يميل سطح الجناح بزاوية تصل إلى ٤٥ درجة. بينما يدور الجناح أثناء سقوط البذرة، فإنه يدفع الهواء «إلى الأسفل»؛ ومِن ثمَّ تؤثر على البذرة قوَّة «صاعدة». من الممكن أيضًا أن تدفع القوة البذرة إلى الجانب بحيث تتَّخِذ مسارًا لولبيًّا في طريقها إلى الأرض (الشكل ٢-٣).



شكل ٢-٣: بند ٢-١١: مسار مُحتمَل لبذرة مُجنَّحة تدور عكس اتجاه الدوَران في مسار لولبي.

ربما يكون الفعل أسهل في التصوُّر إذا رَكِبْتَ إلى جانب البذرة. بينما يأتي الهواء في اتجاهك فإنه يندفع صوب الجانب السُّفلي من الجزء المُجنَّح. و«قوة الرفع» هي العنصر أو «الجزء» العمودي على الجناح من اندفاع الهواء، وتساعد هذه القوة في دعم البذرة. يجعل اندفاع الهواء الجناحَ يدور مثل ريشة الطائرة المروحية، ويسمح أيضًا للبذرة بالانزلاق إلى أحد الجوانب. وغالبًا ما يسمح الجمع بين الدوَران والانزلاق بهبوط البذرة في صورة حلزونية مع الدوران أيضًا حول مركز كتلتها.

(١٢) الثعابين الطائرة

بالنسبة لأولئك الذين يخافون الثعابين يُوجَد ثعبان يمكن أن يسبب لهم الكوابيس مدى الحياة. يستطيع ثعبان شجرة الجنة (كريسوبيليا بارادايس) تسلُّق إحدى الأشجار والقفز من مسافة عالية، ثم الانزلاق نحو الأرض. ومن الممكن أن يُغيِّر مسار انزلاقه أثناء الطيران نحوَ هدفٍ جديد قد يكون شجرة أخرى. فكيف يمكن للثعبان أن ينزلق في الهواء؟

الجواب: يقفز الثعبان المُتدلِّي من الفرع عاليًا وبعيدًا عن الفرع. وعندما يكون جسمُه مفرودًا يُصبح الجانب السفلي مُسطحًا بداية من الرأس وصولًا إلى الذيل (لكن الذيل نفسه لا يشترك في العملية). بالإضافة إلى ذلك، يُصبح الجانب السفلي على طول النصف الخلفي من الثعبان مُقعَّرًا نسبيًّا، مع بقاء مُعظمه مسطحًا لكن مع وجود حواف هابطة عند الجانبَين الأيسر والأيمن. ويتضاعف العرض الأُفقي للثعبان عند منتصف الطول.

وتعمل المنطقة المسطحة من جسم الثعبان كجناحٍ حامل يمنحه قوَّة الرفع. لذلك فإن انزلاق الثعبان في الهواء يُشبه انزلاق الدبُّور الورقي. ورغم ذلك، بعد أن يكتسب الثعبان السرعة فإنه يفعل أمرًا مختلفًا تمامًا، إذ يتَّخذ شكل حرف S ويبدأ في التذبذُب أفقيًّا بتردُّد يُعادل ١٫٣ مرة في الثانية. وعلى الفور يُصبح مساره الانزلاقي أكثر ضحالة. بهذه الصورة، يتعيَّن على التذبذب أن يزيد من رفع الثعبان نسبيًّا. تبلغ سرعة الثعبان في الهواء حوالَي ٨ أمتار في الثانية، ويهبط بسرعة تُعادل ٥ أمتار في الثانية، وينزلق بزاوية تُقدَّر بنحو ٣٠ درجة. ويمكنه تغيير الاتجاهات بإمالة النصف الخلفي من جسدِه في وقت تحرُّك الرأس في الاتجاه الجديد أثناء تذبذُب الرأس.

وإن الرفع الناتج عن تذبذب الثعبان ليس مفهومًا جيدًا بعد. ورغم ذلك، لنا أن نفترض أنه أثناء حركة النصف الخلفي المُتقعِّر من الجسم إلى اليسار واليمين يُمكن أن

يتغيَّر اتجاه الجانب السُّفلي. وإذا تبدَّل من خلال المَيل إلى اليسار والميل إلى اليمين فمن الممكن أن يزيد قوة الرفع.

(١٣) تأثير مقاومة الهواء على كُرات التنس

لماذا تصِل كُرة التنس المُستعملة عادةً على المُستقبِل أسرعَ من كرة التنس الجديدة المضروبة بالطريقة نفسها بالضبط؟

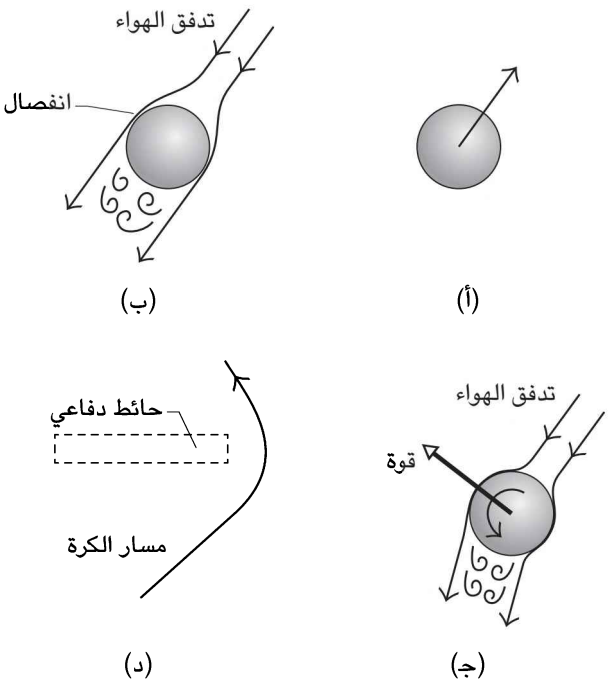
الجواب: يتحدَّد وقت طيران كُرة التنس عن طريق تأثير مقاومة الهواء على الكرة. وإذا تكرَّرت ضربة مُعيَّنة (بنفس السرعة والزاوية) مرات كثيرة، بدايةً بِكُرةٍ جديدة، فإنَّ مقاومة الهواء تزيد في البداية ثم تقلُّ تدريجيًّا إلى أقلِّ قيمة. يبدو أنَّ السبب يكمن في الوبَر (زغب سطح الكرة). الضربات الأولى تستثير الوبر الذي «يمسك» قدرًا أكبر من الهواء ومِن ثَمَّ يزيد مقاومة الهواء. رغم ذلك، يَبلى الوبَر في النهاية أو يُصبح مسطحًا، وتقلُّ مقاومة الهواء. ومِن ثَمَّ فمن يبدأ بضرب الكرة لدَيه ميزة بسيطة عندما يلعب بكرةٍ بالِيَة؛ لأنَّ الكرة تُقابل مقاومة هواءً أقل من الكرة الجديدة وتصل إلى اللاعب المستقبِل في وقتٍ أقلَّ مما يجعل ردَّ الكرة أكثر صعوبة.

(١٤) انحراف كرة القدم حول حائطٍ دفاعي

كيف يمكن أن يستخدم لاعب كرة القدم ركلةً حُرة لإرسال الكرة في مسارٍ «مُنْحَنٍ» حول حائط دفاعي من اللاعبين ويُدخلها إلى شبكة المرمى؟ هذه الركلة، المُسمَّاة «ركلة الموزة» بسبب شكل مسار طيران الكرة، تبدو غريبة، ومن الممكن أن تُفاجئ حارس المرمى تمامًا في أغلب الأحيان، لا سيما عندما يُعيق الحائط رؤية المرحلة الأولى من تحليق الكرة.

الجواب: يُوضِّح شكل ٢-٤أ نظرة فوقية لكرة طائرة عبْر هواء ساكن. لنركب مع الكرة بحيث يمرُّ بيننا الهواء كما في شكل ٢-٤ب. إذا لم تَدُر الكرة حول نفسها، فإنَّ الهواء يمرُّ بطريقةٍ مُتماثلة على جانبي الكرة، ثم في مكانٍ ما على الجانب الخلفي يترُك تيارَا الهواء الكرةَ ويشكِّلان دوَّاماتٍ خلفها. وإذا دارت الكرة حول نفسها — في اتجاه عقارب الساعة مثلًا كما في شكل ٢-٤جـ — فإن التيارَين الهوائيَّين يكونان غير مُتماثلَين. يتكسَّر تيار الهواء الذي يتحرَّك عكس سطح الكرة الدوَّار إلى دوَّامات في فترةٍ مبكرة، في حين يتعلق التيار المُتحرِّك مع سطح الكرة الدوار بالسطح وينفصل بعد فترة متأخرة.

يمكن النظر إلى اندفاع التيار الهوائي بعيدًا عن الكرة الدوارة بوصفه يُشبه اندفاع الطين بعيدًا عن إطار السيارة. فنظرًا لأنَّ دوران الكرة يُجبر التيارات الهوائية على تغيير مسارها، فإن الكرة تُوَجَّه إلى الاتجاه المعاكس. هذا يعني أن تغيير اتجاه الهواء بسبب دوران الكرة حول نفسها يجعل الكرة تنحرِف لأحد الجوانب. يُطلق في العموم على النتيجة اسم «تأثير ماجنوس» نسبةً إلى أول من درس هذه الظاهرة.



شكل ٢-٤: البند ٢-١٤: (أ) تحليق الكرة. (ب) من منظور الكرة. (جـ) الكرة الدوَّارة تغير اتجاه الهواء المار. تغير الكرة اتجاهها إلى أحد الجوانب. (د) يؤدي تغيير الاتجاه إلى انحراف الكرة حول الحائط الدفاعي وصوب المرمى.

عند تنفيذ ركلة حرة، لنفترض أن الكرة رُكِلَت صوب الجانب الأيسر من الحائط الدفاعي وبدوران جانبي في اتِّجاه عقارب الساعة (انظر شكل ٢-٤ب). يجب إطلاق

الكرة بزاوية ١٧ درجة تقريبًا مع الأرض، وتوجيهها بعيدًا عن مُتناول ذراعِ آخِرِ لاعبٍ في الحائط الدفاعي. ومع انطلاق الكرة عبْر الهواء يتسبَّب دوَرانها في تغيير اتجاه تيار الهواء إلى اليسار ومِن ثَمَّ انحراف الكرة نحوَ اليمين. وفي حالة تسديد الضربة جيدًا، فإن الكرة تنحرف بدقَّة حول نهاية الحائط الدفاعي بعيدًا عن متناول اللاعبين ثم تتَّجِه إلى المرمى.

أما الجزء السحري من الركلة فقد يكون ناتجًا عن تغيير سرعة الكرة أثناء التحليق. فمقاومة الهواء على الكرة تعود إلى حدٍّ بعيد إلى الاختلاف ما بين تأثير ضغط الهواء المُرتفِع على السطح الأمامي للكرة ودوَّامات الضغط المُنخفض على السطح الخلفي. عندما تُبطِّئ الكرة يتغيَّر مدى منطقة الدوَّامات، فيزيد في البداية ثم يقل؛ ومِن ثَمَّ تختلف مقاومة الهواء بالطريقة نفسها. ومِن ثَمَّ، فإنَّ بطء الكرة يزداد في البداية ثم يقل، وهو ما يُمكن أن يَخدَع حارس المرمى.

وتنحرِف كرات رياضات أخرى أثناء التحليق في حالة الدوَران حول نفسها، مثل كرات التنس، وكرات تنس الطاولة، وكرات رياضة الكرة الطائرة. (لُوحظ الانحراف منذ وقتٍ مُبكر في طيران القذائف المدفعية ورصاصات البنادق الدوَّارة.) بطبيعة الحال، إن إرسال الكرة في مسارٍ منحنٍ في أيِّ اتجاه من المُمكن أن يُربك الخصم. وتتميز الكرة الدوَّارة أيضًا بالارتداد من الملعب أو الحائط في اتجاهٍ مُفاجئ. إلا أن كرة الشاطئ الملساء تبدو مختلفة من حيث إنها تستطيع الانحراف في البداية في اتجاهٍ معين ثم الانحراف في اتجاهٍ آخر، مُتَّبِعةً مسارًا أشبَهَ بحرف S أكثر منه شبهًا بالموزة. يحدُث الانحراف الأخير المُربك الذي يُطلق عليه «منعكس تأثير ماجنوس» عندما ينخفِض معدَّل سرعة الكرة ودوَرانها إلى أدنى المعدَّلات.

(١٥) الديناميكا الهوائية لكُرة الجولف

لماذا تُوجَد نقرات على سطح كرة الجولف؟ إذا ضربت كرة جولف ودارت إلى الأمام (حيث تدور قمَّة الكرة في اتجاه مسيرة الكرة)، فإن الكرة سوف تدور للأمام عندما تصطدم بالأرض الخضراء. هل هذا أمر مرغوب من جانبِ لاعبٍ عادةً ما يسدِّد ضربات تسقُط على مسافة أقصر كثيرًا من الحفرة؟

الجواب: في البداية كانت كرات الجولف ملساء، ثم لاحظ لاعبو الجولف أنه بمجرَّد أن تُصبح الكرة مُثلَّمة وبالِية فإنها تحلق لمسافة أبعد بالدفعة نفسها المُكتسبة من عصا

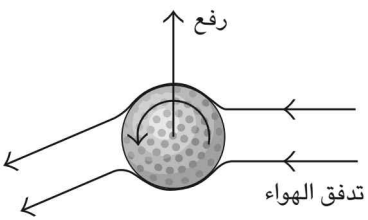
الجولف. وفي النهاية تحسنت التصاميم الحديثة المنقورة، فسمحَتْ بقذف كرات الجولف لمسافةٍ أبعد بكثيرٍ مما تُحققه الكرات الملساء المشابهة.

الوظيفة الأساسية للنقرات هي تقليل مقاومة الهواء على الكرة من خلال تقليل فرق الضغط بين مقدِّمة الكرة ومؤخِّرتها. في المقدمة يكون الضغط مرتفعًا بسبب اصطدام الكرة بالهواء. فأثناء انزلاق الكرة في الهواء يتعلق الهواء بالكرة ثُم ينفصل عنها عند نقطة مُعيَّنة، وعندما ينفصل عنها يُشكل دوَّامات يكون فيها ضغط الهواء أقل. وإذا كانت منطقة تكوُّن الدوَّامات عند مؤخِّرة الكرة مُمتدة، فإن فرق الضغط بين مقدمة الكرة ومؤخرتها يمكن أن يكون كبيرًا. وهذا يعني أن مقاومة الهواء تصير كبيرة ولا تطير الكرة لمسافة بعيدة. أما عندما تصبح الكرة مُغطَّاة بالنقرات (أو مُثلَّمة)، فإن الهواء الموجود على جوانب الكرة يتخلخل، ممَّا يسمح بتعلُّق الهواء بسطح الكرة بطريقة أفضل والوصول لمسافةٍ أبعد عند سطحها الخلفي قبل انفصاله وتكوين الدوَّامات. ومِن ثَمَّ، فالكرة ذات النقرات تمتلك منطقةً تُشكِّل دوَّامات أصغر في المؤخِّرة (ومِن ثَمَّ مقاومة هواء أقل) مقارنةً بالكرة الملساء.

وعلى الرغم من أنَّ الكرة ذات النقرات تُحلق لمسافة أبعد على الملعب، فمن الممكن أن تحلق لمسافة بعيدة خارج الملعب عند تسديد ضربة مُنحنية. وهذا يعني أن النقرات تزيد المسافة وليس التحكُّم.

تشهد الكرة الدوَّارة قوة «رفع». وإذا ضربتْ عصا الجولف الكرة في موضعٍ منخفض بحيث تدور الكرة «دورانًا خلفيًّا» (أو «دورانًا لأسفل»)، فسيكون الرفع موجبًا، ومتجهًا لأعلى، ومِن ثَمَّ تُبقِي قوة الرفع الكرة في الهواء وتحلق الكرة لمسافة أبعد. وإذا ضربت عصا الجولف الكرة في موضعٍ مرتفع بحيث تدور الكرة «دورانًا أماميًّا» (أو «دورانًا لأعلى»)، فسيكون الرفع سالبًا، ومُتجهًا لأسفل؛ ومِن ثَمَّ تُسبب قوة الرفع دفع الكرة لأسفل مبكرًا. ومِن ثَمَّ، فإن الدوران لأعلى يسمح بتدحرُج الكرة لمسافةٍ أطول على العشب، لكنه يُقَصِّر تحليق الكرة في الهواء.

تعود قوة رفع كرة الجولف (الموجب والسالب) إلى طريقة اندفاع الهواء حول الكرة الدوَّارة. فعند الدوران الخلفي يندفع الهواء لأسفل بسبب دوران الكرة (انظر شكل ٢-٥). ونظرًا لأن الهواء مدفوع لأسفل بسبب الدوران، فإن الكرة تندفع لأعلى؛ أي تحظى برفعٍ مُوجَب. أما في حالة الدوران الأمامي، فالهواء يندفع لأعلى وتندفع الكرة لأسفل؛ أي تحصل على رفع سالب.



شكل ٢-٥: بند ٢-١٥: كرة جولف متجهة إلى اليمين. الهواء يمر إلى اليسار ويغير اتجاهه للأسفل بسبب دوران الكرة. وتشهد الكرة رفعًا.

(١٦) الديناميكا الهوائية لكرة البيسبول

كيف يرمي الرامي في لعبة البيسبول كرة سريعة لا تسقط فيها الكرة فعليًّا بفعل الجاذبية وحدَها أثناء طيرانها إلى الضارب؟ إذا لم يتوقَّع الضارب بطريقةٍ صحيحة كرةً سريعة، فمن المُمكن أن تكون الضربة المائلة منخفضة جدًّا بحيث لا يتحقق احتكاكٌ جيد مع الكرة. فكيف يرمي الرامي كرة مُنحنية ينحني فيها مسار الطيران صَوب الضارب أو بعيدًا عنه، أو صوب الأرض؟

الجواب: تُقذَف الكرة السريعة عن طريق تحريك المعصم مباشرةً صوب الضارب بعد دفع الكرة للأمام عن طريق حركة رفعٍ قوية للذراع فوق مستوى الكتِف. هذا الإجراء يجعل الكرة تدور للخلف؛ أي إنَّ سطح الكرة يدور للخلف صوب الرامي. ومع تحرُّك الكرة في الهواء، يُقذَف الهواء المار فوق سطح الكرة صوب الأرض بسبب الدوران. يتسبب انحراف الهواء للأسفل في انحراف الكرة لأعلى (أي يتسبَّب في «رفعٍ موجب»). لا تتحرَّك الكرة فعليًّا لأعلى لأنها تسقط أثناء طيرانها. لكن الكرة لا تسقط بعيدًا مثلما كانت ستسقُط لو لم تكن تدور، وهذا من المُمكن أن يخدع الضارب.

بالإضافة إلى هذا الانحراف الأساسي، فإنَّ الخياطة على الكرة الدوارة تتعرَّض لمقاومة الهواء، وهذا يُمكن أن يُغيِّر من اتجاه حركة الكرة ويُبطِّئها. تلتفُّ الخياطة حول الكرة لتُمسك قطعتَي الجلد المُكوِّنتَين لسطح الكرة. عادة ما تُوصف طريقة مسك الكرة ورميها من منظور الضارب. في إحدى الرميات الأساسية التي يُطلق عليها الكرة السريعة ثنائية الخياطة، يرى الضارب دائمًا جزأين من الخياطة في الكرة أثناء دوَرانها في رحلتها. وفي

«الكرة السريعة رباعية الخياطة»، يرى الضارب أجزاء مُتعاقبة من الكرة تدور أمام ناظريه أثناء طيران الكرة في الهواء. وعلى الرغم من أنَّ كِلا النوعَين من الكرة السريعة يمنحان الرفع الموجب نفسه، فإن بعض الرُّماة يزعمون أن أحد النوعَين أو الآخر هو الأفضل.

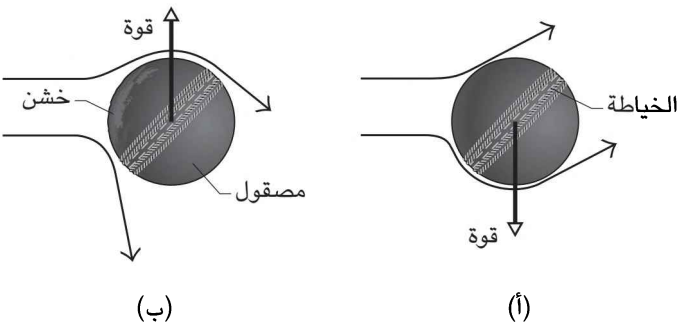
تُلقى الكرة المُنحنية إما بدوَران جانبي أو دوران علوي. وإذا تسبَّب الدوران الجانبي في قذف الهواء إلى يسار الرامي، فإنَّ الكرة سوف تنحرف يمينًا إما ناحية الضارب أو بعيدًا عنه، اعتمادًا على إذا ما كان الضارب أيمن أم أعسر. وإذا كانت الكرة تدور دوَرانًا علويًّا، وهي الرمية التي تُعرَف باسم رمية «الإسقاط»، فإنَّ الهواء يُقذف لأعلى فيسبب انحرافًا لأسفل (رفعًا سالبًا). أما الرمية «المُنزلقة» فهي رمية ذات دوَران جانبي لكن بدوَران أقل بحيث يكون الانحراف أقل، مما يمكن أن يخدع الضارب.

هذه هي الرميات الأساسية. ويُمكن للرامي الماهر إمالة دوَران الكرة للحصول على اتجاه الرفع والانحراف المرغوبَين، بحيث يُغيرهما ما بين كلِّ رمية وأخرى لإرباك الضارب. يبحث لاعبو البيسبول المُحترفون عندما يحين دَورهم في ضرب الكرة عن أدلَّة حول الرمية القادمة في الطريق، ومن هذه الأدلة التوجيه الأخير ليَدِ الرامي أو الخياطة الدوَّارة في الكرة. وهذه المهمة صعبة؛ لأن الضارب يمكن أن يرى الكرة بوضوح فقط في الجزء الأول من رحلتها، وبعد ذلك تُصبح الكرة ضبابية ويبدأ التأرجُح.

(١٧) ديناميكا الكريكيت

في لعبة الكريكيت «يرمي» الرامي الكرة برمية ذراع مستقيمة، فيلقي الكرة على الأرض بحيث ترتدُّ في الاتجاه العام للضارب الذي يحاول بعد ذلك ضربها بالمضرب. وعلى الرغم من أن الوصف الأساسي لا يبدو مُثيرًا، فإن اللعبة يمكن أن تكون مليئةً بالمفاجآت، وتجلس أُمَم كاملة مشدوهةً تُتابع هذه المباريات. فكيف يمكن للرامي السيطرة (ولو تقريبيًّا) على اتجاه الكرة؟

الجواب: أمام الرامي عدة طرق لإرباك الضارب: (١) يمكنه أن يجعل الكرة تقفز على الأرض بطريقة غير مُتوقَّعة عن طريق رمي الكرة بدوران. (٢) يمكنه أن يجعل الكرة «تتأرجح» (تنحرِف) في طريقها إلى الأرض بضبط وضعيَّة الخياطة الموجودة على الكرة. (٣) يُمكنه أن يجعل الكرة تتأرجَح بأن يجعلها تدور. وبطبيعة الحال، يُمكنه أيضًا المزج بين هذه الأساليب.



شكل ٢-٦: بند ٢-١٧: تدفق الهواء أمام كرة كريكيت مرمية وقوة انحراف الكرة. (أ) كرة جديدة. (ب) كرة أصبح سطحها خشنًا من الاستعمال، ومصقولة من أحد الجوانب على يد الرامي.

في الأسلوب الثاني، تتعرَّض الكرة إلى الهواء بواجهةٍ شِبه ثابتة. في الصورة الفوقية المُبيَّنة في شكل ٢-٦أ، تُعدُّ الكرة في وضعٍ ثابت والهواء في وضعٍ مُتحرِّك جهة اليسار. وفي تلك الصورة، تكون الخياطة الموجودة على الكرة في الجزء السُّفلي من الواجهة الأمامية ويمرُّ الهواء فوق الكرة ومن أسفلها. وعلى الجزء العلوي، يتدفَّق تيَّار الهواء بسلاسةٍ تامة؛ وبذلك يترك الطبقة المُجاورة مباشرةً للكرة في حالة اضطراب. ويتحرَّر الهواء من على سطح الكرة قبل أن يصِل إلى الجانب الخلفي. وفي الجزء السُّفلي، يكون التدفُّق سلسًا تمامًا في البداية، ولكن الخياطة «تعرقل» التيار وتُحوِّله إلى مطبَّات هوائية. والمزيج المُضطرب للهواء المجاوِر مباشرةً للكرة يتيح لتيار الهواء أن يلتصق بالكرة حتى يصِل إلى الجانب الخلفي؛ حيث يتحرَّر. ويُمكننا القول بأن الخياطة تجعل تيَّار الهواء يرتفع إلى أعلى كما هو مُبيَّن في الشكل، إلى يسار الرامي؛ ومن ثَمَّ، من منظور الرامي، الهواء يتَّجِه ناحية يساره، وتتجه الكرة عنوةً ناحية يمينه، بمعنى أن الكرة تتأرجح جهة اليمين.

وفي حالة «التأرجُح العكسي» يكون انحراف الكرة عكس ما نراه في شكل ٢-٦أ. يصقل الضارب الكرة في سرواله على نحوٍ مُتكرِّر ليجعل أحد وجهَيْها مصقولًا ويترك الوجه المُقابل خشنًا من الاستعمال المُتكرِّر. ثم يرمي الكرة ووجهها الخشن للأمام (انظر شكل ٢-٦ب). عندئذٍ فإن تيارات الهواء المارة على كلا وجهَي الكرة يحدُث لها على

الفور حالة تدفق مُضطرب فتميل إلى التمسك بالكرة. ورغم ذلك، فإن الخياطة الموجودة على الجانب الأيمن تعمل كمنصة إطلاق حيث ترسل التدفُّق المضطرب بعيدًا عن الكرة. والنتيجة هي أن التدفق القادم حول الجانب العلوي (في منظور الشكل) يغادر عند مؤخرة الكرة، والتدفق القادم حول الجانب السفلي يغادر عند الخياطة. من منظور الضارب، فإن تدفق الهواء يندفع نحو اليمين ومِن ثَمَّ تندفع الكرة نحو اليسار، وهذا هو التأرجح العكسي.

(١٨) الطيور التي تطير في تشكيل على هيئة حرف V

عندما تطير الطيور في سرب لمسافة طويلة، لماذا تتخذ الكثير من أسراب الطيور هيئة الحرف V؟

الجواب: عندما يطير الطائر عن طريق رفرفة جناحَيه (بدلًا من الانزلاق)، فإن كلَّ دفعة للأسفل بجناحه تخلُق دوَّامة رأسية في الهواء تتعقَّب الطائر. تدور الدوَّامة للأسفل على جانب الطائر، وللخارج عند جانبه السفلي، وللأعلى على أقصى جنبه، وللداخل على جانبه العلوي. وإذا وضع الطائر المتعقِّب نفسه في الجزء المتدفِّق لأعلى من الدوَّامة فإنه يتلقَّى رفعًا مجانيًّا. سيظلُّ مضطرًّا إلى الرفرفة ليظل طافيًا، لكنه لن يضطر للرفرفة بقوة شديدة؛ ومِن ثمَّ لن يكون الجهد المبذول كثيرًا جدًّا. ويمكن أن يكون القدْر الموفَّر من الطاقة كبيرًا جدًّا في الرحلة الطويلة.

ولكي يكون الطائر المتعقِّب في التدفق العلوي يجب أن يكون على جانب الطائر القائد، وتشكيل السرب على شكل الحرف V يُعدُّ واحدًا من أفضل التشكيلات التي تضع الطيور في مواقع صحيحة. بالإضافة إلى ذلك فهو يسمح لها بالتواصل البصري. ورغم ذلك، فنادرًا ما تكون الطيور في أفضل موقع يُتيح لها توفير الطاقة، والمسافة بين الطيور في تشكيل الحرف V تكون في الغالب غير مُتساوية، مما يوضح أن الطيران في أي تشكيلٍ أمر صعب للغاية في الواقع.

وعلى الرغم من أن الطائر الموجود في المُقدمة يتعرَّض إلى تدفق علوي من الطيور الموجودة على يساره وعلى يمينه، فإن الموقع الأمامي يكون هو الأكثر إرهاقًا عادةً. وعلى الأرجح يتناوب عددٌ كبير من الطيور في السرب على القيادة. وبدلًا من ذلك، يمكن أن تطير الطيور على هيئة حرف V مسطح أو هيئة خط مستقيم، وبهذه الطريقة لن يكون موقع المقدمة مرهقًا بهذا القدر.

وقد يكون توفير الطاقة أحد الأسباب التي تجعل السمك يسبح أيضًا في أسراب. وتشكيلات الدوامات الناتجة عن السمكة القائدة يمكن أن تساعد في تقليل الجهد المطلوب من الأسماك الموجودة في مؤخرة السرب.

(١٩) السباحة في سائل لزج

يجب أن يدفع السباح الماء أو يسحبه كي يشق طريقه فيه. والماء من الموائع بطبيعة الحال؛ ومِن ثَمَّ فإن دفع أو جذب الماء ليس بكفاءة دفع أو جذب شيء صلب. إذا أضفنا شيئًا إلى الماء ليصبح أكثر لزوجة؛ ومِن ثَمَّ يُصبح أقلَّ ميوعة، فهل يستطيع الشخص أن يسبح في هذا الماء على نحوٍ أسرع؟

الجواب: في إحدى التجارب أُضيف الجوار إلى حمَّام سباحة كي تصبح لزوجته ضعف لزوجة الماء النقي. ثم قيس الوقت الذي استغرقه السباحون في سباحة ٢٥ ياردة. كانت النتيجة أن زيادة اللزوجة لم تغير سرعة السباحة. لقد منحت اللزوجة دفعًا أو جذبًا أفضل للسباح، لكنها زادت أيضًا من المقاومة الواقعة على السباح، وأبطل كلا التأثيرَين الآخر.

(٢٠) خطوط التكثُّف

لماذا تترك الطائرات في بعض الأحيان خطوطًا بيضاء خلفها في السماء؟ لماذا تتضخم هذه الآثار في بعض الأحيان أو تُصبح لولبية؟

الجواب: عندما تطير الطائرة في بُخار ماءٍ كثيف على ارتفاعات عالية، فإنها من الممكن أن تكوِّن سحابة خلفها تُسمَّى «خطوط التكثف» (أي أثر التكثيف). وفي العادة يتكوَّن خط التكثف من خطَّيْن أبيضَين على الأقل يبدآن خلف الطائرة بمسافة بسيطة. ومع اندفاع الطائرة في الهواء تُكَوِّن أطراف الجناحَين (وغيرها من الأجزاء البارزة) دوامات. ويتحرك الهواء عند طرف الجناح للأعلى، وصوب الطائرة، وللأسفل، ثم للخارج. تفرز المُحركات سخامًا في التدفق المحيط، مما يجعل بخار الماء يكوِّن قطرات أو بلُّورات ثلجية تُشتت ضوء الشمس بشدة، فتصبح آثار الدوامات مرئية. ونظرًا لأن تشتيت الضوء لا يعتمد عادةً على الطول المَوجي (أو اللون) فإن آثار التكثُّف تكون بيضاء في المُعتاد.

وهذه الدوامات يمكن أن تُشكل خطورة على الطائرات الأخرى، لا سيما الطائرات الأصغر حجمًا والأخف التي من الممكن أن تنقلب بسبب إحدى هذه الدوامات. لذلك يتوخَّى

طيارو الطائرات الصغيرة حذرًا بالغًا في تجنُّب آثار الطائرات الأكبر حجمًا. رغم ذلك، يُقال إن دوَّامات أطراف الأجنحة استُخدمت استخدامًا نافعًا في السموات الإنجليزية أثناء الحرب العالمية الثانية؛ فعند حدوث إحدى هجمات القنابل الطائرة فاو-١، كان الطيار الإنجليزي يطير إلى جانب إحدى هذه القنابل ويستخدِم دوَّامة طرف الجناح في قلبها كي تتحطم.

عادة ما يكون طول خطِّ التكثُّف المكوَّن من قطرات الماء قصيرًا؛ لأن القطرات تتبخر. أما الثلج فيمكن أن يشكل خط تكثُّف طويلًا، وطويل الأجل، شريطة ألا يصبح الثلج كبيرًا لدرجة تسمح بسقوطه. يمكن لخط التكثف طويل الأجل أن يتمدد عندما يُكَوِّن بخار الماء قطرات أو بلورات إضافية. وفي بعض مناطق الطيران عالية الكثافة يمكن أن تتداخل خطوط التكاثف المُمتدة وتُغطي جزءًا كبيرًا من السماء.

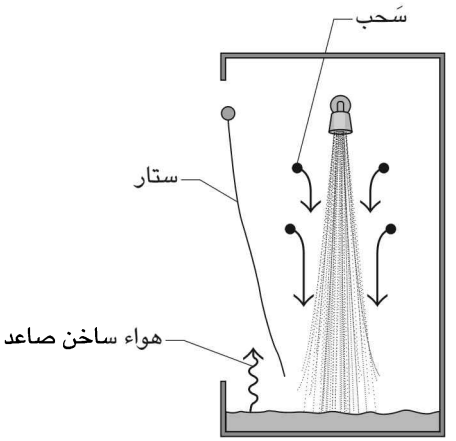
وفي بعض الأحيان تتحوَّل خطوط التكاثف إلى حلقات عندما تبدأ في التحلل، وعندها تبقى أسس الدوامات هي المرئية. ويمكن أيضًا أن تتحوَّل خطوط التكاثف إلى أشكال (منفوشة) تشبه «الفشار» في حالة هبوط أجزاء منها، مما يجعلها تتمدَّد.

وإذا كان خط التكثُّف تحت ضوء ساطع وألقى ظلًّا على الهباء الجوي أسفله (مثل الدخان أو الضباب أو الشبورة)، فإنَّ الظلَّ يبدو خطًّا داكنًا في السماء. وعندما تكون الشمس خلف الطائرة، ربما يبدو الخط الداكن أمام الطائرة، كما لو كان امتدادًا داكنًا لخط التكثُّف الصادر عن الطائرة.

يمكن أيضًا أن تُصدِر الطائرة خطًّا داكنًا يُعرف باسم «خط التبديد» عندما تطير عبر سحابة رقيقة نسبيًّا، فتتخلص من قطرات الماء وبلورات الثلج في السحابة عن طريق تبخيرها، إما من خلال الطاقة الحرارية الصادرة عن المحركات أو بمزج الهواء الدافئ بالأعلى بالسحابة الموجودة بالأسفل. ويمكن أيضًا أن تنتج الطائرة خط تبديد إذا أطلقت المحركات على السحابة رطوبة كافية تجعل البلورات الثلجية يزداد حجمها لدرجة سقوطها من السحابة.

(٢١) رفرفة ستار حوض الاستحمام للداخل

أثناء الاستحمام دائمًا ما يرفرف ستار حوض الاستحمام للداخل ويحتك بساقي. ليس ستاري شيئًا استثنائيًّا؛ لأن معظم الستائر تتسم بهذه السمة المزعجة إلا لو كانت مثبتة بثقل أو مزودة بقطع مغناطيس صغيرة. فما الذي يدفعها للداخل؟



شكل ٢-٧: بند ٢-٢١: مقاومة الهواء تجعل ستار حوض الاستحمام يرفرف للداخل.

الجواب: من التفسيرات الشائعة أنه عندما يصبح الهواء ساخنًا بفعل الماء الساخن فإنه يرتفع فوق الستار؛ ومِن ثَمَّ يجب أن يهب هواء الغرفة البارد على حوض الاستحمام من أسفل الستار. هذا التدفق الذي يشبه المدخنة يحدث بالتأكيد عندما تأخذ حمامًا ساخنًا، ورغم ذلك، فإن الستار يرفرف إلى الداخل كذلك عندما تأخذ حمامًا بماء أبرد من هواء الغرفة.

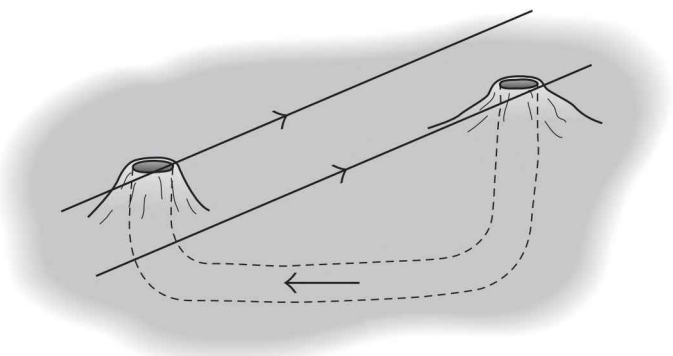
السبب الأساسي لحركة الستار هو أن الماء عند سقوطه «يسحب» الهواء المجاور (أي يحبسه ويدفعه) (انظر شكل ٢-٧). لذلك يجب أن يُوجد تدفُّق هوائي مُستمر نحو التيار الساقط لتجديد الهواء المجاور. جزء من هذا التدفق يمرُّ أسفل ستار الحمام، والتدفق يدفع الستار للداخل. إذا كان الماء ساخنًا، فإن بِركة الماء أسفل حوض الاستحمام تسخن الهواء الذي فوقها مباشرةً، ويرتفع هذا الهواء لأعلى صوب الستار الذي يتحرَّك للداخل، فيساعد في دعم الستارة.

ويمكن أيضًا لحركة الهواء الناتجة عن مقاومة الهواء بفعل تدفق المياه أن تحدُث عندما يتدفَّق الماء مُشكلًا ما يُشبه نظام الكهف؛ فالسَّحْب يحمل الهواء إلى الكهف على امتداد مسار الماء، مما يعني ضرورة تدفق كمية مساوية من الهواء خارج الكهف. وفي بعض الأنظمة، يمكن أن يشعر مستكشف الكهف بتدفق الهواء إلى الخارج.

(٢٢) كلب البراري وأعشاش النمل العملاقة

كلب البراري نوع من القوارض يعيش في السهول المفتوحة في الغرب الأوسط الأمريكي وكثير من المناطق السكنية، ويبني جحورًا طويلة يتراوح عمقها ما بين متر إلى خمسة أمتار، يكون لها مدخلان أو أكثر. لا تستطيع الرياح أن تهبَّ في هذه الأنفاق لإدخال الأكسجين لكلاب البراري. فلماذا لا تختنق في جُحورها؟

يبني النمل القاطع الأوراق أعشاشًا ضخمة يصل عُمقها إلى ستة أمتار تقريبًا لإسكان ما يقرب من خمسة ملايين نملة. يجب أن يتنفَّس النمل داخل المتاهة المُعقدة المكونة من الممرَّات المحفورة تحت الأرض، كما تحتاج الفطريات التي يزرعها من أجل الصغار إلى الأكسجين، ولا يمكنها مقاومة درجات الحرارة التي تزيد على ثلاثين درجة مئوية. يمكن أن يرفع نشاط كل هذا النمل داخل العش درجة الحرارة بسهولة عن هذه القيمة. فكيف تجري تهوية هذا العش للتحكم في كل من الأكسجين ودرجة الحرارة؟



شكل ٢-٨: بند ٢-٢٢: رياح تمر عبْر تَلَّتَيْ أحد جحور كلب البراري.

الجواب: يبني كلب البراري تلالًا حول كل مدخل من مداخل الجُحر، وعادةً ما يكون أحدها مستديرًا يُشبه القبة عند أحد المداخل، والآخر منحدرًا يُشبه المخروط عند مدخل آخر (انظر شكل ٢-٨). هذه التلال المصنوعة من تُراب حفْر الجحور والقاذورات المُحيطة (التي ينظفونها بعناية)، يمكن أن تكون بمنزلة منصَّة مراقبة للحيوان، لكن غرضها

الأساسي هو تهوية الجُحر. فعندما تهبُّ الرياح على إحدى هذه الفتحات، فإنها تميل إلى «سَحْب» (جذب وإزالة) جزيئات الهواء الموجودة عند المدخل. ونظرًا لاختلاف أشكال وارتفاعات التلال، فإن السَّحْب يكون أكثر وضوحًا عند أحد المداخل مقارنة بالآخر. وعلى هذا النحو، يُجذَب الهواء من خلال إحدى الفتحات فيدخل الهواء من الفتحة الأخرى ويتدفق عبْر الجحر. وبفضل هذا القدر الذي يعتمد عليه من الأكسجين لا يختنق الحيوان.

يُولِّد النمل والفطريات في الأعشاش العملاقة للنمل قاطع الأوراق الكثيرَ من الطاقة الحرارية؛ ومِن ثمَّ ترفع درجة حرارة كثيرًا داخل الأعشاش. وعلى الرغم من أن هذا الهواء الدافئ يميل إلى الارتفاع بحيث يخرج من العش فإن هذه الأعشاش أكبر وأعقد من أن تجري تهويتها بهذه الطريقة. بدلًا من ذلك تحصل هذه الأعشاش على التهوية بفضل مقاومة الهواء، من خلال الرياح التي تهبُّ أمام فتحات السطح بطريقة مشابهة كثيرًا لطريقة تهوية جحور كلاب البراري.

(٢٣) دوَّامة حوض الاستحمام

عند تصريف الماء من حوض الاستحمام لماذا يدور فوق البالوعة في شكل حلزوني ويتحول لدوَّامة، وما هو اتجاه الدوران: أهو في اتجاه عقارب الساعة أم عكس اتجاه عقارب الساعة؟ إذا كان اتجاه الدوران يعتمد على نصف الكرة الأرضية الواقع فيه حوض الاستحمام، فماذا سيكون اتجاه الدوران إذا كان حوض الاستحمام يقع في مكان قريب من خط الاستواء؟ هل الماء يتدفق إلى الدوَّامة من السطح العلوي بالضرورة، كما لو كانت الدوامة ميزابًا يصرف الماء من السطح العلوي؟ ما الذي يُحدد عمق الدوامة؟ (يمكن أن تكون الدوامة تجويفًا هوائيًّا بسيطًا على سطح الماء، أو يمكن أن تكون عمودًا هوائيًّا مُمتدًّا للأسفل إلى البالوعة.) لماذا أحيانًا ينعكس اتجاه الدوران فجأة في الدقائق الأخيرة لتصريف المياه من الحوض؟ لماذا يصدر صوت عن بعض دوامات حوض الاستحمام؟

الجواب: تقوم أسطورة اتجاه الدوران في حوض الاستحمام على دوران الغلاف الجوي العام الذي نراه في الأنظمة واسعة النطاق مثل الأعاصير؛ فعندما يتدفق الهواء على نطاق شاسع يُسبب دوران الأرض انحرافًا واضحًا في الرياح فيما يُطلق عليه «تأثير كوريوليس». وهذه الانحرافات تعطي تدفقًا معاكسًا لاتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الشمالي وتدفقًا في اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الجنوبي.

الماء المُتدفق في حوض التصريف هو نظام ضيق المدى للغاية تحكُمه عوامل أكبر من تأثير كوريوليس. ويُحدِّد اتجاه الدوران في الأساس الاتجاه العام لدوران الماء عند تدفُّقه في الحوض أو عندما يُدَوِّره أحد الأشخاص. فمثلًا، إذا كان الماء يسيطر عليه تدفق في اتجاه عقارب الساعة، فإن الماء يمكن أن يحتفظ بجزء من اتجاه هذا التدفق لساعة أو ربما أكثر. وفي حالة تصريف الماء أثناء دورانه في اتجاه عقارب الساعة، فإن الدوامة المكونة فوق البالوعة ستكون في اتجاه عقارب الساعة. من العوامل الأخرى التي يمكن أن تُحدد اتجاه التدفُّق انعدام التناظُر في حوض الاستحمام (فمن الممكن أن يكون موقع البالوعة غير مُتناظر)، والاضطراب الناتج عن سَحب السدادة، واختلاف درجات الحرارة بين الماء بين ناحية (مثلًا الناحية المُطلَّة على بقية الحمام) والناحية المُقابلة (الجدار).

أُجريَت تجربة تأثير كوريوليس في حوض استحمام خاص وفي ظلِّ اتخاذ احتياطات مُعينة؛ إذ كان الحوض دائريًّا، وكانت البالوعة موجودة في مُنتصفه، وترك الماء ليستقرَّ لفترةٍ طويلة في الحوض، وكانت درجة حرارة الماء ثابتة، وعُزل الماء عن أي اضطرابٍ مُحتمل قد يُسببه الأشخاص الموجودون في الغرفة، وسحبت سدادة البالوعة بحذَر بالغ. في ظل هذه الاحتياطات حدد تأثير كوريوليس حركة الدوران، ولأن الحوض كان موجودًا في بوسطن فقد كان تصريف المياه عكس اتجاه عقارب الساعة.

معظم الماء الذي ينزل في البالوعة يتحرك نحو البالوعة القريبة من قاعدة حوض الاستحمام. وعندما يصل الماء إلى البالوعة، ينزل بعضه في البالوعة على الفور، لكنَّ كثيرًا من الماء يدور لـ «الأعلى» قبل أن ينزل البالوعة. والماء الذي ينزل في مركز البالوعة يأتي من سطح الماء العلوي؛ أي من التجويف الذي نراه على البالوعة. إذا كانت الدوَّامة قوية، يكون قاع التجويف رفيعًا وغير مُستقر، وتتصاعد منه فقاقيع هواء.

أما مدى الدوامة (أي عمق عمود الهواء في الدوامة) فيُحدده جزئيًّا قُطر البالوعة. عادة ما تُسفر البالوعة العريضة عن تجويفٍ ضحل على سطح الماء. أما البالوعة الضيقة فإنها تنتج عادةً دوامة قوية ضيقة يمتدُّ فيها عمود الهواء إلى البالوعة. ويمكن للبالوعة متوسطة الحجم أن تنتج دوَّامة تتَّجِه لأسفل في البداية ثم تتراجع لأعلى.

أما سبب عكس اتجاه الدوَران في الدقيقة الأخيرة فهو غير مفهوم جيدًا. أحد التفسيرات يقضي بأنه عندما تُصبح طبقة الماء ضحلةً جدًّا، فإن تدفق الماء في الدوامة يكون صعبًا بسبب الاحتكاك بقاع الحوض.

ويمكن أن تصدر دوامة حوض الاستحمام صوتًا إذا كانت قوية لدرجة تسمح بـ «حبس» (أسر) الهواء في صورة فقاعات تُصدر صوتًا أثناء تذبذُبها وانهيارها. ومن

الممكن أن يهتزَّ سطح الماء أيضًا، فيصدر اختلافات في ضغط الهواء في صورة موجات صوتية.

(٢٤) دوَّامة في فنجان قهوة

قَلِّب فنجان قهوة سادة برفق ثم أزل الملعقة. أثناء دوران القهوة في الفنجان. صُبَّ ببطء وبرفق لبنًا باردًا أو قشدة باردة في المنتصف. لماذا يظهر تجويف في المنتصف؟ لماذا لا يظهر التجويف إذا كان اللبَن دافئًا أو ساخنًا؟

الجواب: أنت تترُك الكثير من الدوامات الصغيرة راسخة في الدوران الأصلي الذي تراه في القهوة. ونظرًا لأن اللبن البارد أكثر كثافة من القهوة، فإنه يغوص إلى الأسفل على طول المحور المركزي للدوامة، ساحبًا معه هذه الدوَّامات إلى المركز، ويجعلها تمتدُّ إلى الأسفل. هذا التجمع والامتداد يزيد سرعة دوران السائل قرب المركز. عندها يُصبح السطح القريب من المركز مقعرًا، أو مجوفًا، مثلما يحدث عادةً مع السائل في حالة الدوَران، إلا أن هذا الشكل المُقعَّر يكون أكثر وضوحًا في هذه الحالة.

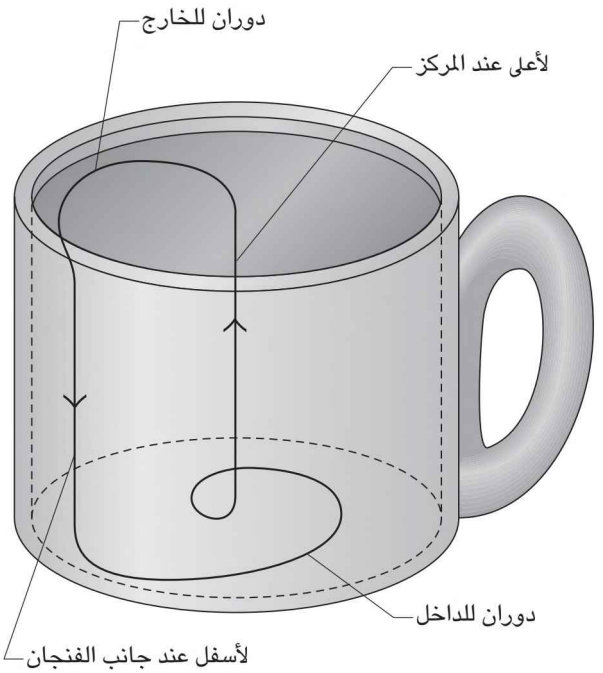
(٢٥) تَجَمُّع أوراق الشاي، دوَران الزيتون

إذا قلبتَ فنجانًا من الشاي تتناثر فيه أوراق الشاي عبْر القاع (ثم أزلتَ الملعقة) لماذا تتجمَّع أوراق الشاي في المركز السفلي؟ ولماذا قبل الوصول إلى المركز تُشكل الأوراق ما يُشبه الحلقة حول المركز ثم تتحرَّك للداخل؟

في حالة تقليب كأس من المارتيني يحتوي على زيتونة، فإن الزيتونة سوف تتحرَّك حول محور الكأس مع السائل الدوَّار لكنها ستدور أيضًا حول محور داخلي. لماذا يكون اتجاه الدوران مُعاكسًا لاتجاه الدوَّامة؟

الجواب: كما أوضح أينشتاين فإن حركة أوراق الشاي تعكس نمَط دوَران ماء الشاي في الفنجان. ولأن التقليب يجعل الماء يدور حول المحور المركزي الرأسي، فإن الماء يَميل إلى الدوران للخارج. وهذا يعني أن كل جزيءٍ من الماء يتحرَّك كما لو كان على دوَّامة خيل مُسطحة دوَّارة.

رغم ذلك، ففي حالة فنجان الشاي، يتأخَّر الماء المُلاصِق للسطح السفلي بسبب الاحتكاك ومن ثم لا يدور بقوة الماء الموجود على السطح العلوي. ومِن ثَمَّ، فإن الميل



شكل ٢-٩: بند ٢-٢٥: تدفق ثانوي عند تقليب الشاي.

للدوران إلى الخارج يكون قويًّا على السطح العلوي وضعيفًا عند السطح السفلي. يُطلِق هذا الاختلاف نظام دوران يُطلَق عليه «التدفق الثانوي»؛ فعندما يدور السائل حول محور مركزي، فإنه يتحرك أيضًا للخارج على طول السطح العلوي، ويتحرك لأسفل على طول جانب الفنجان، ويتحرك للداخل على طول السطح السفلي، ثم يتحرك لأعلى على طول المحور المركزي (انظر شكل ٢-٩). يسحب التدفق على امتداد السطح السفلي أوراق الشاي إلى المركز ثم يتركها.

ما لم يُلاحظه أينشتاين هو أن أوراق الشاي سرعان ما تشكل حلقة بعد إزالة الملعقة قبل أن تصل إلى المركز في النهاية. فالأوراق البعيدة عن هذه الحلقة تنجذب نحوها بفعل التدفق الثانوي، وأوراق الشاي الأقرب للمركز تدور بعيدًا عنه. وعندما يخبو دوران الماء

في الفنجان، يقلُّ نصف قُطر هذه الحلقة؛ ومِن ثمَّ تتحرك الأوراق تدريجيًّا نحو المركز، وتستقر فيه في النهاية.

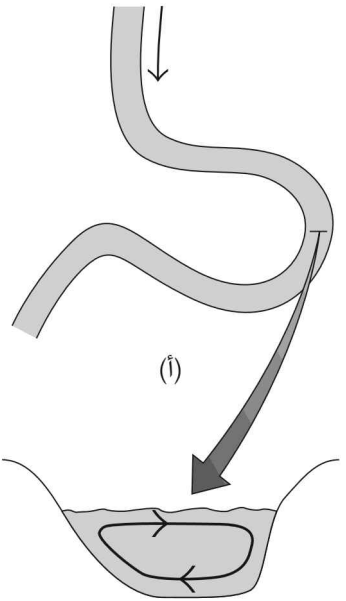
وإذا حدث تقليب الشاي من خلال وضع الفنجان على طاولة دوَّارة، مثل مُشغل الأسطوانات الموسيقية، فسيبدأ التقليب عند قاع السائل بسبب الاحتكاك بين السائل الموجود هناك وبين سطح الفنجان. وتدريجيًّا سيصعد دوران السائل إلى السطح العلوي. وأثناء هذا الصعود، سَيَلِفُّ السائل الموجود في السطح السُّفلي للخارج، ولن يميل السائل في السطح العلوي إلى الدوران. ونتيجة لذلك سيحدُث تدفُّق ثانوي: إلى الخارج عند القاع، وللأعلى عند الجدار، وللداخل عند القمة، وللأسفل عند المحور المركزي. هذا التدفُّق معاكس للتدفُّق الناتج عن تقليب الملعقة، والآن سوف تنتهي الحال بأوراق الشاي أسفل جانب الفنجان.

عند تقليب كأس من المارتيني به زيتونة فإن الزيتونة تكون بين السائل الذي يتحرَّك بسرعة قرب مركز الكأس وبين السائل الذي يتحرك ببطء بعيدًا عن المركز. ومِن ثَمَّ، فإن تأثير السحب على الزيتونة يمكن أن يكون كبيرًا عند النقطة الأقرب للمركز، مما يجعل الزيتونة تدور في الاتجاه المُعاكس للدوامة. (ونظرًا لوجود عوامل كثيرة مثل توزيع الكتلة في الزيتونة المثقوبة المَحشيَّة، فإن الزيتونة يمكن أن تدور في اتجاه الدوامة أو تدور عشوائيًّا.)

(٢٦) الأنهار المُتعرِّجة

لماذا يميل النهر إلى التعرُّج (تكوين مسار يُشبه نير الثور) بدلًا من السير في خط مُستقيم؟ إذا نظرتَ من الطائرة يمكن أن تجد أن بعض الأنهار تسير على نحوٍ شديد التعرُّج. ما الذي يُسبب حلقات الماء المنفصلة التي يُطلَق عليها «البُحيرات القوسية»، والموجودة على جانب النهر شديد التعرُّج؟

الجواب: يبدأ التعرُّج بفعل الصدفة في أثناء التدفق المُعقد للنهر، إلا أنه بمجرَّد حدوث أدنى قدْر من التغير في الاتجاه يمكن لتدفق الماء تعزيز هذا التغيير فيُحْدِث انحناءً ثم حلقة. يُحدِث تدفق الماء هذه التغيرات من خلال نحْت التربة أو الصخور على طول الشاطئ وعلى طول قاع النهر. يمكن أن تكون هذه العملية بالغة التعقيد ويمكن أن تعتمد على الظروف الخاصة بالنهر، لكن إليك هذا التفسير البسيط: يوضح شكل ٢-١٠أ منظورًا علويًّا لانحناءٍ في أحد الأنهار، ويظهر شكل ٢-١٠ب مقطعًا عرضيًّا رأسيًّا مأخوذًا من الانحناء. عندما يتدفق الماء في هذا الانحناء يميل إلى الدوَران للخارج كما لو كان قد قُذف للخارج. يتأخَّر التدفُّق في قاع النهر بسبب الاحتكاك بالقاع، ممَّا يُقلل



شكل ٢-١٠: بند ٢-٢٦: (أ) منظر علوي لتعرُّج نهرِي (نير الثور). (ب) تدفق ثانوي في قطاع عرضي داخل أحد التعرجات.

الحركة للخارج. ولا يتأخَّر التدفُّق على السطح العلوي للنهر. ومِن ثَمَّ، فمع تدفُّق الماء مع التيار عمومًا فإنه يتبع أيضًا «تدفقًا ثانويًّا» يكون للخارج عند السطح العلوي، وللأسفل على طول الضفة الخارجية، وللداخل على طول القاع، ولأعلى على طول الضفة الداخلية. ينحت هذا التدفق الثانوي المواد في الضفة الخارجية ويُرسِّبها في اتجاه التيار على الضفة الداخلية. ومِن ثَمَّ يزيد اتجاه الانحناء للخارج مع تآكُل الضفة الخارجية تدريجيًّا.

وإذا أصبحت الحلقة كبيرة، فإنَّ النحت على طول التعاريج المؤدية للحلقة يُمكن أن يفصل الحلقة مكونًا بحيرةً قَوسية.

(٢٧) دوَران الطائر في الماء

لماذا يدور طائر الفلروب (طائر مخوض صغير) بقوة في الماء أثناء تدلِيَةِ رأسه لأسفل لينقُر في سطح الماء؟

الجواب: عندما لا تُوجد فرائس كافية على سطح الماء فإن الفلروب الطافي يدور بسرعة من خلال دفع الماء بقوة مع مد أصابع القدمَين ثم طيِّها بعيدًا وهو يقبِضُ قدَمه. تُسفر جهوده عن تدفق المياه التحتية لأعلى جالبةً معها الفرائس على السطح وتجعلها تدور في الاتجاه «المعاكس» للطائر. ينقُر الطائر الفرائس سريعًا عند وصولها للسطح، وعلى الأرجح فإنَّ أفضل النتائج تتحقق عندما يجمع التدفق فرائس من قاعٍ ضحْل نسبيًّا، ما كان الطائر ليَصِل إليه لولا ذلك.

(٢٨) صعود الماء جوانب البيضة الدوَّارة

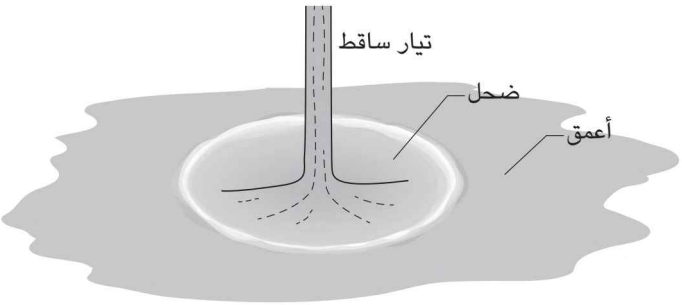
إذا أدرتَ بيضة مسلوقة مثلما تدير لعبة النحلة الدوارة، فإنها ستقِف على أحد طرفَيْها. فلماذا إذا أدرتَها في بِركة ماء ضحلة (عُمقها بضعة مليمترات) يصعد الماء جانب البيضة قبل أن يسقط عنها؟

الجواب: في العادة عندما تُقلب الماء كما في فنجان الشاي فإن الماء يدور للخارج تاركًا تجويفًا في المركز؛ ومِن ثمَّ يدلُّ على وجود دوَّامة في هذا المكان. وعندما تدير البيضة في الماء، فإن الماء يميل للتحرك للخارج لكنه يتمسك أيضًا بالبيضة. وعن طريق صعود الجانب السفلي للقشرة المُنحنية فإنه يستطيع التمسك بالبيضة مع التحرك للخارج أيضًا. وفي نقطة مُعينة على منحنى القشرة، يبتعد الماء عن قشرة البيضة بفعل قوة الجاذبية وعدم التوازن العام. حينها يتطاير الماء في الهواء في صورة قطرات تسقط حول البيضة في دائرة.

(٢٩) نسَق تدفق الماء في صورة دائرة داخل الحوض

عند سقوط تيار ماء يتدفق بانسيابية من صنبور على حوض مسطح مفتوح البالوعة، لماذا تتكون دائرة حول نقطة التصادم يكون الماء فيها أعمق في الجزء الخارجي من الدائرة؟

الجواب: عندما يصطدم ماء الصنبور بالحوض فإنه ينتشر شعاعيًّا بمعدلٍ يُوصف بأنه «فوق حرِج»؛ لأن الماء يتحرك بمعدلٍ أسرع من قدرة الأمواج على التحرك على سطح



شكل ٢-١١: بند ٢-٢٩: جدار ماء دائري حول نقطة تصادم التيار داخل الحوض.

الماء. في البداية يكون التدفق ثابتًا نظرًا لأن أي فرصة لحدوث اضطراب يجري التخلُّص منها بسرعة. إلا أنه مع انتشار الماء للخارج تُصبح آثار لزوجة الماء مهمة ويُصبح التدفق غير ثابت. هذا يعني أن التدفق اللزِج يبدأ على سطح الحوض ثم يمتد تدريجيًّا للأعلى. وعند قُطر معين من نقطة التصادم يصل التدفق اللزِج إلى السطح ويزداد عمق الماء فجأة، ويُعرف هذا التأثير باسم «القفزة الهيدروليكية» (انظر شكل ٢-١١). بعيدًا عن هذا الجدار، تكون سرعة الماء أكثر بطئًا (دون حرجة). وعلى هذا النحو فإن القفزة الهيدروليكية هي الانتقال من التدفُّق الأسرع والأكثر ضحالةً إلى التدفق الأبطأ والأعمق.

غالبًا ما تظهر القفزات الهيدروليكية في كثيرٍ من المجاري المائية الشائعة، كما يحدث عندما يتدفق الماء إلى الطريق عبْر حافة الرصيف، ومن خلال مواسير الصرف الصحي الموجودة تحت الأرض، وعبر قنوات الري المائلة. ابحثْ عن موجة ثابتة عند تدفق الماء لا سيما عند وجود عائق أمام هذا التدفق. تنشأ الموجات عند تدفق الماء على العائق أو بعيدًا عنه. معظم هذه الموجات تفقد طاقتها ببساطة وتختفي، لكن موجةً واحدة ذات طول موجي مُعين تعلو المجرى وتتحرك بسرعة تَحرُّكِ الماء في أسفل المجرى؛ ومِن ثمَّ تصبح الموجة ثابتة. إن الاضطراب المُستمر للماء الذي يسببه العائق يُغذي الموجة بالطاقة باستمرار، مما يجعلها تستمر. يمكنك أن تتأمَّل سلسلةً ثابتة من القِمَم والوديان بدلًا من الجدار الواحد الذي تراه في الحوض. يُمكن أن تمثل القفزات الهيدروليكية في المجاري السريعة الجريان مشكلة خطيرة (وربما قاتلة) عند ركوب الطوف على الأمواج؛ إذ مِن الممكن أن يصبح الطوف محصورًا عند القفزة أو قد ينقلب بسبب اضطراب الماء.

إذا وضعت بحرصٍ قطرة ماء أعلى مجرى القفزة الهيدروليكية في حوض المطبخ، فمن الممكن أن تصبح القطرة محصورة عند جدار القفزة وتظلَّ طافيةً لمدة طويلة (دون أن تندمج في الماء فحسب) بسبب استمرار مقاومة الهواء أسفلها بفعل الماء المتدفق.

ويمكن لمجرى أحد الموائع اللزِجة، مثل مانع التجمد (إيثيلين جليكول)، أن يكوِّن قفزة هيدروليكية دائرية، لكن يمكن أيضًا أن يتحوَّل تلقائيًّا إلى قفزة هيدروليكية مُضلعة ذات حوافَّ مُستقيمةٍ وأركانٍ حادة.

(٣٠) مستوى الماء في القنوات

لنفترض أنك في قاربٍ يتحرك في قناةٍ ضيقة وضحلة جدًّا. عندما تمرُّ مقدمة القارب على نقطة على جانب القناة، هل يرتفع منسوب المياه في تلك النقطة أم ينخفض؟

الجواب: عند تحرُّك القارب في القناة لا بدَّ من سحْب المياه في مقدمة القارب عبْر المساحة المفتوحة الضيقة على جانبَي القارب لتصبح خلف القارب في النهاية. ويصاحب حركة الماء تلك انحسارٌ مُستمر في الماء عند مقدمة القارب. ونظرًا لأن ضغط الماء منخفض عند الانحسار، فإن الانحسار يسحب الماء بكفاءةٍ من مقدمة القارب ويُرسلها إلى جانبَي القارب، وتُعرَف هذه العملية باسم «سَحْب المياه»؛ وعلى هذا النحو، كلما تقدَّم القارب انحسر الماء على جانبَي القناة فيما يُعرف باسم «تأثير القناة». والاختلاف الناتج في ضغط الماء ومُعدَّل التدفُّق على جانبَي القارب يمكن أن يجعل الملاحة في القناة صعبة، ونبض الضغط المُنخفِض يمكن أن يؤثر على المعدَّات على جانبَي القناة أو على الفروع المائية المُتلاصِقة.

(٣١) الأمواج المُنعزلة

في عام ١٨٣٤ شهد المهندس ومعماري البحرية البريطاني جون سكوت راسل موجةً غريبة في قناة مائية بالقُرب من إدنبرة. فقد كان هناك خيول تجرُّ أحد القوارب بسرعة في الماء، وفجأةً توقَّفت الخيول وتوقَّف القارب. رغم ذلك، لم تتوقَّف الموجة التي كانت عند مُقدمة القارب، بل استمرَّت في التقدُّم في القناة بسرعة ٤ أمتار في الثانية. تمكَّن راسل من اتباع هذه الموجة على صهوة جواده، وبلغ ارتفاعها حوالي ثُلث متر وطولها حوالي عشرة أمتار (بعرض القناة)، لمسافة تقرُب من ثلاثة كيلومترات قبل أن تغيب عن نظره في «انعطافات القناة».

اندهش راسل من عدم تضاؤل المَوجة أثناء سفرِها. فإذا ضربتَ الماء في مجرًى مائيٍّ فإن الأمواج التي تصنعها تتضاءل سريعًا جدًّا ولا تستطيع بالتأكيد أن تُسافر عدة كيلومترات حتى على سطح مسطحٍ مائي عريض. فما الذي كان مختلفًا في موجة راسل؟

الجواب: إذا سار قارب في القناة بسرعةٍ أكبر من سرعة الأمواج على الماء، فإن مُقدمة القارب تميل إلى دفع الماء أمام القارب. وإذا كانت سرعة القارب أسرع قليلًا من سرعة الموجة، فإن الماء يُكوِّن العديد من القمم والأودية المُنفصلة. وإذا أسرع القارب، فإن الأودية تفيض بالماء ويصبح الماء المدفوع كتلةً واحدة بارزة تُسمَّى «الموجة المُنعزلة» أو «السوليتون».

رأى راسل موجة منعزلة انطلقتْ من القارب عندما توقف فجأة. وعلى الرغم من أن الحسابات الرياضية الخاصة بهذه الموجة تُشتَهر بالصعوبة، فإن الموجة المنعزلة نفسها بسيطة. في العادة تخضع الموجات المُرسَلة عبْر الماء إلى التصنيف وفقَ الطول المَوجي، وتُعرَف هذه العملية بالتشتُّت؛ ولذلك، إذا أرسل الارتطام مجموعة أمواج مختلفة في الطول الموجي، فإن الأمواج تتشتَّت وتتلاشى أيضًا مع المسافة. أما في حالة الموجة المنعزلة، فإن اضطراب مستوى الماء يزيد بفعل الموجة نفسها؛ مما يمنع التشتُّت، ومن ثَمَّ تحتفظ الموجة بشكلها. في الواقع، من المُفترض أن تسافر الموجة المنعزلة لمسافةٍ طويلةٍ جدًّا لأنها تفقد طاقتها تدريجيًّا بفعل انخفاض لُزوجة الماء (الاحتكاك الداخلي).

وفي الموجة العادية يتحرك جزء من الماء في مسارٍ دائري أو بيضاوي، لكن لا ينتقل في اتجاه حركة الموجة. على سبيل المثال، إذا ضربتَ الماء لإرسال الأمواج في بحيرة، فإن الموجات فقط، وليس الماء، هي ما يتحرك على سطح البحيرة. أما الموجة المنعزلة فمختلفة لأنها «تنقل» الماء بالفعل. ولتوضيح ذلك، جعل راسل قوارب كثيرة تجرُّها الخيول تُرسِل موجاتٍ مُنعزلةً على طول إحدى القنوات. ووجد راسل أن عُمق الماء زاد عند طرف القناة البعيد وانخفض (بالقدر نفسه) عند الطرف القريب.

(٣٢) أمواج المد

عندما يدخل المدُّ ثم يغمر أنهارًا مُعينة، لماذا تُكَوِّن المياه الداخلة جدارًا مضطربًا يُطلَق عليه «موجة المد»، التي يُمكن أن تزيد عُمق المياه للغاية أثناء تجاوزها نقطةً معينة في النهر؟ في بعض الأنهار (مثل نهر سيفرن في إنجلترا) وفي بعض المناسبات (عندما يكون المد مناسبًا)،

يمكن أن تكون الموجة التي تكتسح النهر مرتفعةً بدرجةٍ كافية تجعل المُتزلِّجين على الأمواج يركبونها لمسافة عدة كيلومترات.

ولوقتٍ طويل قبل أن يُصبح ركوب الأمواج رياضةً كان الصيادون يضعون قواربهم عادةً عند مَصبِّ النهر ليحصلوا على ركوبةٍ إلى أعلى النهر على ظهر موجة المَد. من الواضح أن هذا الاستخدام كان غير معروف لقادة وطواقم سفن البحرية الملكية التي استكشفت نهر تشيانتانج في الصين عام ١٨٨٨. ذاتَ ليلةٍ بينما كانت السفن راسيةً في النهر، سمعَت الطواقم دويًّا هائلًا. وبعد حوالي ثلاثين دقيقة، أسرتْ موجةُ مدٍّ السفنَ وحملتها ضدَّ التيار لمسافةٍ تقرُب من كيلومتر رغم تشغيل محركات السفن بكامل طاقتها لمواجهة الحركة. كان الدويُّ ناتجًا عن اضطراب موجة المد، ذلك الاضطراب الذي كان من الممكن أن يقلِب السفن.

الجواب: يُمكن أن تَحدُث موجة المد عندما تتدفق كمية كبيرة من الماء ضد تيار النهر مُكوِّنةً إما جدارًا مائيًّا مضطربًا واحدًا أو سلسلة انسيابية قصيرة من القِمَم والوديان. والشروط المثالية لموجة المد هي: (١) اختلافات كبيرة في ارتفاع ماء المدِّ في المُسطَّح المائي الذي يصبُّ فيه النهر. (٢) يجب أن يكون النهر ضحلًا، له جوانب مُنحدِرة ومصبٌّ يُشبه القُمع. بينما تُدفَع الأمواج ذات الطول الموجي الطويل والموجودة في الماء الأعمق إلى الماء الضحل في المصبِّ ثم إلى النهر، يُكوِّن الماء جبهة أو جدارًا. في «القفزة الموجية» تزداد القِمم والوديان في الارتفاع والعمق وتصبح مُقدِّمة القِمم أكثر انحدارًا إلى أن تغمر القِمَم الوديان. والنتيجة هي تَكوُّن جدار مائي واحد أو تَموُّجٍ مائي يُطلق عليه «الموجة المنعزلة»، التي تتحرك ضد التيار معاكسةً لتدفُّق النهر العادي. ومن الأمثلة التاريخية لهذه الموجة، سقوط ابنة كاتب القرن التاسع عشر الشهير فيكتور هوجو من فوق قاربها في نهر السين الأدنى بسبب موجة مدٍّ لزجةٍ مفاجئة، وغرقتْ بسبب عدم قُدرتها على السباحة.

(٣٣) المدُّ والجزْر

ما الذي يُسبِّب المد والجزر؟ لماذا يحدث في بعض المواقع الشاطئية ذروتَا مدٍّ يوميًّا ويحدُث في المواقع الأخرى ذروة واحدة فقط؟

الجواب: إليكم جوابًا بسيطًا؛ السبب الرئيس للمد والجزْر هو تأثير قوة جاذبية القمر على مُحيطات الأرض، على الرغم من أن تلك القوة ليست كافية لرفع المياه. ونظرًا لاختلاف هذه القوة عبْر سطح الأرض (فهي أقوى على الجانب المُواجِه للقمر، وأضعف عند الجانب المُقابل)، فإن هذه القوة تُعيد تشكيل توزيع المياه من خلال بسطها بصورة موازية للخط

الذي يربط الأرض بالقمر. ويُسفِر البسط عن نتوءَين في توزيع الماء؛ أحدهما على الجانب المُواجه للقمر، والآخر على الجانب المُقابل. لو لم تكن الأرض تدور لأصبح مستوى الماء في أي موقعٍ شاطئي عند النتوء المُواجِه للقمر عاليًا (مد) طوال اليوم، وسيحدُث المِثل أيضًا في الموقع الموجود عند النتوء المُقابل. إلا أن دوران الأرض يعني أن أيَّ موقعٍ شاطئي يدور ما بين كِلا النتوءَين في يومٍ واحد تقريبًا؛ ومِن ثَمَّ سوف يشهد ارتفاع الماء مرَّتَين.

وتُوجَد بعض العوامل التي تزيد الأمر تعقيدًا؛ فالنتوءات ليست موجودةً على نحوٍ دقيق تمامًا على خطٍّ يربط بين الأرض والقمر؛ لأنَّ حركة الماء تشهد احتكاكًا داخل الماء ومع حوافِّ الشواطئ. هذا الاحتكاك يؤخِّر استجابة الماء للبسط الصادر عن القمر. وبهذا فإن نقطة المد العالي في مدينة ساحلية قد تحدُث بعد ساعة أو أكثر من وصول القمر إلى أعلى نقطة في السماء. على سبيل المثال، تتأخَّر نقطة المد العالي في بحر المانش لساعاتٍ كثيرة لأن حركة الماء تجد مقاوَمة كبيرة.

ويُوجَد عامل تعقيد آخر يتمثل في أن قوة جاذبية الشمس تميل أيضًا إلى بسط توزيع الماء. إلا أن تأثير الشمس يقلُّ عن نصف تأثير القمر بشكلٍ تقريبي. وعلى الرغم من أن الشمس أكبر كثيرًا من القمر، فإنها أبعد كثيرًا عن الأرض. وعندما يكون القمر محاقًا وبدرًا، تكون الشمس والقمر على استقامةٍ واحدة ويُطلَق على تأثير الجاذبية المجتمِع للشمس والقمر، الذي يُسفر عن فائضٍ في المدِّ والجزْر، اسم «المد والجزر التام». وعندما تفصل بين اتجاه الشمس والقمر زاويةٌ مقدارها ٩٠ درجة، ينتج عن تأثير جاذبية الشمس والقمر معًا «المد والجزر الناقص». وبسبب عوامل التعقيد المختلفة، من المُمكن أن تشهد بعض المواقع الشاطئية مدًّا وجَزرًا واحدًا ملحوظًا يوميًّا.

(٣٤) المدُّ والجزْر في خليج فندي

ظاهرة المدِّ والجزر في خليج فندي (نوفا سكوشا، كندا) مُثيرة للغاية؛ ففي بعض الأحيان يصل نطاق الفرق في منسوب المياه بين أدنى مستويات الجزْر وأعلى مستويات المدِّ إلى ١٥ مترًا خلال ساعات قليلة. فلماذا يمكن أن يكون نطاق المدِّ والجزْر كبيرًا لهذه الدرجة في هذا المكان ولا يكون كبيرًا لهذه الدرجة في أماكن أخرى؟

الجواب: يمكن أن تجعل الماء الموضوع في حوض يتذبذب (يهتز) إذا ضربْتَه (ضخَخْتَه) بمجدافٍ بانتظام. وستحصل على أقوى ذبذباتٍ إذا ضبطتَ وقت الدفع بحيث تحدث كل ضخَّة في كل مرة يكون فيها الماء في أعلى نقطة عند أحد طرفَي الحوض. بهذا

التوقيت يمكن القول إنك تضخُّ الماء على نحوٍ «موافق للرنين»، ويمكن القول إن الفاصل الزمني لضخِّ الماء يوافق «زمن الذبذبة» في الحوض.

ويمكن أيضًا أن يتذبذب الماء في الخليج في حالة ضخِّه على نحوٍ موافق للرنين. فعلى سبيل المثال، تميل تأثيرات المدِّ والجزر الصادرة عن القمر إلى إحداث ذبذبات في الخليج؛ وهو ما يجعل الماء يهتز. إلَّا أنَّ الذبذبات في معظم الخلجان تكون صغيرة لأن وقت تأثيرات المد والجزْر لا يتوافق مع زمن الذبذبة في الخليج. أما خليج فندي فهو مختلف؛ لأن زمن الذبذبة فيه يعادل ١٣,٣ ساعة، وهو قريب على نحوٍ معقول من الزمن الفاصل بين نتوءات المد والجزْر الذي يبلغ ١٢,٤ ساعة؛ ولهذا تكون حركة الماء في الخليج شديدة.

وتُشير السجلات التاريخية إلى أن اختلافات المد والجزر في خليج فندي قد زادت تدريجيًّا لأن زمن الرنين في الخليج تغيَّر تدريجيًّا ليقترب من زمن تَغايُر المد والجزر. ويمكن أن يكون هذا التغيُّر ناتجًا عن تغيُّراتٍ في شكل الخليج بسبب زيادة منسوب البحر.

(٣٥) الماء الميِّت

في رحلةٍ في القطب الشمالي في أغسطس ١٨٩٣ صادفَتِ السفينة «فرام» ما يُطلَق عليه حاليًّا «الماء الميِّت» في الساحل الشمالي لسيبيريا. كانت السفينة تستطيع التحرُّك بسرعة ستِّ أو سبع عُقدات، لكنها في الماء الميِّت لم تستطِع التحرُّك إلا بسرعة ١,٥ عقدة فقط، على الرغم من هدوء كلٍّ من الماء والطقس. بالإضافة إلى ذلك، كانت السيطرة على السفينة قليلة، واضطُرَّ القبطان في واقع الأمر إلى السير في حلقات تفاديًا لمنطقة الماء الميت. لم يكن الماء مختلفًا من الناحية الشكلية عن بقية ماء المُحيط المُمتد. فما الذي سبَّب انخفاض السرعة وفقدان السيطرة على الدفة؟

الجواب: يتكوَّن الماء الميت عندما تعلو طبقةٌ من الماء العذْب نسبيًّا الماءَ المالح، ويمكن حدوث ذلك عندما يصب أحد الأنهار في مياه المحيط. تُوجَد واجهتان؛ هما واجهة الهواء والماء العذب، وواجهة الماء العذب والماء المالح، وكلٌّ منهما تلعب دورًا. في المعتاد، يتسبَّب قدْر كبير من طاقة مُحرك السفينة في إحداث موجات على أولى هاتَين الواجهتَين، ولتفكر في عملية إنتاج الموجات باعتبارها نوعًا من المقاومة الواقعة على السفينة. في الماء الميت، تُنتج السفينة مجموعتَين من الأمواج، مجموعة على كلِّ واجهة، ومن ثَمَّ تزيد المقاومة كثيرًا. وكلما حاولَت السفينة التحرُّك بسرعة، زادت سرعة تسرُّب طاقتها إلى «الموجات الداخلية»، كما يُطلَق عليها، في واجهة الماء العذب والماء المالح.

تُوجَد مقدمة السفينة فوق القمَّة الأولى في الموجة الداخلية. ويتحرَّك الماء أسفل هذه القمة في الاتجاه المعاكس للسفينة، فيقاوم حركة السفينة. ونتيجة لطول السفينة «فرام» فقد كانت دفَّتها أيضًا فوق قمَّة الموجة الداخلية؛ ومن ثَمَّ لم تكن الدفة ذات فائدة كبيرة في توجيه السفينة.

(٣٦) الأعاصير القُمعيَّة

يمكن أن تحدُث الأعاصير القُمعية في أماكن كثيرة في العالم، لكنها تهديد شِبه مُستمر في منطقة واسعة بمنتصف الولايات المتحدة الأمريكية يُطلق عليه «مجاز الأعاصير القُمعية». تُثير هذه الأعاصير الانبهار والخوف في كلِّ من يراها أو يختبئ منها؛ لأنها مزيج من الجمال والشرِّ في الوقت نفسه.

ما الذي يُسبب الأعاصير القُمعية، ولماذا تحدُث على نحوٍ متكرر في مجاز الأعاصير القُمعية؟ هل يدمر الإعصار القُمعي المنازل بدفع جدرانها للداخل أم بسحبها للخارج؟ هل تستطيع رياح الأعاصير القُمعية أن تغرس قشَّة في الخشب فعليًّا كما تزعم أحيانًا الصحف الشعبية؟

الجواب: الإعصار القُمعي هو دوَّامة هوائية يمكن أن تتكوَّن في عاصفة مُمتدة ينزلق فيها الهواء الدافئ الرطب أسفل الهواء البارد الجاف، وتتحرك كتلتا الهواء في اتجاهَين مُتعاكسَين. عندما يصعد الهواء الدافئ عبْر الهواء البارد ويبدأ بخار الماء في تكوين قطرات ماء ينطلق قدر كبير من الطاقة الحرارية بسبب التحوُّل من الحالة البخارية إلى الحالة السائلة. تؤدي حركة الهواء المُعقدة (كتلتان هوائيتان تتحركان في اتجاهَين مُتعاكسَين وهواء يرتفع لأعلى بسرعة) إلى «رياح القص» حيث يصبح للتدفُّقات الهوائية المجاورة سرعات واتجاهات شديدة الاختلاف. وبطريقة غير مفهومة جيدًا، فإنَّ هذه الظروف يمكن أن تؤدي إلى الدوَران ثم إلى حدوث الإعصار القُمعي. وعلى الرغم من إمكانية مُحاكاة هذه الأفعال على أجهزة كمبيوتر كبيرة، فإن المُحاكاة لا تكشف عن جواب بسيط عن سبب حدوث الإعصار القُمعي أو كيف تُولِّد الأعاصير القُمعية الكبيرة هذا القدْر الهائل من الطاقة.

ولا تُرى الأعاصير القُمعية إلا إذا التقطت الأتربة وأجزاء الحطام من الأرض ورفعتها عاليًا عبْر القمع، أو تسببت في تكثيف كبير للماء في صورة قطرات مائية. والأعاصير الأكبر حجمًا تتركَّب على الأرجح من عدة دوَّامات مُتزامنة؛ إذ تدور دوامات عديدة أصغر حجمًا

حول دوامة مركزية أكبر. وللأعاصير أشكال مختلفة؛ فمنها ما يُشبه الأقماع أو الأعمدة أو الحبال (الثعابين). وبعض الأعاصير القُمعية شِبه عمودية، والبعض الآخر يمتدُّ أفقيًّا قبل أن ينزل لأسفل. ويبدو أنَّ كل الأعاصير تتحرَّك عشوائيًّا، فهي تضرب أماكن مُتباعدة في الريف تاركةً ندبات كبيرة على الأرض.

وعلى النقيض من الاعتقاد الشائع، فإن خطر الإعصار القُمعي الذي يُهدِّد المنازل لا يتمثل في الانخفاض المفاجئ في ضغط الهواء خارج المنزل الذي قد يؤدي إلى انفجار الجدران للخارج. فضغط الهواء لا ينخفض كثيرًا في واقع الأمر. ولذلك، في حالة اقتراب الإعصار القُمعي لا تُهدِر وقتًا في فتح النوافذ آملًا أن يكون ضغط الهواء الداخلي مُساويًا لضغط الهواء الخارجي، بل اركض واختبئ! قد يكون القبو أفضل ملاذ، أما في حالة عدم وجوده فسيكون الحمَّام ودرعه الجزئي المُتمثل في حوض الاستحمام والمواسير أفضل ملاذ.

أما الخطر الذي يتهدَّد المنزل فهو الرياح عالية السرعة المُحيطة بالإعصار القُمعي. فبمجرَّد هبوب الرياح على حواف سقف المنزل يمكنها أن تقتلعه. ومع ضياع السلامة الهيكلية للمنزل سوف تهبُّ الرياح دافعةً الجدار المُواجه لها للداخل وسوف تهبُّ على الجدران الثلاثة الأخرى وتجعلها تبرُز للخارج. وعلى النقيض ممَّا تراه في فيلم «ساحر الأوز» فمن غير المُحتمَل أن يقتلع الإعصار القمعي المنزل بالكامل وأن ينقله. بل الأرجح هو تَحطُّمه ونَقْل أنقاضه لتُستخدَم على الأرجح كشظية لتدمير منزل قريب. وإذا لم يتحطم المنزل، فمن الممكن أن يدور في نهاية المطاف حول نقطة ارتكاز، ستكون مواسير الحمَّام على الأرجح، بحيث تنتهي به الحال في اتجاهٍ جديد.

يمكن أن تكون رياح الإعصار القُمعي قوية لدرجة كافية لغرس قشة في الخشب أو لغرس عصًا خشبية في أنبوب من الصلب. وفي المُحاكاة المُختبرية لرياح الأعاصير القُمعية، اخترقت الشظايا وخِلال الأسنان وقش المقشة أنواعًا مختلفة من الأهداف الخشبية بعد إطلاقها من مدفع هوائي.

قصة قصيرة

(٣٧) النظر إلى الإعصار القُمعي

قليل من الناس نجَوا من تجربة النظر إلى قُمع الإعصار القمعي. وأدقُّ وصفٍ مُسجل لهذه التجربة أدلى به النقيب روي إس هول الذي ضرب الإعصار القُمعي بيته في مايو ١٩٤٨؛ فبعد اقتلاع سقف المنزل واندفاع بعض الجُدران إلى الداخل، صار هول قادرًا على

رؤية منزل جاره وشعر بالاطمئنان؛ لأنَّ منزله لم يَطِرْ في الهواء كما كان يخشى كثيرًا. ورغم ذلك، رأى بعدها شيئًا مريعًا؛ فعلى بُعد ٢٠ مترًا تقريبًا هبط شيء حتى ارتفاع ستة أمتار تقريبًا فوق الأرض وحلَّق في تذبذبٍ رأسي بطيء. كان هذا الشيء مُنحنيًا وسطحه المُقعَّر مواجهًا له. وأدرك حينها مصدومًا أن هذا الشيء المُحلِّق كان السطح الداخلي لقُمع الإعصار، وأنه «كان داخل القمع»!

وعندما نظر لأعلى داخل القمع بدا أنه يمتدُّ لألف قدَم ويتأرجح ويميل تدريجيًّا. كان يضم منطقة مركزية ساطعة تلمع مثل مصباح الفلورسنت. وكلما انحنى القمع تكونت الحلقات على طوله. وعندما وجد هول أن داخل القمع لا يسحَب شيئًا لم يجد غضاضة في التنفُّس (وهو ما يعني أن ضغط الهواء لم يكن منخفضًا بطريقة ملحوظة)، وتعجَّب من الصمْت التام (على النقيض من الدَّويِّ الشديد الذي يحدث مع اقتراب الإعصار القُمعي). وفجأة ابتعد القمع وخرجت أسرة هول من المخبأ ووجدته.

(٣٨) الشواهق المائية والسُّحُب القُمعية

ما الذي يُسبب الشاهقة المائية، وهي تلك الدوَّامات الكبيرة التي نراها فوق الماء؟ لماذا يمكن أن تنجو بعض القوارب أحيانًا عند مُقابلة الشاهقة المائية؟

الجواب: تتكوَّن الشاهقة المائية عادةً فوق الماء الذي يكون فيه سَحْب قوي لأعلى محاطًا بمنطقة سَحْب لأسفل. يلتقط الهواء المُنجذِب للسحب لأعلى الرطوبة والطاقة الحرارية من الماء في الأسفل، وعندما يصعد في القُمع يكون أكثر دفئًا ورطوبة من الهواء المُحيط. ونظرًا لأنَّ الهواء أكثر دفئًا، فإنه يندفع لأعلى، لكن بعدها تبدأ الرطوبة في التكثُّف في صورة قطرات. يُطلِق هذا التغيُّر الكثير من الطاقة الحرارية التي تزيد من دفء الهواء وتزيد من اندفاعه لأعلى. هذه العملية هي «المحرك الحراري» الذي يقود الشاهقة المائية. يهبط الهواء في المنطقة المُحيطة، لا سيما الهواء الذي أصبح باردًا بفعل المطر، ليحلَّ مَحلَّ الهواء الذي صعد إلى القُمع. وعلى الرغم من أن الشاهقة المائية تُشبِه الإعصار القُمعي وتُوصَف غالبًا بأنها إعصار قُمعي ضعيف، فإن المحرك الحراري الذي يقودها وعدم اتِّزان الهواء الذي يُسفر عن السَّحْب لأعلى يُعدَّان أكثر شبهًا بنظيرَيْهما في الدوَّامة الترابية.

وعلى الرغم من أن القوارب تنجو في الغالب من الشواهق المائية الضعيفة، فإن الشواهق المائية الأكبر يُمكن أن تلحق ضررًا كبيرًا بقاربٍ متوسط الحجم ويمكن أيضًا أن تقلبه بسهولة. والشواهق المائية الأكبر حجمًا هي على الأرجح المسئولة عن قصص الأسماك

التي تهطل من السماء؛ إذ تستطيع الشاهقة المائية سَحْب قدرٍ كبير من الماء والأسماك لأعلى قبل أن تنتقل للأرض حيث تفقد طاقتها الحرارية وتتبدَّد وتسقط حمولتها.

وتكون النهاية السُّفلية مُحاطة بـ «غلاف من الرذاذ» يتمثل في أسطوانة رذاذ مُكتنزة دوَّارة. والثلث الأسفل من القُمع مرئي إلى حدٍّ بعيد بسبب الماء المسحوب لأعلى إلى القمع، ويمكن رؤية بقية القُمع إذا تكثَّف بخار الماء إلى قطرات يُمكنها بعد ذلك تشتيت ضوء الشمس.

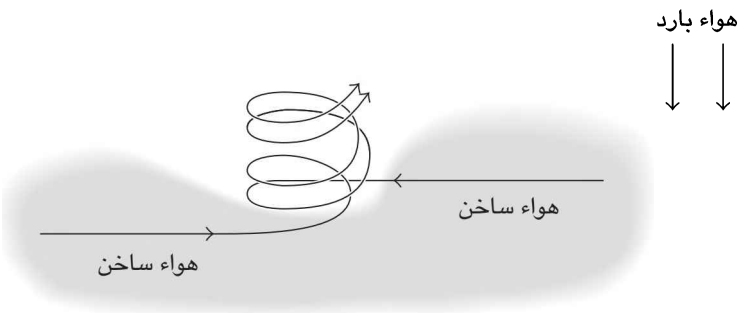
(٣٩) الدوَّامات الترابية والدوَّامات الضبابية والدوَّامات البخارية

الدوامات الترابية هي زوابع تظهر غالبًا في المناطق الحارة، لكنها تظهر أيضًا على سطح كوكب المريخ البارد. تُصبح هذه الدوَّامات مرئية بسبب التراب والقاذورات والفضلات الأخرى التي تلتقطها من الأرض ثم تحملها لأعلى. كثير من الدوَّامات الترابية صغير وغير ضار، لكن بعضها يبلغ ارتفاعه كيلومترًا تقريبًا وتكون كبيرة لدرجة تكفي لحمل حيوانات صغيرة (أو ربما أطفال). والدوَّامات الترابية على سطح المريخ أكبر حجمًا، وقد يصل ارتفاعها إلى ستة كيلومترات.

والدوَّامات الضبابية زوابع يمكن أن تظهر في الضباب، والدوَّامات البخارية زوابع يمكن أن تظهر على الماء في الأيام الباردة. وكلتاهما تستمرُّ لفترة وجيزة ولا تسبب ضررًا.

فما الذي يُسبب هذه الأنواع من الزوابع؟

الجواب: تنتُج هذه الأنواع المختلفة من الزوابع بسبب الوضع غير المُستقر الذي فيه يعلو الهواء البارد الهواءَ الدافئ. على سبيل المثال، يمكن أن تحدُث الدوَّامة الترابية عندما يُسخِّن ضوء الشمس الساطع الأرضَ بشدَّة؛ ومِن ثمَّ يسخن طبقة الهواء الرقيقة التي تعلو الأرض. هذا الهواء الساخن (مُنخفض الكثافة) من المُفترَض أن يرتفع بعيدًا عن الأرض، لكن في حالة عدم وجود رياح في المنطقة أو وجود رياح خفيفة، يرقد الهواء البارد كالدثار فوق طبقة الهواء الساخن. يُصبح الوضع غير مُستقر، ويمكن أن يتسبب ركضُ أرنبٍ يمرُّ عبْر المنطقة في إثارة انفجار علوي من الهواء الساخن. بعد ذلك، يتدفَّق الهواء الساخن عبْر الأرض إلى نقطة الانفجار، ويدور في دوَّامة في حين يدخل عمود الهواء الساخن الصاعد؛ وهذا ما يُطلَق عليه الدوَّامة الترابية (انظر شكل ٢-١٢). هذا الالتواء يُمكن أن يكون في اتِّجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاه عقارب الساعة؛ فالأمر يعتمِد على



شكل ٢-١٢: بند ٢-٣٩: هواء ساخن يتدفَّق على أرضٍ ساخنة ثم يتلوَّى صاعدًا لأعلى. وينزل الهواء البارد لأسفل.

التدفُّق فوق الأرض والعقبات التي يُقابلها. وفي المنطقة المُجاورة ينزل الهواء البارد ليَحلَّ محلَّ الهواء الساخن الذي فُقد في الدوامة الترابية.

يمكن أن تنتقل الدوَّامة الترابية من الأرض إلى الماء، لكن إن لم تلتقط الكثير من الماء فقد يكون من الصعب رؤيتها، وسيكون الدليل الوحيد على وجودها هو الحافة الدائرية التي تكوِّنها على الماء.

يمكن أن تحدُث الدوامة الضبابية عندما يرتفع الضباب من العشب الرطب الواقع تحت ضوء ساطع؛ فالعشب يُسخِّن الهواء الذي يعلوه مباشرةً، ثم يبدأ هذا الهواء في الصعود على نحوٍ شبيه بصعود الهواء الساخن في الدوامة الترابية. إلا أن الرطوبة الموجودة في الهواء تتكثَّف لتُكوِّن قطرات، وتطلق هذه العملية قدْرًا كبيرًا من الطاقة الحرارية وتجعل الهواء الساخن يرتفع بسرعة أكبر. أما الدوَّامة البخارية فيمكن أن تحدث فوق الماء عندما تكون درجة حرارة الهواء أقل من درجة التجمُّد وتكون درجة حرارة الماء فوق درجة التجمُّد. عندئذٍ يكون الهواء المجاور للماء أكثر دفئًا عن الهواء الذي يعلو الماء، وهذا موقف عدم اتزان.

قد تتمكن من صنع دوَّامات بخارية مُصغرة في يوم بارد الطقس؛ فكل ما عليك هو وضع إناء واسع أسفل النافذة وملؤه بماء شديد السخونة. بعد ذلك افتح النافذة بحيث يتدفَّق الهواء البارد الكثيف من النافذة وعبر الماء. سيتصاعد الهواء الساخن وبخار الماء

الصادر عن الماء لأعلى عند دخولهما مجال الهواء البارد؛ لأن الهواء البارد أكثر كثافةً، ولأن بخار الماء يبدأ في التكثُّف مُطلِقًا طاقةً حرارية. كما يندفعان أيضًا أفقيًّا بفعل تدفُّق الهواء البارد. وقد تُسفِر الحركة الرأسية والأفقية المُجتمعة، بالإضافة إلى بعض الاضطراب، عن دوَّاماتٍ سريعة الزوال تُصبح مرئية بسبب تكثُّف قطرات الماء.

(٤٠) الدوَّامات الحلقية

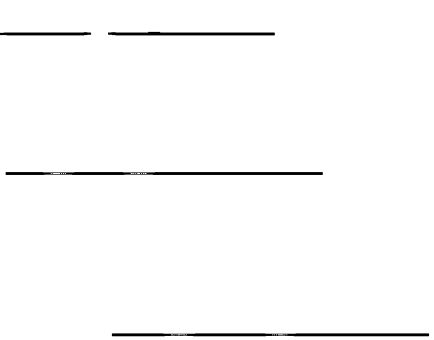
كيف يُطلِق المُدخِّن حلقة دخان؟ لماذا تتمدَّد حلقة الدخان إذا اقتربت من الجدار؟ كيف يُنتِج الدولفين حلقة هواء مُشابهة في الماء؟

الجواب: الحلقة الدخانية هي «دوامة حلقية» صادرة عن طريق نفثٍ قويٍّ من فمٍ مليء بالدخان. عندما ينطلق الدخان والهواء عبْر فتحة الفم الدائرية، يميل التدفق قُرب الشفاه إلى التباطؤ بسبب الاحتكاك؛ ومِن ثَمَّ يسبِقُه التدفق عبر مركز الفتحة. يتسبَّب هذا في جعل التدفُّق ينحني للخارج حول الشِّفاه، ومن ثَمَّ تبدأ حركة الدوَّامة. في هذه الحالة يعمل الدخان عمل «المادة الكاشفة» بحيث يجعل حركة الهواء مرئية.

وإذا اقتربت الحلقة الدُّخانية من الجدار، فإن احتكاك تدفُّق الهواء بالجدار يجعل الحلقة تتمدَّد. ويقلُّ مُعدَّل الْتِواء الهواء على نحوٍ شبيهٍ بانخفاض مُعدَّل دوران المُتزلِّج على الجليد حول نقطةٍ ما عندما يَفرد ذراعَيه للخارج.

يُحبُّ الدولفين أيضًا اللعب بالدوَّامة الحلقية، ويُمكن أن يُنتِج واحدةً بعدَّة طُرق. إليكم الطريقة الأكثر شيوعًا على الأرجح، وفيها يسبح الدولفين على جانبه وهو يُقلِّب زعنفة الذيل الرأسية (في هذه اللحظة) من جانبٍ إلى آخر. أثناء تحرُّك الزعنفة في الماء يتباطأ التدفُّق المُجاور للزُّعنفة بفعل الاحتكاك، فيؤدِّي إلى حركةٍ مُنحنية تتطوَّر إلى دوَّامة حلقية على مُسطح رأسي. ينقلب الدولفين ويُوجِّه فتحة النفْث إلى الدوَّامة الحلقية، وينفُث الهواء في قلب الدوَّامة حيث يتوزَّع سريعًا عبْر الدوامة. يؤثر الهواء على طفو الدوامة ويعمل أيضًا عمل المادة الكاشفة. قد يلعب الدولفين بالدوَّامة عن طريق تعقُّبها، والسباحة داخلها وإنتاج دوَّامة حلقية أخرى للتفاعل معها، أو قد يكسر جزءًا منها فيلتف مُكوِّنًا دوامة حلقية فرعية أصغر.

في حُجرة الدراسة يُمكن تكوين الدوامة من خلال «المدفع الهوائي»، وهو عبارة عن صندوق به فتحة دائرية في المقدمة وغطاء مرن (مثل كيس القُمامة البلاستيكي)



شكل ٢-١٣: بند ٢-٤٠: حلقة دخان مُتعقِّبة تمرُّ خلال حلقة دخان قائدة.

موضوع على الظهر المفتوح نوعًا ما. عند سحْب الغطاء المرِن للخلف وإطلاقه فإنه يدفع تيَّار هواء من خلال الفتحة الدائرية. وكما هي الحال مع نفْث حلقة الدخان، فإن التدفق يُكوِّن دوامة حلقية لكن دون مساعدة المادة الكاشفة. وباستخدام المدفع الهوائي يمكن أن تفاجئ شخصًا في الغرفة حين يرى دوَّامة حلقية كبيرة تقترِب منه دون سابق إنذار.

يمكن تكوين الدوَّامة الحلقية أيضًا من خلال إسقاط قطرة في مائع من نوعها أو في مائع يمكن أن تختلط به. مع ارتطام القطرة واختراقها للمائع فإنها تُكوِّن دوامة حلقية. ومن السهل رؤية هذا التكوُّن إذا كانت القطرة تحتوي على كميةٍ صغيرة من الصباغ.

وإذا تَبِعَت دوامةٌ حلقية دوامةً أخرى، وكانتا مُتمركزتَين نسبيًّا على المحور نفسه، فإنَّ الدوامة المُتعقِّبة يمكن أن تلحق بالدوامة القائدة. واعتمادًا على الظروف، من الممكن أن تندمج الدوَّامتان لتُكوِّنا دوامةً واحدة أو يمكن أن تلعبا اللعبة التالية (انظر شكل ٢-١٣)؛ إذ تتقلَّص الدوَّامة المُتعقِّبة وتدور بمعدل أسرع في حين تتمدَّد الدوَّامة القائدة وتدور بمعدَّل أبطأ. بعد ذلك تمرُّ الدوامة المُتعقِّبة عبر الدوامة القائدة وتُصبح القائدة الجديدة. ويمكن أن يحدُث هذا التبادل المُتخطي مرات عديدة. يمكنك أن ترى تخطيًا مُماثلًا إذا أسقطتَ قطرة ثانية في سائلٍ سريعًا بعد دخول القطرة الأولى في السائل. وإذا تحوَّلت كلُّ قطرة إلى دوَّامة حلقية، فإن الدوامة الثانية لا بدَّ أن تمرَّ خلال الدوَّامة الأولى.

(٤١) السيفون والمراحيض

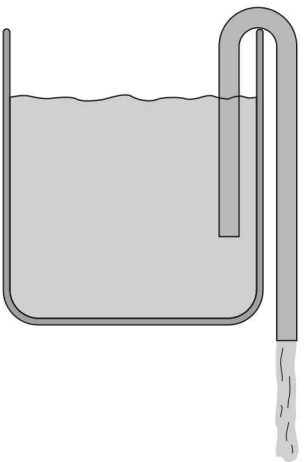
كيف ينزل السائل من وعاءٍ على النحو الذي يحدُث مع ماء السيفون (انظر شكل ٢-١٤)؟ أي لماذا يصعد السائل إلى أعلى الأنبوب الموجود داخله؟ وبصفةٍ خاصة، هل ضغْط الهواء في السائل يدفعه أعلى الأنبوب؟ ما الذي يُحدِّد ارتفاع صعود السائل؟ لماذا يجِب أن يكون طرفُ الأنبوب الحُرُّ أقصرَ من الطرف الموجود داخل الوعاء؟

الجواب: لبدء طرْد المياه لا بدَّ من ملء الأنبوب المُتدلِّي على جدار الوعاء بالسائل بالكامل. (ربما يكون قد مُلِئ عن طريق كرة ضغط تسحب السائل لأعلى قمَّة الأنبوب.) وعلى الرغم من أن السائل يتدفَّق ولا يمتلك قوام المادة الصُّلبة، فإنه مُتماسك. أي إنَّ كل جزءٍ ينجذب إلى الأجزاء المجاورة. عندما يبدأ السائل في جزء الأنبوب المُتدفِّق لأسفل في النزول من الأنبوب، تبدأ الأجزاء القريبة من القمة في سحب الأجزاء الأخرى عبْر القمَّة، وهذا يسحب أجزاءً أخرى عاليًا إلى القمَّة. الأمر برُمته يُشبه وجود سلسلة داخل الأنبوب. فما دام جزء السلسلة خارج الوعاء أطول من الجزء الموجود داخل الوعاء فسوف تسحب الجاذبية السلسلة لأعلى الأنبوب وتمرُّ عبرَه لتنزل منه.

وعلى النقيض من الاعتقاد الشائع، فإن الضغط الجوي «لا يدفع» السائل لأعلى الأنبوب. في الواقع، إذا تغيَّر الضغط الجوي فإنَّ عملية انتقال الماء لن تتأثر.

عند انتقال السائل عبْر الأنابيب يُقال إنه تحت ضغط «إجهاد الشد»؛ نظرًا لأنَّ أيَّ جزءٍ من السائل في جزء التدفُّق لأعلى يسحب لأعلى ولأسفل في الوقت نفسه. ومن المُثير للدهشة أن الماء يمكنه مقاومة إجهاد الشدِّ لدرجة مُعينة، وعند تجاوز هذه الدرجة فإن الماء يُكوِّن فجأةً تجاويف ويتبخَّر من خلالها. يمكن زيادة ارتفاع السيفون إلى أن يحدُث انتقال السائل في أعلى الأنبوب. وعندما تقطع تجاويف الهواء استمرارية تدفُّق الماء، فإن انتقال الماء يتوقَّف ويتسرَّب الماء ببساطة من الأنبوب.

وسوف يتوقَّف انتقال السائل عبْر الأنابيب أيضًا إذا تسلَّل الهواء إلى جزء التدفُّق لأعلى، وتجمَّع في الأعلى وقطع استمرارية تدفُّق الماء. ويحدُث هذا النوع من المقاطعة في المرحاض العادي. عندما يُصَبُّ الماء إلى قاعدة المرحاض من الخزَّان فإن الضغط الزائد في قاعدة المرحاض يدفع الماء إلى ماسورة التصريف؛ مما يُشكِّل أنبوبًا لانتقال الماء. ثم ينتقل الماء وما فيه إلى الماسورة إلى أن يُصَرَّف الماء الموجود في قاعدة المرحاض على نحوٍ شِبه كامل. بعد ذلك يُمكن أن يُكوِّن الهواء فقاقيع في السيفون فيقطع استمرارية تدفُّق الماء في أعلى السيفون ويمنع عملية انتقال السوائل عبْر الأنبوب. عادة يستمرُّ ماء الخزان



شكل ٢-١٤: بند ٢-٤١: أنبوب انتقال السائل في السيفون.

في دخول قاعدة المِرحاض لعدَّة دقائق أخرى، لكن هذا لا يكفي لإعادة بدْء عملية انتقال السائل عبْر الأنبوب. ورغم ذلك، فإنه يعمل كعازلٍ للروائح التي يُمكن أن تتسرَّب إلى الوعاء من ماسورة التصريف.

(٤٢) السَّحالي التي تسير على الماء

كيف تستطيع سحلية البازيليسق الجري على الماء دون أن تغُوص فيه؟ ليست السحالي الصغيرة الخفيفة الوزن هي وحدَها القادرة على الهروب من مُفترسيها بهذه الطريقة، لكن السحالي البالغة الأكبر والأثقل وزنًا تستطيع فِعل ذلك أيضًا.

الجواب: أثناء الجري تبدأ خطوة القدَم عندما تضرب السحلية قدَمها في الماء. يَصدر عن هذه الضربة قوَّة دعم رافعة للأعلى للسِّحلية، لكن نظرًا لأن الماء مائع مُنخفِض اللزوجة (الاحتكاك الداخلي) فسُرعان ما تبدأ القدم في الغوص في الماء. وعندما تغوص تدفع تجويفًا هوائيًّا للأسفل أولًا ثم للوَراء. والدفعة للوَراء تقدم قوة دافعة للأمام للسحلية ممَّا يسمح لها بالجري. ولأنَّ السحلية لا ترغب في مقاومة سَحْب الماء على رجلها، فإنها تسحَب الرِّجل خارج التجويف قبل أن يدخل الماء ويُحيط بقدمها ورجلها. في هذه الأثناء تكون الرجل

الأُخرى قد بدأت خطوتها بضربةٍ على الماء. وعلى الرغم من أنَّ السحلية تغُوص نوعًا ما، فإن متوسط القوة الرافعة التي تشهدها من خلال سلسلة ضربات القدم كافية لدعمها حتى لو كانت كبيرة.

(٤٣) قضيب من الرصاص يطفو في قارب

افترِض أنك جالس في قارب يطفو على بُحيرة صغيرة في الباحة الخلفية، وأن لديك داخل القارب قطعة فلِّين كبيرة جدًّا وقضيبًا من الرصاص. ماذا يحدُث لمستوى الماء في البِركة إذا ألقيتَ الفلين على العشب، وإذا ألقيتَ الفلين في الماء، وإذا ألقيتَ القضيب على العشب، وإذا ألقيتَ القضيب في الماء؟

ماذا يحدُث لمستوى الماء إذا أحدثتَ ثُقبًا في قعْر القارب كي يدخل الماء تدريجيًّا لإغراقه؟ وإذا تغيَّر مستوى الماء، فهل يبدأ في التغيُّر عندما يدخل الماء القارب لأول مرة؟

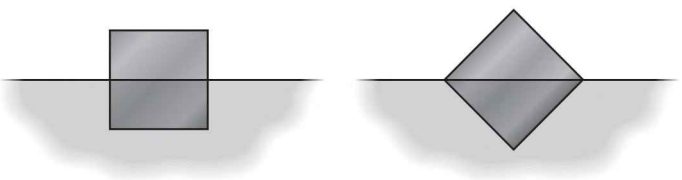
الجواب: عندما يطفو شيء فإنه يُزيح الماء؛ أي إنه يشغل حيزًا كان الماء سيشغله. تُحدِّد القاعدة البسيطة التالية قيمة الحيِّز: فكُتلة الماء المُزاح تساوي كتلة الشيء. ومِن ثَمَّ إذا طفَتْ قطعة فلِّين كتلتها ١ كيلوجرام في الماء، فإنها تغُوص في الماء إلى أن تُزيح حجم ماء مُساويًا لكتلة ١ كيلوجرام. وقطعة الفلين تُزيح هذا القدْر من الماء بصرْف النظر عما إذا كانت تطفو مُباشرةً في الماء أو عبْر القارب. وعندما تُلقي الفلين من القارب إلى الماء، فإنَّ كمية الماء المُزاح لا تتغيَّر ومِن ثَمَّ لا يتغيَّر مستوى الماء في البِركة. وعند إلقاء قطعة الفلين على العُشب تنتهي إزاحتها للماء في البِركة. ومِن ثَمَّ ينخفِض مستوى الماء.

وعندما يكون قضيب الرصاص في القارب تنطبق قاعدة الكُتَل المُتماثلة نفسها. افترض أن القضيب تبلغ كتلته ١ كيلوجرام، فإنها تزيح كمية من الماء لها كتلة مساوية لواحد كيلوجرام. وهذا يشغل قدرًا كبيرًا من الماء، فحجم الماء يساوي حجم القضيب بمقدار ١١ مرة. وإذا ألقيتَ القضيب على العُشب فإنه لا يزيح ذلك القدر الكبير من الماء، وينخفض مستوى الماء في البِركة. أما إذا ألقيتَ القضيب في الماء، فإنه يغُوص تمامًا. ومِن ثَمَّ فإن كمية الماء المُزاح تُماثل حجم القضيب. والكمية الآن هي ١ / ١١ من الكمية المزاحة عندما كان القضيب طافيًا عبْر القارب. ومِن ثَمَّ ينخفض مستوى الماء.

وعندما يبدأ القارب في استيعاب الماء، فإنه يظلُّ طافيًا ومِن ثَمَّ يزيح القدْر نفسه من الماء. ولا يتغيَّر مستوى الماء إلَّا عندما يكفُّ القارب عن الطفو؛ أي عندما يُغمَر تمامًا. عندئذٍ ينخفض مستوى الماء فجأة.

(٤٤) طفو القضبان والأوعية المفتوحة

هل الوعاء المفتوح، مثل أوعية الطعام أو الشراب، يطفو مُستقيمًا أم يميل إلى الجانب؟ إذا طفا عمود طويل ذو قطاع عرضي مُربَّع في سائل فأي الاتجاهَين المُبيَّنَين في شكل ٢-١٥ سيتخذ؟



شكل ٢-١٥: بند ٢-٤٤: اتجاهان لقضيب قصير طافٍ.

الجواب: في أي موقف طفو، تُوازِن قوَّة الطفو لأعلى قوةَ الجذب المُؤثرة على الشيء لأسفل. وبصفةٍ عامة يمكن تحقيق هذا التوازن في اتجاهات عديدة في حالة غوص الوعاء بطريقةٍ مناسبة. ورغم ذلك، فإن معظم الاتجاهات تكون غير ثابتة حيث تتسبَّب قوة الطفو في دوران الوعاء. من الصعب وصفُ الاتجاه الناتج في العموم، لكن يمكن استكشاف النتائج في الحوض أو أثناء الاستحمام. إليكم بعض النتائج: سوف يطفو الوعاء القصير مُستقيمًا (ويكون القعْر مواجهًا للأسفل)، أما الوعاء الطويل الضيِّق فسوف يميل إلى الجانب، ربما لدرجة الانقلاب. وربما أعجَبُ طريقةِ طفوٍ هي ما يفعله الوعاء الخفيف عند إضافة الماء إليه تدريجيًّا؛ إذ يكون اتجاهه مُستقيمًا وهو فارغ، ثم يميل ويزيد الميل، ثم ينخفض الوعاء إلى أن يَصير مُستقيمًا مرة أخرى عندما يكون على وشْك الغرَق.

ويعتمد اتجاه القضيب القصير على نسبة كثافة القضيب إلى نسبة كثافة السائل. ونظرًا لطفو القضيب فإنَّ النسبة لا يُمكن أن تزيد عن ١. وعند قيمةٍ تقترب من الصفر يكون القضيب خفيفًا للغاية حتى إنه لا يكاد يغرق ويطفو ووجهُه مُواجِهٌ لأسفل. وإذا قلَّلنا كثافة السائل تدريجيًّا، فسوف يغُوص القضيب تدريجيًّا ويستمرُّ في الطفو ووجهه لأسفل. رغم ذلك، عندما تصل النسبة إلى حوالي ٠,٢١ فإن القضيب يبدأ في المَيل، وعندما تصل النسبة إلى حوالي ٠,٢٨ يطفو وجوانبه مُكوِّنة زاوية قياسها ٤٥ درجة مع الخط الأفقي.

وإذا استمررْنا في خفض كثافة السائل، فإنَّ الاتجاه لن يتغيَّر إلَّا عندما تصل النسبة إلى ما يقرُب من ٠,٧٢ ثم يقلُّ الميل إلى أن يُصبح وجه القضيب للأسفل ثانية عندما تصل النسبة إلى ما يقرُب من ٠,٧٩. وعندما تصل النسبة إلى واحد، يغطس القضيب تمامًا ووجهه ما زال لأسفل.

(٤٥) ثُقبٌ في سد، سفينةٌ في حوضٍ جاف

تَحكي إحدى الحكايات الشعبية عن صبيٍّ هولندي يُنقِذ بلدته من الفيضان بوضع إصبعه في ثقبٍ اكتشفه في السدِّ فيصدُّ بهذا ماء بحر الشمال. كيف يُمكن لصبيٍّ أن يصُدَّ ماء بحر الشمال بأكمله؟

عند وضْع سفينة في حوض جاف يُصَرَّف الماء وتتحرَّك الجُدران إلى الداخل حتى تُحكم قبضتها على السفينة في النهاية. أثناء عملية تصريف الماء، ما هي أقلُّ كمية ماء لازمة لكي تطفو السفينة؟

الجواب: يعتمد ضغط الماء على إصبع الصبي على عُمق الثُّقب من ناحية سطح الماء وليس على عرض البحر أو عُمقه الكامل. ومِن ثَمَّ، إذا افترضنا أن عُمق الثقب لم يكن كبيرًا فإنَّ القصة من الممكن أن تكون حقيقية.

ولا تُوجَد إجابة كاملة للسؤال المُتعلِّق بالحوض الجاف. ورغم ذلك، فقُدرة السفينة على الطفو لا تعتمد على عُمق المسطَّح المائي أو عرضه. فما يهم هو ارتفاع الماء على جانبَي السفينة. من الناحية النظرية، إذا ظلَّ الارتفاع ثابتًا، فإن ضغط الماء على السفينة سيوفر دائمًا الطفو لأعلى اللازم لمواجهة تأثير قوة الجذْب لأسفل. ومِن ثَمَّ، فإن طبقة رفيعة من الماء تحتضِن بدَن السفينة ستكون كافية. رغم ذلك، فإذا كانت طبقة الماء رقيقة للغاية فإنها ستكون غير مُستقرَّة وأي مُقاطعة عرضية قد تُسبِّب تلامسًا مفاجئًا بين جدران الحوض الجاف والسفينة ومِن ثَمَّ ينتهي الطفو.

(٤٦) فُقدان الوعي الناتج عن قوَّة التَّسارُع لدى الطيَّارين

طالما قَلِقَ الطيَّارون «المُقاتلون» من الانعِطاف الحاد؛ لأنهم من المُمكن أن يتعرَّضوا لفُقدان الوعي الناتج عن قوة التسارُع. تُوجَد العديد من الإشارات التحذيرية للطيار للتخفيف من حدَّة الانعطاف؛ فعندما يكون تسارُع الجذب المركزي ٢ أو ٣ جي، يشعُر الطيار بالثقل.

وعندما يكون في حدود ٤ جي تتحوَّل رؤية الطيار إلى الأبيض والأسود وتضيق الرؤية لتُصبِح ما يُعرف بمصطلح «الرؤية النفقية»؛ حيث تختفي الرؤية المُحيطيَّة وتبقى فقط الرؤية الأمامية (كما لو كنتَ تنظُر من خلال نفق). وإذا ثبَت التسارُع عند ٤ جي أو زاد، تقلُّ الرؤية وسرعان ما يفقد الطيَّار الوعي. فما الذي يُسبِّب هذه التغيُّرات لدى الطيار؟

الجواب: إذا انعطف الطيَّار ورأسه صوب مركز الدائرة، كما يحدُث الانعطاف عادةً، فإنَّ ضغط الدم في الدماغ ينخفض، وتحدُث إعاقة للرؤية، وفقدان للوعي في نهاية الأمر. والطائرات النفَّاثة الحديثة قوية ويمكن المناورة بها بسلاسة شديدة؛ ومِن ثمَّ يستطيع الطيَّار الانعطاف بسهولة بسرعة شديدة، لا سيما أثناء المعارك الجوية. عندئذٍ سيدخل الطيار في حالة فُقدان وعيٍ ناتج عن قوَّة التسارُع دون سابق تحذير. وإذا لم يستَعِدِ الطيارُ الوعيَ في الوقت المناسب، فسوف تتوقَّف الطائرة أو تهوي إلى الأرض.

(٤٧) الدورة الدموية في الثعابين والزرافات والديناصورات الطويلة

لماذا يُوجَد القلب في منطقة وُسطى في ثعبان الماء، ويُوجَد قريبًا نسبيًّا من الرأس في ثعبان الأرض، وأقرب كثيرًا إلى الرأس في الثعبان مُتسلِّق الأشجار؟ كيف تتمكَّن الزرافة من إرسال الدم إلى رأسها دون أن يتجمَّع الدم في سيقانها؟ كيف تتجنَّب الزرافة التعرُّض للتلف الدماغي أو حتى الإغماء عندما تميل لتشرَب من بِركةٍ على سبيل المثال؟ كانت ديناصورات الصوروبودا عملاقة ذات أعناق بالغة الطول؛ فكيف تمكَّنَت من إرسال الدم إلى الرأس وشُرب الماء؟

الجواب: إذا كان الثعبان في وضعٍ عمودي بحيث كان رأسه إلى الأعلى، فيَجِب أن يضخَّ القلب الدم لأعلى إلى الدماغ، ويميل الدم إلى التجمُّع في النصف السُّفلي من الجسم. ورغم ذلك، فكلا التأثيرين لا يُمثِّل مشكلة لثعبان الماء؛ لأن ضغط الماء على الثعبان يزيد مع العُمق. والضغط العالي على النصف السفلي من الثعبان يمنع تجمُّع الدم. يُوجَد القلب في منتصف جسم الثعبان؛ ومِن ثمَّ فإن ضغط الماء العالي هناك وضغط الماء المنخفض عند الرأس يُساعدان في دفع الدم إلى الدماغ.

يفتقر ثعبان الأرض العمودي إلى ضغط الماء ومِن ثَمَّ يُعاني من تجمُّع الدم. ورغم ذلك، فإن موضع قلبه أفضل؛ لأنه أقرب إلى الدماغ منه إلى النقطة المتوسطة في جسم الثعبان. أما ثعبان الأشجار فهو أكثر تكيفًا؛ إذ إن قلبه أقرب من الدماغ، كما أن النصف

السفلي من الثعبان ضيق التصميم لمنع تجمُّع الدم. ومِن ثَمَّ، يستطيع ثعبان الأشجار التسلُّق من دون التعرُّض للإغماء.

وتعاني الزرافة من مشكلةٍ أخطر بكثير في تدفُّق الدم. فنظرًا لأن رأسها أكثر ارتفاعًا عن قلبها، فلا بدَّ أن يكون ضغط الدم كبيرًا للغاية. على سبيل المثال، بالنسبة لزرافة طولها ٤٫٠ أمتار، لا بدَّ أن يُناهز متوسط ضغط الدم في الشريان الأورطى ٢٥٠ملم زئبق (مليمتر زئبقي) ليُصبح ضغط الدم في الدماغ معقولًا ويساوي ٩٠ملم زئبق. ولأن السيقان تبعُد عن القلب إلى الأسفل بمسافة بعيدة، كان من الممكن أن يُسبِّب ضغط الدم الكبير جدًّا تجمعًا دمويًّا شديدًا في السيقان والأقدام لولا تصميمها؛ فالسيقان عضلية ولها جلدٌ مشدود يُشبِه في عمله جوارب الضغط. وعندما تُنزِل الزرافة رقبتها لتشرب، فإنها تتحرَّك ببطءٍ لتسمح بتكيُّف ضغط الدم. كما تفتح ساقَيها الأماميتَين بحيث ينخفض قلبها. وعلى الرغم من أن «شبكة التروية الدموية» التي تُغذِّي الدماغ بالدماء تساعد في حماية الدماغ، فإن الزيادة المُفاجئة في ضغط الدم قد تُصيب الزرافة بالإغماء أو التلَف الدماغي.

أما مشكلة ديناصور الصوروبودا في تدفق الدم فكانت أفدح، حتى لو لم يرفع رأسه بالكامل مُطلقًا. وعلى الأرجح كان يتحرك ببطء ليسمح بتعديل ضغط الدم. كما كان لدَيه أيضًا قلب ضخم يُمثِّل حوالي ٥ في المائة من وزن جسمه.

(٤٨) هل كانت ديناصورات الصوروبودا تسبح؟

كانت الديناصورات المعروفة باسم الصوروبودا، بما فيها ديناصور الأباتوصور (الذي كان يُعرَف أيضًا باسم «برونتوصوروص») والديناصور مامنتشيصوروص الطويل الرقبة على نحوٍ سريالي، تمتاز بالضخامة حتى بمقاييس الديناصورات. وطالما ظلَّ مطروحًا السؤال المُتعلِّق بالطريقة التي تمكَّنت بها الديناصورات من المشي (فضلًا عن الركض). وكان من الاحتمالات المُقترحة أنها قضت وقتًا كبيرًا من حياتها في السباحة في الماء أو الخوض فيها. فهل يستطيع الديناصور العملاق أن يسبَح؟

الجواب: لأننا ليس لدينا ديناصورات صوروبودا لنُراقبها فإن أفضل طريقة للتفكير في هذا السؤال هو صناعة نماذج مُصغَّرة لنرى ما إذا كانت ستطفو. (الجزء الصعب هو وضْع الرئتَين في الاعتبار.) وقد كشف هذا البحث أن مركز قوى الطفو التي ترفع النموذج يقَع نسبيًّا خلف مركز قوى الجذب التي تسحب النموذج لأسفل. من شأن وضْعٍ كهذا ألا يكون ثابتًا؛ لأنَّ قوة الطفو كانت ستُدير ديناصور الصوروبودا للأمام حتى تغُوص رقبته

جزئيًّا على الأقل في الماء. في الواقع، كان من شأن ديناصور الصوروبودا أن يتدحرج على أحد جانبَيه على الأرجح أيضًا. باختصار، ما كان لديناصورات الصوروبودا أن تستمتِع بالسباحة ولو ليومٍ واحد.

رغم ذلك، كان بمقدورها أن تخوض في الماء حتى صدورها دون مشكلة، وكانت الديناصورات ذات الأرجل الأمامية الأطول تستخدِمها كمجاديف لتشقَّ طريقها في الماء مثلما يستخدِم الملَّاحون في فينيسيا المجاديف لتحريك الجندول في الماء. وفي الحقيقة عُثر على آثار للديناصورات المُجدِّفة، وكانت هذه الآثار مُختلفةً عن آثار الأقدام الكاملة التي تركتها الديناصورات السائرة؛ لأنَّ الديناصور المُجدِّف يحفِر طرف المِخلب في الطين ثم يَسحبُه للخلف تاركًا قناة ضيِّقة بها بعض الطين المُلقى في الخلْف.

(٤٩) حجارة المَعِدة عند الديناصورات والتماسيح

لماذا تحتوي أمعاء كثيرٍ من رُباعيات الأطراف، سواء الحية مثل التماسيح أو الحفريات مثل ديناصور البليزوصور، على حصواتٍ وأحجار يُطلق عليها «حجارة المعدة»؟

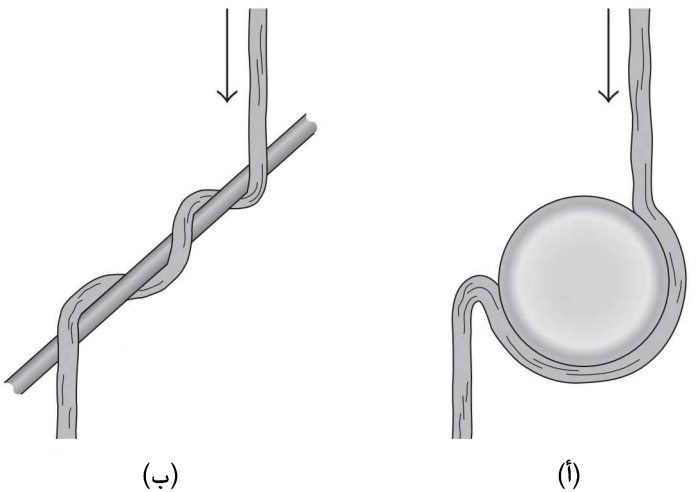
الجواب: لطالما اعْتُقد أن حجارة المِعدة ضرورية للهضم، بحيث يتمكَّن الحيوان من طحْن الطعام في المِعدة. رغم ذلك تُوجَد حجَّة أقوى تقول إن حجارة المِعدة تُستخدَم لموازنة طفو الحيوان، كي يتمكن من الطفو والسباحة على مستوًى مُنخفض نسبيًّا في الماء. وهذا الوضع سيُمكِّن التمساح الذي يطفو وعيناه وأنفه فقط خارج الماء وهو قابع بلا حراك وغير مرئي نسبيًّا من الترصُّد للفريسة. تعمل الحجارة أيضًا كثقَّالة وتُقلل الطاقة المطلوبة لمُجابهة التدحرُج بسبب التيَّار. ويمكن أن تساعد الحجارة التمساح أيضًا في سحب الفريسة إلى الماء.

وحجارة المِعدة في ديناصور البليزوصور كانت تعمل أيضًا كثقَّالةِ تَوازنٍ حيث تسمح للحيوان بالغوص جيدًا في الماء. فنظرًا لأن البليزوصور كان لدَيه عنق طويل ثقيل أمام رئتَيْه الطافيَتَيْن؛ فقد كان يُعاني من التدحرُج عندما يكون الماء هائجًا. كان من شأن هذا التدحرج أن يَقلَّ إذا كان لدَيه حجارة في المِعدة الموجودة خلف الرئتَين.

(٥٠) تأثير كواندا

إذا تدفق أحد الموائع (سائلًا كان أم غازًا) عبْر الهواء بالقُرب من سطحٍ صلب، لماذا يميل تيَّار المائع إلى الانحناء نحوَ السطح ثم لصْق نفسه بالسطح؟ يُمكنك رؤية هذا التأثير

بسهولة في حوض المطبخ من خلال حمل سطحٍ منحنٍ أسفل التيار المُتدفِّق بسلاسة من الصنبور. على سبيل المثال، أمسك برطمانًا زجاجيًّا بطريقة أفقية بحيث يصطدم التيار بأعلى السطح المنحني وينزل لأحد الجانبين (انظر شكل ٢-١٦أ). قد يلتصق التيار بالسطح جيدًا لدرجة التفافه حول القاعدة ويتسلَّق نسبيًّا عائدًا إلى قمَّة الجانب الآخر. وإذا أملْتَ قضيبًا في التيار وضبطتَ سرعة التيار، فقد يتعلَّق التيار بالقضيب ويلتفُّ حوله لولبيًّا عدَّة مرَّات قبل أن يتحرَّر ويسقط (انظر شكل ٢-١٦ب).



شكل ٢-١٦: بند ٢-٥٠: تيار ماء ساقط يلتف حول (أ) برطمان، و(ب) قضيب مائل.

عندما يَستفزُّ النمل الخنافسَ القاذفة فإنها تُصدِر رغوة أو رذاذًا ساخنًا (١٠٠ درجة مئوية) وسامًّا. وتستطيع الخنافس القاذِفة الأكثر شيوعًا (التي يُطلَق عليها براتشينيني) توجيه رذاذها الذي يُشبِهُ البصق من خلال تدوير حافة بطنها مثل بُرج المدفع. وإذا هاجمت النملة إحدى الأقدام الأمامية على سبيل المثال، تُصوِّب الخنفساء حافة البطن للأسفل وللأمام مُستهدفةً الرجل. وبمجرَّد أن تُصاب النملة فإنها تهرُب مسرعة. لا تمتلك خنافس باوسيني، وهي نوع من الخنافس القاذفة أقلُّ شيوعًا، حافةَ بطنٍ مُتحركة، بل تطلق الرذاذ أمامًا نحو المُؤخرة أو إلى الجانب فحسب. ورغم ذلك، تستطيع الخنفساء

استهداف النملة بمهارة حتى إذا كانت النملة أمامها أو على رجلها الأمامية. فكيف تُطلق الخنفساء الرذاذ إلى الأمام رغم أن هذا أمر غير ممكن؟

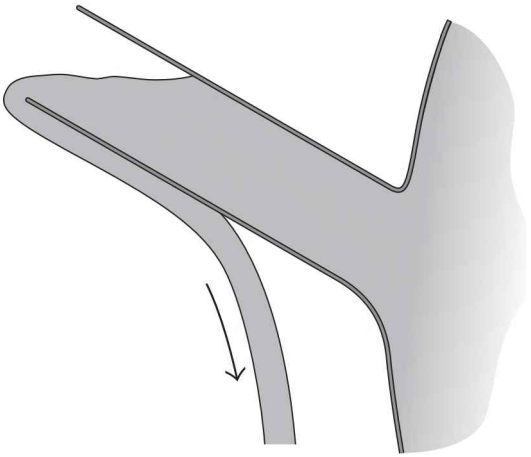
الجواب: يُطلق على انجذاب التيار صوب السطح الصلب وتعلُّقِه به نتيجة لذلك اسم «تأثير كواندا» نسبة إلى هنري كواندا المهندس الروماني الذي اكتشف هذا التأثير. لنفترِض أن تيار الماء قريب على نحوٍ معقول من أحد الأسطح الصلبة. «يسحب» التيار الهواء؛ أي يسحَب جزيئات الهواء القريبة ويُجبرها على التحرك مع التيار. يزيل هذا الفعل جزيئات الهواء؛ ومِن ثَمَّ تميل جزيئات الهواء الأخرى (البعيدة عن التيار) إلى التدفُّق للداخل لتحلَّ محلَّ الأخرى. إلا أن السطح الصُّلب يُعيق التدفق للداخل. ومع عدم وجود جزيئات كافية بين التيار والسطح الصلب يقلُّ ضغط الهواء بينهما. إن الهواء على الجانب الآخر من التيار لا يزال في مستوى الضغط الجوي؛ ومِن ثَمَّ يندفع التيَّار نحوَ السطح، ويُصبح مُلتصقًا به. ويمكن أن يستمرَّ هذا الالتصاق حتى مع إمالة السطح بعيدًا عن الاتجاه الأصلي للتيار.

تمتلك خنافس باوسيني حواف أمام فتحة الغُدَّة التي ينطلق منها الرذاذ. ولكي تطلق الرذاذ إلى الأمام فإنها تضبط الفتحة بحيث يصطدم الرذاذ بالحافة. وهناك يمكن إمالة الرذاذ بزاوية تصِل إلى ٥٠ درجة أثناء التفافه حول الحافة المائلة عن طريق تأثير كواندا. وعندما يُغادر الرذاذ الحافة فإنه يطير في الهواء كبصقٍ خفيف. وتستطيع الخنفساء ضبط الاتجاه الأخير للبصق من خلال ضبط مكان اصطدام الرذاذ بالحافة أثناء إطلاقه من الغُدة.

(٥١) تأثير إبريق الشاي

يسمح بزْبوز إبريق الشاي جيد التصميم (أو بزبوز أي وعاء سوائل) بتدفق الماء بِحُرية، بحيث تنتهي به الحال في المكان الذي تريده، وليكن فنجان الشاي. أما إبريق الشاي السيِّئ التصميم فسيظهر ما يُطلَق عليه «تأثير إبريق الشاي»؛ فبدلًا من التدفُّق الحر، سوف يرتدُّ الماء أسفل البزبوز ويتدفَّق على جانبه السُّفلي ربما لعدَّة سنتيمترات قبل أن يتحرَّر ويسقط (انظر شكل ٢-١٧). وإذا لم يتعلق بالجانب السُّفلي من البزبوز، فمن المُمكن أن يتقوَّس التيار الساقط للوراء صوب إبريق الشاي. بطبيعة الحال فإن هذا التعلق أو التقوُّس الخلفي غير المُتوقَّعَين يمكن أن يُسبِّبا الفوضى. فما الذي يسبب تأثير إبريق الشاي؟

الجواب: في حالة صبِّ الماء بسرعة كافية فإنَّ التيار سيتحرَّك على الأغلب عبْر الهواء في المسار المُتوقَّع والمألوف، وغالبًا ما يُطلَق عليه «مسار القذيفة»؛ لأنَّ أي جسم صُلب



شكل ٢-١٧: بند ٢-٥١: تيار ماء متعلق ببزبوز إبريق الشاي.

ينطلق من البزبوز سوف يسلك المسار نفسه. يحدُث السلوك غير المُتوقَّع عندما يترك الماء البزبوز على نحوٍ أبطأ. يتغيَّر حينها الضغط داخل التيار على امتداد كثافته، فيكون الضغط في مستوى الضغط الجوِّي عند تلامُس سطح الهواء والماء، وينخفض الضغط بالقُرب من مكان تحرُّك الماء سريعًا حول حافة البزبوز. الضغط الخارجي الأكبر يدفع التيار صوب الحافة. وإذا كانت سرعة التيار متوسطة فسوف يُدفَع التيار حول الحافة قبل أن يتحرَّر ويتقوَّس للخلف صوب الإبريق.

وإذا تدفَّق الماء بمزيدٍ من البطء فإنَّ آخر نقطة يلمس فيها الماء البزبوز يمكن أن تتحوَّل إلى الجانب السفلي من البزبوز. ويُعزى هذا الالتصاق عادةً إلى الانجذاب التبادُلي بين جزيئات الماء وجزيئات البزبوز. يُفَسَّر هذا الأمر تفسيرًا غير دقيق على أنه راجع إلى «التوتُّر السطحي»، ويُوصَف عادة كمثالٍ على «التبليل». إلا أن السبب الرئيسي لالتفاف التيار حول الحافة ونزوله من البزبوز هو أن ضغط الهواء يدفع التيار نحو البزبوز. وحتى عند تغطية الجانب السفلي للبزبوز بالزبد لتقليل تجاذُب الجزيئات والتخلص من التبليل، سيظلُّ التيار يلتفُّ حول الحافة وينزل مُلامسًا للبزبوز.

تُحدِّد عوامل كثيرة مكان تحرُّر التيار من البزبوز. وإذا أُجرِيَت تجربة بإبريق شاي مُعين ومعدَّل تدفُّق مُعين للماء، فمن الممكن أن تختلف المسافة التي يمكن أن يقطعها الماء

عبر الجانب السُّفلي من الإبريق من تجربةٍ لأخرى. وللتخلُّص من تأثير إبريق الشاي من الممكن أن يكون للبزبوز ثُقب صغير على جانبه السُّفلي قُرب الحافة. وعندما يصل التيار إلى الثقب سيعمل التغيُّر المُفاجئ في انحناء السطح على انفصال التيار (فيعرقل التيار). يُستخدَم أسلوب مُشابه في حواف النوافذ للتغلُّب على تأثير إبريق الشاي عندما يتدفَّق ماء المطر أسفل الحافة ويكون من المُمكن أن يدخل إلى نقطةٍ غير محميَّة من التسرُّب في الجدار؛ إذ يحتوي الجانب السفلي من حافة النافذة على شقٍّ عمودي ضيِّق يجعل الماء ينفصل عن حافة النافذة. وللتغلُّب على تأثير الإبريق عند صبِّ أي سائل من إناء الطبخ المعدني مثلًا، ضع سكينًا أو قضيبًا عموديًّا على مكان مُغادرة السائل للإناء. سوف يلتصِق السائل بالسكين أو القضيب أثناء نزوله عليه بدلًا من التدفُّق لأسفل خارج الإناء.

يُمكن أن نرى تأثير إبريق الشاي في بعض نوافير المياه حيث يفيض الماء على حافة الوعاء ويسيل إمَّا على الجانب السفلي للحافة أو يتقوَّس للوراء صوب الوعاء كلَوح مائي ساقط. وإذا كانت الحافة دائرية، فإن هذا اللوح المائي سيُكوِّن سطحًا مُغلقًا يُدعى «جرس الماء».

(٥٢) الصعود على مراحل عند الغَوص لأعماقٍ سحيقة

عندما يصعد غوَّاص السكوبا (الغوص باستخدام معدات التنفس تحت الماء)، أو غواص البحار العميقة إلى سطح الماء، لماذا ينتظر عند أعماقٍ مُعينة لفتراتٍ مُحددة بدلًا من الاستمرار في الصعود؟ لماذا يكون كثيرٌ من الغواصين في حالةٍ جيدة عندما يتبعون هذا الإجراء ويشعرون بالتعب إذا صعدوا سريعًا بعد الغوص؟ (فالألم يبدأ سريعًا بعد بدء الصعود.) تغوص الحيتان غالبًا إلى أعماقٍ سحيقة، فهل تُعاني من أي ضرر؟

الجواب: عندما يتنفَّس الغوَّاص الهواء المضغوط تذوب جُزيئات النيتروجين الموجودة في الهواء في مجرى الدم. وعندما يصعد الغوَّاص يُكَوِّن النيتروجين المُذاب فقاعات بسبب انخفاض ضغط الماء على الجسم. (يحدُث تكوُّن الفقاعات على جدران الوعاء في المشروب الغازي المفتوح للتو، لكن فقاعات النيتروجين تحدُث هنا في وسطٍ مائع؛ أي داخل الدم.) تميل الفقاعات إلى التحرُّك مع تدفُّق الدم، وتتجمَّع في صورة «كتل» إذا اتَّجهَتْ نحو الأوردة الكبيرة (صوب القلب) أو تنحشر وتسدُّ تدفُّق الدم إذا انتقلت للأوردة الصغيرة (بعيدًا عن القلب). هذا التسمُّم النيتروجيني المُسمَّى «التحنِّي» يمكن أن يُسبب ألمًا فظيعًا

وشللًا طويل المدى وربما يؤدي للوفاة. وعادة يخضع المُصاب لزيادة الضغط ويُضطر إلى تنفُّس هواءٍ به مستوًى عالٍ من الأكسجين كي يخرج النيتروجين من حالة الذوبان ويتدفق في الدم في نهاية الأمر ويتلاشى. ولتفادي الإصابة بالتحنِّي يصعد الغواص إلى السطح على مراحل، ويقضي فتراتٍ مُعيَّنة في كلِّ مرحلة للسماح للنيتروجين بالخروج من حالة الذوبان.

والهدف من جدولة الصعود هو التخلُّص الكافي من النيتروجين المذاب بحيث لا تبقى فقاعات النيتروجين داخل الغواص عند صعوده إلى السطح. ورغم ذلك، فإنَّ النيتروجين المُذاب المُتبقِّي يمكن أن يكوِّن فقاعاتٍ إذا ركب الغوَّاص طائرة بعد وقتٍ قصير من صعوده إلى السطح. وعلى الرغم من احتواء الطائرات الحديثة على مقصورات ذات ضغطٍ عالٍ، فإن ضغط الهواء يكون أقلَّ من الضغط الجوي العادي على الأرض، وهذا الضغط المُنخفض يسمح للنيتروجين بتكوين الفقاعات.

على الرغم من الاعتقاد السائد الذي يقول إن الحيتان مُحصَّنة من أخطار الغَوص على أعماقٍ سحيقة، فقد أظهرت بعض الأدلة أنها أيضًا يُمكن أن تُعاني من التحنِّي، لا سيما إذا اضطرت إلى الصعود للسطح بسرعة عالية.

واسْتُخدِم مصطلح «التحنِّي» للمرة الأولى لوصف أمراض العُمَّال الذين يُشيِّدون الأنفاق على عُمق سحيق يتطلَّب زيادة الضغط الجوي كما حدث خلال تشييد دعامات جسر بروكلين في ستينيَّات القرن التاسع عشر؛ فعند صعود العمال إلى السطح كان بعضهم يشعُر بآلام في العضلات لدرجة جعلتهم يَحْدَودِبون على نحوٍ شبيهٍ نسبيًّا بنساء الطبقة الراقية في ذلك الزمن، اللاتي كُنَّ يَسرنَ بوضعيَّة مُحدَودِبة مبالغٍ فيها يُطلَق عليها «الانحناءة الإغريقية». ومن هنا بدأ استخدام مصطلح التحنِّي لوَصف الأمراض الناتجة عن تنفُّس هواءٍ عالي الضغط.

(٥٣) الغطس بأنبوب التنفُّس عند البشر والأفيال

في الغطس بأنبوب التنفس يتنفس السبَّاح عن طريق أنبوب يمتدُّ لأعلى مستوى الماء. لماذا يُحَدَّد طول الأنبوب بحوالي ٢٠ سنتيمترًا؟ أي ما الخطر الشديد المُتمثل في استخدام أنبوب أطول باستثناء صعوبة دوَران الهواء دخولًا وخروجًا؟ الفيل أيضًا يستطيع الغطس بأنبوب التنفُّس مُستخدمًا خرطومه. فكيف يستطيع الفيل تحمُّل عُمق الغطس المُعتاد بالنسبة إليه والذي يصل لحوالي مترَين؟

الجواب: نظرًا لأنَّ ضغط الماء على الغطاس يزيد مع العُمق، فإنَّ ضغط الدم يزداد أيضًا. وإذا كان الغطَّاس يسبَح من خلال كتم النفَس، فإن الضغط في الرئتَين يزداد أيضًا. والتماثُل بين ضغط الدم وضغط الهواء في الرئتَين يسمح باستمرار انتقال الأكسجين إلى الدم وإزالة ثاني أكسيد الكربون من الدم. أما إذا بدأ الغطاس التنفُّس من الأنبوب، فسوف ينخفِض ضغط الهواء في الرئتَين لمستوى الضغط الجوي. ويكون هذا الانخفاض بسيطًا إذا لم يكن الغطاس تحت سطح الماء بمسافةٍ كبيرة، لكن في الأعماق السحيقة قد يكون الاختلاف بين مستوى ضغط الدم ومستوى ضغط الهواء في الرئتَين قاتلًا، ويُطلَق على هذه الحالة «الاعتصار الرئوي». حينئذٍ تتمزَّق الأوعية الدموية الصغيرة على سطح الرئة ويتسرَّب الدم إلى الرئتَين.

ويبدو أن الفيل البالِغ قد يتعرَّض لاعتصارٍ رئوي في كلِّ مرة يسبح فيها غوصًا؛ لأن رئتَيه أسفل مستوى سطح الماء بحوالي مترَين، وهذا يعني أن فَرْق الضغط بين ضغط دمه وضغط الهواء في الرئتَين كبير. إلا أنَّ رئتَي الفيل مَحميَّتان بطريقةٍ خاصة. «الجنبة» هي غشاء يُغلف الرئتَين في أي حيوانٍ ثديي. وعلى النقيض من الثدييات الأخرى، فإنَّ جنبة الفيل تمتلئ بنسيجٍ ضامٍّ يُمسك الأوعية الدموية الصغيرة ويحميها في جُدران الرئتَين. وبهذه الطريقة لا تتمزَّق الأوعية الدموية أثناء الغطس بالخرطوم.

(٥٤) الغَوص لأعماقٍ سحيقة، والهروب من الغوَّاصة

من إجراءات السلامة المُستخدَمة في الغَوص باستخدام أدوات التنفُّس تَعَلُّم طريقة ملء الرئة بالهواء من خزَّان شخصٍ آخر ثم الصعود إلى السطح. ما الخطر في هذا الصعود؟ هل يمكن لشخصٍ الهروب من غوَّاصة مُعطَّلة من خلال ملء الرئة بالهواء في الغوَّاصة ثم السباحة لأعلى حيث السطح؟

ما الخطر في ملء الرئة بالهواء عند سطح الماء ثُم النزول إلى الماء مثلما يفعل بعض الناس في الرياضة (الغَوص الحُر) وفي العمل التجاري (مثل غوَّاصي «الآما» اليابانيين في جنوب المُحيط الهادئ)؟ ما الخطير في فقدان الضغط الجوي للحظات أثناء الغَوص في عُمق البحر مع ارتداء بذلة غطس؟

الجواب: يزيد الضغط على جسد السبَّاح كثيرًا بزيادة عُمق الماء. إذا أخذ شخص نَفسًا من خزَّان أدوات التنفُّس تحت الماء في قاع حمام سباحة ثم صعد وهو يكتُم هذا

الهواء فإنَّ الضغط ينخفِض وتتمدَّد الرئتان إلى أن تصِلا لمستوى الانفجار. وإذا لم يزفر الشخص لتجنُّب الانفجار فإن الضغط في الرئتَين يمكن أن يزيد عن ضغط الدم، ثم ينطلق الهواء إلى مجرى الدم وهذا يمكن أن يكون قاتلًا. وفي كلِّ عام يموت بضعة أشخاص أثناء ممارسة الغَوص باستخدام أدوات التنفُّس؛ لأنهم يُهملون الزفير.

من الناحية النظرية، يُمكن للشخص السِّباحة من الغواصة المُعطلة إلى السطح إن لم تكن الغواصة على عُمقٍ سحيق وإذا زفر الشخص أثناء الصعود. إلا أنَّ الزفير يتطلَّب تدريبًا كبيرًا؛ لأنَّ المرء يميل إلى الاحتفاظ بالهواء في الرئتَين أثناء هذه السباحة المُريعة لمسافةٍ غير معلومة للوصول إلى السطح. والأسوأ من ذلك هو الحاجة المُلحَّة إلى التنفس. وتعتمد الحاجة إلى التنفُّس على كمية الضغط الموجود في الرئتَين بسبب ثاني أكسيد الكربون. وإذا وصل هذا الضغط إلى قيمةٍ حرجة مُعيَّنة فإن الحاجة إلى التنفُّس تُصبح لا تُحتمَل. وإذا زفر الشخص بطريقةٍ صحيحة أثناء الصعود، فإنه لا يصل لهذه القيمة الحرِجة أسفل السطح فحسب بل بعيدًا عنه كثيرًا. وإذا استطاع الشخص السباحة وصولًا إلى هذه النقطة فإنَّ ما تبقى له من رحلة الصعود قد يكون أسهل نسبيًّا.

ويمكن أيضًا إنقاذ طاقم الغوَّاصة عند تدلية غُرفة على شكل جرس إلى الغواصة. وفي الواقع، استُخدمت هذه الغرفة لإنقاذ ٣٣ فردًا من طاقم الغواصة الأمريكية «سكوالاس» في مايو ١٩٣٩ عندما تعطلت على عُمق ٨٠ مترًا. أدلى الغوَّاصون حبال توجيهٍ من سفينة على السطح إلى فتحة الغواصة. ثم أدلوا الغرفة على امتداد حبل التوجيه. كانت الغرفة مفتوحةً في القاع ولم تمتلئ بالماء نظرًا لإطلاق الهواء من الخزانات لزيادة ضغط الهواء. وعندما وصلت الغرفة إلى الفتحة اتَّصلت اتصالًا مُحكمًا غير مُنفذٍ للماء مُحكمة بحلقة مُحيطة بالفتحة العلوية للغواصة. وبعد تثبيت الغرفة بالحلقة وخفض الضغط الهوائي انفتحت الفتحة العلوية للغواصة؛ كي تسمح للعديد من أفراد الطاقم بالصعود إلى الغرفة للقيام برحلة الصعود إلى السطح.

في الغوص الحُر تأتي القدرة على حبس النفس لمدةٍ طويلة من التدريب، ومن صدمة الماء البارد على الوجه (التي يُطلَق عليها «استجابة الغواص»)، والاستعداد للتعرُّض للأذى البدَني. يمكن أن يزيد التدريب من كفاءة الرئتَين والوقت الفاصل بين مرات التنفُّس. وتُقلِّل صدمة الماء البارد من استهلاك الأكسجين. وعادةً ما يكون النزول مدعومًا بشيءٍ ثقيل (مربوط بالحزام على الأرجح) يسقط في نهاية النزول. ورغم ذلك، فبدون هذا الشيء الثقيل أيضًا يكتسِب الغوَّاص «طفوًا سالبًا» (قوة صافية للأسفل) أثناء النزول. والطفو

العادي (الطفو الموجب) يكون مُتجهًا لأعلى وناتجًا عن شَغل الغوَّاص لحيِّز مُعين في الماء. رغم ذلك، فمع نزول الغوَّاص تنضغط الرئتان ويشغل الغوَّاص حيزًا أقل. يقلُّ الطفو ويصبح أصغر من قوة الجاذبية. ونتيجة لذلك يُصبِح تأثير القوة الصافية على الغوَّاص مُتجهًا لأسفل، ويغوص الغواص. ويتقلَّص حجم الرئتَين لحجم علبة مشروبٍ بارد، ويتسرَّب الدم إلى المكان الذي كان من المُفترَض أن تشغله الرئتان.

تحدُث هذه التغيُّرات الفسيولوجية إذا بدأ الغوَّاص عند سطح الماء ورئتاه مليئتان بالهواء. أما إذا بدأ الغوَّاص من غرفةٍ مغمورة فإنه قد لا يشعُر بأي انزعاجٍ إذا تنفَّس الهواء (أو أي مزيجٍ أكسجيني آخر) في ضغط الماء المُحيط. وعلى الرغم من أنَّ الغَوص في أعمق أجزاء المحيطات يبدو غير مُرجَّح، فإنه ليس مستحيلًا من الناحية الفسيولوجية.

عندما يعمل أحد الأشخاص في بذلة مُخصَّصة للغطس العميق، فإنه يُزَوَّد بالهواء من خلال خرطوم في القُبَّعة الصُّلبة (الخوذة)، أما المضخة الموجودة في طرف الخرطوم الذي ينتهي عند السطح فتزيد ضغط الهواء في البذلة ليتناسب مع ضغط الماء المحيط. وإذا ضعفت المضخَّة أو تعطَّلت فإن صمامات الأمان تُغْلَق على الفور لمنع انخفاض الضغط داخل البذلة إلى مستوى ضغط السطح. قديمًا عندما كانت المُعدَّات تفتقر لهذه الصمامات، كان تعطُّل المضخة يعني أن ضغط الماء سوف يحشُر حرفيًّا جسَد الغوَّاص داخل الخوذة.

(٥٥) كارثة بحيرة نيوس

في أغسطس ١٩٨٦ في وادي جنوب بحيرة نيوس في الكاميرون بأفريقيا تسبَّبت سحابة غاز أو هباء جوي مُميت في قتْل ما يقرُب من ١٧٠٠ شخص وعدد لا يُحصى من الحيوانات. وأعلن المُحقِّقون الذين وصلوا إلى المَوقع بعد عدَّة أيام أن البحيرة نفسها هي السبب وليس أي نوع آخر من الغازات البُركانية السامَّة. فكيف يمكن أن تبعث البحيرة غازًا قاتلًا؟

الجواب: كانت البحيرة تحتوي على تركيزٍ عالٍ من ثاني أكسيد الكربون المُذاب، لا سيما في الأجزاء السفلية نظرًا لضغط الماء العالي. ويبدو أن شيئًا ما تسبَّب في ارتفاع المياه السفلية إلى السطح، ممَّا سمح لقدْرٍ كبير من ثاني أكسيد الكربون المُذاب في الماء بتكوين الفقاقيع التي طفتْ إلى السطح. نبَعَتْ تلك الفقاقيع من الماء بقوة هائلة جعلت الأمواج تترامى عبْر البحيرة، وتجمَّع ثاني أكسيد الكربون فوق الماء وفاض على حدود البحيرة، وهبط إلى الوادي حيث خنق الضحايا. لقد غُمِر الضحايا في ثاني أكسيد الكربون وماتوا بسبب نقص الأكسجين.

وعلى الأرجح لن نعرِف بالتأكيد أبدًا ما الذي حفَّز ارتفاع المياه السُّفلية في بادئ الأمر. قد يكون هذا المُحفِّز مزيجًا من مياه الأمطار التي تسرَّبت إلى البحيرة ورياح شديدة القوى هبَّت على البحيرة من الطرف الذي دخلت منه مياه الأمطار. فنظرًا لأن مياه الأمطار كانت أكثر برودةً نسبيًّا ومِن ثَمَّ أشدَّ كثافة من مياه البحيرة الموجودة، فإن وضع مياه الأمطار على مياه البحيرة الموجودة كان غير مُستقر. وإذا حركت الرياح الشديدة طبقة مياه الأمطار عبْر البحيرة ثم غطست مياه الأمطار هناك، فمن الممكن أن يتسبَّب غَوصها في ارتفاع المياه العميقة مرة أخرى عند الطرف المُقابل من البحيرة. ومع ارتفاع هذه المياه العميقة تدريجيًّا إلى ضغط مائي أقل، بدأ الغاز في الانبعاث من المحلول.

ما زالت بحيرة نيوس تعجُّ بمعدلات عالية من ثاني أكسيد الكربون، ويخشى الباحثون إمكانية حدوث اندلاعٍ آخر مُميت. وفي واقع الأمر، يُحذِّر الباحثون الجميع من الاقتراب من البحيرة لا سيما في موسم الأمطار.

قصة قصيرة

(٥٦) القفز فوق المنزل وركوب السموات على كرسيٍّ قابلٍ للطَّي

في سبتمبر ١٩٣٧ في ملعب جولف في شاطي أولد أوركارد في ولاية مين قضى آل مينجالون، مُصور الأفلام الإخبارية، النصف الثاني من عصر أحد الأيام في محاولة تصوير حركة خطيرة معروفة باسم «القفز فوق المنزل». وعلى نحوٍ مُتكرر كان يجري نحوَ المنزل ويقفز للأعلى مُرتديًا حمَّالة مربوطة بسبعةٍ وعشرين بالونًا مُمتلئًا بالهيدروجين، على أمل أن يحمِلَه طفوُ البالونات للأعلى ويتجاوز به البناية. إلا أنَّ كلَّ محاولاته باءت بالفشل؛ لأنه لم يتمكن إلا من الصعود لمسافة ٢٥ قدمًا فقط، وكانت هذه المسافة غير كافية.

ولَمَّا أخذ ضوء الشمس في المغيب قال: «لنضعْ هذه المرة ما يُساعدنا على أداء قفزة جيدة وننتهي من هذا الأمر.» فنفخ مينجالون خمسة بالونات أخرى وربطها بالحمَّالة، وقام بآخِر قفزة في اليوم. إلا أنه أثناء الارتفاع أصبح حبل الأمان الممدود بين الحمَّالة ومَصدِّ إحدى السيارات مشدودًا ثم انقطع.

كان الضوء قد بدأ في الانزواء وكانت ثمَّة عاصفة على وشْك الهبوب عندما بدأ مينجالون ينحرف صوب المُحيط الأطلنطي. في البداية راقَبَه والده ومساعده في رُعب ثم قفزا في السيارة. وانضم إليهم الأب مولين، كاهن إحدى الكنائس المحلية، وكان يتحلَّى

بالفطنة إذ حمل معه بندقية عيار ٢٢ شديدة القوة. انطلق الثلاثة خلف مينجالون، لكن مينجالون الذي كانت تحمله البالونات غاب عن نظرهم على نحوٍ مُتكرِّر عندما كان ينحرِف صوب سُحب المطر. بالإضافة إلى ذلك، كانت السيارة مُقيَّدة بالسير على الطُّرق، ولم تكن الطرق بطبيعة الحال تتتبَّع مسار مينجالون بدقَّة.

وبعد ساعة عندما أصبح مينجالون على ارتفاع ٢٥٠ مترًا تقريبًا عن الأرض رآه الرفاق الذين كانوا يتعقَّبونه في السيارة. فأوقفوا السيارة وقفزوا منها، ثم أصاب الأب مولين بدقَّة ثلاثة من البالونات كي ينزل مينجالون إلى الأرض دون أن يلحَق به أذًى. كان فقدان الطفو كافيًا لإنزاله ببطء، وبطبيعة الحال لو كان الأب مولين قد أصاب الكثير من البالونات لأصبحت النهاية مأساوية. في أثناء الطيران أسقط مينجالون الكاميرا، لكنها وُجدت سليمة لاحقًا في حقل بطاطس. وسجَّلت الكاميرا حدثًا أكثر إثارة ممَّا كان يقصد مينجالون في بادئ الأمر.

في يوليو ١٩٨٢ قام لاري والترز أحد سُكان سان بيدرو في ولاية كاليفورنيا برحلة طيران مُشابهة لكن دون قصد. لقد انطلق والترز من طريقٍ في ضاحية لوس أنجلوس راكبًا كرسيًّا قابلًا للطيِّ مُزوَّدًا باثنَين وأربعين بالونًا مملوءًا بالهيليوم. في البداية انطلق لأعلى بسُرعة ٢٥٠ مترًا تقريبًا في الدقيقة، وسُرعان ما وصل إلى ارتفاع ٥ كيلومترات حيث رآه طيارًا اثنتَين من الطائرات. كان الإبلاغ عن رجُلٍ يطير بكرسيٍّ قابل للطي تطفو به البالونات يبدو غريبًا في عيون المُراقبين الجويِّين في مطار لوس أنجلوس الدولي لولا أن أحد أصدقاء والترز كان قد تمكَّن من الاتصال بالمُراقِبين في السابق.

وبمجرَّد أن أصبح والترز في الهواء البارد الخفيف بدأ يُقلِّل من الطفو من خلال التصويب على بعض البالونات بمسدس خرَز. إلا أنه أثناء الإثارة والمُعاناة من نقْص الأكسجين أسقط مُسدَّسَه دون قصد. وعلى الرغم من أن نقص الأكسجين يُسبِّب قدرًا من النشوة، فقد انزعج والترز عندما بدأ كرسيه للحظة في الارتفاع مرة أخرى. وبمجرَّد أن شرَع مجددًا في الهبوط على نحوٍ مُتواصِل، أخذ يُسيطر على سقوطه بإسقاط أوعية مملوءةٍ بالماء بين الحين والآخر تخفيفًا للحمل.

عندما اقترب والترز من الأرض علقت البالونات في أسلاك الكهرباء، لكنَّه لحُسن الحظ انتهت به الحال مُتدلِّيًا على مسافة مِترين تقريبًا من الأرض. وكان بُعدُه عن الأرض كافيًا للقضاء على الاحتمال المُحدِق المُتمثل في نفاذ الكهرباء عبرَه إلى الأرض. وتجنبًا لخطر تعرُّض والترز للصَّعق الكهربي فصل المُنقذِون التيار الكهربي عن المنطقة قبل إنزاله.

استمرَّت رحلتُه ساعة ونصف الساعة، وامتدَّت لمسافة ٥ كيلومترات رأسيًّا و١٦ كيلومترًا أفقيًّا. في البداية كانت وكالة الطيران الفيدرالية في حيرة مِن أمرِها حول كيفية مُقاضاة والترز (فلم تكن تُوجَد أي قواعد مكتوبة حول الطيران بكُرسي قابل للطي في خطوط الطيران الجوية)، لكن بعد مُداولة استمرَّت ستة أشهر غرَّمَتْه الوكالة غرامة كبيرة بسبب انتهاكات عديدة من بينها تشغيل مركبة جويَّة دون شهادة صلاحية للطيران.

(٥٧) تدفُّق زُجاج نوافذ كاتدرائيات العصور الوسطى

بعض الألواح الزجاجية للنوافذ المُركَّبة في الكاتدرائيات أثناء العصور الوسطى أكثر سُمكًا في الأسفل مُقارنةً بأعلاها. فهل تدفَّق الزجاج تدريجيًّا للأسفل مع مرور القرون؟

الجواب: يُمكن اعتبار الزجاج مائعًا لزجًا يستطيع التدفُّق أو الاستقرار. رغم ذلك، تُظهر الحسابات أن التدفُّق لأسفل يحدُث على نحوٍ تدريجي أبطأ من أن يتسبَّب في تغييرات ملحوظة في النوافذ الزجاجية التي تعود للعصور الوسطى. في واقع الأمر، قد يتطلَّب التغيُّر الملحوظ في هذه النوافذ مرور مليون سنة.

وتُوجَد تفسيرات أخرى لأشكال ألواح النوافذ الزجاجية من بينها عملية التصنيع. فعلى سبيل المثال، ربما يكون الزجاج قد صُنع أولًا عن طريق النفخ على صورة أسطوانية ثم قُطِع وسُطِّح في النهاية. وربما كان الجزء السفلي من الأسطوانة أكثر سُمكًا من الجزء العلوي، ومِن ثَمَّ فإنَّ أحد أجزاء اللَّوح الزجاجي النهائي سيكون أكثر سماكة. وربما بطبيعة الحال ركَّب العمال هذه النوافذ الزجاجية واضِعين الجزء الأكثر سماكةً في الأسفل.

(٥٨) موائع لزجة غريبة

لماذا يتدفَّق الكاتشب بسهولة أكبر من الزجاجة إذا رُجَّت أولًا؟ ربما لاحظتَ هذه النتيجة إذا حاولتَ صبَّ الكاتشب على الهمبورجر واكتشفتَ أن شخصًا آخر على الطاولة كان قد رجَّ الزجاجة للتو، في هذه الحالة سيكون الكاتشب في النهاية أكثر من الهمبورجر المَوجود في الطبق.

لماذا يتدفَّق الحِبر بسهولةٍ من القلم الجاف عندما تستخدِم القلم ولا يتدفَّق عندما يكون القلم في جيبك أو في حقيبتك؟ لماذا الدهان أحادي الطبقة يتدفَّق بسهولةٍ على الحائط ولا يتدفَّق ثانية من الحائط وينزل على الأرض؟ لماذا يُفرَد الزبد على الخُبز الموجود في درجة

حرارة الغرفة باستخدام السكين ولا يسيح من تلقاء نفسه؟ لماذا مزيج الماء والنشا الثقيل من الصعب تقليبه إذا حاولتَ التقليب بسرعةٍ لكن من السهل تقليبه إذا قلَّبتَه ببطء؟

لماذا يكون معجون السيليكون (الذي يُباع تحت اسم العلامة التجارية سيلي باتي) أو المزيج المُشتَق من الكحول مُتعدد الفينيل (الذي يُباع تحت اسم العلامة التجارية سلايم) صلبًا إذا ضربته، ومطاطًا للغاية إذا ارتدَّ من الأرض، ومائعًا عند تدليتِه على قضيب؟

الجواب: ترجع الخواص الغريبة لهذه الموائع المُتنوعة إلى «اللزوجة»، ويُقصَد بها مدى سهولة أو صعوبة تدفُّق المائع. على سبيل المثال، يمتاز الدبس البارد بلزوجةٍ عالية ويتدفَّق ببطء، في حين يمتاز الماء بلزوجةٍ أقل ويتدفَّق بسهولة. تعتمد لزوجة مُعظم الموائع على الحرارة، إلا أن مُعظم الموائع تتمتَّع بدرجة لزوجة مُعينة في درجة حرارة مُحدَّدة. ويُطلَق على هذه الموائع «الموائع النيوتنية».

أما النوع الثاني من الموائع فيُطلَق عليه الموائع غير النيوتنية؛ لأنَّ لزوجتها تعتمد على طريقة دفعها إلى التدفُّق. مثال على ذلك الكاتشب؛ فإذا تُرك مُستقرًّا لفترة، فستكون لزوجته عالية، ممَّا يجعل من الصعب صبُّه من زجاجة ذات فتحة صغيرة. أما عند رجِّه أو تقليبه لثوانٍ، فستنخفض لزوجته على نحوٍ ملحوظ. ولذلك، لجَعْل الكاتشب يتدفَّق بسهولة من الزجاجة يُمكنك رجُّها عدة مرات؛ فالرجُّ يجعل أجزاءً من الكاتشب تنزلق بعضها على بعض، وهذه الحركة النسبية (يُطلَق عليها «القص») تفكك على الأرجح الجزيئات الطويلة السلسلة المُتداخِلة في خليط الكاتشب، ممَّا يسمح بسهولة التدفُّق. وعندما يُقلِّل القصُّ من لزوجة المائع، يُقال على المائع إنه «مُتميِّع بالرَّج» أو «مُترقِّق بالقص».

والحبر الموجود في القلم الجاف، والدهان أُحادي الطبقة، والزبد كلها أمثلة على موائع تترقَّق بالقص؛ فعند الضغط عليها من خلال كرة القلَم أو الفرشاة أو السكين يُقلِّل الضغط ومحاولة الحركة من لُزوجتها وتتدفَّق المواد بسهولةٍ كبيرة. وبمجرد توقُّف الضغط ومحاولة التحريك تُصبح اللزوجة مرة أخرى أكبر من القدرة على التدفُّق.

يوصَف هذا المزيج الثخين من النشا والماء بأنه مائع «مُثخَّن بالقص»؛ لأن التحريك الخفيف للمزيج يزيد من لزوجته. (لا يُظهر مزيج الماء والنشا الخفيف هذا التأثير.) وإذا ضربت المزيج الثخين براحةِ يدِك فإن الحركة النسبة تزيد على الفور لزوجته كثيرًا حتى إن المزيج يُصبِح شِبهَ صلب ولا يُطرطش بالتأكيد، إلا أنَّ هذه اللزوجة والقدرة على التدفُّق تعود على نحوٍ شِبه فوري. والزيادة اللحظية في اللزوجة تعود على الأرجح إلى

اتِّخاذ جُزيئات النشا وضعية عمودية على اتِّجاه التدفُّق؛ ومِن ثَمَّ توقف التدفق سريعًا. وبمجرد اختفاء محاولة التدفُّق تختفي هذه الوضعية. وإذا ألقيتَ حفنةً من المزيج الثخين على الأرض، فسيكون شِبه صلب أثناء التصادُم لكنه سيتدفَّق على الأرض بعد ذلك. وإذا غرستَ قضيبًا عريضًا للغاية أو ملعقة كبيرة جدًّا في المزيج ثم سحبتَ القضيب أو الملعقة لأعلى فقد تتمكن من رفع الخليط والوعاء ولو للحظة.

ومعجون سيلي باتي وسلايم كلاهما من الموائع غير النيوتنية اللَّزِجة. فإذا وُضِعا في وضع مُتدلٍّ على قضيب كي تسحبهما الجاذبية برفق، فسوف يتدفَّقان لأسفل. وعند التعرُّض لقوة أكبر وأكثر مفاجأة، كما في التصادم، فإن هذه المواد تتصرَّف مثل الكرة البلاستيكية؛ لأن الجزيئات الطويلة في المادة تلتفُّ وتتصرَّف مثل النوابض. وعند استخدام قدرٍ أكبر من القوة فإنها تنكسِر. على سبيل المثال، إذا سحبتَ فجأةً طرفَيْ حزمةٍ من معجون سيلي باتي في اتِّجاهَين مُتعارضَين، فسوف تنكسِر الحزمة على نحوٍ يُشبه كثيرًا انكسار قضيب معدني يُسحَب في اتجاهَين مُتعارضَين. ويمكنك أيضًا قطع سيلي باتي وسلايم بالمقص؛ فمع الضغط الكبير المفاجئ لشفرتَي المقصِّ ينقُص المائع ومِن ثَمَّ يُصبح المائع صلبًا وهشًّا.

ممكن أن ترى تأثيرًا آخر غريبًا إذا دفعت سيلي باتي في أنبوبٍ أجوف؛ فعندما يخرُج من الطرف الآخر يتمدَّد على النحوِ الذي يُعرَف باسم «انتفاخ القالب». ويحدُث هذا التمدُّد؛ لأن الجزيئات الطويلة ترتدُّ أثناء انبثاقها من الأنبوب، وذلك بعد أن تكون قد تعرَّضت للانضغاط خلال دفع المادة عبْر جُدران الأنبوب.

وتستطيع أنواع أخرى من الموائع غير النيوتنية التدفُّق خارج الأوعية كما يتدفَّق الماء من السيفون. فإذا جذبتَ جزءًا من المائع لأعلى جانب الكأس الزجاجي وسحبتَ ذلك الجزء عبر الحافة، فإن تدفُّقه خارج الكأس الزجاجي يُمكن أن يسحب بقية المادة لأعلى وعبر الحافة.

(٥٩) انعكاس الحساء

عندما تُقلِّب أنواعًا مُعينة من الحساء المعلب، مثل حساء الطماطم، ثم تزيل ملعقة التقليب، لماذا ينعكس الدوَران قُبَيل توقفه؟ لكي ترى هذا الانعكاس امزج أولًا علبة حساء

الطماطم المُكثَّف بكميةٍ صغيرة من الماء (أقل من الكمية العادية). ثم قُم بالتجربة مع تسليط ضوءٍ على سطح الحساء.

الجواب: عندما تُقلِّب الحساء فإنك لا تدفع أداة التقليب في الحساء فحسْب بل تُجبر أيضًا طبقاتٍ عديدة من الحساء على التحرُّك في ترابُطٍ بعضها مع بعض. هذه الحركة القريبة التي يُطلق عليها «القص» تُفكِّك جزيئات الحساء طويلة السلسلة الملفوفة عادة. ومع تضاؤل الحركة والقص تسحب الجزيئات نفسها فجأة مرة أخرى في صورة لفائف، فتعكس الدوَران كما لو كان الحساء غشاءً مطاطيًّا.

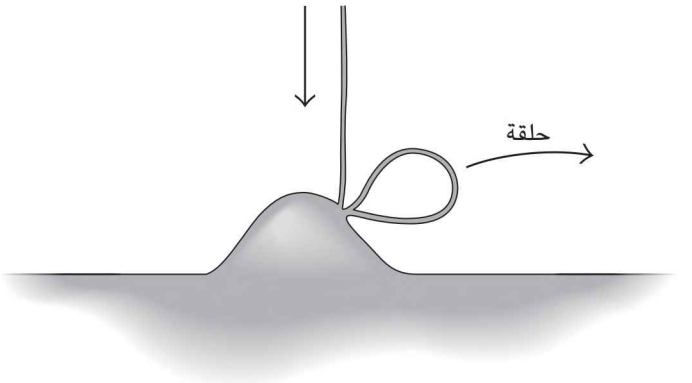
(٦٠) التيَّار السائل المُرتد

صُبَّ تيارًا رفيعًا من شامبو الشعر أو صابون اليد السائل على سطحٍ منبسط يستطيع التيار أن يكون عليه كومة تسيل إلى الخارج. لماذا في بعض الأحيان يقفز التيَّار قفزاتٍ كبيرة إلى الجوانب عند الصبِّ من ارتفاعات مُعينة ومع سوائل مُعينة؟ (أنا أحصل على قفزاتٍ جيدة جدًّا ومُتكرِّرة عند استخدام صابون اليد آيفوري.)

الجواب: يُقال عن نوع الشامبو الذي يقفز إنه «لزج مطاطي»؛ لأنه لزج (بسبب الاحتكاك الداخلي المُقاوم للحركة) ولأنه مطاطي (يتصرَّف مثل الغشاء المطاطي). تكون لزوجة الشامبو عاليةً جدًّا عندما يتحرَّك الشامبو ببطءٍ في التيار الهابط وفي الكومة. إلَّا أنه عندما يجري التيار نحوَ الكومة يُسبب التصادم القص؛ أي إنه يجعل إحدى الطبقات اللزِجة تتحرك سريعًا فوق الطبقة اللزجة الأخرى، وتُقلِّل الحركة لزوجة هذا الجزء من التيار. ونظرًا لأنَّ السائل مطَّاط، فإن الانخفاض المُفاجئ في اللزوجة يجعل الجزء المُصطدِم يرتدُّ نسبيًّا مثل كرة المطاط؛ ومِن ثمَّ يكوِّن التيار حلقةً واسعةً تمتدُّ (تتوسع) للخارج إلى أحد جوانب التيار والكومة (انظر شكل ٢-١٨). وهذه الحلقة خاطفة للغاية حتى إنَّنا نرى فقط الجزء العلوي ويبدو التيار كما لو كان ارتدَّ عن الكومة.

(٦١) الموائع المُتسلقة للقضبان

إذا وضعتَ قضيبًا دوَّارًا في إناء ماء عميق، فسيجعل القضيب الماء يدور مُكونًا دوَّامة تمتدُّ لأسفل القضيب. لكن إذا وضعتَ بدلَ الماء بياضَ بيضٍ أو مُعالِج زيت السيارات «إس تي بي» أو غيرها من الموائع، فلماذا «يتسلق» المائع الدوَّار القضيب مُتبعًا السلوك الذي يُطلَق عليه «تأثير فايسنبرج»؟



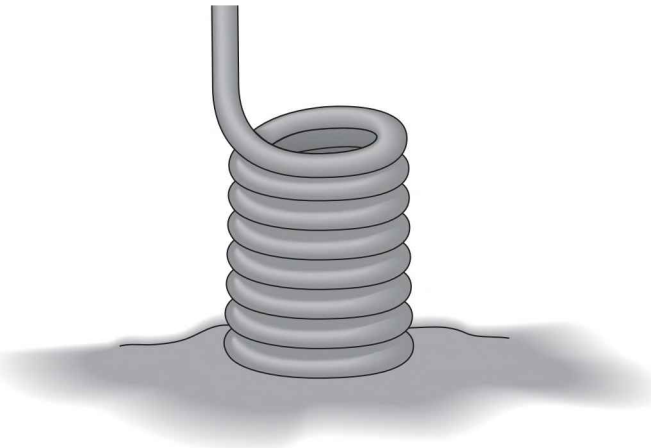
شكل ٢-١٨: بند ٢-٦٠: تيار شامبو هابط يبدو وكأنه يرتدُّ عن كومة شامبو.

الجواب: ميل موائع مُعينة إلى التسلُّق يعود إلى الطريقة التي يَدفع بها القضيبُ المائعَ إلى الدوَران. لرؤية تأثير القصِّ تخيَّل أنَّ المائع موجود في طبقات أسطوانية مُتمركزة حول القضيب. إنَّ دوران القضيب يسحَب أيضًا الطبقة الداخلية إلى الدوَران. وتنزلق هذه الطبقة الأسطوانية أمام الطبقة التالية، وتسحبها إلى الدوران. وهكذا، ينجرُّ المائع إلى الدوران طبقةً تلو الأخرى. ونظرًا لأن الحركة تنشأ عن السَّحْب والانزلاق، فإنه يُمكن القول إنَّ الطبقات تخضع للقص. عندما يكون المائع هو الماء، لا يتجاوز نجاح القصِّ الطبقات الأولى القليلة؛ ومِن ثمَّ يقلُّ الدوران كلما اتجهنا للخارج. أما في هذه الأنواع الخاصة من الموائع فالجُزيئات لا تكون مُتماسكة فحسْب بل متداخلة للغاية، حتى إنها تتصرَّف مثل الشرائط المطاطية؛ فعندما يدور القضيب يلفُّ هذه الشرائط بحيث تنسحب نحو القضيب ثم إلى أعلاه.

(٦٢) لفائف حبل سائلة

عند صبِّ العسَل على شريحة خبز وضبط ارتفاع الصبِّ من المُمكن أن تجعل تيار العسل الرفيع يلتفُّ على الخبز (انظر شكل ٢-١٩). الموائع الأخرى تلتفُّ أيضًا على نفسها عند

صبِّها بالطريقة الصحيحة. على سبيل المثال، يلتف تيار عريض من خليط الكيك للخلف والأمام مُكوِّنًا طيَّاتٍ تُشبه شريط ربط الهدايا. فما الذي يُسبب هذا السلوك؟



شكل ٢-١٩: بند ٢-٦٢: العسل يلتفُّ كما يلتفُّ الحبل.

الجواب: الموائع التي «تلتف كالحبل» أو «تلتف كالشريط» تتَّسِم بأنها مطاطية لزجة؛ أي تتَّسِم باللزوجة والمرونة معًا. وعند صبِّ العسل من ارتفاعٍ مُناسبٍ فإنه يلتفُّ كالحبل أو كالشريط، والسبب في ذلك يعود لعامِلَين: (١) عندما يصل التدفُّق إلى كتلة العسل الموجود على الخُبز فإنَّ السرعة العالية واللزوجة العالية تمنعه من التدفُّق داخل الكتلة؛ ومن ثَمَّ يتباطأ فجأةً بسبب الاصطدام بالكتلة ممَّا يضغط على التيَّار المُتدفِّق. (٢) يُصبح التدفُّق رفيعًا أثناء سقوطه ويصِل إلى كتلة العسل إما في صورة تيار أسطواني رفيع أو شريط عريض رفيع. وإذا كان التيَّار رفيعًا بقدرٍ كافٍ فإن الضغط عليه يجعله يلتفُّ نحوَ أحد الجوانب. ويستمرُّ التيار الأسطواني في الانحناء حتى يُصبح دائريًّا مُكوِّنًا لفةً قد تكون مُجوَّفة من الداخل. أما التيَّار العريض فينثني للخلف والأمام، وأثناء الانحناء عند أحد الجوانب يسحبُه ترابطُه إلى المركز مرة أخرى حيث ينحني بعد ذلك في الاتجاه المعاكس، وهكذا. وفي المُعتاد يُسفر السقوط من ارتفاعٍ عالٍ عن زيادة معدل الالتفاف أو

الانثناء، لكن التأثير يختفي إذا كان السقوط من مسافة شديدة الارتفاع؛ لأن المائع ينزل عندها من الوعاء دفعةً واحدة بدلًا من التدفُّق بسلاسة في صورة تيار.

(٦٣) أمواج الماء

ما الذي يُسبب أمواج الماء؟ أي كيف تتولَّد الأمواج؟

الجواب: لا تُوجَد إجابات كاملة بعدُ لهذَين السؤالَين البسيطَين، إلا أنه يُوجَد تفسيرٌ بسيطٌ يتمثَّل في أنَّ النسيم أو أي اضطراب في الهواء أو الماء يُسفر عن تموُّجات. وهذه التموُّجات يمكن أن تتحوَّل فيما بعدُ إلى أمواجٍ أكبر عند مرور الرياح عليها. وبصفةٍ خاصة، تضغط الرياح على الجانب المُواجِه للرياح من الموجة، وتعلو الموجة، ثم تنكسِر إلى دوَّامات عند الجانب المَحمي من الرياح. يقلُّ ضغط الهواء في الدوَّامات، ومن ثَمَّ فإن اختلاف الضغط بين الجانب المُواجه للرياح والجانب المَحمي من الرياح للموجة يمكن أن يدفع الموجةَ في اتجاه الرياح ويمكن أن يجعلها أكثر طولًا؛ أي إنَّ الرياح يمكن أن تمنح الطاقة للمَوجة. وإذا أصبحتِ الرياح أشدَّ قوة، فإن الأمواج تُصبح أكبر (وكذلك تتغيَّر أطوالها الموجية).

(٦٤) الأمواج المُتطرِّفة والأمواج المارِقة

مُعظم أمواج المُحيطات لها نطاق أطوال مُعيَّن، يمكن أن يكون مُرتبطًا بظروف الرياح والعواصف. ورغم ذلك، ففي بعض الأحيان تحدُث موجات أكبر حجمًا. وإذا وصفْنا «الموجة المتطرفة» بأنها ذات طول مُخيف، فإنَّ «المَوجة المارقة» يُمكن أن تُوصَف بأن طولها مُريع. يَسبِق هذه الموجة نقطة مُنخفضة تُوصَف غالبًا بأنها «حفرة في الماء». وبعض السفن الكبرى التي كانت قوية لدرجةٍ كافية لمقاومة العواصف العنيفة تحطمت أثناء انزلاق مقدمتها لأسفل في هذه الحفرة ثم سحبها لأعلى بفعل موجة تصل إلى ارتفاع ٣٠ مترًا تقريبًا. أما ارتفاع الموجة المارقة التي ضربت باخِرةَ البحرية الأمريكية «رامابو» عام ١٩٣٣ فقد بلغ ٣٤ مترًا حسب قياس ضابط المراقبة الذي استخدَم طريقة التثليث لمسح الموجة المواجهة لمنصَّة المُراقبة. (التصرُّف بطريقة فيزيائية في مواجهة الموت يتطلَّب شجاعةً فيزيائية كبيرة.)

رُصدَت كلٌّ من الأمواج المُتطرفة والأمواج المارقة حول العالم، لكن بحار ساحل جنوب شرق أفريقيا تُنتِج أزيد من حصَّتِها من الأمواج المارقة، وهو ما يؤكده عدد السفن الكبير المفقود في هذه المنطقة. فما الذي يُسبِّب الأمواج المُتطرفة والأمواج المارقة؟

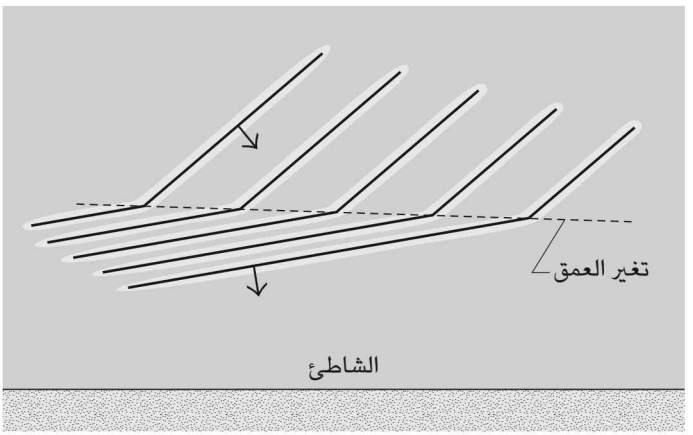
الجواب: على الأرجح أنت تتخيَّل أن موجة المُحيط هي موجة جيبية (في شكل منحنى الجيب ذي القمم والقيعان) تتحرك على سطح المحيط. وإذا تداخلت موجتان تتحركان في الاتجاه نفسه، يمكن أن تتخيَّل أن «الموجة الناتجة» (أي ما ستراه) هي ببساطة مجموع الموجتَين. وفي حالة المحاذاة التامة بين موجتَين (في الطور) فإن القِمم والقيعان في الموجة الناتجة ستكون أعلى وأعمق من قِمَم وقيعان المَوجتَين المُنفردتَين. وفي حالة تداخل الكثير من الأمواج المُتحركة في اتجاهاتٍ مختلفة، سيكون من المُحيِّر وصف الموجة الناتجة، لكن اجتماع الأمواج الفردية في حد ذاته هو ما سيُحدد ارتفاع وعُمق الموجة الناتجة.

يُطلق على هذا التجمُّع البسيط للأمواج «تجمُّع أمواج خطِّي». أما الأمواج المُتطرفة فهي «تجمُّع غير خَطِّي»؛ أي إنَّ تجمُّع الأمواج الفردية يُولِّد نسبيًّا قِممًا وقيعانًا شديدة الارتفاع وشديدة الانخفاض. وربما في أثناء زيادة ارتفاع القمم تدعم الرياح نموَّها بحيث يكون ارتفاع القمَّة النهائي أكثر من المُتوقَّع. أو ربما في مواقف مُعينة تُسفِر زيادة حجم الموجة الجديدة الناتجة عن نقطةٍ حرجة مُعينة عن تعديل الأمواج الفردية ويخلُق موجةً ناتجة أكبر حجمًا. باختصار، بعض السِّمات تدعم الموجة الناتجة. من غير المُرجَّح حدوث موجة مُتطرفة، لكن في بعض الأحيان تضرب هذه المَوجة السفن السياحية أو غيرها من السفن، فتفاجئ القباطنة الذين يَميلون عادةً إلى اعتقاد أنها أمواج مُكوَّنة من تجمُّعات خطية.

والأمواج المارقة (التي يُطلَق عليها أيضًا «الأمواج العملاقة» أو «الأمواج العاتية») أكثر صعوبةً في الشرح، لكن من المؤكد أنها ناتجة أيضًا عن تجمُّع غير خطِّي للأمواج. ورغم ذلك، فإنَّ حدوثها قُبالة ساحل جنوب شرق أفريقيا يعود إلى مواجهة تيَّار أقولاس والأمواج التي تدفعها الرياح في هذه المنطقة. يتدفَّق تيار أقولاس القوي صوب الجنوب الغربي في مسارٍ مُتعرِّج، وتتدفق الأمواج التي تدفعها الرياح صوب الشمال الشرقي عادةً. ونظرًا لأن الأمواج تدفع التيار إلى التعرُّج، فمن المُمكن تركيزها مثلما يُمكن تركيز موجات الضوء عن طريق العدسة. وفي ظلِّ الظروف المُناسبة، فإن هذا التركيز يُسفِر عن حفرة في الماء يتبعها موجة عملاقة تميل صَوب الحفرة.

(٦٥) التِفاف الأمواج للاقتراب من الشاطئ

يُمكن أن تقترِب الأمواج من الشاطئ من اتجاهات كثيرة اعتمادًا على الرياح وأماكن العواصف البعيدة. فلماذا تلتفُّ الأمواج عادةً بحيث تكون مُوازية للشاطئ (انظر شكل ٢-٢٠)؟



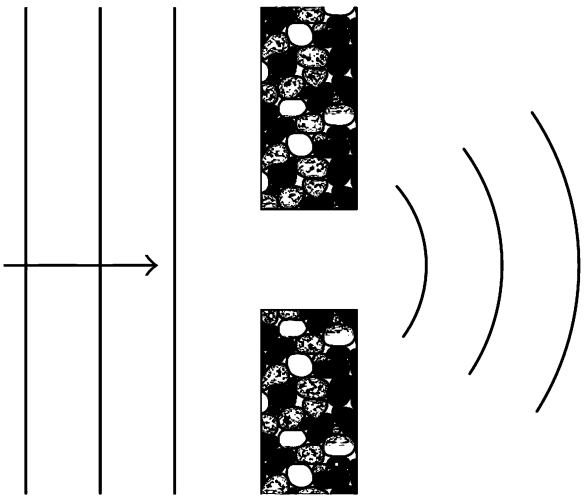
شكل ٢-٢٠: بند ٢-٦٥: منظر علوي لأمواج مُحيط تُغيِّر الاتجاهات مع انخفاض عُمق الماء.

الجواب: هذا الميل للالتفات يُعدُّ نوعًا من «الانكسار»، وهو موضوع أكثر شُيوعًا في مجال البصريات، وهو يحدُث هنا بسبب انخفاض سرعة الأمواج مع انخفاض عُمق الماء. عندما تَعبُر قمَّة الموجة من المياه العميقة إلى المياه الضحلة، فإن أول جزءٍ يَعبُر من القمة يتباطأ ثم يتخلَّف وراء بقية القمَّة. يُحدِث هذا التأخُّر التواءً في القمة، فيتحرك الجزء البطيء في الماء الضَّحل صوبَ الشاطئ على نحوٍ أكثر مباشرةً من الجزء الذي لا يزال في المياه العميقة. وفي النهاية تَعبُر كامل القمَّة إلى الماء الضحل وتتَّجِه إلى الشاطئ على نحوٍ أكثر مباشرةً.

يتغيَّر أيضًا شكل الأمواج لأنَّ ما نراه يتحرَّك على سطح الماء هو في الواقع مجموع الكثير من الأمواج الفردية المُختلفة الأطوال الموجية. يعتمد مدى التباطؤ؛ ومِن ثمَّ الالتفاف أيضًا، على الطول المَوجي؛ ولذلك تتباطأ الأمواج الفردية وتلتفُّ بمُعدلات مختلفة.

(٦٦) مرور الأمواج عبْرَ فتحة ضيقة

عندما تمرُّ أمواج المحيط عبْر فتحةٍ أوسع نسبيًّا من الطول الموجي للأمواج لماذا تتمدَّد من الفتحة (تنتشر) بدلًا من التحرُّك في اتجاهها الأصلي (انظر شكل ٢-٢١)؟



شكل ٢-٢١: بند ٢-٦٦: منظر علوي لأمواج مُحيط تتعرَّض للحيود من خلال فتحة في جدارٍ صخري.

الجواب: هذا الميل للانتشار، الذي يُعدُّ نوعًا من «الحيود»، يَعود إلى تداخُل الأمواج أثناء مرورها من الفتحة. تُمَثَّل عادة الموجة المُستقيمة المُتحركة في خطٍّ مستقيم على صورة طابور من صانعات الأمواج الصغيرة الكثيرة، وكلٌّ منها تُرسِل موجةً شِبه دائرية. وباستمرار يُولِّد تراكُب وتداخل كلِّ هذه الأمواج موجةً مُستقيمة متقدِّمة. رغم ذلك، فإنه عندما تدخل الموجة الفتحة الضيقة لا يبقى إلَّا صانعات الأمواج فحسْب الموجودة داخل الفتحة. تتراكب الأمواج شِبه الدائرية وتتداخل، لكنها لا تكفي لتكوين موجةٍ مستقيمة مُتقدِّمة، بل تنتج موجة تنتشر أثناء عبورها من الفتحة. بالإضافة إلى ذلك، تختلف قوة الحركة الرأسية للماء على طول هذه الموجة الجديدة؛ ففي بعض النقاط تكون حركة المياه

الرأسية كبيرة، لكنها تكون مُنعدمة في النقاط المُتوسِّطة. ومِن ثَمَّ، إذا كانت الفتحة واقعةً بين الأمواج المُتكسِّرة على الشاطئ ووصلت الموجة المُتمدِّدة إلى الشاطئ فإن بعض النقاط على الشاطئ تشهد حركةً موجية هائلة ولا تشهد النقاط الأخرى أي حركة موجية.

ويمكن أن يحدُث الحيود أيضًا عند مرور الموجة على طرف الحاجز؛ حيث يتمدَّد الجزء القريب من الحاجز إلى «منطقة الظل»؛ أي المنطقة الواقعة خلف الحاجز المَحمية بوضوحٍ من الأمواج.

(٦٧) التَّذبذُب والرَّجْرَجة

عندما تحمِل وعاءً مفتوحًا يحتوي على سائل، مثل طبق ماء، وتسير به، لماذا يترجرج السائل؟ ما الذي يتحكَّم في مُعدل الرجرجة؛ أي عدد مرات تذبذُب سطح الماء في الثانية؟ هل يمكن رجرجة حوض استحمام مليء بالماء أو حمام سباحة؟ ماذا عن البِركة أو الميناء أو البحيرة؟

الجواب: عندما تسير فإنَّ مشيتك ومسكتك للوعاء الذي يحتوي على السائل تجعلان السائل يتحرَّك أفقيًّا ورأسيًّا؛ أي إنَّ الأمواج تبدأ في التكوُّن على سطح السائل. مُعظم الأمواج يتفاعل بعضها مع بعض بطريقةٍ عشوائية، لكنَّ أنواعًا مُعيَّنة من الموجات تُكوِّن «موجاتٍ واقفة» يتكرَّر فيها نسق التذبذبات الرأسية؛ فتتذبذب بعض النقاط بأقصى قدرٍ ممكن وبعضها لا يتذبذَب على الإطلاق. يُطلَق على الموجة الواقفة ذات التردُّد الشديد الانخفاض «نسَق التردُّد الأساسي» وتكاد تتكوَّن على نحوٍ شِبه دائم. يعتمد تردُّد الموجة الأساسية (ولو بشكلٍ تقريبي على الأقل) على الأبعاد الأفقية للوعاء وعُمق الماء. وعندما يكون مُعدَّل السير مُساويًا تقريبًا لتردُّد الموجة الأساسية، فمن المُمكن أن تكون الرجرجة قويةً لدرجة انسكاب السائل. ويُمكن تقليل هذه الاحتمالية بالسَّير بمزيدٍ من البطء أو تغيير المشية.

يُمكنك رجرجة حَوض استحمامٍ مليء بالماء إذا حرَّكت بدَّالًا عريضًا للخلف والأمام في الماء. جرِّب التردُّدات إلى أن تصل إلى التردُّد الأساسي. وعندها يمكنك أن تجد الرجرجة القوية التي يمكن أن تجعل الحوض يَفيض على الأرضية بسهولة.

يُمكن أن تحدُث الرجرجة أيضًا في حاويات السوائل الأكبر حجمًا مثل شاحنة الجازولين أو صهريج القطار. بالطبع في هذه الحالة من الممكن أن تُسبب الرجرجة غير المنضبطة اضطراب الشاحنة ويُمكن أن تؤدي لحادثة، ولذلك تُرَكَّب في أغلب الأحيان حواجز داخل الشاحنة لتقليل الرجرجة.

يُمكن أن يفيض حمام السباحة عند تردُّدٍ مُنخفض كثيرًا إذا قفز الناس في الماء بطريقة مُنسَّقة ومُتكررة لتكوين التردُّد الأساسي. ويمكن لمكبسٍ ميكانيكي كبير يهتزُّ عند أحد طرفَي حمام السباحة أن يفعل الأمر نفسه، لكن هذا أقل إمتاعًا بكثير.

أما المسطحات المائية الكبيرة مثل البِرَك والموانئ والبُحيرات فسوف تترجرج وفقَ نسق التردُّد الأساسي الخاص بها إذا تذبذب الماء بفعل موجات الزلازل أو اختلافات ضغط الهواء (مثل الرياح). يُطلق على حوادث الرجرجة الضخمة في المسطحات المائية الطبيعية «التذبذب». وفي حادثةٍ شهيرة وقعت في مارس ١٩٦٤، أطلق زلزال في ألاسكا مجموعة ذبذبات وصلتْ حتى خليج المكسيك. كان مُعظم هذه الذبذبات أصغرَ من أن يُلاحَظ، لكن بلغ قياس إحداها مِترَين من أعلى منسوب مياه إلى أدنى منسوب مياه.

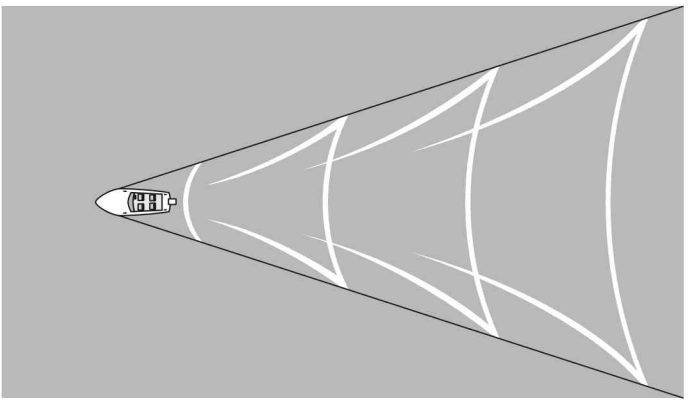
يُمكن أن تترجرج الموانئ وأحواض المدِّ والجزر أيضًا عند «ضخِّها» من قبل المدِّ والجزْر أو بفعل اضطرابٍ صادر عن عاصفة أو تسونامي. في هذه الحالة تُصبح أشبهَ نسبيًّا بزجاجة أو أرغن ذي أنابيب يتعرَّض للضخِّ من خلال مصدر هواء مُتذبذب، فيما عدا أنَّ النتيجة هي تذبذُب مستوى الماء بدلًا من تذبذُب الموجة الصوتية.

وفي المُعتاد يكون مدى التذبذُب في الميناء (ومِن ثَمَّ احتمالية الدَّمار) أكبر في فتحة الميناء الضيقة (الفتحة المؤدية للمُحيط). ومن أسباب هذه النتيجة ما يُطلَق عليه «مفارقة الميناء»، ومفادها أن الفتحة الواسعة تسمح لطاقة الموجة القادمة بالعودة إلى المُحيط، في حين أنَّ الفتحة الضيقة تأسر بفعالية الطاقة القادمة. تحدُث نتيجة مُشابهة مع الأمواج الصوتية؛ فإذا نفختَ في الفم الضيق لزجاجة صودا مُمتلئة جزئيًّا، فسوف تُصدِر صوتًا رنَّانًا عاليًا في محيط الزجاجة الهوائي. أما إذا نفختَ في زجاجةٍ ذات فم أوسع فسيكون الصوت الرنان مكتومًا وربما من المُستحيل إطلاقه.

(٦٨) آثار البطِّ وحاملات الطائرات

لماذا يتكوَّن أثر على شكل حرف V خلف أشياء مثل البط وحاملات الطائرات التي تسير على الماء (انظر شكل ٢-٢٢)؟ هل يعتمد هذا الشكل أو الحجم الزاوي على سرعة الشيء؟

الجواب: الأثر الذي يترُكه الشيء الذي يتحرَّك على الماء يكون هو نفسه تقريبًا لأي شيءٍ يتحرك بأيِّ سرعة ما دامت هذه السرعة تُسفر عن «موجات جاذبية» (حيث تكون الجاذبية هي المُتحكمة في الذبذبات) بدلًا من «موجات شعرية» (حيث يكون التوتُّر السطحي هو المُتحكم في الذبذبات). ولذلك، تترُك البطة وحاملة الطائرات أثرًا بزاوية



شكل ٢-٢٢: بند ٢-٦٨: منظر علوي لأثرٍ تركه جسمٌ يتحرَّك على سطح الماء.

مماثلة تُساوي ٣٩ درجة تقريبًا. إلَّا أن تفاصيل تركيبة الموجة داخل الأثر يُمكن أن تختلف باختلاف الأشياء لا سيما عند مشاهدتها من خلال رادار فَوقي (وهذا موضوع مُثير للاهتمام في المُراقبة العسكرية).

والسبب الأساسي في هذا النَّسَق هو «الأمواج المرحلية» التي تظهر على سطح الماء بسبب الاضطراب الصادر عن قاربٍ متحرك على سبيل المثال. والموجة المرحلية التي تُشبه شكل الموجة الجيبية تنتقل عن طريق إحداث ذبذبةٍ في سطح الماء. إلا أنك لا تستطيع فعليًّا رؤية الموجة المرحلية على الماء؛ لأن القارب يُنتج عددًا هائلًا من هذه الأمواج التي يتراكب (أو «يتداخل») بعضها مع بعض، ويُمكنك فقط أن ترى «الأمواج الجماعية» التي تنتُج عن هذا التداخل. تبدو الأمواج الجماعية وكأنها تنتقل على الماء، لكنها في الواقع تُنتَج باستمرار عن طريق تداخُل الأمواج المرحلية التي تُسافر أسرع مرتَين من الأمواج الجماعية.

وما يزيد أمواج الماء تعقيدًا هو أن الأمواج ذات الطول الموجي الأطول تنتقل بشكلٍ أسرع من الأمواج ذات الطول الموجي الأقصر. ولذلك تميل الأمواج المرحلية ذات الطول الموجي الطويل إلى تخطي الأمواج المرحلية ذات الطول الموجي القصير.

عندما يُسبِّب القارب اضطرابًا في الماء عند النقطة (أ) أثناء تحركه للأمام فإن الموجات المرحلية تتحرك إلى الخارج انطلاقًا من النقطة (أ) بضِعف سرعة الأمواج الجماعية الناتجة

عن تداخل الأمواج المرحلية. ونظرًا لاتساع نطاق معدلات الأطوال الموجية للأمواج، فإن الأمواج المرحلية وأمواجها الجماعية يكون لها نطاق سُرعات عريض. ولذلك، فإنَّ نسَق الأمواج الصادرة عن النقطة (أ) وعن كل النقاط الأخرى على مسار القارب فوضوي جدًّا. إلا أن الأمواج تكوِّن موجاتٍ جماعية بارزة على حدود الأثر الذي يتَّخِذ شكل الحرف V؛ حيث يكون القارب في القمَّة وعند زاوية قياسها ٣٩ درجة. وبهذا ينتج شكل الأثر الذي يلفتُ انتباهنا.

إذا نظرتَ عن كثبٍ إلى صورة فوتوغرافية للأثر ستجد أن داخل الحرف V الكثير من الخطوط المُنحنية التي تجعل الأثر يُشبه بِنية الريشة. والسبب في هذه الخطوط الداخلية هو تداخُل الموجات الجماعية الناشئة عن نقاطٍ كثيرة على طول مسار القارب.

وإذا كنت قريبًا من أحد القوارب والأثر الذي يترُكه في ضوء النهار قد تُلاحظ أن الأثر أكثر هدوءًا من الماء خارجه. وعلى الرغم من كلِّ الأمواج الصادرة عن الاضطراب الناشئ عن القارب فالنتيجة تظلُّ واحدة، وهي أن الأثر يحتوي على الأرجح على عددٍ أقلَّ من الأمواج الجماعية قصيرة الطول الموجي مقارنةً بالماء الموجود خارج الأثر. وفي بعض الأحيان تعني هذه الحالة أن انعكاس ضوء الشمس بالنسبة لك يكون أكثر شبهًا بالمرآة؛ ومِن ثمَّ يكون أكثر سطوعًا داخل الأثر عنه خارجه.

(٦٩) ركوب الأمواج

ما الذي يجعل راكب الأمواج (على لَوح ركوب الأمواج) يتحرَّك صوب الشاطئ أو مع مسار الموجة؟ هل يمكنك ركوب قمة الموجة أو الاتجاه للخلف؟

الجواب: في المياه المفتوحة البعيدة عن الشاطئ تتحرَّك الأمواج بسرعاتٍ متطابقة. أما بالقُرب من الشاطئ فإن سرعة الموجة تقلُّ لِقلَّة عمق المياه. ومِن ثَمَّ، عندما تتحرك موجة المحيط عبْر مياهٍ تزداد ضحالتها تدريجيًّا مع الاقتراب من الشاطئ، فإن قاع الموجة يميل إلى التباطؤ. لا تتباطأ قمة الموجة ومِن ثَمَّ تميل إلى تجاوز قاع الموجة فتتسبَّب في ميل الموجة للأمام. ومن المُمكن أيضًا أن يزيد ارتفاع الموجة. وإذا «انهارت» الموجة ببساطة أو «اندفعت» فإنها تنتشِر في الاتجاه الأمامي وتُصبح أقل ارتفاعًا ومِن ثَمَّ تُصبح غير ذات فائدة في ركوبها. أما إذا «تدفَّقت» الموجة (أي تجاوزت القمة القاع) أو «انحدرت» (أي تجاوزت القمة القاع تجاوزًا كبيرًا حتى إن القمَّة تحدَّبَت لتصطدِم بقاع مُقدمة الموجة مكونة أنبوبًا مائيًّا)، فعند ذلك يستطيع راكب الأمواج ركوب الموجة.

ويشتمل ركوب الموجة على تضافُر عوامل ثلاثة تؤثر على راكب الأمواج ألا وهي: (١) الطفو، وهو عمودي على سطح الماء، ويحدُث لأن لوح التزلُّج مغمور جُزئيًّا. (٢) الجاذبية المُتجهة لأسفل، وهي تُحاول أن تجعل راكب الأمواج ينزلق على وجه الموجة. (٣) السَّحْب الموجود على سطح الماء الذي يُقاوم حركة اللَّوح على الماء، ويعود السحب إلى ضغط الماء على اللوح والاحتكاك بين اللوح والماء أثناء انزلاق كلٍّ منهما أمام الآخر.

ومن خلال التجديف بيدَيه للوصول إلى السرعة المطلوبة، يستطيع راكب الأمواج الجاثي على ركبتَيه أن ينتقل من الوجه الخلفي إلى الوجه الأمامي للموجة عبْر ذروتها. وبمجرَّد أن يتَّخذ الراكب وضعيته فإنه يقف وينتظر ركوبة مجانية (كفى تجديفًا). ومن خلال ضبط اتجاه اللوح في الماء يُمكن للراكب أن يضبط السَّحب ووضعية اللَّوح على الوجه الأمامي. ينعدم تأثير القوى الثلاث (أي يحصل راكب الأمواج على «التوازن») في نقطة ما على الجزء السفلي من الوجه الأمامي. وهناك تكون قوة الطفو مائلةً في اتجاه تحرُّك الموجة ومِن ثَمَّ تميل إلى دفع الراكب. تميل الجاذبية إلى سحب الراكب لأسفل المُنحدر لكن سَحب الماء يَميل إلى مقاومة تلك الحركة، ومِن ثَمَّ يركب الراكب الموجة. وللتنقُّل على وجه الموجة أو للتحرُّك على طول الموجة، يُغير الراكب اتِّجاه اللَّوح ومِن ثَمَّ يُغير سحب الماء. وفي العموم، تغيير الوقوف للخلف يجعل مُؤخِّرة اللَّوح أكثر انغماسًا في الماء، مما يزيد السَّحب ويُبطئ اللوح؛ ومِن ثمَّ يتسلَّق الراكب الوجه الأمامي. وتغيير الوقفة للأمام يجعل الراكب يُسرع وينزلق هابطًا على وجه الموجة.

لا يستطيع راكب الأمواج ركوب الموجة إذا كانت تتدفَّق أو تنحدِر على نحوٍ يكفي لحدوث اضطراب. وإذا ظهر الاضطراب في وقتٍ واحد على طول الموجة بالكامل فسوف ينتظر الراكب الموجة التالية فحسب. أما إذا جاءت الموجة بزاوية إلى الشاطئ، فإن التدفق والاضطراب يبدآن عند أحد طرفَي الموجة ويتحرَّكان على طول الموجة (ويُقال في هذه الحالة إن الموجة «تتقشر»). يحاول الراكب ركوب الموجة عند منطقة التدفُّق التي تُوجَد أمام الاضطراب بقليل. وإذا تقشَّرت الموجة سريعًا جدًّا، تلحق نقطة الاضطراب بالراكب وعندها تنتهي الركوبة.

وأكثر أنواع حركات ركوب المَوج إثارة على الأرجح هي حركة «الأنبوب» حيث تنحدِر قمَّة موجة طويلة للغاية لتصطدِم بقاع الموجة تاركةً نفقًا بين نقطة السقوط وبقيَّة الموجة. وإذا استطاع الراكب الركوب على الجزء الأمامي من الموجة قبل بدء تكوُّن الأنبوب فسيكون من المُمكن ركوب الموجة عبْر الأنبوب.

(٧٠) حركة خنازير البحر والدلافين

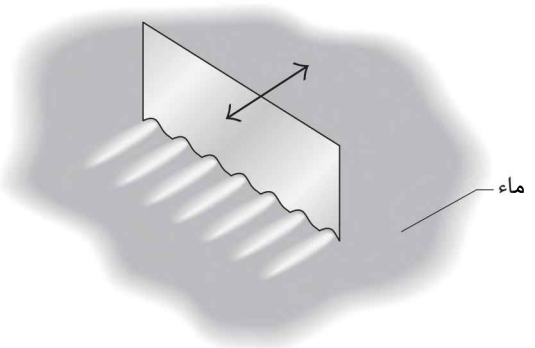
غالبًا ما تُصاحب خنازير البحر والدلافين القوارب والسفن، فتتحرك خلسة بجانب السفينة على عُمق مترٍ تقريبًا أسفل الماء. وقد تكون واقفةً مُنتصبة أو مُستلقية على أحد الجوانب أو تستعرض حركاتها ببساطة بالدوران حول مِحور الجسم. لكن لا يبدو أنها تسبح، بل هي تتحرك فحسب كما لو كانت مربوطة بالسفينة، وربما يدوم هذا لساعات. فما الذي يدفعها؟

الجواب: يعود الدفع الرئيسي إلى الأمواج التي تُطلِقها مقدمة السفينة (أو مُؤخِّرة السفينة في بعض الأحيان). يضع خنزير البحر أو الدولفين نفسه داخل المَوجة الأمامية على عُمقٍ ليس بكبيرٍ أسفل السطح (المائل). وعندما تندفع مقدمة السفينة في الماء دافعةً إيَّاه إلى الأمام ولأعلى وللخارج، فإن الماء يدفع الحيوان، دافعًا إيَّاه للأمام. وإذا أراد الحيوان ببساطة أن يركب الموجة بدلًا من اللعب، فإنه يبحث عن العُمق الذي تُوازِن فيه هذه القوة الدافعة سحْب الماء. وفي بعض الأحيان يمكن أن يحصل الحيوان على ركوبةٍ مجانية حتى إذا كانت موجة مُقدِّمة السفينة صغيرة، وربما دون أن يلاحظ ذلك أيُّ شخصٍ على متْن السفينة التي صنعت الموجة.

(٧١) أمواج الحافة

إذا اهتزَّ مِجداف بشكلٍ رأسي أو أُفقي في الماء فمن الممكن أن يظهر نسَق جميل من الأمواج، وستبدو ذُرى الأمواج الثابتة العمودية على المجداف شديدة الشَّبَه بأسنان المشط (انظر الشكل ٢-٢٣). وعلى هذا النحو فإنها تختلف عن الأمواج العادية التي يصنعها المِجداف، والتي تكون ذُراها موازيةً للمِجداف وتتحرَّك فوق سطح الماء. اكتشف هذه الأمواج الغريبة التي يُطلَق عليها «أمواج الحافة» أو «الأمواج الصليبية» مايكل فاراداي في الأول من يوليو عام ١٨٣١، كما كتَب في مُفكرة ملاحظاته العلمية الدقيقة. يجب أن تكون الاهتزازات مُوحَّدة، فيجب أن يكون عُمق إدخال المجداف صحيحًا بالضبط، وقد يلزم ظهور الأمواج مرور حوالي دقيقة.

ويُمكن أيضًا رؤية أمواج الحافة في كوب الخمر الملآن أو شِبه الملآن. مَرِّر إصبعًا نظيفة وجافَّة حول الحافة. وإذا فعلتَ ذلك على نحوٍ صحيح فمن الممكن أن يُسبِّب الاحتكاك أمواجًا عمودية على الحافة. ويُمكن أن تكون الأمواج شديدة القوة حتى إنَّ بعض قطرات الخمر تتطاير في الهواء. لماذا يُسفِر الاحتكاك عن أمواج؟



شكل ٢-٢٣: بند ٢-٧١: أمواج الحافة عمودية على مجداف يهتز أفقيًّا.

الجواب: الأمواج العادية الناتجة عن ذبذبات المجداف في الماء هي من نوع الأمواج الشعرية، وهي أمواج يتحكم في ذبذباتها التوتر السطحي وليس الجاذبية. ويُمكن وصفها بأنها تموُّجات على سطح الماء تمييزًا لها عن «أمواج الجاذبية» الأكبر حجمًا. في ظلِّ الظروف المناسبة تُطلِق اهتزازاتُ المجداف أيضًا نسَقًا ثابتًا من الماء المهتزِّ على العرْض الأفقي لوجه المجداف. ومن الأمور المُثيرة للدهشة أن تَردُّد اهتزازات الماء يساوي نصف تردُّد اهتزازات المجداف.

عند تصوير فيديو بالحركة البطيئة للمجداف وعند البدء في الاهتزاز أفقيًّا ستجد التسلسل التالي: في كلِّ مرة يتحرك فيها المجداف لأعلى فإنه يرفع تلًّا على طول عرضه الأفقي، وعندما يتراجع فإنه يُخلِّف واديًا على طول ذلك العرض. وأثناء تكوُّن هذه التلال والوديان فإنها تبتعد عن المجداف مثل الأمواج الشعرية العادية.

وبعد عمل المجداف لما يقرُب من دقيقة، ستجد أن المجداف في كل مرة يتحرك فيها للأمام يرفع سلسلةً من التموُّجات العمودية عليه والمُتداخلة مع تلِّ الموجة الشعرية العادية. إلا أنه تُوجَد مجموعتان من التموُّجات: فحركة المِجداف الأمامية ترفع مجموعة، وحركة المجداف الأمامية التالية ترفع المجموعة الثانية وهكذا. وتتكوَّن التموُّجات في المجموعة الأولى في منتصف تموُّجات المجموعة الأخرى. ولذلك، فإن مُعدَّل ظهور أيٍّ من المجموعتَين يُعادل نصف مُعدل اهتزازات المجداف.

عند حكِّ حافة كأس الخمر بطريقةٍ صحيحة سوف تجعل الحافة تهتزُّ مثل الجرس، وقد تسمَع في واقع الأمر رنين الكأس. الحافة دائرية، ومن ثَم فإن الاهتزازات تكوِّن نسقًا إما يتَّجِه ناحية مركز الدائرة أو بعيدًا عنها. ويُعطي شكل ٣-٤ في الفصل الثالث تصوُّرًا مُمكنًا عن لحظة مرور إصبعك حول قرص الساعة المتمثل في الحافة. فتحدُث أعلى إزاحة عند مكان الساعة الثالثة والسادسة والتاسعة، أما نقاط عدم الإزاحة فتحدُث في نقطة وُسْطَى بين تلك الأماكن. يتبَع النسق إصبعك حيثما تَحرَّك. وتعمل الحافة كمجدافٍ مُهتز، ويتكوَّن نسَق من الموجات الحدودية.

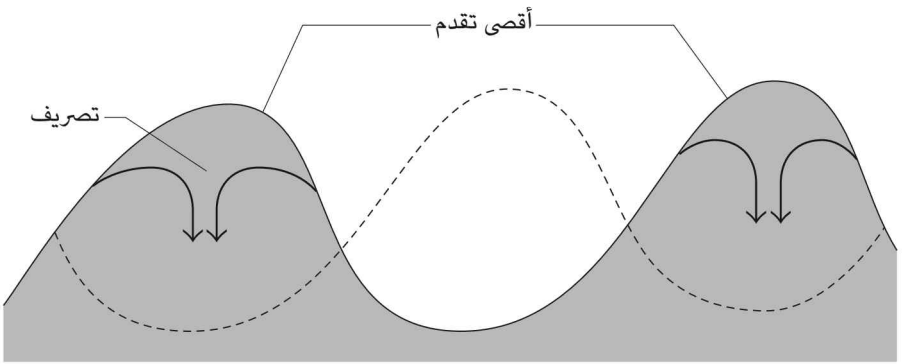
يمكن أيضًا تكوين أمواج الحافة من خلال وعاء انبجاس الماء النحاسي الصيني. لكننا هنا نحكُّ مِقبَضَي الوعاء بدَل الحافة. وإذا انطلقَتْ أمواج الحافة على نحوٍ صحيحٍ فمن المُمكن أن تقذف الماء في الهواء لارتفاع نصف متر.

ويُمكن إنتاج أشكال أمواج الحافة والأشكال الأكثر تعقيدًا (التي تشمل أنماطًا جميلة مثل الشرائط والسُّداسيات والدوائر) في طبقةٍ ضحلة من الماء والجليسرين إذا اهتزَّ السائل رأسيًّا.

(٧٢) نتوءات الشواطئ

ما الذي يُسبِّب نسَق النتوءات التي تُزيِّن كثيرًا من الشواطئ؟

الجواب: يَتشابه من الناحية الحسابية نسَق الماء المسئول عن النتوءات الشاطئية مع أنماط أمواج الحافة المذكورة في البند السابق. ورغم ذلك، بسبب صعوبة الحسابات الرياضية، فإننا سوف نلتزم بالوصف البسيط؛ فعندما تجري الموجة نحو الشاطئ تتَّخِذ عند وصولها شكلَ مُنحنى الجيب (انظر شكل ٢-٢٤) تقريبًا. وعند أقصى نقطة تتقدَّم إليها الموجة تحمِل معها الرمال على الشاطئ مكونةً نتوءًا من الرمل المُبلَّل. ينسحِب الماء عن طريق التدفُّق إلى مركز النتوء ثم يتدفَّق لأسفل عبْر مُنخفض يُشبه الحوض محفور في الرمل. يمنع «ارتداد الموج» الموجةَ التالية من «التقدُّم» على نحوٍ مشابه. وبدلًا من ذلك يحدُث تقدُّم الموجة التالية بعيدًا على جانبَي النتوء؛ حيث حققت الموجة السابقة أدنى تقدُّم. يُرَسِّب الماء الرمل ثم ينسحب مرة أخرى عبْر منخفضٍ مركزي يُشبه الحوض، ويمنع ارتداد الموج الموجةَ التاليةَ من التقدُّم نحوَ هذا النتوء. ومِن ثَمَّ فإن النسَق الذي نراه على الشاطئ يعود إلى تبادل التقدُّم عند النتوءات المُتجاوِرة.



شكل ٢-٢٤: بند ٢-٧٢: منظور علوي لتقدُّم موجة على الشاطئ. والتقدُّم التالي مُوضَّح بالخط المُتقطِّع.

(٧٣) الزيت والأمواج

منذ القِدَم عرف الناس أنَّ إلقاء طبقة من الزيت (مثل زيت الزيتون) على المياه المفتوحة يمكن أن يُقلِّل الأمواج أو يمنعها، حتى في ظلِّ وجود رياح قوية قادرة على تكوين الأمواج. كان هذا التأثير معروفًا لدى بنجامين فرانكلين الذي كان يحمل معه كمية صغيرة من الزيت كي يتمكَّن من توضيح هذا التأثير. وذات مرة، بينما كان يحضُر حفلًا بالقُرب من أحد الأنهار وكان النسيم يدفع الأمواج الصغيرة، سار إلى أعلى النهر نسبيًّا وهزَّ عصاه عدَّة مرات هزاتٍ «سحرية» دون أن يجعل روَّاد الحفلة يرَون رذاذ الزيت المُتساقِط من العصا. واندهش الحضور عندما اختفتِ الأمواج على نحوٍ شبه فوري وأصبح النهر راكدًا.

عند الطيران فوق المياه المفتوحة يُمكنك أن تلاحظ بُقَع التلوث. قد تكون هذه البُقَع أكثر انعكاسًا من الماء، لكن الأكثر أهمية هو أن سطحها أكثر لمعانًا في ضوء الشمس من سطح الماء غير الملوَّث المُجاور لها؛ لأن البُقَع تُقلل الأمواج أو تمنعها.

فلماذا يُهدِّئ الزيت المياه المفتوحة؟

الجواب: تُهدئ طبقة الزيت أو غيره من الملوثات الماء لأسباب ثلاثة: (١) إنها طبقة لزجة (حيث يمنع احتكاكها الداخلي انزلاق الطبقة على الأخرى). ولذلك عندما تبدأ الموجة سرعان ما تفقد طاقتها. هذا التأثير مُهم بصفةٍ خاصة بالنسبة للأمواج ذات الطول المَوجي القصير (أي الأمواج التي تفصل مسافة قصيرة بين ذُراها المتعاقبة). (٢) تتكوَّن

الأمواج عادةً من تموُّجات؛ لأن الرياح تهبُّ على التموُّجات وأمامها. وإذا تبدَّدت التموُّجات فلن يكون مُمكنًا ظهور الأمواج الأكبر حجمًا. (٣) يُمكن أن تتداخل الطبقة مع انتقال الطاقة بين الأمواج ذات الطول الموجي الطويل والأمواج ذات الطول الموجي القصير، فتتسبَّب في انخفاضٍ عام في نشاط الأمواج.

(٧٤) القطرات الطافية

في بعض ماكينات صُنع القهوة تسقط بعض قطرات القهوة إلى بِركة القهوة. من المُفترَض أن تتناثر تلك القطرات وتندمج سريعًا في البِركة، لكنها تتسابق فوق سطح البِركة، وقد تندفع للأمام والخلف داخل الوعاء عدَّة مرات.

يمكن أيضًا تكوين القطرات الطافية عند احتكاك كوبٍ تقليدي من الفوم يحتوي على القهوة (أو غيرها من المشروبات) بسطح طاولة بحيث يتعرَّض الفنجان للالتصاق والانزلاق مرات مُتكررة. وإذا كانت الحركة المضطربة للفنجان سريعة بالقدْر الكافي فإنَّ التموُّجات الناتجة على السائل تنثُر القطرات في الهواء. وعند سقوط تلك القطرات فمن الممكن أن تطفو على السائل بدلًا من الاندماج فيه على الفور. وعند توقُّف حركة الالتصاق والانزلاق، فإن القطرات تندمج سريعًا.

وأيضًا عندما يصطدم تيَّار ماء ثابت من الصنبور بحوض مسطح، فمن الممكن أن يُكوِّن نسَقًا دائريًّا حول نقطة الاصطدام. داخل الدائرة يكون تدفُّق الماء سريعًا وضحلًا، وخارج الدائرة يكون أبطأ وأقلَّ ضحالة. ومِن ثَمَّ، فإن الدائرة هي فعليًّا جدار يحدُث عنده انتقال للماء. وإذا أسقطتَ قطرةً من قطَّارة على مجرًى مائي من فوق الجدار، فقط تطفو القطرة وهي مُعلقة على الجدار.

فلماذا تطفو قطرات الماء في كل هذه الحالات؟

الجواب: قد تبقى القطرة مُعلقة فوق البِركة بسبب التنافُر الكهربائي بين الجُزيئات على سطح القطرة والجزيئات على سطح البِركة. وعند وجود مُنظِّف في القطرة والبِركة، فإن جزيئات المُنظف تميل إلى التجمُّع عند سطح الماء واضعة أطرافها أليفة الماء (الجاذبة للماء) في الماء، مع بروز أطرافها كارهة الماء (طاردة الماء) خارج الماء. ومِن ثَمَّ فإن الأطراف كارهة الماء في قاع القطرة وقمَّة البِركة يمكن أن يطرد بعضها بعضًا مما يتسبَّب في رفع القطرة.

إلا أنه في الأمثلة المذكورة تُوجَد حُجة أكثر إقناعًا تفسر ارتفاع القطرة ألا وهي أن القطرة مدعومة بطبقة هواء بينها وبين البِركة. لنتأمَّل أولًا الموقف الشائع المُتمثل في

إطلاق قطرةٍ فوق بِركة ثابتة؛ لأنَّ هذا الموقف يتضمَّن أيضًا طبقةً من الهواء: أثناء سقوط القطرة يتدفَّق الهواء السفلي للخارج إلى أن تلمس القطرة البِركة أولًا، ثم تندفع موجة عبر القطرة قاطعةً النصف السفلي الذي يندمج فورًا في البِركة، وعند نزول النصف العلوي يدعمه الهواء السفلي جزئيًّا لكنه يتدفَّق للخارج إلى أن تلمس القطرة المُتبقية البِركة أولًا، ومرة أخرى تندفع موجة على القطرة قاطعةً النصف السفلي الذي يندمج فورًا في البِركة. وهكذا تتكرَّر الدورة، ربما لعدَّة مرات، قبل أن يندمج آخر القطرة الأصلية في البِركة بدلًا من الانشطار إلى نصفَين.

نتأمَّل بعد ذلك سلسلة القطرات الساقطة في ماكينة صُنع القهوة. في عملية التناثُر التي سنناقشها في البند القادم، يمكن للقطرة أن تهبط بمجرَّد امتلاء الفوهة التي تركتها القطرة السابقة بالسائل المندفع للداخل. والاندفاع للداخل يدفع القطرة الجديدة إلى الارتداد نسبيًّا إلى أحد الجوانب. ومع نزول القطرة بعد ذلك فإنها تميل إلى طرد الهواء السُّفلي. إلا أنه نظرًا لتحرُّك القطرة يظلُّ الهواء الجديد مدفوعًا تحتها؛ ومِن ثمَّ تظلُّ دائمًا مدعومة بطبقة من الهواء السفلي. ويتشابَهُ مثال الحوض مع هذه الحالة، فيما عدا أن القطرة ترتكِز على الجدار وتدفُّق الماء يسحبُ باستمرارٍ الهواء الجديد تحت القطرة لاستمرار الدعم.

وإذا حدث اهتزاز في البِركة والقطرة، فمن المُمكن أن تضخَّ الحركة الهواء تحت القطرة بسرعة كافية لدعم القطرة. تحدُث حركة الضخِّ في الكوب المصنوع من الفوم الذي يُسحَب على سطح الطاولة بطريقة الالتصاق والانزلاق. وعلى الأرجح ستفلح أيضًا أي طريقة أخرى لإحداث اهتزازٍ رأسي في القطرة والبِركة إذا كان تردُّد الاهتزاز مُساويًا تقريبًا لتردُّد اهتزاز الكوب المصنوع من الفوم.

ويمكن أيضًا أن تحوم القطرة إذا كانت حرارتها أو حرارة البِركة مرتفعة. وفي هذه الحالة سيكون بخار الماء هو الغاز الذي يدعم القطرة. ويُطلَق على هذه الآلية عادةً اسم «تأثير ليدنفروست» ونتناوله في الفصل الرابع الذي يتحدَّث عن العمليات الحرارية.

(٧٥) القطرات المُتناثِرة

ما الذي يحدُث لقطرة ماء مثل نقطة المطر عندما تصطدم بسطحٍ أفقي صُلب أو بِركة ماء؟ لماذا تتناثر بعض القطرات (أي تُلقي أجزاء منها لأعلى وللخارج) ولا يتناثر البعض الآخر؟

عند نزول قطرة دم أو قذفِه من ضحية في مسرح الجريمة يحتاج الباحث الجنائي إلى تحديد سرعة وحجم القطرة من البُقعة التي تركتها على السطح. ومن الصعوبات المُتأصِّلة في هذا الأمر أن حجم البُقعة يعتمد على «كلٍّ من» سرعة وحجم القطرة؛ أي إنَّ البقعة كبيرة الحجم قد تكون ناتجة عن قطرةٍ صغيرة ذات سرعة عالية أو عن قطرة كبيرة ذات سرعة مُنخفضة. هل تُوجَد طريقة لتحليل بقعة الدم للكشْف عن هذه المعلومة؟ (تخيَّل ماذا سيفعل شيرلوك هولمز.)

الجواب: «السطح الصُّلب»: وفقًا للظروف، فإنه عند اصطدام القطرة بسطحٍ صلب يمكن أن تتناثر، أو أن تتمدَّد لتغُطِّي (تبلل) السطح دون تناثر، أو أن ترتد أولًا ثم تتناثر أو تتمدَّد. في حالة التناثر، تُكوِّن القطرة طبقة ضحلة ذات «تاج» (حافة مُرتفعة) تقذف على الأرجح قطراتٍ صغيرة أثناء نزولها. وتتكون القطرات الصغيرة؛ لأن الحافة أصبحت غير مستقرة أثناء تباطؤ حركتها الخارجية. تسيطر إحدى الأمواج التي تميل للتكوُّن على الحافة في هذه المرحلة، وتكون نقاطها العُليا نتوءات أو أصابع يمكن أن تنقصم لتكوِّن نقاطًا. وفي الغالب يمكن رؤية الأصابع في النسق الذي يتركه الرذاذ. والطول الموجي الذي يُهيمن على عدم الاستقرار يُساوي تقريبًا محيط النسق مقسومًا على عدد الأصابع الموجودة في هذا النسَق.

«السطح المائي»: يمكن للنقطة التي اصطدمت بسطحٍ مائي أن تتناثر أو أن تمتزج بالسطح أو أن تطفوَ فوقه. لا يمكن أن يحدُث الطفو الذي ناقشناه في البند السابق إلا إذا سقطت القطرة من مسافةٍ قصيرة. وأما بالنسبة للسقوط من مسافةٍ أعلى، فإن القطرة تُحدِث عادةً فوهة نصف كُروية في سطح الماء ثم تُكَوِّن تاجًا حول حدود الفوهة. ومع انحسار التاج وتراجُعِه إلى الفوهة، فإن التدفُّق الداخلي السريع يُلقي الماء للأعلى في نافورة مركزية. وقد تُسقِط النافورة قطرةً أو أكثر أثناء وصولها لأعلى ارتفاع. وفي النهاية تنحسر النافورة وينتهي التناثُر.

في بعض الحالات سوف ينغلق التاج على نفسه مكونًا قُبة، وسوف تُحاصَر أي نافورة مركزية في الداخل دون رؤيتها. وإذا ضربت القطرة الماء دون أن تُحدِث تاجًا فسوف تُحدِث دواماتٍ مُتَّجِهةً لأسفل تُشبِه في شكلها الكعكة الأفقية؛ فيدور الماء لأسفل في داخل الكعكة ولأعلى خارجها. يمكن لإضافة ألوان الطعام في القطرة أن تجعل الدوَّامة مرئية. والقطرة التي طرحتها نافورة مركزية يمكنها أيضًا تكوين دوامة. تكون النافورة المركزية في طبقة الماء الرقيقة أكثر وضوحًا؛ لأن الحدَّ الصلب السُّفلي يجعل التاج يتحوَّل

بمزيدٍ من القوة إلى النافورة المركزية. أما أعلى ارتفاع للنافورة فيحدُث عندما يكون عُمق طبقة الماء مُساويًا لنصف قُطر الفوهة التي أحدثتْها القطرة. (ومن المُفاجئ أنه عند إزالة الهواء الموجود فوق طبقة الماء أو وجود غازٍ أخف بدلًا منه، يمكن أن يختفي التناثُر.)

والقطرات الساقطة على الماء في سلسلةٍ سريعة يُمكن أن ترتدَّ عن الماء؛ لأنه بعد نزول القطرات الأولى القليلة تصطدم القطرات اللاحقة بالحفرة في الوقت الذي يبدأ فيه الماء في الصعود لأعلى لإعادة ملء الحفرة. ولذلك، فأيٌّ من القطرات اللاحِقة يمكن أن يُلقى لأعلى ببساطة.

يمكن أن تتعرَّض قطرات الشمع الذائب الساقطة على سطحٍ معدني أملس إلى نوع التناثر نفسه الذي تتعرَّض له قطرات الماء، لكنها سوف تتجمَّد في المراحل النهائية. تُصبح الأنماط الأخيرة جذَّابة عندما تُسقِط نتوءات أو تيجان المُحيط قطراتٍ صغيرة؛ لأنَّ هذه القطرات المُتجمِّدة تبقى مُحيطة بمنطقة التناثر الرئيسية. قطرات المعدن المُذاب الساقطة على سطحٍ معدني مُسطَّح يُمكن أيضًا أن تتجمَّد مكوِّنة أشكالًا مُثيرة، إلا أن هذه القطرات تخضع لعملية «تَسَطُّح» بدلًا من عملية «التناثر»؛ لأنها تنتشِر على السطح المستوي وتظهر الأصابع على طول المُحيط. تنفصل بعض الأصابع في صورة قطرات معدنية مُنعزلة. وزيادة خشونة السطح تُقلِّل عادةً عدد الأصابع وتزيد عرضها.

ومن أجل تحديد سرعة وحجم قطرة الدم السائلة من ضحية في إحدى الجرائم يحتاج الطبيب الشرعي إلى فحص حجم البُقعة وكذلك عدد الأصابع الموجودة حول المحيط. تُسفر السرعة العالية عن عدد أصابع أكبر. إلا أنَّ ما يجعل عملية التحليل صعبةً هو طبيعة السطح الذي اصطدمت به القطرة؛ فالسطح الخشِن يجعل الأصابع تتداخل ويُقلِّل حجم البُقعة. ولذلك يتطلَّب الأمر عملًا تجريبيًّا مكثفًا لتسجيل خصائص بُقَع الدم على أنواع الأسطح الشائعة من الخرسانية إلى الورقية وحتى الزجاجية. وبدلًا من ذلك، عند العثور على بُقَع الدم في مسرح الجريمة لا بدَّ من أخذ عيِّنة من السطح الصلب المُلطخ بالبُقع إلى المُختبر مرةً أخرى حيث يُمكن تحليل تجارب تستخدِم قطرات دم معروفة الحجم وارتفاع السقوط على ذلك السطح.

(٧٦) الفقاعات في الصودا والجعة والشامبانيا

لماذا تتكوَّن الفقاعات في الصودا والجعة والشامبانيا وغيرها من المشروبات الغازية بعد فتح الوعاء؟ لماذا تتكوَّن فقط على السطح الداخلي للوعاء ولا تتكوَّن داخل السائل نفسه؟

لماذا يكبر حجمها عند صعودها؟ ولماذا يتكوَّن قِطار من الفقاعات بحيث تتتبَّع الفقاعة الأخرى لا سيما في الشامبانيا؟ لماذا ترتفع الفقاعات في الشامبانيا عادةً أسرع من ارتفاعها في الجعة؟ إذا نظَّفتَ كأس شراب بمسحوق غسيل وتركته يجف في الهواء قبل أن تصُبَّ فيه مشروبًا غازيًّا فلماذا ينتهي تقريبًا تكوُّن الفقاعات؟

عند إضافة الثلج أو الملح إلى كأس من الجعة صُبَّ للتوِّ لماذا يزداد إنتاج الفقاعات بقوة، ربما لدرجة فيضان السائل من الكأس؟ لماذا تتناثر محتويات المشروب الغازي للخارج عند رجِّ المشروب قبل فتحه؟

شراب الشاندي هو مزيج من الجعة ومشروب مُرطِّب يتمثَّل عادةً في الليمونادة أو جعة الزنجبيل. وعند صبِّ الجعة على المشروب المُرطب لا يحدث شيء جدير بالملاحظة. أما إذا أُضيف المشروب المُرطب إلى الجعة، فإن فوران الفقاعات قد يفيض من الوعاء. فما سبب هذا الاختلاف؟

عند وضع قِطَعٍ صغيرة من الليمون في كأس من الجعة لماذا يُمكن أن تصعد وتهبط في الكأس على نحوٍ مُتكرِّر؟ وعند صبِّ جعة جينيس سريعًا في كأس لماذا تتكوَّن الفقاعات في صورة طبقات على جانب الكأس، ولماذا تتَّجِه هذا الطبقات لـ «الأسفل»؟

الجواب: المشروب الغازي هو سائل يحتوي على قدرٍ كبير من ثاني أكسيد الكربون المُذاب المحفوظ تحت ضغط. في الشامبانيا قد يصل الضغط إلى ستَّةِ أمثال الضغط الجوي العادي. أي إنَّ كلًّا من السائل وجيب الغاز الموجود فوق الغاز واقعان تحت هذا الضغط الكبير. (إذا لم تُخلَع قطعة الفلين برفقٍ من زجاجة الشامبانيا فمن الممكن أن يتسبَّب الضغط الكامن تحت قطعة الفلين في إطلاقها بسرعة ٥٠ كيلومترًا في الساعة، وهي سرعة أكثر من كافية لإحداث إصابة بالغة في العين.) وعند فتح الوعاء فإنَّ تدفُّق الغاز للخارج يُقلل الضغط الداخلي؛ ومِن ثمَّ يصبح أقل من المطلوب للحفاظ على الكمية الكاملة لثاني أكسيد الكربون المُذاب. ولذلك يبدأ ثاني أكسيد الكربون في الخروج من المحلول إما من خلال عبور السطح العلوي من السائل (إذا أمكن) أو بتكوين الفقاعات.

في العموم، يمكن أن تتكوَّن الفقاعة ثم تكبُر فقط إذا كان حجمها يفوق قيمةً حرجة مُعيَّنة. ومشكلة الفقاعة الأصغر حجمًا تكمُن في سطحها شديد الانحناء؛ إذ يتسبَّب الانجذاب المُتبادل بين جزيئات الماء على السطح في انفجار الفقاعة على الرغم من الدفعة الخارجية الصادرة من غاز الفقاعة. أما سطح الفقاعة الأكبر حجمًا فهو أقلُّ انحناءً،

والقوة الداخلية لجزيئات الماء على السطح ليستْ كافية لتجعل الفقاعة تنفجر. ورغم ذلك، فإن الفقاعات الأكبر من الحجم الحرِج من غير المُحتمَل أن تتكوَّن داخل السائل نفسه؛ فلا يمكن أن تكبُر ولا أن تظهر فجأة بهذا الحجم. ومِن ثَمَّ، فإن «تَنَوِّي» (إنتاج) الفقاعات يحدُث على السطح فقط، على الجدران والقاع في الأساس (لكنَّه يحدُث أيضًا على أي مادة صلبة في السائل). وفي النهاية تصبح كمية ثاني أكسيد الكربون المُتبقية في السائل أصغرَ من أن تُكَوِّن مزيدًا من الفقاعات.

والتفسير الأكثر شيوعًا لتَنَوِّي الفقاعات يتضمَّن وجود خدشٍ في جدار الكأس وفقاعة موجودة من قبل. إذا كان عرض الخدش مناسبًا، فمن المُحتمَل ألا يكون سطح الفقاعة شديد الانحناء ومِن ثَمَّ لا تنفجر الفقاعة. علاوة على ذلك، يمكن لثاني أكسيد الكربون أن يمرَّ ببطءٍ من السائل إلى الفقاعة، فينفخ الفقاعة ويزيد طفوها. وفي النهاية، تصبح الفقاعة كبيرة على نحوٍ كافٍ لخروج مُعظمها من الخدش والطفو لأعلى. ويبدأ إنتاج الفقاعات مرة أخرى من كمية الغاز الصغيرة المُتبقية في الخدش.

تُشير الأدلة الحالية إلى أن «معظم» الفقاعات في كأس الشراب لا تبدأ بسبب الخدوش، بل تبدأ في الألياف السليولوزية التي ظلَّتْ مُلتصِقة على سطح الكأس عندما غُسلت أو جُفِّفت في السابق بمنشفةٍ ورقية أو قماشية. وتحتوي هذه الألياف الجوفاء على هواء محبوس يبدأ إنتاج الفقاعات. وعند فتح الوعاء، يتسرَّب ثاني أكسيد الكربون إلى الهواء المحبوس من خلال نهايات الألياف المفتوحة. وعندما تصبح الفقاعة كبيرة على نحوٍ كافٍ ينفصل جزءٌ منها من إحدى النهايات، وتتكرَّر العملية. وإذا لم يُجفف الكأس بالورق أو القماش أو إذا غُسل بمسحوقٍ وجُفِّف بالهواء النظيف الصادر عن آلة فسيفقد الكأس هذه الألياف السليولوزية ومِن ثَمَّ لن يتمكن من إنتاج الفقاقيع. والفقاقيع الوحيدة التي سيكوِّنها ستكون ناتجة من الاضطراب الذي يحدُث عند ملء الكأس لأول مرة.

إذا فتحت عبوة صفيحية تحتوي على مشروب غازي من خلال جذب حلقة السحب فإن إنتاج الفقاقيع بكامله سيحدُث عند السطح العلوي المغمور من الحلقة. (استخدم مصباحًا يدويًّا للنظر داخل بقية العلبة الصفيحية.) ومن المُفترَض أنَّ تكوُّن الفقاقيع يحدُث عند تعلُّق البقايا بالحلقة. وإذا نظفت قمَّة العلبة الصفيح بورَقٍ أو قماش لأسباب صحية فإن جزءًا من البقايا سيكون من ألياف السليولوز.

وإن الثلج يحتجِز الهواء في أجزاءٍ مختلفة من سطحه؛ ومِن ثَمَّ يمكن أن يكون تأثيره مثل الألياف. أما الملح فمُختلف؛ فعندما يضيف الشخص الملح إلى الجعة، فإنه يذوب

في المحلول ويُقلل كمية ثاني أكسيد الكربون الممكن ذوبانها في السائل. يحتوي السائل بالفعل على كمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون؛ ولذلك سرعان ما يخرج ثاني أكسيد الكربون من المحلول.

وبمُجرَّد إطلاق الفقاقيع يميل الطفو إلى دفعها لأعلى؛ لأنها أخفُّ من السائل المُحيط. إلا أن جزيئات مثل البروتينات تبدأ بالالتصاق بالفقاقيع سريعًا، فتزيد من السحب وتُبطئ الصعود. هذا التباطؤ يحدُث في الجعة أكثر من حدوثه في الشامبانيا لأنَّ الجعة عامرة بالبروتينات؛ ومن ثَمَّ تسبق فقاقيع الشامبانيا فقاقيع الجعة.

إذ رُجَّ وعاء المشروب الغازي قُبيل فتحه فإنَّ الغاز الموجود عادةً فوقه يختلط به في صورة فقاقيع صغيرة. وعندما يقلُّ الضغط يمكن لثاني أكسيد الكربون أن يخرج فجأةً من المحلول عن طريق التحرُّك إلى هذه الفقاقيع، وقد يكون نموُّ الفقاقيع شديد القوة لدرجة دفع الفقاقيع للسائل من الوعاء، بل من الممكن أيضًا أن تُطلقه للخارج. وتجنبًا للفوضى، يجب أن يبقى الوعاء المرجوج موضوعًا لفترةٍ قبل فتحه، للسماح للفقاقيع بالوصول إلى القمة والانفجار. (لا أعرف لماذا يُسرِّع القرْع على الوعاء هذه العملية إلا إذا كان يزيح الفقاقيع التي تكون مُلتصقة بجدار الوعاء.)

يعتمد تكوُّن الفقاعات في جعة «شاندي» على مكان وجود الجعة بالقُرب من جدار الكأس، أي المكان الذي يُمكن أن تتكوَّن فيه الفقاعات. فعلى سبيل المثال، إذا صُبَّت الجعة على الليمونادة فإن معظمها سيُكوِّن في البداية طبقةً فوق الليمونادة. ومِن ثَمَّ ستتكوَّن الفقاعات في الأساس في الطبقة العُليا ويمكن أن تهرُب بسهولة إلى السطح العلوي بالطريقة المُعتادة. أما إذا صُبَّت الليمونادة على الجعة، فستتكوَّن الفقاعات في الطبقة السفلى وستضطر إلى التسلُّق عبْر الليمونادة للوصول إلى السطح العلوي. بالإضافة إلى ذلك، مع تدفق بعض الليمونادة إلى الجعة، يمكن أن توفر بعض جزيئاتها (مثل اللب) أماكن لتكوُّن الفقاعات وهروبها. باختصار، فإنَّ معدل تَكوُّن الفقاعات يزيد ويجب أن تتَّجِه تلك الفقاعات لأعلى عبر الليمونادة للوصول للسطح العلوي. والنتيجة هي تسارُع إنتاج الرغوة ووجود فرصة جيدة للفيضان.

ويمكن لقطعةٍ صغيرة من الليمون، وحبَّةٍ واحدة من الفول السوداني (ليس من النوع المُجفف المُحمص)، وغيرها من العناصر أن تجمع عددًا كافيًا من الفقاقيع قُرب قاع السائل كي تطفو إلى القمة. وكثير من الفقاعات تنفجر هناك؛ ومِن ثمَّ يغرق الشيء مرة أخرى في القاع. وكلما واصلَتِ الفقاقيع التكوُّن، تكرَّرت العملية.

عند صبِّ جعة جينيس في كأسٍ تملأ الفقاقيع الجعة في البداية. وعندما تندفِع الفقاقيع إلى بعضها يُمكن أن يلتصِق بعضها ببعضٍ مكونة «مجموعات فقاقيع» تتسبَّب في تباطؤ الفقاقيع في صعودها. يفصل المجموعات رأسيًّا بعضها عن بعض مسافة تعتمد على اختلاف مُعدَّلات الصعود بين الفقاعة الحرة ومجموعة الفقاقيع. (من الممكن أن تتكوَّن مجموعات الفقاقيع في الصهارة البازلتية والحِمَم البُركانية المُتدفِّقة إذا كانت الطبقة سميكة على نحوٍ يسمح للفقاقيع الصاعدة بتكوين مجموعاتٍ قبل الوصول إلى سطح الطبقة.)

يقول بعض الناس إنَّ حركة مجموعات الفقاقيع للأسفل ما هي إلا وهم، لكن الحركة تبدو حقيقية ويمكن أن تكون قائمة على أحد التأثيرين التاليَين أو كليهما: (١) الفقاقيع في منتصف الكأس سوف تصعد أسرع من الفقاقيع الموجودة على الجدار؛ إذ يُعيقها احتكاك الجدار والسَّحْب الواقع على المجموعات. ولذلك، تسحب الفقاقيع الصاعدة السائل الموجود في منتصف القدح لأعلى، مما يجعل السائل الذي يحلُّ محلَّه يتحرَّك لأسفل قُرب جدار القدح. (٢) تندفع الفقاقيع المُتحرِّرة من سطح المجموعة إلى أعلى لتنضمَّ إلى قاعدة المجموعة العُليا التالية. ومِن ثَمَّ، تفقد كل مجموعة فقاقيع من سطحها العلوي وتكتسب في الوقت نفسه فقاقيع في سطحها السفلي، ولذلك يتحرَّك مركز المجموعة لأسفل.

(٧٧) فقاعات الصابون ورغوة الجعة

ما الذي يجعل فقاعة الصابون التي كنتَ تنفخها من الحلقة وأنت طفل مُتماسكة؟ لماذا يلزم وجود صابون أو سائل مُنظف، هل يمكن أن تنفخ فقاعة من الماء؟ لماذا تستمرُّ الفقاعة لوقتٍ أطول إذا كانت تحتوي أيضًا على الجلسرين؟ (امزج المنظف والماء والجلسرين بنسبة ١:٣:٣ تقريبًا.) لماذا لا يتسرَّب السائل الموجود على جدار الفقاعة إلى قاع الفقاعة فيجعل القمة تنفتح وتنفجر؟

لماذا تستمرُّ الرغوة (الزَّبَد) على الجِعَة المصبوبة لمدة أطول من الرغوة الموجودة على الصودا المصبوبة؟ لماذا تختفي رغوة الجعة في النهاية؟

الجواب: جدار فقاعة الصابون عبارة عن طبقة رقيقة جدًّا من الماء وجُزيئات المنظف المُتجمعة على السطح الداخلي والسطح الخارجي. يلتصق طرف جزيء المنظف بالماء (فهو مُحبٌّ للماء) ومِن ثَمَّ يثقب سطح الماء. أما الطرف الآخر فلا يرتبط بالماء (فهو كاره للماء) ويبرُز خارج السطح. والقوى التي تجعل الفقاعة متماسكة سببها هو «التوتر السطحي» للماء؛ أي الانجذاب المُتبادَل بين جزيئات الماء. رغم ذلك، فإن التوتُّر

السطحي للماء النَّقي أقوى من أن يسمح لغشاءٍ مائي رقيق مُنتفخ بتكوين فقاعة. وجزيئات المنظف المُتجمِّعة على السطح تُقلِّل من التوتُّر السطحي بقدرٍ يكفي للحيلولة دون انفجار الفقاعات ببساطة.

وتميل المياه داخل الفقاعات إلى التسرُّب إلى القاع بسبب الجاذبية. إلا أنه عندما يترقَّق السطح تبدأ جُزيئات المنظف على السطح الداخلي في طرد جزيئات المنظف على السطح الخارجي، ويتباطأ الترقُّق أو يتوقَّف. ورغم ذلك، يكون الجدار رقيقًا لدرجةٍ كافية كي يتمزَّق الغشاء بسبب التبخُّر، أو الاضطرابات العرضية أو لانتشار (مرور) الهواء في الغشاء.

ويجعل الجلسرين فقاعة الصابون مُستقرة؛ لأنَّ لُزوجَتَه العالية (الاحتكاك الداخلي) تُبطِّئ تسرُّب المياه إلى قاع الفقاعة. كما يُقلل أيضًا التبخُّر من الفقاعة.

أما في رغوة الجعة فإنَّ السائل على جدران الفقاعة يتسرَّب ببطءٍ ومِن ثَمَّ تترقَّق الجدران حتى انفجار الفقاعة. إلا أن التسرُّب يتباطأ بسبب انجذاب جزيئات مُعينة بعضها إلى بعض، وإلى السائل أيضًا. لا يُستخدَم هذا الاستقرار في المشروبات الغازية الأخرى التي يكون من غير المرغوب فيه وجود رغوة عالقة. لكن من المُمكن التخلُّص من رغوة الجعة على نحوٍ شِبه فوري عند إضافة الزيت، مثلما يُمكن أن يحدُث إذا كان الشخص يحتسي الجعة أثناء تناول الأطعمة المقليَّة أو أثناء وضع أحمر الشفاه؛ فالزيت يُقلِّل التوتُّر السطحي عندما يلامس الفقاعة، بينما يُمزِّق السائل المُحيط الفقاعة.

وتترقق أجزاء من جدران الفقاعات أيضًا بسبب امتصاص السائل عند الوصلات المُنحنية التي تلتقي عندها الفقاعات، ويُطلَق على هذه المناطق «حدود بلاتوه» نسبةً إلى العالم البلجيكي جوزيف أنطوان فرديناند بلاتوه الذي عاش في القرن التاسع عشر. وضغط السائل يُحدِّده انحناء السطح الناتج عن التوتُّر السطحي؛ فنجد أن الانحناء الكبير يعني ضغطًا أقلَّ على جدران السائل. ولذلك فإن ضغط السائل يكون أقلَّ عند حدود بلاتوه المُنحنية مقارنةً بالجدران الأكثر تسطحًا. ومِن ثَمَّ، ينسحب السائل من أجزاء الجدران المُسطَّحة القريبة إلى حدود بلاتوه، فتتحوَّل «الرغوة الرطبة» إلى «رغوة جافة».

وتُساعد البروتينات المُتجمِّعة على جدران الفقاعات في استقرار رغوة الجعة لسببَين على الأقل: (١) إنها تزيد من اللُّزوجة ومِن ثَمَّ تُقلِّل التسرُّب. (٢) إنها تميل أيضًا إلى منع اقتراب جانبَي الجدار قربًا كافيًا بحيث يتمزَّق الجدار بسبب الاضطراب العرضي، ممَّا يسمح بـ «التحام» الفقاقيع (اندماجها).

حتى إذا كانت الجدران مُستقرة فسوف تتغيَّر رغوة الجعة تدريجيًّا نظرًا لانتشار (مرور) ثاني أكسيد الكربون في الفقاعة عبْر الجدران. ونتيجة لذلك تفقد الفقاعات الموجودة على سطح الرغوة الغاز الموجود بها وتتقلص. تتقلص الفقاعات الأصغر على نحوٍ أسرع؛ لأنها شديدة الانحناء؛ ومِن ثمَّ فإن التوتُّر السطحي عند جدرانها يضغط على الغاز بداخلها على نحوٍ أشد مقارنةً بالفقاعات الأكبر حجمًا. وتتقلص أيضًا الفقاعات الأصغر حجمًا؛ لأن الضغط يجعل ثاني أكسيد الكربون ينتشر في الفقاعات الأكبر حجمًا حيث الضغط الأقل بسبب الانحناء الأقل. ومِن ثَمَّ، تكبر الفقاعات الأكبر على حساب الفقاعات الأصغر المجاورة.

من طُرق إبطاء انتشار الرغوة والحفاظ عليها استخدام غاز النيتروجين في الجعة بدلًا من غاز ثاني أكسيد الكربون. إن غاز النيتروجين ينتشر في جدران السائل بمُعدل أبطأ. ورغم ذلك، فنظرًا لأن رغوة الجعة المُضاف إليها النيتروجين أكثر استقرارًا، فإن صبَّ الجعة دون أن تفيض الرغوة الكثيفة من الكأس يتطلَّب الصبر. على سبيل المثال، تشتهر جعة جينيس بأنها تحتاج إلى وقتٍ طويل للصبِّ بسبب احتوائها على النيتروجين.

ويُعدُّ تبريد كأس الشراب طريقة أخرى لإبطاء انتشار الرغوة. وفي هذه الحالة، نظرًا لتكوُّن الفقاعات على جدار الكأس فإنها ستحتوي على غاز أكثر برودةً عندما تتَّحِد مع الرغوة الموجودة في القمة. ويعمل انخفاض الحرارة على إبطاء مُعدَّل انتشار جزيئات الغاز في جدران السائل.

وأحيانًا تتعرَّض قمَّة الرغوة في كأس الجعة إلى خسارة مُفاجئة في الفقاعات، وتُعرَف هذه العملية باسم «الانفجار المُتسلسل». فالفقاعات في القمَّة تكون قد جفَّت على الأقل ومِن ثَمَّ تصبح هشة. وعندما تتمزَّق إحدى هذه الفقاعات، تُحفِّز اهتزازات الرغوة أو الهواء بقيَّة الفقاعات على التمزُّق.

والشخص الخبير في جعة جينيس يعرف الطريقة الصحيحة لصبِّها من الزجاجة، التي تتمثَّل في قلب الزجاجة فجأةً داخل الكأس. بطبيعة الحال تُصبح الجعة غير مُستقرة وتبدأ في التدفُّق للخارج. ورغم ذلك، فالتدفُّق يتذبذب في عملية تُعرَف باسم «الخرخرة»، فتخرج الجعة في دفعاتٍ من أحد جوانب فتحة الزجاجة، ويتدفَّق الهواء للداخل في صورة دفعات من الجانب الآخر. وإذا وضعت فتحة الزجاجة على الرغوة المُتكوِّنة أعلى السائل المُصبوب فسوف تُصبح محبوسة في الهواء المُتدفِّق للداخل وتُسحَب إلى الزجاجة. وفي النهاية ستُصبح الكأس مملوءةً بالجعة وتصبح الزجاجة مملوءة بالرغوة.

(٧٨) الفقاعات المُنفجرة

عندما تنفجِر فقاعة على سطح سائل مثل الماء لماذا تنثُر قطرات ماء صغيرة في الهواء؟ عندما تنفجر فقاعة في طبقة فقاعات الشامبانيا لماذا تُكوِّن الفقاعات المجاورة تشكيلًا يُشبِه الوردة كما لو كانت تلك الفقاعات بتَلاتها؟

تستطيع فقاعة الصابون المنفوخة من حلقة بلاستيكية أن تُحلِّق في الهواء لبضع ثوانٍ قبل انفجارها، فهل تختفي على الفور؟ وأين تذهب كل جزيئات الصابون والماء؟

الجواب: تنفجر الفقاعة الموجودة على سطح السائل نظرًا لأن السائل الموجود في الطبقة الرقيقة المُكوِّنة لسطحها العلوي يتسرَّب إلى أن تتمزَّق. وعندما يفتح التمزُّق سطح الفقاعة العلوي كله، تنسحب جوانب الفقاعة إلى قاعها من خلال التوتُّر السطحي؛ أي الانجذاب المُتبادل بين الجزيئات على جدار الفقاعة. يصطدم السائل النازل من جدران الفقاعة المُتقابلة بالقاع ويندفع لأعلى مُكوِّنًا «نافورة» (عمودًا من الماء). وتكون هذه النافورة غير مُستقرة وسرعان ما يثقُبها التوتُّر السطحي ويُحوِّلها إلى قطرات، وهي تلك القطرات التي تتناثر في الهواء من الفقاعة المنفجرة.

وإذا انفجرت الفقاعة على السطح العلوي للشامبانيا أثناء احتسائها فإن النوافير والقطرات الصغيرة تُطلِق روائح تصل إلى داخل الأنف فتعزز متعة احتساء الشامبانيا.

وإذا كانت الفقاعة المنفجرة مُحاطة بفقاعات أخرى فإن التدفُّق لأسفل أثناء الانفجار يمتصُّ الفقاعات المُحيطة نحوها ويُمدِّدها في صورة أشكال تُشبِه أوراق الوردة النامية للخارج من نقطة الانفجار المركزية.

وفقاعة الصابون الطافية في الهواء سوف تنفجر عندما تتمزَّق عند نقطة مُعينة على سطحها. يتمدَّد المزْق في صورة دائرة، وتجمع حافة الدائرة السائل في طريقها أثناء تحرُّكها عبْر بقية الغشاء بسرعة ١٠ أمتار تقريبًا في الثانية، وهو معدل أسرع من أن تلاحظه. وتستمر الحافة في إلقاء القطرات (آلاف القطرات في مجموعها) حتى تصل إلى الجهة المقابلة بالضبط لنقطة التمزُّق الأصلية في الفقاعة.

(٧٩) الحيتان وشبَكات الفقاقيع

لماذا تُطلِق أنواع عديدة من الحيتان الهواء لتُكوِّن فقاقيع أثناء البحث عن طعام مثل الكريل؟

الجواب: من الواضح أن الحيتان تستطيع الإيقاع بفرائسها في شباك (أو ستائر) من الفقاقيع. وتستطيع الفرائس بالطبع السباحة ببساطة عبر شبكة الفقاعات لكنها تتردَّد في فعل ذلك عندما تكون في مجموعة كبيرة. ومِن ثَمَّ، فمن خلال إنشاء شبكة فقاعات حول مجموعة من الأسماك أو تحتها، يستطيع الحوت حشْد الأسماك في منطقة صغيرة حيث يستطيع أن يأكلها فيها بكفاءة لاحقًا. ولا يبدو أنَّ الأسماك تستجيب بصريًّا لشبكة الفقاعات؛ لأن التربُّص والحشْد يمكن أن يحدُث ليلًا. بل يبدو أنَّ الأسماك تستجيب للضوضاء الصادرة عن اهتزاز الفقاعات في الشبكة.

(٨٠) الحشرات المُهروِلة على الماء

كيف تتمكن الحشرة المهرولة على الماء من الاستقرار على الماء أو التحرُّك فوق سطحه؟ لماذا تُولِّد الحركة موجاتٍ أمام الحشرة وخلفها؟ لا تُصدِر الحشرة المهرولة على الماء ضوضاء وتقبَع على الفور فوق الماء، فكيف تستطيع أن تُخبر الحشرات المهرولة الأخرى أنها تريد رفاقًا أو تُشير إلى منافسي رفاقها بضرورة الابتعاد؟

الجواب: عندما تقف الحشرة المهرولة على الماء يكون ثقلها مُحمَّلًا في الأساس على الأرجل الوسطى والخلفية، ممَّا يُسبب تجويفًا أو حفرة على سطح الماء. لا تكسر هذه الحشرات سطح الماء بسبب التوتُّر السطحي للماء؛ أي الانجذاب المتبادل بين جزيئات الماء الذي يجعل سطح الماء يعمل كغشاءٍ مطاطي. بل يمكن أن تضغط الحشرة المهرولة على الماء بقوة على سطح الماء في المرحلة الأولى من القفزة دون أن تكسِر السطح. وإذا كان الماء ضحلًا وكانت الحشرة ساطعة الإضاءة في ضوء الشمس، فإن هذه التجاويف تنتج ظلالًا بيضاوية عند قاع الماء. وتكون هذه المناطق خافتة؛ لأنه في أثناء مرور أشعة الضوء خلال أسطح التجاويف المنحنية، فإنها تنثني نحو أحد الجوانب.

وبطبيعة الحال لو كانت الحشرات المهرولة على الماء كبيرة الحجم لغرقَتْ في الماء ولأصبح اسمها الحشرات الغارقة في الماء. وتعود قدرة سطح الماء على تحمُّل حشرة مهرولة في الماء عادية (خفيفة الوزن) إلى مقاومة الجزء الذي يلمس الماء في كل قدم (الرسغ) للماء، فالرسغ «لا يبتل». ولو كان الرسغ يبتل بسهولة لتمكن الماء من تسلق الرِّجل ولغرقت الحشرة. ومن الأمور المانعة للبَلَل إفراز شمعٍ يُغطي الرسغ مما يجعله «كارهًا للماء». إلا أن السبب الرئيسي لعدَم غرق الحشرة هو التركيبة المجهرية للرسغ؛ فهو مُغطًّى بشعيرات دقيقة (هلبانات دقيقة) عليها أخاديد صغيرة. والسطح الكاره للماء

الذي يبدو خشنًا أسفل المجهر فعَّال جدًّا في عدم السماح للماء بتغطية الأرجل. وبدونه ستظلُّ الحشرة المهرولة على الماء قادرة على الوقوف على الماء، لكنها لن تتمكن أبدًا من الجري أو القفز وسيكون من السهل أن تُصبح وجبةً خفيفة لبعض الحيوانات.

تجري الحشرة المُهرولة على الماء عن طريق التجديف بالأرجل الوسطى والخلفية. ويأتي الدفع في الأساس بالأرجل الوسطى التي تعمل كمجاديف. ومع اندفاع الرجل للخلف فإنها تولِّد في الماء أنبوبة دوامية على شكل منحنًى مفتوح لأعلى شبيه بالحرف U. وقِمَّتا المنحنى المفتوح لأعلى على سطح الماء دوامتان مُتقاربتا المسافة تدوران في اتجاهَين مُتعاكسَين؛ وتتَّصِل هاتان القمتان بجسم المنحنى أسفل سطح الماء. ونظرًا لأن جزءًا من حركة الماء في الأنبوبة الدوامية مُتَّجه نحو الخلف، تندفع الحشرة إلى الأمام. والمجموعة البحثية التي اكتشفت خاصية التجديف عن طريق إنتاج الدوَّامات صمَّمَت حشرة مهرولة على الماء ميكانيكية (أسمتها الروبوت المهرول)، وتتكوَّن هذه الحشرة من أرجُلٍ من السلك الصلب وجسم نُحاسي، وتتحرَّك عن طريق خَيطٍ مرِنٍ على بكرة. وعندما يُجدِّف هذا الروبوت المهرول بأرجله فإنه ينطلق زَوج من الدوَّامات عند كل جانب مع كل ضربة للوراء. ولم يُعجِب ذلك الحشرات المهرولة على الماء القريبة منه.

وعادة ما يكون من الصعب رؤية الدوَّامات التي تنتجها الأرجل الوسطى. وخلف الحشرة نسبيًّا يُمكن أن تتحوَّل حركة الدوامة إلى موجة، لكن نظرًا لأن الأمواج ضحلة وطويلة الطول الموجي نسبيًّا يكون من الصعب أيضًا رؤيتها. أما الأمواج الأكثر وضوحًا فهي ذات الطول الموجي القصير التي تَصدُر أمام الحشرة. وتَستخدِم الحشرة هذه الأمواج المتجهة للأمام التي قد تكون واضحة أمام الحشرة على مسافةٍ تعادل ستة أو سبعة أمثال طول جسمها، لتحديد الفرائس أو العقبات أو الحشرات الأخرى أثناء اندفاعها وسَيرها على نحوٍ مُتعرِّج على سطح الماء. (راقب الحشرات لفترةٍ وستجِد أنها لا تتصادم أبدًا على الرغم من تحرُّكاتها المجنونة.)

تتواصل الحشرات المُهرولة على الماء فيما بينها عن طريق ضرب سطح الماء لإرسال موجات بمدى تردُّدٍ عالٍ نسبيًّا وبمعدَّل ٢٠ مرة تقريبًا في الثانية. وإذا سقطت نملة في الماء وبدأت تترنَّح مُولِّدة موجات فإن الحشرات المهرولة على الماء الموجودة في المنطقة تعترض الموجات ثم تندفع مباشرةً إلى النملة بسرعة مُذهلة كي تتغذَّى عليها.

وتتجنَّب الحشرات المهرولة على الماء أجزاء سطح الماء المُغطَّاة بطبقةٍ رقيقة من الملوثات مثل المواد الزيتية؛ لأنها لا تستطيع الانزلاق على هذه المادة أو إرسال إشاراتها الموجية عبرها. وإذا وقعتْ صدفةً في إحدى هذه المناطق فلا يمكنها الهروب إلا بالقفز.

(٨١) تكوُّن حبيبات على القضبان وخيوط اللُّعاب

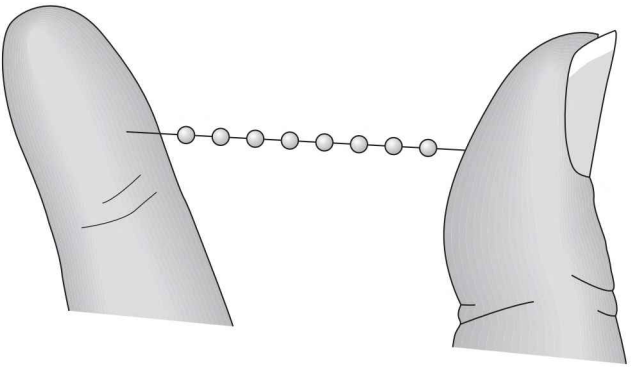
بعيدًا عن مُراقبة الناظرين، أطبِق الإبهام والسبَّابة معًا وأدخلهما في فمك واسحب بعض اللعاب الموجود بجوار الخد. ثم ضع اللُّعاب قريبًا من عينَيك على نحوٍ كافٍ وأبعد الإبهام والسبَّابة إحداهما عن الأخرى تدريجيًّا بحيث يمتدُّ بينهما خيط من اللعاب. في أثناء هذا الانفصال، لماذا يُكَوِّن الخيط فجأةً حبيباتٍ من اللعاب (انظر شكل ٢-٢٥)؟

اغمس قضيبًا رفيعًا (أو أحد الألياف) في فنجان من الزيت أو العسل ثم اسحبْه لأعلى رأسيًّا. في أثناء تدفُّق المائع لأسفل القضيب، لماذا يُكَوِّن حبيبات؟ ولماذا تبدو إحدى الحبيبات مُسيطرةً ومُستحوذةً على الحبيبات الأصغر التي تسير في طريقها؟ ولماذا يتكوَّن المزيد من الحبيبات بعد مرور الحبيبة الكبيرة المُستحوذة على بقية الحبيبات؟

الجواب: يُحاول التوتُّر السطحي في خيط اللعاب (أي الانجذاب المتبادل بين الجزيئات) تقليل سطح الخيط. عندما يكون قُطر الخيط متوسطًا في المرحلة الأولى من التمدُّد، يكون الحد الأدنى من منطقة السطح مُساويًا لمنطقة سطح الأسطوانة؛ ومِن ثمَّ يكون الخَيط أسطوانيًّا. والأمواج الناتجة عن الاضطراب العرضي، المُتمثِّل في اهتزاز اليد الخفيف الذي لا مفرَّ منه، تنتشر في الخيط وتُشوِّه شكله الأسطواني، لكن التوتُّر السطحي سرعان ما يستعيد شكل الخيط.

إلَّا أن مُحيط الخيط يقلُّ مع تباعد الإبهام والسبابة، وفي النهاية يصبح الخيط غير مستقِرٍّ أمام الموجات ذات الطول الموجي الذي يفوق مُحيط الخيط. والسبب في ذلك أن التشوُّه الناتج عن مثل هذه المَوجة يُقلِّل فعليًّا منطقة السطح الكلية؛ ومِن ثمَّ يعزز التوتُّر السطحي التشوُّه بمجرَّد حدوثه بدلًا من إيقافه. يُحول التوتر السطحي الأجزاء التي تُصبح أكثر عرضًا إلى حبيبات، بينما الأجزاء التي تصبح ضيقة تترقَّق لتصبح الخيط الرفيع الموجود بين الحبيبات. كما أن المسافة بين الحبيبات تعمل على تقارُب الطول الموجي للموجة مما يسبب الانتقال. (إذا كانت الحبيبات الأكبر يفصل بينها حبيبات أصغر، فعلى الأرجح حدثت عملية تكوُّن الحبيبات أكثر من مرة، باستخدام طول موجي مختلف في كل مرة.) ومن المُمكن أن يكون الخيط الصغير الموجود بين الحبيبات أصغرَ من أن يُرى.

وبالمِثل فإن الطبقة الرقيقة من المائع على القضيب (أو الليف) تكون غير مُستقرة، والاضطرابات العرضية والتوتُّر السطحي سوف يُعيدان تشكيل الطبقة في شكل حبيبات. وإذا كان القضيب رأسيًّا، فمن المُمكن أن تتدفَّق الحبيبات إلى الأسفل، لا سيما الكبيرة



شكل ٢-٢٥: بند ٢-٨١: حبيبات ظاهرة على خيط من اللعاب مُمتد بين الإبهام والسبابة.

منها. وسوف تندمج الحبيبات الأصغر في طريقها مع الحبيبة الكبيرة، لكن بعد مرور الحبيبة الكبيرة من المُمكن أن تنقسِم أيضًا الطبقة الرقيقة المُتبقية إلى حبيبات. أما إذا كانت الطبقة شديدة الرقة، فإن التدفُّق لأسفل يمنع الحبيبات من التكوُّن.

تستخدم بعض العناكب المَيل إلى تكوين الحبيبات عند نسْج شباكها؛ فبعد بناء الشبكة الأساسية، تُغطِّي العناكب «خيوط الأسْر» المنوط بها أسْر الحشرات بسائل يتحوَّل فورًا إلى حبيبات على الخيوط. وهذه الحبيبات الزلِقة يمكن أن تأسِر الذبابة لفترة كافية تسمح للعنكبوت بالوصول إليها بعد أن يكتشف ضربات الذبابة عن طريق اهتزازات الشبكة.

وتظهر ظاهرة التحبُّب أيضًا في لحام الصلب. فإذا سار مصدر الحرارة على الصلب ضمن نطاق سرعاتٍ مُحدَّد، فستبقى سلسلة من «الحدبات» (أو البروزات) المُتعقِّبة عندما تتجمَّد بُقعة السائل المُتعقِّبة. وعندما يتجاوز مصدر الحرارة نقطة من الصلب المصهور يمكن أن يُكَوِّن التوتُّر السطحي لهذا السائل حبَّةً قبل أن تتجمَّد. وإذا سار مصدر الحرارة ببطء شديد أو بسرعة شديدة، فلن تتكون الحدبات.

(٨٢) حصد المطر بواسطة سحالي الصحراء

بعض السحالي الصحراوية بارعة جدًّا في الحصول على ماء الشُّرب في المناسبات النادرة التي قد يتكوَّن فيها النَّدى أو قد يسقُط فيها المطر (ومن هنا جاء مصطلح «حصد المطر»).

على سبيل المثال، سحلية الشيطان الشائك الأسترالية تحصل على الماء من الندى بالجلوس عليه، وتحصل على الماء أيضًا من المطر الخفيف بالوقوف مُباعِدة بين اليدَين والقدمَين في ماء المطر. كيف يُمكِّن أحد هذَين الإجراءَين السحلية من الحصول على شربة ماء؟

الجواب: تمتصُّ السحلية الماء مثل إسفنجة المطبخ. والمسافات (القنوات) الموجودة بين قشور الجلد تسحَب الماء عن طريق الخاصية الشَّعرية (أي عن طريق قوى الجذب بين جزيئات الماء وبين جزيئات الماء والجزيئات الموجودة في المسام). وتمتاز هذه العملية بالكفاءة العالية حتى إنَّ الماء يُسحَب عاليًا في الجلد حتى قمَّة رأس السحلية.

ولكي تشرب السحلية الماء تقوم بحركاتٍ صغيرة مُتكرِّرة بفكِّها السُّفلي فتزيل الماء من القنوات القريبة من الفم. وأثناء شُرب السحلية يُعَوَّض الماء في تلك القنوات بالماء المسحوب من بقية الجلد. ويُمكن أيضًا أن تساعد الجاذبية في انتقال الماء إلى الفم إذا وقفت السحلية خافِضةً الرأس ورافعة المُؤخِّرة.

(٨٣) حصد الفرائس على يدِ الطيور الشاطئية

انثُر القليل من حُبيبات الفلين في ماءٍ في حوضٍ واسع ثم حاوِل أن تلتقط واحدة من الحبيبات بإمساكها بالإبهام وإصبع. على الأرجح سيتسبَّب قفل الإبهام والإصبع في الماء في دفع الماء وقطعة الفلِّين بعيدًا عنك. والآن تأمَّل طائرًا شاطئيًّا يتعيَّن عليه أن يصيد العوالق (وهي صغيرة) من الماء بمِنقاره. ألا يُواجه المشكلة نفسها التي تواجهها في إمساك قطع الفلين؟

الجواب: تستخدم بعض الطيور الشاطئية التوتُّر السطحي للإمساك بفرائسها من العوالق. بعض هذه الطيور البحرية تُغطِّس مِنقارها في الماء وفكُّها شِبه مُغلَق ثم تفتح فكَّها قليلًا. وعندما تسحَب منقارها خارج الماء، تتوسَّط قطرة ماء جانبَي المنقار عن طريق التوتُّر السطحي؛ أي عن طريق قوى الجذْب بين الماء وداخل المنقار. وتنحصر الفريسة في قطرة الماء. ولِنَقْل القطرة عاليًا إلى الزَّوْر كي يُمكن هضمها يمدُّ الطائر تدريجيًّا جانبَي منقاره. وتستمر القطرة في التعلق بالجانب العلوي والجانب السفلي من المنقار، لكن افتراق الجانبَين يجعل القطرة تتمدَّد. ولمقاومة ذلك، يسحب التوتُّر السطحي القطرة عاليًا حيث يكون الجانبان أكثر اقترابًا. وتستمرُّ هذه العملية حتى تصِل القطرة إلى البلعوم حيث يُمكن ابتلاع الفريسة الأسيرة.

(٨٤) القطرات والأغشية السائلة على الأسطح الصلبة

لماذا تتمدَّد بعض السوائل على سطحٍ صلب مثل السطح العلوي الزجاجي للطاولة، بينما تكوِّن سوائل أخرى حُبيبات؟ لماذا تستطيع بعض القطرات التعلُّق بالسطح ولو كان مائلًا أو كانت القطرة تتدلَّى منه؟

عند تسرُّب طبقة من أحد السوائل على سطحٍ ذي انحدار مُعتدل، لماذا عادةً تصبح الحافة السفلية مُنحنية أو تتقدَّم في صورة تدفُّقات وبُقَع؟ يمكنك عادةً ملاحظة هذا الأثر عند استخدام مَسَّاحةٍ من المطَّاط لإزالة الماء والصابون أو سائل تنظيف الزجاج من زجاج السيارة الأمامي المائل. ادفع لأسفل ثم تَوقَّف قبل الوصول للنهاية. لماذا يتفرَّق السائل على هيئة أصابع تندفِع لأسفل الزجاج الأمامي؟

عندما ينساب ماء المطر لأسفل حائط خرساني رأسي كما هي الحال في المباني العامَّة، لماذا يكون تقدُّم الماء غير مُتساوٍ عادةً؟ وعندما يتسرَّب الماء تدريجيًّا إلى الكهف لماذا يميل عادةً إلى تكوين نوازل كهوف مخروطية الشكل؟

الجواب: يعتمِد مدى انتشار السائل على سطحٍ صُلب أفقي على التجاذُب بين الجزيئات في السائل والجزيئات في السطح الصلب. إذا كان التجاذُب قويًّا فإن السائل ينتشر ويُقال إنه «يُبلل» السطح، وفي حالة وجود تجاذُب قليل فإن السائل يميل إلى تكوين الحبيبات. وغالبًا ما يُوصَف مدى البلل (أو التحبُّب) من حيث الزاوية التي يكونها السائل مع السطح الصُّلب (أي «زاوية التماس»)؛ بحيث تدلُّ الزاوية الصغيرة على البلل وتدلُّ الزاوية الكبيرة على التحبُّب. رغم ذلك، فإن زاوية التَّماس غامضة؛ لأنه في الموقف الواقعي (عند وجود سائل حقيقي على سطح حقيقي مُعقَّد مجهريًّا) من المُمكن أن تكون في نطاق قِيَمٍ كبير نسبيًّا.

وما زالت تفاصيل كيفية انتشار السائل على السطح الصُّلب غير مفهومة بالكامل؛ لأنها تتضمَّن تفاعلات ذريَّة على حافة السائل. وفي كثير من الحالات تتحرك الحافة فقط بسبب انتشار «غشاء سابق» شديد الرقَّة أمام الحافة على نحوٍ طفيف. ثم تجذب الجزيئات في الغشاء السائل الجزيئات الموجودة في الحافة، دافعةً الحافة للأمام. وفي بعض الأحيان تصبح الحافة ثابتة (عالقة) بسبب تشوُّهٍ في السطح أو نقطة تجاذُب قوي. وإذا بدأت القطرة في التبخُّر فإن الحافة الأمامية تميل إلى التقلص، لكن يمكن أن تُصبح ثابتة مرة أخرى عند نقاطٍ مُعينة، مما يجعل التقلص (يُطلق عليه «إزالة التبلل») غيرَ مُتساوٍ.

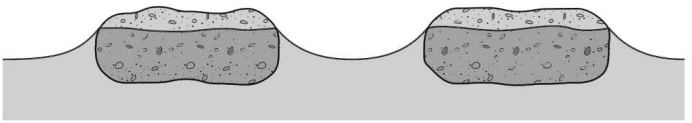
وتتَّسِم بعض السوائل اللَّزِجة مثل الزيوت والجليسرين بطريقة انتشارٍ غريبة على السطح المائل لأسفل؛ حيث سرعان ما ينقسِم خطُّ التقدُّم إلى أصابع بينها مسافات مُتساوية، ثم تنسال الأصابع لأسفل السطح على نحوٍ أسرع من بقية المناطق الفاصلة بينها. وتتكوَّن الأصابع لعدم ثبات خطِّ التقدُّم ولأن الاضطرابات العرضية تُشكِّل موجاتٍ على امتدادها. تسيطر إحدى هذه الموجات على خطِّ التقدُّم، فتخلق تدفُّقات قوية لأسفل ذات فواصل مُنتظمة المسافات على طول الخط.

إذا سال غشاء سائل على منحدر فإن نقطة الثبات تُعيق تقدُّم الغشاء المُوحَّد تاركةً منطقة جافة أسفل تلك النقطة. يمكن أن ترى نتائج الثبات وعدم الاستقرار عند استخدام مَسَّاحة مطاطية لإزالة الماء والصابون من على زجاج السيارة الأمامي. عندما ينزل المطر على جدارٍ خرساني رأسي فإن الحافة الأمامية لا تتقدم عادةً على نحوٍ مُوحَّد صوب الأرض؛ فبعض المناطق تسمح للماء بالنزول على نحوٍ أسرع من المناطق الأخرى، وزيادة التسرُّب تلك في منطقة واحدة يمكن أن يرسل «إصبعًا» عريضة من الماء لأسفل الحائط وإلى أحد الجانبَين.

تتكوَّن هوابط الكهوف من كربونات الكالسيوم الذي يترسَّب من الماء المُتسرِّب إلى الكهف. إذا بدأ الترسيب في نقطة في سقف الكهف، فإن الماء يَميل إلى التسرُّب إلى قاع النتوء المُتكوِّن. ونظرًا لأن طبقة الماء تكون أكثر سُمكًا عند النقطة السُّفلى، فإن الترسيب يكون في أعلى مُستوياته هناك، ممَّا يجعل طول النتوء يزداد على نحوٍ أسرع من العرض، ومن ثَمَّ ينتج الشكل العام المُرتبط لدَينا بهابط الكهف المثالي. أما إذا كان مُعدَّل تسرُّب الماء بطيئًا نسبيًّا مقارنةً بمعدَّل الترسيب، فمن الممكن أن تتكوَّن أشكال أخرى مثل القضبان والتراكيب المُلتوية الجميلة التي يُطلَق عليها «هلكتيت» وتعني الهوابط غير المنتظمة.

(٨٥) تجاذُب حبوب الفطور

إذا طفَتْ حبَّتان بيضاويَّتان، من حبوب الفطور المعروف باسم العلامة التجارية تشيريوز، مُتقاربتان في طبَقٍ من اللبن فلماذا تتجاذبان؟ وإذا تركت الكثير من الحبوب البيضاوية طافية في اللَّبَن في أماكن عشوائية، فلماذا تميل إلى التجمُّع خلال دقائق قليلة؟ لماذا تتجمَّع الحُبيبات البيضاوية أيضًا على جوانب الطبق؟ وتُعرَف هذه التأثيرات المختلفة في مُجملها باسم «تأثير تشيريوز».



شكل ٢-٢٦: بند ٢-٨٥: حبَّتان بيضاويتان من حبوب الفطور طافيتان في اللبن.

الجواب: بجوار الشكل البيضاوي ينحني سطح اللبن لأعلى بسبب التوتر السطحي (انظر شكل ٢-٢٦)؛ أي إن انجذاب الماء في اللبن لجوانب الشكل البيضاوي يكفي لسحْب الماء أعلى الشكل البيضاوي، على الرغم من السحْب لأسفل بفعل قوة الجاذبية. وإذا اقترب شكلان بيضاويان أحدهما من الآخر فإن السطح بينهما يُصبح شديد الانحناء، ممَّا يضع قوةً على كلِّ شكلٍ منهما فيتجاذبان. ويمكن أيضًا شرح التجاذب في ضوء الطاقة؛ فالسطح المُنحني يتطلَّب مزيدًا من الطاقة؛ ومِن ثَمَّ يتقارَبُ الشكلان البيضاويان لتسطيح السطح الموجود بينهما؛ ومِن ثَمَّ تقلُّ الطاقة.

وسطح السائل القريب من جدار الطبق مُقوَّس أيضًا لأعلى بفعل التوتُّر السطحي، ولذلك عندما يقترب شكلٌ بيضاوي من الجدار، فإن السطح الوسيط يُصبح شديد الانحناء. ومِن ثَمَّ، تسحَب القوة الشكل البيضاوي إلى الجدار. وإذا ملأتَ الطبق تمامًا باللبن ثم أضفتَ المزيد كي يكون سطح اللبن أعلى نسبيًّا من حافة الطبق، فإنَّ سطح السائل بالقُرب من الحافة سينحني لأسفل. وعلى هذا النحو فإن الشكل البيضاوي الذي يقترِب من الحافة يدفع بعيدًا عنها. وهذه الفيزياء هي أساس أحد تحدِّيات الحَوض الشائعة المُتعلِّقة بطفو أحد الأشياء في كوب من الماء؛ حيث يُطرح هذا السؤال: هل يمكنك منع الشيء الطافي من البقاء بالقُرب من جدار الكوب في نهاية المطاف؟

ويُمكن لشفرة موسى مُسطَّحة مزدوجة الحافة أن تطفو في الماء إذا وُضعَت في الماء بحرص. وعلى النقيض من حبوب الفطور البيضاوية، فإن شفرة الموسى تطفو أسفل مستوى الماء نسبيًّا، ومِن ثَمَّ ينحني سطح الماء لأسفل ليُقابل الشفرة. رغم ذلك، إذا طفت شفرتا حلاقة مُتقاربتان فإنَّ التوتُّر السطحي يجعلهما تتجاذبان بحيث يُصبح السطح الوسيط مُسطحًا وتقلُّ الطاقة.

وفي العموم، يُطلَق على المادة «أليفة للماء» (أي في العموم «مُحبَّة للماء») إذا كان الماء ينجذب لها، ويُطلَق عليها «دَفوع للماء» (أي في العموم «كارهة للماء») إذا كان الماء لا ينجذِب لها. وعند طفو شيئَين أليفَي الماء فإنهما سوف ينجذبان ولو على مسافة كبيرة، وسوف يتجاذَب الشيئان كارها الماء أيضًا. إلَّا أن الشيء المُحبَّ للماء والشيء الكاره للماء سوف يتنافران؛ لأنه إذا اقتربا فسوف يزيد انحناء سطح الماء، وهذا يتطلَّب طاقة.

(٨٦) قلاع الرمال

ما الذي يجعل قلعة الرمال مُتماسكة؟ إن كوم الرمال في صندوق اللعب بالرمل الموجود في الملعب لا يُمكن أن يكون شديد الانحدار ولا يمكن تشكيل الرمال إلا في صورة تل، ورغم ذلك فإنَّ الجدار في قلعة الرمال يمكن أن يكون رأسيًّا. ويمكن أن يكون لَمعالم القلعة، ومنها الأبراج، أركان حادة. بالإضافة إلى ذلك، فإن كثيرًا من التشكيلات الرملية التي تكونت بطريقة طبيعية، ويُطلَق عليها «منحدرات»، يكون لها جدران شِبه رأسية. فما الذي يسمح بوجود الجدران الرأسية؟

الجواب: الرمال الجافة ليست مُتماسكة نظرًا لعدم وجود قوة بين حُبيبات الرمال تجعلها متماسكة. والرمال المغمورة بالماء ليست متماسكة؛ لأن الماء يُمكن أن يتسرَّب بسهولةٍ بين الحبيبات فيجعل الرمال مائعة. رغم ذلك، فإنَّ الرمال المُبللة نسبيًّا يمكن أن تكون مُتماسكة تمامًا؛ فالماء ينجذب إلى حبيبات الرمال ويُقال إنه «يبلل» الحبيبات. وعند وجود كمية قليلة من الماء بين حبتَيْ رمل متجاورتَين، يتعلق الماء بكل حبة بتكوين «جسر سائل» بينهما. ويتَّخذ الجسر شكلًا يُشبه تقريبًا الساعة الرملية؛ فيتمدَّد الماء في كل حبَّة ويكون للجسر وسط ضيق بين الحبوب. ونظرًا لأن الماء ساكن نسبيًّا فإنه لا يتدفَّق بعيدًا عن الحبيبات أو يتسرَّب ببساطة بسبب قوة الجاذبية. ويعمل الماء كقوة تماسُك بين الحبيبات لسببَين: (١) يجذِب الماء حبيبات الرمل وجزيئات الماء، ويُعرَف هذا التأثير بالتوتُّر السطحي. (٢) نظرًا لاحتواء الجسر على أسطح مُنحنية مُقعَّرة في الخارج، فإن ضغط الماء داخل الجسر يكون أقلَّ من ضغط الهواء داخله، ولذلك تُمتصُّ حبيبات الرمال نحو الضغط الأكثر انخفاضًا.

إذا أصبحت الرمال مُشبَّعة بالماء فلا تعود الحبيبات مُتماسكة بفعل جسور الماء المُستقلة الثابتة، بل تُصبح زلِقة بفعل الماء لدرجة أنها تنهار. يرش صانعو القلاع الرملية المُتمرِّسون أبنِيَتهم بالماء بحيث ينجذِب الماء إلى الأسطح لتكوين جسور ماء مُستقلة. وإذا

تركت القلعة الرملية لتجف، فإن الأسطح الخارجية تفقد هذه الجسور المائية بسبب التبخُّر وسرعان ما تنهار.

وإن رمال الشواطئ المُبتلَّة أكثر تماسُكًا من الرمال النقية (السيليكا)؛ لأنها تحتوي على جزيئات من الطين والمواد العضوية التي يُمكن أن تُؤسِّس روابط كهربائية مع حبيبات الرمل. علاوة على ذلك، يمكن تغطية طبقة الرمال بقشرةٍ من الملح تضيف قوى ترابط إضافية بين الحبيبات. وفي منطقة زحف الموج حيث تغمُر مياه البحر الرمال بانتظام، تُثير المياه فقاقيع هواء في الرمال فتمنحها ملمسًا أكثر نعومة. وعلى هذا النحو، يُمكن أن تختلف «صلابة» الرمال اختلافًا ملحوظًا جدًّا كلَّما انتقلت من الرمال الجافة أعلى الشاطئ نزولًا إلى الرمال المُشبَّعة بالهواء والمُبلَّلة نسبيًّا، وصولًا إلى الرمال المنقوعة في الماء، وانتهاءً بالرمال المُشبَّعة بالماء والغائصة فيه.

(٨٧) مظهر القهوة الرديئة

إذا فحصتَ فنجان قهوة رديئة (مثل القهوة التي تبقى ساخنة لساعاتٍ طويلة الموجودة في مطاعم الدرجة الثانية) فستجد أن مظهر السطح يتغيَّر عند وضع الملعقة وإزالتها، فما السبب؟ فعندما تكون الملعقة بالخارج يفتقد السطح للَّمَعان، وهذا غير مُستحسَن. وعند وجود الملعقة تتكوَّن على السطح دوائر صغيرة لامعة، وإن كان هذا المنظر أقلَّ جاذبية أيضًا.

الجواب: عادةً ما يكون سبب سوء القهوة الرديئة وجود طبقة زيتية على السطح تُعطيه ذلك الانعكاس الباهت المُنفِّر. وهكذا يمكنك في الغالب أن تعرف من سطح القهوة إذا ما كانت زيتية أم لا. إذا وضعتَ الملعقة في الفنجان فستحمِل الملعقة مادة ستنتشر أعلى السطح، مُعتصرةً الزيت إلى قطرات. هذه القطرات ذات السطح المُقوَّس يمكن أن تكون انعكاسات صغيرة لأي مصابيح موجودة في السقف، ولذلك تصنع الكثير من الدوائر اللامعة. وعندما تزيل الملعقة تعود طبقة الزيت إلى التشكل وتختفي معظم الانعكاسات.

(٨٨) دموع الخمر وتغيُّر سطح السوائل الأخرى

في كأس تحتوي على مشروب كحولي قوي مثل الخمر أو الفودكا المنخفضة الكحول، لماذا تتكوَّن القطرات (التي يُطلَق عليها «دموع الخمور القوية») وتزداد وتنزلق لأسفل على جدار الكأس فوق سطح السائل (انظر شكل ٢-٢٧)؟

شكل ٢-٢٧: بند ٢-٨٨: تتكون دموع الخمر فوق سطح الخمر القوية.

الجواب: في المعتاد سوف يتسلَّق سطح الماء جدار كأس الشراب جزئيًّا لأن: (١) جزيئات الكأس تجذب جزيئات الماء (يُوجَد «التصاق» بين المادتين)، و(٢) جزيئات الماء تجذب بعضها بعضًا (يُوجَد «تماسك» داخل الماء)؛ لذلك فإن الماء المجاور مباشرةً لجدار الكأس ينجذب نسبيًّا أعلى الجدار عن طريق الالتصاق ليُكوِّن غشاء، ويجذب ذلك الماء المزيدَ من الماء عن طريق التماسك مكونًا سطحًا مقوسًا بالقُرب من الجدار.

ويتسلق غشاء الخمر السائل لارتفاع أعلى بسبب خاصية إضافية راجعة إلى الاختلاف في التوتُّر السطحي بين الغشاء المُتسلِّق والسائل الأساسي. تتجاذب الجزيئات الموجودة على سطح السائل، وتتجمع واضعةً السطح في حالة توتُّر بحيث نعزو «التوتر السطحي» إلى السطح. والتوتر السطحي في الماء كبير جدًّا لكنه صغير في الخليط المكون من الكحول والماء. وعندما تبدأ طبقة الكحول الممزوج بالماء في تسلق جدار الكأس، فإن الكحول يتبخَّر سريعًا تاركًا غشاءً مائيًّا أساسيًّا على الجدار. ونظرًا لأنَّ ذلك الماء تَوتُّره السطحي أكبر من التوتُّر السطحي لمزيج الكحول والماء الموجود في السائل الأساسي، فإن السائل الأساسي

ينجذب بقوةٍ لأعلى نحو الطبقة الموجودة على الجدار. ونظرًا لازدياد سُمك الطبقة، فمن الممكن أن تنجذب الحافة العلوية لمسافةٍ أعلى بسبب الالتصاق بالكأس؛ ومِن ثمَّ يتسلق الغشاء لارتفاعٍ أعلى ممَّا قد يرتفع له الماء وحده.

وإن قوة الجاذبية التي تسحَب الغشاء المُتسلِّق لأسفل تَحِدُّ من ارتفاع التسلُّق. ومع تبخُّر الكحول من الغشاء يميل التوتُّر السطحي في الماء المُتبقي إلى سحب الماء في صورة قطرات. تتعلَّق هذه القطرات في البداية بجدار الكأس بسبب الالتصاق لكنها في النهاية يزداد حجمها وتتحرَّر فجأة مندفعة لأسفل على جدار الكأس صوب السائل الأساسي. ويمكن تكوُّن هذه القطرات شريطة ألا يكون الشراب مُخفَّفًا للغاية أو قويًّا للغاية؛ فيجب أن يكون الشراب مزيجًا من الكحول والماء ليحدُث التلاعب بين القيم المختلفة للتوتر السطحي في السائل الأساسي والغشاء المُتسلق.

عندما يتحرك أحد الموائع بسبب اختلاف التوتر السطحي في منطقة عنه في منطقة أخرى يُطلَق على هذه الحركة مصطلح «تأثير مارانجوني» نسبةً إلى أول من درس هذا التأثير. ويمكن لتأثير مارانجوني تفسير سبب انتشار بعض القطرات على السطح الصلب انتشارًا واسعًا. ويمكن أن يسبق الانتشار المرئي طبقةٌ رقيقة جدًّا يكون فيها التبخُّر أسرع من بقية القطرة. وفي حالة دموع الخمر القوية، فإنه إذا أسفر التبخُّر في الطبقة الرفيعة عن زيادة التوتُّر السطحي في السائل المُتبقِّي في الطبقة، فسوف ينسحب السائل البديل إلى الطبقة قادمًا من بقية القطرة، ممَّا يجعل القطرة تتمدَّد على السطح.

(٨٩) أشكال الديدان في مشروب تيا ماريا

في الغالِب يُقدَّم مشروب تيا ماريا مُضافًا إليه عدة مليمترات من القشدة على السطح ويُشرَب بشفاطة. فلماذا عند ترك المشروب راكدًا لعدة دقائق تظهر حركة قوية ويُكوِّن السطح خلايا أو أشكالًا أنبوبية تُشبه الدِّيدان؟

الجواب: ينتشر الكحول (يمر ببطء) عبْر القشدة في منطقة واحدة أو أكثر فيقلل التوتُّر السطحي في القشدة بسبب الانجذاب المُتبادل بين الجزيئات على السطح. بعد ذلك يُسحَب السائل المُكوَّن من الكحول والقشدة (ذو التوتر السطحي الضعيف) عبْر السطح ليصِل إلى مناطق القشدة المُتبقية (التي لا يزال توتُّرها السطحي قويًّا). ويرتفع المزيد من

الكحول ليحلَّ محلَّ السائل المُزال، وهكذا. ولأسباب معقدة، يُسفِر وجود القشدة (لا سيما مقاومتها للحركة) عن أنماط دوران يعلو فيها السائل ويهبط، وهي التي يُمكن أن تتَّخِذ شكل خلايا مُنعزلة عندما تكون طبقة القشدة سميكة أو تبدو مثل لفائف أنبوبية شبيهة بالديدان عندما تكون طبقة القشدة رفيعة.

(٩٠) الأشكال في القهوة الساخنة وغيرها من الموائع

إذا وضعتَ فنجان قهوة ساخنة في ضوء شمس ساطع فقد تتمكَّن من رؤية أشكال على سطح القهوة، تتمثَّل في مناطق ضاربة إلى البياض مُجزَّعة بخطوط داكنة تتشكل وتُغيِّر من شكلها باستمرار (انظر شكل ٢-٢٨). ويُطلَق على هذه الأشكال «خلايا بينار» نسبةً إلى مكتشفها الأول.

شكل ٢-٢٨: بند ٢-٩٠: تتكوَّن مناطق ضاربة إلى البياض وخطوط داكنة على القهوة السوداء.

عند تسخين طبقة من الزيت في مِقلاةٍ على نار هادئة لن يتحرَّك الزيت إلا قليلًا، أو قد لا يتحرَّك مُطلقًا. أما إذا اشتدَّت النار تدريجيًّا، فسيبدأ الزيت في التحرُّك مكونًا خلايا

بينار في شكل مُضلَّعات. (لا بدَّ من وجود ضوء ساطع لرؤية الشكل.) وفي حالة وجود نار أشدَّ قوةً نسبيًّا فمن المُمكن أن تتَّخِذ المُضلعات شكلًا سُداسيًّا يُشبه خلية النحل.

أضِف اللبَن بالتدريج قُرب جدار فنجان شفَّاف يحتوي على الشاي الساخن. سيغطس اللبن إلى قاع الفنجان. أضِف كميةً كافية من اللبن بحيث تحتوي ثلاثة أرباع الفنجان على اللبن الأبيض الواضح بسهولةٍ في قاعه. لماذا يُمكن أن تظهر بعد عدَّة دقائق أحزمة أفقية في الجزء الذي يحتوي على اللبن في الفنجان؟

الجواب: بينما يتبخَّر الماء من السطح العلوي للقهوة، يبرد السطح ويُصبح أكثر كثافة نسبيًّا. ويتسبب اختلاف الحرارة الناتج (واختلاف الكثافة) بين الطبقة العلوية والطبقة السفلية للقهوة في حدوث دوَران داخل القهوة. تخيَّلْ وجود سائل في قاع الفنجان. إنَّ هذا السائل مغموس في طبقة ماء مُساوية له في الحرارة والكثافة؛ ومِن ثَمَّ يظلُّ ساكنًا. رغم ذلك، فإن حدوث أي اضطرابٍ عرضي في الفنجان يمكن أن يجعل السائل يصعد إلى سائلٍ أبردَ وأكثر كثافة نسبيًّا. وهناك يُصبح طافيًا، ثم يندفع لأعلى عبْر السائل الذي تزداد برودَتُه وكثافته تدريجيًّا، ويزداد اندفاعه لأعلى. وعلى هذا النحو، تزداد الحركة بسبب الاضطراب العرضي.

ويمكن أن تحدُث سلسلة شبيهة عند وجود سائل في السطح العلوي. فإذا تحرَّك ذلك السائل لأسفل في سائلٍ أكثر دفئًا نسبيًّا وأقلَّ كثافة، فإنه يندفع لأسفل وتزداد الحركة.

ونظرًا لأن سطح القهوة مفتوح، فإن الحركة عبْر السطح تتأثَّر أيضًا بالتوتُّر السطحي الناتج عن تجاذُب جزيئات الماء فيما بينها. وعندما يبرد الماء الموجود على السطح، يزداد توتره السطحي نسبيًّا؛ لذلك فالتوتر السطحي في المنطقة التي يهبط فيها الماء (الأكثر برودة) أكبر من التوتر السطحي في المنطقة التي يصعد فيها الماء (الأكثر دفئًا). والاختلاف في التوتُّر السطحي يجذب الماء عبْر السطح من المنطقة الصاعدة إلى المنطقة الهابطة. ونظرًا لأن التوتُّر السطحي الكبير يجعل الماء يتموَّج، فإن المنطقة الهابطة تُكوِّن نتوءًا أعلى نسبيًّا من المنطقة الصاعدة، فهو أشبَهُ بسلسلة تلال قصيرة تُحيط بأحد الأودية. ثم يُغطَّى سطح القهوة بخلايا من مناطق عريضة (وديان) من السائل الصاعد ونتوءات ضيقة من السائل الهابط.

وعندما يصِل الماء الأكثر دفئًا إلى السطح يتبخَّر جزء منه، لكن اعتمادًا على الرطوبة، من المُمكن أن يتكثَّف البخار سريعًا ليُكوِّن قطرات ماء في الهواء الذي يعلو المنطقة الصاعدة مباشرةً. تسقط القطرات الأكبر حجمًا على سطح السائل مرةً أخرى، بينما

القطرات الصغيرة للغاية تحملها بعيدًا تيارات الهواء الموجودة فوق القهوة الساخنة، في حين تستطيع القطرات المتوسطة الحجم أن تحُوم لأنها مُعلَّقة بفعل تدفُّق الهواء والرطوبة لأعلى من القهوة. وعندما يتشتَّت ضوء الغرفة الأبيض أو ضوء الشمس على هذه السحابة الرفيعة تُصبح السحابة مرئية وضاربة إلى البياض. تفقد النتوءات المُميَّزة للسائل الهابط القطرات الحائمة ومن ثَمَّ تكتسِب شكل القهوة الداكن الطبيعي. وإذا أحضرتَ شيئًا مشحونًا (مثل مشط بلاستيكي مشحون بتمريره في الشَّعر) قُرب سطح القهوة، فسوف تُزال القطرات الحائمة كهربائيًّا وسيختفي المظهر الضارب إلى البياض.

وتحدُث أنماط دوران مُشابهة في طبقة الزيت التي تُسخَّن في مقلاة. وبينما تبرد القهوة من أعلى، فإن الزيت يسخن من أسفل، لكن السِّمة المُهمة هي أن اختلاف الحرارة موجود بين السطح العلوي والسطح السُّفلي للسائل. وإذا تجاوز الاختلاف في درجة الحرارة قيمةً حرجة مُعينة، يُصبح الحمل الحراري غير ثابت أمام الاضطرابات العرضية. تُحرِّك الاضطرابات أجزاءً من السائل في اتجاهاتٍ مختلفة، ويمكن للطفو والتوتُّر السطحي أن يتغلَّبا على اللُّزوجة لتكوين خلايا من السائل الصاعد والهابط. في بعض السوائل، تُكوِّن الحركة تركيبات أسطوانية طويلة؛ حيث يكون السائل صاعدًا في أحد الجوانب وهابطًا في الجانب المقابل. تتكوَّن المُضلعات التي نراها في الزيت من مناطق واسعة من الزيت الساخن الصاعد وخطوط ضيِّقة من الزيت البارد الهابط. وكما هي الحال في القهوة الساخنة، فإن التوتُّر السطحي للزيت البارد يفوق التوتُّر السطحي للزيت الساخن، ومن ثَمَّ ينجذب الزيت على السطح من المنطقة الصاعدة إلى المنطقة الهابطة.

والشرائط التي يمكن أن تظهر بعد إضافة اللبن إلى الشاي الساخن ناتجة عن اللفائف الأفقية التي تجري حول جدار الفنجان، وهو نمط دوَران قد ينتج عن التبريد من خلال الجدار. وهذا التأثير الذي وصفه لي لأول مرة الألماني كريستيان روس عام ١٩٨٧ يمكن أن يتطوَّر إلى ثمانية شرائط، لكنك قد تحتاج إلى التجربة للحصول على الظروف المناسبة لظهورها.

يمكن أن تظهر خلايا بينار أيضًا في الشمع الذائب من شمعة كبيرة. إن التوتُّر السطحي في الشمع الساخن أقلُّ من نظيره في الشمع البارد، ومن ثَمَّ فإن الاختلاف في التوتر السطحي بين الفتيلة والحافة الخارجية للشمعة يمكن أن يدفع خلايا الحمل الحراري. وإذا أُطفِئَت الشمعة بعناية، فمن الممكن أن تترك الخلايا نتوءات في الشمع عندما يبرد ويتجمَّد.

(٩١) أشكال بُقَع القهوة

عندما تنسكِب القهوة على سطح أفقي وتُترَك لتتبخَّر لماذا يتميز مكان البقعة الأصلية بوجود حلقة بُنية مميزة؟ عندما تُترَك بِرَك الماء المالح لتتبخَّر على رصيفٍ على سبيل المثال، لماذا تُميَّز حافة البِركة بحلقة بيضاء؟

القهوة الشرق أوسطية مزيج قوي من الماء والسكر وحبوب البن المطحونة طحنًا ناعمًا، وهو يُغلى في «إبريق» ثم يُصَبُّ في فنجانٍ صغير مع رواسب البن. عندما تبرد القهوة وتصل لدرجة حرارة مناسبة لاحتسائها، تغُوص الرواسب تدريجيًّا في قاع الفنجان. يرشف الشارب القهوة حتى الطبقة السُّفلى ثم يضع الفنجان جانبًا. وإذا تُرك المزيج المُتبقي المُكوَّن من السائل والرواسب ليتبخر لعدة ساعات، فستكوِّن الرواسب نسَقًا مُدهشًا من الخطوط الداكنة والفاتحة الرفيعة حول حافة السائل. وهذه الخطوط التي يبلغ طول كلٍّ منها عدة مليمترات والعمودية على الحافة، يفصل بينها مسافات موحَّدة كما لو كانت قد رُسِمَت على يد رسام. فما الذي يُسبب هذا النسَق؟

الجواب: إذا تركت بقعة قهوة لتتبخر على سطحٍ صلب، فإن البُقَع تتقلَّص مع فقدانها للماء، إلا أن مُحيط البقعة (يُعتبَر «خط التَّماس» لأنه يمثل الاحتكاك بين الهواء والسائل والصُّلب) يُمكن أن يعلَق بما يُلطِّخ السطح الصلب من بُقَعٍ جافة أو مختلفة كيميائيًّا؛ أي إن خط التَّماس يُصبح «ثابتًا» وغير قادرٍ على التراجُع بعيدًا عن البُقعة.

ويترك التبخر، الذي يُمكن أن يكون سريعًا جدًّا في الطبقة الرفيعة عند حافة البقعة، راسبًا للمادة المحلولة في الماء التي يُطلَق عليها «المذاب». ونظرًا لثبات خط التماس، فإنَّ القهوة تتدفَّق نحوَ الحافة من منتصف البُقعة لتحلَّ محلَّ الماء المفقود في التبخُّر. ومِن ثَمَّ يترسَّب المزيد والمزيد من المادة المُذابة عند الحافة، فتتراكم حلقة بُنية تصبح مرئية في النهاية. وبمجرَّد تكوُّن الحلقة يُصبح خط التماس أكثر ثباتًا. رغم ذلك، عندما يقلُّ السائل في البُقعة يمكن أن يتغلَّب خطُّ التماس على الثبات ويتراجع للداخل فجأة. وعندها يثبت مرة أخرى وتتكوَّن حلقة جديدة أصغر. ويمكن لتدفُّقاتٍ مُشابهة أن تترك حلقة بيضاء حول بُقعة من الماء المالح آخِذة في التبخُّر.

يمكن أيضًا أن تحدُث تدفُّقات مشابهة عند حافة القهوة المُعدَّة على الطريقة الشرق أوسطية مُعرَّضة للتبخُّر إذا كان آخر السائل موجودًا في فنجانٍ ذي جدارٍ مائل بحيث تكون حافة السائل ضحلة. بالإضافة إلى ذلك، يتحوَّل التدفُّق إلى سلسلة خلايا مُنتظمة

تدفع راسب البنِّ الداكن المطحون طحنًا ناعمًا خارجًا إلى الحافة وتُرجع السائل من الحافة. التدفُّق إلى الخارج يُرسِّب البن المُذاب عند الحافة، والتدفُّق الداخلي يكسَح أيَّ مادة مُذابة. والنتيجة هي نسَق مُنتظم من الخطوط القصيرة تتناوَب ما بين الداكن والفاتح حول جدار الفنجان. ولو قُلِّبت القهوة لفترة وجيزة، فإن الخلايا سرعان ما ستعود في التكوُّن من جديد. وإذا أُزيل السكر من المحلول المغلي فلن تتكوَّن الخلايا.

والتفسير البسيط لذلك يتمثَّل في أنه عندما يتبخَّر الماء من الحافة الضحلة يتدفَّق السائل البديل نحوَ الحافة ساحبًا معه جزءًا من الراسب للخارج على جدار الفنجان. ويكون هذا الراسب أحد الخطوط الداكنة في النسَق الذي يتراكم. وبمجرَّد أن يصل السائل البديل إلى الحافة ويبدأ في التبخُّر يُصبح أكثر تركيزًا ومِن ثَمَّ أكثر كثافة، ولذلك يبدأ في الغوص فينزلق بعيدًا عن الحافة على طول جدار الفنجان المُقوَّس. وهذا التدفُّق للداخل يسحَب الراسب بعيدًا عن الحافة، فيخلي سطحًا ضيقًا ويكوِّن سطحًا من الخطوط الفاتحة في هذا النسق. ولا يحدُث توزيع الراسب بهذه الطريقة إلا إذا كان جدار الفنجان مُعتدل الانحدار. فلا الجدار الرأسي (الذي لا تُوجَد به أي حوافَّ ضحلة) ولا الجدار شِبه الأفقي (الذي تُوجَد به حافة ضحلة عريضة) سوف يوزِّع الراسب بهذه الطريقة.

(٩٢) الأشكال الناتجة عن التنفُّس

عندما تتنفَّس على سطح مثل المرآة أو عدسات النظارة، لماذا تتكوَّن شبُّورة على السطح؟ ولماذا تتكوَّن شبورة على مرآة الحمَّام الذي يعجُّ بالبُخار؟

الجواب: عندما يُقابل النفَس الدافئ نسبيًّا سطحًا أكثر برودةً مثل المرآة، فإن رطوبة النفس تبدأ في التكثُّف على السطح. من المُحتمَل أن يكون السطح مُغطًّى بالتراب والزيت من البصمات. ونظرًا لأن جزيئات الماء المتكاثفة على السطح أقوى انجذابًا بعضها إلى بعض منها إلى هذه الملوثات، فإنها تميل إلى تكوين قطرات ماء صغيرة بين المُلوِّثات. ولذلك لا يُغطي الماءُ السطح بالتساوي بل يكوِّن قطرات.

في البداية تَكون القطرات صغيرة لكنها تكبُر وتبدأ في «الاتحاد» (الاندماج) في النهاية، وهذه العملية ما زالت غير مفهومة جيدًا. ونظرًا لتزايُد المسافة بين القطرات الكبيرة الناتجة تبدأ قطرات جديدة صغيرة في التكوُّن بين القطرات الأكبر. وهذه الأنواع الثلاثة من القطرات المُتكوِّنة (قطرات صغيرة فقط، ثم قطرات أكبر، ثم قطرات أكبر يتوسَّطها قطرات صغيرة) يُطلَق عليها مُجتمعة «الأشكال الناتجة عن التنفُّس» (لأنها يُمكن أن تصدر عن التنفُّس).

وبمُجرَّد تكوُّن أشكال التنفُّس على المرآة تصبح الصور غير واضحة المعالم، وتبدو المرآة كما لو كانت مُغطَّاة بمادة بيضاء؛ لأن القطرات تُشتِّت ضوء الغرفة الأبيض. وإذا فركتَ إصبعك على السطح وكرَّرتَ عملية التنفُّس المكونة للشبورة، فلن تتكوَّن القطرات على المناطق المفروكة؛ لأنَّ الزيت الموجود في الإصبع يخفض التوتُّر السطحي للماء لدرجة كبيرة يجعلها عاجزة عن تحويل الماء لقطرات. وبدلًا من ذلك، يتمدَّد الماء في صورة طبقة رفيعة، وتُعرَف هذه العملية باسم «التبليل».

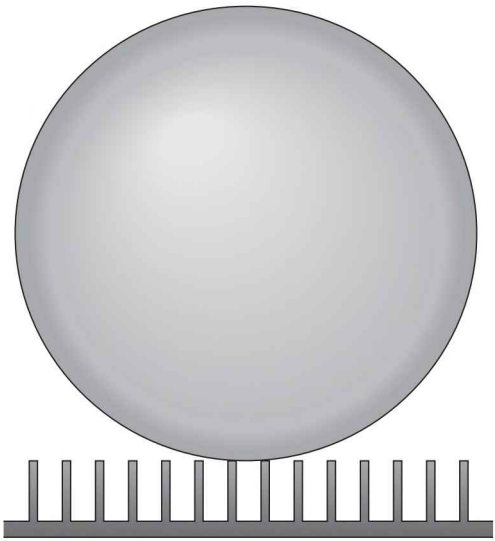
وإذا استمرَّت القطرات في التكوُّن كما يحدُث أثناء حمَّام ساخن طويل في غرفة استحمام أبرد نسبيًّا، فإن القطرات تُصبح أكبر وتندمج إلى أن يُصبح بعضها أثقلَ من أن تبقى ثابتة. وبفعل قوة الجاذبية تنزلِق هذه القطرات الثقيلة على المرآة. ونظرًا لجرَيان هذه القطرات نحو القطرات الأخرى، فسرعان ما ينزلق على المرآة سَيل من القطرات.

من الممكن أن تكون أشكال التنفُّس خطيرة إذا تكوَّنت على النظارات أو على الزجاج الأمامي للسيارة عندما تكون الرؤية ضرورية. (عندما تكون قائد السيارة فسوف تحتاج إلى رؤية الطريق بوضوح وليس بطريقةٍ ضبابية فحسْب وإلَّا فسُرعان ما ستعجز عن رؤية الطريق تمامًا.) وتشتهر أنواع من زجاج السيارات الأمامي باحتفاظها بقطرات الماء والبعض الآخر مُصمَّم خاصةً لإزالة الماء سريعًا. ويستخدم بعض الناس علاجاتٍ منزلية أو منتجاتٍ تجارية يُغطُّون بها زجاج السيارات الأمامي بمُستحضَر يجعل الماء يُبلِّل الزجاج الأمامي بدلًا من تكوين القطرات.

(٩٣) تأثير اللوتس

رُشَّ الماء على أوراق نبات اللوتس وستبدأ القطرات في التحبُّب والتدحرُج على الفور. في أثناء النزول، من المُمكن أن تجمع القطرات بعض القاذورات أو التراب ومِن ثَمَّ تنظف ورقة النبات، ويُقال عن ورقة النبات إنها ذاتية التنظيف. يتَّخِذ الماء شكل حبيبات على الأسطح الأخرى، مثل أوراق الشجر الشمعية، لكن التحبُّب على ورقة نبات اللوتس يبدو مُختلفًا على نحوٍ مُميَّز. فما السبب في تحبُّب الماء على ورقة نبات اللوتس؟

الجواب: في الغالب يُطلَق على قدرة قطرة الماء على التمدُّد على سطحٍ صلب «القدرة على تبليل» السطح. وإذا استطعتَ أن تلقي نظرةً عن كثَب على القطرة، فستتمكن من رؤية الزاوية التي تتَّخِذها القطرة عند مُحيطها على السطح. إذا كانت القطرة تستطيع



شكل ٢-٢٩: بند ٢-٩٣: قطرة ماء تتَّخِذ شكل كُرة مثالية على البِنية المجهرية الشائكة لورقة اللوتس.

تبليل السطح بسهولة، فإنها تُصبح مسطَّحة مثل الفطيرة وتكوِّن زاوية ضحلة عند مُحيطها. وإذا كانت القطرة غير قادرة على تبليل السطح بسهولة، فإنها تتحوَّل إلى حُبيبة وتكوِّن زاويةً كبيرة عند مُحيطها. وعلى ورقة اللوتس، تتحبَّب قطرة الماء لدرجة كبيرة تجعلها أشبَهَ بِكُرة كاملة.

ومن أسباب ذلك أن المادة الموجودة على ورقة النبات لا تجذِب جزيئات الماء (أي إن السطح «كاره للماء»). ولذلك فإنَّ التوتُّر السطحي (بسبب الانجذاب المُتبادَل بين جزيئات الماء) يميل إلى جذْب سطح الماء في صورة قوس كُرة شديد الانحناء. وكثير من الأسطح الصلبة الأخرى، مثل أوراق الأشجار العادية، كارهة للماء أيضًا، وتجعل قطرات الماء تتحوَّل نسبيًّا إلى حبيبات.

ترجع ظاهرة التحبُّب الشديد في ورقة اللوتس إلى البنية المِجهرية التي تستقرُّ عليها القطرة في البداية؛ فالسطح يتكوَّن من بِنية أشواك شِبه منتظمة تُشبه سرير المسامير (انظر شكل ٢-٢٩). ولا تستطيع القطرة السقوط في الفراغات الموجودة بين الأشواك؛

لأنَّ المادة كارهة للماء والفراغات أصغر كثيرًا من القطرة. لذلك تمتلئ الفراغات بالهواء وتستقرُّ القطرة على حواف الأشواك. والحدُّ الأدنى من الاحتكاك الناتج مع الورقة يجعل التوتُّر السطحي للقطرة يجمعها في شكلٍ شِبه كروي. والانحدار التدريجي أيضًا يجعل القطرة تتدحرج (ولا تنزلق). وتلتصِق القاذورات والتُّراب في طريقها بالماء عن طريق عدة قوى ومِن ثَمَّ تُزال من الورقة.

يُوجد أيضًا بعض الأغراض المنزلية الذاتية التنظيف المُعتمِدة على المبدأ نفسه. على سبيل المثال، لا يحتاج لَوح الزجاج ذاتي التنظيف الذي يحتوي على مجموعة مُناسبة من البروزات المجهرية إلى التنظيف؛ لأن الشبورة أو المطر الخفيف يمكن أن يكوِّنا قطرات تنزلِق على اللوح فتجمع كل الأتربة والقاذورات والأوساخ. وهذه سِمة جميلة للغاية عندما يكون الشباك مرتفعًا جدًّا عن الأرض كما هي الحال في ناطحة السحاب. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أيضًا طلاء السيارات بمادة تُنظِّف نفسها في الأمطار الخفيفة.

(٩٤) حشرات المن والكرات السائلة

لا بدَّ أن تتخلص حشرة المن الموجودة داخل عفصة النبات من فضلاتها المُتمثلة في عسل المن وإلَّا سيُغطي السائل الحشرة ويحبِسها ويغرقها. ويتمثل الحل الذي تلجأ له الحشرة في دحرجة السائل بعيدًا عن العفصة. فكيف يُمكن دحرجة السائل؟

الجواب: تُفرز خلايا جلدية في حشرة المن مادة شمعيَّة تتجمَّع ثم تتفرَّق في صورة مسحوق، فتُغطي السطح الداخلي للعفصة، ويُصبح عسل المن مُغطًّى بهذا المسحوق بمجرَّد أن تُفرزه الحشرة. يوفر المسحوق أيضًا سطحًا مجهريًّا خشنًا يستقر عليه عسل المن. وهكذا تتكون كُرات عسل المن وتُصبح شبه كروية، مثل قطرة الماء على ورقة اللوتس الموصوفة في البند السابق. ونظرًا لأنَّ الكرة كروية ولا تُبلل العفصة أو تلتصق بها، فإن الحشرة تستطيع دحرجة الكرة خارج العفصة.

ويمكنك صُنع كرة مُشابهة بخلط قطرة ماء صغيرة مع السخام أو مسحوق الليكوبوديوم. ونظرًا لأن كلتا المادتين كارهة للماء، فإن حبوب المسحوق تظل على سطح قطرة الماء. وبمجرد أن تُصبح القطرة مُغطَّاة فإنها ستُصبح شبه كروية عندما تستقر على أسطح كثيرة متشابهة، مثل السطح الزجاجي الأفقي. في العادة يُغطي الماء الزجاج، لكن الماء يَتحبَّب الآن؛ لأنه مستقر على بروزات مجهرية تُغطي سطحه.

(٩٥) فُرَش الرسم والشعر المبلول وكعك الغميس

لماذا تمتص فُرَش الرسم الدهان، ولماذا تمتص إسفنجات المطبخ والمناشف الورقية الماء وغيرها من السوائل المسكوبة؟ ولماذا يتجمع الشعر الطويل المبلول؟

يستمتع كثير من الناس بغمْس الكعك (أو البسكويت) في الشاي الساخن أو القهوة الساخنة؛ لأن زيادة الحرارة تعمل على إطلاق النكهات والروائح. لماذا تُصبح الكعكة طرية وتنكسر إذا غُمرت لأكثر من عدة ثوانٍ؟ كيف يُمكن غمسها بحيث تطلق النكهة والرائحة وتظل مُتماسكة لتُؤكل بدلًا من أن تغرق؟

الجواب: تجذب شعيرات فُرَش الرسم جزيئات الدهان، فتسحب الدهان لأعلى في الفراغ الموجود بين الشعيرات. ولأنَّ هذه الحركة تُشبه سحْب السائل لأعلى بأنبوبٍ ضيق (شعري)، فإنه يُطلَق على القوة المؤثرة على الدهان «الخاصية الشعرية». وعند سحْب فرشاة الرسم من علبة الدهان مرة أخرى، يظلُّ مُعظَم الدهان بين الشعيرات بسبب هذا الانجذاب. وعندما تحتكُّ الشعيرات بأحد الأسطح مثل جدار أو قماش، يُزال جزء من الدهان لكن يمكن أن يتدفَّق كثير من الدهان؛ لأن الشعيرات مفروشة لحظيًّا على السطح. ويزيد هذا الافتراش المساحة الفاصلة بين الشعيرات المُتجاورة، فيضعف الخاصية الشعرية ويسمح بتدفُّق الدهان.

تُوجَد في المنشفة الورقية وإسفنجة المطبخ ثقوب كثيرة يُمكن سحْب الماء من خلالها عن طريق الخاصية الشَّعرية.

وتتماسك خصلات الشعر بفعل «جسور سائلة» مقوَّسة تضمُّ الشعيرات المُتجاورة. وعند غمس أطراف الشعر في بِركة ماء، فإن الماء يتسلَّق الشعيرات المُتجاورة ويربطها أيضًا ليُقربها بعضها من بعض.

تتكوَّن الكعكة من حُبيبات نشوية جافَّة يجمعها إطار من السكر. وعند غمر الكعكة سرعان ما ينجذب السائل إلى ثقوبها بسبب الخاصية الشعرية. ويذيب السائل الساخن السكر سريعًا مُدمرًا الإطار وتتفتَّت الحبيبات النشوية. إذا أردت أن يمتلئ الشاي أو القهوة بالحبيبات النشوية فاغمس الكعكة رأسيًّا. أما إذا أردتَ أن تأكل الكعكة فأنزلها في السائل وهي مائلة كي لا ينغمس أعلى الكعكة. وبهذه الطريقة تستطيع الكعكة أن تظلَّ مُتماسكة بما يكفي لمُقاومة قاع الكعكة المُبتلِّ بشرط أن تكون الغمسة لفترة قصيرة.

(٩٦) القَلي العميق في الدهون

عند قَلي أطعمة مثل شرائح البطاطس أو خُبز التورتيلا في الزيت نجد أن السطح يُكوِّن قشرة لذيذة المذاق في حين يظل الداخل طريًّا. لماذا تشرب الأطعمة الزيت ولماذا يكون معظم الزيت قد استُهلك «بعد» إزالة الأطعمة من آنية القَلي؟

الجواب: عندما تلمس شريحة البطاطس الزيت لأول مرة، فإن الطاقة المنقولة من الزيت إلى البطاطس ترفع درجة حرارة سطح البطاطس. وعندما تقترب درجة حرارة السطح من مستوى غليان الماء، يبدأ الماء الموجود في ثقوب السطح في التبخُّر، وتتكوَّن فقاعات بُخار الماء الهارب عند فتحات الثقوب فتجعل الزيت يضطرب بجوار البطاطس. (يمكنك أن تسمع هذه العملية.) وعندما يفقد السطح الماء، فإنه يتصلَّب مُكوِّنًا القشرة المرتبطة بالأطعمة المَقلية. وتسبب الحرارة العالية أيضًا تفاعلات كيميائية في السطح فتمنحه النكهة المميزة للأطعمة المقلية.

ومع استمرار الطهي تنتقل الطاقة إلى داخل شريحة البطاطس فيُطهى الجزء الداخلي. ونظرًا لأن الجزء الداخلي يحتوي على ماء حبيس، فإن درجة الحرارة هناك لا تتجاوز نقطة غليان الماء بقدرٍ كبير. ولذلك يُمكن أن ينضج الجزء الداخلي دون أن يفقد الماء أو يكوِّن ملمسًا شبيهًا بالقشرة.

إلا أن الماء بالقُرب من السطح يستمر في التبخُّر من الثقوب لعُمقٍ يصل إلى ملِّيمتر أو ملِّيمترين. وعند إزالة شريحة البطاطس من آنية القلي، فإنها تخرج والزيت يُغطيها، مما يحبس بخار الماء المُتبقي في الثقوب. وعندما يبرد البخار يتكثف مُتحولًا إلى ماءٍ سائل يحتلُّ حيزًا أقلَّ كثيرًا مما يشغله البخار. ونظرًا لانخفاض ضغط الغاز داخل الثقوب، يُمتَص الزيت من الطبقة الخارجية عبْر الثقوب. ويمكن تعزيز هذا الامتصاص عن طريق قوة التجاذُب بين الجزيئات في الزيت وبين الجزيئات الموجودة في جدران الثقوب، ويُعرَف هذا التأثير بالخاصية الشعرية. في الواقع، هذا هو التأثير السائد عند تحمير أطعمة رقيقة مثل رقائق البطاطس لدرجةٍ لا يكاد يتبقَّى بها ماء داخلها.

وإذا رغِب الطاهي في تقليل امتصاص الأطعمة المقلية للزيت فيجب أن ينفضَّ الزيت من الأطعمة (أو أن يُنظِّفه بمناشف ورقية) بمجرد إخراج الأطعمة من الزيت المَغلي.

(٩٧) بقاء البطِّ جافًّا

في المناطق المناخية المعتدلة يحتاج البط (وغيره من الطيور المائية) إلى البقاء جافًّا؛ لأنه إذا أصبح مبتلًّا فإنه سيفقد العزل الحراري في طبقة الهواء الموجودة بين الريش والجلد. وفي هذه الحالة من الممكن أن يفقد الطاقة الحرارية في الماء بمُعدل أسرع مما يستطيع التمثيل الغذائي توليد الطاقة. إلا أنَّ طبقة الريش ليست مُضادة للماء؛ لأن الريش مسامي على نحوٍ واضح. إذن، كيف يستطيع البطُّ أن يبقى جافًّا أثناء الطفو أو السباحة؟

الجواب: يتَّسِم الريش الذي يتكوَّن من الكيراتين والشمع وطبقات الإستر بأنه «كاره للماء». أي إنه يطرُد الماء؛ ومِن ثمَّ تميل قطرات الماء إلى الجريان من فوق الريش بدلًا من تبليله، مِثلما يحدُث عندما تسقط الأمطار على البطة. رغم ذلك، فإنَّ هذا الريش ليس السبب الوحيد في بقاء البطة جافَّة؛ لأنه عندما تطفو البطة يجب دفع الماء لأعلى عبْر الريش وخلاله، وهو ما يدفع طبقة الهواء العازلة الضرورية ويبرد جلد البطة سريعًا.

ولحُسن حظِّ البطة أنَّ المسام (الفراغات المفتوحة) الموجودة بين الريش وداخله أصغر من أن يدخلها الماء، حتى عندما يُحاول ضغط الماء أسفل البطة دفع الماء عبْر الثقوب أو توسعة تلك الثقوب. والسبب يعود إلى أنَّ سطح الماء يتَّخِذ شكلًا محدبًا عند محاولة دخول فتحة في مادة كارهة للماء. وبسبب هذا الشكل يسحب سطح الماء بعيدًا عن الفتحة بفعل التوتُّر السطحي (بسبب الانجذاب المتبادل بين جزيئات الماء). ونظرًا لأن مسام ريش البطة ضيقة، يُصبح سطح الماء شديد التقوُّس ومِن ثَمَّ يمنع التوتُّر السطحي الماء من دخول المسام.

بعض أنواع سلال الفاكهة المُكوَّنة من شرائط بلاستيكية مجدولة قد تبدو غير قادرة على الطفو؛ لأن الشرائط لا تكوِّن بدنًا خاليًا من الثقوب، لكنها تطفو رغم ذلك. فالماء لا يستطيع اختراق الفراغات المفتوحة الموجودة في الشرائط.

(٩٨) قِطَع البطاطس وروَث الطيور والسيارة

إذا تعطلت مِمسَحة الزجاج الأمامي للسيارة، لماذا تستطيع أن تحافظ على الزجاج الأمامي شفافًا على نحوٍ معقول أثناء المطر الخفيف إذا دعكتَه بقِطعة بطاطس. (بطبيعة الحال، قد يكون حيازة بطاطس احتياطية في السيارة أمرًا غير مُرجَّح.) وعندما يزين روَث

الطيور سيارتك ويُصبح مُبتلًا بسبب المطر، لماذا سرعان ما تُصبح المنطقة المجاورة للروَث أكثر جفافًا عن بقية السيارة؟

الجواب: تقلُّ الرؤية عبْر الزجاج الأمامي عندما يكوِّن الماء حُبيبات على الزجاج فيُشوِّه الرؤية من خلاله. وإذا دعكتَ خارج الزجاج بقطعة بطاطس فإن طبقة النشا التي تتركها تجذب بقوَّة جُزيئات الماء وتفرد السائل في صورة طبقة ناعمة. وعندها يُمكن أن تُصبح الرؤية واضحة على نحوٍ معقول.

عندما يذوب روَث الطيور جزئيًّا في المطر، ينتشر المحلول في منطقة صغيرة حول الروث. ويتحوَّل الماء الهابط على بقية أجزاء السيارة إلى حبيبات، لا سيما إذا كان السطح مطليًّا بالشمع. وعندما يتوقف المطر، فإن الطبقات الرفيعة المُحيطة بالروَث تكون أول ما يجفُّ قبل أن تتبخَّر حبيبات الماء بالكامل بفترة كبيرة.

ولا تُنتج كلُّ الطيور تأثير التبليل المذكور بسبب اختلاف الأنظمة الغذائية؛ فالطيور التي تؤدي إلى انتشار الماء تتغذَّى على السمك ومِن ثَمَّ تترُك روثًا زيتيًّا. وهذا التبليل يُمكن أن يُمثل مشكلة خطيرة لشركات الطاقة الكهربائية؛ لأن الطيور يمكن أن تلوث دعامات خط الكهرباء الموصولة بالأرض. وإذا كان الروَث مائعًا فمن الممكن أن يتسرَّب إلى خط الكهرباء الموجود تحت الدعامة بالضبط فيُوقف الخط ويتسبب في «وميض كهربي»، مما قد يُعطل إمداد الطاقة ويُدمِّر خط الكهرباء تدميرًا شاملًا. وتراكُم روث الطيور خطير أيضًا حتى إن لم يكن مائعًا؛ فخلال الأمطار أو ذوبان الجليد يمكن أن يمتصَّ الماء جزيئات مشحونة من الروَث ويزداد توصيله للكهرباء. ومع تسرُّب هذه المياه لخط الكهرباء يمكن أن يحدُث وميض تفريغ كهربي.

(٩٩) أبواغ عيش الغراب القاذِفة

تنشر الفطريات، كعيش الغراب، أبواغها بطُرقٍ شتَّى. إلا أن أكثر هذه الطرق إثارة هي الفطريات ذات الأبواغ القاذِفة التي تُطلِق أبواغها بسرعة أكبر مما تستطيع العين تتبُّعها. يتَّصِل كلُّ بوغٍ بساق يُطلَق عليه ذنيب. وقبل إطلاق البوغ، تتكون قطرة ماء عند قاع البوغ قرب نقطة اتصال البوغ بالذنيب. وفي غضون ما يقرُب من ثلاثين ثانية تتمدَّد القطرة ليبلُغ محيطها حوالي ١٠ ميكرومترات، ثم ينطلق البوغ والقطرة على نحوٍ مفاجئ في الهواء، فما الذي يدفعهما؟

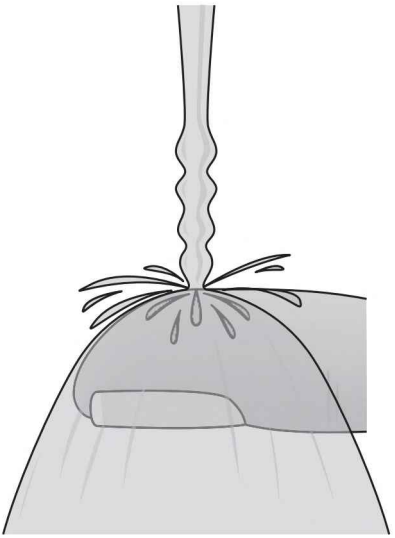
الجواب: عندما يستعدُّ عيش الغراب ذو البوغ القاذف لإطلاق البوغ، فإنه يُفرز مُركَّباتٍ مُعينة على سطح البوغ لتعزيز تكثيف الماء من الهواء. يحدُث التكثيف بسرعة بالغة في مكانٍ تكوُّن القطرة، لكنه يحدث أيضًا على البوغ حيث يكوِّن غشاء ماءٍ عالق. ومع ازدياد محيط القطرة وتمدُّد الغشاء على البوغ، سرعان ما يحتكُّ الغشاء بالقطرة. في هذه اللحظة، يجذب التوتُّر السطحي للماء في الغشاء الماءَ الموجود في القطرة إلى الغشاء. وهذا الجذب يُعطي زخمًا وطاقة حركية كبيرَين للماء المنطلق إلى الغشاء حتى إن البوغ ينجذب بحُرية بعيدًا عن الذنيب وينطلق في الهواء. ويُقَدَّر تسارُع الإطلاق بنحو ٢٥ ألف G (أو ٢٥ ألف ضعف تسارُع الجاذبية)، لكن البوغ سُرعان ما يتباطأ بسبب مقاومة الهواء؛ ولذلك لا يسافر بعيدًا. ونظرًا لأن طاقة وزخم الإطلاق نابعان من التوتُّر السطحي؛ فقد أُطلِق على الإطلاق اسم «قذف التوتر السطحي».

(١٠٠) أمواج التيار الساقط

اضبط ارتفاع إصبع موضوعة أسفل تيَّار مائي رفيع (يبلغ قطره عدة مليمترات) ساقط من صنبور. عند نطاق ارتفاع مُعين تتكوَّن تموجات في التيار في الجزء الذي يعلو الإصبع مباشرة (انظر شكل ٢-٣٠). ما الذي يُسبِّب التموُّجات؟ إذا وضعتَ إصبعك أولًا في سائل تنظيف (مثل تايد أو آيفوري) لماذا تتكوَّن التموُّجات أعلى التيار ولا تتكوَّن في أسفله؟

الجواب: السبب في ظهور التموُّجات هو الأمواج المرسلة إلى «أعلى» التيار نتيجة تأثير التيار على الإصبع. ويُقال إن الأمواج نوع من «الأمواج الشعرية»؛ لأن ذبذباتها يتحكم فيها التوتر السطحي بسبب الانجذاب المُتبادَل بين جزيئات الماء. في هذه الحالة، تنتقل الأمواج الشعرية أعلى التيار بسرعة مُساوية لسرعة انتقال الماء لأسفل؛ ومِن ثمَّ تُصبح الأمواج ثابتة بالنسبة لك. وإذا وضعتَ بدلًا من الصنبور وعاءً يُسرِّب من خلال ثُقب في جانبه السفلي فسوف تنخفض سرعة الماء في التيار عندما ينخفض مستوى الماء في الوعاء. ويؤدي انخفاض هذه السرعة إلى تزايد الطول الموجي للأمواج (أي المسافة بين التموُّجات المُتعاقِبة) حتى يُصبح التيار غير مُستقرٍّ وينكسر في صورة قطرات.

ويعتمد وجود الأمواج على التوتُّر السطحي العالي الشدة للماء. وإضافة سائل التنظيف تُقلِّل من التوتُّر السطحي. وعند تغطية الإصبع بسائل التنظيف فإن جزءًا منه يختلط بالجزء السفلي من التيار فيُقلِّل التوتُّر السطحي لدرجةٍ تكفي لمنع ظهور الأمواج

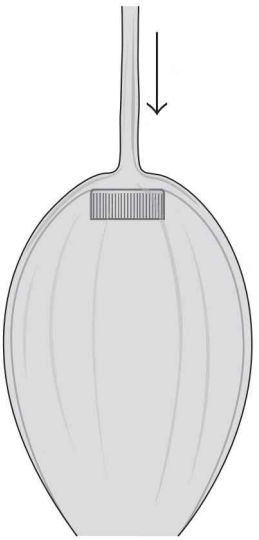


شكل ٢-٣٠: بند ٢-١٠٠: تتكوَّن أمواج ساكنة على تيار رفيع من ماء ساقط.

هناك. ثم يُصبح التدفق خلال الجزء السفلي سلسًا كما لو كان في أنبوبٍ وتتكوَّن الأمواج فوق التدفُّق الذي يُشبِه الأنبوب.

(١٠١) الأجراس والألواح والسلاسل المائية

ضع ملعقة، أو أيَّ شيء كُروي الشكل، بحيث يكون السطح المُحدَّب (المقوَّس للخارج) لأعلى تحت تيارٍ ثابت مُتدفق من صنبور. سينحرف الماء في صورة سطح رقيق مُنحنٍ لأسفل. وستحقق الأسطح المستوية النتيجة نفسها، ولعلَّ أفضلها غطاء زجاجة المياه الغازية البلاستيكي الحلزوني. ضَعْ إصبعَين في الغطاء، وضع الغطاء في التيار الساقط مُوجهًا إصبعَيك لأعلى. وإذا كنت حريصًا، فسوف ينطوي اللوح للخلف تقريبًا على نفسه مُكونًا «جَرسًا مائيًّا» (انظر الشكل ٢-٣١). تحتوي كثير من النوافير على هذه الألواح المُقوَّسة كنوع من النحت المائي. فما الذي يُسبِّب «الألواح المائية»؟



شكل ٢-٣١: بند ٢-١٠١: جرس مائي مُكوَّن من لوحٍ مائي منحرف بفعل سطح صُلب.

يُمكنك تكوين أجراس مائية وألواح شِبه مسطَّحة عن طريق توجيه تيارَين رفيعَين غير مُضطربَين أحدهما نحو الآخر. وإذا كان التياران رأسيَّين ولهما سرعة التدفق نفسها تقريبًا، فسوف يصطدمان ويتمدَّدان في صورة لَوح مُتماثل. ويمكن أن يتفكك اللَّوح إلى قطرات، أو ربما ينحني لأسفل مُكونًا جرسًا مائيًّا.

وعند توجيه التيارَين لأسفل وإمالتهما أحدهما نحو الآخر، فمن الممكن أن يُكوِّنا سلسلة سائلة مُكوَّنة من مجموعة حلقات ذات حوافَّ سميكة نسبيًّا. تكون الحلقات المُتعاقبة مُتعامدةً بعضها على بعض، مما يجعل التشكيل يُشبه الحلقات الموجودة في النوع الشائع من السلاسل.

الجواب: يتماسك الماء بفعل الانجذاب المُتبادَل بين جُزيئات الماء ويُطلَق على هذا التأثير التوتُّر السطحي. وينحني اللوح المائي لأسفل بفعل تأثير الجاذبية عليه. وإذا غادر اللَّوح الشيء المُسبِّب للانحراف باضطراب كبير فلن يستقرَّ وسرعان ما سينكسر. وبسبب قلَّة الاضطراب يُصبح مُمكنًا تكوُّن جرس مائي مُغلَق وجميل.

وتَستخدِم بعض المنحوتات المائية تيارًا رقيقًا عريضًا بدلًا من تيار الماء الأسطواني لصُنع ستارة مائية تُطلِق حافة ثم تنحني لأسفل. وإذا كان تدفُّق الماء شديد الانخفاض، فسوف تتكون سلسلة أعمدة مائية بينها مسافات مُنتظمة بدلًا من تكوُّن لَوح مائي وحيد. ويتحكم التوتُّر السطحي للماء في المسافات؛ حيث يسحب الماء إلى الأعمدة.

يمكن أيضًا تكوين ألواح ماء مُتدفِّق رقيقة عند توجيه تيارَين أسطوانيَّين أحدهما نحو الآخر بالسرعة نفسها تقريبًا، مع وجود مسافة قصيرة تفصل بين المَنْفَذَين. ويُسفر تأثير التيارَين عن إطلاق الماء للجانب في صورة لوح. وإذا كان التياران رأسيَّين ومُتوجهَين أحدهما نحو الآخر، فإن اللَّوح يميل إلى أن يكون دائريًّا، ويتفتَّت إلى قطراتٍ على طول مُحيطه. وإذا كان التيَّاران مُتعامدَين فسيكون اللَّوح أشبهَ بورقة الشجر.

وإذا تعامد التياران لتكوين سلسلة سائلة، فإن التيَّاران يتراجعان عن تأثيرهما ويبتعدان أحدهما عن الآخر ويربط بينهما لَوح رقيق. ويجذب التوتُّر السطحي التيارَين مرةً أخرى حتى يتصادما مرةً أخرى. وفي هذه المرة يتَّجِهان إلى اتجاهات مختلفة لكن على سطحٍ عمودي على سطح الحلقة الأولى. ويقلُّ ارتداد وعرض السلاسل مع استمرار الماء في السقوط حتى تختفي الحلقات ويُكوِّن الماء الساقِط شكلًا أسطوانيًّا ببساطة.

(١٠٢) السير على شاطئٍ مُبتلٍّ وعلى الرمال المُتحركة

إذا دُسْتَ على رمال مُبتلة (ليست شديدة البلل لدرجة دوران الحُبيبات) ثم رفعتَ قدمك، فلماذا تصبح الرمال داخل آثار قدمك جافة نسبيًّا ولماذا تُصبح مبتلة مرة أخرى في غضون دقائق قليلة؟

ما السبب في الرمال المُتحركة؟ وكيف يمكنك الهروب منها؟

الجواب: قبل أن تطأ الرمال تكون الحبيبات مُتجمِّعة معًا عن قُربٍ قدر الإمكان، ويملأ الماء الفراغات الوسيطة. وتبدو الرمال مُبتلة؛ لأنك ترى انعكاسات الماء على سطح الرمل. عندما تطأ الرمال فإنك تقصُّ الرمال حيث تجعل أجزاءً تتحرك على أجزاء أخرى أو عبْر أجزاء أخرى. وهذه الحركة تزيد حتمًا المسافات بين حبيبات الرمال. (ويُقال إنَّ الرمال «مُتمدِّدة»؛ لأن تأثير القصِّ زادَ حجمَها عن حالة الضغط الشديد التي كانت عليها في السابق.) سرعان ما يتسرَّب الماء من سطح الرمال إلى الفراغات الزائدة بين الحُبيبات تاركًا سطح الرمال جافًّا نسبيًّا. وخلال دقائق قليلة تنزلق الحبيبات لتتجمَّع عن قُرب

مرة أخرى أو يأتي ماء إضافي من الرمال المحيطة أو التحتية، ثم يبدو سطح الرمال مُبتلًّا مرة أخرى.

إذا كان لديك زجاجة قابلة للضغط بها رمال وماء فسوف تتمكَّن من ثَني الزجاجة بضغطةٍ خفيفة بطيئة تسمح للحُبيبات بالتحرُّك ببطءٍ من حالة التجمُّع الشديد وتسمح أيضًا للماء بالتسرُّب إلى الفراغات الجديدة لتجعل الحُبيبات زلِقة. أما الضغط المُفاجئ فسوف يُسفر عن تحرك الحُبيبات بسرعةٍ شديدة دون حدوث الانزلاق المائي المطلوب. سيكون الاحتكاك بين الحُبيبات شديدًا جدًّا حتى إنك لن تستطيع ثَنيَ الزجاجة على الإطلاق.

تتكوَّن الرمال المُتحركة من قاعٍ رملي وتدفُّق مائي، مثل النبع الطبيعي. يحرك التدفُّق المائي حبيبات الرمال بعيدًا نسبيًّا ويجعلها زلِقة بحيث يمكن أن ينزلق بعضها على بعض. وعند السير على هذا التشكيل من المُمكن أن تغُوص في الرمال الزلقة. وإذا ناضلتَ محاولًا تحريك رِجلك لأعلى سريعًا فسوف تُصبح الرمال المُتحركة صُلبة فجأة ولن يمكنك تحريك رِجلك على الإطلاق. المشكلة هي أنَّ الحركة المُفاجئة تزيد من المسافات بين الحبيبات الرملية، إلا أن انزلاق الحبيبات بعضها على بعض ينتج احتكاكًا كبيرًا ويمنع الحركة.

الرمال المُتحركة مائع كثيف، ومن الناحية النظرية قد لا تغُوص فيه على نحوٍ يكفي للغرق. وفي موقفٍ مثالي قد تتمكَّن من الرقود عليها بالانحناء عند الوسط ثم الزحف عن طريق دفع اليدَين على السطح، وإخراج الرِّجلَين ببطء. رغم ذلك، فإن الأشخاص الذين جرَّبوا الرمال المُتحركة أوضحوا أنَّ الرمال المُتحرِّكة الموجودة في الأرض البرية تكون أكثر خطورة من هذه الرمال المُتحركة المثالية؛ فمن المُحتمل أن تكون مُحتجبة عن النظر تحت مياهٍ راكدة أو جارية؛ ومِن ثمَّ إذا لم تَغُصْ بعيدًا في الرمال المُتحرِّكة فمن الممكن بسهولة أن تجِد رأسك أسفل الماء. بالإضافة إلى ذلك، نظرًا للسقوط في الرمال المُتحركة، فإنك تتجاوز مستوى الطفو، لكنك لا تصعد لأعلى مرة أخرى على النقيض من حمَّام السباحة. والأسوأ من ذلك، من الممكن أن تغير تدفق الماء الذي يجعل الرمال «متحركة» ومِن ثَمَّ تُصبح الرمال المحيطة بك صُلبة.

ويقول الخبراء إن الطريقة الأكيدة للهرَب من الرمال المُتحركة هي أن تكون مُتأهِّبًا للهرَب. فعندما يكون من المُحتمَل الوقوع في الرمال المُتحركة، لا بدَّ أن يكون الشخص قد ربط أنشوطة حبل تحت ذراعَيه وحول صدره، ويجب أن يكون الشخص الموجود عند طرف الحبل الآخر مُستعدًّا للسحْب بقوة في حالة سقوط الشخص الأول في الرمال المتحركة.

(١٠٣) انهيار المباني والطريق السريع

قُبَيل بدء المباراة الثالثة في نهائي دوري البيسبول عام ١٩٨٩ في أوكلاند بولاية كاليفورنيا، ضربت المنطقة أمواج زلزالية من زلزالٍ بلغت قوَّته ٧٫١ ريختر قُرب لوما بريتا على بُعد ١٠٠ كيلومتر، مُسبِّبةً دمارًا هائلًا وأودَتْ بحياة ٦٧ شخصًا. وأوضحت الصور الفوتوغرافية التي انتشرَتْ حول العالم قطاعًا طويلًا من طريق نيميتس السريع؛ حيث انهار الطابق العلوي على الطابق السُّفلي، فحاصر ركَّاب السيارات وتسبَّب في وفاة العشرات. من الواضح أن الانهيار كان بسبب الهزَّة العنيفة جراء المَوجات الزلزالية. لكن لماذا تعرَّض هذا القطاع بالتحديد من الطريق السريع لهذا الضَّرَر البالغ في حين أن بقية أجزاء الطريق السريع المُتطابقة معه تقريبًا في أسلوب التشييد نجَتْ من الانهيار؟

في ١٩ سبتمبر عام ١٩٩٥ تسبَّبت أمواج زلزالية صادرة عن زلزال بدأ على امتداد الساحل الغربي للمكسيك في دمارٍ فظيع وواسع النطاق في مكسيكو سيتي على بُعد ما يقرُب من ٤٠٠ كيلومتر من مركز الزلزال. لماذا تسبَّبت هذه الأمواج الزلزالية في هذا الدمار الكبير في مكسيكو سيتي وتسبَّبت في دمارٍ قليل نسبيًّا في طريقها إلى هناك؟ بالإضافة إلى ذلك، لماذا ضربت الأمواج الزلزالية المباني ذات الارتفاع المُتوسِّط في مكسيكو سيتي ولم تُلحِق ضررًا يُذكر بالمباني المُرتفعة والقصيرة؟

الجواب: كان انهيار طريق نيميتس السريع قاصرًا على الامتداد المَبني على حاجزٍ طيني سيئ التشييد تعرَّض للإسالة (أو للتمييع) أثناء الاهتزاز. وهذا يعني أن جُزيئات الحاجز الطيني عندما تعرضت للاهتزاز تباعَدَ بعضها عن بعض وأصبحت أكثر ميوعة (أي قادرة على التدفُّق) بدلًا من حالتها الصُّلبة. وعندما كان الحاجز الطيني في حالة ميوعة، كان تأثير الأمواج الزلزالية أكبر منه في المناطق المُحيطة التي كان يرتكز فيها الطريق السريع على رواسب صخرية. وتُعدُّ السرعة القصوى التي تمنحها الأمواج الزلزالية للجزيئات عندما تتذبذب هذه الجزيئات بفعل الأمواج من مقاييس خطورة الأمواج الزلزالية. وفي مناطق الحاجز الطيني كانت السرعة القُصوى خمسة أضعاف ما كانت عليه في المناطق الصخرية على أقلِّ تقدير، ولذلك اهتزَّ الطريق السريع حرفيًّا حتى سقط أحد الطابقَين على الآخر.

وفي بعض أمثلة الإسالة، انزلقَتِ المنازل على الأرض كما لو كانت الرمال المتحركة قد ابتلعتها. بالإضافة إلى ذلك، من المُمكن أن تتكوَّن فوَّارات حارة في المواضع التي ينطلق فيها الماء والرمال لأعلى من الأرض.

كان زلزال المكسيك زلزالًا كبيرًا (بلغت قوَّته ٨٫١ على مقياس ريختر)، لكن موجاته الزلزالية كانت أضعفَ من أن تُسبِّب دمارًا هائلًا عندما وصلتْ إلى مكسيكو سيتي في النهاية. إلا أن مدينة مكسيكو سيتي مَبنية إلى حدٍّ بعيد على قاع بُحيرة قديمة؛ حيث ما زالت التُّربة طريةً بفعل الماء. وعلى الرغم من أن سَعة الموجات الزلزالية كانت ضعيفة في الأرض الأكثر ثباتًا في الطريق المؤدِّي إلى مكسيكو سيتي، فقد تزايدَتْ تزايدًا هائلًا في تُربة المدينة الرَّخوة. علاوة على ذلك، عندما دخلت الموجات الزلزالية التربة الرخوة، انعكس بعضها بين أعلى التربة والمادة الصلبة التحتية (القاع). وعزَّزت الأمواج ذات الأطوال الموجية المُعينة بعضها بعضًا، مما زاد حركة الأرض وأطال مُدَّتها. وبلغت قوة التسارُع بسبب الأمواج ما يقرُب من ٠٫٢٠ G (أي ٠٫٢٠ مرة من تسارُع الجاذبية)، وتركَّز التردُّد (على نحوٍ مُفاجئ) حول ٠٫٥ هرتز. ولم يتوقَّف الأمر عند اهتزاز الأرض بشدَّة لوقتٍ طويل على نحوٍ يُثير الدهشة، بل اهتزَّت مبانٍ كثيرة متوسطة الارتفاع بتردُّدات اهتزازٍ طبيعية (تردُّدات الرنين) بلغت تقريبًا ٠٫٥ هرتز. وكثير من هذه المباني المُتوسِّطة الارتفاع سقط أثناء الهزة، بينما المباني القصيرة (ذات تردُّدات الرنين الأعلى) والمباني المُرتفعة (ذات تردُّدات الرنين الأقل) ظلَّت واقفة.

قصة قصيرة

(١٠٤) تأثير الرمال المُتحركة في الحبوب

إن السقوط في وعاء حبوب كبير، مثل صوامع الغلال التجارية أو حاوية التخزين، لهوَ أمر خطير ومن المُمكن أن يودي بالحياة. وفي إحدى الحالات، سقط عامل سهوًا في صومعة غلال مُمتلئة لعُمقٍ يبلغ عدَّة أمتار. وسرعان ما غاص حتى إبطَيه، وأصبح عاجزًا عن أن يُحرِّر ولو ذراعَيه. ونظرًا لإصابته بأحد أمراض القلب، فقد كان ضغط الحبوب على صدره خطيرًا، ولذلك حاول المُنقِذون سحبَه بسرعة، لكنهم لم يتمكنوا بسبب تأثير الاحتكاك على جسده. بعد ذلك حاولوا إخراجه عن طريق الحفر في الحبوب المُحيطة به، لكن واصلت الحبوب ملء الفراغ حوله، كما أن الغبار المُتطاير كاد يُسبِّب اختناق الضحية والمُنقذين. وأخيرًا أنزلوا أنبوبًا أسطوانيًّا حوله، ودفعوه في الحبوب، ثم استخدموا مكنسة صناعية لشفط الحبوب خارج الأسطوانة، وبذا حرَّروا الضحية.

(١٠٥) تدفُّق المُشاة والهروب عند الفزَع

عندما تزداد كثافة المُشاة على الرصيف، ماذا يفعل المُشاة لتفادي التدفُّق الفوضوي والمُعيق؟ عندما تحاول الجماهير الهروب من مكانٍ مغلق (مثل غرفة أو مبنًى أو استاد) أثناء حالة طوارئ أو عندما يُحاولون الدخول إلى مكانٍ مغلق أثناء انتظار حدَثٍ كبير أو أثناء حدَثٍ مُثير، لماذا تُصبح الحركة مُكبَّلة ومن المُحتمَل أن تكون قاتلة؟

الجواب: يمكن أن تكون حركة المُشاة نوعًا من التدفُّق الحُبيبي أو تدفُّق الموائع أيضًا. إذا أردتَ دراسة تدفُّق المُشاة فابحث عن نقطة مرتفعة يمكنك أن تراقِب منها قدرًا كبيرًا من التدفُّق.

وعندما تكون كثافة المشاة منخفضة، فسوف يختار كل شخصٍ أو جماعة (أو عائلة مثلًا) الطرق الأكثر مباشرةً لهدفهم على الرغم من أن الطريق لن يكون بالضرورة مباشرًا إذا كان مقصورًا على الأرصفة وأماكن عبور المُشاة. على سبيل المثال، إذا استطاع الأشخاص أن يسيروا عبْر حقلٍ في أحد المهرجانات ليصلوا إلى محلِّ الحلوى، فسوف يختارون على الأرجح طريقًا مباشرًا للمَحل. ومع ازدياد كثافة الناس، سيُصبح الطريق مُتعرِّجًا، وسيُضطرُّ مُحبُّو الحلوى إلى التوقُّف بين الحين والآخر لتجنُّب التصادُم مع الآخرين. ومع ازدياد الكثافة أكثر وأكثر، سيبدأ الناس في تجنُّب حارات التدفُّق التي تُشبِه الحارات المرورية في شارعٍ مزدوَج الحارات. ومع بدء هذا النوع من «التقسيم» أو «تنظيم الحارات المرورية» يتحرك الناس بطريقةٍ مُنسَّقة وبسرعة مُحدَّدة وبفاصلٍ جسدي معين لتجنُّب التصادم. وعندها يتحتَّم على مُحبي الحلوى التحرُّك في حارة تدفُّقٍ واحدة أو أكثر للاقتراب من محل الحلوى، وقد يكون الطريق في مُجمله أكثر طولًا من الطريق المباشر الأصلي.

وعندما يحاول عدد كبير من الأشخاص الهادئين الهروب من مكانٍ مُغلق من خلال مَمرٍّ خروج شديد الضِّيق، فإنهم عادةً ما يسمحون بعضهم لبعض بالتحرك في المسار بطريقةٍ بطيئة ومُستمرة. وإذا كان هؤلاء الناس في حالة فزَع لأنهم يحاولون الهروب من خطرٍ ما (مثل الحريق)، فعندما يحتشدون، يكوِّنون أقواسًا حول المخرج. ويمكن أن يكون ضغط الناس خلف الأقواس شديدًا للغاية لدرجة تُعيق الناس داخل الأقواس عن الحركة في أيِّ اتجاه، ولا يستطيعون رفع أذرعهم، ولا يستطيعون التنفُّس جيدًا، مما قد يقود إلى الإغماء أثناء الوقوف. وفي المواقف الخطيرة، من الممكن أن يتعرَّض الناس

الموجودون في الأقواس للسَّحق على نحوٍ مُميت إما بدفعهم نحو الحوائط أو الحواجز، أو من المُمكن أن تسقط الحوائط والحواجز، فيسقط الناس ليَلقوا حتفَهم. أما تدفُّق الناس ببطءٍ عبْر طريق الخروج، فإنه يجعل الأقواس في حالة استرخاء، لكن وقت الهروب سيكون أكبر ممَّا لو خرج الناس بسلاسة.

وإذا تسبَّب اندفاع الناس نحوَ المخرج في سقوط بعضهم، فستكون أجسادهم عقبةً عثرة بالنسبة للقادمين. وقد يكون تجمع الأجساد عاليًا على نحو يكفي لأن يشكل عائقًا، وهذا وضع خطير كما هو واضح.

ولتقليل الخطر بالنسبة للحشود الخارجة، من الممكن بناء مَخارج إضافية. إلا أنه عند تجمهر حشْد مذعور عند أحد المخارج، فإنهم قد لا يُدركون وجود مخارج أخرى مفتوحة. بعض الاستادات مُصمَّمة حاليًّا بممرات خروج خاصة لتقليل احتمالية التكدس، وهذه الممرات تتَّجِه للخارج ومُصممة بشكلٍ مُتعرِّج كي لا يُحتجَز أيُّ شخصٍ عند أحد الجدران.

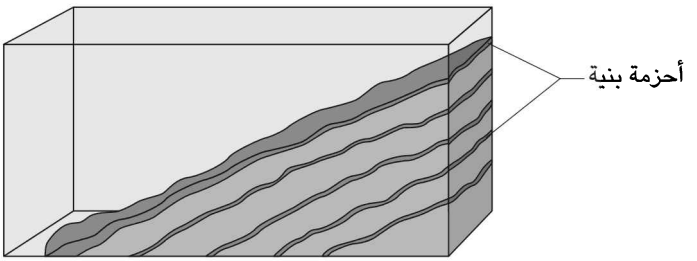
(١٠٦) أكوام الرمال والتدفُّق ذاتي التنظيم

على سطحٍ أفقي صُبَّ الرمال ببطءٍ في تيَّار كي تصنع كومةً من الرمل. بطبيعة الحال، ستُصبِح كومة الرمل أطولَ وأكثر اتِّساعًا. لماذا لا يمكن أن يتجاوز جانب الكومة زاوية مُعيَّنة؟

قَلِّب ببطءٍ حُبيبات مسحوق «تانج» (حبوب البرتقال المستخدمة لإعداد شراب الفطور بنكهة البرتقال) وحبيبات مسحوق «نِستي» (الحُبيبات السوداء المُستخدَمة لعمل شاي فوري) ثم صبَّ الخليط ببطءٍ في تيَّارٍ ضَيِّق. ستكوِّن الحُبيبات كومة مثل الرمال، إلَّا أنَّ حُبيبات نِستي ستتجمع في قاع الكومة. فما سبب الفصل؟

صبَّ ببطء مزيج حبيبات تانج ونِستي في أحد أطراف وعاءٍ شفَّاف ضيِّق وراقِب من خلال إحدى الجُدران الشفافة. لماذا تُكَوِّن الحبيبات أشرطةً تبادُليَّة من حُبيبات تانج ونِستي مع تراكم الكومة (شكل ٢-٣٢)؟

الجواب: عندما تبدأ الرمال المصبوبة في اتِّخاذ شكلٍ مخروطي، تتجمَّع الحُبيبات على المُنحدَر معًا بفعل الاحتكاك المُتبادَل، وتزداد تدريجيًّا زاوية المُنحدَر حتى تصِل إلى قيمةٍ حرجة. ثم تبدأ بعض الحبيبات في الانزلاق على المُنحدَر، وتأخذ في طريقها حبيباتٍ أُخرى إلى أن يحدُث انهيار في جزءٍ من المخروط. بعد ذلك تُصبح زاوية المنحدَر أصغر



شكل ٢-٣٢: بند ٢-١٠٦: تتكوَّن أشرطة بُنِّية وبرتقالية عند صبِّ مزيج المسحوق في كومة.

قيمةً، ويُقال عنها «زاوية الاسترخاء». وبهذه الطريقة، يُقال عن كومة الرمال إنها تُنظِّم نفسها — أي تُعدِّل نفسها — بحيث تكون عند زاوية الاسترخاء. لأنواع المساحيق والمواد الحُبيبيَّة الأخرى المُختلفة (مثل الخرَز الزجاجي، والبذور المُختلفة، والكسكسي الجاف، والبازلاء) زوايا استرخاء مختلفة، اعتمادًا على متوسط الحجم والشكل.

عند تقليبِ مَسحوقَين ثُم صبِّهما، سوف ينفصلان على الأرجح عند انزلاقهما على جانب الكوم ويَثبُتان في مكانهما. وعند صبِّ المزيج في وعاءٍ ضيِّق كما هو موصوف، ستتمكن من رؤية قطاع عرضي للكوم. وعندما يبدأ الانهيار، تميل الحُبيبات الأكبر حجمًا إلى التجمُّع في قاعدة المنحدَر، وتميل الحبيبات الأصغر حجمًا إلى الاحتباس على الجانب مُكوِّنة طبقة. ثم تبدأ الحبيبات الأكبر حجمًا في التراجُع إلى الجانب إلى أن تتكوَّن طبقةٌ من الحُبيبات الأكبر حجمًا. ومِن ثَمَّ، فإن سلسلة الانهيارات تُبدِّل بين تكوين طبقة من الحبيبات الأصغر حجمًا (مثل حبيبات تانج في مزيج حبيبات تانج ونِستي) وطبقة من الحبيبات الأكبر حجمًا.

والحائط الرأسي المُكوَّن من مادة حُبيبية سوف يتعرَّض لكل من الانهيار والهبوط. ولكي ترى ذلك، ضع أنبوبًا مفتوح الطرف في وضعٍ رأسي على طاولة واملأه بمادة حُبيبية. ثم اسحب الأنبوب فجأةً لأعلى لتُخليه من الحُبيبات. يجب أن تنظر سريعًا أو أن تَستخدِم كاميرا تصوير بالحركة البطيئة لتُسجل الحدَث. ستجد أن العمود ينهار في غضون نصف ثانية تقريبًا، لكن طريقة انهياره تعتمد على نسبة الارتفاع إلى العرض. فإذا كانت النسبة كبيرة، فسوف يتحرك السطح العلوي كله للخارج على الفور، تاركًا تلَّةً

ذات قمَّةٍ مُستديرة. وإذا كانت النسبة صغيرة، فسوف يهبط الجزء الخارجي من الكوم ثم يتبَعُه الجزء الداخلي، تاركًا تلَّةً ذات قمَّةٍ حادَّة.

(١٠٧) التدفُّقات في الساعات الرملية والصوامع

إذا وضعتَ ساعة رملية على ميزان حسَّاس لقياس وزنها، فهل تعتمد القراءة على إذا ما كان الرمل في حالة تدفُّق أم لا؟ يتدفَّق الرمل مثل الماء إلى حدٍّ بعيد. فلماذا إذن لا يُوجَد لدَينا ساعات زجاجية مائية؟

عند وضع المواد الحُبيبية، مثل حُبيبات الرمال والخرز الزجاجي، على منحدَرٍ مائلٍ بدرجةٍ كافية فإنها تتدفَّق لأسفل المُنحدَر. لكن إذا كان المُنحدَر خشنًا نسبيًّا، وكانت المواد الحبيبية تتكوَّن من جزيئات مختلفة الأحجام، فلماذا تستطيع «الواجهة» (الحافة السفلى من التدفُّق) الانقسام إلى «أصابع» تمتدُّ لأسفل المُنحدَر؟

افترِضْ أن المواد الحبيبية تتدفَّق لأسفل المُنحدَر أو المُنزلَق نحوَ عائق يُوقفها. فإذا كان إمداد المواد الحُبيبية مُستمرًّا، فلماذا يبدأ التدفُّق ويتوقَّف بين الحين والآخر؟

الجواب: إليكم جواب الساعة الرملية التقليدي. يتغيَّر وزن الساعة الرملية نسبيًّا عندما يبدأ تدفُّق الرمال وعندما ينتهي، لكنه يكون عاديًّا أثناء بقيَّة التدفُّق. (١) عندما يبدأ التدفُّق، وقبل اصطدام الحبيبات بالقاع، يكون الوزن أقلَّ من العادي؛ لأن الحُبيبات في حالة السقوط الحُرِّ لا تُسهم في الوزن. (٢) وبمجرَّد أن تبدأ الحبيبات الاصطدام، يؤدي تأثيرها إلى موازنة خسارة الوزن الناجم عن السقوط الحُر للحبيبات؛ ومِن ثَمَّ يظلُّ الوزن عاديًّا في مُعظم الوقت. (٣) عندما يُوشِك التدفُّق على الانتهاء وتكون الحُبيبات ما زالت في حالة اصطدام مع وجود قدْرٍ قليلٍ من الحبيبات في حالة سقوط حُر، يكون الوزن أكبر من العادي. وإليكم بعض التفاصيل التي تزيد الأمر تعقيدًا: (١) تبدأ الحُبيبات في التحرُّك فعليًّا قبل الوصول إلى العُنق، ويكون لها سرعة مبدئية عندما تبدأ في السقوط الحر. ومِن ثَمَّ، فإن سرعتها قُبيل الاصطدام أكبر من السرعة المُفترَضة في الجواب التقليدي. (٢) تتراكَم الرمال لأعلى؛ ومِن ثَمَّ تنتقل نقطة التصادم لتُصبح أعلى. وهذا التحوُّل يُغيِّر شدَّة الاصطدام ويُقلِّل أيضًا كمية الرمال الساقطة في أي لحظة. (٣) قد لا يكون التدفُّق سلِسًا لأسبابٍ عديدة؛ فالعُنق شديد الضِّيق قد يجعل الحُبيبات تكتظُّ لتُكوِّن أقواسًا تستمر لفترة وجيزة في عنق الساعة أو فوقها بقليل. وهذه الأقواس قد تسحب الهواء إلى

الجزء السفلي، فتزيد ضغط الهواء هناك إلى أن يهرُب الهواء عائدًا عبْر العنق، فيُوقف تدفق الرمال «نسبيًّا». وهذا التوقف قد يكون منتظمًا على نحوٍ يكفي لأن تُوصَف الساعة الرملية بأنها «تدق».

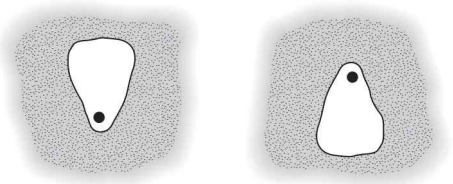
من المُمكن أيضًا أن تتكوَّن الأقواس عند تدفُّق الحُبيبات في الصومعة. في بعض الحالات، يتسبَّب التدفُّق المُتقطِّع في اهتزاز الصومعة فيما يُعرَف باسم «زلزال الصومعة». وإذا كان الاهتزاز كبيرًا على نحوٍ كافٍ فمن المُمكن أن يُصدِر صوتًا يُسمَّى «تزمير الصومعة» ومن الممكن أن يُسبِّب تَشقُّق الصومعة ويؤدي إلى انهيارها.

في الساعة الزجاجية المائية يعتمد مُعدل تدفق الماء من الجزء العلوي على ارتفاع الماء في ذلك الجزء، فكلما زاد ارتفاع الماء زاد مُعدل التدفُّق. وفي الساعة الرملية التي تكوِّن فيها حُبيبات الرمال أقواسًا لفترةٍ وجيزة، فإن التدفُّق من الجزء العلوي لا يمتُّ بصِلة لارتفاع الرمال في هذا الجزء، فما دامت الرمال مُتدفقة، يظلُّ مُعدل التدفُّق ثابتًا.

عندما يتدفَّق مزيج من الحُبيبات على أحد المُنحدَرات، فإن الجزيئات المُنحدِرة سريعًا تميل إلى الدوران في التدفُّق بطريقتَين: في القطاع العرضي الرأسي، تميل الحبيبات إلى الدوران إلى السطح وإلى المُقدِّمة وإلى أسفل المنحدَر. وعندما يتجاوزها التدفق، فإنها تُحاصَر ثم تعود إلى السطح وتُعيد الكرَّة. في هذه الأثناء، يمكن أن تتبايَن هذه المسارات الدوَّارة عبر عرض التدفُّق بحيث يصبح بعضها مستقيمًا أثناء نزول المنحدر وصعوده مرة أخرى، وينحني بعضها يسارًا أو يمينًا عند نظرنا إليها. تُشكِّل المسارات المستقيمة المُتجهة لأسفل ولأعلى الأصابع المُمتدَّة على المُنحدِرة، وتشكل المسارات المُنحنِية يمينًا ويسارًا الفراغ بين هذه الأصابع.

وإذا اصطدمَتِ الحُبيبات المُتدفِّقة على المنحدر بعائقٍ وتوقفت، فإن المواد تبدأ في التكدس، ويرتفع هذا التوقف لأعلى المنحدر إلى أن تُصبح كل المواد الموجودة على المنحدر ثابتة. ومِن ثَمَّ، نظرًا لثبات الإمداد تبدأ المواد الجديدة في التدفق نزولًا على «منحدر» المواد الثابتة لإعادة الدورة.

وإذا كان المنحدر خشنًا لدرجةٍ تجعل تدفق الحبيبات يترك موادَّ رسوبيةً على المنحدر، فبإمكانك زيادة مَيل المنحدر قليلًا والتسبُّب في انهيارات في كل مكان تُخلخَل فيه الطبقة الباقية. وإذا كانت الطبقة ضحلة، فإن الاضطراب (المُتمثل مثلًا في وكزةٍ من قلَم رصاص) يسفر عن منطقة انهيار تُشبِه دمعةً تمتدُّ لأسفل المنحدَر (انظر شكل ٢-٣٣أ). أما إذا



(أ) (ب)

شكل ٢-٣٣: بند ٢-١٠٧: نسَق انهيار في (أ) طبقة رقيقة و(ب) طبقة سميكة من المواد الحُبيبية.

كانت الطبقة سميكة، فإنَّ الاضطراب يُسفر عن انهيارٍ يُشبِه دمعةً تمتدُّ لأعلى المنحدر (انظر شكل ٢-٣٣ب).

(١٠٨) تأثير الجوز البرازيلي والمساحيق المُهتزَّة

ضع حبَّة جوز برازيلي (أو أي مكسرات كبيرة) في وعاءٍ وأضف كمية كافية من الفول السوداني (أو أي مكسَّرات صغيرة) لتملأ الوعاء إلى نصفه. عند هزِّ الوعاء عموديًّا لفترة، لماذا تصعد حبَّة الجوز البرازيلي لأعلى سطح الفول السوداني؟

في وعاءٍ كبير مليء بالفول الجاف، ادفن كُرة تنِس طاولة وضع كُرة مصنوعة من الرصاص أعلى الفول. إذا حرَّكتَ الفول في حركاتٍ دائرية بتدوير الوعاء أفقيًّا، فستختفي الكرة المصنوعة من الرصاص وستظهر كرة تنِس الطاولة، فما سبب هذا الاختلاف؟

يُمكن أن نرى أمرًا مُشابهًا عند خلط الدقيق مع الدهون لإعداد المُعجَّنات. فمن أجل كشف كُتَل الدهن المُتبقية، قد يَهزُّ الطاهي إناء الخلط، فترتفع الكُتَل إلى سطح الدقيق. وكانت النساء الأستراليات الأصليَّات يَستخدمْنَ أسلوبًا مُشابهًا (الغربلة) لفصل بذور العشب القابلة للأكل من الخليط المَبدئي المَمزوج بالتُّراب. فكانت المرأة تربتُ على الإناء المسطح الذي يحمل الخليط أو تَهزُّه برِفق حتى تتجمَّع البذور في صورة كومة ويُكوِّن التراب كومة أخرى.

صُبَّ بعضًا من مسحوق تانج (حُبيبات البرتقال المُستخدمة في مشروب الفطور المحلى بطعم البرتقال) وقدرًا من مسحوق نِستي (الحُبيبات السوداء المُستخدَمة في إعداد الشاي الفوري) في وعاءٍ شفَّاف، وأغلِق الوعاء، وهُزَّ المزيج. على الرغم من أنك تُحاول بقوَّة توزيع حبيبات تانج بالتَّساوي وعلى نحوٍ عشوائي داخل حُبيبات نِستي، فستجِد دائمًا أنَّ حُبيبات تانج البرتقالية تُشكِّل كيانات مُنعزلة داخل حُبيبات نستي. فلماذا لا تنتشِر؟

الجواب: يُوجَد عاملان يتسبَّبان في صعود الجوز البرازيلي في وعاء الفول السوداني؛ العامل الأول: هو أنه عند هزِّ الجوز عموديًّا، من المُحتمَل أن يقع الفول السوداني لصِغَر حجمه في الفضاء الموجود أسفل الجوز البرازيلي، فيُساهم في ارتفاعه مع كلِّ هزة. ولكي يهبط الجوز البرازيلي، لا بدَّ أن تُخلي الطريق الكثير من حبَّات الفول السوداني الأصغر حجمًا، وهذا أمر غير مُحتَمَل الحدوث. ومِن ثَمَّ، تعزز الاحتمالية صعود الجوز البرازيلي إلى السطح العلوي. ويمكن للجوز البرازيلي أن يصعد حتى لو كان مع مجموعة أشياء ذات كثافةٍ أقلَّ نسبيًّا.

والعامل الثاني لصعود الجوز هو: دوَران الفول السوداني الناتج عن الذَّبذبات العمودية؛ فالفول السوداني الموجود في مركز الوعاء يميل إلى التحرُّك لأعلى، والفول السوداني القريب من جدار الوعاء الذي تُعاق حركته بفعل الجدار يندفع لأسفل بفعل تدفُّق الفول السوداني الموجود في المركز لأعلى. ويُمكن أن يدور الجوز البرازيلي ويصعد للقمَّة قُرب المركز.

أما وضع تجربة الفول فمُختلف من حيث أمرَين: فكرة الرصاص «أكثر» كثافة بكثيرٍ من الفول، والاحتكاك بين حبَّات الفول أقل من الاحتكاك الموجود بين حبات الفول السوداني بسبب السطح الزلِق. وعند تدوير الوعاء أو هزِّه، سوف تشقُّ كُرة الرصاص طريقها في الفول، وتجعله ينزلق بسهولةٍ بعيدًا عن طريقها. وإذا استطعتَ بطريقةٍ ما تقليل الاحتكاك بين حبَّات الفول على نحوٍ أكبر، فسوف تتصرَّف حبَّات الفول كما لو كانت سائلًا ولن يكون أمرًا مفاجئًا أن ترى كرة الرصاص تغطس وكرة تنس الطاولة تظهر على السطح.

إذا كان لدَيك مزيج من مادَّتَين، إحداهما أكبر كثيرًا من الأخرى، فقد تجد أنَّ المادة الأكبر ترتفِع تدريجيًّا أعلى المادة الأصغر عند اضطراب الخليط أحيانًا وليس عند هزِّه. وعادةً يحدُث هذا الانفصال بين المواد في عبوات مُنتجات الطعام المكوَّنة من مادَّتَين (أو أكثر) مُختلفتَي الحجم. وهذا الأمر يُصيب مُنتجي هذه المُنتجات بالجنون؛ لأنهم يريدون

توزيعًا مُتساويًا للمواد عند فتح العبوة. وكلُّ اضطرابٍ عرضي أثناء إنتاج وشحن وشراء العبوة يجعل المادة الأصغر حجمًا تنتقل إلى الفراغات الموجودة أسفل المادة الأكبر حجمًا.

عند هزِّ مزيج حبيبات تانج ونِستي تظلُّ حبيبات تانج الأصغر حجمًا فوق حبيبات نِستي الأكبر حجمًا. وتُوجَد آليَّتان من المُحتمَل أن تكونا مسئولتَين عن عدَم قُدرة حبيبات تانج على الانتشار: إحدى هاتَين الآليَّتَين هي الآلية نفسها المسئولة عن تسلق الجوز البرازيلي لأعلى بعض حبَّات الفول السوداني. أما الآلية الأخرى فتنبُع عن طريق الدوَران التي تنطلق في المزيج بفعل الذبذبات وطريقة انتقال القوى المُؤثرة الناتجة في كتلة المزيج. وتسيطر الآلية الأولى إذا كانت سَعة الذبذبات كبيرة (عند هزِّ الوعاء لأعلى ولأسفل بقوة). وتسيطر الآلية الثانية إذا كانت سَعة الذبذبات صغيرة (ضرب الوعاء بظفر الإصبع بقوة كافية لتحريك الحُبيبات).

عند توزيع طبقةٍ من حُبيبات تانج فوق طبقٍ يهتزُّ رأسيًّا، فإن الحبيبات تميل إلى التجمع في صورة أكوام. وبمجرَّد البدء تميل الأكوام الأصغر حجمًا إلى التحرُّك نحوَ الأكوام الأكبر حجمًا وتنضمُّ إليها. ويبدو أنَّ هذا التحرُّك يعود إلى الذبذبات النسبية التي يتعرَّض لها الطبَق تحت الكوم الأكبر (الذبذبات الأصغر) والكوم الأصغر (الذبذبات الأكبر). تميل الذبذبات الأكبر إلى الإطاحة بعددٍ أكبر من الحُبيبات في الهواء. وتميل الحبيبات الهابطة بالقُرب من الكوم الأكبر إلى البقاء في مكانها على نحوٍ يفوق تلك الحُبيبات الهابطة بعيدًا عن الكوم الأكبر. ومِن ثَمَّ، تُوجَد حركة صافية للحبيبات نحوَ الكوم الأكبر.

إليك هذا اللُّغز المُتبقي: املأ إلى المنتصف برطمانًا أسطوانيًّا صغيرًا نسبيًّا بالملح وأضِف صامولة سُداسية معدنية ودبُّوس ضغط (دبوس لوحة الإعلانات ذا الرأس البلاستيكية). إذا حملتَ الأسطوانة عموديًّا وهززتَها رأسيًّا، فسوف تصعد الصامولة لأعلى الملح ويختفي دبوس الضغط عن الأنظار. أما إذا أمسكتَ الأسطوانة أفقيًّا وهززتَها أفقيًّا، فسوف يصعد دبوس الضغط لأعلى الملح وتختفي الصامولة عن الأنظار.

(١٠٩) بالون الانهيار الجليدي

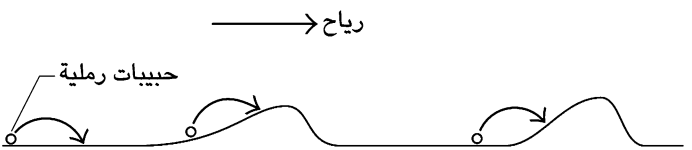
يَستخدِم بعضُ مُتزلِّجي الجليد العالقون في الانهيارات الجليدية «بالون الانهيار الجليدي». وهذا البالون الذي يَحملونه في حقيبة الظَّهر يكون في البداية غيرَ منفوخ. وعند اقتراب الانهيار الجليدي، يسحَبُ المُتزلِّج حبل فتح البالون لملئه بغاز النيتروجين من الأسطوانة، ويسحَب تدفُّق النيتروجين الهواء من خارج البالون. وعندما يعلَق المُتزلِّج والبالون في

الانهيار الجليدي، فإنهما يتحرَّكان إلى أعلى التدفُّق بدلًا من الدفن تحته. وبهذه الطريقة يكون لدى المُتزلِّج فرصة أكبر في النجاة. فلماذا يتحرَّك المُتزلِّج إلى قمَّة التدفُّق؟

الجواب: عندما يكون بالون الانهيار الجليدي مُتَّصِلًا بظهر المُتزلِّج العالِق في التدفُّق الجليدي، فإن هذا المُتزلج يصبح فعليًّا شبيهًا بالجوز البرازيلي الموجود في وعاء فول سوداني مُهتز؛ فالبالون يوفِّر قوة طفو لأعلى؛ لأن الغاز الذي يحمله أقلُّ كثافةً من الجليد المُتدفق. إلا أن هذه القوة غير كافية لرفع المُتزلِّج لأعلى الجليد. بل ما يرفع المُتزلِّج هو زيادة الحجم الناتجة عن البالون؛ حيث نجد أن الجوز البرازيلي (في هذه الحالة المُتزلج والبالون المنفوخ) أكبر كثيرًا من الفول السوداني المُحيط (كتل الجليد).

(١١٠) دوَّامات الرمال والحركة

لماذا يُمكن أن تتكوَّن تموُّجات في الرمال على أرضية صحراوية (أو في قاع نهر)؟ ما الذي يُحدِّد الطول المَوجي للتموُّجات؛ أي متوسط المسافة الفاصلة بينها؟ كيف يمكن لنبات، مثل كتل الحشائش، أن يُغير نسَق التموُّجات؟ لماذا لا تظهر التموُّجات عادةً في قاع الجليد؟



شكل ٢-٣٤: بند ٢-١١٠: القفز الرملي لحُبيبات الرمال يُسفر عن تكوُّن التموُّجات الرملية.

الجواب: عندما تكون السرعة عاليةً على نحوٍ كافٍ، فإن الرياح العابرة على طبقة رمال (جافة) مُسطَّحة مبدئيًّا يمكن أن تُحرِّك حبيبات الرمال. ويمكن أن «تزحف» الحبيبات على الطبقة أو أن تتعرَّض لـ «القفز الرملي» حيث تقفز، ومن المُمكن أن ترتد. وإذا هبطت الحُبيبات على جزءٍ مُسطَّح من الطبقة، فإنها تقفز ثانيةً، أما إذا هبطت على جزءٍ مُرتفِع من الطبقة (نتوء تَكوَّن بالصدفة)، فمن الممكن أن تعلَق (انظر شكل ٢-٣٤). وعندما يزداد النُّتوء ارتفاعًا، فإنه يجتذب المزيد من الحُبيبات ويحمي الحُبيبات

أيضًا على الجانب المَحمي من الرياح. من الممكن أيضًا أن تقفز بعض الحبيبات البعيدة نسبيًّا عن اتجاه الرياح ومِن ثَمَّ يُمكن أن تعلَق بنتوءٍ آخر. يمكن أن يزداد حجم النتوء إذا كان الجانب المَحمي من الرياح مُنحدرًا، وكان الجانب المُواجه للرياح أكثر انحدارًا نسبيًّا. وتميل الرياح المُنحرفة فوق قمَّة النتوء إلى التكسُّر في صورة دوَّامة عند الجانب المَحمي من الرياح، وهذا يدفع الهواء «أعلى» الجانب المَحمي من الرياح، ويزيل الرمال للحفاظ على الجبهة المُنحدِرة. ومع تكوُّن النتوء، فإنه يتحرَّك أيضًا في اتجاه الرياح؛ لأن الحُبيبات في الجانب المُواجه للرياح يمكن أن تقفز فوق القمة. تتحرَّك بعض النتوءات بمُعدَّلٍ أسرع من غيرها، وتندمج كثيرٌ من النتوءات أو على الأقل تقترِب كثيرًا على نحوٍ يسمح لبعضها بالتأثير على بعض.

والآن لنتقدَّم بالأيام أو الأسابيع، أو ربما بالسِّنين. سنجد أنَّ هذا النشاط يُسفر تدريجيًّا عن الأشكال المُتموِّجة التي نراها في الرمال. وبمجرد تكوُّن تلك التموُّجات تظلُّ محفوظة بفعل الرياح والقفز الرملي. وبطبيعة الحال، إذا تغيَّرت الرياح جذريًّا، فمن الممكن أن يحلَّ شكل جديد محلَّ الشكل القديم.

يمكن أن يَسير تكوُّن الشكل بمُعدَّل أسرع إذا كانت الرمال مغمورةً تحت مجرًى مائي مُعدَّل تدفُّقه مُنتظم نسبيًّا. في هذه الحالة قد تتمكَّن فعليًّا من رؤية تكوُّن التموُّجات في غضون دقائق قليلة.

ومع هبوب الرياح حول النباتات، وتكوُّن التموُّجات (أو الدوَّامات الصغيرة)، يختلف اتجاه التموُّجات والمسافة بينها عن تلك الموجودة على جانب النباتات المُواجِه للرياح.

من الممكن أيضًا أن يحدث القفز الرملي مع رقائق الثلج في حقلٍ جليدي. ورغم ذلك، فإن التموُّجات لا تظهر (أو ليست واضحة أو شائعة على أقل تقدير) لسببَين: (١) تميل الرقاقة إلى الالتصاق بأي نقطةٍ تصطدِم بها سواء أكانت نتوءًا جليديًّا بارزًا أم لا. (٢) يميل الحقل الجليدي إلى تكوين قشرة جليدية لا سيما بعد يومٍ مُشمِس؛ ومِن ثَمَّ فلا يُمكن حدوث القفز الرملي. ورغم ذلك، فقبل تكوُّن القشرة، يمكن أن تترُك الرياح القوية أشكالًا على الجليد، لا سيما إذا كوَّنت دوَّامات هوائية على جانب العائق المَحمي من الرياح.

(١١١) الكثبان الرملية

لماذا تتكوَّن الكثبان الرملية؟ لماذا تستطيع التحرُّك؟ متى يزحَف الكثيب الرملي إلى غيره؟ وكيف تستطيع الكثبان الاندماج ثم الانفصال؟ كيف يتسبَّب الكثيب الرملي في انشقاق

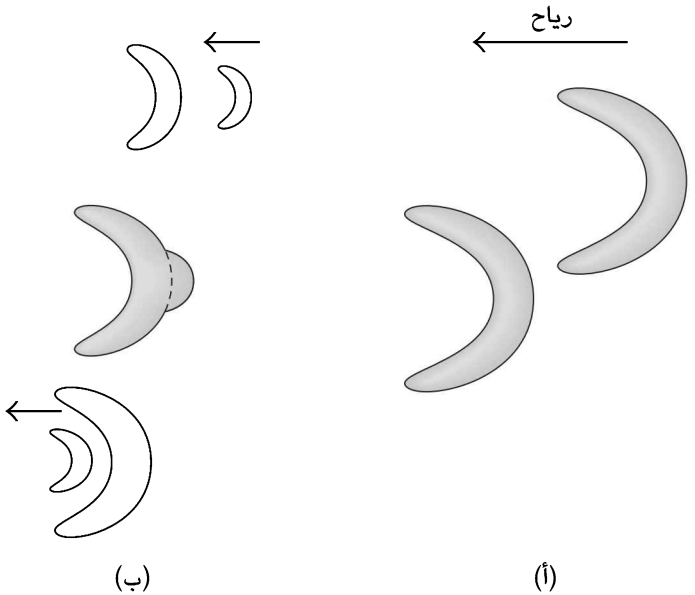
غيره من أجل توفير ممرٍّ للكثيب الرملي الأول؟ لماذا الكثبان الرملية في بعض الصحاري، كما في ليبيا، مُتراصَّة في صورة خطوط شِبه متوازية كما تظهرها الصور المُلتقطة بالأقمار الصناعية؟

الجواب: «الكثبان الطولية» هي تلال طويلة تتراصُّ مع اتجاه الرياح السائدة. أما «الكثبان البرخانية» فهي كثبان ذات شكلٍ هلالي وعمودية على الرياح، ولها «قرون» (أطراف) تُشير إلى اتِّجاه الرياح. كل الكثبان الرملية ناتجة عن دوَّامات رملية بسيطة، وعن قُدرة الرياح على قذف حُبيبات الرمال. على مدار سنواتٍ كثيرة، ربما قرون، تتجمَّع الحبيبات في التِّلال المُتزايدة في النمو. وبمجرَّد تكوُّن أحد التلال، فإنه لا يتخلى عن أي حبيبات رملية حتى إنَّ التِّلال المنافسة تتلاشى أو لا تكاد تبدأ فعليًّا.

عندما تُفكِّر في كثيبٍ رملي، فإنك على الأرجح تتخيَّل كثيبًا برخانيًّا (كثيب رملي مُتحرك هلالي الشكل) على الرغم من أن هذا النوع نادر جدًّا. والكثيب البرخاني يسير تدريجيًّا على الصحراء (أو عبْر الطُّرق والقرى الصغيرة)؛ لأن الرياح تقذف حُبيبات الرمال في الجانب المُواجه للرياح وتُلقي بها في الجانب المَحمي من الرياح. وفي النهاية يُصبح الجانب المَحمي من الرياح شديد الانحدار، ثم تبدأ الانهيارات في إنزال الرمال على المُنحدر نحو القاعدة، فتقلُّ زاوية الميل ليكتسِب المُنحدَر التوازُن. وعلى مدار السنوات، يتحرَّك الكثيب الرملي في الاتجاه العام للرياح.

تُظهِر الصور الجوية لحقول بعض الكثبان البرخانية أنَّ كثيرًا من الكثبان تتَّخِذ وضعياتٍ غريبة؛ حيث يكون طرف أحد الكثبان أمام القسم الأوسط من كثيبٍ رملي آخر (انظر شكل ٢-٣٥أ). وتعود هذه المُحاذاة إلى الكيفية التي تنحرِف بها الرياح بفعل الكثيب الرملي المُعاكس للرياح. ومع مرور وقتٍ كافٍ، فإن انحراف الرياح يمكن أن يعيد تشكيل الكثيب الرملي المُواجِه للرياح بحيث يتسبَّب في شكل القسم الأوسط ذي الطرف.

يكاد يكون من المستحيل أن يُشاهد المرء في حياته استحواذ كثيبٍ رملي مُتحرك على آخر، لكن هذه العملية يمكن أن تحدُث في غضون دقائق إذا تكوَّنت كثبان مُصغَّرة في نهرٍ مائي مُتدفق. والتفاعلات بين الكثيبَين الرمليَّين تعود إلى تغيُّر التدفُّق الناتج عن الكثيب الرملي المعاكس للتيار. في هذه الحالة من الممكن أن يمحوَ التدفق مركز الكثيب الرملي السائر مع التيار ليوفِّر (ظاهريًّا) ممرًّا. وبدلًا من ذلك، من الممكن أن يمتزِج كثيب رملي صغير معاكس للتيار مع كثيبٍ رملي أكبر سائر مع التيار، ثم قد يظهر كثيب رملي صغير



شكل ٢-٣٥: بند ٢-١١١: (أ) منظور علوي لكثيبَين رمليَّين برخانيَّين. (ب) تصور خادع لكثيب رملي صغير يمرُّ خلال كثيبٍ رملي أكبر.

من مُؤخرة الكثيب الرملي (انظر شكل ٢-٣٥ب). وفي العموم، تُعطي العملية تصوُّرًا خادعًا بأن الكثيب الرملي الصغير مرَّ خلال الكثيب الرملي الأكبر.

أما سبب الترتيب شِبه المُتوازي للكثبان الطولية فيعود إلى تكوُّن الدوَّامات المعروفة باسم «دوران لانجموير». فعند تحرُّك الرياح على مُتَّسعٍ مُسطَّح، فإنها تميل إلى التكسُّر إلى أنابيب دوَّامات أفقية. إذا نظرتَ عبْر إحدى هذه الأنابيب في اتجاه الرياح (وكان الهواء يتميَّز نسبيًّا بوجود أثرٍ دخاني)، فستجد أن الهواء يدور تدريجيًّا إما في اتجاه عقارب الساعة أو عكس اتجاه عقارب الساعة أثناء ابتعاده عنك، وتتَّخِذ الأنابيب المجاورة اتجاهات دوران مُعاكسة. وإذا فرضْنا أنَّنا نظرنا عبْر أنبوبٍ في اتجاه عقارب الساعة، فسيكون تدفُّق الهواء عبْر الأرض ناحية اليسار. يكون تدفُّق الأنبوب المُجاور الموجود على اليسار

عكس اتجاه عقارب الساعة؛ ومِن ثَمَّ فإن التدفُّق على الأرض يتَّجِه نحو اليمين. ونظرًا لتجمُّع هذَين التدفُّقَين الأرضيَّين، فإنهما يميلان إلى نقل الرمال إلى نقطة التجمُّع؛ أي إلى المكان الذي تتكوَّن فيه الكثبان الطولية. على الجانب الآخر من الأنبوب، لا تتجمَّع التدفُّقات الأرضية ومِن ثَمَّ لا تتكوَّن الكثبان. ونظرًا لأنَّ الأنابيب شِبه مُستقيمة، فإن الكثبان الطولية تتكوَّن على طول خطوط شِبه مستقيمة يفصل بينها مسافة تبلُغ ضعف عرض الأنبوب.

(١١٢) تضاريس «ياردانج» والقطعات الرملية الأخرى

لماذا على الشاطئ الرملي تميل معظم الأحجار مع الرياح السائدة، ولماذا يمتدُّ حَيد رملي مُكوَّن من كثيرٍ من الأحجار؟ على بعض الشواطئ يمكن أن ترى تكوينات رملية شبيهة بالأبراج، مكوَّنة من أعمدة من الرمل الرطب تمتدُّ من مستوى السطح العام، وعادةً ما يكون واضحًا وجود طبقاتٍ مُختلفة من الرمال. تبدو هذه الأبراج وكأنها قلاع منحوتة في كعكة مُتعدِّدة الطبقات. وعادةً ما يكون الرمل المُحيط بها جافًّا.

في الصحاري الرملية يمكن أن نجد بعضًا من أجمل وأغرب التكوينات في العالم، ألا وهي تضاريس «ياردانج». وهذه التضاريس تكوينات صخرية تبرُز من الرمال وتُشبِه بدَن السفينة المقلوب، ويكون بعضها في حجم اليد، والبعض الآخر يبلُغ طوله مئات الأمتار. تتكوَّن هذه التضاريس على كوكب الأرض ومن المُمكن العثور عليها أيضًا في المريخ. فكيف تتكوَّن تضاريس ياردانج؟

الجواب: عندما تهبُّ الرياح على حجَر شاطئ يقِف عاليًا نسبيًّا على رمال جافة، فإنَّ الرياح تحفُر حفرة أمام الحجَر وتسقط بعض الرمال لتكوِّن حيدًا خلف الحجَر. في النهاية، يَميل الحجَر نحو الحفرة ومِن ثَمَّ مع اتِّجاه الرياح. وإذا كان الحجَر مُسطَّحًا في أعلاه، فسوف تحفُر الرياح الرمال من حول الحجَر تاركةً الحجَر على قاعدة. ثم تحفُر الرياح الرمال الموجودة أمام القاعدة حتى يميل الحجَر مع اتِّجاه الرياح. ولا تقوم الرياح بالحفْر أو الإمالة إذا كانت الرمال رطبة؛ لأن «الجسور السائلة» التي تربط الحبيبات الرملية بعضها ببعض تجعل الحبيبات شديدة التماسُك على نحوٍ يحُول دون نقلِها من أماكنها بسهولة. ورغم ذلك، تستطيع الرياح تدريجيًّا تجفيف الرمال الخارجية، وعندها يمكن أن تتعرَّض الحبيبات للكشْح أو الصنفرة على يد الحُبيبات المحمولة في الهواء. وبطبيعة الحال تستطيع التيارات المائية، مثل الأمواج المُتلاطمة، تعرية الرمال المحيطة بالأحجار.

تتكون الأبراج في الرمال المُتماسكة بفعل الماء القادم إما من الهطول أو الرذاذ أو التسرُّب من رمالٍ مُنخفضة نسبيًّا. والإمداد من المصدرَين الأخيرَين قد يحدُث فقط في المناطق المُنعزلة؛ حيث تصبح تلك المناطق رطبة، وتُصبح الرمال مُتماسِكة. وقد تكون المناطق مُغطَّاة بالرمال الجافة لفترة، لكن في النهاية تُعريها الرياح وتصقلها الرمال المحمولة عبر الهواء. والنتيجة النهائية تكون أبراجًا فردية أو تلالًا.

تضاريس ياردانج هي نتيجة للتعرية التي تُحدِثها الرياح والرمال. فالرياح تحمِل حُبيبات الرمال، وتُعرِّي الصخر، ثم تصقل الصخر بتيارات من حُبيبات الرمال. وتدريجيًّا يتقلص الصخر ويصبح هيكلًا ضيقًا مُحاذيًا للرياح السائدة. وكثير من تضاريس ياردانج تُشبِه القطة المُتَّكِئة. وفي الواقع، ربما استُلهم تمثال أبو الهول من تضاريس ياردانج التي وجدها قدماء المصريين في الصحراء المُتاخِمة لنهر النيل.

(١١٣) أسوار الجليد والترسيبات الهوائية

السور الجليدي هو سور أو صفٌّ من النباتات يُوضع لتبقى الطرُق أو السكك الحديدية خالية من أكوام الثلوج. فأين يجِب وضع هذا الحاجز؟ ألن يكون الجدار الصُّلب أكثر فعالية من السور ذي الفراغات المفتوحة؟ أم هل يقع الاختيار على السور لأنه أقلُّ تكلفة؟ كيف يتراكم الجليد حول عائقٍ مثل جلمود الصخر أو جذع شجرة؟ وتحديدًا ما الذي يتحكَّم في الحُفَر أو المناطق الدائرية الخالية من الجليد التي يُمكن أن تتكوَّن حول جذوع الأشجار؟

الجواب: الهدف من السور الجليدي هو إجبار الرياح على ترسيب الجليد قبل أن تصل إلى الطريق مثلًا؛ ومِن ثَمَّ لا بدَّ من تشييده على جانب الطريق المعاكس للرياح. والحائط الصُّلب ليس بالفعالية نفسها؛ لأنه يُجبر الرياح على الدوران لأعلى في الهواء، وهذا يجعل الجليد محمولًا في الهواء. ومِن ثَمَّ، فالسور الذي يكون نصفه تقريبًا مفتوحًا أمام الرياح ويرتفع فوق الأرض بضعة سنتيمترات على الأقل هو الأفضل.

في البداية يكوِّن سور الجليد دوَّامات صغيرة على جانبه الأمامي وجانبه الخلفي، وهذا يجعل الجانبَين شِبه خاليَين من الجليد، ويمكنك رؤية هذا التأثير في بداية موسم الجليد. تتكوَّن أكوام الجليد على جانبَي السور، لكن المناطق المُجاورة للسور يكون فيها الجليد أقلَّ بكثير. والفجوة الموجودة أسفل السور تسمح لبعض الرياح بتكوين الدوَّامات عند الجانب الخلفي من السور، ممَّا يجعل هذا الجانب خاليًا من الجليد.

ومع تزايد تراكم الجليد (نموه)، تمتدُّ قمَّة كوم الثلوج على كلا جانبَي السور نحوَ السور حتى تُلامِسه. وبعد ذلك ترى كوم جليد مُتواصلًا تكمُن ذروته عند السور، لكن ما لا تراه هو التجويف المتروك على جانبي السور. وبمجرَّد تكوُّن الكوم المُتواصل، لا تعود للسور فائدة.

ومع انحراف الرياح حول الجلمود (أو حتى حول الصخور والأشياء الأصغر حجمًا)، فإنها تميل إلى إلقاء الثلج عند المُؤخِّرة وتجويف الثلج عند المُقدِّمة وعلى الجانبَين.

والانخفاضات الدائرية أو الحلقات الخالية من الجليد المُحيطة بجذع الشجرة لها سببان، ألا وهما: الشجرة تُعدُّ عقبةً أمام الرياح التي تدور حول الجذع. وهذه الحركة تجرف الجليد الذي يسقط بالقُرب من الجذع. في أثناء النهار، تُصبح الشجرة دافئةً بامتصاص الأشعة تحت الحمراء الموجودة في ضوء الشمس، ثم تعكس الفروع والجذوع بعضًا من هذه الطاقة إلى الأرض. ونظرًا لأن الجليد مُستقبِل ممتاز للأشعة تحت الحمراء، فإنه يمتصُّ كل ما يسقط عليه منها تقريبًا ويميل إلى التضاؤل أثناء الذَّوَبان.

(١١٤) الانهيارات الثلجيَّة

عند بدء الانهيار الثلجي، كيف ينزل الثَّلْج على المُنحدَر، وكيف يمكن منعه للحيلولة دون تدمير قريةٍ على مقربة من سفح المُنحدَر؟

الجواب: بمُجرَّد بدء الانهيار يُصبح الثلج، لا سيما الثلج المسحوق، محمولًا على الهواء، ويتقدَّم كسحابة جسيمات مُضطربة. وسرعان ما تبدأ في أسْر الهواء («سَحْب» الهواء) الموجود في التدفق، فتُخفِّف تركيز جزيئات الثلج، كما تلتقط أيضًا المزيد من الثلج من المُنحدَر. وتكون سُرعة الجسيمات أعلى ما تكون فوق مستوى المنحدر نسبيًّا؛ أي أسفل قمَّة الانهيار بمسافةٍ كبيرة، لكن الجسيمات تتحرَّك على طُرق مُعقدة ومُتغيرة باستمرار بدلًا من النزول على المنحدَر مباشرة. ومن الممكن أن تتحرك مقدمة الانهيار الثلجي بسرعة ١٠٠ متر في الثانية، وقد يصل ارتفاع الانهيار الثلجي إلى ١٠٠ متر.

وتُقام على المنحدر حوائط مُرتفعة ذات دعامات خلفية متينة لتُوقِف الانهيار الثلجي، لكن لا بدَّ من استنزاف طاقة الانهيار الثلجي قبل وصوله إلى الحوائط. من أجل ذلك، تُشَيَّد أكوام قُرب قمَّة التلِّ من ناحية الحوائط. والغرَض من هذه الأكوام هو تغيير اتِّجاه حركة الثلج نحوَ الهواء، مثلما يُغيِّر مُنحدَر قفز التزلُّج اتجاه حركة القافز. وعندما يندفع الثلج على المنحدَر أسفل التلِّ نسبيًّا يكون قد فقد قدرًا كبيرًا من طاقته.

(١١٥) الانهيارات الأرضية ذات التدفُّقات الطويلة

عند انهيار مُنحدَرٍ صخري فإنه يُولِّد انهيارًا أرضيًّا كبيرًا، ويُمكن للحطام أن يهبط على منحدر مُعتدِل ثم ينتشر لعدة كيلومترات في الوادي المسطح، في حركةٍ يُطلَق عليها «التدفق» أو «تدفق الانهيار الأرضي». وفي الواقع، من المُمكن أن ينتشر الحُطام عبْر الوادي وأن يصعد المنحدَر في الجانب المُقابل. فلماذا لا يوقِف الاحتكاك بين الحطام وأرضية الوادي أو حوائط المنحدَر هذا الانهيار الأرضي سريعًا؟

الجواب: يتَّفِق مُعظم الخبراء على أن الانهيارات الأرضية التي تتجاوز حجمًا مُعينًا من المواد تتمتَّع بتدفُّقات كبيرة على نحوٍ مُدهش لأنها تنزلِق على طبقةٍ زلِقة. إلا أنه تُوجَد مقترحات كثيرة بشأن مُكوِّنات هذه الطبقة الزلقة. تمثَّلت إحدى هذه الفِكَر الشائعة في أنَّ المواد كانت تنزلِق على طبقةٍ من الهواء. إلا أنَّ الهواء من الممكن طردُه ظاهريًّا من المواد بسرعةٍ كبيرة، وهذه الآلية لا يمكن أن تُفسِّر الانهيارات الطويلة التدفُّقات التي حدثت على القمر.

ومن الفِكَر الأخرى أنَّ أمواج الضغط الموجودة داخل المواد ترفع المواد من على الأرض؛ ممَّا يُقلِّل الاحتكاك بين المواد والأرض. إلَّا أنَّ الدليل التجريبي لم يؤيد هذه الفكرة.

وعلى الأرجح فإنَّ أكثر الفِكَر ترجيحًا هي أنَّ المواد تتحرَّك على طبقةٍ رقيقة من الحطام المُهتزِّ الذي يشتمل على مواد مكشوطة من الأرض. وهذا الحطام المُهتَز يعمل بصورةٍ ما عمل الكُريات في المَحْمَل؛ ممَّا يفسر سِمتَين واضحتَين للانهيارات الأرضية، هما: (١) معظم المواد تنزل على المُنحدَر سليمة إلى حدٍّ كبير مع وجود طبَقتِها الأصلية المُغلِّفة لها. (٢) المواد المكشوطة من الأرض يُمكن أن تشتمِل على الماء؛ ممَّا يجعل الانزلاق سلسًا ويسمح بمزيدٍ من التدفُّق.

(١١٦) تساقط الصخور

يحدُث تساقط الصخور عندما تسقط صخرة أو مجموعة صخور من جانب أحد الجبال، وعادةً ما يكون هذا الجانب هو واجهة مُنحدَر صخري. فلماذا تسقُط الصخور، وما الذي يُحدد المكان الذي تبقى فيه الصخور في النهاية؟ عندما يحتوي تساقُط الصخور على صخورٍ كثيرة، من بينها صخور كبيرة وصخور صغيرة، لماذا تميل الصخور إلى التمايُز بحيث تُصبح الأكبر حجمًا أسفل المنحدَر والأصغر حجمًا أعلى المنحدَر؟

في يوليو ١٩٩٦، وقعَتْ حادثتان مُتعاقِبتان لتساقط صخور جرانيت عملاقة في مركز هابي آيلز الطبيعي بمُتَنزَّه يوسيميتي الوطني بولاية كاليفورنيا. انزلقَتْ كلُّ صخرة على منحدَر شديد الانحدار ثم تحركت كالقذيفة واصطدمت بالأرض بعد سقوطها من ارتفاعٍ يُقارب ٥٥٠ مترًا. وأسفر الاصطدام عن أمواج زلزالية امتدَّت لنطاقٍ بعيد بلغ نحو ٢٠٠ كيلومتر. إلا أنَّ الأمر الأكثر دهشةً كان الدَّمار الذي خلَّفتْه الصخور أسفلَ الوادي لمسافةٍ تصل إلى ٣٠٠ متر من مكان هبوطها؛ حيث تَعرَّض ما يزيد عن ١٠٠٠ شجرة إلى الاقتلاع أو الكسر، وتهدَّم جِسر ومطعم وجبات خفيفة، ولقِيَ شخص مصرَعه، وأُصيب العديد من الأشخاص. فكيف تسبَّبت صخور الجرانيت في هذا الدَّمار الكبير على مسافة ٣٠٠ متر من سقوطها؟

الجواب: مُعظم حوادث تساقط الصخور تحدُث بفعل تجوية الصخور القاعدية. (١) يمكن للشقوق التي تجمع الماء أن تتَّسِع وتمتدَّ عندما يتجمَّد الماء؛ لأنَّ الماء يتمدَّد عند تجمُّده. (٢) يَضعف الصخر بفعل التجوية الكيميائية، لا سيما في ظلِّ وجود الرطوبة. وعلى الرغم من إمكانية تعرُّض أي صخور للتجوية، فإن تساقُط الصخور لا يحدُث إلا عندما تكون واجهة الصخرة القاعدية مُتحدِّرة وعندما يظلُّ جزء من الصخرة مدعومًا مع توجُّه الشقوق إلى الواجهة. عند هذه المرحلة، ينهار الجزء المُتعلِّقة به الصخرة، أو الذي يدعمها، وتتحرَّر الصخرة.

واعتمادًا على الظروف، فمن المُمكن أن يسقطَ الحجَر المُتحرِّر في الهواء ويرتدَّ نازلًا على منحدرٍ شديد الانحدار أو أن يسقط على منحدرٍ متوسط الانحدار أو أن ينزلق على منحدرٍ ضحل. ومن الممكن أيضًا أن يتفتَّت إلى صخورٍ صغيرة. وفي حالة حدوث أيٍّ من هذه النتائج، فإنه يفقد كثيرًا من طاقته عند الاصطدام. ومن المُمكن أيضًا أن يفقد طاقته إذا اصطدم بالأشجار، ومن ثَمَّ غالبًا ما يُزرَع صفٌّ من الأشجار كحاجزٍ أمام انزلاق الصخور.

عندما يتضمَّن تساقُط الصخور صخورًا مُتباينة الأحجام، من المُمكن أن تنفصل الصخور على المنحدر؛ لأن الصخور الأكبر حجمًا تصِل إلى أسفل المُنحدَر بينما تعلق الصخور الأصغر حجمًا في النقاط المُنخفِضة (الشقوق) في المنحدَر. وفي العموم، تميل المواد على طول المنحدَر إلى التمايُز فتكون الناعمة في الأعلى والخشنة في الأسفل. ومن المُفاجئ أن الصخور العُليا في بعض حوادث تساقط الصخور تقبَع في النهاية على مسافةٍ كبيرة من الصخور الأخرى، وقد يكون سبَبُ ذلك اكتسابَها الطاقة من الصخور الأخرى التي تصطدم بها من الخلف أثناء عملية الانزلاق والتدحرُج عند السقوط.

في تساقط الصخور الذي حدَث في مركز هابي آيلز الطبيعي فقد أسفر ارتطام كلٍّ حجَر جرانيتي عن «انفجار هوائي»، وهو مَوجة ضغط تتحرَّك عبْر الهواء من نقطة التصادُم. وكان الانفجار الهوائي الناتج عن الصخرة الثانية، التي كان حجمها حوالي ثلاثة أضعاف كتلة الصخرة الأولى، شديد التدمير؛ إذ أسفرَ عن اندفاع رياحٍ سُرعتها ١٢٠ مترًا في الثانية عبر الأشجار. في الواقع، كان الانفجار الهوائي الناتج عن الصخرة الثانية أسرع من الصوت (لقد كان موجة صدمة)؛ لأنَّ الأتربة التي أثارها الاصطدام الأول خفضت سرعة الصوت في الهواء عن قيمتها الطبيعية التي تبلُغ ٣٤٠ مترًا في الثانية إلى حوالي ٢٢٠ مترًا في الثانية. وقُرب التصادُم، تحرَّك الاندفاع الهوائي بسرعة تزيد عن ٢٢٠ مترًا في الثانية، ومن ثَمَّ كان أسرع من الصوت.

(١١٧) الأعلام والأشرطة المُرفرِفة

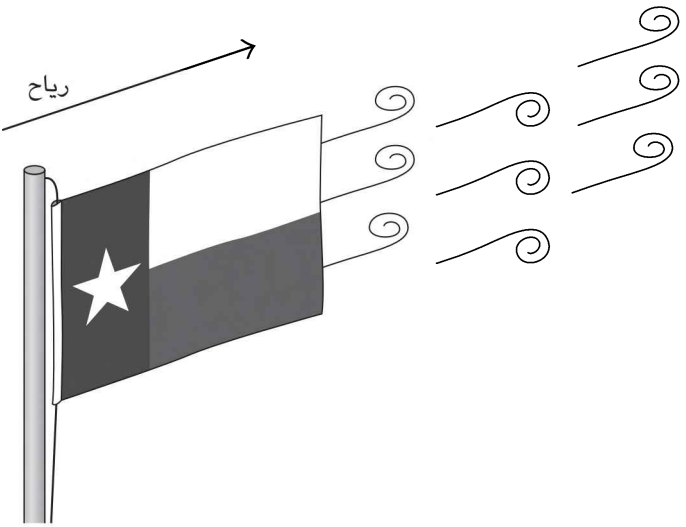
لماذا يُرفرِف العَلم على الصارية حتى في ظلِّ وجود رياح مُعتدلة؟ لماذا تُرفرِف الورقة عندما تُعرِّضها للمروحة؟

إذا رميتَ في الهواء بَكرة ورق حمَّام مفكوكة نسبيًّا، فلماذا سرعان ما يتَّخِذ الجزء المُتدلِّي (غير الملفوف) شكلًا يُشبه الموجة؟

الجواب: تخيَّل أن العَلَم موضوع بزاويةٍ في اتجاه مرور الهواء بحيث يدفع الهواء أحد جانبَي العلم. هذا الاندفاع من الممكن ببساطةٍ أن يجعل العَلم مفرودًا، فيُبسَط في اتِّجاه تدفُّق الهواء. وبدلًا من ذلك، من الممكن أن يتسبَّب هذا الاندفاع في ثَنْي العَلَم. وإذا كانت سرعة الهواء فوق قيمةٍ حرجة مُعينة، فإن هذا الانحناء يمكن أن يكون غير مُستقرٍّ ويُرفرف العَلم بعد ذلك.

وتُعزى الرفرفة في الغالب إلى تكوين العَلَم للدوَّامات. في الواقع، سواءٌ تسبَّبَت الرياح في بسط العَلم أو في رفرفته فحسْب، فإن طرف العَلم الحُر «يطلِق الدوَّامات»؛ أي إن سلسلة من الدوَّامات المُتبادَلة على يسار العلَم ويمينه تتكوَّن ثم تتحرَّك مع التيَّار (انظر شكل ٢-٣٦). وتكون الدوَّامات أكبر عند رفرفة العَلَم، لكنها نتيجة للرفرفة وليست سببًا لها، ويمكن أن تكون موجودة حتى في حالة عدم رفرفة العَلم.

من الممكن أيضًا للصحائف المرنة الأخرى، مثل الأوراق، أن تُرفرِف في الرياح المُعتدلة إذا زادت سرعة الهواء عن قيمةٍ حرجة تعتمد على نوع الصحيفة ومرونتها.



شكل ٢-٣٦: بند ٢-١١٧: تكوينات دواميَّة مُتبادلة بين الجانب الأيسر والجانب الأيمن للعَلم.

أي شريط مرن مُثَبَّت بثقلٍ من أحد طرفَيه ومُدلًّى سوف يُعطي على الأرجح مظهرًا يُشبه الموجة. وتنتقل الموجة في اتجاه الرياح على طول الشريط بنصف سرعة سقوط الشريط، وعادةً ما تكون المسافة بين بروزات الموجة أكبر في الشريط الأطول. وعلى الأرجح يُعزى المظهر الموجي إلى عدم ثبات تيار الهواء الذي يُجبَر على الانتقال مع الشريط في أثناء سقوطه في الهواء الساكن. بتعبير أبسط، فإنَّ تيَّار الهواء المحبوس والشريط نفسه يتلوَّيان في أثناء السقوط.

(١١٨) النوافير المُرفرفة والشلالات القارعة

لدى كثيرٍ من النوافير حوافُّ تسقط من عليها المياه الفائضة في صورة طبقةٍ رقيقة إلى البِركة. فلماذا في بعض هذه النوافير ترفرف طبقة الماء بمُعدَّل عدة مرات في الثانية؟ (التردُّد أقل بكثيرٍ من أن يُمكِّنك من سماع صوت الأمواج الصوتية الصادرة عن الرفرفة.)

أما التدفُّقات الأكبر والأطول فتحدُث عندما يُسمَح للماء الفائض بالانصباب من خلال مواسير الصرف داخل السد أو من أعلى قمَّة السد، لتسقُط سقوطًا حرًّا في بِركة أو

مجرًى مائي. فلماذا تتمكَّن هذه التدفُّقات من إصدار صوتٍ شديد القوة لدرجةِ تشبيهه بصوت عشرين قطارًا من القطارات السريعة؟

يتسبَّب الشلَّال المرتفع في إحداث اهتزاز ملحوظ في الأرض المجاورة، وأحيانًا تشعُر بذلك بجسدك عندما تقِف بالقُرب من الشلَّال. وعند تحليل الاهتزاز ستجد أن أكبر قدرٍ منه يحدُث عند تردُّدٍ مُرتبطٍ بارتفاع سقوط الماء سقوطًا حرًّا من الشلال، وكلما زاد الارتفاع قلَّ التردُّد. فكيف يتسبَّب الشلال في اهتزاز الأرض؟ ولماذا يرتبط التردُّد بارتفاع الشلال؟

الجواب: السبب في رفرفة النافورة هي طبقة الهواء المحبوس خلف طبقة الماء الساقط. فعندما يتسبَّب الاضطراب العارض في اهتزازٍ صغير في طبقة الماء في الأعلى، فمن المُمكن أن يزيد الاهتزاز عند سقوط الماء؛ أي تُوجَد «زيادة». وفي الأسفل، يُغيِّر الاهتزاز ضغط الهواء في طبقة الهواء المحبوس الذي يُدفَع ويُجذَب بعد ذلك أعلى طبقة الماء؛ أي تُوجَد «تغذية مُرتدَّة» تُعزز اهتزاز طبقة الماء. وعلى الرغم من أن هذه الآثار تكون بسيطة في البداية وتكاد تكون غير مُدرَكة، فإن حلقة الزيادة والتغذية المُرتدَّة تؤدي إلى تكبيرها إلى أن تُصبِح ملحوظة. إلَّا أن هذه الحلقة لا يُمكن أن تحدُث إلا مع مُعدَّلات تدفُّق مُعيَّنة، وسرعات مياه مبدئية مُعينة، وسُمك معين لطبقة الهواء؛ ومِن ثمَّ لا تتعرض كل طبقات الماء الساقط إلى الرفرفة.

ويُطلِق الماء الفائض من السدِّ اهتزازاتٍ مُشابهة في عمود الماء وفي الهواء الموجود بين العمود والسد. وتُعرَف حركة الماء الناتجة لدى المهندسين الهيدروليكيين باسم «اهتزاز طبقة الماء». وفي الغالب تكون السدود مُصمَّمة بـ «قواطع منع تكوُّن الطبقات المائية» لمنع التدفُّق السلِس للماء، وذلك للحيلولة دون الاهتزازات، بتكوين ستائر كثيفة من الماء الساقط.

في الشلال، يُنتِج اصطدام واضطراب الماء عند أسفل الشلال أمواجًا صوتية داخل عمود الماء الساقط. وعند تردُّداتٍ مُعينة، تُصدِر هذه الموجات الصوتية «رنينًا» (أي إن الأمواج يُعزز بعضها بعضًا) وعندها يمكن أن يزداد هذا الاهتزاز ويُصبح قويًّا جدًّا. هذا الموقف يُشبه طريقة إصدار الأمواج الصوتية للرنين داخل أنبوب هواء له فتحة واحدة فقط؛ حيث يكون اهتزاز جزيئات الهواء صفرًا عند طرف الأنبوب المقفول ويبلغ ذروته عند الطرف المفتوح. ويكون التردُّد الذي يُطلَق عليه «التردُّد الأساسي»، الذي هو أقل تردُّد للرنين، هو المُهيمن على الصوت المسموع المُتسرِّب من الأنبوب.

في عمود ماء الشلال، يكون اهتزاز جُزيئات الماء عند قمَّة الشلال مُساويًا للصفر ويكون في أعلى مستوياته عند القاعدة، وتكون الاهتزازات أعلى ما يُمكن عند التردُّد الأساسي. تنتقل الموجات الصوتية عند ذلك التردُّد من الشلالات عبْر الهواء وعبْر الأرض. وكلما زاد ارتفاع الشلال، انخفض التردُّد الذي تسمعه من الموجات الصوتية عبْر الهواء. إلا أنك تستطيع الشعور بهذه الموجات الصوتية عبْر جسدك ويُمكنك أن تشعُر باهتزاز الأرض من خلال قدميك.

(١١٩) النوافير النابضة

كثير من العروض المائية الزُّخرفية، سواء في الأماكن المُغلَقة أو المفتوحة، بها نوافير تُرسِل انبجاسات مائية مُستقيمة في الهواء. فلماذا ينبض هذا التيار المائي الرأسي حتى عندما يكون تدفُّق الماء ثابتًا؟ يُمكنك أن ترى هذا النبض وتسمعه.

الجواب: عندما يتدفَّق التيار لأول مرَّةٍ ينطلِق الماء بأعلى ارتفاع تسمح به الجاذبية وسرعته المبدئية. ومن هذا الارتفاع الأقصى تهبط فقاعة الماء العلوية إلى التيَّار المنبجِس مرة أخرى، مُسبِّبة تسطُّح قمَّتِه. وعندما تتفكك هذه الفقاعة إلى قطرات، يعود التيار إلى الظهور مرة أخرى ويصعد إلى أقصى ارتفاع. ثم تتكرر دورة الصعود والهبوط والتسطيح. يمكنك منع هذا السلوك الدوري بإمالة التيار بحيث لا تسقط قمَّة الماء عليه مرة أخرى أو بوضع عقبة في التيار لمنع الماء من الوصول إلى الارتفاع الأقصى.

(١٢٠) الصب: الكوب المقلوب، وكأس الجعة الطويلة

املأ جزئيًّا وعاء شراب (مثل كوب الشرب العادي) له جوانب مستقيمة وفتحة عريضة. قُصَّ مربعًا ورقيًا أعرض نسبيًّا من فتحة الكوب وضعْ هذه الورقة على فتحة الكوب بإحدى يدَيك، وافرد أصابعك باتِّساع لتضغط بالورقة على أكبر مساحة مُمكنة من الحافة. بيدك الأخرى اقلب الكوب سريعًا، ثم أزل يدَك الأولى من على الورقة. ستجذب قوى الجاذبية كلًّا من الورقة والماء لأسفل، فلماذا لا يقَعان؟

إذا أزلتَ الورقة أو جعلتها تختفي بطريقةٍ سحرية، فسوف ينهمر الماء من الوعاء. فما سبب اختلاف الموقف عما كان عليه عندما كانت الورقة موجودة؟ إذا كان الوعاء ضيقًا (مثل أنبوب الاختبار الضيق) فلماذا يتمكن الماء من البقاء في مكانه؟

شكل ٢-٣٧: بند ٢-١٢٠: كأس جعة طويلة.

«كأس الجعة الطويلة» هي كأس شرابٍ غريبة الشكل (انظر شكل ٢-٣٧) تحمل الجعة لارتفاع ياردة تقريبًا. (تُوجَد أحجام أقصر تتَّخِذ الشكل نفسه.) وفي المُعتاد يشرب المرء بوضع الكوب على الشفاه وإمالته لأعلى لصبِّ بعضٍ من السائل في الفم بطريقة محكمة. فلماذا استخدام هذا الإجراء مع كأس الجعة الطويلة سيتسبب في إغراق المرء بالجعة؟ وما الطريقة الصحيحة للشرب من كأس الجعة الطويلة؟

الجواب: عند قلب وعاء الشراب والورقة موضوعة على الحافة، يسقط عمود الماء مما يُقلِّل ضغط الهواء المحبوس في الوعاء. ومِن ثَمَّ، فإن الضغط على أعلى العمود يكون أقلَّ من الضغط الجوي على أسفل العمود، واختلاف الضغط يكفي لدعم الماء. يُمكنك أن تعرِف أنَّ الماء قد انخفض بسبب بروز الورقة لأسفل على نحوٍ واضح. وقد يتولَّد عن احتكاك الماء والورقة والحافة بعض الالتصاق، لكنه لا يكفي لدعم الماء. وإذا كرَّرتَ هذه التجربة مُستخدمًا رقاقة صُلبة مثل لَوح زجاجي بدلًا من الورقة، فلن ينخفض العمود وسوف ينهمر الماء.

وإذا اختفت الورقة، فسوف يظلُّ الضغط الجوي قادرًا على دعم الماء في الكوب. أي لا شيء يتغيَّر في حجة الدعم. إلا أن الماء يكون غير مُستقر في مواجهة أي اضطراب عارض من شأنه إرسال موجات على واجهة الهواء والماء. فالنقاط المنخفضة (الوديان) في أي موجة من هذه الأمواج تجعل الماء يبرز لأسفل، والنقاط العُليا (القِمَم) تجعل الهواء يتحرك لأعلى. فإذا زادت إحدى هذه الأمواج في الحجم سريعًا، فسيتحرَّك الهواء لأعلى أحد جوانب الكأس ويتحرك الماء لأسفل عند الجانب الآخر.

والهواء الصاعد لأعلى يُعتصَر في الأسفل مكونًا فقاعة، والماء النازل لأسفل يُعتصَر في الأعلى مكونًا فقاعة. مع صعود إحدى الفقاعتَين ونزول الأخرى يحاول سطح الهواء والماء إعادة ترتيب حالة التسطح الأولية لكنه يكون غير مُستقر على الإطلاق. ومِن ثَمَّ تصعد سلسلة من الفقاقيع إلى الوعاء أثناء نزول سلسلة من الفقاقيع منه، وتُعرف هذه العملية في علم المحاكاة الصوتية باسم «البقبقة».

قد لا يتَّسِم سطح الماء بالحساسية تجاه الاضطرابات العارضة إذا كان الوعاء ضيِّقًا؛ لأنه في هذه الحالة سيكون مُتزنًا بفعل التوتُّر السطحي. وهذا يعني أن تعلُّق ماء السطح بجوانب الوعاء يُمكن أن يتغلَّب على الأمواج الصادرة عن الاضطراب.

وعملية البقبقة هي السبب في أن الشُّرب من كأس الجعة الطويلة يمكن أن يتسبَّب في فوضى. فالعُنق الضيِّق للكأس يمنع مرور الهواء بسهولة إلى الكأس ليخرج السائل من الكأس. وبدلًا من ذلك فإن عدم الاتزان على سطح السائل والهواء يؤدي إلى الارتفاع المفاجئ لفقاعة هواء كبيرة عبْر عُنق الكأس وصبِّ دفقةٍ كبيرة من السائل، وهذه الكمية الكبيرة من السائل أكبر من أن يسعها الفم أو أن تُبتلَع بسرعة. ويعرف محترفو الشُّرب من كأس الجعة الطويلة كيفية إمالة الكأس أثناء «تدوير» العنق الضيِّق بين أيديهم في وضعية رأسية. تؤدي عملية التدوير إلى تدوير السائل حول جُدران العُنق وتسمح بمرور الهواء على طول المحور المركزي للوعاء. وعندها يستطيع الهواء الدخول بسهولةٍ إلى الكأس، ويستطيع الشارب التحكُّم في كمية السائل الخارج من الوعاء.

(١٢١) تساقط قطرات الماء

عندما تسقُط قطرات الماء من الصنبور، كيف تقطع اتِّصالها بالماء المُتبقي في الصنبور؟ هل يُفقَد الاتصال بانفصالٍ أو انقطاعٍ مُفاجئ أم بوداعٍ مُطوَّل؟

الجواب: يجمع التوتُّر السطحي القطرة في صورة سطح مُنحنى عند فوهة الصنبور. ومع ازدياد كمية الماء، يتدلَّى الماء إلى شكلٍ أقربَ للكرة. وعند الوصول إلى نقطة حرِجة مُعينة، تتسبَّب قوة الجاذبية في نزول الماء سريعًا. وإذا استطعتَ مشاهدة نزول الماء بالحركة البطيئة، فسوف ترى أنَّ القطرة الساقطة ما زالت مُرتبطة بماء الصنبور عن طريق خيط أسطواني الشكل سرعان ما يُصبح رفيعًا. وفجأة يُكَوِّن قاع الأسطوانة خيطًا أشدَّ رُفعًا سُرعان ما ينقطع. وبعد الانكسار مباشرة، تهتزُّ القطرة الساقطة وتُكوِّن الأسطوانة المُتبقية أمواجًا سُرعان ما تتحوَّل إلى قطراتٍ شديدة الصغر. ومن المُمكن أن تنفصل هذه القطرات من الأسطوانة وتسقط، أو من المُمكن أن تنجذِب مرة أخرى إلى الصنبور.

ومن الممكن للموائع التي تتمتَّع بلزوجةٍ أكبر من الماء أن تُكوِّن أسطواناتٍ كثيرة أشدَّ رُفعًا، واحدة تلوَ الأخرى، على نحوٍ يُشبه بدرجةٍ ما سلسلة رسومات قطة القبَّعة اللانهائية الموجودة في أحد كُتب دكتور سوس، إلى أن تنقطع الأسطوانة السفلى والأكثر رفعًا. وعلى الأرجح ما يُسبِّب الانقطاع هو اضطراب عارِض مثل حركة الهواء أو اهتزاز الصنبور أو حتى الصوت.

(١٢٢) أشكال فقاقيع الصابون

عندما تنفخ فقاعة صابون عبْر حلقة بلاستيكية، فإنك تنفخ غشاءً من الصابون فتكون سطحًا مُقوَّسًا يتحرَّك بعيدًا عن الجزء الداخلي للحلقة عند التمدُّد. عندئذٍ يُصبح الحَيِّز الداخلي للحلقة خاليًا. ونظرًا لأنَّ غشاء الصابون ليس سطحًا مُغلقًا، فكيف تتكوَّن الفقاعة المغلقة عندما يتحرَّر الغشاء من الحلقة؟

لماذا تتَّخِذ الفقاعة التي تطفو بحرية شكلًا كرويًّا؟ وإذا تكون غشاء أسطواني بين دعامَتَين دائريَّتَين قريبتَين، فما الشكل الذي سيَتَّخِذه الغشاء عند ابتعاد الدعامتَين تدريجيًّا؟

الجواب: عند نفخ غشاء الصابون على الحلقة وتكوُّن الفقاعة، فإن جزء الفقاعة القريب من الحلقة سوف يُشكِّل فجأة وسطًا ضيقًا و«ينفصل» عن الحلقة. ومع انهيار الوسط يُصبح جزء من الغشاء الموجود على الحلقة مُسطحًا ليملأ الحيز الداخلي للحلقة، وسُرعان ما يتَّخِذ الجزء المُتحرِّر شكلًا كرويًّا. وتتَّخِذ الفقاعة شكلًا كرويًّا؛ لأن الضغط لا بدَّ أن يكون مُتماثلًا في كلِّ مكانٍ داخل الفقاعة. وهذا الضغط يفوق الضغط الجوي؛

لأن التوتُّر السطحي يميل إلى جعل الفقاعة تنهار على نفسها. ونظرًا لتماثل الضغط الداخلي في كلِّ مكان داخل الفقاعة، فإن مُنحنى الأسطح لا بدَّ أن يكون متماثلًا في كل مكان؛ ومِن ثمَّ تتَّخِذ الفقاعة شكلًا كرويًّا.

وإذا شغلَتِ الفقاعة مسافة قصيرة بين دعامتَين دائريتَين مُصمَتَتَين (مِجدافَين مثلًا)، فسوف تتَّخِذ الفقاعة شكلًا أسطوانيًّا. ويكون الشكل مُستقرًّا لأنَّ أي اضطراب عارض يزيد تلقائيًّا منطقة السطح؛ ومِن ثمَّ يجذب التوتُّر السطحي الغشاء مرة أخرى إلى الشكل الأسطواني. أما إذا زاد الانفصال بين المِجدافَين عن مُحيطهما، فإن الفقاعة تُصبح غير مُستقرة وعندها سوف يتسبَّب أي اضطراب عارض في تفتُّتها إلى فقاعتَين أصغر حجمًا، واحدة على كل مِجداف.

وسوف تحصل على النتائج نفسها إذا استخدمتَ حلقتَين دائرتَين بدلًا من المجدافَين، شريطة أن يملأ الغشاء الحيِّز الداخلي لكلِّ حلقة بحيث يُغلِق الطرفَين. وإذا تمزَّق أحد الأغشية الطرفية، فسوف ينخفِض الضغط داخل الفقاعة لمُستوى الضغط الجوي، فيجعل مُستويات الضغط على جانبَي جدار الفقاعة مُتساوية. وهذه المُساواة تعني بالضرورة أن يُصبح مستوى تقوُّس الفقاعة مُساويًا للصفر، وتتحقق هذه الحالة بطريقة أنيقة؛ إذ يصير للفقاعة وسط مضغوط بحيث تُشبه الساعة الرملية. وعلى طول الخط المُمتدِّ بين الحلقة والأخرى يكون الانحناء مُقعرًا (إلى الداخل)، وعلى طول الخط المحيط بالفقاعة، أو الوسط، يكون الانحناء مُحدَّبًا (إلى الخارج). وبهذه الطريقة يكون الانحناء العام مُساويًا للصفر كما هو مطلوب. ولا تصبح هذه الفقاعة مُستقرة إلَّا إذا كان الفاصل بين الحلقتَين أقلَّ بكثيرٍ من مُحيطَي الحلقتَين. أما إذا كان الفاصل كبيرًا للغاية، فسوف يضيق الوسط على الفور وينفصل، ومن ثم يتقلَّص الغشاء المُتبقِّي على كلِّ حلقةٍ ليُصبح مُسطحًا.

(١٢٣) مسارات الفقَّاعات

عند إطلاق فقَّاعة عند قاع أسطوانة مائية طويلة فإنها يجب أن تتسلَّق الأسطوانة مباشرةً. وفي الواقع، هذا ما تفعله تمامًا الفقَّاعات الصغيرة والكبيرة. فلماذا تتَّخِذ الفقاعات المُتوسِّطة الحجم مسارًا مُتعرِّجًا أو حلزونيًّا؟

الفقَّاعة التي تصعد في الماء يجِب أن تكون كروية، كما هي الحال مع الفقاعات الصغيرة. فما السبب الذي يجعل الفقاعة الأكبر حجمًا مُسطَّحة في أسفلها؟

الجواب: ما زال صعود الفقاعات المتوسطة الحجم خاضعًا للبحث. ويبدو أنَّ الحركة المُتعرِّجة والحلزونية تعود إلى الدوَّامات التي تتكوَّن على الجانب السُّفلي للفقَّاعة في أثناء شقِّ طريقها لأعلى عبْر الماء. فإذا تناوبت الدوَّامات على اليسار واليمين، فمن المُمكن أن تنحرِف الفقاعة نحوَ اليسار واليمين. ويبدو أن تكوين الدوَّامات والانحرافات يرتبط باهتزازات الفقَّاعة.

وإذا اقتربت فقَّاعتان صاعدتان تقارُبًا شديدًا، فمن المُمكن أن تتغيَّر حركتهما عن طريق تدفُّق الماء بجوار كل منهما. ومن الممكن أن تتدحرجا أو أن تتباعدا أو أن تنجذِب إحداهما نحو الأخرى وتتلامسان.

يتحدَّد شكْل أي فقاعة بناءً على التوتُّر السطحي لسطح الفقاعة وتأثير مقاومة المائع على الفقاعة في أثناء تحرُّكها. بالنسبة للفقاعة الصغيرة ذات الانحناء الشديد، يتغلب التوتر السطحي وتُسحَب الفقَّاعة لتكوِّن شكلًا كرويًّا لتقليل منطقة السطح. وهذا يعني أن الفقاعة تكون طاقتُها أقلَّ ما يمكن عندما تكون كروية الشكل، فأيُّ تشوُّهات تزيد منطقة السطح وتتطلَّب طاقة إضافية. وفي حالة الفقاعة الكبيرة ذات الانحناء الأقل، تكون مقاومة المائع مهمة والأثر الذي تتركه الفقاعة الصاعدة يُمكن أن يجعل السطح السُّفلي مُسطَّحًا.

عند إطلاق الفقاعة في مائعٍ شديد اللزوجة مثل عصير الفاكهة المُركَّز أو منتجات الشَّعر المختلفة، فمن المُمكن أن تستغرق الفقاعة وقتًا طويلًا في الصعود. ويمكن أن يعتمد شكلها على طريقة إطلاقها. على سبيل المثال، إذا أُطلِقَت في مائع فمن الممكن أن يكون لها ذيل عندما تتحرَّر من وصلتها الأولية، ومن الممكن أن تحتفظ بهذا الذيل طوال صعودها.

(١٢٤) الفقَّاعات الزائفة

اصنَعْ خليطًا من الماء وسائلِ تنظيفٍ خفيفٍ وضعه في وعاء، ثُمَّ اشفط بعضًا منه في زجاجة قابلة للعصر أو في قطارة (مثل النوع المُستخدَم لوَضْع القطرة في العين أو لوضع الدواء في فم الطفل الصغير). ضعْ حافةَ الزجاجة أو القطارة مباشرة فوق سطح السائل الموجود في الوعاء، وأطلِقْ كميةً صغيرة من السائل في السطح. ستَنتُج فقَّاعات عادية وبعض الفقاعات الأخرى التي يُطلَق عليها «الفقَّاعات الزائفة» التي تتَّسِم بشكلٍ وسلوكٍ مُختلفَين. فما الفقاعة الزائفة؟ ولماذا تتكوَّن هذه الفقَّاعات؟

الجواب: الفقَّاعة العادية كُرة هواء تتراصُّ جزيئات الماء والصابون على سطحها. تساعد جزيئات الصابون في استقرار السطح كما تفعل في فقاعات الصابون التي ينفخها

الطفل في الهواء. أما الفقَّاعات الزائفة فتتكوَّن من قشرة كُروية رفيعة، وتُوجَد كُرة ماء داخل القشرة وتتراصُّ جزيئات الماء والصابون على سطحَي القشرة كليهما. ونظرًا لأن الفقاعة الزائفة تتكوَّن في الأساس من الماء، فإنها تفتقر إلى القدرة على الطفو التي تتَّسِم بها الفقاعة العادية وتميل إلى الثبات في موضعها داخل الماء بدلًا من الصعود.

إليكم طريقة أخرى لصُنع الفقاعات الزائفة. أولًا اصنَعْ عنقودًا من ثلاث فقَّاعات عادية مُتلامِسة أثناء الطفو على الماء. ثم اسمح لقطرةٍ من الماء والمُنظِّف بالسقوط في التجويف الذي تتلامَس فيه الفقَّاعات. ستجد أن فقاعة زائفة قد ظهرت تحت التجويف.

في فقاعة الصابون العادية، يتسرَّب الماء من القمَّة إلى القاع، فيُرقِّق القمة إلى أن تتمزَّق. أما في الفقاعة الزائفة، فيرتفع الهواء الموجود في القشرة إلى الأعلى، ويُرقِّق قاع القشرة إلى أن يخترق الماء القشرة. يحدُث كل هذا بسرعة، وهو ما يفسر لماذا لا تبقى الفقاعات الزائفة إلا لمدة قصيرة جدًّا.

(١٢٥) رفع الأرز بالعصا

ادفع بقوةٍ عصًا في وعاءٍ من الأرز النِّيء أو غيره من الحبوب. لماذا تزداد بسرعةٍ القوة المطلوبة كلما تحرَّكَت العصا لعمقٍ أكبر، ولماذا تصبح القوة كبيرة جدًّا عندما تقترب العصا من قاع الوعاء؛ حيث قد تُضطرُّ إلى طرْق العصا كي تتحرك ولو قليلًا؟

بمجرد تثبيت العصا اضرب الوعاء أو هُزَّه برفقٍ لعدة دقائق. إذا سحبت طرف العصا المكشوف لأعلى، فلماذا يتسبب ذلك في رفع وعاء الأرز بأكمله لأعلى؟

الجواب: لُوحِظت هذه التأثيرات لأول مرة منذ وقتٍ طويل عندما كان التجار والعُملاء يَغرزون العِصيَّ في أكياس الحبوب للتحقُّق من محتوياتها. وعند دفع العصا في الأرز على سبيل المثال يزداد تأثير الاحتكاك على العصا لسببَين: (١) ضغط مزيد من الحبوب على العصا. (٢) زيادة ضغط الحبوب العميقة التي تحمل وزن الحبوب العُليا. ومن ثَمَّ فإن الاحتكاك الكُلي المقاوِم لحركة العصا يزداد مع عُمق العصا.

ويزداد الاحتكاك على نحوٍ أسرع عندما تقترِب العصا من قاع الوعاء. التأثير ليس مفهومًا جيدًا، لكن التخمين المعقول هو أنَّ المقاومة الشديدة لإعادة ترتيب الحبوب تأتي من أقواس الحبوب؛ حيث تُصبح الحبوب محبوسة في صورة أقواس تقاوم حركة العصا. (ومثلما من المُمكن أن تُصبح الأقواس الهندسية قوية، من الممكن أن تُصبح أقواس الحبوب قوية.)

عند ضرب الوعاء أو هَزِّه بعد إدخال العصا تُصبح حبَّات الأرز شديدة التكدُّس. وتتكدَّس حبَّات الأرز بشدةٍ حول العصا بصفةٍ خاصة. وعند سحْب العصا لأعلى يؤدي الاحتكاك بين حبَّات الأرز والعصا إلى تثبيت العصا في مكانها بقوة. بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ حبَّات الأرز المُحيطة بالعصا شديدة التكدُّس ومُتماسكة بشدةٍ بعضها ببعض. الحبوب المُلاصِقة لجدار الوعاء مُتمسِّكة بقوةٍ بالجدار أيضًا. ومن ثَمَّ، فإنَّ كلَّ شيء — العصا والحبوب والوعاء — مُثبَّت في مكانه. أما إذا كانت العصا أو الوعاء زَلِقَين للغاية أو لم يكن الأرز مضغوطًا في مكانه، فسيُسبِّب ذلك وقوع كميات كبيرة من الأرز خارج الوعاء عند إدخال العصا فيه.

وإذا سحبتَ بقوةٍ كافية لاستخراج العصا بطريقةٍ بطيئة ومُحكمة فستجد على الأرجح أنَّ قوة الأرز المؤثرة على العصا تختلف دوريًّا. وعلى الرغم من أنَّ هذا الاختلاف غير مفهوم جيدًا، فهو على الأرجح يعود إلى تكوُّن الأقواس قُرب العصا وانهيارها.

(١٢٦) رمْي القُرص

عند رمْي قُرص في رياح معتدلة، هل سيذهب بعيدًا عند رميه عكس اتجاه الرياح أم مع اتجاه الرياح؟ بأي زاويةٍ يجِب إطلاق القُرص، وما طريقة إمالته؟ ولماذا ينبغي تدويره؟

الجواب: عادةً ما تكون زاوية مسار الإطلاق ٣٥ درجة. ويقول بعض الرياضيِّين إنَّ سطح القُرص لا بدَّ أن يكون مائلًا بالزاوية نفسها، بينما يزعم آخرون أن القُرص يطير لمدةٍ أطول إذا كانت زاوية مَيله أقلَّ بنحو ١٠ درجات. وَفقًا لهذا الزعم، فإن الميل الأصغر يعني أن القُرص يشهد ارتفاعًا أكبر في أثناء مرحلة الهبوط؛ ومن ثَمَّ يظلُّ عاليًا لمُدَّة أطول. وإذا أُطلق القرص دون تدوير، فإنه يهتزُّ ويفقد بسهولةٍ التوجيهَ المطلوب. فالقُرص الدوَّار أكثر اتزانًا؛ إذ يكون أشبهَ بالجيروسكوب من حيث إن المحور الذي يدور حوله يُشير إلى الاتجاه نفسه تقريبًا طوال الطيران.

إلا أن التوجيه ليس ثابتًا تمامًا في أثناء الطيران لأن مقاومة الهواء على القُرص ليست مُوزَّعة عليه بالتَّساوي، بل تتركَّز المقاومة على الجانب الأمامي والجانب الأيسر (بفرْض أن القُرص رماه رياضي أيمن مُستخدِمًا الأسلوب المعتاد). وقوى عزم الدوران الناتجة عن المقاومة غير المُوحَّدة تتسبَّب في تدوير مُقدمة القرص لأعلى قليلًا وتدوير الجانب الأيسر لأسفل قليلًا.

عند رمْي قرصٍ في رياحٍ مُعتدلة، فإن ضغط الرياح على الجانب السفلي يُضيف قوة رفع ويمنح رميةً أطول مقارنةً بالأحوال التي لا تتوافر فيها الرياح. وتستمرُّ هذه الميزة في حالة الرياح التي سُرعتها ١٥ أو ٢٠ مترًا في الثانية، بينما تؤدِّي الرياح القوية إلى اضطراب التوجيه وتتسبَّب في هبوط القُرص مبكرًا. وعند رمي القُرص في اتِّجاه الرياح، فإن الرياح تضغط على الجانب العلوي وتُقلِّل الرفع وتجعل الرمية أقصر.

(١٢٧) رمْي الرمح

يتضمَّن رمي الرمح زاويتَين مُهمَّتَين نسبةً إلى المحور الأفقي؛ إحداهما هي زاوية مسار الإطلاق، والأخرى زاوية الرمح نفسه. فما القيمة اللازمة لكلٍّ زاوية لزيادة مدى الرمية؟ وتحديدًا، هل يَجِب أن تكون قيمة الزاويتَين واحدة؟

الجواب: جرى العُرف على أن تكون قيمة الزاويتَين ٣٥ درجة، وهذه القيمة مأخوذة من محاولات لا تُعدُّ ولا تُحصى كانت تعجُّ بمُتغيرات كثيرة. ومع ذلك، فقد كانت طريقة الإطلاق التقليدية تبدو منطقية في حدِّ ذاتها؛ فالمُحاذاة المبدئية للرُّمح مع المسار كانت تجعل الإطلاق انسيابيًّا. وإذا كانت زاوية الرمح أعلى أو أدنى من المسار فسوف يكون تأثير مقاومة الهواء عليها أكبر، وستقلُّ فترة طيرانه. إلا أن بعض الدراسات النظرية تزعُم أن المدى يطول إذا زادت زاوية مسار الإطلاق إلى ٤٢ درجة وظلَّت زاوية الرمح عند ٣٥ درجة. وتُعارِض دراسة أخرى هذا الزعم بحجةٍ عملية؛ فعندما تزيد زاوية الإطلاق لن يتمكَّن الرياضي على الأرجح من إطلاق الرمح بسرعةٍ كبيرة لأنَّ الأمر سيكون أكثر صعوبة، ومن ثَمَّ تضيع هذه الميزة. ووجدت دراسات أخرى أن زاوية الإطلاق يجِب أن تكون ٣٢ درجة وأن تكون زاوية العصا حوالي ١٧ درجة. يزيد توجيه رأس الرمح لأسفل من مقاومة الهواء بالتأكيد، لكن من الممكن أن يزيد الرفع أيضًا (بسبب ضغط الهواء على الجانب السُّفلي للرمح) في أثناء الجزء الأخير من الطيران. ومع مزيدٍ من الرفع سيظلُّ الرمح مُحلقًا لفترةٍ أطول.

وعادةً ما تنخفض مُقدِّمة الرمح في أثناء الطيران بحيث ينغرز بالأرض عند الهبوط. ويعود هذا الدوران إلى تأثير القوى على مُقدمة الرمح. إن وزن الرمح هو القوَّة المسئولة عن «مركز الكتلة» (مركز توزيع الكتلة). والرفع مسئول عن «مركز الضغط» (مركز توزيع الضغط)، ويُوجَد عادةً خلف مركز الكتلة. وأثناء الطيران، يتسبَّب الرفع في دوران

الرُّمح حول مركز الكتلة كي ينغرز في الأرض. وبمجرَّد دوَران الرمح، فإنه يُصبح أكثر انسيابيةً بسبب مرور الهواء ولا يتلقَّى المزيد من الرفع. ويمكن زيادة المدى إذا أُعيد تشكيل الرمح بحيث يقترِب مركز الضغط من مركز الكتلة. وقد يُسفر تغيير المكان عن تقليل دوَران العصا والحفاظ على الرفع في أثناء الهبوط.

(١٢٨) تقارُب القاربَين

عندما يمرُّ الماء بين قاربَين مُتجاورَين مُعاكسَين للتيار، لماذا يتقارَب القاربان؟

الجواب: عندما يندفع الماء في المكان الضيِّق المحصور بين قاربَين فإنَّ سرعته تزداد. والطريقة الوحيدة للحصول على الطاقة اللازمة للسرعة الزائدة هي الحصول عليها من مخزون الطاقة الداخلي المُرتبِط بالضغط. ونتيجةً لذلك، ينخفض ضغط الماء بين القاربَين. ومع وجود مُستوًى عاديٍّ من الضغط على الجوانب الخارجية للقاربَين وانخفاض الضغط على الجوانب الداخلية يتقارَب القاربان.

(١٢٩) الديناميكا الهوائية للكبلات وخطوط النقل

تستطيع الرياح العاتية دفْع الكبلات أو خطوط نقل الكهرباء في اتجاه الرياح. فلماذا «تقفز» بعض الكبلات وخطوط النقل في الرياح؛ أي تهتزُّ بصورةٍ عمودية على طولها وفي اتجاه الرياح؟ في بعض الحالات يمكن أن يؤدِّي هذا الاهتزاز إلى انقطاع التيار في الخطوط المُتجاورة، أو قطْع أحد الخطوط، أو سقوط برج دعم. وعلى الأرجح تحدث النتيجتان الأخيرتان عندما يكون الخط مُغطًّى أيضًا بالجليد.

انتشرت اهتزازات الكبلات في جسْر بوينت دي نورماندي، الذي كان أطول جسرٍ مدعوم بكبلاتٍ في العالم عند افتتاحه عام ١٩٩٥. وعلى الرغم من أنَّ اهتزازات الكبلات نفسها لم تتسبَّب في انهيار الجسر، فقد كان من المُمكن أن تتسبَّب الحركة في تهالُك الكبلات قبل الأوان فتُصبح في حاجة إلى إحلال مُبكِّر.

فما الذي يُسبِّب اهتزاز الكبلات والخطوط؟

الجواب: عندما تهبُّ الرياح على كبلٍ فمن المُمكن أن تنكسِر إلى دوَّامات على الجانب المَحمي من الرياح. وبالنسبة إلى الكبل الأفقي، سيحدُث تبادُل في تكون الدوامات ما بين أعلى الكبل وأسفله. وعلى الرغم من أن هذه الدوامات تتحرك في اتِّجاه الكبل، فإن تكوُّنها

عند الكبل أو خلفه بالضبط يؤدِّي إلى اختلافٍ في ضغط الهواء المندفع نحوَ الكبل. يقلُّ ضغط الهواء في مكان الدوَّامة؛ ومِن ثَمَّ تحدث تغيرات دورية في ضغط الهواء أعلى الكبل وأسفله. وتحدُث هذه الدوَّامات وهذه التغيُّرات في ضغط الهواء بتردُّدٍ مُعيَّن يعتمد على سرعة الرياح وقُطر الكبل. وإذا حدث وتوافق ذلك التردُّد مع تردُّدٍ يستطيع الكبل الاهتزاز عنده (أي «تردُّد الرنين») فإن الكبل يبدأ في الاهتزاز على النحوِ المُسمَّى بـ «الرنين»؛ أي إنه يهتزُّ بشدَّة. سوف تهتزُّ الخطوط المُتباينة الأطوال بتردُّدات مختلفة، لكن الرياح العاتية يمكن أن تجعل عددًا من هذه الخطوط يهتزُّ بتردُّدات رنين مُختلفة.

ولحلِّ هذه المشكلة في جسر بوينت دي نورماندي، استعان مهندسو الجسر بمُتسلِّقي جبالٍ لتسلُّق الكبلات وربطها بحبال. ونظرًا لأنَّ الكبلات المُتجاورة مختلفة الأطوال، فإنها تختلف من حيث تردُّدات الرنين. ومِن ثَمَّ، فعند ربط كبلَين مُختلفَين في تردُّدات الرنين عند النقاط المناسبة، فإنَّ اهتزاز أحد الكبلَين يُقاوم اهتزاز الكبل الآخر.

(١٣٠) لوح التزلُّج على الأمواج

لكي تركب على لوح التزلُّج على الأمواج، ألقِ اللَّوح الدائري على طبقةٍ ضحلة من الماء (كتلك الموجودة عند حافة الماء على الشاطئ) بحيث يبدأ اللوح في الانزلاق على الماء. بعد ذلك قِف على اللوح. إذا ركبتَ اللوح بطريقةٍ صحيحة فمن المُمكن أن تنزلق لمسافة عشرة أمتار. فلماذا لا تتوقَّف تدريجيًّا بمجرَّد أن تضع وزنك على اللوح؟

الجواب: لا يعمل الماء عمل مادة التشحيم كما يحدُث في حالة انزلاق إطارات السيارات على الشارع المبلول عند ضغط المكابح. وبدلًا من ذلك فإن لوح التزلُّج على الأمواج يعتمد على حركة الماء النسبية في أثناء تحرُّكه على الماء.

عند ركوب لوح التزلُّج على الماء يقف المُتزلج بحيث يُميل حافة اللوح الأمامية لأعلى. بعد ذلك يصطدم الماء المار بالجانب السُّفلي للماء، فيمنح اللوح قوةَ رفع؛ ومِن ثَمَّ يجعله يظلُّ فوق الرمال الموجودة بالأسفل. إلَّا أن الوقوف بصورةٍ صحيحة يتطلَّب ممارسة. فإذا رفعت الحافة الأمامية للأعلى كثيرًا، فسوف يصطدم الماء بجزءٍ صغير جدًّا من أسفل اللوح، ومن ثَمَّ سيشهد قدرًا قليلًا من الرفع. وإذا ارتفعتِ الحافة الأمامية بدرجةٍ قليلة فسوف يكون الاصطدام خاطفًا ولن يُعطي الرفع الكافي. وبطبيعة الحال، فإن توجيه الحافة الأمامية لأسفل سوف يُنهي الركوب على الفور.

يمكن أن يكون تأثير مقاومة الهواء على مُتزلج الأمواج كبيرًا، بل أكبر من تأثير سحب الماء عليه. رغم ذلك، فإنَّ راكب الأمواج يستطيع غالبًا تطويل مدَّة الركوب عن طريق القرفصة لتقليل مساحة المقطع العرضي المُعرضة للهواء.

(١٣١) الطفو أثناء انعطاف السيارة

عند طفو بالون مليء بالهيليوم في سيارة مُغلقة النوافذ، لماذا يتحرَّك البالون نحوَ السقف عندما تنعطف السيارة انعطافًا حادًّا، وهل يتحرَّك إلى الخارج بعيدًا عن المنعطف أم إلى الداخل نحوه؟ وإذا انعطفت السيارة في طقسٍ بارد أثناء تشغيل نظام التدفئة في السيارة، لماذا يتغيَّر توزيع الهواء الدافئ أثناء الانعطاف؟ وفي أي اتجاهٍ يتغيَّر؟

الجواب: إذا انعطفت السيارة انعطافًا حادًّا نحو اليسار فسوف تشعُر كما لو كنتَ قُذِفْتَ بعيدًا عن المنعطف؛ أي نحوَ يمينك. والسبب في ذلك هو أنَّ الجذع العلوي من الجسم يستمرُّ في التحرُّك في الاتجاه الأصلي في حين ينجذب الجزء السفلي من الجسم بفعل قوة الاحتكاك الصادرة عن مقعد السيارة نحو المنعطف جهة اليسار؛ لذلك تميل إلى الخارج بعيدًا عن المنعطف. يميل الهواء الموجود في السيارة أيضًا إلى التحرك في الاتجاه الأصلي، لكن الجدار الأيمن يُجبره على الانعطاف. وهذا الفعل يزيد كثافة الهواء على الجانب الأيمن من السيارة. ويميل الهيليوم، وهو الأخفُّ كثافة من الهواء، إلى الطفو بعيدًا عن الهواء الأكثر كثافة مُتجهًا نحوَ الهواء الأقل كثافة، ومن ثم يتحرَّك نحوَ اليسار، على النقيض من مَيل جسمك.

والهواء الدافئ أقلُّ كثافة من الهواء البارد، ويميل إلى الاتجاه نحوَ اليسار أثناء الانعطاف. وإذا كنت قائد السيارة، فقد تشعُر به يتحرَّك أمام وجهك إذا لم تكن المروحة تُوجِّه الهواء بالفعل نحوَ وجهك.

(١٣٢) انعكاس الأمواج على المياه الضحلة

لماذا يستطيع الحاجز الرملي (المغمور) القريب من الشاطئ عكس أمواج المُحيط القادمة؟ لماذا تستطيع تشكيلات مُعيَّنة من الحواجز الرملية (أو الحواجز الصناعية المغمورة) عكس أمواج المُحيطات بقوة؟

الجواب: قد ترى موجةَ مُحيط تنتقل على سطح الماء، غير أنَّ الحركة تمتدُّ أسفل السطح؛ إذ تتحرك أجزاء من الماء في مدارات رأسية بيضاوية الشكل أثناء مرور الموجة،

ويكون سطح الشكل البيضاوي موازيًا لاتجاه انتقال الموجة. ويمكن للحاجز الرملي أن يُعيق هذه الحركة المدارية إذا لم يكن الحاجز الرملي أسفل السطح بمسافة بعيدة. تتمكَّن مُعظم الأمواج من العبور، لكن بعض الأمواج تنعكس مُرتدَّة إلى المحيط.

يمكن حدوث انعكاس أقوى يُطلَق عليه «الانعكاس الرنان» أو «انعكاس براج» من خلال سلسلة من الحواجز الرملية التي يُعزِّز بعضها انعكاس بعض. فإذا كان للأمواج طول مَوجي مُعيَّن، وكان اتجاه انتقالها عموديًّا على طول الحاجز الرملي الضحل، فإن الانعكاس المُعَزَّز يحدُث إذا كانت المسافة بين الحواجز الرملية تُعادل نصف الطول الموجي للأمواج. تخيَّل موجة مُستمرة تنعكس من حاجزَين رمليَّين مُتعاقبَين. ستجد أن الجزء الذي تجاوز الحاجز الرملي الأول وانعكس من الحاجز الرملي الثاني ثم تجاوز الحاجز الرملي الأول مرة أخرى (لكنه يتحرَّك الآن إلى الخارج) من الواضح أنه قطع مسافة إضافية. هذه المسافة تُعادل ضعف المسافة بين الحاجزَين. وإذا كانت هذه المسافة الإضافية تُساوي الطول المَوجي للموجة، فعندما يصل هذا الجزء إلى الحاجز الرملي الأول يكون مُتزامنًا مع الموجة التي انعكست للتوِّ من الحاجز الرملي الأول. ومِن ثَمَّ، فإن هذَين الانعكاسَين يرتدَّان إلى المُحيط في تزامُن، ممَّا يُسفر عن موجة ناتجة قوية (عالية السعة).

باختصار، عندما ترتدُّ الأمواج المُنعكسة بفعل الحواجز الرملية عائدة إلى المُحيط في تزامن، يكون الانعكاس قويًّا، حتى إن مقدارًا قليلًا نسبيًّا من الموجة الأصلية يظلُّ مُتوجهًا نحو الشاطئ. وهذا النوع من الانعكاس الموجي يمكن أن يُساهم في حماية الشاطئ والمناطق القريبة من الشاطئ. وفي حالة وجود حاجزٍ رملي واحد أو حاجزَين في بادئ الأمر، فإن الأمواج تستطيع تحريك الرمال بالتعرية والترسيب، مُكوِّنةً حواجز رملية إضافية على الجانب الشاطئي للحاجزَين الرمليَّين الأصليَّين. وتستطيع حركة الأمواج تلك تكوين حواجز رملية إضافية ذات مسافةٍ بينية مُناسبة تبلغ نصف الطول الموجي بحيث تُسفر عن انعكاسات رنَّانة.

مشكلة هذا التفسير أنَّ الأمواج تصِل إلى الشاطئ بأطوال موجية مختلفة ومن اتجاهات كثيرة جدًّا. ومن المُمكن ألا يحدُث الانعكاس الرنَّان لكثيرٍ من الأمواج.

(١٣٣) الأمطار والأمواج

هل ثمَّة أي حقيقة في قول البحَّارة المأثور إن الأمطار تهُدئ أمواج المحيط؟

الجواب: هذا القول ينطوي على بعض الحقيقة، بشرط ألا تكون الرياح المُصاحبة للأمطار شديدة القوة. فعندما تصطدم قطرة المطر بالماء، فمن المُمكن أن تكوِّن دوَّامة

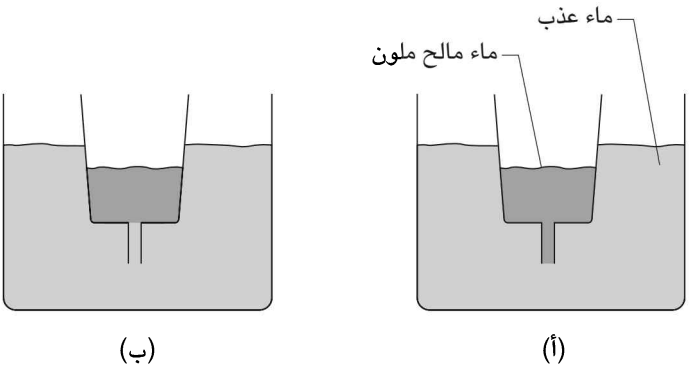
في الماء أو تتسبَّب في اهتزاز سطح الماء أو تناثُر قطرات الماء. هذا النشاط يجعل الطبقة العلوية مُضطربة، وهذا يُعيق الأمواج ذات الطول الموجي القصير ويُقلِّل منها. أما إذا كان يُصاحب الأمطار رياح قوية وشِبه أفقية، فمن المُمكن أن تُنتج الأمطار والرياح وتدعم أمواجًا مائية قصيرة الطول الموجي.

(١٣٤) مُذَبذِب مِلحي

املأ كوب شرابٍ شفافًا بالماء بصورة جزئية. ثم اثقُب قعْر فنجانٍ ورقي وأنزل الفنجان جزئيًّا في الماء، وثبِّتْه في مكانه بمشبك أو بلصْقِه في سكينتَي عشاء موضوعتَين على الكوب. حضِّر مزيجًا من ماءٍ مُعتدل المُلوحة وملوِّن طعام في وعاءٍ مُنفصل وصُبَّ المزيج ببطءٍ في الفنجان الورقي حتى يُصبِح سطحه أسفلَ سطح الماء العذْب في الكوب بقليل. سوف يتدفَّق تيَّار من الماء المُملَّح الملوَّن للأسفل عبْر الثُّقب، ثم يصعد تيَّار من الماء العذْب عبْر الثُّقب. ومن المُفترَض أن تُكرِّر دورةَ التدفُّق المتبادل تلك نفسها كلَّ بضع دقائق، وربما لعدَّة ساعات؟ فما السبب في هذا «المُذَبذِب الملحي» كما يُطلَق عليه؟

الجواب: أولًا، تخيَّل أنَّ الثُّقب في واقع الأمر عبارة عن أنبوبٍ ضيِّقٍ قصير مُمتلئ في البداية بماءٍ مُملَّح ملون (انظر شكل ٢-٣٨أ). يَفصل سطحٌ بَينيٌّ موجود أسفل الأنبوب بين الماء العذب والماء المالح. لنفترِض أن هذا السطح البَيني في حالة توازُن في بادئ الأمر؛ أي إنَّ الضغط أسفل السطح البَيني مباشرة، والناتج عن الماء العذب، يُساوي الضغط أعلاه الناتج عن الماء المالِح. ونظرًا لأن الماء المالِح أكثر كثافةً من الماء العذب، فإنَّ حالة التوازُن تعني أن ارتفاع الماء فوق السطح البيني يجِب أن يكون أقصر بالنسبة للماء المالح مقارنة بالماء العذْب.

وعلى الرغم من توازُن هذا الترتيب، فإنه غير مُستقر أمام الاضطرابات العارضة التي لا مفرَّ منها. افترِض أنه بفعل الاضطراب دخلتْ كمية «صغيرة» من الماء العذْب إلى الأنبوب. نظرًا لأنَّ الأنبوب ضيِّق للغاية، فارتفاع السائل في الكوب الورَقي لا يتغيَّر على نحوٍ ملحوظ، إلا أن الضغط يتغيَّر لأن جزءًا من الأنبوب أصبح يحتوي الآن على ماءٍ عذب أقلَّ وزنًا؛ لذلك يُصبح الضغط فوق السطح البيني أصغرَ مما كان عليه في السابق. وفي واقع الأمر، يستمر هذا الدفع إلى أن يزيد في النهاية ارتفاع الماء في الكوب الورقي زيادة كافية لإعادة تأسيس التوازُن في السطح البيني. وعند هذه المرحلة يُصبح الأنبوب مليئًا بالماء العذب (انظر شكل ٢-٣٨ب).



شكل ٢-٣٨: بند ٢-١٣٤: (أ) اندفاع الماء العذب لأعلى عبْر الأنبوب الضيِّق. (ب) اندفاع الماء المالِح المُلوَّن لأسفل عبْر الأنبوب.

ومرة أخرى يُصبح هذا التوازُن في قاع الأنبوب غير مُستقر. وعندما يُسفر اضطراب عارض عن إرسال كمية صغيرة من الماء المالح إلى أسفل الأنبوب، سيؤدي زيادة الوزن في الأنبوب إلى اندفاع الماء العذْب خارج قاع الأنبوب، فيؤدِّي إلى اندفاع المزيد من الماء المالِح إلى الأنبوب. وفي النهاية يعود الترتيب إلى هيئته الأولى ويُصبح الأنبوب مُمتلئًا بالماء المالح. ثم تُعاد هذه الدورة مراتٍ عديدة.

وإذا كان الكوب الورَقي يحتوي على ثُقب بدلًا من أنبوب ضيِّق، فمن المُمكن أن نعتبِر الثُّقب أنبوبًا قصيرًا. إلا أنه في هذه الحال لا يعود دخول السائل في الآخر تدريجيًّا، بل يُصبح سريعًا لدرجةٍ تجعل من الصعب إيقافه (فالتداخُلات تحمل زخمًا).

ويصف جاليليو تجربة مُشابهة تتمثَّل في ملء كرة ذات فتحة ضيِّقة بالماء ثم وضعها وهي مقلوبة في كوب من النبيذ الأحمر. سيدخل النبيذ في الماء حتى تُصبح الكرة مملوءة بالنبيذ ويُصبح الكوب مملوءًا بالماء. وعلى الرغم من أن جاليليو لم يصف حدوث أي اهتزازات، فإننا من الممكن أن نُخمِّن حدوثها.

(١٣٥) أصابع الملح والنافورة المالِحة

لترى التكوين المعروف باسم «أصابع الملح»، املأ جزئيًّا وعاءً بالماء العذب البارد. بعد ذلك صُبَّ برفقٍ ماءً دافئًا مالحًا قليلًا مُضافًا إليه مُلوِّن طعام ليُصبح أكثر وضوحًا. صُبَّ

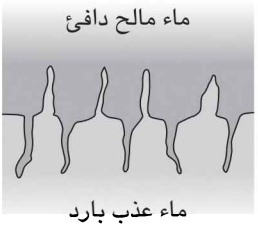
دون أن تُحدِث إلَّا أقلَّ قدرٍ مُمكن من الاضطراب عن طريق الصبِّ من ارتفاع سقوط صغير أو بالصبِّ على جسمٍ طافٍ. الماء العلوي أخف من الماء الموجود بالأسفل؛ فعلى الرغم من أن الماء العلوي مالح، فإن درجة حرارته الأعلى تُقلل كثافته لمستوًى أقل من الماء العذب؛ ومن ثَمَّ، نظرًا لوجود ماءٍ علوي أخف وزنًا، يصبح هذا الترتيب مُستقرًّا. لماذا إذن بعد مرور بضع دقائق تنزل «أصابع» من الماء المُلوَّن إلى الماء العذب وتصعد أصابع من الماء العذب إلى أعلى داخل الماء الملوَّن (انظر شكل ٢-٣٩أ)؟

لتكوين «نافورة مالحة» املأ جزئيًّا وعاءً بالماء العذب البارد. ثم اثقُب ثقبًا في قعْر كوبٍ ورقي واقلب الكوب، وأخفِضه في الماء (انظر شكل ٢-٣٩ب). أضِف بعد ذلك طبقةً من الماء الدافئ إلى الوعاء إلى أن يبدأ الماء في الانبثاق من ثُقب الكوب. وبعد ذلك أضِف طبقةً من الماء المالح الساخن إلى الوعاء. وفي النهاية ضعْ بضعَ قطراتٍ من ملوِّن الطعام قُرب الثُّقب ليصبح التدفُّق مرئيًّا. لماذا يستمرُّ الماء في الانبثاق من الثقب؟ من الناحية النظرية يمكن تشييد نافورة مالحة «دائمة» في المحيط. وبمجرد بدء التدفق، يمكن أن يستمرَّ الماء في التدفُّق عبْر أنبوبٍ طويل يمتدُّ من ماء قاع المُحيط الأكثر برودةً والأقل ملوحةً إلى ماء السطح الأكثر دفئًا وملوحة.

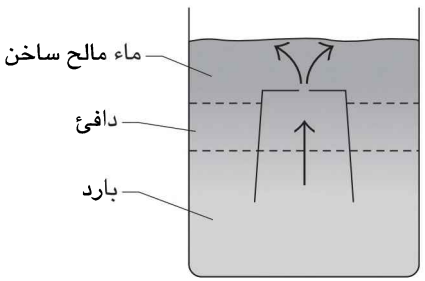
الجواب: يفتقر الترتيب الذي يكون فيه الماء المالِح الدافئ أعلى الماء العذب البارد إلى الاستقرار لسببَين في واقع الأمر: (١) تنتقل الطاقة الحرارية بسرعةٍ كبيرة من الماء الأكثر دفئًا إلى الماء الأكثر برودةً عبْر السطح البيني. (٢) ترسل الاضطرابات العارِضة أمواجًا صغيرة عبْر السطح البيني وسُرعان ما تتزايد إحدى هذه الأمواج في الحجم مكونةً الأصابع.

ولكي ترى كيف يحدُث عدم الاستقرار تأمَّل إحدى هذه الأمواج الصغيرة. النقطة العُليا (الذروة) هي نتوء من الماء العذب الأكثر برودةً في الماء المالح الأكثر دفئًا، والنقطة السُّفلى (الوادي) نتوء من الماء المالِح الأكثر دفئًا في الماء العذب الأكثر برودة. تلك النتوءات من المُفترَض أن تتسطَّح ببساطةٍ غير أن الطاقة الحرارية تنتقل إلى النتوء العلوي وتهرب من النتوء السفلي. وعندما يُصبح النتوء العلوي دافئًا يُصبح أخفَّ ومِن ثَمَّ يشقُّ طريقه إلى ارتفاعٍ أعلى. وعندما يبرد النتوء السُّفلي يُصبح أثقل ومن ثَمَّ يشقُّ طريقه إلى عُمقٍ أدنى؛ ومن ثَمَّ فإن النتوءات تزيد بسبب انتقال الطاقة الحرارية، وتتحوَّل الموجة العارِضة المبدئية إلى أصابع ناتئة.

تتكوَّن أصابع مُشابهة عندما يعتلي محلول سكري ملوَّن (أقل كثافة) محلولًا ملحيًّا (أكثر كثافة). فكلٌّ من الملح والسكر ينتشران (يتشتَّتان) عبْر السطح البيني المحصور



(أ)



(ب)

شكل ٢-٣٩: بند ٢-١٣٥: (أ) أصابع رفيعة تمتدُّ رأسيًّا من السطح البيني الموجود بين الماء المالِح الدافئ والماء العذْب البارد. (ب) تدفُّق الماء في نافورة مالحة.

بين الطبقتَين، لكن الملح ينتشر أسرع. من المُفترَض أن تتسطَّح النتوءات الصادرة عن الاضطرابات العارضة، غير أنَّ انتشار الملح من النتوءات العلوية وانتشار الملح في النتوءات السفلية يجعل النتوءات تتحوَّل إلى أصابع.

في الترتيب الذي تتشكَّل فيه النافورة المالحة يصبح الماء البارد دافئًا عند انتقاله لأعلى الكوب بسبب الماء الأكثر دفئًا الموجود خارج جدار الكوب. ومن ثَمَّ، فإن الماء المُتَّجه إلى أعلى يصبح أخفَّ ويستمر في الصعود. وعندما يصل إلى الثقب يجد نفسه أخفَّ بكثيرٍ عن الماء المالح المُحيط ومن ثَمَّ ينبثق. ويُمكن أن تحدُث عملية شبيهة في نافورة المحيط المالحة الافتراضية؛ فبمجرَّد بدء التدفُّق سيُصبح الماء الذي يصعد الأنبوب دافئًا بفعل الماء الدافئ باستمرارٍ الموجود خارج الأنبوب. ومن ثَمَّ، سيُصبح الماء الداخلي أخف، ونظرًا لعدم قدرة

الماء على اكتساب الملح من جدار الأنبوب، سيُصبح أخفَّ من الماء الخارجي؛ ولذلك، سوف يستمرُّ في الصعود عبْر الأنبوب.

(١٣٦) رفع الأشجار الطويلة للماء

كيف تتمكَّن شجرة بالغة الطول مثل شجرة السيكويا العملاقة من رفع الماء إلى الأوراق في أعلاها؟

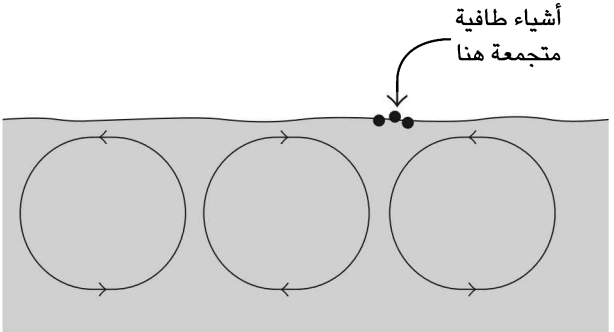
الجواب: ما زال جواب هذا السؤال البسيط على نحوٍ مُخادع يُثير جدلًا شديدًا. والجواب المقبول بوجهٍ عام والمعروف باسم «نموذج التماسُك والشد» هو أنَّ تبخُّر الماء من على سطح الورقة يُقلِّل الضغط في عمود الماء المُستمر الذي يجري من الجذور إلى الأوراق. ويُقال إن هذا العمود مُعرَّض إلى «ضغط سلبي» لأن الماء ينجذب لأعلى بفعل الشد. بالطبع يُمكن وضع الماء تحت ضغط، لكن فكرة إمكانية وضع الماء تحت تأثير الشدِّ لطالَما رُفضَت نتيجة الاعتقاد بأن تماسُك الماء (الانجذاب المُتبادَل بين جزيئات الماء) لا يستطيع مقاومة الشد. رغم ذلك يبدو أن الشدَّ والضغط السلبي موجودان في الأوعية الشَّعرية للشجر. وببساطة، عندما يتبخَّر جُزيء ماء من الورقة، ينجذب جزيء ماء إلى الجذر.

ورغم ذلك، لا يزال الاعتراض على نموذج التماسُك والشدِّ مستمرًّا؛ ففي بعض النباتات يمكن أن يُسحَب الماء على مراحل، مثلما تُرفَع السفن العابرة في القنوات عبْر الهويس. بالإضافة إلى ذلك، يمكن لظروفٍ بيئية مثل الجفاف أن تؤثر على طريقة رفع الماء.

(١٣٧) تكوُّن صفوف الرياح على الماء

عندما تهبُّ الرياح المُعتدلة على المسطحات المائية، لماذا تُكوِّن الفقاقيع والأعشاب البحرية والأوراق وغيرها من الأشياء الصغيرة الطافية صفوفًا مُتوازية يُطلَق عليها «صفوف الرياح»؟

الجواب: عندما تكون سرعة الرياح في نطاقٍ مُعيَّن فإنها تخلق خلايا دوَران أفقية طويلة على الطبقة العلوية للماء. ويُطلَق على هذا الدوَران «دوران لانجمويير» نسبةً إلى العالِم إرفينج لانجمويير الذي اكتشفه بعد أن رأى صفوفًا من عُشب السرجس البحري خلال رحلة بحرية عبْر المُحيط الأطلنطي. يتسبَّب هذا الدوَران في حركة لولبية للماء في الاتجاه العام للرياح. وكل خليتَين مُتجاورتَين تتناقضان في اتجاه الدوران. وبفرْض أنك



شكل ٢-٤٠: بند ٢-١٣٧: خلايا الدوَران في الماء تجمع الأشياء الطافية.

نظرتَ إلى خليةٍ يدور فيها الماء في اتجاه عقارب الساعة، فسيكون اتجاه دوَران الماء عكس عقارب الساعة في الخلية الموجودة جهة اليسار وفي الخلية الموجودة جهة اليمين (انظر شكل ٢-٤٠). وهذا يعني أنه على السطح يجتمع دوَران الخلية التي تدور مع عقارب الساعة ودوَران الخلية التي تدور عكس عقارب الساعة الموجودة على يمينك، لكن لا يحدُث تجمُّع على يسار الخلية. تُكوِّن الأشياء الطافية بفعل التجمُّع صفًّا على الجانب الأيمن للخلية التي تنظر إليها. وتتكوَّن صفوف أخرى على جوانب خلايا أخرى، وتكون المسافة بين الصفوف ضِعف عرض الخلية. وإذا كانت الأشياء غير طافية على الماء، فمن المُمكن أن تجد أيضًا صفوف الرياح إذا جمَّعَت الدوَرانات الطبقات الرقيقة الطافية (أو «الطبقات الأحادية») في صورة مسارات أو ممرَّات. تُقلِّل هذه الطبقات نشاط الموج في الماء، وهذا يجعل الماء يعكس الضوء بطريقةٍ مُختلفة عن المناطق الخالية من هذه الطبقات الرقيقة.

(١٣٨) شوارع السُّحُب وقطاعات حرائق الغابات

لماذا يُطلَق على السُّحب المُرتَّبة أحيانًا في شكل خطوط رفيعة طويلة «شوارع السحب»؟ غالبًا ما يكون من الصَّعب رؤية هذا الترتيب من الأرض، لكن عند تصويره من قمرٍ صناعي يمكن أن تبدو هذه الخطوط شديدة الانتظام حتى إنها تبدو مصطنَعة.

الجواب: غالبًا ما يؤدي تدفُّق الهواء على نطاق واسع في الجزء السُّفلي من الغلاف الجوي للأرض إلى تكوين أنابيب دوامية طويلة مُتوازية مُمتدة في الاتجاه العام للرياح.

إذا نظرتَ في اتجاه الرياح فستجد أن الهواء يدور في مسار لولبي عبْر الأنبوب، وتتضادُّ الأنابيب المُتجاورة في اتجاهات الدوَران؛ فمنها ما يدور في اتجاه عقارب الساعة ومنها ما يدور عكس اتجاه عقارب الساعة (مثل الخلايا في شكل ٢-٤٠). تتكوَّن السحب في الأماكن التي يكون فيها اتجاه تدفُّق الدوَّامات المُتجاورة لأعلى. ومن ثَمَّ، من المُمكن أن تتكوَّن خيوط طويلة من السحب على الحدود بين الأنابيب الدوَّامية المُتجاورة وتساوي المسافة بين كل أنبوبٍ وآخر ضِعف عرض الأنبوب.

بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ الرياح التي تهبُّ في حرائق الغابات يمكنها تكوين أنابيب دوَّامية أُفقية، ويُغيِّر الدوران داخل هذه الأنابيب المُتجاورة من نسَق الاحتراق؛ فعندما يكون اتجاه تدفُّق الأنابيب المُتجاورة لأسفل، يقلُّ احتمال احتراق الأشجار لأنَّ الدوَران يدفع الحريق بعيدًا نحوَ مناطق التدفُّق العلوي؛ لذلك في وجود رياح مُستمرة يمكن أن يمتدَّ الحريق عبْر إحدى الغابات في قطاعاتٍ مُتوازية تاركًا قطاعاتٍ وسطى من الأشجار غير المُحترقة.

(١٣٩) تعبئة حلوى حبيبات إم آند إمز

عند تعبئة برطمان بحلوى دائرية الشكل أو بحلوى حبيبات إم آند إمز (تلك الحلوى ذات الشكل البيضاوي التي تُنتجها شركة مارس)، فأي المجموعتَين ستكون أثقل وزنًا إذا كانت حبوب كلا النَّوعَين من الحلوى مُتماثلة في الكثافة؟

الجواب: على الرغم من أنَّ الجواب قد يبدو واضحًا فإن الجواب (أو على الأحرى السؤال نفسه) يُعتبَر مفاجئًا؛ فعلى الرغم من أن الحُبيبات الكُروية مكدَّسة في برطمان، فإنه تُوجَد فراغات كبيرة بين الكُرات. ونظرًا لأن حبيبات إم آند إمز بيضاوية الشكل وقصيرة، فإنها تتكدَّس تاركةً قدرًا أقلَّ من الفراغات. ومِن ثَمَّ، فإنَّ مجموعة حُبيبات إم آند إمز ستكون أثقلَ وزنًا.

(١٤٠) كوم التفَّاح

إذا بنَيْتَ هرمًا من التفَّاح أو كومًا من الرمال، ففي أي نقطة على طول قاعدة البنيان سيكون تأثير القوة على الأرض أكبرَ ما يكون؟

الجواب: إذا شيَّدتَ هرمًا وكانت كلُّ قطعةٍ فيه (كالأحجار مثلًا) مُرتَّبة في أعمدةٍ رأسية منظمة، دون أن تستند أي قطعة على عمودَين، فسيكون الجواب بسيطًا: يقع أكبر تأثير للقوة على الأرض أسفلَ العمود الأطول، وهو عند مركز الهرم، ويُصبح التأثير أضعف تدريجيًّا عند الأعمدة الأقصر القريبة من المُحيط الخارجي للهرم.

إلا أنك عندما تُحاول رصَّ أشياء مثل التفاح أو حبيبات الرمال أو غيرها من الأشياء غير المُنتظمة لن تستطيع تكوين أعمدةٍ رأسية دون سند القطعة على عمودَين؛ فكل قطعة في الكوم تستنِد على قطعةٍ أسفلها مُزاحة ناحية الجانب. وهذا الترتيب يمكن أن ينقل قوة الدعم نحو جانب الكوم. ووفقًا للتجارب، فإنَّ أكبر تأثيرٍ للقوة على الأرض أسفل الكوم يكمُن عادةً في حلقة محيطة بالقاعدة، بين المركز والمُحيط الخارجي.

(١٤١) أشكال المساحيق

تكوِّن الرمال الأشكال التي يُطلَق عليها «أشكال كلادني» عند وضعها على سطح معدني أفقي يهتزُّ على نحوٍ شِبه مُستمر. ويمكن أن تنطلِق هذه الاهتزازات عن طريق سحْب قوس ناحية إحدى الحواف، أو قد يرتكز السطح المعدني على سمَّاعة قُمعية عمودية يشغلها مولِّد ذبذبات. فما السبب في هذه التصاميم؟ وإذا وضعْنا ترابًا ناعمًا بدلًا من الرمال (ربما مسحوق الطباشير) فلماذا يمكن أن تظهر أشكال مُختلفة؟ عند استخدام مزيجٍ من الرمال والتُّراب لماذا ينفصل المُكوِّنان؟

انثر مسحوقًا ناعمًا في شكل طبقةٍ مستوية تمامًا على سطح زجاجي أفقي، واضرب جانب السطح مرةً كل ثانية تقريبًا بعصًا بلاستيكية. لماذا يكوِّن المسحوق أكوامًا صغيرة قُمعية الشكل بعد عشرين ضربة تقريبًا؟

الجواب: يهتزُّ السطح المعدني عند نقاطٍ مُعينة (يُطلق عليها «البطون») اهتزازًا شديدًا، في حين لا يهتزُّ مُطلقًا عند نقاطٍ أخرى (يُطلق عليها «العُقَد»). يُمكن أن تكون البطون متجاورة وتكوِّن صفوفًا عبْر السطح المعدني، ويمكن أيضًا أن تكون العُقَد متجاورة وتكوِّن صفوفًا خاصة بها. وحبيبات الرمال الموجودة في البداية عند هذه البطون تتناثر في الهواء بعيدًا عن الصفوف، وتميل إلى التجمُّع في صفوف العُقَد. وبمجرَّد تجمُّع حبيبات الرمال فإنها تكشف صفوف العقد وتكوِّن أحد أشكال كلادني. ويعتمد

ظهور شكلٍ مُعيَّن من هذه الأشكال في واقع الأمر على شكل القُرص المعدني ومكان تثبيته (فعلى سبيل المثال، إذا ثُبِّتَ القُرص بمِلزمة فإنَّ هذا يحُول دون احتمالية الاهتزاز).

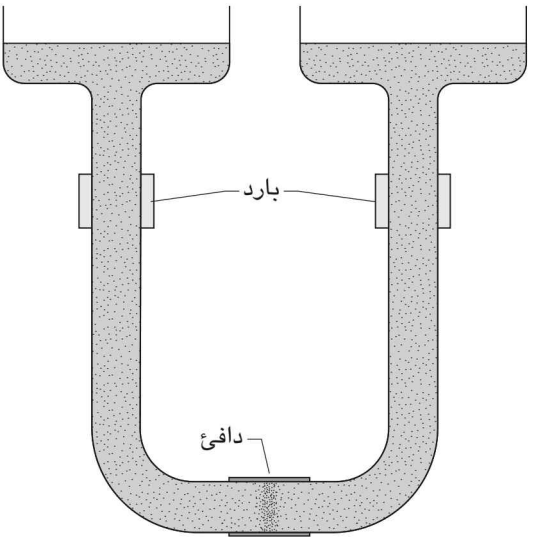
ونظرًا لأنَّ التراب أخفُّ من الرمال فإنه يتأثَّر بالتيارات الهوائية المُتكوِّنة فوق السطح المعدني مباشرة عند اهتزازه. وبالقُرب من السطح المعدني يميل الهواء إلى الانتقال من العقدة إلى البطن المُجاور ثم إلى الأعلى بعيدًا عن السطح المعدني. ومِن ثَمَّ، فإن تدفُّق الهواء يميل إلى حمْل التراب من العقدة إلى البطن المجاور، فيُرسبه هناك مع تحوُّل تدفُّق الهواء إلى الأعلى.

اسْتُخدمت أشكال كلادني في التحليل الجنائي لأجهزة الكشف عن الدخان. في أنواع مُعينة من الحرائق التي يصدُر عنها السخام تتجمع جزيئات الدخان في صفوف العقد الخاصة بالأجزاء التي تهتزُّ عندما يصدر جهاز كشف الدخان صوت الإنذار. ويمكنك أن تعرف فيما بعد إذا ما كان الإنذار قد أطلق الصافرة أثناء الحريق أم لا عن طريق رؤية إذا ما كانت أشكال كلادني المُتكوِّنة من ذلك السخام قد تراكمت على تلك القِطَع أم لا. وإذا لم تكن قد تراكمت عليها، فهذا يعني أن جهاز كشف الدخان لم يقُمْ بوظيفته.

عند ضرب سطح معدني يحمل ترابًا دقيقًا فإن هذا الضرب يُسفر عن اهتزازات رئيسية وجيزة في السطح المعدني، مما يؤدي إلى رفع التراب في الهواء ويؤدي أيضًا إلى تحرُّك الهواء. وبفرْض أن التراب تجمَّع في النقطة (أ) أكثر من تجمُّعه في المنطقة المُجاورة؛ فإن التراب الأكثر الموجود في النقطة (أ) يمكن أن يُغيِّر اهتزازات السطح المعدني وتدفُّق الهواء بحيث يتحرك التراب الموجود في المنطقة المُجاورة نحو النقطة (أ) عند نثره في الهواء. فعندما تهبط حُبيبات التراب على نقطةٍ مُترِبة، فإنها تميل إلى الالتصاق، أما إذا هبطت على نقطة خالية فإنها لا تلتصق. ومِن ثَمَّ يزداد التراب في النقطة (أ) حتى تستحوذ النقطة (أ) على التراب المُجاور بالكامل. وتحدُث هذه البداية العارضة، وهذا الاستحواذ اللاحق، على سطح القُرص المعدني عند وجود مسافاتٍ شِبْهِ مُتساوية بين كلتا الكومتَين.

(١٤٢) المُذبذِب الهيدروليكي

يُظهِر شكل ٢-٤١ أنبوبًا على شكل حرف U يحتوي على الماء وله فتحتان واسعتان. قاع الأنبوب المركزي مُعرَّض للحرارة أما الطرفان العلويان فباردان، وكلٌّ شيءٍ مُتماثل. فلماذا بمجرَّد بدء التسخين والتبريد يهتزُّ الماء يسارًا ويمينًا؟



شكل ٢-٤١: بند ٢-١٤٢: سوف يهتزُّ الماء من جانب لآخر.

الجواب: يؤدِّي التسخين إلى خفض كثافة الماء ومِن ثَمَّ يرتفع الماء الدافئ، في حين يزيد التبريد من كثافة الماء؛ ومِن ثمَّ يهبط الماء البارد. وعلى الرغم من تماثُل الموقف في بادئ الأمر، فإن أي اضطرابٍ بسيط في المُحيط يجعل الماء يتدفَّق في أحد الطرفَين أكثر من تدفُّقه في طرف الأنبوب الآخر. فإذا دفع الاضطراب الماء الدافئ أعلى الطرف الأيمن؛ فإن الحركة تجعل الماء البارد يهبط في الطرف الأيسر. ومِن ثَمَّ يُصبح عمود الماء في الطرف الأيمن أقلَّ كثافة من العمود في الطرف الأيسر، والاختلاف في الكثافة يدفع مزيدًا من الماء الدافئ أعلى العمود الأيمن، ممَّا يسمح بهبوط مزيدٍ من الماء البارد في الجانب الأيسر.

وفي النهاية، يُصبح العمود في الجانب الأيمن أعلى على نحوٍ كافٍ من العمود الموجود في الجانب الأيسر بما يجعل حركة الماء تتباطأ وتتوقَّف ثم تنعكس. وفي الوقت نفسه، يُصبح الماء الموجود في القاع دافئًا. ومِن ثَمَّ، مع انعكاس الحركة يندفع الماء الدافئ إلى العمود الأيسر؛ ومِن ثَمَّ تُعاد الكرة.

(١٤٣) فقاعات الزيت التي تتحرَّك في الجلسرين

املأ وعاءً على نحوٍ شبهِ كامل بالجلسرين واملأ بقية الوعاء بزيت السيليكون الأخف وزنًا والأقلَّ لزوجةً عن الجلسرين. اترك الوعاء ليلًا دون تعريضه للاضطراب (للسماح بهروب الفقَّاعات الهوائية)، ثم أغلِق الوعاء واقلِبه. لماذا تتكوَّن فقاقيع الزيت في نسَقٍ شِبه مُوحَّد على السطح الذي أصبح الآن قاع الوعاء ثم ترتفع في صورة تيارات؟ هذا الترتيب هو أساس أنواعٍ عديد من ألعاب الموائع الجديدة التي يكوِّن فيها أحد الموائع فقاقيع تمرُّ عبر المائع الآخر دون أن تختلط به.

الجواب: يتَّسِم الترتيب الأول بالاستقرار، فالزيت يطفو فوق الجلسرين. أما الترتيب المقلوب فيتسم بعدم الاستقرار (وهذا مثال على ما يطلق عليه «استقرار رايلي-تايلور») والاضطرابات العارضة المتمثلة في اضطرابات عملية القلب نفسها ترسل موجات في الواجهة البينية الفاصلة بين الزيت والجلسرين مثلما يمكنك إرسال الموجات على الواجهة البينية الفاصلة بين الهواء والماء في حوض الاستحمام. تزداد سرعة إحدى هذه الموجات عن الأخرى وتسيطر عليها. وعندما تصل هذه الموجة لنقاطٍ عالية (قمم) يبرُز الزيت لأعلى إلى الجلسرين، وعندما تصل الموجة لنقاط منخفضة (وديان) يبرز الجلسرين لأسفل إلى الزيت. وتتحوَّل البروزات الصاعدة لأعلى إلى فقاعات صاعدة يُغذيها الزيت المتدفق أسفل البروزات السفلية، وتشير بشكل تقريبي المسافات المُنتظمة للغاية بين الفقاعات على طول قاع الوعاء إلى الطول الموجي للموجة المسيطرة.

إليكم تجربة مشابهة: اترك وعاءً من شراب الذرة ساكنًا طوال الليل. ثم ضعْ أنبوبًا صغيرًا يُطلِق مزيجًا من شراب الذُّرة والماء بالقُرب من قاع شراب الذُّرة الموجود في الوعاء. سيكوِّن الخليط فقاعةً عند خروجه من الأنبوب. ونظرًا لأن فقَّاعة الماء والشراب أخفُّ من الشراب، فإن الفقاعة ترتفع. وأثناء ارتفاعها تترك خلفها أثرًا. ويمكن أن يُصبح هذا الأثر مسارًا للفقَّاعات الجديدة التي تنطلِق من الأنبوب.

(١٤٤) كُرة في تيَّار الهواء

جذبًا لانتباه العملاء تستخدِم بعض المتاجر عرضًا يتمثَّل في كرة مُعلَّقة في تيار الهواء. لو كان تيار الهواء صاعدًا لأعلى مباشرة فلن يكون التعلق مُدهشًا؛ لأن تأثير الهواء على الجانب السُّفلي من الكرة يُمكن أن يوازن تأثير قوة الجاذبية على الكرة. إلا أنَّ السمة

الجاذبة للانتباه تتمثَّل في مَيل تيَّار الهواء بزاوية تبلغ ٤٥ درجة تقريبًا عن المستوى الرأسي. فكيف يتمكن تيَّار الهواء من تعليق الكرة؟ ولماذا تعود الكرة إذا ضربتها ضربة كافية لجعلها تترُك تيَّار الهواء جزئيًّا؟

الجواب: السبب في تعلُّق الكرة في الهواء واستقرارها هو أنها تُغيِّر اتجاه تيار الهواء. إذا انخفضت الكرة للأسفل في محاولةٍ واضحة للهروب من تيَّار الهواء، فإنَّ التيار يتدفَّق فوق أعلى الكرة وأسفل جزء من ظهر الكرة؛ حيث يتحرر متوجهًا إلى الأسفل بميل. ونظرًا لتوجُّه التيار للأسفل، تتوجَّه الكرة لأعلى وتعود إلى التيار. ومهما حاولت الكرة الإفلات من التيار، فإنها تُغير اتجاه التيار في النهاية إلى ذلك الاتجاه؛ ومِن ثمَّ تندفع عائدة إلى التيار.

ويمكن تعليق الكرة أيضًا في تيَّارٍ مائي رأسي. وعلى الرغم من أنها ستقفز وتُحاول الهروب من التيار فإنها تعود إليه. الفرق الوحيد هو أن هذا التيار مائي وليس هوائيًّا، لكن تغيير اتجاه التيار لا يزال يُفسِّر استقرار الكرة.

ذات مرة كان لديَّ لعبة مكونة من أنبوب له شكل الحرف U وبه أنبوب ضيِّق قصير عند أحد طرفَيه. كنت أنفخ في الأنبوب الضيِّق كي أرفع كرة خفيفة الوزن في تيَّار الهواء وكي أسحب تيار الهواء عبْر بقية الأنبوب الذي على شكل الحرف U. وعند ارتفاع الكرة، كانت تمرُّ عبْر الطرف المفتوح الآخر من الشكل U وتُمتصُّ عن طريق دوَران الهواء. وكان الهدف هو تدوير الكرة عبْر الشكل U مرَّاتٍ كثيرة قدْر الإمكان بنفخةٍ واحدة قوية في الأنبوب الضيق.

(١٤٥) سفينة فلتنر

في عام ١٩٢٥ عبرت سفينة صمَّمها المهندس أنطون فلتنر المحيط الأطلنطي غير مدفوعة بمروحة الدفع التقليدية المغمورة في الماء بل مدفوعة بأسطوانتَين دوَّارتَين بارزتين رأسيًّا في الهواء. فكيف تستطيع أسطوانتان دوَّارتان دفع سفينة عبْر الماء؟

الجواب: كان الهواء يدفع الأسطوانتَين لكن ليس بالطريقة نفسها التي يدفع بها الأشرعة؛ فعندما تكون الأسطوانة ثابتة، يتدفَّق الهواء على نحوٍ مُتماثل على جانبَي الأسطوانة؛ حيث ينفصل في نقطةٍ ما قُرب المؤخِّرة عن الأسطوانة ويتكسَّر في صورة دوَّامات. يوفر هذا الترتيب قدرًا من الدفع للأسطوانة؛ لأن جانب الأسطوانة المُواجِه للرياح يزيد فيه الضغط الجوي عن الجانب المَحمي من الرياح (الضغط الجوي في الدوَّامات أقل).

إلا أن الأسطوانة تندفع على نحوٍ أكبر في حالة دوَرانها. ففي الجانب الذي يدور مع اتجاه الرياح يميل الهواء إلى التعلُّق بالأسطوانة لفترةٍ أطول من ذي قبل، وفي الجانب الذي يدور عكس اتِّجاه الرياح يتحرَّر الهواء من الأسطوانة على نحوٍ أسرع من ذي قبل. وتكون المُحصلة هي تغيُّر اتجاه تيار الهواء بفعل الأسطوانة الدائرة واتجاهه نحوَ الجانب مع اتجاه الدوران. ونظرًا لاندفاع التيار في اتجاهٍ مُعين، فإن الأسطوانة (ومِن ثَمَّ السفينة) تندفع إلى الاتجاه المُقابل.

لذلك من الناحية النظرية يمكن أن تُدفَع السفينة في الماء عن طريق تغيير اتجاه أسطواناتها في الرياح. ومن الناحية العملية، لا بدَّ أن الرحلة عبْر المُحيط الأطلنطي كانت مُخيفة؛ حيث تطلَّبت الصبر في توجيه السفينة في الرياح وفي السير في مسارٍ مُتعرِّج. (وربما استُخدِمت مروحة الدفع الخاصة بالسفينة على نحوٍ أكثر من المذكور.)

(١٤٦) مضيق جبل طارق ومضيق مسينة ومضيق صقلية

عندما تدخُل السفينة قناةً مُعينة عبْر مضيق جبل طارق، لماذا تستطيع الدوَران تلقائيًّا حول المِحور الرأسي أو تميل نحو الجانب؟ طالما عُرِف مضيق مسينة، الذي يفصل بين إيطاليا وصقلية، بمياهه الغادرة، وأُطلِق عليه «البحر المجنون». وقد أرجع هوميروس، على سبيل المثال، سلوك المياه الغريب إلى الوحشَين سيلا وكاريبديس. وفي الجانب الآخر من صقلية، في مضيق صقلية الذي يفصل الجزيرة عن تونس، تُهاجِم في بعض الأحيان المياه العالية ميناء الصيد الصقلي الكبير «مازارا ديل فالو» مكونة حائطًا عاليًا فوق المصبِّ القديم. فما سبب هذا السلوك الغريب في هذه المضايق الثلاث؟

الجواب: السبب في السلوك الغريب في مضيق جبل طارق هو «الأمواج الداخلية»، وهي أمواج مُتكوِّنة داخل تيار المد والجزر عبْر المضيق. تتكون الأمواج داخل هذا التيار؛ لأن المياه القادمة من البحر المتوسط أكثر ملوحة من مياه المُحيط الأطلنطي. (مياه البحر المتوسط أكثر ملوحة بسبب تبخُّر المياه من البحر.) ومِن ثَمَّ، فإنَّ مياه البحر المُتوسط أكثر كثافةً من مياه المحيط الأطلنطي. وعندما يتدفَّق هذا الماء الأكثر كثافة عبْر المضيق إلى المُحيط الأطلنطي لا بدَّ أن يعبُر فوق «سد» (نقطة مرتفعة) مما يدفع الماء لأعلى وفوق المياه (الأخف) القادمة من الأطلنطي. هذا الموقف يفتقر إلى الاستقرار؛ فالمياه الأكثر كثافة تتحرك فوق المياه الأخف، وتتولَّد الأمواج. ولا تُرى الأمواج على سطح الماء إلا في هيئة أحزمة من المياه المُضطربة، لكن حركة الأمواج يمكن أن تضرب السفن وتقلِبها.

بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ الأمواج الداخلية مسئولة أيضًا عن البحر المجنون في مضيق مسينة. وهناك يفصل سدٌّ بين ماء البحر الأيوني الأكثر كثافة والأشد ملوحة الواقع جنوب السد عن ماء البحر التيراني الأخف كثافة والأقل ملوحة الواقع شمال السد. تتَّسِم اهتزازات المد والجذر في البحر المتوسط بأنها صغيرة للغاية في العموم (فهي بضعة سنتيمترات فحسب)، أما الاهتزازات في هذَين البحرَين المُتواجهَين عبْر السد فمختلفة في الطور المَوجي (غير مُتوافقة). ومِن ثَمَّ، فعندما يرتفع الماء في أحدهما وينخفض الماء في الآخر، يتدفَّق الماء فوق السد. ونظرًا لاختلاف الكثافة يُولِّد التدفُّق أمواجًا داخلية. على السطح تظهر الأمواج كأحزمة يكون الماء فيها شديد الاضطراب كما لو كانت تُحرِّكه رياح عاصفة قوية. ومِن ثَمَّ، فإنَّ الأمواج الداخلية، وليست الوحوش التي وصفها هوميروس، هي التي هدَّدت سفن الصيد في هذه المنطقة.

ويرجع سبب المياه الغريبة في مضيق صقلية إلى خضخضة الماء في المضيق، ويُطلَق على هذا التأثير اسم «تراوُح منسوب السطح». تحدُث اهتزازات رنانة في المضيق؛ أي تحدث خضخضة طبيعية شديدة الشَّبَه بالخضخضة التي يمكنك إحداثها في طبق ماء تحمله عبْر الغرفة. وفي بعض الأحيان يُمكن أن تكون الخضخضة في المضيق كبيرة حتى إنها ترسل جدارًا من الماء يُطلق عليه «القفزة الهيدروليكية» أو «المَوجة الضخمة» أعلى المصب.

(١٤٧) تناثُر الحُبيبات

إذا وقعَتْ كرة ثقيلة جاسئة على طبقةٍ من الكرات الجاسئة الأصغر حجمًا، فلماذا يصدُر عن الارتطام نافورة ضيِّقة من الكُرات الأصغر حجمًا؟

الجواب: عندما تخترق كرة ثقيلة طبقةً من الكرات الأصغر حجمًا، فإنها تُسبِّب ثقبًا أسطوانيًّا. وتُشكِّل الكُرات المندفعة بعيدًا عن الثقب نافورةً حول مُحيط الثقب. وعندما ينسدُّ الثقب بتدفُّق الكرات إليه مرة أخرى، فإنها تتصادم وتُغيِّر اتجاهها لأعلى وتكوِّن النافورة.

(١٤٨) نتوء رفيع على الماء الجاري

عندما تكون الإضاءة مناسبة لماذا تستطيع رؤية خطٍّ رفيع كالشعرة يمتدُّ عبْر الماء بطيء الجريان في الجدول أو الغدير؟ (عادةً يجب أن تكون الشمس منخفضة كي يكون الضوء مائلًا، وحتى في هذه الحالة ستحتاج إلى محاولة الرؤية من زوايا عدة.)

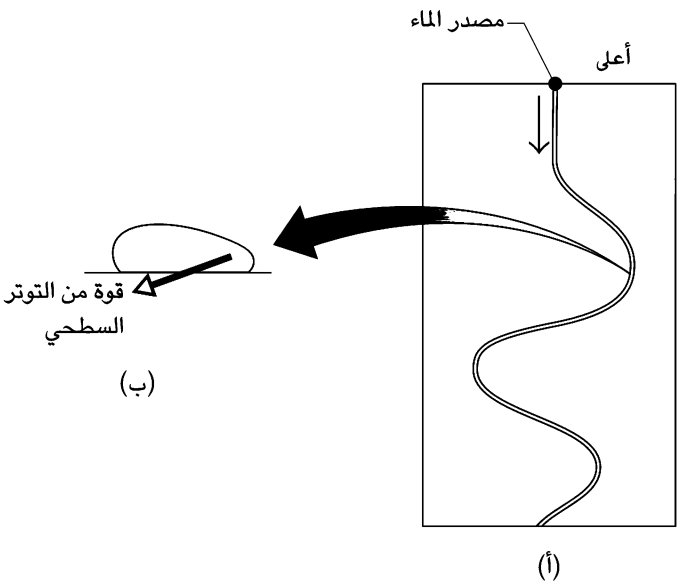
الجواب: تحتوي مُعظم الجداول والغُدران على طبقاتٍ من الملوثات على المياه السطحية. وقد تكون هذه الطبقات ملوثات أو قد تكون موادَّ مكونة طبيعيًّا مثل المواد الصادرة عن النباتات. عادةً ما تكون الطبقات رقيقة جدًّا على نحوٍ يَحُول دون رؤيتها ومن الممكن أن تكون في سُمك الجزيء فحسب، وفي هذه الحالة يُطلق عليها «الطبقات الأحادية».

عندما تقابل المياه البطيئة الحركة طبقة أحادية، فإن المياه القادمة تتراكم مكونةً نتوءًا رفيعًا جدًّا قبل أن تتمكن من التحرُّك أسفل الطبقة. وإذا كانت الإضاءة مناسبة فسوف تتمكَّن من رؤية الحافة نظرًا لتبايُنها مع الماء الجاري من ناحية وركود الطبقة من ناحية أخرى. ويُطلَق على هذا النتوء عادة «نتوء رينولدز»؛ لأن أوزبورن رينولدز (١٩٠٠) كان من أوائل من درَسوه، على الرغم من أنَّ بنجامين فرانكلين (١٧٧٤) وهنري ديفيد ثورو (١٨٥٤ ولاحقًا) لاحظوا هذه الظاهرة في السابق. ومن المُمكن أيضًا أن ترى نتوء رينولدز في بِركةٍ أو في مُسطَّح مائي مفتوح إذا دفعت الرياح المعتدلة الماء غير الملوث فوق طبقة من الملوثات.

(١٤٩) المجاري المائية الرفيعة المُتعرِّجة

إذا تدفَّق مجرًى مائي رفيع على سطحٍ زجاجي أملس مائل بزاوية أقل من ٣٠ درجة، فسيكون المجرى مُستقيمًا. وإذا زاد المَيل عن ٣٠ درجة، فمن المُمكن أن يظلَّ المجرى مُستقيمًا، لكن من الممكن أن يتعرَّج يسارًا ويمينًا، مُكوِّنًا إما نسَقًا مُتعرجًا مُستمرًّا أو نسَقًا دائم التغير (انظر شكل ٢-٤٢أ). فما سبب التعرُّج؟

الجواب: عندما يكون «مُعدل التدفق الحجمي» (كمية المائع المُتدفِّق عبْر نقطةٍ معينة في الثانية) منخفضًا، فإن تأثير الجاذبية على الماء يميل إلى إسالة الماء مباشرة على السطح المائل. يُقلل التوتر السطحي (الناتج عن التجاذب المُتبادل بين جزيئات الماء) من منطقة السطح ويعمل كغشاءٍ مطاطي، فيحافظ على استقامة التيار. تزيد الجاذبية من سرعة المجرى في الجزء الأول منه. ومع ازدياد سرعة الماء تقلُّ مساحة المقطع العرضي في المجرى؛ لأنه مع تحرُّك الماء بسرعة أكبر تقل المساحة المطلوبة لنقل القدر نفسه من الماء في الثانية. إلا أنه مع ازدياد السرعة يزداد تأثير المقاومة على الماء من السطح المائل إلى أن تُصبح المقاومة مُساوية لقوة الجاذبية. وبعد ذلك لا تتغيَّر السرعة أو مساحة المقطع العرضي.



شكل ٢-٤٢: بند ٢-١٤٩: (أ) بالنظر إلى أسفل مباشرة على سطحٍ مائل نجد أن مجرى الماء يتعرَّج. (ب) مقطع عرضي في انحناءة. الانحناء الشديد على الجانب الأيمن يُسفر عن قوة شديدة على الجانب الأيسر.

عندما يكون مُعدَّل التدفُّق الحجمي أكبر نسبيًّا، يمكن أن تتسبَّب حركة الماء في جعل المجرى غير مُستقرٍّ عن طريق وجود سرعات مختلفة عبْر المجرى. يعني اختلاف السرعة هذا أن شكل المجرى لم يعُد متماثلًا. ويتسبَّب التوتر السطحي على الجانب الأكثر انحناء في قوة جذْبٍ أكبر من التوتر السطحي على الجانب الأقل انحناء.

وإذا افترضْنا أن الانحناءة بدأت في التكوُّن بفعل الصُّدفة في المجرى، فإنَّ الانحناءة لن تُصبح واضحة إلا إذا أصدر التوتر السطحي في المجرى قوة كافية لدفع المجرى على نحوٍ مائل عبْر السطح المائل. يعرض الشكل (٢-٤٢ب) مثالًا على ذلك؛ حيث نرى مقطعًا عرضيًّا عبْر جزءٍ من انحناءةٍ في المجرى. نظرًا لأنَّ الجانب الأيسر من المجرى أكثر تقوُّسًا

من الجانب الأيمن، فإن التوتر السطحي ينتج قوة أكبر في الجانب الأيسر. وتُوَجَّه هذه القوة تحديدًا إلى الجانب الأيمن، ويُترَك المجرى المُنعطِف متوجِّهًا لليمين عبْر خطٍّ مائل، ممَّا يجعل الانحناءة واضحة.

وعندما يزداد مُعدَّل التدفُّق الحجمي، فإنَّ الماء المندفع يتمكن من التغلُّب على ميول التوتُّر السطحي. فمن الممكن أن يتجاوز المجرى الانحناءة؛ ومِن ثمَّ يُحركها من مكانها. أو من الممكن أن يتفرَّق على طول الخط المائل، تاركًا الانحناءة نظرًا لأن الماء يسلك طريقًا جديدًا، ثم تنزلق الأجزاء المتروكة على السطح المائل.

(١٥٠) قصاصات شعْر ماكينة الحلاقة الكهربائية وقارب الكافور العائم في الماء

عند إفراغ قصاصات شعْر صغيرة من ماكينة الحلاقة الكهربائية في الماء، مثلما يحدُث عادةً عند تنظيف ماكينة الحلاقة الكهربائية على المرحاض، لماذا تتباعَد قصاصات الشَّعْر سريعًا بعضها عن بعض بمجرَّد اصطدامها بالماء؟

القارب المدفوع بالكافور من ألعاب التسلية القديمة التي أصبحت الآن شِبه منسيَّة. اصنع «قاربًا» خفيف الوزن من ورَقِ الألومنيوم، واصنع فتحة على شكل قَطْع إسفيني في مؤخِّرة القارب. دع القارب يطفو بعنايةٍ على الماء، وضع كتلةً صغيرة من الكافور (مادة كيميائية لا تُباع بوصفةٍ طبية تُشترى من الصيدليات) عند فتحة القارب. سيبدأ القارب على الفور في التحرك للأمام عادة. فكيف يتسبَّب الكافور الطافي على الماء في حركة القارب؟

إذا أسقطتَ قطعةً قصيرة من بعض أنواع الغراء (مثل لاصق ديفكون دوكو) في طبقةٍ ضحلةٍ من الماء فلماذا تترنَّح القطعة وتدور؟

الجواب: عند إلقاء قصاصات شعْر ماكينة الحلاقة الكهربائية في الماء يكوِّن الزَّيتُ الموجود في الشعيرات طبقةً رقيقة على الماء سُرعان ما تُقلِّل التوتُّر السطحي. ثم تُسحَب هذه الطبقة الرقيقة وقصاصات الشعر إلى الخارج بفعل التوتُّر السطحي الأكبر للماء المُحيط بهما، الذي لم يتغيَّر.

قلَّل الكافور، في القارب المدفوع بالكافور، التوتُّرَ السطحي في الماء عند مُؤخِّرة القارب؛ لأن جزيئات الكافور تحلُّ محلَّ جزيئات الماء فتضعف التوتر بين جزيئات الماء

على السطح. يظلُّ التوتُّر السطحي للماء في مُقدِّمة القارب كما هو دون تغيُّر. يسحَب الماء المُجاور كلًّا من مقدمة القارب ومُؤخِّرته، لكن الشدَّ في مُقدمة القارب يكون أكبر، ومن ثَمَّ يتحرَّك القارب للأمام. ومع تحرُّك القارب حول الماء يتسامى الكافور تدريجيًّا في الهواء أو ينتشر في بقية الماء، ومن ثَمَّ لا يُصبح سطح الماء مُغطًّى بالكافور في النهاية، ممَّا قد يؤدي إلى توقُّف القارب.

إذا قطعتَ قطعة من الكافور لها طرف مُقوَّس ووضعتَها في الماء فإنها سوف تدور؛ فتركيز جزيئات الكافور في الماء المجاور للجزء المُقعَّر أكبر من ذلك المجاور للجزء المُحدَّب. والسبب في ذلك يعود إلى أنَّ جزيئات الكافور يمكن أن تتحرَّك بمزيدٍ من السهولة بعيدًا عن الجزء المُحدَّب. وهذه التركيزات غير المتساوية تجعل التوتر السطحي يُنتِج سَحبًا غير متساوٍ. فيُسحَب الطرف بدرجة أكبر عند الجزء المُحدَّب؛ ومِن ثمَّ تدور القطعة، ويقود الجزء المُحدَّب الجزء المُقعَّر في الدوَران.

وإذا أحاطت بقطعة الكافور حلقة طافية (وكانت مثلًا عشرة أضعاف حجم القطعة)، فإن القطعة الدائرة ستجعل الحلقة تدور في الاتجاه المُعاكس. وإذا وُضِع قارب الكافور في طريق على شكل الرقم ثمانية بالإنجليزية (طريقَين دائريَّين مُتصلَين في المنتصف)، فقد يتحرك القارب بطريقتَين: فمن المُمكن أن يظلَّ في إحدى الدائرتَين، فيَعبُر في المنتصف ويُغير اتجاه الدوران بين الدوران في اتجاه عقارب الساعة والدوَران في عكس اتجاه عقارب الساعة، أو من الممكن أن يعبُر المنتصف دون أن يُغير اتجاه دوَرانه. يعتمد الطريق الذي يسلكه القارب عند نقطة التقاطُع على أحداثٍ عشوائية نسبيًّا، لكنه يعتمد أيضًا على كمية الكافور الموجود أمام القارب في الطريقَين المُحتملَين. فإذا كان أحد الطرق لا يزال يحتوي على قدرٍ كبير من الكافور دون الطريق الآخر، فعلى الأرجح سوف يجذب التوتر السطحي الأقوى في الطريق الثاني القاربَ إلى ذلك الاتجاه.

وعند وضع قاربَي كافور في طريقٍ دائري أو في طريقٍ هندسي آخر، فسوف يؤثر الكافور الذي يتركه أحد القاربَين على سرعة القارب الآخر، وسُرعان ما ستُصبِح حركة القاربَين متزامنة حول الطريق، وسيكون القارب التابِع على مسافةٍ شِبه ثابتة من القارب المُتقدم.

عند إسقاط قطعتَين قصيرتَين من أنواعٍ مُعينة من الغراء في الماء، فإنهما يتحركان بتغيير التوتُّر السطحي في الماء المُحيط بهما على نحوٍ يُشبه الكافور كثيرًا.

(١٥١) بُقَع الزيت على الطُّرق

لماذا تكون بُقَع الزيت على الطُّرق بيضاوية الشكل عادةً، ويكون محورها الطولي موازيًا للتدفق المروري، وتتخذ في الغالب شكلًا حلقيًّا؟

الجواب: عندما تتسرَّب قطرة زيت من مَركبة مُتحركة فإن سرعتها في الهواء تكون في البداية مُساوية لسرعة المركبة. وإذا تجاوزت السرعة قيمةً حرجة مُعينة، تنتفِخ القطرة لتصبح فقاعة تُشبه فقاعة الصابون الموجودة على الحلقة الدائرية قبل انطلاق الفقاعة. وسُرعان ما ينفجر الجزء المُنتفخ من الفقاعة، وتتشظَّى الحافة إلى قطراتٍ صغيرة تأخُذ شكل حلقةٍ بيضاوية عند اصطدامها بالطريق. وإذا فحصنا الشكل بعد تكوُّنه بفترة قليلة فسيكون مُمكنًا تمييز بُقَع القطرة الصغيرة الواحدة.

ويَتحدَّد حجم قطرات المطر عن طريق عملية مُشابهة؛ فعندما تُصبح القطرة الساقطة كبيرة جدًّا ينفخها الهواء لتُصبح فقاعةً ثم ينفجر حَيِّزها الداخلي.

(١٥٢) أشكال قطرات الماء الساقطة على الجلسرين

لماذا يتكوَّن تدريجيًّا شكلٌ يُشبه الوردة عند سقوط قطرة ماء على طبقة رقيقة من الجلسرين؟

الجواب: يُصبح هذا النسَق أكثر إثارة للانتباه إذا لُوِّنَ الماء بملوِّن طعام. يؤدي التناثر إلى شطر القطرة إلى جزأين: في البداية يبرز من مركز التصادُم بقعةٌ مركزية ثم يظهر حول المُحيط حافة دائرية (تُشبه فنجان الشاي). وسرعان ما يبدأ الماء والجلسرين في الاندماج بعد طرْح الماء للخارج بعد التصادُم، ويبدأ الماء الموجود على السطح في التحرُّك مع الهواء. والسبب في الحركة هو اختلاف التوتر السطحي على السطح. ونظرًا لأن التوتُّر السطحي للماء أكبر من الجلسرين، فإن مزيج الماء والجلسرين ينسحب مركزيًّا على طول السطح العُلوي للداخل نحوَ الماء. ونظرًا لأن المائع الداخلي مُتأخِّر بفعل الجلسرين الموجود أسفله، فإنَّ هذه الحركة نحوَ المركز تُطلِق خلايا دوَران داخل طبقة الماء والجلسرين. وحول المُحيط الخارجي لمنطقة التناثر، يُعزِّز اختلاف التوتُّر السطحي الاختلافات العارضة في شكل الحدِّ الفاصل بين الماء والجلسرين. وخلال ١٥ ثانية يظهر شكل الوردة.

(١٥٣) أصابع زيت الزيتون على الماء المُغطَّى ببودرة التلك

في وعاءٍ ضحل نظيف صُبَّ طبقة رقيقة من الماء وانثُر كمية صغيرة من بودرة التلك (أي «بودرة الأطفال») على الماء. انفخ برفقٍ لتوزيع البودرة بالتساوي (يجب أن يبدو السطح ضبابيًّا وتكون الحبوب أصغر من أن تُرى). ثم اغمس طرف دبوس ورق مفرود في زيت الزيتون وضعْه لفترةٍ وجيزة جدًّا في منتصف الماء المُغطَّى ببودرة التلك.

إذا كانت كمية بودرة التلك صغيرةً وكانت الحُبيبات مُتباعدة جيدًا، فسيُحرك الزيت ببساطةٍ بودرة التلك إلى الخارج بحيث يُخلي منطقة شِبه دائرية. وإذا كانت كمية بودرة التلك كبيرة جدًّا، فلن يتمكن الزيت من تحريك بودرة التلك على الإطلاق، وسيمكث فحسْب على سطح الماء في صورة قطرة. أما إذا كانت كمية بودرة التلك متوسطة، فسرعان ما سيُظهر السطح نسقًا منتشرًا للخارج من النقطة التي لمَسها دبُّوس الورق. فما سبب تكوُّن النسَق؟

الجواب: ينتشر الزيت مُكوِّنًا طبقةً رقيقة، ربما «طبقة أحادية» في سُمك جزيء واحد. وفي حالة وجود قدْر قليل من بودرة التلك أو عدم وجودها على الإطلاق في الطريق، فإنَّ الزيت يدفع بودرة التلك بسهولةٍ إلى الخارج. أما في حالة وجود قدرٍ كبير من التَّلك في طريق الزيت، فالحُبيبات تُصبِح مُكتظة ولا تستطيع التحرُّك، ومن ثَمَّ يقبع الزيت في صورة قطرة. وفي موقعٍ وسيط لن تكون الحبيبات مُكتظة لكن سيُوجِد قدْر من الاحتكاك بين الحُبيبات يكفي لجعل الماء شديد اللزوجة. ومن ثَمَّ، يحاول الزيت الأقل لزوجةً شقَّ طريقه في مزيج بودرة التلك والماء الأكثر لزوجة.

ولا تصمد الواجهة الفاصلة بين السائل اللزِج والسائل الأقل لزوجةً أمام الاضطرابات العارضة التي تُرسِل الموجات على طول الواجهة وتتأرجح كل موجة من هذه الموجات ما بين تسرُّبات طفيفة جدًّا للزيت في التلك والماء وبين تسرُّبات طفيفة جدًّا للتَّلك والماء في الزيت. وبمجرَّد أن تسيطر إحدى الموجات تنمو تسرُّباتها سريعًا لتُكوِّن «أصابع» رفيعة. وعندما تُصبح أصابع الزيت أكبر حجمًا فإنها تمحو التَّلك تاركة طُرقًا خالية بوضوح في مناطق التلك.

وفي الغالب يُدرَس عدَم استقرار الأصابع على الواجهة الفاصلة بين مائعَين في خلية «هيل شو»، التي تتكوَّن من لوحَين من البلاستيك الشفَّاف يفصل بينهما حشيَّة مطاطية ضيقة. تُملأ الخلية بالمائع قبل تثبيتها وغلقِها، ثم يُحقَن مائع آخر في المنتصف عن طريق حقنةٍ مغروسة في ثُقب صغير في أحد اللوحَين. يتقدَّم المائع الثاني داخل المائع الأول في

هيئة أصابع مُتسرِّبة، وبعض الأشكال يُشبِه السراخس، بينما البعض الآخر يُشبه بتلات الورد، وبعض الأشكال يكون من الصعب وصفُه بسهولة.

(١٥٤) مُذبذِب دُهن الدجاج

في وسط صحنٍ ضحل يحتوي على الأمونيا وسائل تنظيف الأطباق ضع قطرة دُهنٍ سائل من دجاجة مطهية. لماذا تنبضُ القطرة؟

الجواب: اكتشفَ جيفري ماي مُدرِّس الكيمياء في مدرسة كامبريدج في ويستون بولاية ماساتشوستس هذا الأثر في منتصف سبعينيَّات القرن العشرين أثناء محاولة نقْع مقلاةٍ استخدَمها لشيِّ الدجاج. وضع جيفري ماي الماء الساخن في المِقلاة ثم أضاف سائل تنظيف الأطباق والأمونيا، وما إن تكوَّنت بُقَع الزيت على السطح العلوي للماء حتى بدأت في النبض. وعندما غطَّى المِقلاة لمنع تبخُّر الأمونيا توقفت النبضات. لقد رأى دليلًا على وجود «غطاء يُشبِه الغشاء» يُحيط بكل بقعة؛ مما يُرجح وجود تفاعل بين جُزيئات الصابون والزيت.

وهذا شَبيه بالأنظمة الأخرى التي تظهر فيها ذبذبات في التوتر السطحي؛ فالأمونيا تفصل الزيت ببطءٍ عن دُهن الدجاج، فتسمح للزيت بالتشتُّت (الانتشار تدريجيًّا) على سطح الماء. ويُقلل وجود الزيت التوتُّر السطحي حول القطرة. ونظرًا لأن التوتُّر السطحي البعيد عن القطرة أقوى فإنَّ السائل المُحيط بالقطرة ينسحب دائريًّا إلى الخارج، فيجعل القطرة نفسها تتمدَّد إلى الخارج.

إلا أنه عندما ينتشر الزيت يجد جُزيئات الصابون الموجودة على سطح الماء. تصبح بعض أجزاءٍ من الزيت مُحاطة بجزيئات الصابون في تشكيلةٍ يُطلَق عليها «أفرون»؛ إذ يلتصق الطرف الكاره للماء (الذي لا ينجذِب للماء) في كلِّ جُزيء صابون بالزيت، ويلتصق الطرف المُحبُّ للماء (المُنجذِب للماء) بالماء. وعندما يُصبِح الزيت مُحاصرًا، يزداد التوتُّر السطحي للماء ممَّا يسمح للقطرة بالاسترخاء والانسحاب إلى الداخل.

ثم تُعاد دورة التمدُّد والانكماش لأنَّ الحركة الخارجية للزيت على سطح الماء تتسبَّب في حركةٍ داخلية للماء والأمونيا الموجودة داخل الماء؛ ومن ثَمَّ تصل الأمونيا الجديدة إلى قطرة الدُّهن لتبدأ الدورة التالية.

الفصل الثالث

الصوت

(١) صرصرة الرياح

ما الذي يُسبِّب صرصرة الرياح التي تستدعي في مُخيلتك صُوَر مذءوبين يَعوُون خارج منزلك في ليلةٍ عاصفةٍ مظلمة؟

الجواب: إذا مرَّ الهواء بعائقٍ ما، وخاصةً لو كان بروزًا مثل حافة سطح مبنًى أو حتى الحافة الرأسية لأحد المباني، يتشتَّت الهواء إلى زوابع (دوَّامات) تُحمَلُ في اتجاه تدفُّق تيار الهواء. تُحدِثُ الدوَّامة تبايُناتٍ في ضغط الهواء، وهي التي تخرج منها على هيئة مَوجة صوتية أو ما يُطلَق عليه صرصرة الرياح. يُمكن أن يصلك الصوتُ مباشرةً إذا ما كنتَ بالخارج، ولكن يُمكنه أن ينتقل أيضًا عبْر زجاج النوافذ والأبواب والجُدران وأن يجد طريقه إلى أُذنَيك حتى عبْر أغطية فراشك.

(٢) صفير أسلاك الهاتف وإبر الصنوبر

لماذا تسمع صفير خطوط الهواتف وإبر الصنوبر حين يهبُّ نسيم قويٌّ عبْر خطوط الهاتف أو أسلاك الكهرباء أو غابات أشجار الصنوبر؟ إنَّ هذا الصوت الذي يعلو ثم يخفُت نتيجةً لهبوبٍ عشوائي لنسيم قوي يُعتبَر أحد العناصر المُهدِّئة للأعصاب التي يشعُر بها المرء حين يُوجَد داخل إحدى غابات أشجار الصنوبر في يومٍ خريفي.

الجواب: حينما يتدفَّق النسيم عبْر أسطوانةٍ رفيعة كسلكٍ أو إبرة صنوبرية، فعادةً ما يُشكِّل تدفُّق الهواء دوَّامات على طول الأسطوانة. يُقال إن الأسطوانة تُزيحُ الدوَّامات مرةً جهة اليمين ومرةً جهة اليسار، ثم إلى جهة اليمين مرةً أخرى وهكذا. تُغيِّر الدوامة المُتشكِّلة ضغط الهواء؛ ومن ثَمَّ تنتقل سلسلة من التغيرات في ضغط الهواء على طول

شكل ٣-١: بند ٣-١.

الأسطوانة وترسل موجة صوتية؛ ما يُقال عنه هفيف الرياح. ستتمكن من سماع صوت التغيُّرات في ضغط الهواء بسبب إزاحة الدوَّامة حينما تلتقِط أذنك بعضًا من الموجات الصوتية. وكلما زادَتْ سرعة تدفُّق الهواء عبْر الأسطوانة، ارتفع مُعدَّل حدوث التغيُّرات؛ ومن ثَمَّ يصير تردُّد الصوت أعلى.

من المُمكن أن تهتزَّ الأسطوانة تمامًا كأوتار آلة الجيتار عند تردُّدات مُعينة، وتُوصَف حينئذٍ بالتردُّدات الرنَّانة. وفي حال تطابُق تردُّد تغيرات ضغط الهواء مع واحدة من هذه التردُّدات الرنانة، ستهتزُّ الأسطوانة عند ذلك التردُّد. حينذاك تُرسِل حركة الأسطوانة أيضًا موجاتٍ صوتية، وقد تحبس أو تحتفظ بتردُّد الدوَّامة التي تُزاح حتى إذا تغيَّرت سرعة تدفُّق تيار الهواء بعض الشيء. حينما تهتزُّ خطوط الهاتف أو كبلات الكهرباء، يُقال إنها

تتأرجح. يمكن أن يُشكِّل ذلك مصدرًا للقلق لأنه يمكن لِمثل هذه الحركات العنيفة أن تخلع المنصَّات التي تحمل الأسلاك المُثبَّتة على الأعمدة أو الأبراج، خاصةً إذا كانت هذه المنصَّات تحمل أيضًا الثلوج التي تكوَّنت على الأسلاك.

قد يصبح الصفير الصادر من أسلاك الهواتف أعلى صوتًا وأشدَّ حدَّةً في الأيام القارسة البرودة؛ إذ يتسبَّب انخفاض درجات الحرارة في انكماش الأسلاك، ومن ثَمَّ تُصبح مشدودةً بين دعاماتها. إذا تأرجحت الأسلاك يُمكنها أن تنقل الحركة إلى الدعامات ممَّا يجعلها تتأرجح بدَورها ومن ثَمَّ تزيد من مستوى الضوضاء.

(٣) الصافرات والصفير

كيف يُصَفِّرُ الإنسان؟ أو بعبارةٍ أخرى كيف يَصدُر صوت الصفير؟ كيف يُصدِر إبريق الشاي صفيرًا حينما يسخُن الماء؟ اخترِعَ عدد لا يُحصى من الأشياء التي تُصدِر صفيرًا، ولكن أبرزها على الأرجح هو صافرة الشرطة الإنجليزية التي تتكوَّن من أنبوبٍ واحد، وصافرة الشرطة الأمريكية، والعديد من الآلات المُوسيقية التي تُصدِر صوتًا عبْر آلية الصفير.

الجواب: تعتمد أي صافرة على ثلاثِ خواص: (١) يقابل تيار الهواء حاجزًا ويتشتَّت إلى دوَّامات. (٢) تتسبَّب الدوامات في إحداث تبايُن دوري في ضغط الهواء بحيث تنبعث موجة صوتية يمكن لأذنَيك سماعها. تعود إما الدوامات نفسها أو تباينات ضغط الموجة الصوتية إلى الجُزء المعاكس من تيار الهواء مرةً أخرى. (٣) إذا كان تيار الهواء مُضطربًا (ينحرِف أو يتغيَّر بسهولة)، تزيد هذه التغذية العكسية من اضطراب التيار مما يُعزِّز تشكُّل الدوَّامات عند الحاجز. وبمجرَّد أن تتشكل الدوَّامات وتحدُث التغذية العكسية، تسمع حينئذٍ صفيرًا مُتصلًا.

إذا قمتَ بالصفير عبْر شفتَين مَضمومتَين لتُصدِر ما يُعرف باسم «النغمة الفُوَّهِيَّة»، تُولَّدُ الدوامات حينما يُدفَعُ الهواء خارجًا من خلال الفتحة الضيقة لشفتَيك. (تتشكل الدوامات هناك لأن تدفُّق الهواء عبْر مركز الفتحة يكون أسرع من تدفُّقه وهو أقرب إلى الشفتَين.) ينتقل جزء من الموجات الصوتية التي تُولِّدها الدوامات إلى داخل الفم (القناة الصوتية) مرةً أخرى من خلال الشفتَين. يعتمد رنين هذا الصوت العائد على السرعة التي تَعبُر بها الدوامات خارج الفم من خلال الشفتَين وعلى السرعة التي يَعبُر بها الصوت إلى داخل الفم من خلال الشفتَين. يُمكن للصوت أن يتردَّد داخل القناة الصوتية عند تردُّداتٍ

مُعينة تُعرَف باسم الصِّيَغ. إذا كان رنين الصوت العائد قريبًا من الصيغة التردُّدية الثانية (التي تتضمَّن ثاني أقل تردُّد)، يُنشئ الصوت الراجع رنينًا في القناة الصوتية؛ أي إن الصوت يُحدِثُ موجاتٍ يُعزِّز بعضها بعضًا، لا يُبطله. وإذا حدَث الرنين عند الصيغة التردُّدية الثانية، فإن التردُّد المُكافئ حينها هو ما تسمَعُه أذناك.

يمكنك أن تُغير الصيغة التردُّدية، ومن ثَمَّ تردُّد الصفير، عن طريق تغيير شكل القناة الصوتية، وذلك عن طريق دفع لسانك إلى الأمام أو إعادته إلى الخلف. يُمكنك أيضًا أن تُغيِّر تردُّد الصفير عن طريق النفخ بقوةٍ أكبر بحيث يكون تردُّد الصوت الراجع أعلى، ومن ثَمَّ أقرب من صيغةٍ تردُّديةٍ أعلى (صيغة رنين أعلى).

يُعرَف صوت صافرة غلاية الشاي حينما تُغلي المياه بالكامل باسم «النغمة الثُّقبية». يتكوَّن الجزء الذي يُصدِر صفيرًا من الغلاية من أسطوانة قصيرة مثقوبة عند طرفَيها. وعندما تُغلى المياه (وتتحوَّل إلى بخار) داخل الغلاية، فإن بخار الهواء والماء الذي يُدفَع إلى الخارج من خلال الثُّقب السُّفلي يُشكل تيارًا من الهواء يصطدم بالثقب الثاني ويُحدِث دوَّامات هوائية داخل الأسطوانة، فتُولِّد التبايُنات الناتجة في ضغط تيار الهواء الذي يمرُّ عبْر الثقب الثاني الصوت؛ والموجاتُ الصوتية التي تُوجَد خارج الأسطوانة هي صوت صافرة غلاية الشاي. أما داخل الأسطوانة، فينتقل الهواء مرةً أخرى إلى الثقب الأول على شكل تغذية عكسية تتحكَّم في تيَّار الهواء الذي يدخل الأسطوانة. وهكذا، ينتقل الاضطراب الذي تُحدِثه التغذية العكسية في تيَّار الهواء الداخل مع اتجاه تدفُّق تيار الهواء ليواصل عملية توليد الدوَّامة الهوائية عند الثُّقب الثاني.

أما بالنسبة إلى صوت صافرة الشرطة فهي تُولِّد «نغمة حدية»؛ أي تيارًا من الهواء يُدفع فوق حافة ثُقب أو عبْرها. يتشتَّت تيار الهواء إلى دوامات تُصدِر بعد ذلك موجات صوتية. تُحدِّد التردُّدات الرنانة لتجويف صافرة الشرطة تردُّد الصوت، وهو ما يُشبه إلى حدٍّ كبير الرنين الذي يحدُث داخل فمِنا حينما نضمُّ شفتَينا لنُطلق صافرة فُوَّهيَّة. لكن في حالة صوت صافرة الشرطة الأمريكية، ترتدُّ كُرة صغيرة داخل تجويف وتُغير شكله الداخلي (فيتغيَّر التردُّد الرنان بدوره)، كما أنها تُعرقل تدفُّق تيار الهواء خاصةً حينما تسدُّ الثقب الذي ننفخ الهواء من خلاله بشكلٍ مؤقت؛ فتكون النتيجة «صوتًا متغيرًا» يؤثر على تردد صوت الصافرة ودرجة عُلوِّه فيرتفع تارةً وينخفض أخرى.

تعمل آلة الفلوت بنفس الطريقة؛ إذ نقوم بنفخ تيار من الهواء عبْر فتحة ويتجاوز الحافة خروجًا منها. تُولِّد الدوَّامات الصوت داخل تجويف الفلوت عند درجة التردُّدات

الرنانة للتجويف أولًا، ثم يغذي هذا الرنين الداخلي بعد ذلك الدوَّامات المُتشكلة بالطاقة مرةً أخرى بحيث تستمرُّ جميع الدوَّامات في الحركة ويستمرُّ الرنين ومن ثَمَّ نسمع الصوت الذي تُصدره الآلة بشكلٍ مُتواصل دون انقطاع.

تُعتَبر الزجاجات البيروفية الخزفية الأثرية التي تُصدر صفيرًا حديًّا واحدة من الأمثلة الغريبة على هذا النوع من الصفير، وهي زجاجة مياه مصنوعة من الخزف صنَعها سكان بيرو الأصليون قبل الغزو الإسباني في عام ١٥٣٢. هناك عدد قليل من هذه الزجاجات الخزفية لا يزال موجودًا ويُعرَضُ كمُقتنيات أثرية. تتكوَّن هذه الزجاجات من تجويف أو اثنين يربط بينهما أنبوب يمتدُّ من أحد التجاويف وصافرة بالقُرب من رأس الزجاجة. حين يقوم شخص بالنفخ في الأنبوب، يتسرَّب الهواء من التجويف من خلال فتحة بالقُرب من الصافرة. يتكوَّن هيكل الصافرة من فتحة صغيرة تفضي إلى تجويف هواء صغير، وحينما يصطدم تيار الهواء المُتسرِّب بجانبٍ واحد من الفتحة الصغيرة، تُحدِثُ الدوامات الناتجة رنينًا داخل تجويف الهواء الصغير.

أكثر أنواع الصافرات إزعاجًا هي صافرات الإنذار التي لا تزال تُستخدم في بعض سيارات الطوارئ. (عادةً ما تُستخدَم في سيارات الشرطة الحديثة أجهزة إلكترونية لإصدار صوت التحذير، إلا أن العديد من سيارات الإطفاء لا يزال يَستخدِم الصافرات الميكانيكية الأصلية نظرًا للصوت الصاخب الجاذب للانتباه الذي تُصدره.) صُنعت صافرات إنذار ضخمة خلال الحرب العالمية الثانية والحرب الباردة لتحذير المدنيِّين من أي هجومٍ عسكريٍّ وشيك؛ إذا كنت واقفًا بالقُرب من إحدى هذه الصافرات الضخمة، فسيهزُّك الصوت الصادر منها بشدَّة، لدرجةٍ ستُشعرك بأن الأرض التي تقِف عليها متقلقلة. على الرغم من وجود العديد من الأنواع المختلفة لصافرات الإنذار، فإن مُعظمها يُصدِر نغماتٍ ثُقبية من خلال دفع الهواء المضغوط عبْر شبكتَين من الثقوب التي تدور فيها إحداها بسرعةٍ متفاوتة نسبةً إلى الأخرى؛ بحيث يتولَّد الصوت حينما تدور ثقوب الشبكتَين بعضها بمُحاذاة بعض. ويتحكم معدل الدوَران في تردُّد الصوت.

(٤) التحدُّث والغناء

كيف نتحدَّث أو نُغني؟ كيف نهمس؟ لماذا يصعُب فهم الكلمات التي تُغنيها مُغنِّية السوبرانو؟

الجواب: يَصدر الصوت من خلال عضلات تُعرف باسم الأحبال الصوتية التي تُوجَد بالحنجرة. تُغلَق الأحبال الصوتية الموجودة على جانبَي الحلق بينما يزداد ضغط الهواء داخل الرئتَين، ثم تُفتح الأحبال الصوتية فجأةً ويندفع الهواء عبرها فيُحدِث اضطرابًا يتسبَّب في اهتزازها. تُغير هذه الاهتزازات ضغط الهواء وتنقل الموجات الصوتية إلى أعلى داخل القناة الصوتية، بما في ذلك الجزء العلوي من الحلق والفم والتجويف الأنفي. تتوافَق تردُّدات هذه المَوجات الصوتية مع تردُّدات اهتزاز الأحبال الصوتية. يُعتبر التردُّد الأدنى هو «الاهتزاز الأساسي» للأحبال الصوتية، أما التردُّدات الأخرى فهي مضاعفات كاملة لهذا التردد. على سبيل المثال، إذا كان التردُّد الأدنى هو ٧٠ هرتز، تُحسب التردُّدات الأخرى كالآتي: ٢ × ٧٠ = ١٤٠ هرتز و٣ × ٧٠ = ٢١٠ هرتز، وهكذا.

تتكوَّن القناة الصوتية من أنبوبٍ أحدُ طرفيه مُغلق عند الحنجرة والطرف الآخر مفتوح عند الفم وفتحتَي الأنف. يمكن أن يُحدِث الصوتُ رنينًا في هذا الأنبوب في حال كَون تردُّد الموجات الصوتية مناسبًا، وهو ما يُطلَق عليه اسم «صيغة تردُّدية» أو «صيغة عادية» فحسب. هذه الصِّيَغ ليست دقيقةً ولكن ينتشر كلٌّ منها على مدى مجموعة من التردُّدات الأخرى التي تُساوي مضاعفات العدد الفردي للصيغة التردُّدية الأدنى. على سبيل المثال، إذا حدثت الصيغة التردُّدية الأدنى عند درجة ٥٠٠ هرتز، فستحدُث الصِّيَغ التردُّدية الأخرى عند الدرجات ١٥٠٠ و٢٥٠٠ هرتز؛ إذ إن ٣ × ٥٠٠ = ١٥٠٠ هرتز و٥ × ٥٠٠ = ٢٥٠٠ هرتز، وهكذا.

حينما تنقل الأحبال الصوتية الصوت إلى القناة الصوتية، يمكن أن تُحدِث تردُّدات الأحبال الصوتية بعض الصِّيَغ التردُّدية. وهو ما يعني أن الموجات الصوتية التي تحدث عند هذه الصيغ الترددية تتراكم داخل القناة الصوتية بحيث يصير الجزء الذي يخرج من القناة الصوتية مرتفعًا بما يكفي لسماعه. في الواقع، تعمل القناة الصوتية كآلية فلترة فيما يتعلق بجميع التردُّدات التي تُصدرها الأحبال الصوتية. يمكننا أن نُغير هذه الآلية عن طريق تغيير تردُّدات الصيغ، ويحدث ذلك عن طريق تغيير وضع اللسان وتغيير درجة اتِّساع فتحة الفم (أو بغلق الأنف)، وبتغيير ارتفاع الحنجرة داخل الحلق. (لا يرغب المطربون المحترفون عادةً في حركة الحنجرة هذه لأنها تُعرقل سيطرتهم على درجة شدِّ الأحبال الصوتية؛ لذا يتدرَّبون على استخدام العضلات في تثبيت موضع الحنجرة.) يُمكننا أن نُغيِّر تردُّدات الموجات الصوتية التي تدخل القناة الصوتية من خلال تغيير درجة شدِّ الأحبال الصوتية: إذا كانت درجة الشد كبيرة ينتج عن ذلك تردُّدات أعلى. على الرغم من

أنَّ الأمر يبدو مُعقدًا، فإن معظم الناس يتعلمون فعل ذلك دون تفكير حينما يَبلغون عامَين.

يمكن لكثيرٍ من الحيوانات إصدار صوتٍ من حناجرها، والبعض يمكنه التحكُّم في تردُّد الصوت وسعته الموجية عبْر فمه عن طريق التحكُّم في عضلات الحنجرة أو في حجم القناة الصوتية. والبعض، مثل طائر المَينة، يستطيع التحكم بما يكفي لتقليد صوت الإنسان، ولكن البشر فقط هم من يمكنهم إصدار مجموعة واسعة من الأصوات المُتنوِّعة (إذا استثنينا موسيقى البانك روك).

حين نهمس تكون الأحبال الصوتية مُرتخيةً بحيث لا يهزُّها الهواء الذي يتدفَّق عبرَها. يؤدي الاضطراب (الطفيف) الذي يحدُث في تيَّار الهواء إلى إصدار الصوت الذي يُنتج بعض الصِّيَغ التردُّدية في القناة الصوتية. ويُصدر الحديث المنطوق همسًا عن طريق التحكُّم في حجم وشكل القناة الصوتية وتغييرهما من خلال اللسان والشفتَين في الأساس.

حتى يُسمَع صوت مُغنية السوبرانو في قاعة حفلات موسيقية كبيرة بمصاحبة عزف الأوركسترا، لا بُدَّ أن تُغني بصوتٍ مرتفعٍ تزيد تردُّداته كثيرًا عن الصيغة التردُّدية الأدنى العادية لقناتها الصوتية (هي بحاجةٍ لأن تُغني في نطاقٍ تردُّدي يكون فيه صوت الأوركسترا عامةً أكثر هدوءًا ويكون سَمع الجمهور في أفضل حالاته). وعلى الرغم من أن مُغنية السوبرانو تستطيع أن تضغط أحبالها الصوتية لتُصدِر تردُّدًا مُرتفعًا ثم تطابق هذا التردُّد مع صيغة ترددية أعلى لقناتها الصوتية، فإنه لا ينتج عن الرنين صوتٌ قويٌّ.

تُصبح جودة الغناء وإمكانية سماعه أفضل حالًا إذا غيَّرَت مُغنية السوبرانو صيغتَها التردُّدية الأدنى إلى تردُّداتٍ أعلى، ثم أصدرت هذه الصيغة. وحتى يتسنَّى لها تغيير الصيغة التردُّدية، تخفض المُغنية فكَّها إلى الأسفل لتفتح فمها ثم تجعل شفتَيها في وضع الابتسام. يُقلِّل هذا الأداء بفعاليةٍ من طول القناة الصوتية وهو ما يُغيِّر بدَوره الصِّيَغ التردُّدية لتُصبح صيغًا أعلى. حينئذٍ، يمكن للتردُّدات الأعلى التي تُصدرها الحنجرة أن تُحدِث الصيغة التردُّدية الأولى للقناة الصوتية؛ ممَّا يعني أن المُغنية تستطيع الغناء بصوتٍ عالٍ في التردُّدات الأعلى. ومع ذلك، لا يَحدُث هذا الأمر دون ثمن؛ إذ لا يعود بإمكان المغنية أن تُغني أصواتًا وكلماتٍ بعينها بوضوح؛ ومِن ثَمَّ، لا يتمكن الجمهور دائمًا من فهم الكلمات التي تُغنيها بوضوح.

(٥) التحدُّث بعد استنشاق الهليوم

سأشرح هذه الحيلة، ولكني لا أنصحكم بالقيام بها؛ لأنها خطرة، بل ويمكن أن تكون قاتلة. لماذا إذا استنشق شخصٌ غاز الهليوم ثم تحدَّث يبدو صوته كصوتِ شخصية البطة دونالد الكرتونية ذات الصوت الجنوني العالي التردُّد؟

الجواب: كما شرحتُ في البند السابق، يعتمد صوتُ أيِّ شخصٍ تسمعه على إحداث صِيَغ تردُّدية مختلفة في القناة الصوتية من خلال الموجات الصوتية التي يُولِّدها اهتزاز الأحبال الصوتية. حينما تحدُث إحدى تردُّدات الأحبال الصوتية في النطاق التردُّدي لصيغٍ تردُّدية بعينها، يُصبح الصوت الذي وُلِّدَ عند هذا التردُّد جزءًا من صوت المُتحدِّث. تعتمد الصيغة التردُّدية للتردُّد (سواءٌ كان التردُّد المركزي أو نطاق التردُّدات المختلفة) على عاملين؛ أولًا: شكل وطول القناة الصوتية، وهو ما يُمكننا التحكم فيه حينما نُغير وضْع اللسان أو فتحة الفم. ثانيًا: سرعة الصوت داخل القناة الصوتية.

في الأحوال الطبيعية، بلا شك، يكون الهواء موجودًا داخل القناة الصوتية وتُساوي سرعة الصوت قيمةً مُعيَّنة، وهي حوالي ٣٤٠ مترًا في الثانية. إلَّا أنَّنا إذا استعضْنا عن الهواء العادي بالهواء المزوج بالهليوم، تصير سرعة الصوت أسرعَ بكثيرٍ (نحو ٩٠٠ متر في الثانية). تغير هذه الزيادة في السرعة جميع الصِّيَغ التردُّدية. أما اهتزازات الأحبال الصوتية فلا تختلف تقريبًا عن الاهتزازات التي تحدُث في الهواء العادي، إلَّا أن التردُّدات الأعلى لهذه الاهتزازات الآن تستثير وتُعلي الصيغ التردُّدية للقناة الصوتية، كما قد تتغيَّر أيضًا القوة النسبية لهذه الصِّيَغ. ومِن ثَمَّ تكون النتيجة صوتًا غير مألوف يتكوَّن من تردُّدات أعلى.

يكون الخطر هنا واضحًا؛ إذ لا يمكنك البقاء على قيد الحياة دون تنفُّس الهواء (أو بالأحرى ذرَّات الأكسجين الموجودة في الهواء)، ولكنك إذا ملأت رئتَيك بالهليوم بحماقةٍ فلن تعود قادرًا على تنفُّس الهواء؛ وحينئذٍ ستدخل في سباقٍ خطير ضدَّ الإصابة بالاختناق. حينما ينخفِض مستوى الأكسجين في دمك، هل ستعود قادرًا على إخراج الهليوم الذي امتلأتْ به رئتاك واستنشاق الهواء مرةً أخرى بسرعةٍ كافية لتفادي إصابتك بالاختناق أو لتفادي مُعاناة مُخِّك من نقص الأكسجين؟ نعم سنموت جميعًا يومًا ما، هذا صحيح، ولكن هذه طريقة غبية لفعل ذلك بلا أدنى شك.

(٦) الغِناء الحَلْقي

يستطيع بعض المُغنِّين في جمهورية توفا الواقعة في جنوب سيبيريا غناء نغمتَين في وقتٍ واحد، وهي ممارسة تُعرَف باسم «الغناء الحَلْقي» أو «الغناء التوافقي»، الذي تكون فيه إحدى النغمات على شكل دندنةٍ ذات تردُّدٍ مُنخفض، وتكون الأخرى على شكل صوتٍ ذي ترددٍ مرتفع يُشبِه آلة الفلوت، ولكن كيف يمكن لشخصٍ أن يُغنِّي نغمتَين في وقتٍ واحد؟

الجواب: في الصوت العادي الذي يتحدَّث الإنسان أو يُغني به، فإن الترددات التوافُقية التي تُولِّدها الأحبال الصوتية تُحدِث بالأساس الصيغة الترددية الأولى للقناة الصوتية (انظر البندَين السابقَين). كما تُستثار بعض الصيغ الترددية الأعلى للقناة الصوتية، إلا أن المُستمِع لا يُميِّزها وحدَها على حِدَة، ولكنه يلاحظها لا شعوريًّا تقريبًا كمجرَّد جزءٍ مُميز من طابع الصوت (يُقال إنها تُضيف إلى «جَرْس الصوت»، إلَّا أنَّ هذا تعريفٌ اصطلاحيٌّ مُبهم).

في الغناء الحلقي، لا تُعتبَر عملية توليد الدندنة ذات التردُّد المنخفض عبْر اهتزاز الأحبال الصوتية والجزء العلوي من الحَلْق صعبةً بصورةٍ استثنائية، ولكن الصعوبة الحقيقية تكمُن في توليد الصوت ذي التردُّد الأعلى الذي يبدو منفصلًا عن الدندنة ذات التردُّد المنخفض أو كأنه عائمٌ على سطحها. الهدَف هو إنتاج واحدة من الترددات التوافقية المُرتفعة للقناة الصوتية التي تطابق تقريبًا واحدةً من الصيغ الترددية المُرتفعة للقناة الصوتية بالضبط. في حال حدوث هذا التطابق، يُصبح الرنين عند هذه الصيغة الترددية قويًّا، وكذلك الصوت الذي يُصدره المُغني. ومع ذلك، يتطلَّب إحداث هذا التطابُق من المُغني أن يضبط كلًّا من حركة الأحبال الصوتية (أي المدة التي تستغرقها الأحبال الصوتية في الفتح ثم الغلق)، وشكل القناة الصوتية (أي كيف يتغيَّر وضع اللسان). يستطيع أيُّ شخصٍ تقريبًا أن يتعلم القيام بكلِّ ذلك، ولكنه يتطلَّب الكثير من الممارسة حتى تُطرِب تلك الأصوات أُذُن المستمع.

(٧) الشخير

يُشخِّر الكثير من الناس أثناء نومهم، وهو ما يُقلق منام أفراد العائلة الآخرين، وأحيانًا ما يتسبَّب ذلك في ضررٍ شديدٍ لصحتهم وقُدرتهم على النوم، فما الذي يُسبِّب الشخير؟

الجواب: يَحدُث الشخير حينما يُسحَب الهواء إلى داخل الرئتَين، إما عبْر الأنف (والفم مغلق) وإما عبْر الأنف والفم معًا. يتدفَّق الهواء عبر الحنك الرَّخو، وهو الجزء الرَّخو الذي يُشكِّل الجزء الخلفي من سقف الفم (يمكنك رؤيتها إذا نظرتَ داخل فم أحدِهم). إذا كان الهواء يتدفَّق عبْر الأنف فقط، فإنه يدخُل الحلق وصولًا إلى الجزء العلوي من الحنك الرَّخو؛ وإذا تجاوزتْ سرعة الهواء قيمةً حرجة بعَينها، يجذب الهواء الحنك الرَّخو تجاه الجزء الخلفي من الحلق، وهو ما يُعرقل تدفُّقَه جزئيًّا. يهبط سقْف الحلق أولًا على اللسان ثم يعود إلى وضعه الأصلي. ولكن إذا حدَث التدفُّق عبْر الأنف والفم بدلًا من ذلك، يمرُّ الهواء على جانبَي الجزء العلوي والسُّفلي للحنك الرَّخو. في هذه الحالة، يهبط الحنَك الرخو بين الجزء الخلفي من الحلق واللسان ويُعرقل الهواء الذي يتدفَّق عبْر الأنف والذي يتدفَّق عبْر الفم بالتناوب. يُمكنني أن أُصدِر صوت الشخير (شخيرًا مسرحيًّا، كما لو كنتُ أُمثِّله في مسرحية)، من خلال استنشاق الهواء بشدَّةٍ من أنفي وفمي. تتسبَّب العرقلة التي يُحدثها خفقان الحنك الرَّخو في أن يتذبذب الهواء بدَوره، وهو ما يجعل فتحتَي أنفي تهتزَّان.

تُنتِج حركة الحنك الرخو والاضطراب الذي تُحدِثه موجاتٍ صوتيةً في الحلق. إذا أحدثت هذه الموجات رنينًا في الحلق أو في المنطقة التي تشمل الحلق والفم والأنف، يمكن إذن أن يكون الصوت مرتفعًا بما يكفي لإيقاظ أفراد العائلة.

السبب الثالث لحدوث الشخير هو حركة الطيِّ المُنتظمة للبلعوم (وهو الجزء العلوي المرن القابل للطيِّ من الحلق فوق الحنجرة مباشرةً). تُعطِّل حركة الطي التي تُغلِق وتُعيد فتح البلعوم تدفُّق الهواء وتُحدِث اضطرابًا يُنتِج موجاتٍ صوتية.

(٨) صوت خرخرة القطط وزئير الأسد

كيف تُخرخِر القطة ويزأر الأسد؟

الجواب: تُخرخِر القطة كما نتحدَّث نحن تقريبًا، كما شُرح في البنود السابقة، فيما عدا أنه حينما يتسرَّب الهواء عبْر الأحبال الصوتية، فإنها تهتزُّ وتُنتِج صوت طنينٍ في القناة الصوتية (تجويف الحنجرة والأنف والفم). تردد هذا الطنين هو حوالي ٢٥ هرتز تقريبًا، وهو تردُّد مُنخفض للغاية قد يصير من المُستحيل سماعه. ومع ذلك، يُحدِث هذا الطنين نغماتٍ توافقيةً أعلى في القناة الصوتية، ويمكنك سماعها تخرج من أنف القطة

وفمها، فيكون الصوت الذي تسمعه يُشبِه صوت تكرار حرف الراء، وهو عادةً ما يكون علامة على شعور القطة بالاطمئنان.

يعتقد بعض الباحثين أنَّ حالة العظْمة اللامية هي التي تُحدِّد القُدرة على الخرخرة والزئير، وهي عبارة عن هيكل يقع في جذْر اللسان ويتَّصِل بالحنجرة. إذا كانت هذه العظْمة مُتصلِّبة تمامًا، يمكن حينئذٍ أن يَحدُث صوت الخرخرة. ولكنها إذا لم تكن مُتصلِّبة تمامًا، يمكن إذن أن يحدُث صوت الزئير. ربما يعني هذا أن الحيوان الذي له عظمة لامية أكثر مرونة، كما هي الحال في الأسد، يُمكنه أن يُحرِّك الحنجرة أسفل الحلق ليزيد من طول القناة الصوتية بشكلٍ ملحوظ؛ إذ تَخفض هذه الزيادة من تردُّد الصوت الذي يُصدِره الأسد. تختلف حنجرة الأسد أيضًا عن مُعظم الحيوانات الأخرى في أن أحباله الصوتية سميكة وتتكوَّن من أنسجة مرِنة يمكنها أن تهتزَّ عند تردُّدات مُنخفضة بسعاتٍ اهتزازية كبيرة نسبيًّا؛ وبذلك يتمكن الأسد من الزئير!

قصة قصيرة

(٩) صوت ديناصور الباراصورولوفوس

كانت عظْمة رأس ديناصور الباراصورولوفوس، المُمتدَّة نحوَ الخلف والتي تُشبه عُرف الديك، تحتوي على مجرًى أنفيٍّ على شكل أنبوبٍ طويل مُقوَّس مفتوح عند نهايتيه. يمكن أن يكون الباراصورولوفوس قد استخدم هذا المجرى لإصدار الصوت عن طريق الصياح حتى يحدُث الرنين في المجرى بتردُّداته الأدنى (التردُّدات الأساسية)، وهو ما يُشبه كثيرًا عملية النُّطق لدَينا التي تتمُّ من خلال الرنين الذي يحدُث داخل تجويف الفم والأنف والحنجرة. أما الجماجم الأحفورية التي تحتوي على مجارٍ أنفية أقصر، فيُعتقد بأنها تعود إلى إناث الباراصورولوفوس التي من شأنها أن تُصدِر أصواتًا بتردُّدٍ أعلى.

(١٠) أصوات النمور والأفيال

يقَع جزء من زئير النمر في نطاقٍ أقلَّ من النطاق المسموع لدى البشر، النطاق «دون الصوتي». هل يكتسب النمر أيَّ ميزةٍ من خلال إصدار صوتٍ ذي تردُّدٍ مُنخفض كهذا؟

رغم أنَّ الأفيال تسمَع بشكلٍ أفضل عند تردُّد ١٠٠٠ هرتز تقريبًا، فإنها حين ينادي بعضها على بعض، خاصةً على بُعد مسافاتٍ كبيرة، فإنها تبذُل الكثير من طاقتها في

إصدار صوتٍ تردُّده بين ١٤ و٣٥ هرتز يمتدُّ إلى النطاق دون الصوتي. ومِن ثَمَّ، فإذا كنت قريبًا من أحد الأفيال وهو يُنادي، فقد تشعُر بالموجة الصوتية أكثر من سماعها. فهل يتميَّز النداء ذو التردُّد المُنخفِض والطاقة المُرتفِعة بأيِّ شيءٍ عن النداء ذي التردُّد المُرتفع؟ تنادي أفيال السافانا ليلًا ما يقرُب من ضعف نداءاتها أثناء الصباح، إما للتزاوج أو لتحذير الأفيال المُتنافسة حتى تبقى بعيدًا، فهل هناك أي ميزة للنداء ليلًا؟

الجواب: تعتمد المسافة التي يقطعها الصوت في الغابة، موطن النمور، على طول المَوجة الصوتية: تمتصُّ الأشجار والأغصان وأوراق الشجر والعشب الصوت ذا الموجات الأطول وتُشتِّته على نحوٍ أقلَّ من الصوت ذي الموجات الأقصر؛ لذلك، حتى يُصدر النمر نداءً للتزاوج أو لتحذير النمور الأخرى، يمكن أن يُرسِل الإشارة إلى مسافةٍ أبعد من خلال الزئير بتردُّدٍ مُنخفض (موجات صوتية طويلة) بدلًا من الزئير بتردُّد أعلى. (علاوةً على ذلك، فهذا مُخيف بدرجةٍ أكبر.) تعتمد حيوانات الغابات أو الأدغال الأخرى أيضًا على التواصُل عبْر التردُّدات المنخفضة. على سبيل المثال، تصدَح طيور الشابنام التي تُعَدُّ أكبر طيور الغابات في العالم بأصوات طنين عميقة ذات تردُّدات مُنخفضة تصل إلى ٢٠ أو ٣٠ هرتز، وهو أدنى مستوًى يمكن للبشَر سماعه. بينما تقَع بعض الأصوات التي يُصدِرها وحيد القرن السومطري (المُسمَّاة «نفخات صفيرية») في النطاق دون الصوتي.

غالبًا ما يحدُث انقلابٌ حراريٌّ ليلي في السافانا بحيث تُوجَد طبقة الهواء الدافئ فوق سطح طبقة الهواء البارد. يُمكن لنداءٍ ذي تردُّد مُنخفِض أثناء الانقلاب الحراري أن يُحبَس فعليًّا أسفل طبقة الهواء الأدفأ؛ ومِن ثَمَّ، بدلًا من أن ينتشر النداء في الهواء إلى أعلى ويُفقَد، يكون مُعظمُه محبوسًا بين طبقتَي الهواء وينتقل فوق السافانا قاطعًا مسافاتٍ أكبر بكثير (ربما تصِل إلى عشرة كيلومترات) ممَّا يقطعها أثناء النهار الذي لا يحدُث فيه انقلاب حراري (ربما يقطع مسافةً مقدارها كيلومتران وحسب). تقل احتمالات انحباس الأصوات ذات التردُّد العالي أسفل طبقة الهواء الدافئة، كما أن الهواء يمتصُّها كذلك أكثر، ومِن ثَمَّ لن يقطع النداء ذو التردُّد المرتفع الذي يُصدره الفيل مسافةً كبيرة.

يكون أفضل وقتٍ يقوم فيه الفيل بالنداء، بحيث ينتشر عبْر أقصى مساحةٍ مُمكنة، بعد غروب الشمس بساعةٍ أو ساعتَين، حين تكون شدَّة الرياح منخفضة ويكون الانقلاب الحراري قد استغرق وقتًا كافيًا للتشكُّل. قد تزداد شدَّة الرياح في وقتٍ لاحقٍ من الليل؛ وعلى الرغم من أن النداء قد ينتقل بشكلٍ أفضل في اتجاه الرياح، فإنه ينتقل بكفاءةٍ أقلَّ في أيِّ اتجاهٍ آخر؛ ومِن ثَمَّ تتضاءل المساحة الكلية التي يمكن للنداء أن يُسمَع فيها.

(١١) نقيق ضفدع الثور

يَنُقُّ ذكر ضفدع الثور إما لجذب شريكةٍ أو لتحذير الذكور الآخرين حتى يبقَوا بعيدًا. كيف يمكن لحيوانٍ صغيرٍ كهذا ذي فمٍ صغيرٍ أن يُصدِر مثل هذا النقيق العميق والمُزعج؟

الجواب: يُصدِر ضفدع الثور مُعظم نقيقه من خلال طبلة أذنه، وليس من خلال فمه. يُقال إن باحثًا قد اكتشف ذلك عن طريق الضغط بأصابعه (بلطف) على أذن الضفدع، ولاحظ كيف أنَّ درجة ارتفاع صوته قد انخفضت بشدَّة. تكرَّرت هذه التجربة لاحقًا باستخدام «سدادات الأذن الضفدعية» التي كانت عبارة عن قِطَع من الفوم تُثبَّت فوق طبلة الأذن عن طريق زنبرك!

ينشأ الصوت في الأحبال الصوتية للضفدع، تمامًا مثلما يحدُث في الثدييات. ولكنه يُنقَلُ بعد ذلك إلى طبلة الأذن، إذ يحدُث الرنين بتردُّداتٍ مُعيَّنة كما هي الحال في جلدة الطبلة. يَزيدُ هذا الرنينُ درجةَ الصوت بشدةٍ عند هذه التردُّدات وينشر الصوت في بيئة الضفدع المُحيطة. قبل اكتشاف هذا الدور الذي تلعبه طبلة الأذن، اعتقد الكثير من الناس أن الرنين يحدُث داخل الكيس الصوتي، ألا وهو منطقة الحلق التي ينفخها الضفدع عند النقيق. على الرغم من أن قرد الجيبون وبعض أنواع الضفادع والعلاجيم تُنتِجُ الرنين داخل كيسها الصوتي حتى يصير صوتُها أعلى، فإن ضفدع الثور لا يفعل ذلك.

(١٢) صوت صرصور الليل وجراد البحر الشائك

كيف يَصِرُّ صرصور الليل ويُصدِر جراد البحر الشائك صوتًا خشنًا يُشبه صوت الكشط؟

الجواب: يَصِرُّ صرصور الليل بهدف البحث عن شريك للتزاوج عن طريق طَيِّ جناحه الأمامي الأيمن على جناحه الأمامي الأيسر بعد أن يفتحهما. بينما يُطوى الجناحان أحدهما على الآخر، تحتك «ريشة قاسية» تقع أعلى الجناح الأيسر بمجموعةٍ من النتوءات الصغيرة (مجموعة من السنون المَعقوفة) التي تقَع على الجزء السُّفلي من الجناح الأيمن. تطرُق الريشة القاسية نتوءًا تلوَ الآخر؛ وهو ما يتسبَّب في اهتزاز الريشة ومجموعة النتوءات، وهو ما يتسبَّب بدَوره في اهتزاز مُعظم الجناحين الآخرين. وبالتبعية، يُنتِج اهتزاز الأجنحة في منطقةٍ كبيرة إلى حدٍّ ما من جسم الصرصور تُعرَف باسم «القيثارة» اختلافاتٍ في ضغط الهواء تنتقل من الأجنحة على شكل موجات صوتية — وهذا هو صوت

الصَّر. يعتمد تردُّد الصوت على المُعدَّل الذي تقبض به الريشة القاسية على النتوءات ثم تُفلتها. يبدو أن ما يتحكَّم في هذا المُعدَّل هو تردُّد الاهتزاز الذي يحدث في القيثارة الخاصة بكلِّ جناح؛ فحينما تتحرَّك كلُّ قيثارة فإنها تلوي إما الريشة القاسية أو أحد النتوءات بحيث يتحرَّر كلٌّ منهما بعيدًا عن الآخر.

إلا أنَّ نداء التزاوُج الذي يُصدِره ذكر الصرصور له ثمن؛ إذ إنه يجذِب الذباب الذي يُمكنه تحديد موقع الصرصور سماعيًّا والتوجُّه إليه كي يضع بيوضه فيه. تفقس هذه البيوض في النهاية على هيئة يرقات طفيلية تخترق جسد الصرصور وتقتله (فبالنسبة إلى الإنسان والصرصور على حدٍّ سواء، لا يجلب نداء التزاوُج سوى المشكلات.)

يحكُّ جراد البحر الشائك أيضًا ريشة (جزء من قرن الاستشعار) فوق القُرين، وهي عبارة عن صفيحة مجهرية خشِنة تقَع أسفل العينين، ولكن الوضع يختلف لأنَّ الريشة عبارة عن نسيجٍ رخوٍ لا يُصدر صوتًا من خلال طرق نتوءات القُرين. بدلًا من ذلك، بينما تحتكُّ الريشة على طول القُرين وعلى كلِّ نتوءٍ من النتوءات، تلتصِق الريشة على أحد النتوءات وتتمدَّد قبل أن تفلِتُ أخيرًا نحوَ النتوء التالي. عندما يحدُث هذا الانفلات، تهتزُّ الريشة والقُرين ويُصدران صوتًا — صوت جراد البحر الشائك الخشِن الذي يُشبِه صوت الكشط. يُستخدم هذا الصوت في إخافة المُفترسات ويمكن للجراد الاستمرار في إصداره حتى حينما تَنْعُم قشرته الخارجية الصُّلبة أثناء عملية الانسلاخ.

(١٣) الشجرة كآلة عزف للضفدع والجُحر كآلة عزف لصرصور الليل

لماذا يَنُقُّ ذكر ضفدع تجاويف الأشجار أو ما يُعرَف بضفدع جزيرة بورنيو (واسمه العلمي Metaphrynella sundana) ليدعو الإناث إلى التزاوج وهو يقبع داخل تجويف الشجرة؟ ولماذا تزداد حدَّة ووضوح صوت صَر الحرَّاقات (نوع من صراصير الليل) وهي تحفُر جُحرها وتبنيه؟

الجواب: في المُعتاد يجلس ضفدع جزيرة بورنيو بأريحية في بِركة ماء داخل تجويف إحدى الأشجار، مثل أحد جذوع الأشجار المُجوَّفة. حينما يُطلق نداء التزاوج، يُجرب الضفدع طُرقًا مختلفة للنداء عن طريق تخفيض وزيادة تردُّده حتى يطابق تردُّد النداء أدنى «تردُّد رنان» لتجويف الشجرة. هذا هو أدنى تردُّد تُعزِّز فيه الموجات الصوتية بعضها بعضًا داخل التجويف؛ ممَّا يسمح لها بتكوين موجةٍ صوتيةٍ قويةٍ ومرتفعة.

بمجرَّد أن تحدُث عملية التطابق، يصبح الصوت الذي يتسرَّب من التجويف إلى الخارج مرتفعًا وينتقل مسافاتٍ بعيدة مُعلنًا عن شعور الضفدع بالوحدة.

تفعل الحرَّاقات التي تبني الجُحور شيئًا مماثلًا؛ إذ تحفر تجويفًا يُحدِثُ فيه صريرُها «رنينًا»؛ أي إن تردُّد صَرِّها يطابق التردُّد الرنان للتجويف. تبني الحرَّاقات جُحورها على مراحل وتكون عامةً على شكل مصباحٍ وقطاعًا يُشبه شكلَ البوق يربط الجزء المصباحي بالخارج، وهو ما يُشبه إلى حدٍّ كبيرٍ النهايات المفتوحة لبعض الآلات الموسيقية التي تتَّسِع لتسمح للصوت بالتسرُّب وأن يصير مسموعًا. تتوقَّف الحرَّاقات عند نهاية كلِّ مرحلةٍ من مراحل البناء وتَصِرُّ حتى تختبر ما إذا كان الجُحر سيُصدر رنينًا أم لا. تنجح في النهاية في إحداث الرنين، وينقل البوق بكفاءةٍ الموجات الصوتية القوية التي تحدُث بالداخل إلى البيئة الخارجية.

(١٤) هجوم حشرات الزيز الأسترالية

إذا أطلق ذكَر حشرة الزيز الأسترالية Cyclochila australasiae، صيحة نداء خلال نومك من مكانٍ قريب، فستستيقِظ مفزوعًا لأنَّ نداءه يكون مُرتفعًا بشدة (١٠٠ ديسيبل على مسافة مترٍ واحد). كيف تستطيع هذه الحشرة — وهي من الحشرات الأعلى صوتًا بين أنواع الحشرات المعروفة لكن يبلغ طولها ٦٠ مليمترًا فقط — إصدار ضجيجٍ مُرتفع كهذا؟

الجواب: يحتوي جانبا حشرة الزيز على هيكلٍ يُشبه الطبلة به أربعة ضلوع عمودية تنثني إلى الخارج. تعمل إحدى العضلات على سحْب هذا الهيكل إلى الداخل بحيث تنثني الضلوع واحدًا تلوَ الآخر في تتابُعٍ واحدٍ سريعٍ إلى الداخل فجأة. أثناء حركة الانثناء، يُصدِر كلُّ ضلعٍ من الضلوع نبضةً صوتية — صوت نقر. تُحدِث هذه السلسلة من النقرات رنينًا في كيسٍ هوائي يُوجَد داخل بطن الزيز؛ وهو ما يعني أن الموجات الصوتيَّة يُعزِّز بعضها بعضًا كي تُشكِّل موجةً كبيرة. يساوي تردُّد هذا الصوت المعزز ٤٣٠٠ هرتز ويبلغ مُستواه أكثر من ١٥٠ ديسيبل؛ أي أكثر ممَّا ستتعرَّض له حتى في حفلةٍ من حفلات موسيقى الهيفي ميتال. ينبعثُ الصوت بعد ذلك من البطن عبْر طبلة أذن موجودة على كلِّ جانب من جانبَي جسم حشرة الزيز. أما عن سبب عدم فقدان حشرة الزيز سمعها، فلا يزال هذا الأمر غير مفهوم.

(١٥) أصوات البطريق

بعد الغوص داخل المياه وتناول الطعام، لا بُدَّ أن يزحف البطريق الإمبراطوري مرةً أخرى ليصِل إلى بيته، الجليد الطافي، ويعود إلى شريكته. ومع ذلك، يمكن أن تكون هذه الشريكة في فصل الشتاء وسط الآلاف من البطاريق التي تتجمَّع معًا حتى لا تتجمَّد في طقس القطب الجنوبي القاسي الذي يُمكن أن تنخفض فيه الحرارة إلى ٤٠ درجة تحت الصفر وتبلغ سرعة الرياح ٣٠٠ كيلومتر في الساعة. إلى جانب ذلك، تبدو جميع طيور البطريق مُتشابهة، حتى لطيور البطريق الأخرى؛ ومِن ثَمَّ لا يمكن للبطريق أن يتعرَّف على شريكته بصريًّا. كيف إذن يجد البطريق شريكتَه بين الآلاف من البطاريق؟

الجواب: تُصدِر معظم الطيور أصواتها باستخدام ناحيةٍ واحدة فقط من عضوها الصَّوتي ذي الجانبَين الذي يُعرف باسم «أنبوب المِصفار». إلا أن البطريق الإمبراطوري يستخدِم الجانبَين في وقتٍ واحد لإصدار الصوت. يُحدِث كل جانب رنينًا في حلق الطائر وفمه، وهذا يُشبه إلى حدٍّ كبير ما يَحدُث في أنبوبٍ ذي نهايتَين مفتوحتَين؛ أي إنَّ الموجات الصوتية التي يُعزز بعضها بعضًا تتسبَّب في إنتاج موجةٍ صوتية قوية خالصة. يختلف تردُّد الموجة الصوتية الخالصة التي يُحدِثها جانب من أنبوب المِصفار عن تردُّد الموجة الثانية التي يُحدثها الجانب الآخر منه. يميز المُستمع متوسط التردُّدين، ولكنه يُميز أيضًا أنَّ الصوت العادي يصدَح عاليًا ويتغيَّر؛ أي تتنوَّع حدَّتُه بين الارتفاع والنعومة يُصاحبه «تردُّد تضاربي» مُعين يساوي الفرق بين التردُّدَين الفعليَّين. يمكن للبطاريق تمييز هذه «التردُّدات التضاربية»؛ وبذلك، يمكن أن يكون نداء البطريق ثريًّا بالتردُّدات الرنَّانة والتردُّدات التضاربية المُختلفة، وهو ما يسمح بالتعرُّف على الصوت حتى وسط الآلاف من أصوات البطاريق الأخرى.

(١٦) صوت نقْر الحُوت

يُصدِر حوت العنبر الأصوات من خلال إنتاج سلسلةٍ من النقرات. يُصدِر الحوت في الواقع صوتًا واحدًا فقط بالقُرب من مقدِّمة رأسه ليبدأ سلسلة النقرات التي تليه، فما الذي يُصدِر باقي سلسلة النقرات؟ كيف يُمكن للباحثين أن يُحدِّدوا طول الحوت عبْر هذه السلسلة من النقرات؟

الجواب: يخرج جزء من الصوت الذي يُصدِره الحوت من مقدمة رأسه في الماء ليُصبح أول صوت نقْرة يمكن رصدُه من سلسلة النقرات. ينتقل باقي الصوت داخل

جسم الحوت إلى الخلف عبْر كيس العنبرية (جسم دهني) الذي يُوجَد في رأسه، وينعكس من الكيس الأمامي (طبقة هوائية) الذي يقَع في الجزء الخلفي من الرأس، ثم ينتقل إلى الأمام عبْر كيس العنبرية. حينما يصِل الصوت إلى الكيس القاصي (طبقة هوائية أخرى) الذي يقع في مُقدِّمة الرأس، يتسرَّب جزء من الصوت في الماء ليُشكل النقرة الثانية، ويُنقَلُ الباقي إلى الخلف عبْر كيس العنبرية. تتكرَّر هذه الدَّورة عدة مرات، فتُنتج نقرات أخرى عديدة. يرتبط الفاصل الزمني الذي يحدُث بين النقرات المُتتالية بالمسافة بين الكيس الأمامي والكيس القاصي التي تتناسَب مع حجم الحوت؛ ومِن ثَمَّ، يمكن للباحثين من خلال قياس هذا الفاصل الزمني أن يُقدِّروا طول الحوت.

(١٧) النغمة الانعكاسية

حين تُحلِّق طائرة فوق مستوى الرأس وعلى مستوًى قريب بما يكفي ليُسمَع صوتها، اخفِضْ رأسك بالانحناء نحوَ الأرض. لماذا يزداد تردُّد الضوضاء الصادرة عن الطائرة وأنت تخفض رأسك؟

الجواب: يتكوَّن الصوت الذي تسمعه من الصوت الذي يأتي إليك مباشرةً من الطائرة، ومن الصوت الذي ينعكس لك من الأرض. تخضع مجموعتا الموجات الصوتية الاثنتان للتداخُل في أُذنَيك، فتسمع أولًا الموجات التي تتداخل تداخُلًا بنَّاءً (بحيث يُعزِّز بعضها بعضًا، لا يُبطله). يعتمد مستوى الارتفاع فوق الأرض الذي تَحدث فيه عملية التداخل البنَّاء على الطول الموجي؛ إذ يتطلَّب الطول الموجي الأكبر (الأطول) ارتفاعًا أكبر. حينما تخفض رأسك، فإنك تتحرك لأسفل تجاه الارتفاعات التي تخضع فيها الأطوال الموجية الأقصر (ذات التردُّدات الأعلى) لعملية التداخل البنَّاء؛ وبذلك، حينما تنحني، يرتفع تردُّد الصوت الذي تسمعه.

يمكنك أن تسمع تأثيرًا مُشابهًا إذا مشيتَ بعيدًا عن شلَّال مياه نحوَ جدار عمودي يعكس صوت الشلال إلى أُذنيك؛ بحيث يتداخل الصوت مع الصوت الذي يصلك مباشرةً من الشلال. فكلَّما اقتربتَ من الجدار، ارتفع تردُّد الصوت الذي تسمعه.

(١٨) الأصوات البعيدة

يقع منزلي في كليفلاند هايتس بولاية أوهايو فوق منطقة مسطحة تتَّصِل ببحيرة إري. يمتدُّ خط للسكك الحديدية على طول المنطقة المسطحة عند سفح كليفلاند هايتس. لا

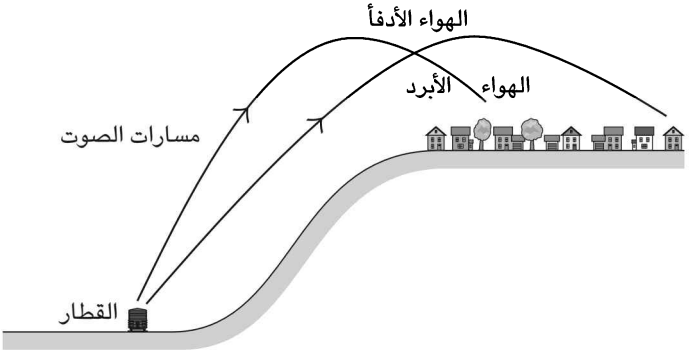
يمكنني رؤية السكة الحديدية بلا شك، ليس فقط لأنها بعيدة جدًّا، بل أيضًا بسبب التِّلال المُؤدية إلى كليفلاند هايتس وآلاف الأشجار والبيوت التي تعيق مجال رؤيتي. لماذا إذن يمكن بسهولة سماع صوت صليل القطارات أثناء مرورها بطول خط السكك الحديدية في منزلي في بعض الليالي؟

حينما تحدُث أصوات انفجارات عالية مُتكررة في مكانٍ بعينه، كما هو الحال في القصف المدفعي المُتكرِّر، يمكن أن تُسمَع في المناطق المُحيطة بموقع الانفجار فقط. إذا كنت تقود سيارتك مُبتعدًا عن موقع الانفجارات، فستنخفِض شدَّة الصوت في المنطقة الأولى (المنطقة المركزية)، ثم سيُصبح الصوت غير مسموعٍ في المنطقة الثانية، ثم يصير مسموعًا مرة أخرى في المنطقة الثالثة. ما سبب حدُث هذه المناطق؟

حين انفجر بركان جبل سانت هيلين في ولاية واشنطن الأمريكية في عام ١٩٨٠، كانت الطاقة التي انطلقت من البركان تُكافئ ميجا أطنان عديدة من مادة تي إن تي شديدة الانفجار. لماذا لم يُسمَعُ الانفجار إلَّا على بعد ١٠٠ كيلومتر؟

قضى الجنود البريطانيون أثناء الحرب العالمية الأولى بالقُرب من مدينة ميسينز، جنوب بلدية إبير ببلجيكا، عامًا كاملًا يحفرون فيه واحدًا وعشرين نفقًا امتدَّت أسفل الخطِّ الألماني على عُمق حوالي ثلاثين مترًا. بمجرَّد اكتمال حفْر الأنفاق، خُبِّئَ فيها حوالي مليون طن من المُتفجِّرات، وفي منتصف ليلة السابع من يونيو عام ١٩١٧، فجَّر البريطانيون تسعةَ عشر مخبئًا من مجموع واحدٍ وعشرين (فشل تفجير مخبأين)، وهو ما نتج عنه أكبر انفجارٍ من صُنع الإنسان حتى يومِنا هذا. سُمِعَ الانفجار في لندن وحتى في دبلن، على بعد المئات من الكيلومترات من مَوقع الانفجار، كيف يمكن للصَّوت الناتج عن هذا الانفجار قطع هذه المسافة البعيدة؟ (انفجر أحد المَخبأين المُتبقِّيَين بغتةً أثناء عاصفة رعدية في عام ١٩٥٥، ولحُسن الحظ لم يتسبَّب ذلك إلا في موت بقرة واحدة. لم ينفجر، حتى الآن، المخبأ الآخر الذي لا يُعرَف مكانه بالتحديد، وهو ما يُقلق الناس الذين يعيشون في المنطقة العامة لتلك المخابئ.)

الجواب: حينما تُرسَل موجة صوتية بزاوية على السطح العمودي، تُغيِّر الموجة اتجاهَ سيرها إذا واجهت تغييرًا في درجات حرارة الجو. يُقال إن الصوت «ينكسر»، أو يخضع لـ «الانكسار». وإذا انخفضت درجة الحرارة، تبدأ الموجات الصوتية في الانتقال بزاويةٍ أقلَّ على السطح العمودي. إذا ارتفعت درجة الحرارة، تنتقل الموجات بزاويةٍ أكبر ويُمكن حتى



شكل ٣-٢: بند ٣-١٨: تنحني مسارات الصوت نحو الأرض مرة أخرى بفعل زيادة درجة حرارة الهواء التي تحدُث مع الارتفاع أثناء فترة الانقلاب الحراري.

أنْ «تنقلب» بحيث تعود إلى الأرض مرة أخرى. يُمكنني سماع أصوات السكك الحديدية البعيدة في الليل عندما يكون الهواء الذي فوق المنطقة مباشرة أدفأ من الهواء الموجود بالقُرب من سطح الأرض، وهو ما يُعرَف باسم «الانقلاب الحراري». حينها فإن بعض الموجات الصوتية التي تصدُر من خط السكك الحديدية تنحني من أسفل لأعلى وتعود إلى الأسفل مرة أخرى تجاه منطقة كليفلاند هايتس، فيسمعها جميع من هناك (انظر شكل ٣-٢).

في الماضي، كانت عملية نقل الصوت لمسافةٍ أطول أثناء فترة الانقلاب الحراري معروفة جيدًا لدى القُدَماء. على سبيل المثال، عرف رجال قبائل الزولو الأفريقية أن بمقدورهم سماع بعضهم بعضًا عبْر وادٍ عرضُه كيلومتران إذا انتظروا حتى المساء عندما يكون الهواء في الوادي أبردَ من الهواء الذي فوقه.

حينما تنتقل الموجات الصوتية الصادرة عن أحد الانفجارات لمسافاتٍ بعيدةٍ إلى أعلى في الهواء، يمكن أن تنحني نزولًا إلى الأرض مرة أخرى نتيجة زيادة درجة الحرارة الموجودة في الجزء السُّفلي من طبقة الستراتوسفير (أسفل طبقة الستراتوبوز، وهي على ارتفاع ٤٢ كليومترًا) والجزء السفلي من طبقة الثيرموسفير (أعلى طبقة الميزوبوز، على

ارتفاع ٨٥ كيلومترًا). قد تعود عندئذٍ الموجات الصوتية إلى الأرض على مسافةٍ بعيدة من مصدرها، مسافة أكبر بكثيرٍ من المسافة التي تقطعها الموجات الصوتية على طول سطح الأرض حيث تعُوقها الأشجار والمنازل وغيرها من العقَبات؛ ومِن ثَمَّ، يمكن سماع الصوت في منطقةٍ أبعد من المنطقة الأولى المركزية. في حال انعكاس هذا الصوت من الأرض، يُمكنه أن «يرتد» ليعود إلى الأرض مرة ثانية ولكن في منطقة أخرى أبعدَ عن الأولى.

حين انفجر بركان جبل سانت هيلين، تكوَّنت الموجات التضاغُطية (يُضغَطُ الهواء من خلال المواد التي تتحرك من الانفجار إلى الخارج) ببطءٍ شديدٍ لا يمكن أن تستجيب له الأذن البشرية؛ ومِن ثَمَّ، لم تُسمَع الموجة التضاغطية (ولم تتسبَّب أيضًا في أيِّ أضرار للنوافذ وغيرها من الأغراض الهشَّة) في توليدو بواشنطن، التي تبعُد ٥٤ كيلومترًا. ومع ذلك، حينما وصلت الموجات التضاغُطية إلى طبقة الستراتوسفير، فإنها تجمَّعت وأُعيدَ توجيهها نحو الأرض مرةً أخرى. وحينما وصلتْ إلى الأرض على مسافاتٍ تزيد عن ١٠٠ كيلومتر، كانت الاختلافات في ضغطها سريعة بما يكفي لسماعها.

بالمِثل، انتقلت أصوات الانفجارات التي حدثت بالقُرب من ميسينز إلى أعلى نحو طبقة الستراتوسفير، ثم عادت مرةً أخرى إلى الأرض. ومع ذلك، على عكس انفجار بركان جبل سانت هيلين، تشكَّلت الموجات التضاغطية التي حدثت في موقع الانفجار بسرعة؛ ونتج عنها صوتٌ شديدٌ بالقرب من الجنود.

تؤثر الرياح أيضًا على اتجاه انتقال الموجة الصوتية. إذا انتقلت الموجة الصوتية إلى أعلى في اتجاه الرياح، ينحني مسار الموجة بحيث تعود إلى الأرض مرة أخرى في مكانٍ ما مع اتجاه الرياح. وتحدث في بعض الأحيان عودة الصوت هذه على مسافاتٍ بعيدة.

(١٩) الظلال الصوتية

أثناء الحرب الأهلية الأمريكية التي دارت رحاها في الفترة من عام ١٨٦٢ حتى عام ١٨٦٥، اعتمد القادة المَيدانيون لجيش الاتحاد وجيش الولايات الكونفدرالية اعتمادًا كبيرًا على الصوت لتحديد موعد بدء المعارك وموقع حدوثها. كان يُقسِّم القادة في مرات عديدة قواتهم لمهاجمة العدو من اتِّجاهَين مُختلفين، ولكن كانت الطريقة الوحيدة لتنسيق هذه الهجمات هي سماع صوت الضجيج الناتج عن هجوم إحدى المجموعات، والذي كان بمنزلة إشارة للمجموعة الأخرى ببدء الهجوم. بدَتْ هذه الخطة منطقية إذ كان من الممكن

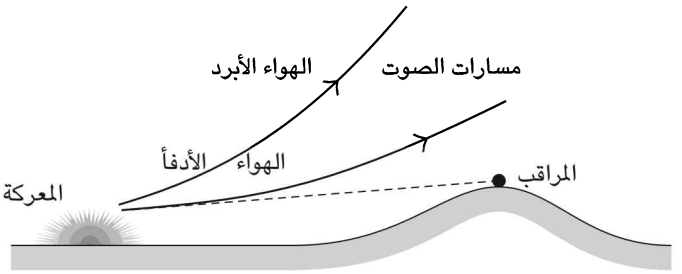
أن تكون إحدى المجموعتَين على بُعد بضعة كيلومترات من الأخرى، ومع ذلك فقد فشلتْ أحيانًا أخرى في معارك حاسمة.

لاحظ وزير الحربية بجيش الولايات الكونفدرالية وأحد مُوظفِّيه تأثيرًا غريبًا مماثلًا في يونيو من عام ١٨٦٢، بينما كانوا يراقبون معركة جينز ميل من فوق قمَّة أحد التِّلال على مسافةٍ لا تزيد عن كيلومترين. ضمت المعركة التي كانت تدور رحاها أسفل الوادي ما لا يقلُّ عن ٥٠ ألف جندي ومائة قطعة مدفعية ميدانية، وأحدثتْ قدرًا هائلًا من الضجيج الذي كان يصمُّ الآذان بلا شكٍّ للقوات المُشتبِكة. ومع ذلك، لم يسمع المُراقبان أيَّ شيءٍ خلال الساعتَين اللتَين قَضياهما في مراقبة المعركة، كيف يمكن لمعركةٍ كهذه ألا تكون مسموعةً بينما تدور رحاها على بُعد كيلومترات قليلة فقط؟

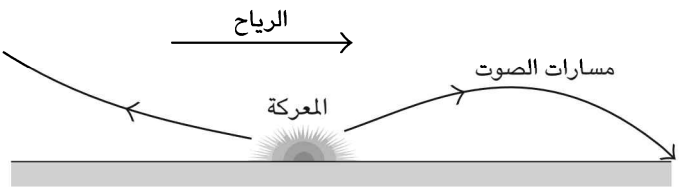
الجواب: تُوجَد ثلاثة أسباب رئيسية تُفسِّر عدم التمكن من سماع هذه المعارك شديدة الصَّخَب حتى على بُعد كيلومترات قليلة: (١) يُحتمَل أن تكون إحدى الغابات الكثيفة المُتداخِلة قد كتمَتِ الأصوات عبْر امتصاص الموجات الصوتية. (٢) يُحتمَل أن تكون الموجات الصوتية التي انبعثت على مستوى سطح الأرض قد انتقلت بطول مسارات انحنتْ لأعلى بدلًا من المسارات المُتَّجهة أفقيًّا. (٣) يُحتمَل أن يكون المسار الذي اتخذته الموجة الصوتية مُنحنيًا في حال تغيَّرت درجة حرارة الهواء أو سرعة الرياح مع الارتفاع.

فيما يتعلق بالسبب الثالث، إذا انخفضت درجة حرارة الهواء مع الارتفاع، فستنتهي الحال بالموجات الصوتية التي تصدُر بطول المسارات المائلة إلى أعلى قليلًا إلى الانتقال بطول مساراتٍ أعلى؛ ومِن ثَمَّ لن تصِل إلى المُراقبين على الأرض الذين يقفون على بُعد عدة كيلومترات (شكل ٣-٣أ). تزداد سرعة الرياح عادةً مع الارتفاع. في الحالات الطبيعية، إذا انبعث الصوت في اتجاه الرياح، فإنه غالبًا ما يهبط عموديًّا نحو الأرض؛ ومِن ثَمَّ يمكن سماعه (شكل ٣-٣ب). ومع ذلك، إذا انبعث الصوت عكس اتجاه الرياح، فإنه غالبًا ما يتَّبِع مسارًا ينحني في الهواء لأعلى ومِن ثَمَّ لا يمكن سماعه.

في بعض معارك الحرب الأهلية، كان القائد يقِف عكس اتجاه الرياح حينما كانت تحدث زيادة كبيرة في سرعتها مع الارتفاع، وفي هذه الحالة، يقال إن القائد كان موجودًا في مجال «الظل الصوتي». بل والأغرب من ذلك هي الحالات التي يُعيد فيها تأثير درجة الحرارة توجيه الموجات الصوتية إلى أعلى، ثم يُعيد تأثير الرياح توجيهها إلى أسفل، فتنتهي بها الحال على الأرض مرة أخرى بعيدًا عن المعركة؛ ومن ثَمَّ، كان الجنود البعيدون يسمعون صوت المعركة، بينما لم يسمعه القريبون منها بدرجةٍ معقولة.



(أ)



(ب)

شكل ٣-٣: بند ٣-١٩: (أ) يحدُث انحناء للصوت القادم من المعركة بعيدًا عن المُراقِب في حالة انخفاض درجة حرارة الهواء مع الارتفاع. (ب) تعمل الرياح على انحناء مسارات الصوت.

(٢٠) صوت الغواصات السوفييتية

أثناء الحرب الباردة، كانت الولايات المتحدة تراقب الغواصات السوفييتية عن طريق التنصُّت تحت الماء عبْر شبكةٍ من الهوائيات الصوتية التي يُمكنها أن تكتشف الضوضاء التي تُصدرها الغواصات، مثل أصوات مراوح الدفع. ولكن كانت الخاصية المُثيرة للاهتمام هي أنَّ الهوائيات كانت تقَع على خطوط العرض المُتوسِّطة، بينما كانت الغوَّاصات على بُعد ألف كيلومتر في خطوط العرض القطبية. فكيف يمكن أن تُسمَع مراوح الدفع، حتى لو كانت صاخبةً، على هذه المسافة؟ تمتَّعت الولايات المتحدة بهذه القُدرة على التنصُّت إلى أن حذَّر أحد الجواسيس السوفييت بشأنها.

الجواب: يُحتجَز بعض الصوت الذي تُصدره مروحة دفع صاخبة على سبيل المثال داخل أنبوبٍ يُطلَق عليه اسم «قناة السوفار الصوتية» ويمتدُّ بين خطوط العرْض القطبية وخطوط العرْض المُتوسِّطة. تقبع هذه القناة في العمق الذي تبلُغ فيه سرعة الصوت تحت الماء أدناها. تعتمد سرعة الصوت على كلٍّ من العُمق ودرجة حرارة الماء. إذا قِسْنا سرعة الصوت كلَّما توغَّلنا في العُمق، فسنجد أن تأثير درجة الحرارة هو ما يسيطر في البداية، بينما تقلُّ السرعة كلما انخفضت درجة الحرارة. ولكن في النهاية تأثير العمق هو ما يسيطر، فتزداد السرعة منذ ذلك الحين فصاعدًا.

وبذلك، يُوجَد نطاق مُعيَّن من العُمق تبلُغ السرعة فيه أدناها. إذا انتقل الصوت داخل هذا النطاق، فيُمكن أن يُحتجَز كما يحدُث في الضوء داخل الألياف البصرية. على سبيل المثال، إذا وُجِّهَ الصوت لأعلى قليلًا نحوَ المنطقة ذات السرعة الأعلى الموجودة فوق قناة السوفار مباشرة، فإن التغيُّر الناتج في السرعة يؤدِّي إلى انحناء مسار الصوت (ينكسر الصوت) إلى أسفل مرة أخرى. وبالمثل، إذا وُجِّهَ الصوت لأسفل قليلًا نحو المنطقة ذات السرعة الأعلى الموجودة أسفل قناة السوفار مباشرة، فإن التغيُّر الناتج في السرعة يؤدِّي إلى انحناء مسار الصوت لأعلى. أصبحت الضوضاء الصادرة من الغواصات السوفييتية التي تغُوص في خطوط العرض القطبية حبيسةً داخل هذه القناة الصوتية، ثم انتقلت على طول الطريق إلى الهوائيات التي تقع عند خطوط العرض الوسطى.

(٢١) أبواق المُشجِّعات وصفافير الضباب

إذا صاحت إحدى المُشجِّعات مباشرة في أحد الحشود الصاخبة، فلن يَسمَع صياحَها أيٌّ مِمَّن في الحشد، ولكن إذا صاحت المُشجِّعة عبْر مكبِّر صوت، يمكن أن تُسمَع صيحتها بسهولة. كيف يجعل مُكبر الصوت الصيحة أعلى؟

لماذا تكون فتحة صافرة الضباب التقليدية أوسع رأسيًّا منها أفقيًّا؟ ألا يعني ذلك أن الصوت يُهْدَر عبرَ إرساله إلى أعلى؟

الجواب: عندما يخرُج الصوت من فتحة يُماثل حجمها الطول المَوجي للصوت، فإنَّ الموجات الصوتية «تَحيدُ»، أو تتشتَّت، في اتجاهات جديدة. كلَّما كانت الفتحة أصغر، صار التشتُّت أكبر. حينما تصيح مُشجعةٌ في الجمهور، يتشتَّت الصوت الصادر من فمِها إلى حدٍّ بعيد، فلا يُرسَلُ فقط إلى الأمام، بل يمينًا ويسارًا ولأعلى ولأسفل. يُقلِّل هذا التشتُّت

بشدَّة من حدَّة الصوت (ارتفاعه) في أيِّ اتجاهٍ بعينه. ولكن حينما تصيح المُشجِّعة من خلال مُكبرِ صوتٍ مخروطيِّ الشكل، يصدُر الصوت من فتحة أكبر كثيرًا (في أقصى نهاية مُكبِّر الصوت)، فيكون التشتُّت أقلَّ بكثير؛ ومِن ثَمَّ، يُوجَّه الصوت للأمام في المقام الأول وتُصبِح حدَّتُه أشد؛ لذا يُستخدَم مُكبر الصوت لتقليل حيود صيحات المشجعة.

تهدف صافرة الضباب إلى نشرِ تحذيرٍ صوتي بشكلٍ أُفقي على أوسع نطاقٍ ممكن، بحيث يستطيع أيُّ شخصٍ على متْنِ أيِّ سفينةٍ تقترِب من أيِّ اتجاهٍ أن يسمعَ التحذير. وبما أن التشتُّت الأفقي للصوت شيءٌ محمودٌ على العكس من تشتُّته رأسيًّا، فقد صُمِّمت فتحة صافرة الضباب بحيث يكون عرضها ضيقًا وارتفاعها كبيرًا.

(٢٢) اتِّجاه الهمْس

إذا تحدَّث إليك شخصٌ في منطقة مفتوحة (حيث لا يُوجَد إلا قليل من الأشياء التي تعكس لك الأصوات) بمستوى صوت مُنخفِض وثابت إلى حدٍّ ما، بينما يُشيح المُتحدِّث بوجهه بعيدًا عنك، فستتمكَّن على الأرجح من سماع الكلمات في مُعظم الوقت الذي كان يُشيح فيه بعيدًا عنك. بعد ذلك، اجعل المُتحدِّث يُكرِّر ما قاله هامسًا وهو لا يُواجهك أيضًا بنفس «مستوى الصوت» (ربما بطريقة «الهمس المسرحي»، كما لو كان يقصد أن يَسمعه الجمهور). لماذا يُصبح الهمس غير مسموعٍ على نحوٍ أسرع من الصوت العادي عندما يكون المُتحدِّث مُشيحًا بوجهه بعيدًا؟

الجواب: يُوجَد هنا تفسيران. لنتناول التفسير الأسهل أولًا: كما شُرِحَ في البند السابق، يحيد الصوت (ينتشر في اتجاه الانتقال) حينما يمرُّ من خلال فتحة يُماثل حجمها طول موجة الصوت. يكون الحيود أقلَّ بالنسبة إلى الأطوال الموجية الأقصر. يتكوَّن صوت الهمس من أطوالٍ موجية أقصر (تردُّدات أعلى) عن مُعظم الأصوات العادية؛ ومِن ثَمَّ، بما أن الهمس يكون أقلَّ انتشارًا، فلا بُدَّ أن يواجهك الشخص الهامس مباشرةً حتى يتسنَّى لك سماع صوته.

تُوجَد أيضًا إجابة أكثر غموضًا: يُعتبَر حساب انتشار الصوت من الفم الذي قام به اللورد رايلي في عام ١٨٩٦ أمرًا صعبًا. افترض رايلي وجود مصدرٍ صغير للصوت على سطح إحدى الكُرات، ووجد أنَّ المَوجات الصوتية تلتفُّ حول الكرة؛ وكانت الأطوال الموجية

الأقصر تلتفُّ حول الكرة أقلَّ من الموجات ذات الأطوال الموجية الأطول؛ ولذلك، فصوت الهمس ذو الأطوال الموجية الأقصر لا يلتفُّ حول الرأس بقدْر ما يلتفُّ الصوت العادي.

يمكنك سماع تأثيرٍ مُماثل حينما يكون الجمهور حاضرًا لمسرحيةٍ مُقامة في مكانٍ مفتوح يفتقر إلى الأسطح الكافية اللازمة لعكس أصوات المُمثلين للحضور. يمكن سماع صوت المُمثل بسهولةٍ حتى حينما يُشيح بوجهه بعيدًا عنك، أمَّا المُمثلة التي تتحدَّث بنفس درجة ارتفاع الصوت ولكن بتردُّدات أعلى، فقد يتحتَّم عليها مواجهتك حتى يصير صوتها مسموعًا.

(٢٣) إزاحة دوبلر

إذا توقفتَ عند نقطة تقاطُع قضبان القطارات بينما يُصدِر قطار صوت صافرته المُرتفعة، فلماذا يتغيَّر تردُّد الصافرة؟ وهل يتغيَّر من تردُّدٍ مرتفع إلى آخر منخفض، أم العكس؟

الجواب: إن حركة مصدر الصوت نسبةً إلى المُتلقي (أنت أو أي كاشف آخر للصوت) تُغيِّر تردُّد الصوت، وهو تأثير يُعرف باسم «إزاحة دوبلر». السبب الرئيسي للإزاحة هو أن الصوت عبارة عن موجة؛ فإذا كان مصدر الصوت ثابتًا بالنسبة إليك، فستكوِّن الأطوار المُرتفعة الضغط للموجة التي تمرُّ أمام أُذنيك بنفس المعدَّل (التردُّد) الذي تُنتَجَ به من المصدر. ومِن ثَمَّ، ما تسمعه هو نفس التردُّد الذي يُنتجه المصدر دون أي إزاحة (تغيير). ولكن إذا تحرَّك مصدر الصوت نحوك، إذن فهو يُلاحق الموجات التي يُصدرها في اتجاهك. ومِن ثَمَّ يُصبح المعدَّل الذي تَعبُرك به الأطوار المُرتفعة الضغط للموجة أكبر ممَّا يُنتجه المصدر، وهكذا ستسمع تردُّدًا أعلى. أما إذا تحرَّك مصدر الصوت بعيدًا عنك، يصير التأثير معكوسًا تمامًا؛ إذ ستسمع تردُّدًا أقلَّ من الذي يتمُّ إنتاجه. ونتيجةً لذلك، يعني تحرُّك مصدر الصوت «نحوك» حدوث ارتفاع في التردد، بينما تحرُّكه «بعيدًا عنك» يعني حدوث انخفاض فيه، ويعتمد مقدار الإزاحة على سرعة المصدر. إذا كانت حركة المصدر تقع على زاويةٍ من خطِّ اتجاهك، يُصبح التأثير (مقدار الإزاحة) أقل؛ وإذا كانت الحركة عمودية على خطِّ الاتجاه، فلا تحدُث إزاحة.

إذا وضعتَ كاشفًا للصوت بين قضبان القطارات، يمكنك قياس إزاحة دوبلر لصافرة القطار. سيكون لصافرة القطار تردُّد مُرتفع مُعيَّن أثناء حركتها «بالكامل» نحوَ الكاشف

(حتى يُصبح صوت الصافرة مسموعًا فوق الرأس مباشرة)، وبعد ذلك سيكون لها تردُّد مُنخفض مُعين أثناء حركتها بالكامل بعيدًا عن الكاشف.

ولكن بدلًا من ذلك، إذا وضعتَ الكاشف على بُعد مسافةٍ آمنةٍ على جانب مسار القطار — لنَقُل على بُعد ٢٠ مترًا — فستختلف القياسات لأسبابٍ هندسية. بينما يقترِب القطار من الكاشف، تكون سرعته «نحو» الكاشف أقلَّ تدريجيًّا؛ ومِن ثَمَّ ينخفض مقدار إزاحة دوبلر. ومِن ثَمَّ، يُعتبَر أن للصافرة تردُّدًا مرتفعًا مُعينًا — أثناء أغلب مدَّة اقتراب القطار — كما يقيسها كاشف الصوت المُثَبَّت على قضبان القطار. ومع ذلك، بينما يقترِب القطار، يتسبَّب عدم المُحاذاة في انخفاض التردُّد بسرعةٍ بينما تكون حركة القطار عمودية على اتجاه الكاشف حتى يُصبِح التردُّد ثابتًا. حينئذٍ، ينخفض التردُّد بسرعةٍ حتى يصل إلى تردُّدٍ منخفضٍ مُعين يظلُّ ثابتًا ما دام يمكن سماع الصافرة.

لنفترض أنك أنت الكاشف الصوتي، وبأنك قريبٌ بما يكفي من المسار الذي يمكن فيه تجاهل التأثير الهندسي. من المُفترَض أنْ تُميِّز تردُّدًا مرتفعًا «مُعينًا» بينما يقترب القطار نحوك، وتردُّدًا منخفضًا «مُعينًا» بينما يبتعد القطار عنك؛ ولكن المدهش هو أنك لن تميزهما. بدلًا من ذلك، ستميز «ارتفاعًا مستمرًّا» في التردُّد بينما يتحرك القطار نحوك، «وانخفاضًا مستمرًّا» في التردُّد بينما يتحرك القطار بعيدًا عنك. عادةً ما يُسمَّى هذا التردُّد المسموع «حدة الصوت». في هذه الحالة، تتأثَّر حدَّة الصوت الذي تميزه الأذن بمدى ارتفاع الصوت. نظرًا لأن الصافرة تُصبح أعلى تدريجيًّا كلَّما اقتربت، فإنك تنخدع بالاعتقاد بأن التردُّد يزداد باستمرار. ولأن الصافرة يُصبح صوتها أقلَّ ارتفاعًا باستمرار بينما تتحرَّك بعيدًا، فتنخدع بالاعتقاد بأن التردُّد ينخفض باستمرار. يُسمَّى هذا التأثير الذي تتغير فيه حدة الصوت «تأثير دوبلر».

(٢٤) كيف يعثُر الخفاش على حشرة؟

حينما يمشي خفاش على الأرض بحثًا عن فرائسه من الحشرات، فعادة ما يُرشده سماع حركة الحشرة أكثر من رؤيتها وذلك لأن بصره ضعيف، كما أنه يبحث عن فرائسه ليلًا. ومع ذلك، يمكن لبعض أنواع الخفافيش رصْد الحشرات واصطيادها، كالعثة، وكلاهما طائر. وعلى الرغم من أن الخفاش يطير بسرعة، يُمكنه تحديد موقع الحشرة والإمساك بها. كيف يتمكن الخفاش من رصد وجود الحشرة، وكذلك رصد اتجاهها وسرعة طيرانها أيضًا؟

لماذا تُفضِّل الخفافيش اصطياد العثة وهي تطير بالقُرب من مصباح بخار الزئبق (تستخدم عادةً كمصابيح إنارة في الشارع) عن اصطيادها في حقلٍ مفتوح؟ ولماذا لا تُصبح هذه الميزة موجودة إذا كان المصباح هو مصباح بخار الصوديوم؟

حين كنتُ أستكشِف الكهوف في غرب ولاية تكساس، كنت أقضي إجازة نهاية الأسبوع بأكمله تحت الأرض. كانت تطير آلافٌ من الخفافيش أمامي مرَّتَين في الليلة الواحدة، فتارةً تطير نحو فتحة دخول الكهف، فتخرج منه بحثًا عن الطعام، وتارةً أخرى تطير عائدةً إلى أماكن مبيتها في عُمق الكهف. لم يحدُث ولو لمرةٍ أن ارتطم خفاش طائر بي أو بالجدار حتى في قلب الظلام الدامس لأحد الممرات المُلتوية داخل الكهف. كيف تتمكَّن الخفافيش من تجنُّب هذا الارتطام؟

الجواب: يُصدِرُ الخفاش دفقةً من الموجات الصوتية بتردُّدات مرتفعة للغاية بحيث يتعذَّر على الإنسان سماعها؛ لأنها تقع في منطقة تُسمَّى بمنطقة «الموجات فوق الصوتية». ينعكس الصوت الذي يصدر عبْر فتحتي أنف الخفاش، على الأرجح، من الأجسام التي تقابله في مساره، مثل الحوائط ومُكتشفي الكهوف والحشرات الطائرة، تُنبِّه أصداء الصوت الصادرة من هذه الأجسام الخفاش إلى وجودها في طريقه. ومع ذلك، تُمثِّل هذه الطريقة مشكلةً بالنسبة للخفافيش التي تطير في أسرابٍ كبيرةٍ بسرعة عبر أحد ممرَّات الكهوف؛ إذ كيف يتمكن الخفاش من تمييز صدى صوت ناتج من صوتٍ أصدرَه من أصداء الأصوات الصادرة من الخفافيش الأخرى؟ الإجابة هي أنَّ لكلِّ خفاش إشارة لها تردُّد خاص وتغيرات في التردُّدات وفي السعة الموجية تُميزها عن الباقية. ومع ذلك، تظلُّ قدرة الخفافيش على التقاط إشارةٍ واحدةٍ بين العشرات أو حتى المئات من الإشارات الأخرى أثناء الطيران بسرعةٍ نحو أحد الجدران أمرًا مذهلًا.

يتلقَّى الخفاش معلومات أكثر من مجرَّد صدى الصوت؛ وذلك لأنه حسَّاس للتغير الذي يحدُث في تردُّد الصدى الذي ينتج عن حركته نفسها. لنفترِض أنَّ الخفاش يُصدِر صوتًا بتردُّدٍ معينٍ أثناء طيرانه تجاه أحد الجدران؛ يكون لصدى الصوت الذي يعود إلى الخفاش تردُّدًا أعلى ويُقال إنه تعرَّض لتأثير «إزاحة دوبلر». ومِن ثَمَّ، كلما زادت سرعة طيران الخفاش نحو الجدار، اختلف تردُّد الصدى. فالخفاش يستخدم تأثير إزاحة دوبلر ليُحدِّد سرعته.

تُصدِر بعض الخفافيش صوتًا بتردُّد ثابت وتستخدم تأثير دوبلر لا لكي ترصد فقط العوائق، بل والحشرات أيضًا. بينما تُصدر بعض الخفافيش الأخرى صوتًا يمتدُّ عبْر

نطاقٍ ترددِيٍّ. يمكن للخفَّاش أن يُحدِّد ملامح سطح أحد الأهداف من خلال تحليل تأثير دوبلر الذي يحدُث عند تردُّدات مختلفة؛ ومِن ثمَّ يميز صدى صوت الحشرة من صدى صوت أوراق الأشجار على سبيل المثال. يمكن أن تصبح المهمة أسهل إذا كانت الحشرة تحرك جناحيها في مجال إشارة الموجات فوق الصوتية للخفاش؛ لأنَّ الاختلاف في درجة ميل الجناح يُسبِّب تباينًا في الصدى العائد إلى الخفاش (يكون الصدى أقوى عند درجات ميلٍ مُعينة، ولا يكون كذلك عند درجات أخرى). يكون هذا التباين إشارةً مؤكدةً على أنَّ الصدى يصدُر من حشرة تطير.

تُفضِّل بعض الخفافيش الصيد عن طريق الطيران المُنخفض فوق الماء (الترولة) لأن سطحه المُستوي يُحدِث اضطرابًا أقلَّ بكثيرٍ في الصدى وهو ما يسهل على الخفاش تصنيفه. يكون معظم انعكاس إشارة الخفاش فوق الماء بعيدًا عنه، بينما ستعكس الحشرة الصوت مباشرةً إلى الخفاش بشكلٍ واضح.

تتمتَّع أنواع مُعينة من الحشرات بالحساسية للموجات فوق الصوتية التي تستخدمها الخفافيش. حينما ترصد إحدى هذه الحشرات أحد تردُّدات هذه الموجات، خاصةً إذا كان الصوت مرتفعًا، تطير الحشرة خوفًا على الفور وفي اتجاهٍ عادةً ما يُقلِّل من حدَّة الصوت. وبعض هذه الحشرات لدَيها طُرق دفاع أفضل؛ إذ تُصدِر صوتَ نقرٍ يُشوِّش بفاعليةٍ على رصد الصدى الذي يحتاجه الخفاش ليُحدِّد مكان الحشرة وينقضَّ عليها. يصدر صوت النقر نتيجة لحركات التوائية تخضع لها بشرة صُلبة أثناء انثنائها. تُنتِج كل حركة التواء مفاجئ تغييرًا مفاجئًا في ضغط الهواء، وهذا التغيير المُتكرِّر في الضغط ينتقل من الحشرة في شكل صوتٍ في مجال الموجات فوق الصوتية. لإرباك الخفاش، لا بُدَّ أن تصل هذه النقرات إما في نفس الوقت الذي يصل فيه صدى الصوت الصادر من الحشرة أو أن تصِل قبله مباشرةً بحيث لا يصير بإمكان الخفَّاش تمييز الصدى.

ومِن ثَمَّ يُمكن للخفَّاش أن يجد وليمةً شهيةً إذا كان يطير بالقُرب من المصباح. ومن الغريب أن بعض هذه الحشرات إما تفرُّ عندما تستشعِر وجود الموجات فوق الصوتية، أو تُرسِل إشارة تشويش، ولكنها لا تفعل هذا أو ذاك وهي بالقُرب من المصباح. أحد التخمينات هو أنها لا تخشى وجود الخفَّاش أثناء وقتِ النهار (إذ تنام الخفافيش في ذلك الوقت بدلًا من صيد الطعام)، يخدعها الضوء الأبيض الساطع فتعتقد أنها في ضوء النهار وأنها بذلك في أمان. يُصدر مصباح بخار الصوديوم ضوءًا أصفر مُميزًا لا تُخطئه العثَّة على الأرجح بأنه ضوء النهار.

(٢٥) كيف يعثُر الخفاش على زهرة؟

كيف تجد الخفافيش التي تتغذَّى على رحيق الزهور تلك الزهور؟ تعتمد عملية تلقيح العديد من الأزهار، خاصةً في المناطق الاستوائية، على الخفافيش التي تحطُّ عليها. حينما يحطُّ خفاش على إحدى الأزهار ويدسُّ أنفه في شقٍّ بين البتلات ليخترق من خلاله الزهرة وصولًا إلى الرحيق، يتسبَّب في أن تقذِف بتلتان أُخريان بحبوب اللقاح على ردف الخفاش حتى يحملها إلى الزهرة التالية. ليس على الخفاش فقط أن يُحدِّد مكان الزهرة، بل عليه أيضًا أن يُحدِّد مكان الشقِّ الذي سيدُسُّ من خلاله أنفه؛ فكيف يتمكَّن من فعل كل ذلك ببصره الضعيف وفي الظلام؟ كيف تمنع الزهرة خفاشًا ثانيًا من الحطِّ عليها حتى يتجدَّد مخزونها من حبوب اللقاح؟

الجواب: على ما يبدو فإن الخفاش يتمكَّن من التعرُّف على الزهرة من خلال نوع الصدى الذي يتلقَّاه منها حينما يُرسل دفقتَه من الموجات فوق الصوتية نحوَ الزهرة (انظر البند السابق). في الواقع، تكون بتلات بعض الزهور على شكل كأسٍ حتى يتسنَّى لها إرجاع صدى يُمكن التعرُّف عليه إلى الخفاش. على سبيل المثال، تكون بتلات نبات الميقونة الهولتونية Mucuna holtonii، على شكل كأسٍ يُعيد الصدى بقوة إلى الخفَّاش حتى حينما يقترِب بزاوية يكون فيها مواجهًا للزهرة (الزهرة هي نسخة صوتية من العاكس الخلفي للضوء الذي يَرتديه العدَّاءون ليكونوا مرئيِّين في ضوء مصابيح السيارات الأمامية في الليل). ترتفع البتلة العلوية للكأس حينما تكون حبوب اللقاح مُتاحة. بعد أن يترُك الخفاش الزهرة وهو يحمل حبوب لقاحها على ردفه، تتدلَّى البتلة العلوية ممَّا يفسد شكل الكأس؛ ومِن ثَمَّ، لن يتلقَّى الخفاش الثاني صدًى قويًّا من الزهرة. في وقتٍ لاحق من الليل، ترتفع البتلة العلوية بعد أن يتجدَّد مخزون حبوب اللقاح؛ فتستعيد الزهرة شكل الكأس مرة أخرى وتُرسل صدًى قويًّا ليحطَّ عليها خفاشٌ آخر.

(٢٦) سماع الصوت أسفل الماء

لماذا حينما يكون رأسك أسفل الماء يبدو الصوت الصادر من شخصٍ إلى يمينك وكأنه قادم من الأمام؟

الجواب: أحد المفاتيح التي يستخدمها عقلك لتحديد اتجاه مصدر الصوت هو التأخير الزمني الذي يحدُث بين وصول الصوت إلى الأذن الأقرَب من المصدر وبين وصوله

إلى الأذن الأخرى الأبعد. على سبيل المثال، إذا كان مصدر الصوت إلى يمينك مباشرة، يُخبرك التأخير الزمني الذي يكون بمقدار ٠,٠٠٠٥٨ ثانية وخبرتك السابقة، أن المصدر يقع إلى يمينك تمامًا بزاوية ٩٠ درجة من الاتجاه الأمامي. ومع ذلك، إذا كنتَ أنت ومصدر الصوت مَغمورَين أسفل الماء، سيكون التأخير الزمني بمقدار الرُّبع فقط (٠,٠٠٠١٤ ثانية) لأن سرعة الصوت في الماء تبلغ أربعة أضعاف سرعة الصوت في الهواء. (ينتقل الصوت من الأُذن الأقرَب إلى الأذن الأخرى بشكلٍ أسرع.) يقودك هذا التأخير الزمني الأقصر وخبرتك السابقة إلى الاعتقاد خطأً بأن مصدر الصوت يقع على زاوية ١٣ درجة فقط من الاتجاه الأمامي.

ومع ذلك، على الأرجح لا يمكنك تحديد الزاوية جيدًا نظرًا لأنَّ التأخير الزمني الذي يستغرقه الصوت للانتقال من أُذنٍ إلى الأخرى يُشَوِّشهُ تأثير إضافي. يمكن نقل الصوت بسهولةٍ أكبر من الماء إلى داخل رأسك عنه من الهواء إلى داخل رأسك. لذا، بغمر رأسك أسفل الماء، يصل الصوت إلى الأذن الأُخرى ليس فقط من خلال المرور أمام رأسك عبْر الماء، بل أيضًا من خلال الانتقال عبْر رأسك نفسه. يختلف التأخير الزمني لهذَين المسارَين بعض الشيء، وهو ما يُعطيك إشارات مُتضاربة حول اتجاه مصدر الصوت.

(٢٧) تأثير حفل الكوكتيل

في حفلٍ صغيرٍ يكون الناس فيه واقفين ويتحدَّثون في أزواج، تجد أن كلَّ فردٍ يقف على مسافة «مقبولة اجتماعيًّا» من الآخر ويسمع كلاهما الآخر من دون أيِّ مشكلة. ومع ذلك، لماذا يُصبح السمع أصعبَ كلما ازدادت كثافة الحضور في الغرفة؟ وماذا يفعل كلُّ زوج من المُتحدِّثين نتيجة لذلك؟ ولماذا يظلُّ من الممكن تمييز الصوت؟ قد تلاحظ حدوث نفس تلك التأثيرات في العديد من البيئات الصاخبة الأخرى، مثل في مطعم مُزدحِم أو في عربة مترو.

الجواب: كلما ازدادت كثافة الأشخاص، ازدادت الضوضاء الخلفية الناتجة عن صوت حديثهم (الأصوات الآتية منهم إليك مباشرة، بالإضافة إلى الأصوات المنعكسة من الجُدران والسَّقف ومن الأشخاص الآخرين أيضًا). عندما تُصبِح الضوضاء الخلفية بنفس ارتفاع صوت المُحادثة التي تنخرِط فيها، ترفع أنت وشريكك صوتكما تلقائيًّا، وهو ما يُعرَف بـ «تأثير ظاهرة لومبارد» الذي سُمِّي نسبة إلى إيتيان لومبارد الذي درس هذه الظاهرة في عام ١٩١١. وبما أنَّ كل المُتحدِّثين الآخرين يُعانون من نفس المشكلة، فإنهم

يرفعون بدورهم أصواتهم أيضًا؛ مِن ثَمَّ تظلُّ لدَيك مشكلة في سماع ما يقوله شريكك. في مرحلةٍ ما، لتجنُّب الصراخ، تقترِب أنت وشريكك أحدُكما من الآخر بشكلٍ أكثر من الطبيعي (بحيث تصيران داخل «المساحة الشخصية» لكلٍّ واحدٍ منكما). إذا أسكتَ أحدُهم الحضور ليُعلن عن شيءٍ ما على سبيل المثال، ثم عاود الناس الحديث، تعود مستويات الصوت (تدريجيًّا مع الوقت) إلى القِيَم التي كانت عليها سابقًا. دُرِسَ تأثير ظاهرة لومبارد في بعض الحيوانات، مثل الطيور التي ترفع مستويات صوت نداءاتها حينما تُقابلها أصوات خلفية مُتزايدة تَصدُر من الطيور الأخرى.

إذا قام أحدهم بتسجيل مُحادثتك مع شريكك باستخدام ميكروفون واحدٍ ثم أعاد تشغيل ما سجَّله لاحقًا في غرفة هادئة، فعلى الأرجح لن تتمكَّن من تمييز ما يقوله شريكك كما كنتَ تُميزه حينما كنتَ تسمعه وجهًا لوجه. الفرق هو أنك تسمع شريكك بأذنيك وأنتما تتحدَّثان وجهًا لوجه؛ إذ يساعدك التأخير الزمني البسيط بين ما تسمَعُه الأذن وبين الاختلاف الطفيف في شدَّة الصوت في الأُذنَين على تمييز صوت شريكك من بين باقي الأصوات الأخرى. يُطلَق على هذا التأثير اسم «تأثير حفل الكوكتيل». يُمكن أيضًا أن تُساعدك رؤية حركة فم شريكك و«لغة جسده» في ملء فراغات الكلمات غير المسموعة أو حتى جمل كاملة لم تسمعها بوضوح. لا تتوفَّر أي من هذه المفاتيح حينما تستمع إلى محادثة سجلها ميكروفون واحد. حينئذٍ يتوجَّب عليك البحث عن مفاتيح أخرى، مثل البحث عن الأفكار الذكية أو النغمات المميزة المدفونة في ضجيج الخلفية. في بعض الأحيان يكون التقاط المُحادثة من بين هذه الضوضاء الخلفية سهلًا للغاية، كما يحدُث حين تتمكن بسهولةٍ من سماع صوت أحد أفراد الجمهور الذي كان يجلس بالقُرب من المُسجِّل عندما كانت الحفلات الموسيقية تُسَجَّل بشكلٍ غير قانوني. تستخدم بعض الحيوانات القدرة على التعرُّف على الأصوات المألوفة في خلفية صاخبة، مثل فرخ البطريق الملكي الذي يتمكن من سماع والدَيه في وسط الضجيج الذي تُنتجه الآلاف من طيور البطريق الأخرى المجاورة.

(٢٨) الصوت المُنبعِث من الأذنَين

يُصدِرُ حوالي ٦٠٪ من الناس صوتًا من الأُذنَين، وهو ما يُعرَف بـ «الانبعاثات الأذنية السمعية». تتطلَّب معظم الانبعاثات وجود ميكروفون ومكبر للصوت حتى تُسمَع، ولكن

بعض الانبعاثات تكون مسموعةً إذا كنتَ تقِف بالقُرب من الشخص في غرفة هادئة إلى حدٍّ ما. لماذا تُصدِر الأذنَين الصوت؟

الجواب: حينما يستثير الصوت طبلةَ الأذن للعمل، تُنقَلُ الاهتزازات إلى الأذن الداخلية (قوقعة الأذن)، التي تتكوَّن من جزأين طويلَين نسبيًّا من السائل يفصل بينهما «الغشاء القاعدي». العضو المَعْني بالاستشعار الصوتي هو «عضو كورتي» الذي يقع على هذا الغشاء. عندما تُنقَلُ إشارة صوتية إلى عضو كورتي من خلال اهتزاز الغشاء القاعدي، تبدأ قضبان تُشبِه الشعر داخل العضو بالتمايُل، ممَّا يؤدي إلى إطلاق نبضات كهربائية تُرسَلُ إلى الدماغ كمعلومات عن الصوت. يتَّسِم هذا الرصد بحساسيته للتردُّدات العالية؛ إذ يُحفِّز كلَّ صوتٍ ذي تردُّدٍ مُعين القضبانُ التي تُشبِهُ الشَّعر في منطقة مُعينة. يرجع هذا الانتقاء إلى نظام تحكُّم يُغذي جزءًا من الإشارة داخل منطقة الرصد مرة أخرى. يمكن لطاقة التغذية العكسية هذه أن تتسبَّب في اهتزاز الغشاء القاعدي دون مُحفِّز خارجي، وتُرسِل هذه الاهتزازات إلى طبلة الأذن مرة أخرى التي تُنتج بعد ذلك موجات صوتية تنتقل خارج القناة الصوتية. تُعتبَر مثل هذه الموجات الصوتية قليلة جدًّا عند مُعظم الناس، ولكن إذا قال أحدُهم إنَّ أُذنَيه تطنَّان، فقد تتمكَّن من سماع هذا الطنين فعلًا.

(٢٩) سماع الموسيقى في رأسك

تحمل كلاسيكيات موسيقى الهيفي روك، مثل أغاني فريق «آيون باتَرفلاي» أو فريق «ليد زيبلين»، جملًا لحنيَّة ثقيلة يلعبها جيتار الباص. ومع ذلك، لا تتمكَّن السمَّاعات الصغيرة، مثل تلك الموجودة في السيارات، من انتاج نغمات الباص، إذ تتطلَّب الموجات الصوتية أطوالًا موجيةً طويلةً لا يمكن إنتاجها في مخروط سمَّاعة ذي قطرٍ وعمقٍ صغيرين. ومع ذلك، تبدو الأصوات الصادرة من هذه السماعات الصغيرة مقبولة؛ إذن، كيف يمكنك سماعَ جُمَلِ الباص اللحنية؟

الجواب: تُنتَج الأصوات ذات التردُّد المُنخفض داخل رأسك بسبب تأثيرين. أُطلِقَ على التأثير الأول اسم «التأثير الأساسي المفقود»، والذي يتعلق بإدراكك لسلسلةٍ من النغمات التوافُقية. تتكوَّن هذه السلسلة من التردُّدات الأدنى (الأساسية) والتردُّدات الأعلى (النغمات المتآلِفة) وهي عبارة عن مضاعفات الأعداد الصحيحة من التردُّد الأدنى. على سبيل المثال، إذا كان التردُّد الأساسي يُساوي ٥٠٠ هرتز، فإن السلسلة تتكوَّن من ٢ × ٥٠٠ = ١٠٠٠ هرتز، أو ٣ × ٥٠٠ = ١٥٠٠ هرتز، أو ٤ × ٥٠٠ = ٢٠٠٠ هرتز، وهكذا. لنفترِض

أن سمَّاعات السيارة يمكنها توليد أي تردُّد فوق ٨٠٠ هرتز، ولكن لا يمكنها توليد أي تردُّد أقل. إذا أرسلت هذه السلسلة التوافُقية إلى السمَّاعات، فلا يمكن للتردُّد الأساسي الذي يبلغ ٥٠٠ هرتز أن يوَلَّد، ولكن يمكن توليد التوافُقيات الأعلى. وعلى الرغم من ذلك، فالجهاز العصبي المسئول عن إدراك تلك التوافُقيات الأعلى وإدراك أنها جزءٌ من سلسلة توافُقية يخلق أيضًا إدراكًا يتمكن من تمييز التردُّد الأساسي على الرغم من أنه لا يصل إلى أذنيك؛ ومِن ثَمَّ، حينما تستمع إلى موسيقى الهيفي روك عبْر السماعات، تكون التردُّدات التوافُقية الأعلى للنغمة كافية لجهازك العصبي ليتمكن من تمييز التردُّد الأساسي للنغمة. ولكن يظلُّ السبب وراء فعل الجهاز العصبي لهذا الأمر غير مفهوم.

أما التأثير الثاني المسئول عن إدراك جملة الباص اللحنية، فهو أنَّ آلية السمع في الأذن «لا خطية»؛ أي إن استجابتها لأي اختلافات في الموجات الصوتية التي تدخُل الأذن تكون مشوشة. ويُفترَض أن استجابتها لا خطيَّة حتى تستجيب لمستويات الصوت (ارتفاع الصوت) عبْر نطاقٍ واسعٍ جدًّا ولتتمكَّن أيضًا من فرْز الأصوات طبقًا لتردُّداتها. تحدُث إحدى النتائج الثانوية لهذه الاستجابة المشوَّشة عندما تتعامَل الأذن مع تردُّدَين؛ على سبيل المثال، تردُّد أول (f_1) يبلغ ١٠٠٠ هرتز، وتردُّد ثانٍ (f_2) يبلغ ١٥٠٠ هرتز. إذا كانت الموجات الصوتية مُرتفعة نسبيًّا، فستنتهي الحال بموجةٍ صوتية بتردُّد يُساوي الفرق بين هذَين التردُّدين ($f_2 - f_1 = 500\ \text{hertz}$) إلى أن تُنتَجُ في الأذن الداخلية. نظرًا لأنَّ هذَين التردُّدين مُتتابِعان في السلسلة التوافُقية المذكورة آنفًا، فإنَّ الفرق بينهما يُساوي التردُّد الأساسي. وهكذا، على الرغم من أن التردُّد الأساسي لا يدخل الأذن، فإنه يُنتَج في الأذن الداخلية عن طريق استجابة الأذن اللاخطية.

يمكنك سماع «نغمة الفرق» $f_2 - f_1$ في حالاتٍ أخرى يُصدِر فيه مصدران صوتيان تردُّدات قريبة بدرجة معقولة «بصوتٍ عالٍ». ولا بدَّ أنْ تكون عاليةً حتى تحثَّ الأذن الداخلية لإحداث التشويش. على سبيل المثال، إذا أصدرَتْ إحدى آلات الفلوت التردُّد f_1، بينما أصدرَت أخرى التردُّد f_2، فعندئذٍ ستسمع صوت آلة فلوت ثالثة غير موجودة عند تردُّدٍ يُساوي $f_2 - f_1$.

كما يمكن سماع نغمة الفرق أيضًا عن طريق الضغط بقوة على صافرة الشرطة البريطانية ذات الفتحتَين. إذا غطيتَ الفتحة القريبة بإصبع، فستسمع التردُّد لأن الفتحة البعيدة مفتوحة؛ وإذا غطيتَ الفتحة البعيدة بإصبع، فستسمع التردُّد لأن الفتحة القريبة

مفتوحة. أما إذا تركتَ كلتا الفتحتَين مفتوحتَين، فستسمع تردُّدين مُختلفَين بالإضافة إلى تردُّدٍ ثالث؛ ألا وهو نغمة الفرق.

توَظَّف نغمة الفرق أيضًا في الأرغن ذي الأنابيب: كي يُصدِر الأنبوب نغمة دو منخفضة عند درجة ١٦ هرتز، يجب أن يبلُغ طوله حوالي عشرة أمتار، وهو طول كبير للغاية وثقيل ومُكلِّف. ومع ذلك، إذا عُزِفَ على الأنبوب الذي يُصدِر نغمة دو عند درجة ٣٢ هرتز والأنبوب الذي يُصدِر نغمة صول عند درجة ٤٨ هرتز معًا بصوتٍ عالٍ، فسيُصدران نغمة دو المنخفضة عند درجة ١٦ هرتز كناتج تشويش داخل الأذن الداخلية؛ ومِن ثَمَّ، يُنتِج الأنبوبان الأقصر والأوفر ثمنًا مُوسيقى إضافيةً في رأسك.

(٣٠) فقدان السمع الناجم عن الضوضاء

عندما ظهرت موسيقى الروك آند رول، وبَّخ عددٌ لا حصر له من الآباء أبناءهم من المُراهقين على سماع هذه الموسيقى لأنها ستتسبَّب في تدمير سمعهم. أظهرت الدراسات المُبكرة أن هذا التنبُّؤ لم يكن صحيحًا؛ ومع ذلك، بدأت أضرار السمع بالظهور مع تطوُّر موسيقى الروك، وخاصةً بعد أن صارت أكثر صخبًا في الحفلات والنوادي الليلية (وبعد ذلك سماعها بشكل مُركَّز من خلال سماعات الرأس). في الواقع، بعد سنوات من التعرُّض للموسيقى الصاخبة، سواءٌ أثناء العروض الموسيقية الحيَّة أو الاستماع إلى الموسيقى المُسجَّلة من خلال سمَّاعات الرأس التي تُستخدَم في استديوهات التسجيل، عانى بعضُ موسيقيِّي الروك المُخضرَمين من مشكلاتٍ جسيمة. على سبيل المثال، فقدَ تيد نادجينت السمع تمامًا في إحدى أُذنَيه، بينما عانى بيتر تاونزهيند (من فريق ذا هوْ) ولارس أولريتش (من فريق ميتاليكا) من طنين الأذن المُتواصِل الذي كان عاليًا بما فيه الكفاية حتى أثَّر سلبًا على قُدرتهما على النوم والتركيز.

يُعاني العديد من مُنسِّقي الأغاني (الدي جيه) الذين يعملون في الحفلات الموسيقية والنوادي الليلية الصاخبة إما من فقدان السمع المؤقَّت بعد ترك العمل، أو فقدان السمع الدائم، أو طنين الأُذن. كما بدأت الأضرار التي تُصيب السمع في الظهور لدى من يستخدِمون أجهزة تشغيل الموسيقى المحمولة من جرَّاء سماع الموسيقى عبْر سمَّاعات الرأس بصوتٍ مُرتفع. يمكن بالطبع أن يتسبَّب العديد من المصادر الأخرى للصوت الصاخب أو المفاجئ في فقدان السمع، مثل صوت منافيخ الأوراق، وجَزَّازات العُشب، وصوت الألعاب النارية القريبة، والطلقات النارية، والمطارق الثقَّابة، ومحركات الطائرات

النفاثة، والدراجات النارية، وسيارات السباق. يتَّخِذ العديد من الناس الاحتياطات اللازمة الآن، إذ يرتدي البعض سدادات الأذن «الخاملة» التي تُخفِّف الضجيج دون عزله تمامًا، والتي تكون على شكل أسطوانات مصنوعة من الفلِّين تسدُّ فتحة الأذن، بينما يَستخدِم آخرون سدَّادات وسمَّاعات الأذن «النشطة» التي ترصد أي ضجيجٍ مُستمرٍّ في الخلفية، مثل صوت مُحرِّك الطائرة وتُلغيه تمامًا بحيث لا يُعَد مسموعًا.

لماذا تتسبَّب الأصوات العالية في هذه الأنواع المُتعدِّدة من مشكلات السمع؟ وكيف تُلغي سدَّادات وسماعات الأذن النشطة الضوضاءَ المُحيطة؟

الجواب: تظلُّ تفاصيل فقدان السمع المؤقَّت أو الدائم بسبب الضوضاء العالية غير مفهومة. قد يتسبَّب في الفقدان المؤقَّت للسمع انخفاض تدفُّق الدم إلى الأذن الداخلية بسبب انقِباض الأوعية الدموية. أما فقدان السمع الدائم فقد ينجُم عن انثناء الخلايا الشَّعرية للقوقعة المسئولة عن تحويل التردُّدات الصوتية إلى إشارات عصبية للدماغ. إذا انثنت الخلايا الشَّعرية واختلفت الإشارات عن النَّسق المُعتاد، فقد يعتقِد الدماغ أنَّ هذا التغيير يدلُّ على دخول الصوت إلى الأذن؛ ومِن ثَمَّ يصل هذا الشعور المُتعلق بالصوت إلى الوعي ويَنتُج عن ذلك الشعور بالطنين.

يرصد جهاز مُصغَّر في سدَّادات وسمَّاعات الأذن النشطة الصوت المُحيط ويُنتِج صوته الخاص. إذا كان الصوت المُحيط ثابتًا إلى حدٍّ ما، يُنتِج الجهاز حينئذٍ موجةً صوتية لها نفس السعة الموجية والتردُّد. قد يبدو أنَّ هذا يزيد الأمر سوءًا. ومع ذلك، تكون الموجة الصادرة مُعاكسة تمامًا للموجودة في البيئة المُحيطة؛ ومِن ثمَّ تلغي الموجتان إحداهما الأخرى داخل أذنيك عن طريق التداخُل الهدَّام. يمكن أن يكون التأثير الناتج عن هذه العملية مُذهلًا، فإذا ارتديتَ سمَّاعات الأذن النشطة التي تُلغي الضجيج دون تشغيلها، فإن صوت الطنين الصادر من مُحركات الطائرة، على سبيل المثال، يكاد يكون غير مُحتمَل. أما إذا ضغطتَ زرَّ التشغيل، فسينخفض صوت الطنين فجأةً حتى يصير همسًا خافتًا.

(٣١) الصوت المُحسَّن بالضوضاء

عادةً ما تميل الضوضاء إلى «حجب» (أو إخفاء) الإشارة، إذ قد تخفي صوت أحد الأصدقاء في حفلٍ صاخب (تبلُغ «نسبة الإشارة إلى الضجيج» أقلَّ من ١,٠ وهو ما يعني أنَّ الإشارة

تُفْقَد في خضمِّ الثرثرة). ومع ذلك، يمكن في الواقع أن تزيد الضوضاء من إمكانية سماع الإشارة في بعض الأحيان. على سبيل المثال، إذا خفضتَ مستوى الصوت أثناء استماعك إلى الموسيقى، فستُصبِح الموسيقى ضعيفةً جدًّا لدرجة يصعُب سماعها. إذا شغَّلتَ حينئذٍ مصدر ضوضاء يُنتج صوتًا واحدًا وثابتًا، مثل صوت طنين مُحرك الطائرة، وضبطتَ مُستوى صوته، فقد تجد أنه يمكنك سماع صوت الموسيقى مرة أخرى. كيف يُمكن للضوضاء أن تجعلَ الموسيقى غير المسموعة مسموعة؟

الجواب: تتكوَّن الموسيقى من مجموعة من الأصوات ذات المستويات الصوتية المختلفة، ولكنك إذا خفضتَ مستوى الصوت حتى يُصبح غير مسموع، فلن يمكنك حتى سماع أعلى الأصوات وأوضحها. حينما تُشغِّل ضوضاء خلفية ثابتة إلى حدٍّ ما، يُضاف مستوى صوت الضوضاء إلى مستوى صوت الموسيقى، وكلَّما تأتي الأجزاء التي تعلو فيها الموسيقى، تُعزِّز الضوضاء الإضافية تلك الأجزاء وتدفع بها إلى النطاق المسموع؛ ومِن ثَمَّ يمكنك الآن أن تُميِّز إيقاع الموسيقى وربما بعض التفاصيل كذلك، ولكن الموسيقى التي تسمعها لن تكون عالية الجودة بكلِّ تأكيد إذ إنك ستُفَوِّت جميع الأجزاء ذات الصوت المُنخفِض. ومع ذلك، فما تسمعه سيكون كافيًا للتعرُّف على الموسيقى.

(٣٢) سمَّاعة الطبيب وأصوات التنفُّس

يمكن للأصوات التي تُنتَج داخل جسم المريض، سواء من خلال منطقة الصدر أو الظهر أو الحلق، أن تلفِتَ انتباه الطبيب إلى وجود خطبٍ ما. من الواضح أنه ليس بمقدور الطبيب سماع تلك الأصوات بمجرد الوقوف بالقُرب من المريض؛ لذا يستخدِم السماعات للفحص. هل يمكن للطبيب أن يسمع هذه الأصوات بشكلٍ أفضل عن طريق ضغط أذنَيه بقوَّة على جسم المريض (بصرْف النظر عن كون هذا الأمر مُحرجًا للغاية)؟ ما الذي يُسبِّب هذه الأصوات؟

الجواب: تُوَلَّد الأصوات أولًا عن طريق تدفُّق الدم عبْر القلب وعن طريق تدفُّق الهواء عبْر الرئتَين والحنجرة. ما يزال السبب وراء الأصوات الناتجة عن تدفُّق الهواء غير مفهوم بما يكفي، ولكنها عادةً ما تُعزى إلى الاضطراب الذي يُسبِّب تغيُّرات في ضغط الهواء، الذي يُرسِل بعد ذلك موجات صوتية عبْر الصَّدر والظهر والحلق. يُمكن أن يُشير الاضطراب بالِغَ الشدَّة أو الاضطراب بالغ الانخفاض (عدم سماع أي صوتٍ داخل الصدر) إلى وجود مشكلاتٍ في تدفُّق الهواء وتلَف الرئتَين. يمكن أن تُشير خشخشة الصدر وصفير الصدر

(الذي يدوم لفترةٍ أطول من الخشخشة) إلى انسداد المجرى الهوائي وهو ما يمكن أن يكون عرَضًا من أعراض الإصابة بالربو.

تنتقل الأصوات المُختلفة التي تُنتَج داخل جسم المريض إلى جدار الصدر حيث تنتقل الأصوات ذات التردُّدات المُنخفِضة بقوة أكبر. ومع ذلك فإن الأصوات تنتقل بشكل سيئ عبر السطح الفاصل بين الصدْر والهواء. قد يتمكَّن الطبيب من سماع بعض الأصوات من خلال ضغط أُذنَيه على جدار صدْر المريض مباشرة (على سبيل المثال يُمكن قطعًا سماع صوت نبضات القلب)؛ لأنَّ الأصوات قد تُحدِث رنينًا داخل قناة الأذن. وفي الواقع، كان ضغط الأذن على جسم المريض أحد الطُّرق الأولية للاستماع إلى أصوات الجسم الداخلية، إلَّا أنَّ استخدام السماعة لا يُثير الحرَج كما هو الحال في الطريقة الآنفة. إلى جانب ذلك، يمكن أن تُضخِّم السماعة حدَّة الأصوات نظرًا إلى أن الأصوات ذات التردُّد المُنخفض يمكن أن تُحدِث رنينًا داخلها.

تنقسم سماعة الطبيب التقليدية التي تضغط على صدر المريض إلى نوعَين أساسيَّين؛ القرص المعدني أو الجرس المطاطي. تتسبَّب أصوات الصدر في هزِّ قُرص السماعة أو الهواء الذي بداخلها، وهو ما يؤدي بدَوره إلى اهتزاز الهواء الموجود داخل أنابيب السماعة بحيث يتسنَّى للطبيب سماع هذه الاهتزازات. صُمِّم القُرص والجرس بحيث يكونا أعرض من الأنابيب ليجمعا الصوت عبْر مساحةٍ كبيرة نسبيًّا من الصدر، ولكنها ليست بالِغة الكبر بحيث تحُول دون قدرة الطبيب على تمييز مكان مصدر الصوت داخل الصدر. تُظهِر التجارب عامَّةً أن السماعة ذات القرص المعدني أفضل من الأخرى ذات الجرس المطاطي في نقل الصوت إلى المُستمع، وعلى الرغم من ذلك يفضل العديد من الأطباء استخدام الجرس.

(٣٣) شد أوتار الجيتار والأربطة المطَّاطية

لماذا يزيد شدُّ أوتار الجيتار من التردُّد الذي تسمعه حينما تنقُر على الوتر عند نقطة مُعينة؟ إذا شددتَ رباطًا مطاطيًّا عن طريق مَطِّه بين الإبهام والسبابة ونقرتَ عليه أيضًا، لماذا يظلُّ التردُّد الذي تسمعه كما هو أو ينخفض بعض الشيء؟ لماذا يتوجَّب العزف على الجيتار قليلًا خلف الكواليس قبل الظهور للعزْف على خشبة المسرح؟

الجواب: تسمَع صوتًا صادرًا من وتَر الجيتار حينما تنقُر عليه لأنَّ الموجات التي أطلقتَها بطول الوتر يُعزز بعضها بعضًا، وهي الحالة التي تُسمَّى بـ «الرنين». ويعني

هذا التعزيز أن حركة الوتَر في الهواء كبيرة إلى حدٍّ ما، مما يؤدي إلى تغيُّرات مسموعة في ضغط الهواء. لا تتسبَّب مُعظم الموجات الموجودة على الوتَر في أيِّ حركة تُذكَر، ولكن ثمة موجاتٍ ذات أطوالٍ موجيةٍ بعينها يمكنها أن تُحدِث رنينًا، ومِن ثَمَّ تُصدِر صوتًا.

على سبيل المثال، تُحدِث إحدى الموجات الرنين الذي يُسمَّى بالرنين «الأساسي»، والذي يُنتِج صوتًا بأدنى تردُّدٍ يمكن للوتَر أن ينتجه. تعتمد قيمة هذا التردُّد على طول الوتَر وكذا على السرعة التي تنتقل بها الموجات على طول الوتَر، وتعتمد هذه السرعة على درجة شدِّ الوتَر وثخانته. وهكذا تُحدِّد ثلاثة عوامل (الطول والثخانة ودرجة شدِّ الوتَر) تردُّد الصوت الصادر عن الوتر.

إذا شددتَ أحد أوتار الجيتار، فإنك تزيد من درجة الشدِّ دون إحداث تغيير كبير سواءً في ثخانة أو طول الوتَر؛ ينتج عن ذلك موجات أسرع بطول الوتَر وتردُّدات أعلى للصوت الصادر. أما إذا شدَّدتَ رباطًا مطاطيًّا، فإنك لا تزيد فقط من درجة الشدَّة، بل إنك تخفض الثخانة وتزيد الطول أيضًا، فتكون النتيجة هي عدم تغيُّر سرعة الموجة بدرجةٍ ملحوظة. ومِن ثَمَّ لا يتغير تردُّد الاهتزاز ولا تردُّد الصوت بصورةٍ ملحوظة.

تزيد الحركة أثناء العزف على وتَر الجيتار من درجة حرارته فيتمدَّد؛ ومِن ثمَّ تقلُّ درجة الشدِّ والتردُّدات التي يمكن للوتر إنتاجها. لا يرغب أي عازف في حدوث هذا الأمر على المسرح؛ لأنه حينئذٍ سيتحتَّم عليه شدُّ الوتر لإعادة ضبط النغمات التي يُصدرها. ومِن ثَمَّ، يُعزَفُ على الجيتار خلف الكواليس حتى تُصبحَ الأوتار دافئة، ثم يُعاد ضبط درجة الشدِّ لتصدر النغمات دون نشاز.

(٣٤) العزف على الكمان

كيف يُصدِر العزف بالقوس على وتَر الكمان صوتًا؟ لماذا لن تسمعَ أيَّ صوتٍ تقريبًا إذا مَرَّرتَ القوس على منتصف الوتر تمامًا؟ (في حال أصدر الوتر صوتًا، فستجده صوتًا مُزعجًا.) لماذا يُمْسَحُ على القوس بمادة راتينج القلفونية؟

يمكن لقوسٍ بعَينه، له طول ودرجة شدٍّ وكتلة مُعينة، أن يصدر أصواتًا لها سلسلة من التردُّدات يُقال إنها جزء من سلسلة توافُقية. على سبيل المثال، قد يكون التردُّد الأدنى الذي يعرف باسم التردُّد الأساسي هو ٥٠٠ هرتز. أما التردُّد التالي الأعلى، الذي يُعرَف باسم التردُّد التوافُقي الثاني أو التآلُف الأول فيُساوي ٢ × ٥٠٠ = ١٠٠٠ هرتز. يمكنك إيجاد قِيَم باقي السلسلة عن طريق ضرب ٥٠٠ هرتز في الأعداد الصحيحة الأخرى

(٣، ٤، ٥ … إلخ). يُحدِّد أي موقع على الكمان يُعزَفُ عليه بالقَوس وترتكز عنده الأصابع أيَّ جزء من سلسلة الترددات سيُنتِجها الوتر فعليًّا. وما يُثير دهشة العديد من عازفي الكمان هو أن الوتر يمكن أن يُستخدَم بطريقةٍ تجعله يُصدِر «أجزاء من الترددُ الأساسي»؛ أي ترددات أقل من الترددُ الأساسي قد تصِل إلى النصف. كيف يمكن لعازف كمان أن يعزف هذه النغمات؟

الجواب: إذا نقرتَ على وتر جيتار، فسيهتز في عددٍ من أنماط الرنين، التي تنتقل فيها الموجات بعضها عبْر بعض في اتِّجاهين مُعاكسَين، ويعزز بعضها بعضًا لتُنتج نمَطًا مُتداخلًا. وفي كلِّ نمطٍ مُتداخِل يكون للوتر مناطق اهتزاز قوية، والتي تتسبَّب في اختلافاتٍ في ضغط الهواء، ثم تنتقل تلك الاختلافات بعيدًا عن الوتَر على هيئة موجاتٍ صوتيةٍ.

أما الوتَر الذي يُمرَّر عليه قوس الكمان فهو حالة مختلفة تمامًا عن الحالة السابقة؛ لأن الموجات لا تنشأ على الوتر عبْر نقرة واحدة، بل حينما يُمَرَّرُ القوس على الوتر لأعلى، على سبيل المثال، يتعرض كلاهما لعملية متكررة تُعرف باسم «التلاصُق والتحرُّر»، إذ يتلامسان ثم يفترقان وهكذا. يمكن أن يلتصق الوتر بالقوس في البداية ويُحَرَّكُ إلى أعلى، ولكنه ينزلِق بعيدًا عن القوس في النهاية. عند حدوث عملية التحرُّر، تُغادر موجتان مُثلَّثتان نقطة التحرُّر في اتجاهين مُعاكسين على الوتر؛ فتتَّجِه واحدة نحوَ طرف الوتَر الأقرب إلى عازف الكمان، بينما تتَّجِه الأخرى نحوَ الطرف الأبعد. تنعكس كلُّ موجة عند نهاية الوتر (وتنقلب نتيجة لعملية الانعكاس)، ثم تنتقل بطول الوتر إلى الطرف المُعاكس. يكون القوس في هذه الأثناء لا يزال يتحرَّك لأعلى عبْر الوتَر، ولكنه يتحرَّك عليه انزلاقًا. في بعض الأحيان، حينما تعود الموجات المُثلثية إلى موقع القوس، يلتصِق الوتَر به ويتحرَّك لأعلى حتى يتحرَّر منه مرة أخرى، وبذلك تستمرُّ الموجات المُثلثية.

لا بُدَّ أن يُنَمِّي عازف الكمان حدسَه ويُدَرِّب أُذنه على أن يضبط حركة قوسه للتزامُن مع انتقال الموجات المُثلثية دون أن يكون قادرًا على رؤيتها بالطبع. إذا اتَّخذَت هذه الموجات المُثلَّثية وضعها المناسب، فسينتج عن اهتزازها اختلافات في ضغط الهواء، وستنتقل هذه الاختلافات من الكمان إلى الخارج على هيئة موجاتٍ صوتية. كما يمكن أن يُحدِث اهتزازها رنينًا داخل هيكل الكمان الخشبي وتجويفه الهوائي، وتُنتِج هاتان المجموعتان من الاهتزازات موجاتٍ صوتيةً إضافية بترددُات مختلفة، مما يضيف بدَوره إلى «جودة» الصوت المسموع وإثراء «طابعه».

يُصنَع القوس من شَعْر الخيل الذي يمتاز سطحه الخارجي بطبقاتٍ صلبة وسطحه الداخلي بمواد أنعم. وكلَّما استُخدم القوس بشكل متكرر، يُحزَّز الشَّعر تدريجيًّا بطول

الجانب الذي يحتكُّ بالوتر، فينكشف سطحه الداخلي الأنعم. حينما يُوضَع راتينج القلفونية على شَعر القوس، تدمج جسيماته جزئيًّا في المادة الداخلية الأنعم. تعمل الأجزاء المكشوفة من جسيمات راتينج القلفونية على توفير مواقع يمكن للوتَر أن يلتصق بها حينما يُمرَّر عليه القوس، إلا أن العزف يزيل الجسيمات تدريجيًّا، وهو ما يتطلَّب وضع المزيد من راتينج القلفونية على الشعر حتى يتسنَّى للقَوس والوتر أن يتلاصقا ويتحرَّرا بشكلٍ مناسب.

لا أفهم التفسيرات المنشورة حول أسباب عدم صدور أيِّ صوتٍ عند العزف بالقوس على منتصف الوتَر أو صدور صوتٍ مُزعج. ومع ذلك، أعتقد أنَّ هذا يرجع إلى تماثُل الموجتَين المُثلَّثتين اللتَين يُصدرهما العزف بالقوس على منتصف وتَر الكمان. تقطع الموجتان عادة مسافات مختلفة لتصلا إلى نهاية الوتَر، ولكن في حالة العزف على منتصف الوتر، تقطعان مسافات مُتساوية وتعودان إلى القوس مرة أخرى في الوقت نفسه. وبذلك، تجتمعان وتتسبَّبان في إحداث انحرافٍ أكبر من المُعتاد في الوتر عند المنتصف، وهو ما يفسد بدوره عملية الالتصاق والتحرُّر المناسبة بالقوس؛ ومِن ثمَّ، إما لا يُصدِر الوتر صوتًا، أو يصدر صوتًا خشنًا.

لكي يعزفَ عازفُ الكمان نغمة جزئية، فإنه يضغط بقوةٍ على مشط الكمان أو حتى يلفُّه أثناء العزف على وترٍ طبيعيٍّ مصنوع من خيوط الأمعاء الحيوانية (وتر غير صناعي). لم يُقَدَّمْ تفسيرٌ وافٍ للسبب وراء خفض هذه العملية للتردُّد إلى درجةٍ أقل من التردد الأساسي، ولكنه يبدو أنه يتضمَّن «موجات لولبية» لا تُنتِج فقط إزاحة جانبية للوتر، بل حركة مُلتوية أيضًا. قد تنتقل هذه الموجات بطول الوتَر بصورةٍ أبطأ من الموجات المثلثية العادية آنِفة الذكر؛ ومِن شأن هذه السرعة الأقل أن تؤدِّي إلى إنتاج تردُّدات مُنخفضة لاهتزاز الوتَر؛ ومِن ثمَّ تردُّدات أقل للصوت.

(٣٥) سماع نغمات الكمان وكأنها مُشتَّتة المصدر

في حالة التردُّدات التي تقلُّ عن ١٠٠٠ هرتز يُصدر صوت الكمان من نفس اتجاه الكمان. أما بالنسبة للتردُّدات الأعلى، فقد يبدو الصوت قادمًا من اتجاهاتٍ مختلفة وفق التردُّدات المختلفة. وهكذا، بينما يتغيَّر تردُّد الصوت عند الترددات الأعلى، يبدو اتجاه مصدر الصوت وكأنه قد تغير، وهو تأثير يُطلَق عليه أحيانًا اسم «تأثير النغمات مُشتَّتة المصدر» (أي سماع

النغمات وكأنها قادِمة من اتجاهات مُختلفة عن اتجاه الكمان). قد يبدو حينئذٍ أن الصوت قد انفصل عن الموقع الفعلي للكمان، فما الذي يُسبِّب هذا الشعور؟

الجواب: حين يكون مصدر الصوت صغيرًا مقارنة بالطول الموجي للصوت، يبدو الصوت وكأنه ينبُع من جهة المصدر، حتى أثناء تغيُّر التردُّد. أما عندما يكون مصدر الصوت كبيرًا مقارنة بالطول الموجي، فيمكن أن تعمل الأجزاء المختلفة للمصدر وكأنها مصادر مُنفصلة، يبثُّ كلٌّ منها صوته. تتداخل هذه الحزم الصوتية في أي تردُّد وتنتج نمطًا تداخليًّا بمستويات حدَّة مختلفة، ويتغيَّر النمط بتغيُّر التردُّد. إذا سمعت مجموعة من التردُّدات العالية، فيمكن أن يُوهِم هذا الفرق في النمط التداخُلي للتردُّدات المختلفة بأن هذه التردُّدات المختلفة تصدُر من أماكن مختلفة.

حينما يُصدِر الكمان أيَّ تردُّد أعلى من الحد الأدنى للنطاق المسموع، يصدر الصوت في المقام الأول من خشب الكمان. حينما تكون التردُّدات أعلى من ١٠٠٠ هرتز، تكون الأطوال الموجية صغيرةً بما يكفي لتصدُر من أجزاء من الخشب كما لو كانت مصادر مُنفصلة؛ ومِن ثمَّ، يمكن أن يحدُث حينئذٍ تأثير النغمات مُشتَّتة المصدر.

(٣٦) أصداف البحر

كانت الأصداف تُستخدَم في الماضي كصافرات لتحذير السفن من أخطار الاصطدام بالصخور في الضباب الكثيف، أما اليوم، فيستخدمها الناس على نطاقٍ واسع كصافرات للاحتفال. كي تنفخ في الصدفة، لا بُدَّ أن تضغط شفتَيك على فتحة ضيِّقة تُصنَع من خلال كسر أو طحن طرف القشرة. لماذا تُصدِر الأصداف هذا الصوت العالي؟

إذا التقطت صدفةً كبيرة نسبيًّا من أحد الشواطئ ووضعتها بالقُرب من أذنٍ واحدة، لماذا تسمع صوتًا صادرًا منها يُشبِهُ صوت الأمواج التي تتكسَّر على الشاطئ؟

الجواب: يتضمَّن النفخ في الصَّدَفة مجموعتَين من الاهتزازات، فمن المُفترض أن تهتز شفتاك (تطنطن) بصورة أشبه بوتَر الجيتار، وإذا حدث تطابُق في الترددات، فإن اهتزازات شفتيك قد تُنشئ موجاتٍ صوتيةً مُهتزة داخل الصدفة. يمكنك أن تجعل شفتَيك تهتزَّان عن طريق النفخ عبرهما وهما مضغوطتان على الفتحة الموجودة في القشرة. إذا فعلتَ ذلك بدقَّة، تهتزُّ الشفتان في عدة تردُّدات في وقتٍ واحدٍ في سلسلة من القِيَم تُعرَف باسم «السلسلة التوافقية». في واحدة من مجموعات القياسات كان التردد الأدنى المعروف

باسم «التردد الأساسي» يساوي ٤٧٫٥ هرتز، بينما كانت الترددات الأعلى تساوي ناتج مضاعفات الأعداد الصحيحة لهذه القيمة: ٢ × ٤٧٫٥ = ٩٥ هرتز، ٣ × ٤٧٫٥ = ١٤٢٫٥ هرتز، إلخ.

تُنشئ اهتزازات الشفتَين موجاتٍ صوتية داخل الصَّدَفة لها نفس ترددات اهتزازات الشفتَين. تلغي معظم الموجات الصوتية بعضها بعضًا، ولكن يمكن في واحد من التردُّدات الرنانة للصَّدَفة أن يُعزِّز بعضها بعضًا لتكوين موجة صوتية قوية (عالية). كان التردد الرنَّان الأقل للقشرة في التجربة هو ٣٣٢٫٥ هرتز.

نجح نافخُ الصَّدَفة في أن يجعلها تُصدر صوتًا مسموعًا، وذلك لأن التردُّد السابع في السلسلة التوافقية لاهتزازات الشفتَين كان ٣٣٫٥ هرتز. ومِن ثَم، فقد أحدثت اهتزازات الشفتَين بهذا التردُّد رنينًا داخل الصدفة بنفس التردُّد، فصار يمكن لأيِّ شخصٍ آخر سماع الصوت الصادر عن الصدَفة.

يمكن أن تُحدِث الضوضاء المُحيطة رنينًا أيضًا داخل الصدَفة. وإذا وضعتَ الصدَفة بالقُرب من إحدى أذنيك، فستتمكن من سماع بعض الترددات الرنانة. الصوت الذي تسمعه من القشرة سيكون غير ثابتٍ على الأرجح؛ لأن الضوضاء المُحيطة التي تنتجه غير ثابتة هي الأخرى. وإذا أردتَ فَهْم هذا الصوت المتقلب، واضعًا في الاعتبار أنك تضع على أذنك صدَفةً بَحْرية، فقد تتخيل بسهولة أن الصوت الذي تسمعه هو صوت الأمواج المتكسِّرة.

يُشبِهُ بركان سترومبولي في إيطاليا الصَّدَفة من حيث إن الرياح المتقلبة التي تمر عبر قنواته يمكن أن تُحدِث رنينًا داخل هذه القنوات، وهو ما يجعل البركان يُصدِر أصواتًا ذات حِدَّة مُتقلبة.

(٣٧) صوت آلة الديدجيريدو

تصدر آلة الديدجيريدو، وهي آلة موسيقية تقليدية يستخدمها سكَّان أستراليا الأصليين، صوت أزيز مُستمرًّا نسبيًّا حينما تُعزَف. وهي ببساطة عبارة عن غُصن شجرة طويل مجوف من الداخل على شكل أنبوب يمتدُّ من بداية الغُصن لنهايته حفرَه النمل الأبيض. يمكنك العزف على الغصن من خلال ضغط شفتيك على أحد طرفَي الأنبوب، ثم النفخ بطريقةٍ معينة، ومع ذلك يعتبر إصدار صوتٍ عالٍ وثابتٍ إلى حدٍّ ما أمرًا صعبًا للغاية، حتى بالنسبة لعازفي آلات النفخ النحاسية المُخضرَمين. كيف تُصدِر آلة الديدجيريدو الصوت؟

الجواب: الفرق الأساسي بين عزف آلة الديدجيريدو وآلة نفخ نحاسية هو أنه في حالة الأولى، لا بُدَّ أن تُحدِث رنينًا قويًّا في قناتك الصوتية (التجويف المُشترك للفم والأنف والجزء العلوي من الحلق). وهو ما يعني أنك لا بُدَّ أن تُحدِث موجاتٍ صوتية في القناة الصوتية يُعزِّز بعضها بعضًا لإنتاج موجة صوتية قوية، ثم تسمح لبعض من هذا الصوت بالتسرُّب داخل آلة الديدجيريدو بطريقتَين: الأولى هي السماح باستمرار لرنين القناة الصوتية أن يهُزَّ شفتَيك، وسيُحدِث جزء الشفتين الذي داخل الأنبوب اهتزازاتٍ للهواء في تلك المنطقة. أما الطريقة الثانية، فهي فتح شفتيك بشكلٍ متكررٍ لتسمح بخروج دفقةٍ من الصوت من قناتك الصوتية إلى الأنبوب. يمكنك تغيير الصوت الذي تُصدره الديدجيريدو من خلال تغيير الرنين داخل قناتك الصوتية وهو ما يتمُّ إما عن طريق تغيير اهتزازات أحبالك الصوتية في الحنجرة، أو بتحريك وضْع لسانك لتغيير شكل القناة الصوتية. في الواقع، ما تفعله للعزف هو مزيجٌ من الغناء أو الدندنة أو الأَزِّ داخل أنبوب الديدجيريدو، وهو ما لا تفعله أثناء العزف على آلةٍ من آلات النفخ النحاسية.

(٣٨) زمير الصوامع

إذا فُرِّغَت الحبوب من صومعة التخزين، لماذا يمكن أن تهتزَّ الصومعة، ما يُطلق عليها اسم «اهتزاز الصومعة» أو تُصدِر أصواتًا يُطلَق عليها «زمير الصوامع» الذي يُشبه الصوت المُتكرر لزمير بوق الشاحنات؟ (تهتزُّ بعض الصوامع ولا تصدر زميرًا، والأخرى تُصدِر زميرًا ولا تهتز، والبعض الآخر لا يهتزُّ ولا يُصدِر زميرًا أو يصنع الشيئَين معًا.) يتسبَّب صوت زمير الصومعة في الإزعاج فقط، أما اهتزاز الصومعة فقد يؤدِّي إلى انهيارها.

الجواب: على الرغم من أنَّ عملية تدفُّق الحبوب من الجزء السُّفلي للصومعة قد تكون مُتواصلة، إلا أنَّ هبوط الحبوب داخل الصومعة يكون مُتقطعًا. قد يكون هناك العديد من الأسباب وراء هذه الحركة المُتقطعة، أولها التشكل والانهيار المُتكرِّر للتِّلال التي تُكوِّنها الحبوب. ومع ذلك، يبدو أنَّ السبب الرئيسي هو التصاق الحبوب على طول الجدار الداخلي للصومعة ثم انزلاقها بشكلٍ مُتقطِّع. يتسبَّب هذا التغيُّر في عملية نزول الحبوب في اهتزازها، وهو ما يتسبَّب بدَوره في اهتزاز الجدار. تعمل جدران الصومعة بمنزلة ألواحٍ عملاقة لإنتاج وبثِّ الموجات الصوتية في الهواء. تكون الاهتزازات قوية بما يكفي في بعض الأحيان، فتتسبَّب في انهيار الصومعة.

في بعض الصوامع، قد تتسبَّب الاهتزازات أيضًا في إحداث رنين صوتي في عمود الهواء الذي يقع فوق الحبوب؛ أي إن الموجات الصوتية ذات الأطوال الموجية الصحيحة اللازمة لتعزيز بعضها بعضًا تُنتج موجةً صوتيةً كبيرة وواضحة في هذا العمود الهوائي، وهو ما يُشبِه إلى حدٍّ ما الموجة الصوتية نفسها التي تنتج داخل أنابيب آلة الأرغن.

(٣٩) الأنابيب البلاستيكية المُموَّجة التي تُصدِر ألحانًا

تُباع الأنابيب البلاستيكية المُموَّجة كلعبة موسيقية. يُمسَك بطرف بالأنبوب، الذي قد يكون طوله حوالي متر تقريبًا ويُلَفُّ في الهواء بحركةٍ دائرية ضيِّقة، وهو ما يُسبِّب دوَران الطرف الآخر من الأنبوب في حركة دائرية أكبر. لا يسمع أي صوت عند لفِّ الأنبوب ببطءٍ في حركة دائرية، ولكن عند لفِّه بدرجةٍ أسرع نسبيًّا، يُصدِر الأنبوب صوتًا بتردُّد أعلى. قد تتمكن من إصدار أربعة أو خمسة تردُّدات عن طريق تعديل درجة سرعة لفِّ الأنبوب في الهواء. ولكن لماذا يُصدِر الأنبوب لحنًا؟

الجواب: مع تحرُّك طرف الأنبوب في دوائر كبيرة، يتدفَّق الهواء الداخلي فعليًّا إلى الخارج بطول الأنبوب. (يجعل جدار الأنبوب الهواء يدور، ولكن بما أنه لا يُوجَد ما يُبقي على حركة الهواء في دائرة، فإنه يتدفَّق إلى الخارج بطول الأنبوب.) بينما يغادر الهواء طرف الأنبوب البعيد، يتدفَّق هواءٌ جديدٌ عبْر الطرف القريب، ومِن ثَمَّ يستمر تدفُّق تيار لا ينقطع من الهواء عبْر الأنبوب.

إذا كان تدفُّق الهواء سريعًا بما يكفي، تمنع الحواف الداخلية للأنبوب الموج التدفق السلِس للهواء، وهو ما يُحدِث اضطرابًا في تيار الهواء — أي اختلافات في ضغط الهواء. تحدث هذه الاختلافات في ضغط الهواء بتردُّدات ضمن نطاقٍ مُعين تُحدده سرعة تدفق التيار والمساحات التي تفصل بين نتوءات الأنبوب، إذا طابق تردُّدٌ ضمن هذا النطاق أحد «التردُّدات الرنانة» للأنبوب، فينتُج عن ذلك «رنين» داخل الأنبوب؛ أي إنَّ الموجات الصوتية في ذلك التردُّد يُعزِّز بعضها بعضًا وتكوِّن موجةً صوتية قوية. يتسرَّب جزء من هذه الموجة الصوتية من الطرف المفتوح ويصير من المُمكن سماعُها. يؤدي الدوَران الأسرع؛ ومِن ثمَّ تدفُّق الهواء عبر الأنبوب بصورةٍ أسرع إلى تغيير النطاق التردُّدي للاضطراب إلى قِيَمٍ أعلى. وهكذا، سيطابق تردُّدٌ ضِمن هذا النطاق الجديد الأعلى أحدَ التردُّدات الرنانة الأعلى للأنبوب؛ ومِن ثمَّ ستسمع صوتًا ذا تردُّدٍ أعلى.

قد لا تُصدِر اللعبة أدنى تردُّدٍ مُمكن لأن تدفُّق الهواء عبْر الأنبوب في حالة الدَّوَران البطيء يكون بدَوره بطيئًا للغاية بما يمنع إنتاج اضطراب. يكون أقل تردُّد رنَّان يمكن سماعه هو التردُّد التوافُقي الثاني (أو ما يُعرف كذلك بالتآلُف الأول).

يمكنك أن تجعل أنبوبًا بلاستيكيًّا مُموَّجًا يُصدِر «لحنًا» إذا أمسكتَ به خارج نافذة السيارة أثناء سَيرِها (ولكن لا تفعل ذلك أثناء القيادة). أمسِك بطرف الأنبوب في اتِّجاه الهواء القادم، بحيث يدخل الهواء عبْر الأنبوب وشاهد ما سيحدُث.

(٤٠) الأصوات التي تصدُر من كوب القهوة

صُبَّ الماء الساخن في كوب القهوة، ثم انقُر بمفصل إصبعك إما على قاع السطح الخارجي للكوب، أو انقُر القاع الداخلي بملعقة أثناء التقليب، ولاحظ التردُّد. ثم أضِف مسحوقًا، مسحوق القهوة سريعة الذَّوبان على سبيل المثال، وانقُر مرةً أخرى، ستجد أن التردُّد الآن أقل بكثير، ولكنه يُعاود الارتفاع مرةً أخرى إلى قيمته الأصلية في غضون بضع دقائق. لماذا انخفض التردُّد؟ ولماذا عاود الارتفاع مرة أخرى؟

الجواب: حينما تنقُر على الكوب بملعقة، فأنت تُحدِث اهتزازًا في جدران الكوب عند تردُّدٍ مُعين، وتُحدِث بذلك موجاتٍ صوتية مؤقتة داخل عمود الماء. ما يهمُّنا هنا هو التأثير الثاني، أما التأثير الأول فيقلُّ حينما تنقُر على قاع الكوب بمفصل إصبعك أو بأيِّ أداة رقيقة أخرى. من بين كلِّ المَوجات الصوتية التي تُنتِجها، يكون لدى بعضها الطول الموجي الملائم بحيث يتوافَق داخل عمود الماء بين القاع المُغلَق والقمَّة المفتوحة، ويُشكل ما يُسمَّى «الرنين». يُعزز هذه الموجات الصوتية بعضها بعضًا، وهو ما ينتُج عنه تكوين موجة صوتية كبيرة وواضحة. يتسرَّب بعض الصوت من الماء ويصير مسموعًا، ويُقال إن التردد الناتج هو تردد رنَّان لكوب الماء.

يعتمد هذا التردُّد الرنَّان على ارتفاع عمود الماء، وكذا على سرعة الصوت في الماء. تعتمد سرعة الصوت في أيِّ مادة على كثافة هذه المادة وعلى درجة انضغاطها. عادة ما تتسبَّب الكثافة الأكبر في سرعةٍ أكبر، أما المواد شديدة الانضغاط، فعادة ما تتسبَّب في سرعة أبطأ. تبلغ سرعة الصوت في الماء حوالي ١٤٧٠ مترًا في الثانية.

عندما يُضاف مسحوق القهوة إلى الماء، تتشكَّل فقَّاعات هواء على حُبيبات المسحوق (يكون الهواء ذائبًا بالفعل في الماء أو يلتصِق بالحُبيبات بينما يمتزِج المسحوق بالماء). لا تشغل الفقاعات حيزًا كبيرًا (لن تجد سطح الماء يرتفع عند جانبي الكوب)؛ ومِن ثَمَّ

لا تُغير كثافة الماء كثيرًا. ومع ذلك، تُسبِّب الفقاعات زيادةً كبيرة في الانضغاط؛ ومِن ثَمَّ تُقلِّل من سرعة الصوت في الماء، وهو ما يُقلِّل بدَوره التردُّد الرنَّان. ومِن ثَمَّ، فالتردُّد الذي تسمعه يقلُّ عندما يُضاف المسحوق.

ولأن معظم الفقاعات يرتفع إلى أعلى، فإنها تصل تدريجيًّا إلى سطح الماء ثم تنفجر، وكلما قلَّ عددُها، ازداد التردُّد حتى يعود إلى قيمته الأصلية قبل أن يضاف المسحوق. نظرًا لأن أفضل رسالة كُتبَت في هذا الموضوع كانت تتناول مشروب الشوكولاتة الساخنة بدلًا من القهوة، فقد عُرف هذا التغيُّر في التردد باسم «تأثير الشوكولاتة الساخنة». يمكن أن يؤدي صبُّ الملح أو تحريكه في كأسٍ من الجعة إلى إحداث تأثير الشوكولاتة الساخنة، إلا أنك لن تتمكن من سماعه إذا لم تتخلَّص من الرغوة التي تُغطِّي سطح الجعة أولًا. (كما أن وضع الملح في الجعة أمرٌ غير منطقي إطلاقًا.)

(٤١) رنين الزجاجة

إذا قُمتَ بالنفخ عبْر الفتحة الضيقة لفوَّهة الزجاجة (سواءً كانت زجاجة مشروب غازي أو كحولي)، فستجعلها تُصدِر صوتًا. في الواقع، يمكنك أن تُصدِر لحنًا باستخدام مجموعة متنوعة من الزجاجات بها مستويات مختلفة من السوائل بداخلها، فما الذي يُنتج هذا الصوت؟

الجواب: عندما تقوم بالنفخ عبْر فُوَّهة الزجاجة المفتوحة، يحدُث اضطراب في الهواء المُتحرك، ويحمل هذا الاضطراب اختلافاتٍ في الضغط في نطاقٍ واسعٍ من التردُّدات. المطلوب هو أن تطابق إحدى هذه التردُّدات تردُّدًا رنَّانًا داخل الزجاجة؛ أي إنَّ المطلوب هو إحداث اهتزازاتٍ في الهواء الموجود داخل الزجاجة يُعزِّز بعد ذلك بعضها بعضًا لتُشكِّل موجةً صوتية قوية. إذا حدث هذا التطابُق في التردُّدات وحدثت موجة داخلية قوية، فسيتسرَّب جزء من الصوت خارج الزجاجة ويمكن سماعه.

ومع ذلك، لا تشبه الاهتزازات داخل الزجاجة تلك الاهتزازات التي يمكن أن نُحدِثها في أنبوب بسيط، الفرق هو أنَّ الزجاجة لها عُنق (سدادة هواء) والهواء الموجود بداخل باقي الزجاجة يُكَوِّنُ ما يُعرف باسم «رنان هلمهولتز». رياضيًّا، تُشبِه اهتزازات رنَّان هلمهولتز اهتزاز قالبِ طوبٍ موضوع عند طرف زُنبرك. تعمل سدَّادة الهواء في هذه الحالة مثل كتلة القالب، بينما يعمل باقي الهواء الموجود داخل الزجاجة مثل الزنبرك. في آلية العمل العادية للزنبرك والقالب، يضغط القالب الزنبرك ويُمدِّده بشكلٍ متكررٍ يجتاز

فيه نقطة المنتصف دائمًا؛ ومِن ثمَّ يستمرُّ في الاهتزاز. أما في حالة الزجاجة، فتتسبَّب كتلة سدَّادة الهواء في أن يخضع باقي الهواء الموجود داخل الزجاجة للانضغاط والتمدُّد المُتكرر بصورةٍ يتجاوز فيها حدَّ التوازن؛ ومِن ثمَّ يستمرُّ في الاهتزاز.

ستهتزُّ أي زجاجة (بها سدَّادة هواء وتيَّار من الهواء) بقوة عند تردُّدٍ مُعيَّن، وإذا كان هذا التردُّد مُتوفِّرًا في الاضطراب الذي يحدث عند فوَّهة الزجاجة، ستنشأ موجة صوتية قوية داخل الزجاجة. إذا قمتَ بتقليل حجم الهواء داخل الزجاجة عن طريق ملئها بالسائل جزئيًّا، فستزيد من التردُّد الذي ستهتزُّ عنده الزجاجة.

تُعرف بعض الكهوف جيدًا بالرياح القوية التي تمرُّ عبرها، خاصة بالقُرب من مداخلها. نظرًا لأنَّ الرياح تعكس اتجاهها أثناء النهار، يُقال بأنَّ الكهف «يتنفَّس»؛ وهو ما يُعتبَر مثالًا آخر على رنان هلمهولتز. تُحدِث الاختلافات الخارجية في الرياح والهواء اضطرابًا، إذ يعمل الهواء الموجود في الفتحة الضيقة للكهف مثل كتلة سدَّادة الهواء، بينما يعمل الهواء الموجود في باقي الكهف مثل الزنبرك. يكون تردُّد الاهتزاز مُنخفضًا جدًّا بحيث لا يُسمَع (من ٠٫٠٠١ إلى ١ هرتز)، ولكن يمكنك الشعور بتدفُّق الهواء (الرياح) الناتجة من الاهتزازات.

(٤٢) صوت احتكاك الأصابع بالسبورة

لماذا تُصدر الأبواب صريرًا؟ لماذا تُصدر الأظافر صوتَ صريرٍ مزعجٍ إذا احتكَّت بسرعة بطول سبورة؟ ولماذا تُصدر إطارات السيارات صريرًا حينما تُشَغَّلُ السيارة بعد فترة من الركود؟

الجواب: هذه ثلاثة أمثلة فقط ضمن عديد من الأمثلة الأخرى لما يُسمَّى بتأثيرات «التلاصُق والتحرُّر». يتحرك سطحان في مقابلة أحدهما الآخر ويُجبرا على الاحتكاك. قد يتحركان بسلاسةٍ في بعض الأحيان، خاصة إذا كانا قد زُيِّتا، ومع ذلك، في بعض الحالات يلتصق أحدهما بالآخر أولًا ويلتحِمان معًا، ثم يَمُدُّ أحدهما الآخر، ثم يتحرَّران أخيرًا. بعد التحرُّر مباشرة يمكن أن تهتزَّ أجزاء من السطح بعد التحرُّر مباشرة وتُصدِر موجةً صوتيةً مسموعةً. قد تُحدِث الحركة في هذه الأجزاء اهتزازاتٍ أيضًا في منطقة أكبر، والتي تعمل بدَورها كمِرنان يجعل الصوت أعلى.

على سبيل المثال، حينما يحتكُّ ظفر إصبع بطول سبورة، يلتصق الظفر بالسطح أولًا وينثني، ثم يتحرَّر فجأة وينزلق عليها، فيهتزُّ ويطرق سطح السبورة. الصوت الصادر

الذي تسمعه ينتج من كلٍّ من نقْر ظفر الإصبع، ومن الاهتزازات التي يُحدثها النقر في السبورة والتي تعمل وكأنها مرنان. تصِل حركة الظفر إلى ذروتها عند الطرف الخارجي، وإلى أدناها (صفر) عند الاتجاه المعاكس، وهو ما يُشبه إلى حدٍّ كبير حركة اهتزاز الشجرة بفعل الرياح القوية. ومثل الشجرة أيضًا، يَعتمد تردُّد الاهتزاز عكسيًّا على طول الظفر، وبما أن الظفر قصير، يكون التردُّد الصادر عاليَ التردُّد، وهذه هي أحد الأسباب التي تجعل الصوت مُثيرًا للأعصاب.

يمكن أن تُصدِر مفصلات الباب الصدئة صريرًا إذا تعرَّضت الأجزاء التي يحتكُّ بعضها ببعض إلى التلاصُق والتحرُّر بصورة متكررة. ولكنك قد تقضي على أيِّ فرصةٍ للالتصاق إذا أدرتَ الباب سريعًا؛ ومِن ثم ستقضي أيضًا على عملية الالتصاق والتحرُّر وصوت الصرير.

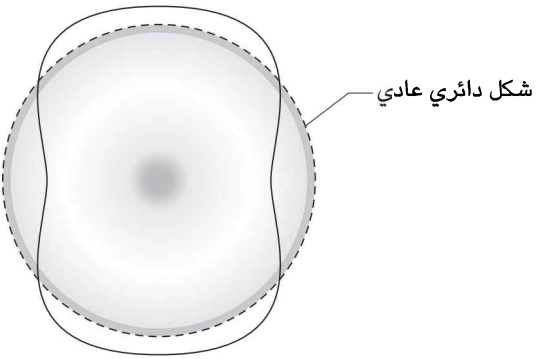
تتعرَّض الإطارات التي تنحدِر فوق الأرصفة الجافَّة إلى عملية التلاصُق والتحرُّر، وهو ما يجعل الإطارات تهتز وتُصدر صوتًا. في الواقع، هذا الصوت المميز هو ما يلاقي إعجاب الناس في سباقات السيارات التي تُقام في الشوارع. ستُصدر كذلك الإطارات صريرًا إذا ضغطت المكابح بعنف وتوقفت فجأة، دون تدخُّل أي نظام مكابح أوتوماتيكي، ولكن الصوت الذي يصدُر في هذه الحالة لا يكون محلَّ إعجاب.

إذا أنصتَّ جيدًا، فستجد المئات من الأمثلة الأخرى للصوت الذي يصدُر عن طريق عملية التلاصُق والتحرُّر.

(٤٣) حك كئوس الخمر

إذا حككتَ إصبعا مُبتلًّا حول حافة كأس من كئوس الخمر أو أيٍّ من أنواع كئوس الشراب العديدة، ستتمكَّن من جعلها تُصدِر صوتًا، فما الذي يُنتج هذ الصوت؟

الجواب: عندما تحكُّ إصبعك على حافة الكأس، يخضع كليهما لعملية التلاصُق والتحرُّر. تُسحَب الحافة قليلًا أثناء مرحلة الالتصاق في اتجاه حركة إصبعك، ما يؤدي بدَوره إلى تشويه شكل الحافة. أما أثناء مرحلة التحرُّر، فتتحرَّر الحافة من إصبعك وتُحاول استعادة شكلها الأصلي، ولكن ينتهي بها الحال وهي تهتز. يُطلَق على أقوى اهتزاز اسم «الرنين»، وفيه تهتزُّ الحافة كما هو مُبيَّن بالصورة الفوقية المعروضة في شكل ٣-٤. يتبع هذا النمَط من الاهتزازات إصبعك حول الحافة وينتج صوتًا نابضًا (يعلو ويخفُت بتردُّدٍ يبلغ بضعة هرتزات، تبعًا لسرعة الإصبع على الحافة). يتناسَب



شكل ٣-٤: بند ٣-٤٣ و٣-٤٤: صورة فوقية مُكبرة لحافة كأس خمر مُهتزَّة.

التردُّد الذي تدفع به الحافة الهواء والتردُّد الذي تسمعه طرديًّا بالتقريب مع سُمك الحافة، ويتناسب عكسيًّا مع مربع نصف قطر الكأس عند الطرف المفتوح. ومن ثم، عادة ما يكون التردُّد أعلى لو كانت الحافة أسمك ونصف القُطر أصغر. إذا أضفتَ سائلًا إلى الكأس، فإنك بذلك تخفض التردُّد الرنَّان؛ لأن كتلة السائل تُقلِّل من المعدل الذي يمكن أن تهتزَّ به جدران الكأس.

يبرَعُ بعض الموسيقيين في عزف الموسيقى على صفٍّ من الكئوس التي تحتوي على مستويات مختلفة من السوائل (يسمح ضبط مستوى السائل بضبط اللحن الذي يُصدره الكأس). توسَّع المخترع ورجل الدولة الأمريكي الشهير بنجامين فرانكلين في فكرة كئوس الخمر التي تُصدِر ألحانًا من خلال بناء آلة الهارمونيكا الزجاجية. تتكوَّن هذه الآلة، التي أصبحت شائعة إلى حدٍّ ما، من حواف زجاجية مُثبَّتة أفقيًّا على عمود دوران. رُتِّبت الحواف بصورة متدرجة في القُطر، بحيث تكون أكبرها قطرًا تقع إلى اليسار حتى يُصبح عزف النغمات على الكئوس ممكنًا وهي تُدار عن طريق دوَّاسة تُحرَّك بالقدم، بينما يضغط العازف أصابعه المُبتلة على الحواف ويحكُّها أثناء دوَرانها.

يمكن جعل أدوات غريبة أخرى أن تُصدِر ألحانًا حينما تُحَكُّ وتهتز، وتُعتبَر آنية نفث الماء الصينية المصنوعة من النحاس واحدة من أشدِّ هذه الآلات سحرًا. حينما تكون

الآنية ممتلئة بالماء جزئيًّا وتُحَكُّ مقابضها بيدَين جافَّتَين، تهتزُّ الآنية بقوة لدرجة أنها يمكن أن تقذف بقطراتٍ كبيرة من الماء إلى أعلى بارتفاع نصف متر.

(٤٤) تحطيم كئوس الخمر باستخدام صوت الإنسان

هل يمكن لمُغَنٍّ مُحترفٍ أن يحطم كأسًا من الخمر أو أيَّ حاوية زجاجية أخرى ببساطة من خلال الغناء، كما تُصَوِّر الرسوم المُتحركة والاسكتشات الكوميدية والإعلانات؟

الجواب: يمكن تحطيم كأس خمر إذا تعرَّض لصوتٍ ذي حدة شديدة بتردد يُطابق أدنى «تردُّداته الرنانة» — أي أدنى تردٍ يهتز عنده الكأس إذا طُرِقَ. تهتزُّ الحافة عند هذا التردد بالنمط المُبيَّن بشكل ٣-٤. مع تراكم الاهتزازات، يمكن أن يتصدَّع الكأس، إما عند نقطة بها عَيب صنْع لا يُرى بالعين المجردة، أو بالقرب من مكان الحد الأقصى للاهتزاز. تتسبَّب الحركة المُتكررة عند المنطقة المعيبة بتوسيع الصدع، وتسمح له بالتفرُّع عبْر الحافة، وعندئذٍ يتحطم الكأس سريعًا. ولكن لحدوث كل ذلك، يجب أن يتعرَّض الكأس للصوت الحاد لبضع ثوانٍ.

ومع ذلك، عند القيام بذلك باستخدام صوتٍ بشريٍّ غير مُضخم يصبح الأمر مستحيلًا؛ لأنه لا يمكن الحفاظ على تردٍ ثابتٍ لعدة ثوان. في الواقع، فشلت التجارب التي غنى فيها المطربون دون تضخيم أصواتهم في كسر كئوس الخمر.

(٤٥) خرير جداول الماء وهدير المطر

ما هو مصدر خرير جداول الماء وصوت تساقط قطرات المطر على بِركة ماء؟

الجواب: يرجع صوت ارتطام الماء بالماء، سواءً في بِركة ماء أو شلال أو في هطول الأمطار إلى آليتَين أساسيَّتَين: يُسبب الارتطام نفسه اختلافات في ضغط الهواء تنتقل من هذا الارتطام على هيئة موجات صوتية نسمعها كنبضٍ صاخب (قصير). غالبًا ما يَحبِس الارتطام أيضًا الهواء في الماء كفقاعات تُوَلِّدُ بعد ذلك الصوت عندما يهتزُّ حجمها؛ أي إنها تزيد وتنقص في الحجم مما يؤدي إلى اختلافات في الضغط تسري عبر الماء ثم تخرج إلى الهواء. وأخيرًا، تسقط فقاعات الهواء أو تنفجر على سطح الماء، وهو ما يُصاحبه صوت تناثُرٍ خافت.

إذا ارتطمت قطرة من المطر أو من شلال ماء بسطحٍ صلب، مثل صخرة أو رصيف، ستسمع ضوضاء الارتطام فقط؛ لأنه لا تُوجَد أيُّ فقاعات هواء قد تكوَّنت أو حُبِسَت. في

المرة القادمة حينما تكون بالقُرب من أيِّ رصيف عندما يبدأ هطول الأمطار، راقِب ما إذا كنتَ ستتمكن من تمييز التغيُّر في الصوت بين أصوات الارتطام الأولى (التي ترتطم فيها قطرات الماء بالرصيف الجاف)، وأصوات الارتطام اللاحقة (التي ترتطم فيها قطرات الماء ببرك المياه المُتجمِّعة على الرصيف).

(٤٦) صوت رنين الفناجين والبرطمانات

لماذا يزداد تردُّد الضوضاء التي تسمعها أثناء صبِّك للماء في حاويةٍ متساوية الجدران، مثل كوب شُرب زجاجي أو برطمان أو فنجان؟

الجواب: يعمل عمود الهواء الموجود داخل الحاوية (بداية من فوَّهتها حتى سطح السائل أو قاع الحاوية نفسها) عمل أنبوب ذي طرفٍ واحدٍ مفتوح. تُصدِر الضوضاء الناجمة عن تناثُر الماء (انظر العنصر السابق) صوتًا عبْر نطاق واسع جدًّا من الترددات. يطابق واحد من هذه الترددات أدنى تردُّدٍ رنان لعمود الهواء داخل الحاوية؛ أي أن اختلافات الضغط في هذا التردد تُحدِث أصواتًا داخل عمود الهواء يُعزز بعضها بعضًا لإنتاج موجة صوتية قوية وواضحة. ما تسمعه هو جزء من الصوت الذي يغادر عمود الهواء، ويَحدُث هذا الصوت في المقام الأول عند التردُّد الرنان (كما أنك تسمع أيضًا ضوضاء خافتة تأتي مباشرة من تناثُر الماء).

يتناسب التردُّد الرنان لعمود الهواء عكسيًّا مع طول عمود الهواء. لذا، بينما تمتلئ الحاوية ويقلُّ طول عمود الهواء، يزداد تردُّد الرنين. ويمكنك أن تعرِف من الصوت وحدَه متى تكون الحاوية قد شارفَتْ على الامتلاء.

(٤٧) صوت هدير الماء داخل المواسير

ما الذي يُسبب صوت الهدير الذي تسمعه أحيانًا آتيًا من مواسير المياه عند فتح الصنبور؟

الجواب: عادةً ما يرجع صوت الهدير الذي يصدُر من مواسير المياه إلى التدفُّق المُضطرب للمياه عبْر المواسير، خاصة عند المنعطفات والوصلات حيث لا بُدَّ أن يتغيَّر اتجاه تدفُّق الماء أو أن يدور حول العقبات التي تواجهه. يتكوَّن الاضطراب في الماء من دوَّامات تُنتِج تغيراتٍ في ضغط الهواء. يمكن أن ينخفض ضغط الماء أثناء هذه التغيرات بما يكفي بحيث تتكوَّن فقاعات هواء من الهواء المُذاب في الماء، وهي عملية تُعرَف باسم «التكهُّف».

يُرسِل الوجود المفاجئ للفقاعة واهتزازها، ثم انهيارها في نهاية المطاف، موجاتٍ عبْر الماء، وتهزُّ هذه الموجات المواسير، فتسمع صوت صلصلة. يمكنك التخلص من الضوضاء غالبًا من خلال تقليل تدفُّق المياه، بحيث يُصبح الاضطراب المُنتَج أقل.

(٤٨) صوت طقطقة مفاصل الأصابع

ما الذي يتسبَّب في الصوت الذي نسمعه عندما نُطقطق مفصل الإصبع؟ ولماذا يجب أن تنتظر بضع ثوانٍ حتى نطقطقه مرةً أخرى؟

الجواب: عندما تُطقطق مفصل الإصبع بأن تجذِبه إلى الخارج، فإنك توسِّع المسافة بين العظام التي تكوِّن المفصل، وكذا تقلص من عرض تجويف المفصل. يحتوي هذا التجويف أساسًا على طبقة رقيقة من «سائل زليلي» يفصل بين العظام. إذا شُدَّ الإصبع بقوة كافية، يمكن لجوانب التجويف أن تُطقطق إلى الخارج، مما يزيد من عرض التجويف ويُقلل من الضغط داخل السائل الزليلي. يسمح هذا الانخفاض المفاجئ في الضغط بتكوُّن فقاعة أو اثنتين من الغاز، غاز ثاني أكسيد الكربون في المقام الأول، الذي يذوب في السائل. يُرسِل الظهور المفاجئ للفقاعات، الذي يُسمَّى بـ «التكهُّف»، نبضة ضاغطة عبْر السائل وتجويف المفصل، ثم إلى الهواء الخارجي؛ وحينما تصل النبضة إلى أذنك، تسمع صوت طقطقة. لتكرار هذه العملية، يجب أن تنتظر من خمس عشرة إلى ثلاثين دقيقة حتى يستعيد التجويف شكله الأوَّلِي ويُضْغَط السائل الزليلي ويصبح طبقة رقيقة بين العظام مرة أخرى، ويذوب الغاز مرة ثانية في السائل. وحتى ذلك الحين، عليك البحث عن عادة سيئة أخرى لتُزعج بها المُحيطين بك.

(٤٩) أصوات كوروتكوف

تتمُّ الطريقة التقليدية لقياس ضغط الدم عن طريق نفخ الحزام المطاطي لجهاز قياس الضغط ولفِّه حول الذراع، ثم الانصات عبْر سماعة الطبيب أثناء انخفاض ضغط الحزام المطاطي على الذراع تدريجيًّا وعودة الدم للتدفُّق مرة أخرى. يُسجِّل المُختص ضغط الدم حينما يسمع أصواتًا مُعينة تُعرَف باسم أصوات كوروتكوف، من خلال سماعة الطبيب. عندما يَسمَع الصوت الأول، يُسَجِّلُ الرقم المُرتفع لضغط الدم (الضغط الانقباضي) وعندما يَسمَع آخر صوت، يُسَجِّلُ الرقم المنخفض لضغط الدم (الضغط الانبساطي)، فما الذي يُسبِّب هذه الأصوات؟

الجواب: على الرغم من أن أصوات كوروتكوف قد دُرِسَت على مدار مائة عامٍ تقريبًا، إلا أن مصدرها لا يزال مصدرًا للجدال. إليك تفسيرين لهذا الأمر:

انفتاح الشريان: حينما ينخفض ضغط الحزام المطاطي المنفوخ حتى يصل إلى المستوى الانقباضي للدم، يبدأ الدم في التدفُّق من أسفل الحزام كالنافورة إلى أسفل الذراع، وهو ما يفتح الشريان الذي كان قد انكمش بدوره عندما قطع الحزام المنفوخ تدفق الدم. يرسل هذا الانفتاح الشرياني موجةً صوتيةً عبْر الذراع تُسمع من خلال السماعة على هيئة نقرة، وبينما يستمر الضغط داخل الحزام المطاطي في الانخفاض، يخفُت الصوت الذي يصدر مع كل دفقة دم، ثم يختفي بمجرد أن يصِل ضغط الحزام إلى المستوى الانبساطي لضغط الدم. ومِن ثَمَّ وهكذا، يُسجل المُختصُّ ضغط الدم عندما يَسمَع النقرة الأولى لضغط الدم الانقباضي، وضغط الحزام المطاطي عند سماع الصوت المكتوم لضغط الدم الانبساطي.

التكهُّف: عندما يبدأ الدم في التدفُّق من أسفل الحزام كالنافورة إلى أسفل الذراع ويفتح الشريان المُنكمش على آخره، يتسبَّب الانخفاض المُفاجئ في الضغط عند قمَّة تدفُّق الدم في خروج الغاز (الأكسجين والنيتروجين وثاني أكسيد الكربون أساسًا) من حالة الذوبان ويتجمَّع على هيئة فقاعات. عندما تنفجر الفقاعة بعد فترةٍ وجيزة، ويتدفَّق الدم فجأة ليملأ المساحة التي كانت تشغلها، ترسل الحركة المفاجئة للدم موجةً صوتية عبْر الدم والذراع. يُعرَف هذا الصوت، أو بالأصحِّ صوت انهيار الفقاعات الذي يحدُث بعد كلِّ تدفق للدم إلى أسفل الذراع مباشرة، باسم صوت كوروتكوف. تستمر عملية توليد الصوت هذه حتى يُصبح ضغط الحزام المطاطي عند المستوى الانبساطي لضغط الدم، وعندئذٍ لا يندفع الدم إلى أسفل الذراع كالنافورة بعد ذلك.

(٥٠) الهجوم الفتَّاك للروبيان القاذف

تعجُّ المُحيطات بالأصوات المختلفة، وفي بعض الأماكن، تُصدر مستعمرات الروبيان أصواتًا صاخبة قد تستخدمها أيُّ غواصة في تفادي السونار من خلال الاختباء بالقُرب من أيٍّ من هذه المُستعمرات. يحدُث الصوت الذي يصدر من الروبيان القاذف (Alpheus heterochaelis) عندما يُهاجم فريسته باستخدام كَلَّابِه الضخم (الذي يكون أكبر من كَلَّابِه الآخر بكثير). ومن المُثير للدهشة، أنه لا يُطبِق كَلَّابِه على الفريسة، بل بالقُرب

منها، وعلى الرغم من ذلك، تتسبَّب هذه الحركة في صعْق الفريسة أو قتلها، وعندئذٍ يمكن للروبيان أن يلتقطها بكَلَّابِه الأصغر ليأكلها. يهاجم روبيان السرعوف (Odontodactylus scyllarus) فريسته أيضًا دون الإطباق عليها، ولكنه يضرب زائدة تغذية نحوَها بغتةً بدلًا من ذلك. ولكن ما الذي يصعق الفريسة أو يقتلها في هذَين النوعَين من الهجوم؟

الجواب: عندما يُطبق الروبيان جانبي كَلَّابِه أحدهما نحوَ الآخر، فإنهما ينفُثا دفقةً من الماء بسرعة تجعل الماء يمرُّ بعملية التكهُّف؛ أي إن الهواء المُذاب يخرج من السائل ويُكَوِّن فقاعات. تنفجر تلك الفقاعات على الفور تقريبًا، وتُرسِل عبْر الماء نبضاتٍ صوتيةً مرتفعة بما يكفي لأن تصعق الاختلافات في الضغط التي تُحدِثها الفريسة أو تقتلها. أما الصوت المسموع الذي يصدر من الروبيان القاذف، فهو عبارة عن صوت الانهيار الصادر من الفقاعات، وليس صوت جانبَي كَلَّابِه وهما يُطبِقان أحدهما على الآخر.

تكون اختلافات الضغط الناجمة عن انهيار الفقاعات شديدة للغاية لدرجة أنها قد ينتج عنها وَمْضة من الضوء فيما يُعرَف عمومًا باسم «الضيائية الصوتية» (الضوء الناتج عن الصوت). ومع ذلك، فقد أُطلِق على عملية إنتاج الضوء التي يتسبَّب فيها الروبيان اسم «الضيائية الروبيانية» (الضوء الناتج عن الروبيان). يظهر الضوء نتيجة لأن انهيار الفقاعة بسرعة كبيرة يُسَخِّن الهواء الموجود بداخلها، مما يؤدي إلى تأيُّن جزيئات الهواء في الإلكترونات والأيونات المُوجَبة. تهبط الإلكترونات على الفور تقريبًا داخل الجزيئات وتفقد طاقتها (لا بُدَّ أن تفقد طاقتها حتى تتمكن من الدخول مرة أخرى) عن طريق إطلاق الضوء. تكون عملية انبعاث الضوء الناجمة عن انهيار فقاعة (أو عدد كبير من الفقاعات) قصيرة للغاية ويكون الضوء الناتج خافتًا بشدَّة بحيث لا تراه بالعَين المُجردة، فهو ببساطة نتيجة ثانوية لعملية التكهف.

يُنتج الروبيان القاذف أيضًا نبضات صوتية عبْر عملية التكهُّف، إلا أن الفقاعات تتكون نتيجة للحركة القاذفة لزائدة التغذية الخاصة به.

(٥١) صوت غليان الماء

ضع وعاءً من الماء على الموقد، ثم اسحَبْ كرسيًّا واجلِس لتستمع إلى صوت الماء أثناء تسخينه، ولتُشاهد ما يحدُث داخل الوعاء أيضًا. إنه أمر شائع حتى إنك قد لا تلاحظه، ولكنك قد تستخدمه لاشعوريًّا للاستدلال على غلَيان الماء تمامًا، فما الذي يُسبِّب هذا الصوت؟

الجواب: يبدأ الصوت الذي تسمعه صادرًا من الماء على صورة هسيس مُتقطِّع، ثم يصير هسيسًا مُستمرًّا. ينتج هذا الصوت من جرَّاء تكوُّن فقاعات الهواء في الشقوق (والخدوش) الموجودة بطول قاع الوعاء. تدفع زيادة درجة الحرارة في الشقِّ الهواء المُذاب إلى الخروج من السائل والدخول في فقاعات الهواء. تهتزُّ كلُّ فقاعة كلَّما تضخَّمت، وتُرسِل موجات صوتية عبْر الماء وجدران الوعاء؛ ومجموع الأصوات الناتج من هذه الفقاعات هو صوت الصفير الذي نسمعه. بمُجرَّد أن تتضخَّم الفُقَّاعات بما فيه الكفاية بحيث تصير قابلة للطفو في الماء وتتحرَّر من قاع الوعاء، ترتفع الفقاعات سريعًا إلى سطح الماء حيث تتفرقع مُسبِّبة تناثُرًا خافتًا.

مع استمرار درجة حرارة الماء في الارتفاع، يُدفَع معظم الهواء خارج السائل، ومِن ثَمَّ يقلُّ تكوُّن فقاعات الهواء ويخفُت صوت الصفير المصاحب لذلك تدريجيًّا. يُسمَعُ بعد ذلك صوتٌ أكثر وضوحًا، إذ يبدأ الماء في التبخُّر بطول قاع الوعاء، ويُكوِّن فقاعات من البخار في الشقوق. إلا أن تكون الفقاعة أو حتى تذبذبها ليس هو المصدر الرئيسي للصوت الذي تسمعه، بل انهيار الفقاعة حيث يُعاود البخار الذوَبان مرة أخرى فجأة، ويندفع الماء ليملأ المساحة التي كانت تشغلها الفقاعة، يرسل هذا الاندفاع «نقرة» عبْر الماء والوعاء ثم تنتقل إلى الهواء، وهو ما نسمعه بدَورنا.

عندما يسخن الماء بدرجة أكبر نسبيًّا، تصير فقاعات البخار كبيرة بما يكفي لتتحرَّر من القاع. ومع ذلك، فهي لا تصِل إلى سطح الماء؛ لأنَّ أثناء ارتفاعها من القاع المُفرط السخونة عبْر المياه الباردة نسبيًّا تنفجر وتُرسِل أصواتَ نقرٍ خشنة. يمكن أن تُحدِث هذه الموجات الصوتية رنينًا في الهواء الموجود فوق الماء مباشرة (الموجود بين سطح الماء وقمة الوعاء تقريبًا)، وفي الماء وفي جدران الوعاء؛ أي إن الموجات الصوتية التي يُعزِّز بعضها بعضًا تُنتِج موجات صوتية خالصة في هذه المناطق الثلاث، فتُوَلِّد موجاتٍ صوتية في الهواء يمكن سماعها. ينتج هذا المزيج من أصوات النقْر والرنين الصوتَ الخشن الذي يرتبط في دماغنا بالوصول الوشيك للماء إلى درجة الغليان.

مع استمرار ارتفاع درجة حرارة الماء وارتفاع درجات حرارة طبقات الماء العُليا، تصل فقاعات البخار في النهاية إلى سطح الماء دون أن تنهار، وهناك تنفجر مُحدثةً صوت تناثر خافت. يمكنك الاستدلال سمعيًّا على وصول الماء إلى حالة الغليان القصوى عندما يحلُّ صوت التناثر الناعم محلَّ الأصوات الخشنة التي كانت تُسمَع سابقًا، عندئذٍ يحين وقت صبِّ الماء لتحضير كوب من الشاي.

(٥٢) أصوات مضغ الطعام

قد لا تُحبُّ سماع صوت الناس وهم يقضمون الطعام ويمضغونه، ولكن هل يمكنك تمييز أيِّ شيءٍ بشأن ما يأكلونه عبْر هذه الأصوات؟ على سبيل المثال، هل يُمكنك التمييز من خلال الصوت فقط ما إذا كانت التفَّاحة ناضجة أو ما إذا كانت رقائق التورتيا طازجة؟ كثيرًا ما يبذل مُصنِّعو المواد الغذائية جهدًا كبيرًا لضمان أن منتجاتهم تُصدِر الأصوات «المناسبة» عند تناولها.

الجواب: يمكنك من خلال الصوت تمييز ما إذا كانت التفاحة ناضجةً أو ما إذا كانت رقائق التورتيا طازجة. في الواقع، أعتقد أن الدافع الأساسي لمُعظم القائمين على صناعة الوجبات الخفيفة هو أصوات القرمشة التي تُصدِرها منتجاتهم عندما تؤكل (أضف إلى ذلك الملح والدهون، فما الذي قد يتمنَّاه أي شخص أكثر من ذلك!) عندما تطحن مادة هشَّة مثل التورتيا فجأة، تنكسر الرقاقة إلى نصفَين عندما تتسارَع الشقوق في الانتشار عبْر خلاياها المليئة بالهواء. تنثني هذه الخلايا وتنكسر، ثم تهتزُّ الأجزاء لحظيًّا وهو ما ينتج عنه اختلافات في ضغط الهواء؛ ومِن ثَمَّ يُوَلِّد موجاتٍ صوتية تُمكِّنك من سماع صوت تناول أحدهم لرقائق التورتيا. ترسل الاهتزازات التي تحدُث بين الأسنان موجاتٍ صوتيةً عبْر الأسنان والفك إلى الأذن. وهكذا عندما تقضم إحدى رقائق التورتيا يمكنك سماع الموجات، ليس فقط عبْر الهواء، ولكن أيضًا عبْر هذا المسار الثاني إلى الأذن. تُصدر رقاقة التورتيا الطازجة أصواتًا ذاتَ تردُّداتٍ عالية تفُوق ٥٠٠٠ هرتز أثناء تكسُّرها نتيجة لهشاشتها البالغة. بينما قد لا تكون رقاقة التورتيا البائتة على نفس القدْر من الهشاشة نتيجة لامتصاص الماء الموجود في الهواء؛ ومِن ثَمَّ عندما تقضمها، يمكنك هرسُها بكلِّ بساطةٍ دون حدوث أيِّ تشقُّق سريع أو اهتزاز لأجزائها.

يمكن التمييز بين التفَّاح الطازج المُقرمش والتفَّاح القديم الغَضِن من خلال أصوات المضغ، خاصة في القضمة الأولى، التي عادةً ما تُصدر أصواتًا بتردُّدات أقل من ٢٠٠٠ هرتز، فخلايا التفاحة هي ما تُحدِث فرقًا في الصوت المسموع. تحتوي خلايا التفاحة الطازجة المُقرمشة على ماء مضغوط، وعندما تقضم، تنفطِر الخلايا مُنتجةً صوتًا في النطاق الترددي من ١٠٠ إلى ١٥٠٠ هرتز. وعلى العكس من ذلك، ففي حالة التفاحة الغضَّة القديمة، تكون خلاياها تحت ضغطٍ أقل (يكون ضغط امتلائها أقل) لأنَّ الكربوهيدرات (البكتين) الموجودة في جدرانها تكون قد امتزجت بالسائل بالفعل و«ذابت» فيه. ومِن ثَمَّ، عندما تقضم تتداعى الخلايا بسهولة دون أن تنفطر مُكوناتها الداخلية وتُصدِر صوتًا ضئيلًا.

(٥٣) فرقع، وطقطق، والتهم!

يتكوَّن أحد أنواع حبوب الإفطار الشعبية في أمريكا الشمالية من حبوب الأرز المحمَّصة المُنتفخة التي تُصدِر صوتَ فرقعة حينما تُوضَع في اللبن، وكان هذا الصوت هو أصل شعار «فرقع، وطقطق، والتهم» الذي استخدمته الشركة المُصنِّعة لتسويق منتجها. لماذا تصدر حبوب الإفطار هذا الصوت؟

الجواب: تكون كلُّ حبةٍ هشَّة ومضغوطة؛ أي إن الأجزاء المختلفة للحبة تكون متماسكة مع بعضها بشدة. عندما يصير جزء منها رطبًا، تقلُّ صلابتها وتنكسِر الأجزاء المُتماسكة، فتُسبِّب هذه الحركة المفاجئة اهتزازاتٍ لحظية تنتج صوت نبض خافت أقرب إلى الطقطقة منه إلى الفرقعة. إذا تناولت حبوب الإفطار هذه فضعْ في اعتبارك أن الأصوات التي ستسمعها هي أصوات صرخات احتضار حبوب الأرز المُنتفِخة.

(٥٤) دَوِي اختراق حاجز الصوت الصادر من الطائرات وطلقات الرصاص

كانت الطائرات تطير بسرعة «دون سرعة الصوت» حتى عام ١٩٤٧ عندما كسر تشاك ييجَر ما يُعرَف باسم حاجز الصوت عن طريق التحليق بسرعةٍ تتجاوز سرعة الصوت (كانت الطائرة تُحلِّق «أسرع من الصوت»). عندما أصبح الطيران الذي يتجاوز سُرعة الصوت شائعًا، أصبح الصوت المُزعج والمُدمِّر أحيانًا الذي يُصاحب ذلك شائعًا أيضًا، وهو ما يُعرف باسم «دَوِي اختراق حاجز الصوت». ولكن لماذا تُصدِر الطائرة التي تفوق سرعة الصوت دَوِي اختراق حاجز الصوت الذي قد يُزعج الناس ويُفزِع القطط ويكسر النوافذ أحيانًا؟ هل يُمكن لشخصَين داخل طائرة تفوق سرعة الصوت أن يسمع كلٌّ منهما الآخر عندما يتكلمان؟

إذا أتلف انفجار قنبلةٍ أحدَ المباني (لنقُل جدران المبنى على سبيل المثال)، فلا بدَّ أن يتجاوز ضغط الانفجار على المبنى قيمةً حدِّية بعَينها حتى يتحقَّق التلَف، ومع ذلك يمكن لدَوِي اختراق حاجز الصوت أن يُتلف مبنًى بضغطٍ أقلَّ مائة مرة من هذه القيمة الحدِّية، فكيف يكون هذا ممكنًا؟

وكذا أيضًا تفُوق سرعة بعض أنواع طلقات الرصاص سرعة الصوت، فهل تُصدِرُ هي الأخرى صوتَ دَوِيِّ اختراق حاجز الصوت؟

عندما كان الصاروخ «فاو-١» يقصف إنجلترا أثناء الحرب العالمية الثانية، كان المراقب يسمع ضوضاء تحليق الصاروخ أولًا (كانت عبارة عن صوت طنين مُميَّز، صار

وسيلة غير مقصودة للتحذير)، ثم صوتَ انفجار الصاروخ عندما يُصيب الهدف. عندما استُخدِمت صواريخ «فاو-٢» في وقتٍ لاحق، كان المراقب يسمع أحيانًا هذين الصوتَين بترتيبٍ عكسي؛ أي الانفجار أولًا دون صوت تحذيري، ثم ضوضاء تحليق الصاروخ بعد ذلك بفترةٍ وجيزة، فلماذا صار التسلسل معكوسًا؟

في الثالث عشر من أغسطس عام ١٩٨٩، كان مكوك الفضاء «كولومبيا» مُتجهًا نحوَ قاعدة إدواردز الجوية في كاليفورنيا وحلَّق فوق لوس أنجلوس وباسادينا. كان مكوكًا يفوق سرعة الصوت ويتحرك بسرعة حوالي ٤٦٠٠ كيلومتر في الساعة؛ ومِن ثَمَّ أصدر موجة صدمية مُرتفعة (صوت دَوِيِّ اختراق حاجز الصوت) سُمِعت في كلتا المدينتَين. من الغريب أن محطة رصد وقياس الزلازل في باسادينا رصدت موجة زلزالية واضحة قادمة من لوس أنجلوس قبل ١٢,٥ ثانية من تلقِّيها الموجة الصدمية للمكوك، فكيف يُمكن للمَوجة الصدمية أن تُولِّد موجة زلزالية في لوس أنجلوس؟

الجواب: عندما تُحلِّق طائرة عبْر الهواء، فإنها تدفع جزيئات الهواء بعيدًا عن طريقها، وهو ما يُسبِّب تبايُنًا في الضغط الجوي. ينتقل هذا الاختلاف في الضغط الجوي من الطائرة على هيئة موجةٍ صوتية، كما ينتقل الصوت الصادر من المحركات أيضًا. إذا كانت سرعة الطائرة دون سرعة الصوت، فستسمع صوت المُحركات ولن تلحظ موجة الضغط الناجمة عن دفع الطائرة للهواء.

يصير الوضع معكوسًا عندما تفوق سرعة الطائرة سرعة الصوت؛ إذ تُواصِل الاختلافات في ضغط الهواء التي تُسبِّبها الطائرة نتيجةً لاندفاعها عبْر الهواء الانتقال على هيئة موجات صوتية، ولكن تكون الموجات في هذه الحالة أبطأ من الطائرة نفسها فتتجمَّع مُكوِّنة شكلًا مخروطيًّا تتَّجِه قمَّتُه نحو الطائرة، ويُلازم هذا المخروط الطائرة ما دامت سُرعتها تفوق سرعة الصوت. ما تسمعه بالأساس في صوت دَوِي اختراق حاجز الصوت هو هذه الموجات الصوتية المُتجمِّعة (التي يُقال إنها «موجة صدمية»)، وليس صوت محركات الطائرة.

عندما تتحرَّك الطائرة أفقيًّا، على سبيل المثال، يُمكن للجزء السُّفلي من المخروط أن يجترف الأرض، وإذا مرَّ بسرعة بجانبك فسيزيد أولًا ضغط الهواء على طبلة أذنك عن قيمته العادية، ثم ينقُص حتى يصل إلى قيمةٍ أقلَّ من قيمته العادية، ثم يزيد حتى يصل إلى قيمته العادية مرةً أخرى. (يُشبِه الرسم البياني لهذه التغيرات حرف N؛ ومِن ثمَّ فإن الموجة الصدمية التي تَصدُر من الطائرة تُسمَّى غالبًا بـ «الموجة N».) تتسبَّب هذه التغيُّرات

المفاجئة في ضغط الهواء في اهتزاز طبلة أذنك، ومن ثَمَّ تسمع صوتَ دَوِيِّ اختراق حاجز الصوت.

تتكوَّن الموجة الصدمية للطائرة في الواقع من مجموعةٍ من الموجات الصدمية الفردية التي تَنتُج من الجزء الأمامي المخروطي الشكل من الطائرة، ومن المُحرِّكات، ونقطة اتصال جسم الطائرة بالجناح، والذَّيل. إلا أنه بحلول الوقت الذي تصلك فيه هذه الموجات الصدمية على الأرض، فإنها قد تندمج وتصير موجة صدمية واحدة تُصدِر صوتًا واحدًا لدَوِي اختراق حاجز الصوت. ومع ذلك، يُمكنك في بعض الأحيان تمييز أصوات دَوِيِّ اختراق حاجز الصوت كلٍّ على حدة.

قد لا تصِل الموجات الصوتية التي تُشكِّل المخروط إلى الأرض لأنها أثناء انتقالها إلى الأسفل تنحني مساراتها بفعل التغيُّرات الحادثة في درجة حرارة الهواء بطول هذه المسافة، ويُقال بأنَّ الصوت «ينكسر» أو يتعرَّض للانكسار. إذا قابلت الموجات هواءً دافئًا أثناء نزولها، يمكن أن تنحني المسارات بعيدًا عن الأرض بما يكفي لكيلا تُلامِسها. كما يمكن أن تُوجَّه الموجات أيضًا إلى مسافات بعيدة قد تصل إلى مائة كيلومتر إذا انحبست بين طبقاتٍ ذات درجات حرارة أعلى؛ ومِن ثَمَّ، يمكن أن تُسمَع الموجات أحيانًا دون رصْد وجود أي طائرةٍ في الأفق، وهو ما يجعل صوتَ الدَّوِيِّ الغامض مُقلقًا.

عندما تتسارَع طائرة تفوق سرعة الصوت، خاصةً إذا كانت طائرة حربية، مُحلِّقة نحو الأمام أو تقوم بمُنعطفات حادة، يمكن أن تنبعِث الموجات الصدمية في اتجاهاتٍ مُختلفة ويمكن لبعضها أن يصطدم بالأرض عند نفس النقطة. يعني وجود مزيجٍ من موجتَين أو أكثر من الموجات الصدمية أن الاختلافات في ضغط الهواء تكون أكثر حدَّة، وهو ما يَنتُج عنه صوت «دَوِي هائل» يمكن أن يكون مُفزِعًا للناس على الأرض. على الأرجح، يُلحِق هذا الوضع أيضًا أضرارًا بالمباني، خاصةً إذا كان المُعدَّل الذي يحدُث به اختلاف الضغط يتناسب مع المعدل الذي يمكن أن يهتزَّ به الجدار على سبيل المثال. ومِن ثَمَّ، يُمكن أن تكون الاهتزازات الناجمة عن الموجات الصدمية في هذه الحالة ضخمة بما يكفي لكسر الجدار.

يمكن لشخصَين داخل طائرة تفُوق سرعة الصوت أن يتحدَّثا معًا بكل تأكيد؛ إذ إنهما موجودان داخل هواء يُجبَر على التحرُّك مع الطائرة؛ ومِن ثمَّ لا يحدُث أيُّ تغيير ذي قيمة تُذكَر للموجات الصوتية لصوتيهما التي تنتقِل عبْر ذلك الهواء.

دَوِيُّ اختراق حاجز الصوت للرصاصة التي أُطلِقَت إذا فاقت سرعة الرصاصة سرعة الصوت. كانت سرعة الصواريخ «فاو-١» التي قصفت إنجلترا أثناء الحرب دون سرعة الصوت؛ ومِن ثَمَّ كان المراقب يسمع صوتَ ضوضاء تحليقها قبل أن تظهر للعِيان. على النقيض، كانت الصواريخ «فاو-٢» من النوع الذي يفوق سرعة الصوت؛ ومِن ثَمَّ، كان الصاروخ يصل إلى الأرض قبل صوت الضوضاء الناتجة عن تحليقه.

عندما ضربت موجة المكوك «كولومبيا» الصدمية ولاية لوس أنجلوس، تسبَّبت في اهتزاز العديد من المباني الشاهقة في منطقة وسط المدينة، وهو تأثير مُماثل لذلك الذي يُحدِثه الزلزال. تراوَحَت فترات اهتزاز هذه المباني (الفترة هي الوقت الذي يستغرقه لحدوث اهتزاز كامل) من ثانية إلى ستِّ ثوانٍ. أحدثت المباني أثناء فترات اهتزازها موجاتٍ زلزالية؛ ومِن ثَمَّ إذا اهتزَّ مبنًى لفترةٍ استغرقت ثانيتَين على سبيل المثال، فستنتج موجة زلزالية تدوم لمدة ثانيتَين. انتقلت الموجات الزلزالية عبْر الأرض أسرع من الموجات الصدمية التي انتقلت عبر الهواء؛ ومِن ثَمَّ وصلت إلى باسادينا قبل الموجات الصدمية. وصلت الموجات التي وصلت أولًا من جميع المباني بالتوازي معًا تقريبًا وأحدثت اضطرابًا واضحًا رصدته محطة قياس ورصد الزلازل. أما بعد ذلك، فنتيجةً لاختلاف فترات الاهتزاز، تداخلت الموجات وامتزجت؛ وهو ما جعل العديد منها يُلغي بعضه تأثير بعض؛ ومِن ثَم، ضَعُف الاضطراب المرصود في محطة رصد الزلازل.

(٥٥) دَوِي اختراق حاجز الصوت الصادر من أنفاق القطارات

عندما زيدَت سرعة القطارات السريعة في اليابان من ٢٢٠ كيلومترًا في الساعة إلى ٢٧٠ كيلومترًا في الساعة، بدأ يَصدُر من أنفاق القطارات أصواتُ دَوِيٍّ كلما مرَّ أحد القطارات عبْرها. كان صوت هذا الدَّوِي مرتفعًا ومُفزعًا تمامًا كصوت دَوِيٍّ اختراق حاجز الصوت الذي يَصدُر من الطائرات التي تفوق سرعة الصوت. لماذا نتج عن زيادة السرعة صوت دَوِي؟

الجواب: لا بدَّ أن يَشقَّ القطار، خاصةً لو كان قطارًا سريعًا، طريقَه عبْر الهواء؛ ومِن ثَمَّ، يُنتِج موجاتٍ تضاغُطية إلى الأمام. تتبدَّد هذه الموجات في الأماكن المفتوحة بسرعة، ولكنها تدوم لفترةٍ أطول داخل الأنفاق. في الواقع، يمكن أن تدوم لفترةٍ طويلة بما يكفي حتى تتجمَّع مُكوِّنة موجةً صدمية. عندما تصل الموجة الصدمية إلى نهاية النفق وتخرج منه تكون قويةً بما يكفي لتُنتِج دَوِيَّ اختراق حاجز الصوت. على الرغم من أنَّ

التكنولوجيا الحديثة يُمكنها زيادة سرعة القطارات، فإن أصوات الدويِّ الناتجة تَحُدُّ من السرعات التي قد تكون مقبولةً بالنسبة إلى تصميم القطارات والأنفاق.

(٥٦) الرعد

ما الذي يُسبِّب الرعد؟ ولماذا يمكن أن يتدرَّج صوته من صوتِ قعقعةٍ مُثير للأعصاب إلى صوت دويٍّ هادرٍ لا يتوقف؟

الجواب: المصدر الرئيسي لصوت الرعد هو الموجة الصدمية التي يُحدثها البرق، وهي عبارة عن تفريغ كهربائي. يسري التيار الكهربائي الهائل الذي يُحدِثه البرق بين السحب والأرض (أو بين السحب وبعضها) في قناةٍ ضيِّقة لا يتجاوز نصف قطرها بضعة سنتيمترات. ينزع الحقل الكهربي الضخم، الذي تُحدِثه الشحنات الموجودة على الأرض وفي السحاب، الإلكترونات من جُزيئات الهواء داخل هذه القناة، ثم يزيد الحقل الكهربي من سرعة الإلكترونات المُحرَّرة وتصطدم بجزيئات الهواء، وتنقل الطاقة التي اكتسبتها إلى الجزيئات. ونظرًا لحالة السخونة الشديدة التي يكون عليها غاز هذه الجزيئات (قد تكون درجة حرارته ٣٠٠٠٠ كلفن)، يتمدَّد الغاز. تحدُث هذه العملية بسرعة بالِغة بحيث تتمدَّد قناة الغاز الساخن في البداية بسرعةٍ تفوق سرعة الصوت بكثير، وهو ما يُرسِل موجة صدمية من تغيُّرات الضغط المُفاجئة إلى الهواء المُحيط وينتج صوت الرعد.

إذا كنت تقف بالقُرب من البرق، فستسمع صوت فرقعة مُرعبًا أثناء مرور الموجة الصدمية بجانب أُذنيك. وإذا كنت بعيدًا، فستسمع صوت الجزء الأقرب من الصاعقة أولًا، ثم ستسمع صوت أجزاءٍ الصاعقة الأعلى أو الأبعد منك. ولأنَّ الموجات الصوتية تكون قد انتشرت بالفعل، فقد لا يكون هذا الصوت المتأخر مرتفعًا بما يكفي ليُفزعك. ستسمع أيضًا على الأرجح انعكاسات الصوت القادمة من التِّلال والمباني والأرض، وحتى من السحب، وهذه التأثيرات هي ما تتسبَّب في دويِّ الرعد بلا توقُّف.

قد تسمع نغمة موسيقية إذا كنت بالقرب من برقٍ يتكوَّن من العديد من عمليات التفريغ الكهربي السريعة. فإذا كانت النبضات الصوتية الصادرة من عمليات التفريغ الكهربي متقاربة جدًّا بعضها من بعض، فلن تُميز كلَّ واحدةٍ منها على حدة، بل ستُميزها جميعها كجزءٍ من نغمة موسيقية. على سبيل المثال، إذا كان الزمن الفاصل بين النبضات المُتتالية هو ٠٫٠٠١ ثانية، ستُميز الصوت عند التردد ١ / ٠٫٠٠١ الذي يساوي ١٠٠٠ هرتز.

إذا كان البرق على بُعد حوالي عشرين كيلومترًا منك، فقد لا تسمع الرعد. تنكسِر الموجات الصوتية أثناء انتقالها عبْر الهواء (ينحني مسارها) بفعل الاختلافات في درجة حرارة الهواء (إذ يكون الهواء الأسخن أقلَّ كثافةً من الهواء الأبرد، وهذا التغيُّر في الكثافة هو ما يمكن أن يؤدي إلى انحناء المسار الذي يسلكه الصوت). نظرًا لأن الهواء يكون عادة أكثر برودةً عند مستوى السُّحب منه عند مستوى الأرض، فإن الصوت الذي ينتقل تجاهك آتيًا من البرق البعيد، ينحني ويتجه بعيدًا عنك. ومع ذلك، في بعض العواصف الرعدية يكون الهواء الموجود بالقُرب من الأرض أكثر برودة من الهواء الأعلى، وهو ما يعرف باسم «الانقلاب الحراري». يمكن أن يتعرَّض الصوت القادم من الصاعقة، والذي يكون مُتجهًا إلى أعلى في البداية، إلى الانحناء إلى أسفل أثناء الانقلاب الحراري. والأسوأ من ذلك هو أنه في بعض الأحيان يمكن أن يتركز ويتجمَّع الصوت المُنبعث من الأجزاء المختلفة للصاعقة ويتَّجِه نحوك. عندما يحدُث ذلك أثناء الليل، قلْ وداعًا للنوم لأنك ستظلُّ مُستيقظًا (ومُختبئًا أسفل الأغطية خوفًا من الوحوش) حتى تمُرَّ العاصفة.

يمكن أن يكون بعض الصوت الناتج عن البرق «دون الصوتيِّ»؛ أي يكون تردُّده منخفضًا للغاية بحيث لا تستطيع تمييزه سمعيًّا. يبدو أن مصدر الموجات دون الصوتية هو انهيار الحقل الكهربي وتوزيع الشحنة الكهربية في السحابة عندما تفقد السحابة فجأةً معظم شُحنتها الكهربية عند حدوث الصاعقة؛ إذ إنَّ قطرات الماء الموجودة في السحابة تكون مشحونةً وتتنافر معًا كهربيًّا. ولكن بمجرد أن تفرغ الصاعقة هذه القطرات وتزيل التنافُر الكهربي المُتبادَل، تتحرك القطرات فجأة إلى الداخل لتتوزَّع بصورة أكثر إحكامًا. تنتج هذه الحركة المفاجئة اختلافاتٍ في ضغط الهواء تنتقل من السحابة إلى الأرض على هيئة موجات دون صوتية. يكون التردُّد الذي يبلغ حوالي واحد هرتز منخفضًا للغاية بحيث لا تستطيع تمييزه سمعيًّا، ولكنك قد تكون قادرًا على الشعور به، خاصة إذا كنت تقف أسفل السحابة مباشرةً. ومع ذلك، فإن وجودك هناك على الأرجح سيجعلك تُولي قدرًا كبيرًا من الانتباه إلى الصاعقة القريبة أكثر من الانتباه لتمييز أيِّ إحساسٍ ضعيف ينتج عن الموجات دون الصوتية.

(٥٧) الدوي الغامض الآتي من السماء

لوقتٍ طويل رُصِدَ دويٌّ غامضٌ قادم من السماء، حتى من السماء الصافية، وظلَّ مصدر هذه الأصوات مَثارًا للجدل. على سبيل المثال، عندما سافر المُستكشفان الأسطوريان لويس

وكلارك عبْر الغرب الأمريكي، رفَضا في البداية قصص الأمريكيين الأصليين حول أصوات الدويِّ هذه، ولكنهما غيَّرا رأيهما عندما سمعاها بنفسيهما أيضًا بالقُرب من جبال روكي في ولاية مونتانا. عُرِفَت ظاهرة الدمدمة الغامضة هذه بأسماء مختلفة في مناطق عديدة حول العالم، منها «الدويُّ الغامض» و«قاذفات الضباب»، و«مدافع باريسال». في الوقت الحاضر، تظهر تقارير ترصد حدوث ظاهرة الدويِّ الغامض بالصحف أحيانًا، خاصة حينما تسمعها أعداد كبيرة من الناس، أو إذا حدثت الظاهرة بصورة مُنتظمة. هل يمكنك اقتراح ما يُسبب هذه الأصوات الغامضة؟

الجواب: في الوقت الحاضر، يكون صوت الدويِّ الغامض على الأرجح ناتجًا عن دويِّ اختراق حاجز الصوت الذي تُحدثه الطائرات التي تفوق سرعة الصوت. يمكن أن تكون الطائرة بعيدة كثيرًا عن المكان الذي يُسمَعُ فيه صوت الدويِّ، وهو ما يجعل مصدره يبدو غامضًا. على الرغم من أن القوانين تمنع الطائرات من إصدار أصوات دويِّ اختراق حاجز الصوت فوق الولايات المتحدة الأمريكية وكندا، إلَّا أنها ما زالت يمكنها إصدارها فوق المناطق ذات الكثافة السكانية المُنخفضة أو فوق المُحيط. على سبيل المثال، بعض أصوات الدوي الغامضة التي كانت تُسمَع على نطاقٍ واسع والتي ورَدَ بشأنها الكثير من التقارير في الساحل الشرقي للولايات المتحدة، تمَّ الربط بينها وبين أصوات دوي اختراق حاجز الصوت الصادرة من الطائرة كونكورد. على الرغم من أن الطائرة كونكورد العابرة للمُحيط الأطلسي كانت مُطالبة بأن تخفض سرعتها وتُحلِّق دون سرعة الصوت قبل وصولها إلى وجهتها، مطار كينيدي بنيويورك مثلًا، إلا أنها كانت تُحلِّق بسرعة تفوق سرعة الصوت فوق المحيط. اعتمد المسار الذي اتخذَتْه الموجات الصوتية على الكيفية التي تتغيَّر بها درجة حرارة الهواء وسرعة الرياح مع الارتفاع. يمكن أن تُوجِّه الحرارة والتغيُّرات في سرعة الرياح الموجاتِ الصوتية في بعض الحالات؛ ومِن ثمَّ كانت الموجات الصوتية تُسمَع بطول الساحل الشرقي بالقُرب من كينيدي.

ومع ذلك، لا يمكن أن تُفسِّر ظاهرة دوي اختراق حاجز الصوت كلَّ أصوات الدوي الغامض التي تُسمَع حديثًا أو أيًّا من أصوات الدوي الغامض التي كانت تُسمَع قبل رحلة الطيران التي تفوق سرعة الصوت في عام ١٩٤٧. قد يكون لأصوات الدويِّ الغامض الأخرى أنواع مختلفة من المصادر؛ فقد تكون ناتجةً عن حدوث اضطرابات زلزالية بعيدة إذا كان اهتزاز الأرض ضعيفًا جدًّا بحيث لا يمكن الشعور به، ولكن تكون الموجة الصوتية التي تُرسَل عبْر الهواء مسموعة. كما يمكن أن يكون صوت الرعد البعيد أحد تلك المصادر

إذا كانت العاصفة بعيدة جدًّا بحيث لا تُرى — يمكن سماع صوت الرعد إذا كان الغلاف الجوي يتمتَّع بالتوزيع المناسب لدرجات حرارة الهواء. حينئذٍ، قد ينكسر الصوت مرارًا وتكرارًا أينما تتغيَّر درجة حرارة الهواء مع الارتفاع، ومِن ثم، قد يقطع الصوت مسافةً كبيرة. إلا أنه من الصعب إثبات مثل هذه التفسيرات.

(٥٨) السقوط الصخري وإسقاط الأشجار

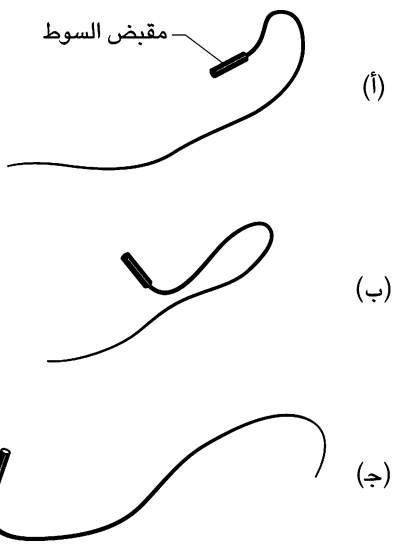
في العاشر من يوليو عام ١٩٩٦، وقع سقوطان صخريَّان مُتعاقبان ومأساويَّان بالقُرب من مركز هابي آيلز للطبيعة بمُتنزَّه يوسيميتي الوطني في كاليفورنيا. في كلٍّ حادث سقوط صخري، كانت تنزلِق كُتلةٌ ضخمة من الجرانيت أولًا على منحدرٍ وعرٍ وتندفع كالصاروخ وتهبط مسافة ٥٥٠ مترًا، ثم تصطدم بالأرض. أحدثت هذه الاصطدامات موجاتٍ زلزاليةٍ سجَّلتها أجهزة قياس الزلازل التي تقع على بُعد ٢٠٠ كيلومتر. ومع ذلك، ما كان أكثر إثارةً للدهشة هو الأضرار التي أحدثتْها الكُتَل الصخرية في أماكن أبعدَ من الوادي، تقَع على بُعد أكثر من ٣٠٠ متر من المكان الذي وقعتْ فيه، ما أدَّى إلى سقوط أكثر من ١٠٠٠ شجرة وهَدْمِ جسرٍ ومطعم للوجبات الخفيفة ومقتل شخصٍ واحد وجُرح عددٍ آخر. كيف يمكن أن تُحدِث كُتَل الجرانيت هذه الأضرار الهائلة في الأماكن التي لم تسقط فيها بالأساس؟

الجواب: أحدث ارتطام كلٍّ كتلة من الجرانيت في نهاية رحلة سقوطها بالأرض اختلافات في ضغط الهواء انتقلت من نقطة الارتطام على هيئةِ موجةٍ صوتية. تتكوَّن الموجة، التي يُقال إنها «اندفاع هوائي» ناتج من الارتطام، من هواءٍ مضغوط يتمدَّد بعد ذلك. إذا كنتَ واقفًا وقتَ اندفاع الهواء، فسوف تدفعك الاختلافات في ضغط الهواء، التي كانت المصدر الفعلي للرياح القوية، بعُنف في أحد الاتجاهات أولًا، ثم في الاتجاه المعاكس بعد ذلك. أما الاندفاع الهوائي الذي نتج عن ارتطام الكتلة الصخرية الثانية التي كانت كتلتها تساوي ثلاثة أضعاف كتلة الأولى فكان مُدمِّرًا على نحوٍ استثنائي؛ فقد أحدث رياحًا تصِل سرعتها إلى ٤٣٠ كيلومترًا في الساعة عبْر الأشجار، وهو ما يُشبِه الرياح التي تحدُث بالقُرب من الإعصار. في الواقع، كان الاندفاع الهوائي الناجم عن سقوط الكتلة الصخرية الثانية يفوق سرعة الصوت (كانت موجة صدمية)، وذلك لأن الغبار الذي أثاره الارتطام الأول كان قد قلَّل من القيمة العادية لسرعة الصوت في الهواء التي تبلغ ٣٤٠ كيلومترًا في

الثانية إلى حوالي ٢٢٠ مترًا في الثانية، أما بالقُرب من نقطة الارتطام، فقد كانت سرعة الاندفاع الهوائي أكبر من هذا بكثير.

(٥٩) الصوت الصادر عن السِّياط والمناشِف الرطبة

كيف تجعل السوط يُصدر صوتًا؟ عليك أن تُحرك مقبض السوط بسرعة بطريقةٍ أو بأخرى لمسافة قصيرة، فيتحرك طرفه بسرعة كبيرة. بالمثل، كيف تجعل المنشفة تُصدر صوتًا؟ ولماذا تُصدر صوتًا أفضل عندما تكون رطبة؟



شكل ٣-٥: بند ٣-٥٩: ثلاث لقطات لانتقال موجة لولبية بطول السوط عندما يُسحَب مقبض السوط بسرعة إلى الخلف.

الجواب: كي تجعل السوط يُصدر صوتًا، أو أيَّ أداة أخرى تُشبِهه، عليك أن تُحرِّك مقبض السوط بسرعةٍ حتى تُرسل موجة بطول السوط. قد يُحدث المبتدئ موجة بسيطة، ولكن المُحترِف يُنتج موجةً لولبية (انظر شكل ٣-٥). عندما تصل الموجة إلى النهاية، يتسارع طرف السوط بشدَّة (أسرع من عجلة الجاذبية بنحو ٥٠ ألف مرة) وسرعان ما

تتجاوز سرعته سرعة الصوت. وكما هو الحال مع الأجسام الأخرى التي تفوق سرعتها سرعة الصوت، كالطلقات والطائرات التي تفوق سرعة الصوت، يُولِّد طرف السوط صوت دويٍّ اختراق حاجز السوط (أو مَوجة صدمية)، ألا وهو صوت «قرْع» السَّوط.

تعمل المِنشفة الرطبة على إنتاج الصوت بصورة أفضل من المِنشفة الجافة لأن كتلتها تكون مُعزَّزة. وعلى الرغم من أنك لا بدَّ أن تبذل مجهودًا أكبر كي تحركها، فإن طرفها ينتهي به الحال مُكتسبًا طاقةً أكبر تكفي لصفْع ضحية في غرفة خلع الملابس صفعةً مؤلمة.

يعتقد بعض علماء الحفريات بأن ديناصور الصوروبودا المُسمَّى «أباتوصوروص لويزيا»، الذي كان ديناصورًا ذا ذيلٍ طويلٍ مرِن، كان بإمكانه تحريك ذَيله سريعًا مثل السوط، وكانت سرعة طرف ذيلِه على الأرجح تتجاوز سرعة الصوت وتُرسِل صوت دويٍّ اختراق حاجز الصوت.

(٦٠) السُّعال والعطس

ما الذي يُصدِرُ صوت السُّعال والعطس؟ ولماذا يكون صوت سُعالِ وعطسِ بعض الناس مرتفعًا ومُزعجًا؟

الجواب: عندما تسعل، فأنت تطرد الهواء بسرعة كبيرة من خلال القصبة الهوائية والشُّعَب الهوائية العُليا حتى يزيل الهواء المُخاط الزائد الذي يُبطِّن المسار. تنجح في إنتاج هذه السرعة العالية عن طريق تنفُّس كمية كبيرة من الهواء وحبسه عبْر إغلاق لسان المزمار (فتحة ضيقة في أعلى الحنجرة)، وزيادة ضغط الهواء من خلال قبض الرئتين، وهو ما يجعل القصبة الهوائية والشُّعَب الهوائية العُليا تنكمش جزئيًّا لتُضَيِّق المسار، ثم زفر الهواء أخيرًا عبْر هذا المسار عن طريق إعادة فتح لسان المزمار فجأة. يضطرب تدفُّق تيار الهواء فجأة، وهو ما يُنتِج موجاتٍ صوتية في كلٍّ من الهواء وأنسجة الرئة. لا تُنتج الأحبال الصوتية في هذه المرحلة الصوت، وذلك لأنها تكون مفتوحة على آخرها حتى لا تُعيق تدفُّق الهواء. ومع ذلك، عند نهاية السعال، عندما تُضَمُّ الأحبال الصوتية مرة أخرى، يمكن أن يتسبَّب تدفق الهواء في اهتزازها، فتُنتِج صوتًا.

تزداد سرعة الهواء أثناء اندفاعِه الهائل خلال القصبة الهوائية والشُّعب الهوائية العليا. أعتقد أن سرعة الهواء عند بعض الناس تصل إلى سرعة الصوت، أو حتى تفوقها، ومِن ثَمَّ تخرج موجة صدمية خفيفة (أو دوي اختراق حاجز الصوت) من الحلق وتجعل

صوت السعال مرتفعًا على نحوٍ استثنائي، كما يمكن أن تُحدِث عطسةٌ قوية موجةً صدمية أيضًا. (ومن الجدير بالذكر أن الأشخاص الذين يفُوق سُعالهم أو عطسُهم سرعة الصوت لا يكونون محلَّ ترحيبٍ داخل المصاعد.)

(٦١) كيفية انتقال الصوت في الغُرَف وقاعات الحفلات الموسيقية

تكون بعض الغرف والقاعات المُغلقة غير المجهَّزة سيئة للغاية من الناحية الصوتية بحيث لا يتمكن الجمهور من سماع ما يُقال أو يُعزَف أو يُغَنَّى كما ينبغي. على سبيل المثال، إذا عُزِفَت حفلة موسيقية في ملعب كرة سلة، فمن المؤكد أنها ستكون مزيجًا من الأصوات غير الواضحة. (غالبًا ما يكون الصوت مرتفعًا في حفلات الروك حتى يُصبح صاخبًا بدرجةٍ لا يهتمُّ فيها الجمهور بالجودة الصوتية.) فما الذي يُحدِّد ما إذا كانت التجهيزات الصوتية للمكان مُلائمة أم لا؟

الجواب: يمكن أن يتجمَّع الصوت الذي يصل إلى المُستمِع بثلاثِ طُرق: أولًا، الصوت المباشر الذي يأتي مباشرة من المصدر إلى المستمع. ثانيًا، «الانعكاسات المبكرة» التي تصل بعد وقتٍ قصير (في غضون ٠٫٠٥٠ ثانية) من انعكاسات الصوت على الجدران أو السقف. ثالثًا، «الانعكاسات المتأخرة» التي تصل بعد ذلك. يفترض أن تكون الانعكاسات المُبكرة مرتفعة؛ لأنها تصل بعد «الصوت المباشر» مباشرة، فيمزجها المستمع ذهنيًّا مع الصوت الأصلي. ومن المُفترَض أن تصل هذه الانعكاسات المُبكرة من يسار المستمع أو يمينه لتُعزِّز انطباع وجوده داخل غرفة، وكذا ليوسع الدماغ ذهنيًّا حجم مصدر الصوت. فبدون هذه الانعكاسات الجانبية، سيعتقد المُستمع أنَّ الغرفة «ساكنة» أو أن مصدر الصوت ضعيف.

لا يفترض أن تكون الانعكاسات المُتأخِّرة مرتفعة للغاية وإلا ستتداخل و«تغطي» على ما يصل في نفس الوقت من الأصوات المباشرة؛ ومِن ثَمَّ لن يتمكن المستمع من تمييز الصوت المباشر — قد تكون لاحظتَ هذه التغطية إذا صِحتَ قائلًا عبارة بعينها في مكانٍ مغلقٍ يُولِّدُ صدى صوتٍ قويًّا. ومع ذلك، يجب عدم التخلُّص من الانعكاسات المتأخِّرة؛ لأنها تُعطي المُستمِع شعور «الانغماس» داخل الصوت.

لا يزال تحديد الآثار النفسية للانعكاسات المُبكِّرة والمُتأخِّرة وكذا تصميم قاعات الحفلات الموسيقية محلَّ دراسة مستمرة. تعتمد هذه التصميمات جزئيًّا على ما إذا كانت القاعة ستُستخدَم لإلقاء محاضرة أم لتقديم أغنيات أم لعزف آلة موسيقية. تتكوَّن جدران

قاعات الحفلات الموسيقية بصفةٍ عامة من العديد من البروزات أو الأشكال المختلفة التي يمكنها عكس الصوت إلى الجمهور. للتقليل من فُرَص حدوث صدًى صاخب، يمكن تغطية الجدار الخلفي بستارٍ أو جزء من المسرح ببساط.

تُعتبَر التجهيزات الصوتية في مكان العزف المُخصَّص لجلوس فرقة الأوركسترا أسفل المسرح مباشرة عاملًا جوهريًّا للموسيقيين الذي يعزفون هناك، إذ إنَّ العازف لا يسمع فقط الأصوات المباشرة للآلات الأخرى، بل انعكاسات تلك الأصوات أيضًا. ومع ذلك، فإن الجانب الأكثر إزعاجًا للعازف الذي يجلس أسفلَ المسرح يقَع عندما تُحدِثُ الموجات الصوتية التي تتردَّد بين أرضية المكان والسقف رنينًا (ينتج الرنين عندما تُعزِّز الموجات الصوتية بعضها بعضًا وتنتج موجةً صوتية خالصة). إذا كان اختلاف ضغط الرنين قويًّا بالقرب من أُذن العازف، سيبدو أن مصدر ذلك الصوت عند مستوى الرأس، وليس في أيِّ مكانٍ آخر كما يكون الحال دائمًا. يمكن التخلُّص من هذا التشتيت المُزعِج أو تقليله من خلال تصميم ارتفاع مكان العزف ووضع مُمتصَّات الصوت فيها بشكلٍ صحيح.

تمتاز الكنائس القديمة بجُدرانها وأرضيَّاتها وأسقُفها الصلبة التي لها أصداء صوتٍ مُرتفعة تدوم لعدة ثوانٍ. تُرسِلُ موسيقى الأرغن التي تُعزَف في هذه الكنائس فرطًا من الأصوات التي ترتدُّ بين الأسطح الصلبة. على سبيل المثال، في كاتدرائية القديس بولس في لندن، يمكن أن يُدوِّي صدى الصوت لمدة ١٣٫٥ ثانية. أما الكنائس الحديثة، فيدوم صدى الصوت فيها لمدة أقصر بحيث يُسمَع الكلام الآتي من منبر الوعظ بوضوح، ويرجع قِصَر مدة دوام صدى الصوت إلى أن الجدران تمتصُّ الصوت بشكلٍ أفضل من الجدران الحجرية القديمة. ومع ذلك، طُلِيَت الجدران في كنيسة واحدة على الأقل حتى تعكس الأصوات بشكل أفضل، وهو ما يجعل صوت أرغن الكنيسة يبدو أكثر غلظة؛ ومِن ثمَّ أكثر شبَهًا بالأرغن الذي يُستخدَم في الكاتدرائيات.

(٦٢) صدى الهمس البعيد في الأروقة المُغلقة

تضمُّ بعض الأبنية المُغلقة غُرَفًا تسمح للهمس الذي يصدر في نقطة معينة بها بأن يُسمَع في نقطة أخرى تبعُد عن الأولى بمسافةٍ كبيرة. تقول الأسطورة إنَّ «أُذن ديونيسيوس» في سرقوسة كانت تتمتَّع بهذه الخاصية، فكان حديث السُّجناء الذين يقبعون داخل زنازينهم يصل بطريقةٍ أو بأُخرى إلى أذن الطاغية. وبالمثل، فإن القُبَّة التي تُغطي قاعة مجلس

النواب الأمريكي القديم في مبني الكابيتول بواشنطن العاصمة تعكس ولو همسة واحدة يتلفظ بها أحدهم في أحد جوانب القاعة واثقًا أنها لن تُسمَع، غير أنها تُسمَع على الجانب الآخر من الغرفة، وربما، لسُوء حظه، يسمعها عضو من الحزب السياسي المنافس.

إلَّا أنَّ الوضع الأكثر إحراجًا الذي يُقال إنه حدث في كاتدرائية جيرجينتي في مدينة صقلية الإيطالية، كان عندما اكتشف أحد مُرتادي الكنيسة أنه عندما يقِف في نقطةٍ مُعينة في الكاتدرائية، كان يتمكَّن من سماع الاعترافات التي يهمس بها الناس إلى القسِّ على كرسي الاعتراف القريب من الطرف الآخر من الكاتدرائية. كان من المُمتِع بالنسبة لهذا الشخص وأصدقائه سماع هذه الاعترافات حتى اليوم الذي تصادَفَ فيه جلوس زوجتِهِ على هذا الكرسي.

الجواب: من المُستبعَد أن تكون الأروقة التي يُسمَع بها صدى الهمس البعيد في الكثير من الأبنية المغلقة قد صُمِّمت عن عمدٍ كجزءٍ من المبنى لإحداث هذا التأثير، فهي تكون عادةً أماكن مغلقة ذات مقاطع عرضية بيضاوية الشكل بحيث يمكن للموجات الصوتية أن تتركز. يكون للمقطع العرضي البيضاوي بؤرتا تركيز، فإذا تحدَّث شخصٌ ما عند نقطة منهما، ستنعكس الموجات الصوتية من السقف وتتلاقى عند نقطة التركيز الأخرى، بافتراض أنَّ الأصوات المنعكسة من السقف لن تعُوق المصابيح أو الزخارف طريقها.

(٦٣) الأروقة التي يُسمَع بها صدى الهمس البعيد في كاتدرائية القديس بولس

تحتوي قُبَّة كاتدرائية القديس بول في لندن ممرًّا حول مُحيطها الداخلي يمكن للمُتفرجين منه رؤية الجزء الداخلي من القُبَّة وبعض أجزاء من الطابق الرئيسي أسفل الكنيسة، وهو عبارة عن ممرٍّ دائري يبلُغ نصف قطره حوالي ٣٢ مترًا. إذا وقفتَ على أحد جوانب الممر، بينما وقف صديقك على الجانب الآخر المُقابل له وتحدَّث إليك عبْر الفراغ الفاصل بينكما، فسيُضطرُّ إلى الصراخ تقريبًا حتى تتمكَّن من سماع ما يقول. أما إذا واجه الجِدار وتحدَّث هامسًا، فستسمع بكلِّ سهولة ما يقوله إذا كنتَ أنت أيضًا تقِف بالقُرب من الجدار. وفي الواقع، سيمكنك سماع ما يقوله إذا وقفتَ في أيِّ نقطةٍ أخرى على طول الممر؛ أي إنه ليس من الضروري أن تكون مُقابل صديقك؛ ومِن ثَمَّ فهذا التأثير ليس تأثيرًا مركزًا كما هو الحال في البند السابق. كيف يصل إليك كلام صديقك؟ ولماذا لا بُدَّ أن يُواجِه الجدار وأن يكون قريبًا منه حتى يصلك صوته؟ ولماذا يُسمَعُ ما يقوله بوضوح أكبر إذا تحدَّث همسًا؟

الجواب: تتعلق بعضُ الموجات الصوتية التي تخرج من فم صديقك بالجدار عن طريق الانعكاس المُتكرِّر أثناء انتقالها بعيدًا عن صديقك. (قد تنعكس الموجات الصوتية الأخرى مرةً أو اثنين، ثم «تُفقَد» أثناء انتقالها عبْر الجزء الداخلي من القبَّة.) تُسمَّى الموجات التي تتعلق بالجدار «الموجات السطحية» أو «موجات رايلي».

أظهر اللورد رايلي هذا التأثير التعلُّقي في عام ١٩٠٤ عندما قام بثَنْي شريط معدني طويل بحيث شكَّل جدارًا أفقيًّا نصف دائري، ثم وضع صافرةً في أحد أطرافه، وشعلة في الطرف الآخر. عملت الشُّعلة بمثابة كاشف صوت، إذ كانت تتمايَل بشكلٍ ملحوظ عندما كان يتسبَّب الصوت في اضطرابها. عندما كان يُنفَخ في الصافرة، كانت الشعلة الموضوعة في نهاية نصف الدائرة تتمايل. ولكن عندما أدخل رايلي حاجزًا ضيِّقًا بطول المُحيط الداخلي للشريط المعدني، لم تَعُد الصافرة قادرةً على جعْل الشعلة تتمايَل؛ إذ إنَّ الصوت الذي يتسبَّب في إحداث اضطراب في الشعلة لم يَعُد يأتي مباشرة من الصافرة إلى الشعلة، بل أصبح ينتقِل بطول الجدار نصف الدائري مُحدثًا انعكاساتٍ مُتكرِّرة، ليُشكِّل حزامًا ضيِّقًا من الصوت بطول الجدار. وعندما وضع الحاجز بجانب الجدار، حَجَبَ المَوجات التي تنتقِل بطوله. لشرْح الأمر بشكلٍ مُبسَّط، يُمكننا القول بأنَّ الموجات تتعلَّق بالجدار؛ لأنها تخضع للانعكاسات المُتكرِّرة التي تأخذها من نقطةٍ ما على الجدار إلى أخرى، ولكن في الواقع يُعتبَر انتقال الموجة أكثر تعقيدًا من ذلك بكثير. ممَّا لا شك فيه أن بوسع الموجات السطحية، في ظلِّ بعض الظروف، أن تنتقل بطول سطحٍ مستوٍ بحيث لا يُصبح التفسير المُتعلق بالانعكاسات المُتكررة له أي معنى منطقي.

تعتمد قُدرة الموجات الصوتية على التعلُّق بسطح مُنحَنًى أثناء انتقالها بطوله على الطول الموجي، تعمل الأطوال الموجية الأقصر بشكلٍ أفضل لأن النقاط التي تخضع فيها الأطوال الموجية لانعكاساتٍ مُتتالية تكون أقربَ من بعضها؛ ومِن ثَمَّ، يمكن للموجات الصوتية أن تنتقل حول ممرٍّ كاتدرائية القديس بول بنجاحٍ أكبر إذا كانت تتكوَّن من أطوالٍ موجيةٍ أقصر. تتطابق هذه الأطوال الموجية مع التردُّدات الأعلى الموجودة في صوت الهمس.

(٦٤) صدى الصوت الصادر من الجُدران والأركان وبساتين الأشجار

بكلٍّ بساطة، صدى الصوت هو انعكاس الموجات الصوتية إلى اتجاه مصدر الصوت الأصلي مرة أخرى. لقد سمعتَ على الأرجح صدى الأصوات المختلفة بالأروقة والأماكن المغلقة

الأخرى ذات الجدران الصلبة التي تعكس الصوت جيدًا. تمتاز بعض الأبنية بقُدرتها على عكس صدى الصوت بشكلٍ مُضاعف؛ حيث ينعكس الصوت من العديد من الأسطح ثم يعود إلى مصدره الأصلي، أو ينعكس باستمرارٍ بين سطحَين ثم يعود إلى مصدره الأصلي مرة أخرى. يمكن أن يُكَوِّن رُكن يقَع بين ثلاثة أسطح مُتعامِدة، كجدارَين وسقفٍ مثلًا، «عاكسًا خلفيًّا» يمكنه أن يجعل الصوت يرتدُّ بكفاءةٍ من سطحَين أو ثلاثة ويعود إلى مصدره مرة أخرى.

يمكن لبعض الأبنية إنتاج أصداء صوتٍ يصعُب للغاية تفسيرها. على سبيل المثال، إذا وقفتَ أسفل جسرٍ حجري يُشكِّل قنطرةً فوق الماء، يمكن أن يُنتِج التصفيق مجموعةً من أصداء الصوت التي تعتمد على الأرجح على ما هو أكثر من مجرَّد انعكاس الموجات الصوتية. يمكن في الواقع لأصداء الصوت أن تكون قريبةً من بعضها بما يكفي لتسمعها على هيئة نغمة موسيقية.

إذا تصادَف يومًا أن سمعتَ أصداء صوتٍ صادرة من بساتين الأشجار، لاحِظ ما يلي: يُعطي صوتٌ ذو تردُّدٍ عالٍ، مثل صوت امرأة تصرُخ، صدًى جيدًا، أما الصوت ذو التردُّد المُنخفض، مثل صوت زئيرٍ جهوري عميق فقد لا يُنتج أيَّ صدًى يُذكر. إذا غنَّيتَ نغمة موسيقية، أو حتى صفقتَ بيديك، فستجد أن صدى الصوت أعلى بمقدار أوكتاف واحد؛ أي إنَّ تردُّدَه يكون ضعف تردُّد الصوت الذي أصدرته. لماذا تُصدِر بساتين الأشجار هذه الأصداء المميزة؟

الجواب: تعتمد قدرة الصوت على الانعكاس من الأجسام المُحيطة، كالأشجار، على الطول المَوجي للصوت. عندما تكون الأطوال المَوجية أكبر من الجسم، ينعكس الطول الموجي الأقصر أفضلَ من الطول الموجي الأطول. ومِن ثَمَّ، عندما ترسل صوتًا له نطاق من الأطوال المَوجية المختلفة، ستنعكس الأطوال الموجية الأقصر من بستان الأشجار، مثلًا، بصورةٍ أفضل. وذلك لأنَّ الطول المَوجي الأقصر يتطابق مع التردُّد الأعلى؛ أي إن صدى الصوت الذي تسمعه سيشتمل على التردُّدات الأعلى أكثر من التردُّدات الأدنى، على عكس الصوت الذي أرسلته في الأصل. وهذا يعني أيضًا أن الأصوات ذات التردُّدات المنخفضة سينتُج عنها صدى صوت سيئ أو لن تُنتِج أيَّ صدًى من الأساس، بينما يمكن أن تُنتِج الأصواتُ ذات التردُّدات المرتفعة صدى صوتٍ ملحوظًا.

أما إذا أرسلت نغمةً موسيقية، فسيحتوي الصوت على مكوِّنين اثنَين على الأقل، ألا وهما: تردُّد أقل (الذي يُقال إنه «التردُّد الأساسي»)، وتردُّد آخر يبلغ ضعف الأول

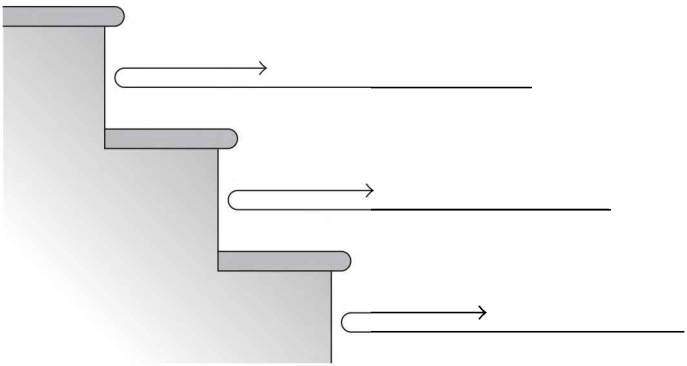
(الذي يُقال إنه «التردُّد التوافُقي الثاني»). يعكس بستان الأشجار التردُّد التوافُقي الثاني بصورة أفضل بكثيرٍ من التردُّد الأساسي نظرًا لكونه ترددًا أعلى. ومِن ثَمَّ، على الرغم من أنَّ الصوت الذي أصدرته يهيمن عليه التردُّد الأساسي، إلا أن صدى الصوت الذي تجده في المُقابل يُهيمِن عليه التردُّد التوافُقي الثاني؛ ومن ثَمَّ، يساوي تردُّد الصدى في المقام الأول ضعف تردُّد الصوت الأصلي.

(٦٥) الصدى الموسيقي الذي يصدُر من السلالم والأسوار

إذا صفَّقتَ بيديك بالقُرب من درَجٍ طويل أو سُور خشبي، فلماذا يكون صدى الصوت طويلًا مُمتدًّا، بدلًا من أن تسمع تصفيقةً واحدة؟ لماذا يقلُّ تردُّد الصدى مع الوقت؟ يمكن أن يُسمَع واحدٌ من الأمثلة الأكثر إثارةً للفضول لصوت «الصدى الموسيقي» أو «الصدى المُزَقزِقْ» (صوت يُشبِه صوتَ زقزقة طائر الكيتزال البراق) بعد التصفيق أمام مجموعة السلالم الشاهقة الموجودة بطول جانب معبد الكوكولكان الذي يقع في منطقة أطلال حضارة المايا في تشيتشن إيتزا بالمكسيك. تتكوَّن هذه السلالم المُنحدِرة من اثنين وتسعين درجًا حجريًّا يصعدها بعض السياح.

الجواب: يرجع التغيُّر في التردُّد الذي يحدُث أثناء الصدى المُنعكس من مجموعةٍ من السلالم الشاهقة إلى الزاوية التي تصِل بها الموجات الصوتية إلى درجات السُّلَّم المُتتابِعة، وليس التردُّدات الموجودة في نبضة الصوت (مثل الموجودة في التصفيق). ألقِ نظرةً على المنظر الجانبي لدرجات السلم، وافترض أن مسارات الصوت الآتي والصوت المنعكس أُفقية بالنسبة للدَّرَجات السُّفلية (انظر شكل ٣-٦)، ستحصل على نبضة عائدة من الدرجة الأدنى، الأقرب إليك، ثم نبضة عائدة ثانية من الدرجة التالية، ثاني أقرب درجة إليك، ثم ثالثة بعد ذلك بقليل، وهكذا. تتأخَّر كل نبضة عائدة عن سابقتها وذلك لأنَّ مسارها من وإلى درجة السلم ذات الصِّلة يكون أبعد. ومِن ثَمَّ، فأنت لا تُميِّز هذه النبضات كل واحدة على حِدة، بل تُميِّز التردُّد الذي تصل عنده. على سبيل المثال، إذا كان الزمن بين النبضات هو ٠,٠٠٢ ثانية، فستُميِّز تردُّدًا يبلغ حوالي ٥٠٠ هرتز.

أما بالنسبة للدرجات الأعلى، فيجب أن يتَّخذ الصوت الموجود في الصدى مسارًا مُنحرفًا، سواء في طريق الوصول إلى الدرجة أو في طريق العودة إلى حيثما تقِف. ومن



شكل ٣-٦: بند ٣-٦٥: انعكاسات الصوت من درجات السلم.

ثَم، ففي حالة الدرجات الأعلى يكون الفرق بين مسار الوصول والعودة من كلِّ درجةٍ إلى الدرجة التالية أكبر منه في حالة الدرجات السُّفلية؛ ومِن ثَمَّ يكون الفارق الزمني بين النبضات أكبر. على سبيل المثال، يُمكن أن يكون الزمن من النبضة إلى الأخرى ٠,٠٠٣ ثانية، وهو ما ستُميِّزه كتردُّد يبلغ حوالي ٣٣٣ هرتز، وهو أقلُّ من الصدى الذي تتلقَّاه من الدرجات السفلية.

يتشابَه تفسير الصدى الموسيقي الصادر من الأسوار الخشبية مع ما ذُكِر سلفًا، باستثناء أن الأجسام العاكسة (الأسوار) تكون مُنفصلة بعضها عن بعض أفقيًّا بدلًا من رأسيًّا.

إذا أُرسِلَت موجات صوتية عبْر صفٍّ من الأسطوانات تبعُد فيه كلُّ واحدة عن الأخرى بمسافة مُنتظمة، يمكن أن تخضع الموجات إلى التداخُل البنَّاء الذي تُعزِّز فيه الموجات بعضها بعضًا، والتداخُل الهدَّام الذي تلغي فيه تأثير بعضها بعضًا. ينقل صف الأسطوانات في حالة بعض التردُّدات الصوتية الصوتَ من جانبٍ إلى آخر، أما بالنسبة للتردُّدات الأخرى، فتقلُّ عملية انتقال الموجات إلى حدٍّ كبير. أُجريت هذه التجربة من خلال إرسال موجات صوتية عبر منحوتة منصوبة على هيئة عملٍ فني بسيط. تكوَّنت المنحوتة من أسطوانات عمودية رفيعة مصطفَّة على شكل مربع.

قصة قصيرة

(٦٦) الخصائص الصوتية للأبنِيَة العتيقة

على الأرجح لعِب الصدى دورًا في المُعتقدات الخرافية التي كان يؤمن بها القُدَماء. على سبيل المثال، رُسِمَت بعض النقوش الصخرية القديمة في أستراليا حيث لا تزال تسمع أصداء الصوت بوضوح. تسمع أفضل صدًى للصوت في بعض هذه الأماكن عندما تكون على مسافة ثلاثين مترًا من هذه النقوش، فيبدو صدى الصوت كما لو كان صادرًا من النقوش نفسها.

تُوجَد بعض فنون النقوش الصخرية القديمة الموجودة في الكهوف الأوروبية عند نقاطٍ مُعينة في الكهف تكون فيها أصداء الصوت قوية. ربما تكون تلك المواقع قد لعِبَت دورًا في الشعائر الخرافية التي مارسها الناس الذين صنعوا هذه النقوش، والذين ربما كانوا ينشدون ويغنون أو يقرعون الطبول هناك.

تمتاز القبور الصخرية الموجودة في بريطانيا وإيرلندا بأن لها تردُّدات رنَّانة تقع في نهاية النطاق المسموع؛ أي إنَّ الموجات الصوتية التي لها تردُّدات مُنخفضة مُعينة كان يُعزِّز بعضها بعضًا لتُكَوِّن موجات صوتية خالصة. مما لا شكَّ فيه أن هذه القبور لم تُبْنَ لخصائصها الصوتية، إلا أنه بمجرَّد بنائها، ربما يكون الناس قد اكتشفوا أنه عند قرْع الطبول بتردُّدٍ مُعين، يمكنهم أن يُحدثوا رنينًا داخل المقبرة. في العصر الحديث، حدث الرنين في ممرِّ الدخول الطويل الذي يؤدي إلى الحجرة المركزية في مَعْلَم نيوجرانج التذكاري بإيرلندا، إذ تمَّ ضبط مصدَرِ صوتٍ موضوعٍ في الحجرة المركزية بحيث يتطابق تردُّده مع أحد التردُّدات الرنَّانة للممر.

(٦٧) الغناء في الحمَّام

لماذا يبدو صوتك وأنت تُغنِّي في الحمَّام أفضل، أو على الأقل يبدو أفضل مقارنةً بأي مكان آخر؟ عادة ما يشعُر من يُغنِّي داخل كابينة الاستحمام بأن جودة الصوت أفضل؛ ومِن ثمَّ يغني بأريحية أكبر.

الجواب: تفسير الأمر أكثر تعقيدًا بكثيرٍ ممَّا كنتُ أعرفه عندما كتبتُ عن الغناء في الحمَّام قبل سنوات. في ذلك الوقت ذهبتُ إلى أنَّ السبب الرئيسي الذي يجعل صوتَ مُغنٍّ هاوٍ أفضل، هو أنه يُمكنه أن يُحدِث رنينًا داخل كابينة الاستحمام المُتعارَف عليها؛

ومِن ثمَّ يُعزِّز مدى ارتفاع الصوت عند التردُّدات الرنانة. عند إحداث الرنين، فأنت تضع عددًا صحيحًا من نصف الأطوال الموجية بين جدارين مُتوازيين أو بين الأرض والسقف. وعندما يحدُث هذا الأمر، تتداخل الموجات تداخُلًا بنَّاءً؛ أي يُعزِّز بعضها بعضًا، وهو ما يُعزِّز بدوره مستوى ارتفاع الصوت. ومِن ثَمَّ، يصبح الصوت مرتفعًا وواضحًا وربما حتى غليظًا أيضًا.

اقترح من قرءوا مقالي أسبابًا إضافية، الأول هو أنَّ جدران وأرضية كابينة الاستحمام — وربما سقفها أيضًا — عادة ما تكون مصنوعة من القرميد الصلب؛ ومِن ثمَّ تعكس الصوت جيدًا. أما إذا حاولتَ الغناء داخل خزانة فارغة لها نفس أبعاد كابينة الاستحمام، لن تكون انعكاساتُ الصوت على نفس الجودة وسيصعب إحداث رنين. (وإلى جانب ذلك، سوف تُخيف عائلتك إذا حاولتَ الغناء وأنت حبيس داخل خزانة.)

السبب الآخر هو أن الجدران القريبة تُعيد انعكاسات صوتك بسرعة، فتُصبح منغمسًا داخل صوتك. لذا، يمكنك سماع انعكاس نغمةٍ موسيقية وأنت ما زلتَ تُغنِّيها؛ ومِن ثمَّ يمكنك تعديل صوتك إذا وجدتَ أنك تنشز. وبطبيعة الحال يمكن أن يُغطي صوت ضوضاء سرَيان الماء إذا كان مرتفعًا على كلِّ أخطاء النشاز.

(٦٨) الجِيران المُزعِجون بالأعلى

يمكن أن يكون العيش أسفل جارٍ مُزعجٍ اختبارًا للصبر، ولكن ما هو سبب هذه الضوضاء عمومًا؟ هل بسبب صوت نقرات حذاءٍ ذي كعبٍ عالٍ على الأرضية الخشبية؟ هل يُمكن أن تقلَّ الضوضاء إذا كانت هناك سجادة، والتي من شأنها أن تمنع صوتَ نقرِ الكعْب العالي، في الشقة بالأعلى؟

الجواب: تُوصَف معظم أصوات الضوضاء المُزعِجة بصوت «ارتطام مكتوم» أو صوت «خبطة عالية» وربما يكون من المُدهِش أنَّ السبب وراء هذه الأصوات ليس شيئًا مثل نقْر الأحذية ذات الكعوب العالية على الأرض، بل الضوضاء ذات التردُّد المُنخفِض التي تنتُج عن خطوات شخصٍ يمشي على الأرضية. يتسبَّب وقع الأقدام المُتكرِّر في اهتزاز الأرضية مثل جلدة الطبلة بتردُّد يقَع بين ١٥ و٣٥ هرتز، وهو عند نهاية التردُّد المُنخفض لنهاية النطاق المسموع بالنسبة لمُعظم الناس، ويمكن للجار الذي يسكن بالأسفل أن يسمع تلك الضوضاء، بل ويشعر بها.

قد يسمع صوت نقْر كعب الحذاء على الأرضية، ولكن الطاقة التي تُنقَل إلى اهتزازات الأرضية ذات التردُّد المُنخفض، والتي تُشبه اهتزازات الطبلة، تكون أكبر بكثير. قد يزيد وضع سجادة على الأرضية الوضع سوءًا، وذلك لأنَّ سطحها الناعم يُمَكِّنُ وقْع الأقدام من تغذية اهتزازات الأرضية بالمزيد من الطاقة؛ ومِن ثَمَّ يكون الحلُّ الوحيد هو الانتقال إلى شقَّة بُنيَت عندما كانت الأرضيات والدعامات تُصنَعُ من الخرسانة المسلحة.

(٦٩) الرمال الطنَّانة والرمال الصافِرة

تُصَفِّرُ رمال بعض الشواطئ إذا مشيتَ عليها أو دفعتَها بيديك أو وضعتَ عليها طبقًا بزاوية حوالي ٤٥ درجة. وفي بعض الصحاري، تطنُّ الرمال بتردُّدٍ منخفض يبلُغ حوالي ١٠٠ هرتز، بحدَّة يصعب معها تبادُل الحديث أحيانًا. يُشبِّه بعض المُراقبين الصوت الذي تُصدره الرمال بصوتِ أزيز آلة الديدجيريدو الأسترالية، فكيف يمكن للرمال أن تُصدر صوتًا؟ ولماذا لا تُصدر كلُّ الرمال الموجودة على جميع الشواطئ والكثبان الرملية أصواتًا؟

الجواب: تتحرَّك الكثبان الرملية ببطءٍ عبْر الصحراء؛ لأنَّ الرياح التي تهبُّ على جانبها المُقابل للرياح تحمل حبيبات الرمال إلى أعلى ذلك الجانب، وتُرَسِّبُها إما على القمة أو أعلى الجانب الخلفي من الكثبان، يتسبَّب هذا النقل التدريجي لحُبيبات الرمال في جعل مُنحدَر الجانب الخلفي للكثبان كبيرًا للغاية بحيث يتعذَّر الحفاظ على اتِّزانه، ثم تنزلق طبقةٌ من الرمال على الجانب الخلفي إلى الأسفل، فتُقلل الانحدار. وهكذا، فإن عملية نقْل حبيبات الرمال من الجانب المُقابل للرياح إلى أعلى، وانزلاقها إلى أسفل على الجانب الخلفي تعمل في النهاية على تحريك الكثبان عبر الصحراء.

يُمكن أن يُصدِرَ انزلاق حبيبات الرمال إلى أسفل في بعض الكثبان الرملية صوتَ طنين، شريطة أن تكون حبيبات الرمال مُتماثلة في الحجم وفي تركيب السطح إلى حدٍّ ما. يمكن أن تنزلق الرمال إلى أسفل في أكثر من طبقة، يبلُغ سمك كلٍّ منها حوالي ٠٫٥ سنتيمتر. تهتزُّ طبقات الرمال أثناء هبوطها عموديًّا على سطح الرمال الأساسي وتعمل إلى حدٍّ كبير كجلدة الطبلة المُهتزة؛ وعندما يتوقَّف الانزلاق، تتوقَّف كذلك عملية إصدار الصوت. تتزاحم حُبيبات رمال الطبقة أثناء انزلاقها بعضها فوق بعض وتصطدِم بمعدَّل حوالي ١٠٠ مرة في الثانية الواحدة. يُصبح مُعدل عملية التزاحُم والاصطدام ومعدل اهتزاز طبقة الرمال ككل مُتَّسِقًا (يُقال إن كليهما تكوِّنان داخل حلقةٍ مُتكرِّرة من

التعزيز المُتبادَل). وهكذا، يبلغ تردُّد الصوت الذي تُصدره اهتزازات طبقة الرمال حوالي ١٠٠ دورة في الثانية الواحدة؛ أي ١٠٠ هرتز.

إذا كانت رمال الشاطئ تُصدِر صوتًا عندما يسير الناس عليها، فهذا يعني أنَّ وقْع الأقدام يتسبَّب في أن تنزلِق طبقات الرمال بعضها فوق بعض وتهتزُّ مُصدرةً موجات صوتية.

أما السبب وراء إصدار بعض الرمال صوتًا دون غيرها فيظلُّ غير مفهوم. لقد اكتسبَتْ بعض حبيبات الرمال على ما يبدو بعض السِّمات الخاصَّة التي تتَّضِح في قدرة الرمال على التحرُّك في طبقاتٍ رقيقة نسبيًّا، وتتسبَّب هذه الحركة في اهتزاز الطبقات الرملية. أما الاحتمال الأكثر إثارةً للاهتمام فهو أنَّ حبيبات الرمال تتمتَّع بقشرة خاصَّة. في الواقع، أظهرت التجارب التي أُجرِيَت على رمال الشاطئ الصافرة أن قُدرتَها على إصدار الصفير تختفي تدريجيًّا إذا شُطِفَت الرمال بالمِياه العذبة، وأنه لا يُمكنها استعادة قُدرتها على إصدار الصفير حتى ولو غُمِرَت في المياه المالحة مرة أخرى.

(٧٠) تَصدُّع وفوَران الجليد

ما الذي يُسبِّب أصوات التصدُّع التي نسمعها عندما نضع مُكعَّبات الثلج في شرابٍ بدرجة حرارة الغرفة؟ عندما يبدأ جبل جليدي في الذَّوَبان، فإنه يُصدِر صوتًا مختلفًا، «صوت طقطقة القلي» الذي يُعرَف لمن يَسمعونه من الغوَّاصات والسفن باسم «فوران الجليد»، فما الذي يتسبَّب في صوت الفوَران هذا؟

الجواب: تنتُج أصوات التصدُّع الصادرة من مكعب الثلج الموجود في سائل بدرجة حرارة الغرفة عن الضغوط داخل المُكعَّب التي تُحدثها الزيادة المُفاجئة في درجة الحرارة على سطح المكعب، إذ تتسبَّب زيادة درجة الحرارة في تمدُّد الجليد، وهو ما يضع السطح تحت ضغطٍ ويُمكن أن يُحدِث صدعًا بطول السطح. وعندما تتحرَّك أسطح الثلج الموجودة على جانبي الصَّدع فوق بعضها أو بعيدًا عن بعضها فإنها تُنتج تبايُنات في ضغط السائل أو الهواء، وتنتقل هذه التبايُنات من الصَّدع على هيئة موجات صوتية.

أما صوت فوران الجليد فهو نَوع مختلف من الانبعاثات الصوتية التي تحدُث فقط في حالة الثلج الغائم؛ أي الثلج ذو الجيوب الهوائية المُحتبِسة بداخله. عندما يذوب السطح الجليدي، يمكن للهواء أن يندفع خارجًا فجأةً من أحد الجيوب الهوائية، ويدفع الماء إذا كان السطح مغمورًا بالماء أو يدفع الهواء إذا لم يكن السطح مغمورًا. وفي كلتا الحالتَين،

ينتقل التبايُن المفاجئ من موقع تواجُد الجليد على هيئة موجةٍ صوتية، مما قد يتسبَّب في اهتزاز أجزاءٍ أخرى من الجليد. ويُعرَف الصوت الكُلِّي الذي يصدُر نتيجة لذلك بكلِّ تبايُناته العشوائية في الشدَّة باسم فوَران الجليد.

(٧١) السماع عبْر الجليد

لماذا يمكن لضحية انهيارٍ جليديٍّ أن يسمع صوتَ فريق الإنقاذ وهو مدفون داخل الجليد، ولكن لا يمكن لفريق الإنقاذ سماعه؟ قد يصرُخ الضحية أو يُطلِق النار من أحد المُسدسات — كما أفادت التقارير — كإشارة على وجود ناجين، لكن رغم ذلك لا يُسمَع أي من ذلك.

الجواب: عادة ما يكون انتقال الصوت عبْر طبقاتٍ من الجليد سيئًا، ومع ذلك يُفترَض أن يماثل انتقال الصوت من الضحية إلى أعلى تقريبًا انتقاله من الأعلى إلى الضحية بالأسفل. يرجع السبب الرئيسي في سماع الضحية للصوت الذي ينتقل من الأعلى إليه بالأسفل وعدَم سماع فريق الإنقاذ بالأعلى لصوت الضحية القادم من الأسفل هو وجود الضحية في بيئةٍ هادئة للغاية بالأسفل، على العكس من فريق الإنقاذ بالأعلى الذي قد يُحدِثُ ضجيجًا كبيرًا أثناء بحثِه عن ناجين عبْر الثلوج.

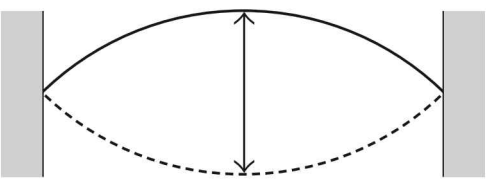
(٧٢) صوت المشي على الجليد

لماذا يَصِرُّ الجليد عندما تمشي فوقه؟ ولماذا من الأرجح أن يُسمَع صوت الصرير هذا بدرجةٍ أكبر عندما يكون الجليد باردًا للغاية؟

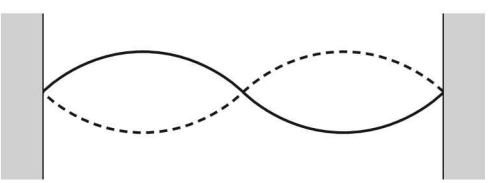
الجواب: إذا كانت درجة حرارة الجليد أقلَّ من سالب ١٠ درجات مئوية تقريبًا، فيمكن أن يتسبَّب الضغط إلى أسفل الذي ينتج عن وقْع الأقدام في انكسار بعض الروابط التي تلصق حبيبات الثلج ببعضها أو في أن تتداعى طبقات الجليد فجأةً ثم تنزلق بعضها فوق بعض. يتسبَّب التأثيران في اهتزاز الجليد لفترةٍ وجيزة، وهو ما ينتُج عنه صوت. إذا لم يكن الجليد باردًا بما فيه الكفاية، فتتكسَّر حبيبات الثلج بسهولةٍ أو تتداعى فجأة، وذلك لأنَّ الروابط التي تجمع بينها قد تكون أقلَّ أو أضعف ممَّا تكون عليه عندما يكون الجليد باردًا للغاية. قد يكون ضعفها نتيجة للذَّوَبان الجُزئي الذي يُسَهِّلُ حدوث أي انزلاق، وقد يكون الذوَبان أيضًا نتيجةً لامتصاص أشعَّة الشمس، خاصة على السطح العلوي للجليد. أو ربما يكون الضغط الذي تُحدِثه في بعض الأماكن أثناء المشي كفيلًا بإذابة الجليد.

(٧٣) هل يُمكنك تحديد شكل الطبلة من خلال الصوت الذي تُصدِره؟

نشر عالِم الرياضيات مارك كاك هذا العنوان وهذه الفكرة في عام ١٩٦٦، إلا أنه يمكن إعادة صياغة سؤاله كالآتي: هل يمكنك تحديد شكل طبلةٍ من خلال التردُّدات التي يمكن أن تصدُر من جلدة تلك الطبلة المستوية؟ أي هل يمكنك بعد سماع الكثير من تلك التردُّدات، أن تُخَمِّن عبرَ أيٍّ منها ما ستبدو عليه جلدة الطبلة في إحدى الصور؟ هل يمكنك تخمين أي من أجزائها سيهتزُّ وأي منها سيظلُّ ثابتًا؟



(أ)



(ب)

شكل ٣-٧: بند ٣-٧٣: أشكال الوتَر المُهتز. لقطتان للوتر، تظهر اللقطة (أ) النمَط الأبسط، واللقطة (ب) النمط التالي الأعقد.

الجواب: يُمكنك أن تُميِّز شكل الوتَر المُثبَّت بين دعامتين، إذ يتوافَق تردُّدٌ بعَينه مع نمَطٍ مُعين لاهتزاز الوتَر. على سبيل المثال، يتوافق أدنى تردُّد يمكن للوتَر أن يهتزَّ عنده مع نمَط مُعيَّن. تكون نهايات الوتر ثابتة وذلك لأنها مُثبَّتة على الدعامتَين، بينما يهتزُّ مركز الوتَر إلى أقصى حد، وتهتزُّ نقاطه المتوسطة بمقادير متوسطة (انظر شكل ٣-٧أ).

يتوافَق التردُّد الأعلى التالي مع النمط التالي الأعقد (انظر شكل ٣-٧ب)، وهكذا. يُقال إنَّ هذه التردُّدات هي «التردُّدات التوافُقية» للوتَر، بينما يُقال إنَّ أشكال الوتَر المُماثلة هي «النُّسُق الرنانة». ومِن ثَمَّ، بمُجرَّد سماع بعض هذه التردُّدات، يمكنك تمييز النسَق المماثل من خلال أيٍّ واحدةٍ منها. علاوة على ذلك، إذا كنتَ تعرف كثافة الوتَر ودرجة شَدِّهُ، يمكنك أيضًا معرفة طول الوتَر من خلال أدنى تردُّدٍ له.

لجلدة الطبلة المسطحة نُسُقٌ رنَّانة وتردُّدات توافُقية مُتشابِهة، إلا أن الأنماط تكون مُعقدة نتيجة لكونها ثنائية الأبعاد. يَسْهُلُ الربط بين نسَق الاهتزاز وشكل الطبلة بالنسبة لجلود الطبول الدائرية، أما بالنسبة لباقي أشكال جلود الطبول، فيكون الربط بين نسَق الاهتزاز (الأجزاء التي تهتزُّ والأجزاء التي تظلُّ ثابتة) وشكل جلد الطبلة صعبًا. يمكن تمييز شكل الطبلة العادية من خلال صوتها، أما الطبول الأكثر تعقيدًا، فلا يُمكننا دائمًا تمييز شكلها وذلك لأنه يمكن لطبلتَين مُختلفتين في الشكل تمامًا أن تُصدِرا نفس مجموعة التردُّدات التوافقية. ومع ذلك، حتى في هذه الحالات الصعبة، يُمكننا أن نُميِّز من أيِّ منطقة من جلدة الطبلة يصدُر الصوت؛ ومِن ثَمَّ يمكنك تمييز من أيِّ مكانٍ على الطبلة يصدُر الصوت حتى لو لم تتمكَّن من تمييز شكلها من خلال الصوت.

(٧٤) الموجات دون الصوتية

إذا وقفتَ أمام مُكبرات الصوت في حفلٍ لموسيقى الهيفي روك، فلن تشعُر بالراحة بكلِّ تأكيد. ولكن هل من الممكن أن يجعلك أحد التأثيرات الصوتية تشعُر بعدم الارتياح أو الغثيان حتى لو كنتَ في مكانٍ هادئ لا يُسمَعُ فيه صوت؟

الجواب: قد تتعرَّض في العديد من المواقف إلى «الموجات دون الصوتية» (أي الموجات الصوتية التي يكون تردُّدها أقلَّ ممَّا يمكن لأذنك تمييزه — أقل من ٣٠ هرتز) والتي قد تكون شديدة نسبيًّا. قد لا تهتز جراء التعرُّض لهذه الموجات، ولكن قد يتأثر إحساسك بالتوازُن بما يكفي حتى تشعُر بالاعتلال، أو قد يزعجك صليل الأغراض التي تُحيط بك جرَّاء تعرُّضها لهذه المَوجات. أحد الأمثلة الشائعة للموجات دون الصوتية هي تلك التي تُوجَد في مقصورة الركاب بالعديد من المركبات المختلفة. قد لا تتأثر عند التعرُّض السريع لهذه الموجات، ولكن ركوب السيارة لفترةٍ طويلة قد يجعلك تشعُر بـ «دوار السيارات». ويُصبح هذا الشعور بالاعتلال أسوأ إذا أحدثت الموجات دون الصوتية «رنينًا»؛ حيث تعزز بعضُ الموجات بعضًا وتنتج موجة خالصة داخل السيارة. فيمكن أن يحدُث الرنين

إذا كانت النافذة مفتوحة، وتكون الموجات دون الصوتية جزءًا من الاضطراب الذي يحدُث عندما تتحرك الحافة الخلفية لنافذة السيارة عبْر الهواء. يُحدِثُ أيضًا كلٌّ من مُحرك السيارة ودوران الإطارات على الطريق موجاتٍ دون صوتية تزداد شدَّتُها إذا زادت سرعة السيارة. ومع ذلك، فقد قلَّلت الديناميكا الهوائية المُحسَّنة للسيارات الحديثة وعزلها لضوضاء الطريق من مشكلة تأثير الموجات دون الصوتية.

يمكن أن تُولَّد الموجات دون الصوتية أيضًا عندما تمرُّ ريح قوية عبْر أركان أو حواف المباني وتنقسم إلى دوَّامات هوائية. يُمكن للتباين في ضغط الهواء أن يُنتِجَ موجةً دون صوتية قد تُصيب ساكني المبنى بالتوتُّر. (كما يمكن أن تُصدر الرياح أيضًا صوتًا مسموعًا، كما في صرير الرياح الشتوية التي تهبُّ حول المباني.) هنا يُمكن أن يصير التأثير أكثرَ حدَّةً مرة أخرى إذا أحدثت الموجات دون الصوتية رنينًا داخل إحدى غُرَف المبنى، كما يحدُث عندما تكون النافذة مفتوحة.

يمكن أن تؤثِّر الموجات دون الصوتية على مساحةٍ أكبر من ذلك بكثيرٍ عندما يتدفَّق تيار هوائي شديد على سلسلةٍ من الجبال ويتشتَّت مُحدثًا اضطرابًا. يقترح بعض الباحثين في الواقع وجود صلةٍ بين عملية إنتاج الموجات دون الصوتية ومعدلات الاكتئاب المُنتشِرة وزيادة معدلات الانتحار، إلا أن هذه الصِّلة لم تَثبُتْ بعد.

ونحن أيضًا نتعرَّض للموجات دون الصوتية الصادرة من الآلات (المصاعد على سبيل المثال)، وأمواج المُحيط والانفجارات والعواصف الهائلة، وحتى الانبعاثات دون الصوتية لدويِّ العواصف البعيدة يُمكنها أن تؤثر علينا. أصدر الانفجار البركاني الضخم الذي وقع عام ١٨٨٣ في كراكاتوا (بالقُرب من جاوة في جنوب شرق المحيط الهادئ) موجاتٍ دون الصوتية قوية عبر الغلاف الجوي. وُجهَت الموجات الناتجة بين سطح الأرض والهواء ذو الحرارة الأعلى في طبقة الستراتوسفير؛ حيث انحنت المسارات باتجاه سطح الأرض مرةً أخرى أثناء اختراق الموجات الصوتية للطبقة السُّفلى من الستراتوسفير، ثم انعكست لأعلى مرة أخرى نحوَ طبقة الستراتوسفير عند السطح، وهكذا. لم يتمكَّن أي شخص يقَع على مسافةٍ كبيرة من الجزيرة من سماع الجزء المسموع من الانفجار، ولكن مقاييس الضغط الجوي في جميع أنحاء العالم سجَّلت مرور الموجات دون الصوتية.

على الرغم من أنك قد تتعرَّض للموجات دون الصوتية معظم اليوم، فلا يكون لها تأثير يُذكَر، وذلك لأن شدَّتها عادةً ما تكون قليلة. وعلى الرغم من ذلك، إذا كنتَ تبحث عن

حجَّةٍ سهلة لعدم إتمام فروضك المنزلية، أو لتعثُّر علاقة عاطفية، أو لعدَم فوز فريقك المُفضَّل في كرة القدم، فيمكنك أن تُلقي باللوم على الموجات دون الصوتية.

(٧٥) أصوات نضوج الذُّرة

ما الذي يتسبَّب في الضوضاء التي تصدُر من حقول الذرة حتى في الليالي الهادئة نسبيًّا؟ (يُطلِق المزارعون على هذه الضوضاء اسم «أصوات نضوج الذرة».)

الجواب: ترجع الأصوات التي تصدُر من حقل الذرة إلى أوراق الذرة التي يلطم بعضها بعضًا حينما يهبُّ نسيمٌ عبْر الحقل أحيانًا، وتصبح الضوضاء أوضح كلما زادت قوة النسيم. كما تُصبح أوضح عندما يهبُّ النسيم على سيقان الذُّرة الأنضج، وذلك لأنَّ الأوراق تكون أكبر وأكثر تحرُّرًا وجفافًا، وهو ما يجعل سيقان النبات تتمايَل أكثر.

(٧٦) أصوات القماش

أمسك بقطعةٍ من القماش يبلغ طولها حوالي ٣٠ سنتيمترًا، بحيث يكون كلُّ طرفٍ في يدٍ وتكون القطعة مُتدلِّيةً بأريحية في المُنتصف، ثم اجذب يدَيك فجأةً بحيث تصير قطعة القماش مشدودةً على آخرها ولاحِظ الصوتَ الذي سيصدُر. لماذا تُصدر قطعة القماش صوتًا؟ ولماذا يكون التردُّد أعلى إذا كانت قطعة القماش أقصر؟

الجواب: عندما تُصبح قطعة القماش مشدودةً على آخرها بحيث تُصدِر صوتًا، فإنها تهتزُّ لحظيًّا مثل وتَر الجيتار بعد النقر عليه وهو ما يسبب تبايُنات في ضغط الهواء المُحيط. تنتقل هذه التبايُنات من قطعة القماش على هيئة موجةٍ صوتية، وهو الصوت الذي تسمعه صادرًا منها. كما هو الحال مع وتَر الجيتار، يعتمد تردُّد الصوت على طول المادة المُهتزَّة، فكلَّما كانت أقصر، كان التردُّد أعلى.

(٧٧) صفير قنوات صرْف الماء

إذا صفَّقتَ بيدَيك عند أحد طرفي قناةٍ لصرف الماء، فستسمع صدى «صفير»؛ أي يبدأ الصوت عند أعلى تردُّد ثم ينخفِض سريعًا حتى يصل إلى أدنى تردُّد. أُطلِق على أصداء الصوت المميزة هذه اسم «الصافرات». يمكنك أيضًا سماع صوت صافرةٍ إذا صفَّق أحد أصدقائك بيدَيه عند الطرف الآخر من قناة صرْف الماء. تصدُر صافرة مشابهة أحيانًا في

أحد ملاعب كرة المضرب، باستثناء أن التردُّد «يزداد» بمرور الوقت بدلًا من أن «ينخفض». لماذا تحدُث الصافرة؟ بعبارة أخرى، لماذا يتغيَّر تردُّد الصدى؟

الجواب: يُطلَق على صدى الصفير اسم «صفير قنوات صرف الماء»، ويمكن أن يُسمَع في العديد من أنواع الأنابيب المختلفة، بما في ذلك الأنابيب التي تكون قصيرةً بما يكفي لتُستخدَم في الفصول الدراسية. يحدُث صوت الصفير نتيجةً للرنين الذي يُعزِّز فيه بعض الموجات الصوتية بعضًا. ومع ذلك يُمكننا هنا الاكتفاء بشرحٍ مُبسَّط، لنفترِض أنَّ تصفيقة صديقك، التي تُصدر نبضة صوت، كانت بالقرب من مركز أحد طرَفي ماسورة الصرف، وأن طول الماسورة هو «ل». يمكن أن ينعكس الصوت من جانبَي الماسورة بطُرقٍ عِدة، على سبيل المثال، قد ينعكس الصوت على مسافة «ل/٢» (في منتصف الماسورة)؛ ومِن ثمَّ يُصدِر انعكاسًا واحدًا.

تتطلَّب المزيد من الانعكاسات أن يتَّخذ الصوت مسارًا مُتعرجًا داخل الماسورة؛ ومِن ثمَّ ينتقل الصوت بطول الماسورة بصورة أبطأ، وهكذا ستسمع صدى الانعكاس المُفرد أولًا، ثم صدى الانعكاس المزدوَج، وهكذا. التردُّد الذي تسمعه هو التردُّد الذي تصل به هذه الأصداء إلى أذنيك. يكون التسلسل الأول لأصداء الصوت، التي لا تتطلَّب سوى بعض الانعكاسات فقط، سريعًا، لذا تسمع تردُّدًا مُرتفعًا (أول جزء من صوت الصفير). أما التسلسل التالي لأصداء الصوت (المزيد من الانعكاسات) يكون أقلَّ سرعة، وبذلك تسمع التردُّد المُنخفض (الجزء الثاني من صوت الصفير). تُحدِّد الأصداء التي تنعكس مباشرة تقريبًا عبْر قُطر الماسورة الحدود القصوى؛ ومِن ثمَّ نادرًا ما تنتقل عبْر الماسورة.

كون الأمر بالمِثل تقريبًا إذا أنصتَّ لأصداء الصوت الناتجة عن تصفيقك أنت، إلا أنه في هذه المرة لا بُدَّ أن يعكس الصوت اتجاه انتقاله عند آخِر طرف الماسورة. يحدُث هذا الأمر سواء أكان طرف الماسورة مُغلقًا (بجدارٍ أو بغطاء) أم مفتوحًا. قد يكون هذا مفاجئًا بالنسبة للحالة الثانية؛ إذ عندما يصل الصوت إلى الطرف المفتوح من الماسورة، يؤدي انتقاله المفاجئ إلى الهواء الطلق في أن ينتقل جزء منه إلى داخل الماسورة مرة أخرى، وهنا نقول إن بعض الصوت «ينعكس» عند الطرف المفتوح؛ ولذا تكون نهاية بعض الآلات الموسيقية واسعةً لتُقلِّل من حدوث هذا الانعكاس؛ ومِن ثمَّ تسمح لمزيدٍ من الصوت بالتوجُّه ناحية الجمهور أو الميكروفون.

عندما تنزلِق كرة المضرب عبْر جدار أو أرضية الملعب، يمكن أن يحدُث الانزلاق على دفعات سريعة، وهو ما يجعلها بدورها تهتز. تتسبَّب الاهتزازات في إحداث تباينُات

في ضغط الهواء، وتنتقل هذه التبايُنات من الكرة على هيئة موجات صوتية، أو صوت صافرة. نظرًا لأنَّ الأسطح الصُّلبة في الملعب تعكس الصوت جيدًا، فإنك لا تسمع الصوت القادم إليك مباشرةً من الكرة فقط، بل أيضًا الانعكاسات القوية الآتية من الأسطح. في الواقع، ينعكس الصوت عدة مرات حول الغرفة (شريطة ألا يكون الجدار الخلفي به مساحة كبيرة مفتوحة للمراقبين)، وهكذا يمكنك سماع أصداء الصوت لمدَّة تصِل إلى ثانية أو ثانيتَين. يزداد التردُّد الذي تتعرَّض به لأصداء الصوت الآتية من حولك؛ ومِن ثمَّ يزداد التردُّد الذي تُميزه أُذناك كذلك.

(٧٨) صافرات لعبة سلينكي الزُّنبُركية

ثَبِّت أحد طرفَي لعبة سلينكي الزنبركية (لعبة تتكوَّن من زنبرك ملفوف، تصنعها شركة برووف سلينكي المحدودة تحت علامة تجارية مسجلة) إلى جدار، ثم اجذِب الطرف الآخر بعيدًا عن الجدار. بمجرَّد أن يصير الزنبرك مشدودًا، انقُر عليه بقلم رصاص واستمع إلى الصوت الذي سيصدر من طرف الزنبرك غير المُثبَّت إلى الجدار. ستسمع «صدى صافرة» حيث يبدأ الصدى من الطرف غير المُثبَّت بتردد عالٍ وينخفض بسرعة حتى يصير تردُّدًا منخفضًا. فما الذي يُسبِّب الصافرة؟

الجواب: تُرسِل نقرتُك على الزنبرك موجاتٍ «صوتية مُستعرضة» بطول سِلك الزنبرك، وهي ما تتسبَّب في اهتزاز السلك بصورةٍ عمودية على طوله، بدلًا من أن تتسبَّب في اهتزاز السلك بطوله كما تفعل «الموجات الطولية». تعتمد سرعة الموجة المُستعرضة التي تنتقل بطول السلك على تردُّد الموجة نفسها، إذ تنتقل الموجات ذات الترددات الأعلى أسرعَ من الموجات ذات التردُّدات الأدنى. عندما تنقُر على السلك، فإنك تُرسل نطاقًا واسعًا من التردُّدات، وعندما تصِل الموجات إلى الطرف البعيد للزنبرك، تنعكس ثُم تعود إليك مرة أخرى، بحيث تصِل الموجة ذات التردُّد الأعلى أولًا وتَتبعها الموجة ذات التردُّد الأدنى. لا يؤثر كَون السلك ملفوفًا على شكلٍ حلزوني على هذا الأمر.

(٧٩) الضجيج الصادر عن البنادق في المناطق الدائمة التجمُّد

تضمُّ الأوصاف التاريخية لعمليات استكشاف المناطق الدائمة التجمُّد في أمريكا الشمالية وروسيا على رواياتٍ غامضة عن صوت الضجيج الصادر عن البنادق. في واقع الأمر، يُفيد

أحد الأوصاف بأن الأيائل كانت لا تُلقي بالًا لصَوت الطلقات الصادرة عن بنادق حقيقية، ويُرجِعُ ذلك إلى كونها مُعتادة على هذا النوع من الضجيج. فما الذي يمكن أن يتسبَّب في صوت الضجيج هذا؟

الجواب: المناطق الدائمة التجمُّد عامرة بأوتادٍ جليدية تمتدُّ أسفل الأراضي المُتجمِّدة. تتعرَّض هذه الأوتاد للضغط وتكون بها عيوب كثيرة، مثل الفقاعات المطمورة. عندما تنخفِض درجة الحرارة بصورةٍ جذرية، يمكن أن يظهر شقٌّ عمودي في الوتد الجليدي، ثم ينتقل أفقيًّا بطول الوتد. إذا كانت سرعة انتشار الشقِّ عالية، فيمكن أن يُحدِثَ التصدُّع المفاجئ الذي يحدُث في النقطة الأمامية من الشقِّ تبايُنات في ضغط الجليد وفي الهواء المُحيط. تنتقل هذه التبايُنات في الضغط من الشقِّ المُتزايد على هيئة موجات صوتية تبدو وكأنها صوت طلقات نارية.

(٨٠) أصوات الشَّفَق القطبي والكُرات النارية

هل من الممكن سماع الشَّفَق القطبي؟ هل من الممكن سماع مشاهد الضوء المُبهر التي تحدُث على ارتفاعاتٍ شاهقة في خطوط عرض عالية؟ تفيد تقارير بعض المراقبين بسماع صوت طقطقةٍ أو حفيف أو صفير يبدو أنه يرتبط بالشَّفَق القطبي. هل يمكنك سماع أحد النيازك أثناء احتراقه في السماء؟ يَدَّعي بعض المراقبين أنهم يمكنهم سماع صوت النيزك إما قبل ظهوره أو في نفس وقت ظهوره، وهو ما يبدو غريبًا، وذلك لأنَّ النيازك تحترق على ارتفاعاتٍ شاهقة. يمكن أن يُسمَع دوي اختراق حاجز الصوت أحيانًا، إلَّا أنَّ هذا الأمر لا يُعدُّ غامضًا، وذلك لأن هذا الصوت يصل إلى أُذنَي المراقب «بعد» عبور النيزك. وإذا استمرَّ وجود النيزك لفترةٍ كافية ليصطدم بشيءٍ ما بالقُرب منك، أو يصطدم بك أنت شخصيًّا، فسيكون أيُّ صوتٍ صادر من النيزك واضحًا ومسموعًا.

الجواب: رغم أن إصدار الشَّفَق القطبي للموجات دون الصوتية أمر معروف ومُسجَّل منذ فترةٍ طويلة، فإنه لا تُوجَد تسجيلات موثَّقة لوجود أصوات مسموعة. من الصعب للغاية الاعتقاد بأنه يمكن لموجةٍ صوتية تحدُث في المنطقة المسموعة أن تنتقل إلى أسفلَ قاطعةً ١٠٠ كيلومتر من الغلاف الجوي على الأقل، ويظلُّ من الممكن سماعها. ومع ذلك، فقد أفاد عددٌ من الناس بسماع صوتٍ يرتبط بالشَّفَق القطبي. قد تكون بعض هذه الوقائع محض أوهام (حيث يُخطئ الناس تفسير الضوضاء المُحيطة التي يسمعونها أثناء مشاهدة الشيء، ويُقيمون صلةً مُتخيلةً بينهما). وقد تكون بعض هذه

الأصوات نتيجةً لعملية تنفُّس المراقب في درجات حرارةٍ منخفضة جدًّا (قد تصل إلى سالب ٤٠ درجة مئوية أو أقل)، وذلك لأنَّ بخار الماء الموجود في نَفَس الإنسان يُمكن أن يتجمَّد ثم يقع على الأرض مُصدرًا صوت حفيفٍ أو خشخشةٍ خفيفًا. ومع ذلك، يمكن أن يكون بعض هذه الأصوات حقيقيًّا إذا كانت هناك طريقة للربط بين الشَّفَق القطبي والحقل الكهربي الموجود على مستوى الأرض. عندئذٍ، قد يُصدر هذا الحقل تفريغًا كهربيًّا عند النقاط الحادَّة، مثل قمة إحدى الشُّجيرات أو طرف أحد القضبان المعدنية.

إذا سمعتَ صوت دويٍّ اختراق حاجز الصوت الصادر من أحد النيازك، فهذا الصوت ينتقل إليك بسرعة الصوت؛ أي إنك تسمع الصوت بعد اختفاء النيزك من مجال الرؤية. فكيف يمكنك سماع الصوت في نفس الوقت الذي ترى فيه النيزك بأي حالٍ من الأحوال، أو حتى قبل أن تراه؟ الطريقة الوحيدة التي يمكن معها حدوث ذلك هي إذا كان يُصدِر النيزك بطريقةٍ ما موجةً كهرومغناطيسية تصلك بسرعة الضوء. فيمكن لموجةٍ كهذه أن تتسبَّب في اهتزاز الأشياء من حولك، وإذا وقعَتْ هذه الاهتزازات عند تردُّدٍ في النطاق المسموع، فسيُمكنك سماع تلك الاهتزازات، وعندئذٍ ستكون تلك الأصوات مُرتبطةً بالنيزك. تُوجَد أدلة على أن الموجات الكهرومغناطيسية ذات التردُّد المنخفض يمكن أن تَصدُرَ عند مرور أحد النيازك عبْر الجزء العلوي من الغلاف الجوي.

(٨١) آلة البُلرورار الأسترالية

آلة البُلرورار هي عبارة عن قطعة من الخشب تُشبه النصل مربوط بأحد طرفَيها حبل. امسك بطرف الحبل الآخر، ولفَّ النصلَ الخشبي فوق رأسك بسرعة حتى تسمعَ صوت أزيزٍ أو جَأر (استُخدمت هذه الآلة في الجزء الثاني من فيلم «كروكودايل دندي»). فما الذي يُسبِّب هذا الصوت؟

الجواب: يدور النصل الخشبي للآلة أثناء حركته في الهواء، ويَلفُّ الحبل في اتجاه، ثم يُحرِّره، ثم يَلفُّه مرة أخرى في الاتجاه المعاكس. تُحدِث هذه الحركة الفوضوية عبْر الهواء دوَّاماتٍ تُشبه كثيرًا ما فعله سلك الهاتف في أحد البنود السابقة. تتسبَّب تبايُنات الضغط داخل هذه الدوَّامات في اهتزاز النصل، ويرجع الصوت الذي تسمعه إلى اهتزازات كلٍّ من الدوَّامات والنصل الخشبي.

الفصل الرابع

الحرارة

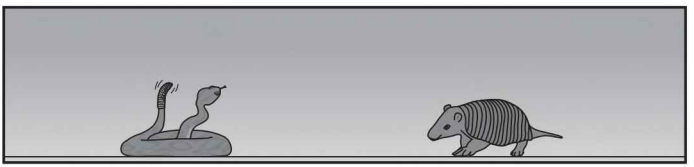
(١) الأفاعي الجرسيَّة المَيِّتة

تُمثل الأفاعي الجرسية خطرًا على الإنسان بسبب سُمِّيَّتها العالية. عادة ما تُقتَلُ هذه الأفاعي عندما يُكتَشَفُ وجودها في المناطق السكنية، إلَّا أن موت إحدى هذه الأفاعي لا يُقلِّل من خطرها على الفور. في الواقع، لقد ارتكب العديد من الناس خطأ الاقتراب من أفعى مَيِّتة للإمساك بها وإزاحتها بعيدًا. فعلى الرغم من أنه قد يكون مرَّ على موتها ثلاثين دقيقة، إلا أنها لا تزال بإمكانها مُهاجمة الشخص وغرس أنيابها في يدِه المدودة وإفراغ سُمِّها فيها. كيف يمكن لأفعى جرسية مَيِّتة أن تُهاجم أيَّ يدٍ تقترِب منها؟

الجواب: تعمل التجاويف الموجودة بين عينَي الأفعى وأنفها كأجهزة استشعارٍ ترصد الإشعاع الحراري. على سبيل المثال، عندما يقترِب فأر بالقُرب من رأس الأفعى الجرسية، يستثير الإشعاع الحراري المُنبعث من الفأر أجهزة استشعارها، وهو ما يتسبَّب بدَوره في أن تقوم الأفعى بردِّ فعلٍ مُنعكس تُهاجم فيه الفأر بأنيابها وتبثُّ سُمَّها فيه. ومِن ثَمَّ، يمكن للأفعى الجرسية أن ترصد الفأر وتقتُله حتى في الليالي غير المُقمِرة؛ لأنَّ هذه العملية لا تتطلَّب وجود ضوءٍ مرئي.

يمكن أن تتسبَّب اليد البشرية المدودة نحوَ الأفعى في نفس الفعل المنعكس، حتى لو كانت الأفعى قد ماتت بالفعل منذ فترة، إذ يُواصِل جهازها العصبي العمل لفترة. ينصح

أحد خبراء التعامُل مع الثعابين بأنه إذا كان عليك إزالة أفعى جرسية قُتِلَت مُؤخرًا، فعليك استخدام عصا طويلة بدلًا من استخدام يدَيك.



شكل ٤-١: بند ٤-١.

(٢) الخنافس كاشفة الحرائق

تُعرَف خنافس «ميلانوفيلا» صغيرة الحجم بسلوكٍ غريب، إذ تطير نحوَ حرائق الغابات وتتزاوَج بالقُرب منها، ثم تطير الإناث لتضع بيوضها تحت لحاء الأشجار المُحترقة. تُعدُّ هذه هي البيئة المثالية بالنسبة ليَرقات الخنافس التي تفقس من البيض، إذ إنَّ الشجرة لم يَعُد بإمكانها حماية نفسها من اليَرَقات من خلال الطرق الكيميائية أو مادة الراتينج الصنوبري. إذا كانت الخنفساء مُتواجِدة في مُحيط الحريق، فسيُصبح استشعاره سهلًا بكلِّ تأكيد. ومع ذلك، يمكن لهذه الخنافس استشعار حريقٍ كبير على بُعْد ١٢ كيلومترًا، فكيف تفعل الخنافس ذلك؟ الأمر الأكيد هو أنَّ الخنافس لا ترى ولا تَشُمُّ الحريق على مسافةٍ كهذه.

الجواب: تمتلك الخنفساء عضوَين كاشفَين للأشعة تحت الحمراء بطول جانبَي جسمها، ويحتوي كلٌّ عضو على حوالي سبعين جهاز استشعارٍ صغيرًا يُشبِه كلٌّ منها النتوء. يَتمدَّد جسم كروي داخل جهاز الاستشعار بمقدارٍ ضئيل للغاية وهو يمتصُّ ضوء الأشعة تحت الحمراء الصادرة من الحريق، ويضغط هذا التمدُّد إلى أسفل على أحد الخلايا الحسِّية. تعمل هذه الآلية حينئذٍ كآليةٍ لتحويل الطاقة من الأشعة تحت الحمراء إلى طاقة جهاز ميكانيكي. يمكن للخنفساء تحديد موقع الحريق عن طريق توجيه جسمها بطريقةٍ تجعل أعضاءها الأربعة المسئولة عن كشف الأشعة تحت الحمراء تتأثَّر بالأشعة الصادرة من الحريق، ثم تطير باتجاه الحريق بحيث تزداد استجابة هذه الأعضاء.

(٣) كيف يقتُل النحل دبورًا عملاقًا؟

يتغذَّى الدبُّور الآسيوي العملاق على النحل الياباني، لكن إذا حاول أحد هذه الدبابير اقتحام خلية من خلايا النحل، تُشَكِّلُ عدة مئات من النحل كُرةً محكمةً حول الدبور بسرعة لتُوقِفه (يُقال إنها تُكَوِّرُ الدبور). يموت الدبور في غضون عشرين دقيقة تقريبًا، على الرغم من أنَّ النحل لا يلدغه أو يعضه أو يسحقه أو يخنقه، فلماذا إذن يموت الدبور؟

الجواب: بعد أن يُشكِّل المئات من النحل الياباني كُرةً مُحكمة حول الدبور الضخم الذي يحاول غزو خليته، يرفع النحل درجة حرارة جسمه بسرعة من درجة الحرارة الطبيعية البالِغة ٣٥ درجة مئوية إلى ٤٧ أو ٤٨ درجة مئوية. إذا لم يفعل ذلك سوى عددٍ قليل من النحل، فلن تكون الطاقة التي ستنتقل إلى الدبور ذات أهمية، وذلك لأن معظم الطاقة الحرارية المُتزايدة للنحل سوف تتشتَّت بعيدًا. ولكن حين يكون الدبور مُحاصرًا داخل كُرة مُحكمة مُكوَّنة من مئات النحل، تزيد هذه الكرة نفسها من درجة الحرارة وتنتقل طاقة حرارية كبيرة إلى الدبور المُحاصَر. تكون درجة الحرارة المُرتفعة قاتلة بالنسبة له، ولكنها لا تكون كذلك بالنسبة إلى النحل.

(٤) لماذا تتكدَّس الحيوانات معًا؟

لماذا تتكدَّس حيوانات الأرماديلو (ربما العشرات منها) معًا ليلًا؟ ولماذا تتكدَّس البطاريق الإمبراطورية (ربما الآلاف منها) خلال فصل الشتاء في القارة القطبية الجنوبية؟

الجواب: الأرماديلو والبطاريق الإمبراطورية والعديد من الحيوانات الأخرى ذات الدم الحار تتكدَّس معًا خلال الطقس البارد حتى تبقى دافئة. على سبيل المثال، إذا ظلَّ أحد البطاريق الإمبراطورية وحده يمكن أن يفقد قدرًا كبيرًا من الطاقة الحرارية عن طريق عملية التوصيل الحراري (منه إلى الأرض)، والحمل الحراري (إلى الهواء، خاصة إذا كان الهواء يتحرَّك)، والإشعاع الحراري (إلى البيئة الباردة، بما في ذلك السماء). يمكن أن تهلَك طيور البطريق الوحيدة نتيجة لفقدان الطاقة في البيئة القاسية للقُطب الجنوبي التي يُمكن أن تصل درجات الحرارة فيها إلى ٤٠ درجة مئوية تحت الصفر وسرعة الرياح إلى ٣٠٠ كيلومترٍ في الساعة. يُصبح التكدُّس أكثر أهمية عند تكاثر طيور البطريق خلال فصل الشتاء، إذ يحتضِن الأب البيضة وحدَه حصريًّا تقريبًا، ويُحافظ عليها من التجمُّد عن طريق الإبقاء عليها مُتوازنة فوق قدَمَيه لعدة أشهر. لذا لا بدَّ أن يصوم الأب أثناء فترة

الحضانة، إذ إنَّ طعامه يكون موجودًا في الماء؛ ومِن ثَمَّ، مع عدم وجود أي مصدر للطاقة من الطعام، لا بُدَّ أن يبقى الأب ضمن مجموعة مُتكدِّسة من البطاريق وإلَّا سيدفعه فقدان الطاقة إلى التخلِّي عن البيضة ليذهب بحثًا عن الطعام.

عن طريق التكدُّس، تُقلِّل طيور البطريق (التي يصِل عددُها إلى عشرة طيور بطريق لكلِّ متر مربع) بدرجةٍ كبيرة من متوسط فقدان الطاقة الحرارية الذي ينجم عن الحمل الحراري والإشعاع، إلا أن البطاريق التي تقف على الحدود الخارجية من الحشد لا تزال تُعاني من فقدانٍ كبير للطاقة، ولكنها تظلُّ تستفيد من وجود الطيور المجاورة بالقُرب منها. إليكم طريقة أخرى لشرح هذا الأمر: إذا وضعتَ العديد من «الأسطوانات الدافئة المُفرَدة» في بيئةٍ باردة، فيمكن أن يكون إجمالي فقدان الطاقة الحرارية هائلًا، وذلك لأنَّ مساحة السطح الكلية التي تُفقَدْ فيها الطاقة كبيرة. ومع ذلك، إذا جَمَّعتَ هذه الأسطوانات معًا لتُكوِّن أسطوانة واحدة كبيرة، ستكون مساحة السطح الكليَّة أقل؛ ومِن ثَمَّ ستكون الطاقة المفقودة من خلال السطح أقل.

(٥) السير في الفضاء دون ارتداء بدلة فضائية

يفترِض بعض الباحثين أنه يمكن للإنسان أن يسير في الفضاء لفترةٍ وجيزة دون ارتداء بدلة الفضاء (كما فعل رائد الفضاء في فيلم «٢٠٠١: أ سبيس أوديسي»)، دون أن يموت. إذا كان رائد الفضاء يسير بعيدًا عن الشمس، فهل سيشعُر بالبرد؟ هل يُوجَد ما يُمثِّل خطرًا على حياة رائد الفضاء أكثر من مجرَّد نقص الأكسجين؟

الجواب: أحد الأسباب التي تجعل درجة حرارة الغرفة مُريحة هي أن الأشعَّة تحت الحمراء التي ترسلها إليك الجُدران والأشعة تحت الحمراء التي ترسلها أنت إليها بدَورك تكونان مُتساويتَين تقريبًا؛ ومِن ثَمَّ، تحصل على الطاقة بنفس المعدَّل الذي تفقدها به تقريبًا. إذا انخفض الإشعاع الحراري الذي يصل إليك بصورةٍ ملحوظة، فستشعر بالبرودة. وبالمثل، إذا حدَث أن سِرتَ في الفضاء السحيق بعيدًا عن المركبة الفضائية؛ حيث لا تُوجَد جدران تُحيط بك، فستشعر بالبرد الشديد بسرعة. سيبلغ معدَّل فقدانك للطاقة الحرارية حوالي ٨٠٠ واط، ومع ذلك، سيكون نقص الأكسجين مصدر قلقٍ أكبرَ بكثير.

وأيضًا سيُشكِّل تعرُّضك للفراغ مصدرَ قلق. عندما يكون الماء مكشوفًا في الفراغ، يتعرَّض للغليان أولًا (ويتبخَّر بعضه)، ثم يتجمَّد بعد ذلك. وبما أن جسدك يحتوي على الكثير من الماء و… حسنًا، ربما يكون من الأفضل أن نفكِّر في شيءٍ أقلَّ رعبًا.

(٦) سقوط بعض قطرات الماء على مِقلاة ساخنة ولَمْس الرصاص المصهور

إذا سُخِّنَت مقلاة إلى درجة حرارة أعلى من درجة غليان الماء ثم رُشَّت بعض قطرات الماء عليها، فستنتشِر القطرات وتظلُّ موجودة لمدة ثوانٍ فقط قبل أن تتبخَّر. ومن المُدهش أنه إذا كُرِّرَت هذه التجربة مرة أخرى على مقلاةٍ أكثر سخونةً (بدرجة حرارة أعلى من ٢٠٠ درجة مئوية) فستتجمَّع قطرات الماء على شكل خرزات وقد تدوم على حالها كما هي لعدَّة دقائق، فكيف يكون ذلك مُمكنًا والمقلاة أشدُّ سخونةً بكثير؟ يعرف هذا التأثير باسم تأثير «ليدنفروست»، نسبةً إلى يوهان جوتليب ليدنفروست الذي درس هذه الظاهرة في عام ١٧٥٦ (لم يكن عمل هيرمان بورهافا السابق في هذا المجال معروفًا بنفس القدر).

فأثناء تراقُص قطرات الماء الخرزية الشكل على سطح المقلاة الساخن، قد ترى القطرات الأصغر حجمًا تهتزُّ مكوِّنة أشكالًا شِبه هندسية، ستُظهر أي صورة ضوئية هذه الأشكال بكل سهولة. إذا كانت الاهتزازات ثابتة بما يكفي، يمكنك أن «تُجمِّدها» في مكانها عن طريق تعريضها لوامضٍ ضوئي باستمرار، أما القطرات الأكبر، فتتحرَّك مثل الأميبا البطيئة. وفي بعض الأحيان، سيُصدِر كِلا النوعَين من القطرات صوت طشطشةٍ عاليًا ونفخةً من بخار الماء، فما الذي يتسبَّب في هذه السلوكيات؟

هل لتأثير ليدنفروست علاقة بالعادة القديمة التي كان يقوم فيها الناس باختبار درجة سخونة المكواة عن طريق بلِّ أصابعهم باللعاب ثم لمسِها؟ لماذا لا يحترق الإصبع عندما يُلامس المعدن الساخن لفترةٍ وجيزة؟

اعتدتُ منذ عام ١٩٧٤ أن أُسلِّي طلَّابي بخدعة؛ إذ كنتُ أدسُّ أصابعي لفترةٍ وجيزة في الماء أولًا، ثم أدسُّها في رصاصٍ منصهر تبلغ درجة حرارته حوالي ٤٠٠ درجة مئوية. فكيف يُحافظ الماء على أصابعي؟ (لحماقتي، أهملتُ استخدام الماء في مرة من المرَّات، ولكنني أدركتُ الخطأ على الفور عندما لمستُ المعدن السائل المنصهر، فقد كان الألم شديدًا.)

قبل أن أكمل، لا بُدَّ أن أُحذِّر من أنَّ هذه التجربة في غاية الخطورة. كما هو واضح، يمكن أن تحترق إصبعي إذا لمست الرصاص المنصهر، وإذا كان الوعاء مائلًا فيمكن أن ينسكب عليَّ الرصاص المنصهر ويحرق جسدي بأكمله. ومع ذلك فهناك خطران آخران أقلُّ وضوحًا. إذا كان الرصاص قريبًا من نقطة الانصهار، فمن المُمكن أن يؤدِّي الوجود المُفاجئ لماء أبردَ بكثيرٍ وإصبع إلى أن يتصلَّب الرصاص الذي ستكون درجة حرارته

٣٢٨ درجة مئوية حول إصبعي، التي ستُصبح درجة حرارتها بالمثل بعد ثوانٍ قليلة. أما الخطر الثاني فهو أنه إذا كان الماء كثيرًا على الإصبع، فسيتبخَّر بعضٌ منه بقوةٍ شديدة بحيث يؤدِّي تمدُّده إلى تناثُر الرصاص المنصهر على وجهي. وقد عانَيتُ بالفعل من حروقٍ شديدة على وجهي وذراعيَّ جرَّاء هذه الانفجارات.

يظهر مثالٌ مُشابه لتأثير ليدنفروست في رواية روبرت روارك الأكثر مبيعًا «سَمثينج أوف فاليو»، إذ أجبرَتْ إحدى القبائل رجُلَين على لَعْق سكينٍ ساخنٍ للغاية لتكشف أي منهم يقول الحقيقة. كانت الفكرة وراء هذا الأمر هي أن الرجل الكاذِب سيكون لسانه جافًّا من الخوف؛ لذا سيحترِق لسانه، أما الصادق فسيكون لسانه رطبًا؛ ومِن ثمَّ لن يُصيبه أيُّ ضرَر. لم تكن تعلم القبيلة عن تأثير ليدنفروست بالاسم، ولكنها أدركَتْ مبادئ عمله.

إذا صُبَّ النيتروجين السائل على سطحٍ مستوٍ، فستتراقَص قطراتُه على السطح مثل تراقُص قطرات الماء على سطح المقلاة الساخن، وذلك على الرغم من أنَّ درجة حرارة النيتروجين تكون سالب ٢٠٠ درجة مئوية ويفترض أن يتبخَّر على الفور، إلا أنه يبقى كما هو. كيف يسمح تأثير ليدنفروست للنيتروجين بألا يتبخَّر؟

ولعلَّك شاهدتَ النيتروجين السائل مُستخدَمًا في تجربة علمية شهيرة؛ حيث تُغمَر فيه زهرة. وبعد أن تصِل الزهرة إلى درجة حرارة السائل، تُسحَب ثم تُصدَم بسطح الطاولة. تكون الزهرة المُجمَّدة هشَّةً جدًّا لدرجة أنها تتكسَّر إثر الاصطدام وتتناثَر على هيئة أجزاءٍ صغيرة في أنحاء الطاولة.

لسنوات اعتدتُ تقديم تجربة الزَّهرة في صفِّ الفيزياء ثم بأداءٍ مسرحي إلى حدٍّ ما، كنت أضع وعاء النيتروجين السائل على شفتي وأصبُّ كميةً كبيرة من السائل في فمي مع الحِرص على عدَم ابتلاعه. وبعد ذلك كنتُ أزفر من فوق السائل، فتخرُج سحابة دخانية كبيرة تُشبِه التِّنين منه. تكوَّنت السحابة الدُّخانية عندما مرَّ الهواء المُشبَّع بالرطوبة من رئتي فوق النيتروجين السائل وتكثَّفت بعض الرطوبة في الوسط البارد للنيتروجين مُكَوِّنَةً قطرات ماء جعلت السحابة الدخانية تظهر بوضوح، ولكن لماذا لم يتشقَّق لساني مثلما يحدُث للزهرة؟

مرة أخرى، ينطوي هذا الأمر على العديد من المخاطر، فقد كان من المُمكن أن تتجمَّد شفتاي، إذ أحيانًا ما تتجمَّد الشفتان عندما تلامِسان الوعاء المعدني، وتلتصقان بحافة الوعاء، وكنتُ سأعاني لاحقًا من تقرُّحاتٍ في هذه الأماكن التي تعرَّضت للتجمُّد. أما الأمر

الأكثر خطورة فيتمثَّل في الميل الطبيعي للبلْع عند وجود شيءٍ داخل الفم. إذا ابتلعتُ النيتروجين السائل، كان حلقي ومعدتي سيتضرَّران بشدَّة جرَّاء تعرضهما للسائل البارد لفتراتٍ طويلة أولًا، ثم إلى غاز النيتروجين البارد الذي يتبخَّر من السائل ثانيًا.

فُوجِئتُ بخطرٍ آخَر في آخِر أداءٍ لي لهذه التجربة، إذ تسبَّبت برودة السائل أو الغاز على ما يبدو في انكماش سِنَّتَينِ من أسناني بما فيه الكفاية حتى تشقَّقت مينا السِّنَّتَين. لم ألاحظ شيئًا في ذلك الوقت، ولكن خلال جلسة فحص الأسنان التالية، أخبرَني طبيب الأسنان أنه بعد الفحص الدقيق صارت هاتَين السِّنَّتَين تُشبهان خرائط الطُّرق وأقنعَني بأن أتخلَّى عن أداء هذه التجربة.

الجواب: عندما تقترِب قطرة ماء من سطحٍ معدني ساخن، ولكن درجة حرارته أقل من ٢٠٠ درجة مئوية، تنتشر القطرة على سطح المعدن ولكنها تتبخَّر سريعًا. أما عندما تكون درجة حرارة السطح المعدني أعلى من ٢٠٠ درجة مئوية، فلا تنتشر قطرة الماء على السطح. فبينما تقترِب القطرة من السطح المعدني، يتبخَّر جزء من الماء الموجود على السطح السُّفلي ويُحدِثُ وسادةً ضيقةً من بخار الماء تستقرُّ عليها باقي القطرة. تتجدَّد هذه الوسادة باستمرارٍ كلَّما تبخَّر المزيد من السائل الموجود في قاع القطرة. ومِن ثَمَّ، بما أنَّ القطرة لا تلامِس السطح المعدني، فلا تسخن بسرعة نتيجة للحمل الحراري عن طريق البخار والإشعاع الحراري الصادر من المعدن، على العكس مما يحدُث عندما تلامِس السطح مباشرة فتسخُن بسرعة. وهكذا يمكن لقطرة الماء العائمة هذه أن تظلَّ موجودة لفترة أطول.

عندما أدسُّ أصابعي الرطبة في الرصاص المنصهر، يتبخَّر بعضُ أو كل الماء الذي يُغطيه، ومِن ثَمَّ تصير أصابعي مَحميَّةً مؤقتًا بقفازٍ من البخار؛ إذ إنَّ البخار يُبطِّئ من انتقال الحرارة. إذا لامس الرصاص المنصهر بشرتي، فسيكون انتقال الحرارة سريعًا للغاية بحيث قد تؤدِّي لمسة وجيزة إلى الإصابة بالحروق. لو أنني لمستُ بأصبعٍ مُبتلَّة قطعةً صلبة من المعدن شديدة السخونة، فستكون مُلامستي لها بلا احتكاك نظرًا لطبقة البخار التي تتشكل حينئذٍ. أخبرَني أحد الحدَّادين أن انعدام الاحتكاك هو ما يدفعه إلى إلقاء قطعة معدنية بالِغة السخونة من يدِه حينما يلتقطها دون قصدٍ بيده المُبلَّلة بالعرَق؛ إذ إنه إذا انتظر حتى يشعُر بالألم كي يترُكها، فستأتيه إشارة الشعور بالألم بعد فوَات الأوان واحتراق يدِه بشدَّة.

عندما يُسكَبُ النيتروجين السائل على أحد الأسطح، كما هو الحال في فمي، يتبخر جزء من السائل بطول الجانب السُّفلي ويدعم السائل المُتبقي، وهو عادة ما يمنع أي اتصال مباشر مع السطح. بعدئذٍ، تُستنزَف الطاقة الحرارية ببطءٍ من السطح إلى السائل عن طريق الحمل الحراري والإشعاع، لكن ليس بنفس سرعة التوصيل الحراري الذي يحدُث عند الاتصال المباشر.

يحدث تأثير «معاكس لتأثير ليدنفروست» عندما تسقط قطعة معدنية بالغة السخونة في الماء، إذ إنَّ الماء الذي يُلامِس القطعة الساخنة أولًا يتبخَّر، ثم يُغطِّي المعدن ويؤخِّر عملية تبريده. عندما تنخفض درجة حرارة سطح المعدن إلى ما دون ٢٠٠ درجة مئوية، يبدأ الماء في ملامسة السطح ويغلي حتى يتبخَّر.

قصة قصيرة

(٧) تجربة ابتلاع مُروِّعة

في عام ١٧٥٥، هزَّت عاصفة صَيفية فنار إيديستون بالقُرب من مدينة بليموث الإنجليزية. كان هنري هول هو الحارس الليلي المُكلَّف بمُراقبة شموع الفانوس التي تُضيء المياه من حولها. عندما صعد الدَّرَج الضيق في تمام الثانية صباحًا ليفحص الشموع، اكتشف أن جمرةً شاردة قد أضرمت النار في السخام والشحم، الذي تجمَّع على سطح الفانوس الذي كان مصنوعًا من رقائق الرصاص التي تدعمها عوارض خشبية.

على الرغم من أنَّ هول حاول بكلِّ ما أوتي من قوة أن يُخمد النيران بالماء، إلا أن النيران سرعان ما اشتدَّت حتى صار وكأنه في قلب الجحيم، إذ ابتلعَتْ ألسنة النار العوارض الخشبية وأذابت الرصاص. بعدئذٍ، وبينما كان هول يُلقي بالمزيد من الماء ليُخمد الحريق، انهارت داعمات السقْف وسُكِبَ الرصاص المصهور عليه، فاحترق وجهه وذراعاه، كما أنه شعر أيضًا بألمٍ مُبرِّح في حنجرته وبطنه. كان فمُه مفتوحًا على ما يبدو بينما كان يُلقي الماء على النار آخر مرة.

انتشر الحريق إلى باقي الفنار، وهو ما دفع هول وعاملَينِ آخرَين إلى الخروج إلى العاصفة هربًا. عندما أُنقِذوا أخيرًا وأُعيدوا إلى الشاطئ، تمكَّن هول من إخبارهم بأنه قد ابتلع جزءًا من الرصاص المُنصهر، ولكنهم اعتقدوا أنه قد كان في حالة صدمة من المصيبة التي ألَّت به فحسْب، إذ كان في الرابعة والتِّسعين من عمره. طمأن الطبيب المحلي

هول، ولكنه ظلَّ مُتشككًا في روايته، فكيف يمكن لأيِّ شخصٍ أن يبتلِعَ الرصاص المُنصهر ويبقى على قيد الحياة؟

ولكن في الواقع، لم يبقَ هول على قيد الحياة لفترةٍ طويلة، فبعد اثني عشر يومًا بدأ يُعاني من التشنُّجات ومات بعد ساعاتٍ قليلة. حينما أجرى الطبيب تشريحًا لجثمانه، وجدَ قطعة بيضاوية من الرصاص تَزِن حوالي سبع أوقيات داخل معدته.

(٨) السير على الجمر المُشتعِل

قمتُ بالسير على الجمر المُشتعل كجزءٍ من محاضراتي في الفيزياء قبل أن يُصبح الأمر موضة رائجة في الولايات المتحدة بفترةٍ طويلة. كنت أعدُّ موقدًا من قطع الأخشاب العادية التي تُستخدَم في المدافئ، وأسمح للطلَّاب بحرْق الأخشاب حتى تُصبح جمرًا مُشتعلًا ذا لونٍ أحمر زاهٍ، ثم أجرف الجمر داخل حوض خشبي مُبطَّن بالصفائح المعدنية ومُغطًّى بالرمل. وبعد ذلك، كنت أحمل الحوض (أنا وأحد المساعدين) بفخرٍ إلى صفِّي. كنت أحاضر عن تأثير ليدنفروست (انظر بند ٤-٦)، وأثناء خلعي لجواربي وحذائي، كنتُ أشرح للطلاب بإيجازٍ كيف أن تأثير ليدنفروست قد يُساعد على حماية قدمَيَّ من الاحتراق أثناء سيري على الجمر. سرتُ على الجمر ثلاث خطوات، وعلى الرغم من أنَّني شعرتُ ببعض الحرارة وبأن قدَماي اتسَّختا بالرماد، إلا أنني لم أُصَب بالأذى.

كرَّرتُ هذه الحركة الخطِرة لمدة عامَين وكنت أزداد ثقةً في كل مرة. كانت ثقةً غير مُبررة، لأنني عندما سرتُ على الجمر في المرة التالية عانيتُ من حروقٍ شديدة، وكان الألم شديدًا لدرجة أنَّ دماغي أوقَفَ هذه المعلومة من الوصول إلى وعيي حتى أتمكَّن من إكمال مُحاضرتي التي تستغرق ٥٠ دقيقة، ولكنني حينما ذهبت إلى المشفى، عاد الألم وأغرقَني كالطوفان.

في بعض «ورش العمل» التي تحظى بالشعبية؛ حيث يُمكن للناس أن يتعلَّموا كيفية السير على الجمر المُشتعِل (غالبًا بعد دفع مبلغٍ كبيرٍ من المال)، يكون التركيز الأساسي على التفكير في «الأفكار الملائمة». هل يمكن أن تُقلِّل أي فكرة من انتقال الطاقة الحرارية إلى القدَمين؟ وإذا لم يكن الأمر كذلك، فما الذي يسمح بالسير الآمِن على الجمر؟ ولماذا تفشل هذه الخاصية أحيانًا، وهو ما يُجبِر الضحية على ألا يُعاني فقط من حروق شديدة، ولكن من احتمالية الإصابة بالالتهاب أيضًا؟

الجواب: على الرغم من أنَّني قلتُ في إحدى المرات إن تأثير ليدنفروست هو السبب الرئيسي للسلامة أثناء السير على الجمر، إلا أنَّ عالِم الفيزياء بيرني ليكيند أقنعَني في النهاية بأنَّ هناك شيئًا آخر أكثر أهمية من ذلك. حينما أضع إحدى قدميَّ على الجمر، تكون درجة حرارة سطحه مُرتفعة، ولكن لا تكون طاقتُه الحرارية كذلك. إذا كانت خطوتي قصيرة، فسيصل قدْرٌ قليل من الطاقة الحرارية إلى جلدي، ولذا قد لا تحترِق قدماي. ولكنني إذا أطلتُ الوقوف فستنتقل الطاقة الحرارية من داخل الجمر بكلِّ تأكيد إلى جلدي، ويُمكن أن تُصيبني حروق شديدة.

أما الجري فيُعتبَر تصرُّفًا أحمق لسببٍ عملي، وهو أنَّني قد أركل الجمر بحيث يسقط على مُقدِّمة قدمي ويظلُّ ملامسًا لجلدي لفترةٍ كافية تتسبَّب في احتراقه؛ لذا أكون حريصًا على السير بحرصٍ وبسرعة مُعتدِلة.

ولكن بالنسبة لتأثير ليدنفروست فهو خاصية أمان ثانوية. عندما مشيتُ فوق الجمر الساخن حرصت على أن تكون قدماي مُتعرِّقتَين، وقد ساعدني العرَق بثلاثِ طُرق. الأولى أنه أخمد سطح الجمرات الساخنة إلى حدٍّ ما، والثانية بأنه عمل على امتصاص بعض الطاقة الحرارية التي كانت في طريقي؛ والثالثة، أنه كان يتبخَّر في بعض المواضع ويوفر لي طبقة ليدنفروست تحميني لفترة وجيزة. قد تساعد أيٌّ من هذه العوامل إذا كانت خطوتي طويلة إلى حدٍّ ما، أو إذا كان الجمر شديد الحرارة. غالبًا ما أكون مُتوترًا للغاية؛ ومِن ثمَّ تكون قدماي مُتعرِّقَتَين بالفعل ... فيما عدا اليوم الذي كنتُ أشعر فيه بالثقة التامَّة وبأن نجاح التجربة أمر مُسلَّم به، وكان من الواضح أنَّني كنتُ بحاجة إلى الحماية الإضافية التي لا يمكن لقدَمي الجافة أن توفرها لي. في بعض ورش العمل المخصَّصة لتعليم السير على النار، يتم تحفيز المشاركين انفعاليًّا، وهو ما قد يجعل أقدامهم تتعرَّق، وغالبًا ما يُقادون للسير على عُشبٍ رطب نتيجة رشِّه بخرطوم الحديقة أو بفعل الندى قبل أن يسيروا على الجمر.

(اقترحتُ منذ فترة طويلة أنه حتى يحصل الطلاب على درجة الفيزياء، ينبغي ألا يكون الامتحان النهائي امتحانًا تحريريًّا، بل يصير إلزاميًّا أن يسير المُمتحِنون على الجمر الأحمر الساخن. فإذا فكَّر دارسو الفيزياء في «الأفكار الصحيحة»؛ أي إذا كانوا يؤمنون حقًّا بالفيزياء، فلن يُصيبهم أيُّ مكروهٍ ويمكنهم عندئذٍ الحصول على درجتهم الجامعية. لجعل الأمر أكثر سهولة، يُمكن أن يُسمَح في الامتحان بمُطالَعة أحد الكُتب أو الملاحظات، على سبيل المثال، يمكن أن يُسمَح للطلاب بأن يحملوا كتاب فيزياء عاديًّا ليساعدهم. كنت

دائمًا أحمل معي كتاب «الفيزياء» الأصلي لديفيد هاليداي وروبرت ريسنيك، باستثناء في ذلك اليوم المروع الذي كنتُ فيه على عجلةٍ من أمري ونسيتُ إحضار الكتاب معي؛ ومِن ثمَّ اضطررتُ لتعلُّم كيفية السير على جانب قدَمي لمدة أسبوعين خوفًا من أن تُصاب الأجزاء المُحترقة من قدمي بالالتهاب.)

قصة قصيرة

(٩) روايات السير على النار

في عام ١٩٨٤، حضرت مُراسِلة لإحدى محطَّات سان فرانسيسكو التليفزيونية ورشة عمل تُقام في نهاية الأسبوع لتعليم السَّير على النار بدعوة من أحد «الوسطاء الرُّوحيِّين». ادَّعى الوسيط الرُّوحي أنه لم يُصَب أي شخص بأذًى أثناء ورش العمل، إلَّا أن المُراسِلة عانت من حروقٍ من الدرجة الثانية عندما سارت على حوض من الجمر المُشتعِل طوله ثلاثة أمتار. أذيع الشريط الذي سجَّلتْه لما دار أثناء الورشة، بما في ذلك صراخها ألمًا، في البرنامج الإخباري للمحطة صباح يوم الإثنين التالي.

أيضًا في عام ١٩٨٤، نشر مُراسِل مجلة «رولينج ستون» قصةً عن ورش عمل يُقدِّمها أحد «المُعلمين الرُّوحيِّين» في كاليفورنيا والذي كان يُعَلِّم كيف يمكن لـ «التحكم العقلي» أن يزيل الحروق الناتجة عن السَّير فوق الجمر الساخن، إذا عزم المُشاركون على القيام بالأمر. في الواقع، نجا مُعظم المشاركين من الإصابة بالحروق عندما تمَّ تحفيزهم انفعاليًّا أولًا، ثم تعرَّضوا لاختبار السير على الجمر بعد ذلك. ادَّعَى أحد الأشخاص بعد ذلك أنه إذا تمكن من السيطرة على عقله بالكامل، فإنه يُمكنه النجاة حتى من «انفجارٍ نوويٍ مباشر»!

لحُسن الحظ، لم يكن ذلك الشخص موجودًا بعد ليلتَين عندما عرجت امرأة شابَّة مُصابة بإصابات في الدِّماغ والعمود الفقري بعُكَّازَيها فوق حوض الجمر، إذ يبدو أنها صدَّقَتْ كلام المعلم الروحي المعسول عن «التفكير في الأفكار الصحيحة» لتجنُّب الإصابة بالحروق. أشار مُراسِل مجلة «رولينج ستون» أن متوسط الوقت الذي استغرقه المُشاركون في السير على الجمر كان ١٫٥ ثانية، ولكن هذه الشابَّة استغرقت ٧ ثوانٍ ثم انهارت من شدَّة الألم، ولكنهم أخرجوها قبل أن تسقُط فوق الجمر وأبعدوها عن المكان. أمضت هذه الشابَّة اثنَي عشر يومًا في أحد المُستشفيات، إذ كانت تُعاني من حروقٍ بالِغة في قدمَيها.

(١٠) تجميد الماء وتبريده الفائق

كيف يتجمَّد الماء؟ لماذا يمكن أن تنخفِض درجة حرارته إلى ما دون درجة التجمُّد، بدرجات عديدة على الأرجح، دون أن يتجمَّد؟ يُقال إن هذا الماء السائل المُبرَّد قد تعرَّض لـ «التبريد الفائق».

الجواب: يحتاج الماء إلى «عامل تَنَوٍّ» حتى يتجمَّد؛ أي إنه يحتاج إلى ذرَّة غبار أو بعض الهواء المُذاب أو أي مادة أخرى حتى يبدأ تراكم جُزيئات الماء في شكل بلُّورة ثلجية. يتعلق سبب ذلك بالطاقة اللازمة لزيادة نصف قُطر إحدى الذرَّات الجليدية الأولية حتى يُصبح أكبر. إذا كان نصف القُطر الأوَّلي أصغرَ من نصف القُطر الحرِج، فستتطلَّب زيادته الكثير من الطاقة، وهو ما يعني أن حدوث هذه الزيادة سيكون غير مُحتمَلٍ.

إذا تكوَّن الجليد الأوَّلي على عامل تنوٍّ، فقد تكون الزيادة سهلةً وذلك لأن نصف القُطر قد يكون بالفعل أكبر من نصف القُطر الحرج. ومع ذلك، إذا كان الجليد يفتقر إلى أحد عوامل التنوِّي، فإن زيادته تعتمد على التقاء جزيئات الماء في اتِّجاهاتٍ مُعينة بالصُّدفة. يزداد احتمال حدوث هذا الالتقاء التصادُفي إذا بُرِّدَت جزيئات الماء إلى ما دون التجمُّد، بحيث تُصبح أقلَّ حركة؛ ومِن ثمَّ أكثر عُرضةً للتجمُّع والتشكُّل كمادة صلبة. لذلك، يمكن تبريد الماء تبريدًا فائقًا بوجود القليل من عوامل التنوِّي لقد بُرِّدَ الماء النقيُّ في حاوية نظيفة حتى وصل إلى درجة حرارة سالب ٢٠ مئوية قبل أن يتجمَّد، وعلى الأرجح تصل قطرات المياه الموجودة في السحاب إلى درجة حرارة سالب ٤٠ مئوية قبل أن تتجمَّد. ومع ذلك حتى ماء الصنبور العادي بعوامل تنوِّيه الوفيرة، قد لا يتجمَّد حتى تصِل درجة حرارته إلى بضع درجاتٍ تحت درجة التجمُّد.

حتى يتجمَّد الماء على مستوى السطح الذي يلامس فيه الماء الجليد، كما هو الحال في مكعب الثلج المُتجمِّد، فلا بُدَّ أن يفقدَ طاقته الحرارية في الماء أو من خلال الطبقة الجليدية التي تشكَّلَت بالفعل. إذا حدث فقدان الطاقة الحرارية من خلال التوصيل الحراري إلى الماء فائق التبريد، فإن السطح يميل إلى تكوين «جليد شُجيري» يتكوَّن من تفرُّعاتٍ جميلة تُشبه شكل نبات السرخس عبْر الماء فائق التبريد. أما إذا حدث فقدان الطاقة الحرارية من خلال التوصيل الحراري عبْر الجليد المُتشكِّل بالفعل، فسيميل السطح الذي يلامس فيه الماء الجليد إلى أن يكون مُستويًا. وإذا تجمَّدت نقطة واحدة بعَينها على السطح أسرع من باقي السطح، فستشكِّل نتوءًا يزيد المسافة عبْر الجليد. ومِن ثَمَّ، سيتباطأ التجمُّد عند النُّتوء حتى يواكبه باقي السطح في سرعة التجمُّد، وبعد ذلك يُصبح السطح مُستويًا.

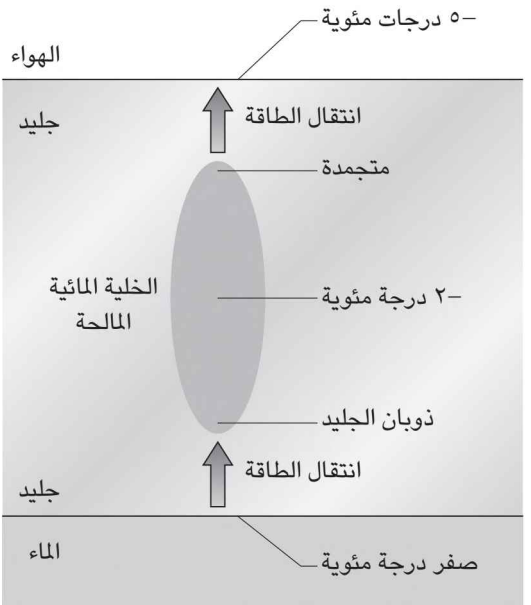
(١١) تناول الجليد البحري

يعلم الناس الذين يعيشون بالقرب من البحر في أقصى الشمال أن جليد البحر الذي تجمَّد حديثًا يكون شديد المُلوحة بحيث يستحيل أكله، أو إذابته كي يُشرَب، غير أنَّ الجليد البحري الأقدم عمرًا يكون صالحًا لذلك. كما أنهم يعلمون أيضًا أن بإمكانهم أن يُسرِّعوا من عملية تحويل الجليد من غير مُستساغٍ إلى مُستساغ إذا أُخرِج الجليد الذي تجمَّد حديثًا من المياه، خاصة في أشهُر الربيع أو الصيف الدافئة. لماذا يُصبح الجليد أقلَّ ملوحة في الطقس الأدفأ حين يكون من المُنتظر أن يُقلِّل التبخُّر من كمية الماء الموجود داخل مُكعَّبات الثلج بحيث يجعل الثلج الباقي أشدَّ مُلوحة؟

الجواب: عندما تتجمَّد مياه البحر، يُضغَطُ الملح (والشوائب الأخرى) داخل الخلايا بدلًا من أن يصير ضِمن هيكل البلورة الجليدية. وبما أن هذه «الخلايا المالحة» يمكن أن تكون مُترابطة، يخرج المحلول المالح ببطءٍ من الجليد. إذا ارتفعت درجة حرارة الجليد، كما يحدُث عندما يُستخرَج الجليد من البحر إلى الشاطئ ويُترَك في ضوء الشمس، تتَّسِع خلايا المحلول المِلحي ويزيد معدَّل الرشح.

بالإضافة إلى الرَّشْح عبْر الخلايا المُترابطة، تهاجر الخلايا في اتجاه درجات الحرارة الأعلى. إذا كان الجليد جزءًا من لَوحٍ جليدي يُغطي الماء، يكون هذا الاتجاه نحو الأسفل وذلك لأنَّ قاع الغطاء (عند السطح الذي يُلامِس فيه الماء الجليد) يكون عند نقطةِ التجمُّد بينما يُمكن أن يكون الهواء الخارجي (عند السطح الذي يُلامِس فيه الهواء الماء) أقلَّ بكثيرٍ من نقطة التجمُّد.

في الخلية المالِحة التي تظهر في شكل ٤-٢، يكون الجزء العلوي من الطبقة الجليدية عند درجة حرارة الهواء سالب ٥ درجات مئوية، والجزء السُّفلي من الطبقة عند نقطة التجمُّد البالغة صفر مئوية، والمياه المالحة الموجودة داخل الخلية عند درجة سالب ٢ درجة مئوية. لا يكون الماء الداخلي مُتجمِّدًا؛ لأن الملح يُقلِّل النقطة التي يتجمَّد عندها الماء (تتعارَض جُزيئات الملح مع قُدرة جزيئات الماء على أن تُحافظ على نفسها ثابتةً داخل هيكل البلورة الجليدية). يذوب الجليد الموجود أسفل الخلية تدريجيًّا لأنَّ الطاقة الحرارية تُوَصَّلُ من قاع الطبقة الجليدية إلى أعلى. تتجمَّد المياه الموجودة أعلى الخلية تدريجيًّا لأنَّ الطاقة الحرارية تُوَصَّلُ من القاع صعودًا إلى الجزء العلوي من الطبقة الجليدية. وبهذه الطريقة، تُهاجر الخلية إلى أسفل، وعندما تصِل إلى قاع الطبقة، تُطلِق ملحَها في الماء الموجود أسفل الطبقة المُتجمِّدة. وبذلك، تتخلَّص الطبقة الجليدية تدريجيًّا من ملحِها.



شكل ٤-٢: بند ٤-١١: خلية مالحة تتحرك للأسفل عبْر إحدى الطبقات الجليدية إلى الماء بالقاع.

يرتبط انتقال الطاقة في قاع الخلية بالنتائج المفاجئة التالية: إذا وُضِعَ مكعب من الثلج (من الماء النقي) درجة حرارته سالب ١ مئوية في مياه شديدة الملوحة درجة حرارتها سالب ١ مئوية، فسيذوب مكعب الثلج على الرغم من أن درجتي حرارتهما مُتطابقتان. لشرح هذه النتيجة، لنفترض أنَّ الملح يُقلل من نقطة تجمُّد المياه المالحة إلى سالب ٢ درجة مئوية، لنُفكِّر الآن في جُزيئات الماء الموجودة عند سطح المكعب. ستكون تلك الجزيئات أدفأ قليلًا من نقطة التجمُّد المنخفضة للمياه المالحة المجاورة؛ لذا عادةً ما تغادر المكعب. أما الجزيئات الموجودة في المياه المالحة بجوار المكعب، فتكون أبردَ قليلًا من نقطة التجمُّد العادية في الجليد النقي للمُكعَّب، لذا تميل إلى الانضمام إلى المكعب. ومع ذلك، تمنع جزيئات الملح اتحادَهما عن طريق ربط جزيئات الماء. (سيتأيَّن جُزيء الملح في الماء، ثم تتجمَّع جزيئات الماء حول الأيُونات كما يتجمَّع الأطفال حول شاحنة المُثلَّجات.) ومع مغادرة جُزيئات الماء للمكعب وعدم إضافة أيٍّ منها، يذوب المكعب.

(١٢) معدلات تبريد الماء الساخن والدافئ

كانت أكثر المقالات التي كتبتُها لمجلة «ساينتيفيك أميريكان» إثارةً للجدل تتعلق بسؤال قديم هو: إذا وضعْتَ كمياتٍ متساوية من الماء في حاوياتٍ مفتوحة مُتطابقة الشكل، وكانت درجة حرارة الماء في كلٍّ حاوية تختلف عن الأخرى، إحداها ساخنة جدًّا والأخرى أبرد، فأيَّ ماء سيُكوِّنُ الجليد أولًا عندما يُوضع في نفس البيئة الباردة؟ من المُدهِش، في بعض الظروف، أن الماء الساخن هو ما يُكَوِّنُ الجليد أولًا.

كانت النتيجة معروفة لأرسطو وللناس الذين يعيشون في مناخاتٍ باردة. ومع ذلك، سَخِرَ العلماء إلى حدٍّ كبيرٍ من صحَّة تلك النتيجة حتى ستينيَّات القرن العشرين عندما سأل أحد الطلاب التنزانيِّين، ويُدعى إي بي إمبيمبا، مُدَرِّسه بالمدرسة الثانوية عن سبب تجمُّد خليط المثلَّجات بسرعة أكبر عندما يوضع في المُجَمِّد وهو ساخن، عنه حين يُوضَع وهو في درجة حرارة الغرفة. لم يُصدِّق المعلم الأمر إلَّا حين أجرى إمبيمبا التجربة على الماء، وتُعرَف تلك النتيجة الآن باسم تأثير إمبيمبا.

لماذا يمكن أن يبرد الماء الساخن أسرع ويتجمَّد في وقتٍ أقلَّ من كمية مُساوية من الماء الدافئ (أو حتى الفاتر في بعض الأحيان)؟

الجواب: يرتكز أحد الاعتراضات على صحة تلك الظاهرة على الحسِّ المنطقي السليم. إذا كانت عيِّنة الماء «أ» أسخنَ من عيِّنة الماء «ب» ومع ذلك فإنها هي التي تفوز بسباق تكوين الجليد أولًا، فلا بدَّ إذن من أن تصل العيِّنة «أ» إلى درجة حرارة العينة «ب» في وقتٍ ما. وإذا كانت العيِّنتان مُتطابقتَين، ألن تبردا بنفس المعدل من درجة الحرارة الواحدة التي كانتا عليها؟ أحد أخطاء هذه الحجَّة هي أننا لا نستطيع تعيين درجة حرارة واحدة لأيٍّ من العيِّنتَين لأنَّ كلَّ عينةٍ منهما يكون لها نطاق من درجات الحرارة المختلفة داخل الماء. ومِن ثَمَّ، يتطلَّب تأكيد أو رفض تأثير إمبيمبا بحثًا أكثر تعمقًا.

في الواقع، لم يتم الوصول إلى حجَّة مُقنعة تؤكد صحة الظاهرة أو تدحضها. على سبيل المثال، قد تُغيِّر تبايُنات تدفق الهواء أو درجة الحرارة داخل المُجَمِّد من معدل التبريد من تجربةٍ لأخرى، وهو ما قد يُعطي بيانات غير موثوقٍ فيها بحيث يمكن من خلالها تفسير تأثير إمبيمبا بشكلٍ خاطئ، لذا نحتاج إلى القيام بالعديد من التجارب في ظروفٍ خاضعة للضبط الدقيق. نجح عددٌ من الباحثين الذين حاولوا استيفاء هذا الشرط

في أداء تجربة تأثير إمبيمبا في ظروفٍ خاضعة للضبط الدقيق، ولكن دون أن يتَّفِقوا على السبب الذي أدَّى إلى نجاح التجربة. إليكم بعض النقاط التي ذكروها:

(١) يحدُث فقدان أكبر للطاقة والكتلة في عملية التبخُّر التي تحدُث في حالة الماء الساخن. وإذا تمَّ التخلص من التبخُّر من خلال تغطية الحاويات، يبدو أن تأثير إمبيمبا يختفي. (ومع ذلك، قد يظلُّ موجودًا في ظروفٍ خاصةٍ حتى من دون وجود تبخُّر.)

(٢) يخضع الماء لتغيُّرات غريبة في الكثافة بينما يبرد نزولًا من درجة ٤ مئوية حتى نقطة التجمُّد؛ فعلى العكس من معظم السوائل، يتمدَّد الماء أثناء تلك المرحلة الأخيرة من انخفاض درجة الحرارة. ولذا، عندما تنخفِض درجة حرارة إحدى عيِّنات الماء إلى أقلَّ من ٤ درجات مئوية، تكون الأجزاء الأبرد أخفَّ وزنًا؛ ومِن ثمَّ ترتفع، بينما تكون الجُزيئات الأدفأ قليلًا أكثر كثافة، ومِن ثَمَّ تغُوص إلى أسفل. يجلب هذا الاختلاط الماء الأدفأ قليلًا إلى أعلى بطول جُدران الحاوية وإلى السطح العلوي المكشوف، ممَّا يسمح له بفقدان الطاقة الحرارية. تُشير التجارب إلى أنَّ هذا الاختلاط يكون أكثر وضوحًا عندما يكون الماء عند درجة حرارة أعلى. ومِن ثَمَّ، قد تصل المياه الساخنة أصلًا إلى نقطة التجمُّد أولًا، ويرجع ذلك إلى حدٍّ كبير إلى سرعة اختلاط وتبريد السائل في هذه المرحلة الأخيرة.

(٣) يبرد الماء «برودة فائقة» (تحت نقطة التجمُّد) قبل أن يبدأ فجأة في تشكيل الجليد. تصل المياه الأبرد إلى درجة التبريد الفائق عند درجة حرارة أقل، على العكس من الماء الذي يكون ساخنًا بالأساس؛ ومِن ثمَّ يستغرق الأول وقتًا أطول لتشكيل الجليد.

(١٣) المياه التي تُجمِّدها السماء

في بعض المناطق التي لا تُستخدَم فيها المُجَمِّدات بشكل شائع، يُصنَع الثلج عن طريق ترك وعاءٍ ضحل من الماء في الهواء الطلْق حتى صباح اليوم التالي. يُدعَم الوعاء أو يُعزَلُ بطريقةٍ ما عن الأرض. ستتجمَّد المياه بلا شك إذا انخفضت درجة حرارة الماء تحت درجة التجمُّد، ولكن في الليالي الصافية قد يتجمَّد الماء حتى إذا ظلَّتْ درجة حرارة الهواء أعلى من نقطة التجمد. فما الذي يُسبِّب حدوث التجمُّد في مثل هذه الليالي؟

الجواب: يُمكنك اعتبار السماء في الليالي الصافية كسطحٍ واحدٍ درجة حرارتُه أقلُّ من نقطة تجمُّد الماء. يحدث خلال الليل تبادل للأشعة تحت الحمراء بين السطح والماء. في البداية، يبعث الماء الذي تكون درجة حرارته أعلى من نقطة التجمُّد إشعاعًا أكثر ممَّا

يُمتصُّ من السماء، وهكذا يبرد. إذا كانت درجة حرارة الهواء الموجود حول الماء ليست أبعدَ بكثيرٍ من نقطة التجمُّد، فقد يفقد الماء طاقةً حرارية كافية من خلال عملية الإشعاع هذه حتى يتجمَّد. يجب عزْل الوعاء عن الأرض بحيث لا يُمكن للأرض توفير الطاقة الحرارية من خلال التوصيل الحراري بحيث تمنع التجمُّد.

(١٤) حفظ الخضراوات المخزونة باستخدام حوضٍ من الماء

عندما كانت ليلة شتاء قاسية تؤثر على منزل جدَّتي في تكساس، كانت تقلق بشأن جِرار الفواكه والخضراوات المُخزَّنة في قبو العواصف بالفِناء الخلفي. ولحماية جِرارها، كانت تسحب حوضًا كبيرًا إلى القبو ثم تملؤه بالماء. كيف يمكن لِمثل هذا الأمر أن يساعد في حماية الجِرار من التجمُّد والانفجار؟

الجواب: ستَحُول كمية الماء الكبيرة دون انخفاض درجة حرارة القبو إلى ما دون الصفر؛ أي درجة تجمُّد الماء العادية. عندما بدأ الماء في التجمُّد، أطلق كميةً كبيرة من الطاقة التي حافظت على درجة حرارة القبو في حدود درجة صفر مئوية. كانت المحاليل المائية الموجودة في جِرار حفظ الخضراوات والفاكهة ذات نقاط تجمُّدٍ أشدَّ انخفاضًا إلى حدٍّ ما لأنها كانت خليطًا من السوائل المختلفة؛ ولذلك لم تتجمَّد. يمكن أن تنخفض درجة الحرارة في القبو إلى ما دون الصفر، وتتعرَّض الجِرار للخطر فقط إذا تجمَّد حوض الماء بالكامل، وهو أمر غير مُرجَّح حدوثه بين عشيَّةٍ وضحاها. اعتاد السائقون الذين يُدرِكون أنَّ مشعاع السيارة يفتقر إلى ما يكفي من مُضادَّات التجمُّد بحيث يمنع التجمُّد عند حدوث موجةٍ باردة مفاجئة؛ أن يتَّخذوا تدابير مُشابِهة بحيث يضعون حوضًا من الماء بالقرب من المِشعاع عند إغلاق المرأب ليلًا؛ ومِن ثمَّ لا يتجمَّد المِشعاع.

(١٥) رشُّ البساتين لمنع تجمُّدها

عندما يُهدِّد الصقيع بساتين الفاكهة في ولاية فلوريدا (تكون درجات الحرارة أقلَّ من سالب ٢ درجة مئوية تقريبًا)، تُرَشُّ النباتات بالماء الذي يُشكل طبقةً رقيقة من الجليد فوقها، ولكن كيف يُمكن أن يحافظ هذا الأمر على النباتات من التجمُّد؟

الجواب: لا ترجع الحماية إلى طبقة الجليد التي تتكوَّن على النباتات؛ فهي لا تعزل الهواء البارد عن النباتات، بل تأتي الحماية ممَّا يحدُث للماء بعد أن يهبطَ ويستقرَّ على

النباتات؛ إذ يبرد الماء حينئذٍ ويصل إلى نقطة التجمُّد ثم يتجمَّد. تتطلَّب كلتا العمليتَين أن يُطلِق الماء طاقة حرارية إلى النباتات بحيث يمكن لجُزيئات الماء أن تُبطِّئ من حركتها الحرارية أولًا، ثم تُحبَسُ داخل الهيكل البلوري للجليد. يمكن للطاقة التي نُقلت إلى النباتات، ثُم إلى الهواء، أن تحافظ على درجة حرارة البُستان ما بين سالب ٢ وصفر درجة مئوية، ممَّا يسمح للنباتات بالبقاء على قَيد الحياة.

رشُّ البساتين أمر صعب لأنه إذا كان هناك نسيم محسوس، أو إذا كانت رطوبة الهواء منخفضة، يمكن أن يُفسِد الرشُّ النباتات سريعًا. السبب وراء ذلك هو أن الماء عادةً ما يتبخَّر من القطرات وهي تطير في الهواء. وبما أن التبخُّر يتطلَّب الكثير من الطاقة، تنخفض درجة حرارة القطرات إلى نقطة التجمُّد (أو حتى إلى أقل من ذلك في حال كانت القطرات باردة برودة فائقة) قبل أن تصل إلى النباتات. قد تتجمَّد القطرات جُزئيًّا وهي في الهواء أو تتجمَّد فور ارتطامها بالنبات. في كلتا الحالتَين، تُنقَلُ طاقة أقلُّ بكثيرٍ إلى النباتات، ويمكن أن تنخفض درجة حرارة البستان إلى أقلَّ من سالب ٢ درجة مئوية؛ ممَّا يؤدي إلى موت النباتات.

يمكن لمُزارِع البستان أن يعرِف من الجليد الموجود على النباتات ما إذا كان الرشُّ يساعد النباتات أم يؤذيها. إذا نُفِّذَ الأمر بشكلٍ صحيح، تنتشر قطرات الماء على النباتات قبل أن تتجمَّد وتُكوِّن طبقةً من الجليد الصافي. أما إذا لم يُنَفَّذ الأمر بشكلٍ صحيح، فستتجمَّد القطرات المُتجمِّدة جزئيًّا بشكل فردي على النباتات وتُكوِّن جليدًا أبيض اللون وغير صافٍ نتيجةً لتشتُّت الضوء على جميع الحواف التي تفصل بين القطرات المُتجمِّدة. وبطبيعة الحال، عندما يُهدِّد صقيع مُتجمِّد أحد البساتين بين عشيةٍ وضحاها، يقضي المزارع ليلتَهُ يُراقب ويقيس درجات الحرارة ودرجة شفافية الجليد بدلًا من النوم والراحة.

(١٦) إلقاء الماء الساخن في الهواء الشديد البرودة

إحدى وسائل التسلية الجديدة لمن يعيشون في القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) هي إلقاء الماء المُغلى في الهواء عندما تكون درجة حرارة الهواء سالب ٤٠ درجة مئوية أو أقل. لماذا يُصدِر الماء «صوت تشقُّق»، كما لو أنه يحتجُّ على درجة الحرارة المنخفضة؟ لماذا يمكن أن يُصدِر استنشاق الهواء البارد صوتَ رنين؟

الجواب: عندما يُلقى الماء في الهواء فإنه يتكسَّر إلى قطرات، وإذا كان الهواء شديد البرودة، تتجمَّد القطرات وتتكسَّر أثناء طيرانها في الهواء، وتكون الضوضاء المُركَّبة لتكسُّر القطرات هي صوت التشقُّق الذي يُسمَع. يمكن أن يَصدُر من التنفُّس صوتُ رنين لأن رطوبة الماء الموجودة في الزفير يمكنها أن تتجمَّد في الهواء. ومع ذلك، لا أعرف ما إذا كان الصوت يحدُث بسبب التشقُّق أم بسبب اصطدام الجليد بالأرض.

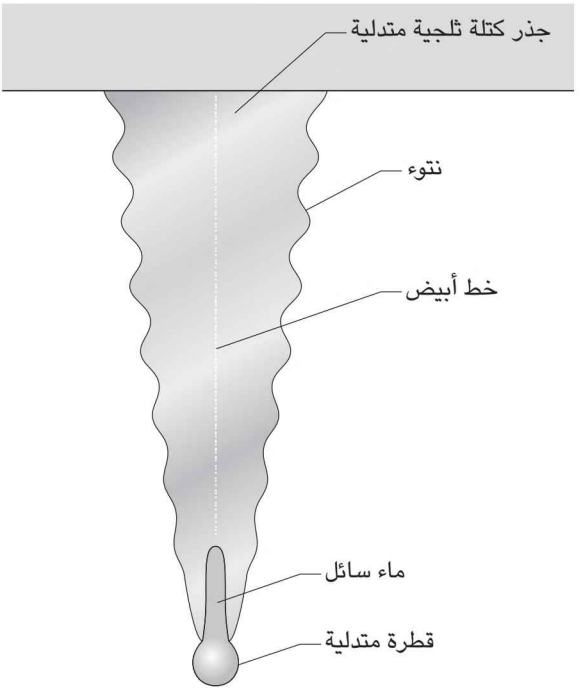
(١٧) الكُتَل الثلجية المُتدلِّية

لماذا يبلغ عرض طرف الكُتَل الثلجية المُتدلِّية على شكلٍ مخروطي بضعة مليمترات فقط؟ لماذا يمتدُّ عمود ضيِّق من السائل إلى أعلى بطولِ مركز أي كتلة ثلجية مُتدلِّية (لا تزال في طور) النمو والتكوُّن (شكل ٤-٣)؟ ما الظروف التي يخضع فيها الماء للتجمُّد؟ وكيف يتمكَّن من التجمُّد آخِذين في الاعتبار وجوده معزولًا في مركز الكتلة الثلجية؟ لماذا يمتدُّ خطٌّ أبيض بطول المحور المركزي للكتلة الثلجية المُتدلِّية؟ لماذا تتكوَّن أضلاع ثلجية أفقية على طول الجانب؟ لماذا تكون بعض أجزاء الكتلة الثلجية المُتدلِّية صُلبة، بينما تكون الأخرى إسفنجية هشَّة بحيث يمكن خرقُها بسكين جيب بسهولة؟ لماذا تكون بعض الكُتَل الثلجية المُتدلِّية مُلتويةً أو مُتشابكة؟

الجواب: يُوجَد الكثير من التساؤلات حول الكُتَل الثلجية المُتدلِّية، ومن المُثير للدهشة أنه لم يُجَب عن كلِّ هذه الأسئلة بشكلٍ وافٍ، ولكن إليكم ما أفهمه عن الأمر.

تبدأ الكُتَل الثلجية المُتدلية في التكوُّن عندما يتسرَّب الماء من داعمٍ مُرتفع، مثل المِزراب الموجود على أسطح المنازل، ويُشكل قطرة متدلية. قد تتجمَّد القطرة بالكامل، أو ربما سطحها فقط، مكوِّنًا قشرةً رقيقة حول السائل المُتبقِّي. ومع تزايد تسرُّب الماء إلى الهيكل وتجمُّده، ينمو الهيكل الثلجي إلى أسفل وإلى الخارج.

يمكن أن يُحفَظ السائل داخل القشرة الثلجية بفضل التوتُّر السطحي، الذي يرجع إلى قوى الجذب بين جُزيئات الماء. يمكن أن يتجمَّد السائل فقط إذا حدَث التوصيل الحراري للطاقة الحرارية إلى أعلى بطول الكتلة الثلجية المُتدلِّية حتى «أساسها» (قمَّتها). لا يمكن أن تُفقَد الطاقة الحرارية أفقيًّا من خلال القشرة؛ وذلك لأنَّ كلا جانبَيها (عند سطح السائل وعند سطح الهواء) يكون لهما نفس درجة الحرارة؛ أي نقطة تجمُّد الماء. وفي ضوء عدم وجود اختلافٍ في درجة حرارة سماكة القشرة، لا يمكن توصيل الطاقة الحرارية من خلال القشرة.



شكل ٤-٣: بند ٤-١٧: بِنيَة كتلة ثلجية مُتدلِّية.

عندما يتجمَّد الماء الداخلي، يخرج الهواء الذائب من المحلول ويُكوِّن فقاعاتٍ تَعْلَق بعد ذلك داخل الثلج بطول المحور المركزي حيث يتجمَّد السائل في النهاية. يمكن لهذه الفقاعات الفردية أن تُشتِّت ضوء الشمس، والمُركَّب الناتج من الضوء المُشتَّت الذي يخرج منها يُنتِج الخطَّ الأبيض الذي يمتدُّ بطول محور الكتلة الثلجية المُتدلية.

على الأرجح يبدأ تكوُّن الأضلاع الثلجية على امتداد جانب الكتلة الثلجية المتدلية بفعل الاختلالات العارِضة في تدفُّق الماء إلى أسفل على الجانبَين. وبمجرد تكوُّن هذه الأضلاع فإنها تنمو مُتفرعةً إلى الخارج أسرع من التجاويف المتوسِّطة لسببَين، وهما أنها تكون مُغطَّاة بطبقةٍ من الماء أرقَّ من تلك التي تُغطِّي التجاويف، كما أنها تبرُز في الهواء البارد أكثر ومِن ثَمَّ تكون أكثر عرضةً له. لهذَين السببَين من الأرجح أن يتجمَّد الماء على تلك

الأضلاع أسرعَ من الماء في التجاويف. عادةً ما يتجمَّد الماء في التجاويف ويُصبح عبارة عن شبكةٍ من الماء الثلجي الإسفنجي الذي يمكنك أن تُدخِل فيه شفرة سكين.

إذا بدأ السائل الذي يُغلِّف الكتلة الثلجية المُتدلية في التجمُّد (عندما يكون الهواء باردًا وإمدادات المياه قليلة)، يتجمَّد السطح الخارجي من الطبقة أولًا ويحبس مؤقتًا باقي السائل أسفلَ قشرةٍ من الجليد. عندما يتجمَّد الماء، فلا بدَّ أن يتمدَّد. وعلى الكتلة الثلجية المُتدلية يدفع التمدُّد السائلَ من خلال القشرة الثلجية في مناطق مختلفة. وبينما يخرج السائل ويتجمَّد في هذه المناطق، فإنه يُكوِّن أشواكًا قصيرة على الكتلة الثلجية المُتدلية.

إذا ضربت الرياح إحدى الكُتَل الثلجية المُتدلية أثناء تكوُّنها، فستصبح ملتويةً ومتشابكة، أما إذا نمَتْ على فرع شجرة يتدلَّى تدريجيًّا جرَّاء ضغط وزن الكتلة الثلجية المُتدلية عليه، فقد تنتهي الحال بالكتلة مقوَّسةً ومائلة بشكلٍ ملحوظ. كما يمكن للثلوجُ المُتساقطة والذَّوبانُ غير المُتساوي أن تُشوِّه الشكل المثالي للكتلةَ الثلجية المُتدلية.

إذا تشكَّلت الكُتَل الثلجية المُتدلِّية على أحبال الغسيل أو أسلاك الهواتف أو خطوط الطاقة أثناء المطر المُتجمِّد، فقد تكون المسافات التي تفصل بينها منتظمة وتبلُغ بضعة سنتيمترات. ربما يعود هذا النمط الدوري إلى مَيل الغطاء المائي الأوَّلي إلى تقليص مساحة سطحه عن طريق إعادة تنظيم شكله مكونًا شكلًا خرزيًّا. تُعيد أي موجة تصادُفية تنظيم شكل الكتلة والتوتُّر السطحي، ثم تسحب الماء حتى يتجمَّع على هيئة خرزات تفصل بينها مسافات تُقارب الطول الموجي لتلك الموجة التصادُفية، ثم تنمو تلك الخرَزات وتُصبِح كُتَلًا ثلجية مُتدلية.

(١٨) السدود الثلجية التي تتكوَّن على الأفاريز

يمكن أن يتكوَّن سدٌّ ثلجي في الطقس البارد بطول أحد الأفاريز ويعُوق التدفق السُّفلي للماء ممَّا يؤدي إلى تجمُّعه. لماذا يتكوَّن السدُّ الثلجي؟ ولماذا يمكن أن يُحدِث تجمُّع الماء ضررًا كبيرًا داخل المبنى؟ لماذا تميل تلك الكُتَل الثلجية المُتدلِّية الضخمة للتكوُّن على هذه المباني؟

الجواب: تتكوَّن السدود الثلجية على الأسقُف المُنحدِرة فوق الغُرَف العُليا التي تستمدُّ دفْأها من الطاقة الحرارية التي تفقدها الغرف بالأسفل. يُمكن أن تذيب الغُرَف العُليا الجليد والثلج الموجود على السطح. وإذا سال الماء الذائب من الجليد أو الثلج على إفريزٍ بارد، فيمكن أن يتجمَّد عليه بدلًا من أن يجفَّ على السطح، ثم ينمو بعد ذلك

الثلج بطول السطح. يكون السطح مقاومًا للماء ما دام أنه يمكن للماء أن ينساب عليه ويتساقَط منه. ولذلك عندما يُحتَجَزُ الماء خلف سدٍّ ثلجي، يمكن أن يتحرك الماء إلى أعلى عبْر الألواح ثم إلى أسفل بطول الجزء السفلي من خشب السطح الذي لا يكون مُقاومًا للماء. يمكن بعدئذٍ أن يتسرَّب الماء إلى الأسفل على سقف إحدى الغُرَف أو بطول الجدار ويُفسِد اللَّوح الجصي وطلاء الجدار.

يمكن للسقف الذي يميل إلى تكوين سدود ثلجية أن تتكوَّن عليه أيضًا كُتَل ثلجية مُتدلِّية ضخمة، ولكن بدلًا من أن يُشكِّل الثلج سدًّا، ينساب الماء على الإفريز بطول الكتل الثلجية المُتدلية التي تكون لا تزال صغيرةً حجمًا، وتزيد في الطول والوزن كلما تجمَّد الماء عليها.

لا يبدو أن ضوء الشمس يلعب أيَّ دورٍ مهمٍّ في تشكيل السدود الثلجية والكُتَل الثلجية المُتدلية الضخمة. لمنع تكونهما، تُصمَّم الغرف العُليا بحيث يكون بها فتحات تهوية تسمح للهواء البارد بالدخول. وبما أنها تكون باردة حينئذٍ، لا تذيب الجليد والثلج الموجود على السطح؛ ومِن ثَمَّ، يُقْطَع إمداد الماء الذي يصل إلى الإفريز.

(١٩) الجليد الهشُّ والجليد الزجاجي المُتجمِّعان على كابلات الكهرباء

عندما يتجمَّع الثلج والجليد على كابلات الكهرباء، يمكن أن يتسبَّب الوزن الإضافي في انهيار الكابلات وأبراجها الداعمة. حدث هذا الأمر في يناير عام ١٩٩٨ في جنوب مقاطعة كيبك الكندية عندما تسبَّب الجليد في انهيار ١٣٠٠ برجٍ أساسيٍّ و٣٥٠٠٠ برجٍ ثانوي وقَطْع إمدادات الكهرباء التي تخدُم أكثر من مليونَي شخص، واستمرَّ ذلك الأمر بالنسبة للبعض لأسابيع. ما هي الظروف التي تؤدِّي إلى تجمُّع الثلوج والجليد على كابلات الكهرباء؟ وهل تكون المشكلة أسوأ في حالة وجود الهواء البارد بشكلٍ خاص؟

الجواب: يُمكن أن تُشكِّل قطرات الماء التي يحملها الهواء نوعَين من الجليد على كابلات الكهرباء، الأول هو «الجليد الهش» الذي يكون جافًّا، مع عدم وجود ماءٍ سائل على الكابل (إذ إنَّ قطرات الماء عندما تتجمَّع تتجمَّد). أما الثاني فهو «الجليد الزُّجاجي» الذي يتكوَّن من طبقةٍ داخلية من الجليد والماء السائل، وطبقة خارجية من الماء السائل. ينمو خطُّ الجليد المُتجمِّد إلى الخارج عبْر السائل بينما يمتدُّ «الجليد الشُّجيري» (تشكيلات تُشبِه شكل نبات السرخس) داخل السائل. تُوصَّل الطاقة الحرارية التي تنبعِث من الماء المُتجمِّد من خلال الطبقة الخارجية ومنها إلى الهواء الخارجي البارد.

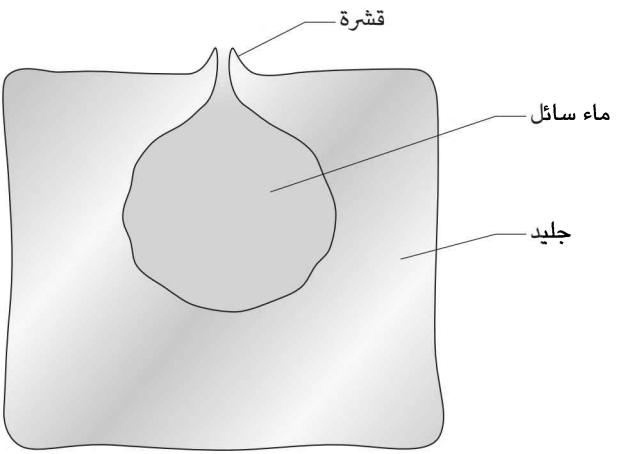
عندما يتكوَّن الجليد الزجاجي، يمكن أن يتساقَط بعض الماء السائل من الكابل، ممَّا يُقلِّل من الوزن ومن الخطر، ولكنه يمكن أيضًا أن تتكوَّن كتل ثلجية مُتدلية. تتباعد الكتل الثلجية المُتدلية عن بعضها بمقدار سنتيمترين، وتنمو إلى أسفل وأفقيًّا كلما تدفَّق المزيد من الماء إلى الجانبَين ويتجمَّد، ويمكن أن تندمج في نهاية المطاف مُكونةً ستارًا من الجليد. لا يُهدِّد وزن الكتل الثلجية المُتدلية كابلات الكهرباء وأبراجها الداعمة فقط، بل تزيد من احتجاز قطرات الماء والجليد كذلك. وإذا هبَّتْ رياحٌ قوية، فيمكن أن يزيد عبء المقاومة الهوائية الواقع على الكتل الثلجية المتدلية من قوة الضغط على الكابل زيادة كبيرة.

على الأرجح يكون الجليد الذي يتكوَّن على الكابل هو الأخطر عندما تكون درجة حرارة الهواء تحت نقطة التجمُّد ببضع درجات؛ وذلك لأنه حينئذٍ يُمكن أن يتشكَّل الجليد الزجاجي. من المؤكد أن قطرات الماء الموجودة في الجو والجليد اللذَين يصطدمان بالطبقة سيلتصِقان بها بدلًا من الارتداد بعيدًا عنها، كما قد يحدث مع الجليد الهش. كما أن الماء المُتساقِط يمكن أن يُكوِّن كُتلًا ثلجية مُتدلية ويجعل الوضع أسوأ وذلك لأن المساحة السطحية الأكبر والديناميكا الهوائية المتزايدة تُشكِّلان عبئًا إضافيًّا. ومِن ثَمَّ، إذا زادت درجة حرارة الهواء، كما يحدُث خلال الانتقال من الليل إلى النهار، يمكن أن يصبح التشكُّل الأولي للجليدِ الهشِّ أكثر خطورة إذا تحوَّل إلى جليدٍ زجاجيٍّ بينما لا تزال قطرات الماء والجليد تتجمَّع.

(٢٠) المسامير الجليدية والتشكُّلات الجليدية الأخرى

لماذا يكون لمُعظم مكعَّبات الثلج المُجمَّدة في الصواني، انتفاخٌ يمتدُّ من مركزها إلى أعلى؟ لماذا تُكوِّن بعض مكعبات الثلج مسمارًا أعلى سطح المكعب؟ (يمكن أحيانًا العثور على مسامير جليدية ترتفع من الأحواض ومن حمَّامات السباحة الصغيرة الأخرى التي تكون موجودة في الهواء الطلق أثناء الطقس البارد.)

لماذا يكون للغطاء الجليدي الذي يُغطِّي بِرَك الماء سلسلة من النتوءات التي تُشكِّل حلقات في تلك البِرَك؟ ولماذا تكون هذه النتوءات على «الجانب السفلي» من الجليد؟ كيف يمكن للغطاء الجليدي الذي يُغطي بعض الأنهار أن يُشكل قرصًا كبيرًا مُتحركًا ومنفصلًا عن باقي الجليد بفراغٍ ضيق؟ (يبلغ قُطر هذه الأقراص حوالي ٥٠ مترًا، وتستغرق حوالي ١٫٥ ساعة لتدور في دائرةٍ كاملة، وتظلُّ موجودة لشهور.) لماذا تُشكِّل بعض الأغطية



شكل ٤-٤: بند ٤-٢٠: مرحلة مُبكِّرة في عملية تشكُّل أحد المسامير الجليدية.

الجليدية التي تُغطي بعض الأنهار صدْعًا طويلًا على شكل مُنحَنى الجيب؟ لماذا يحتوي سطح الجليد الذي يُغطي البحيرات وبِرَك الماء، وحتى مكعبات الثلج أحيانًا، على نتوءات بدلًا من أن يكون مستويًا، حتى إذا كانت المياه هادئة خلال عملية التجمُّد بالكامل؟

الجواب: عندما تُشكِّل جزيئات الماء الجليد، لا بدَّ أن يتمدَّد الماء. وإذا كان الماء موضوعًا في الصينية المُخصَّصة لصنع مكعَّبات الثلج، فلا يمكن له سوى أن يتمدَّد لأعلى. يكون مركز مُكعب الثلج هو آخر ما يتجمَّد؛ ومِن ثمَّ فإن المُحيط الخارجي المُتمدِّد يدفع الماء المُجمَّد إلى الداخل وإلى أعلى.

يمكن أن تُشكِّل هذه العملية مسمارًا إذا تجمَّد الجزء العلوي من الماء وشكَّل طبقةً رقيقة من الثلج، ثم كسَّر الماء المُتمدِّد بالأسفل هذه الطبقة، ودفع بباقي الماء السائل من مركز المكعب إلى الخارج عبْر الشَّق. عادة ما يسيل ذلك الماء على قمَّة الثلج حيث يتجمَّد، ولكنه أحيانًا ما يتجمَّد في قشرة مُجوَّفة (شكل ٤-٤). إذا كان مُعدَّل التجمُّد بطيئًا بما يكفي، يمكن أن يُضغَط المزيد من الماء لأعلى داخل القشرة، ويسيل من القمَّة ويتجمَّد ويُمدِّد القشرة إلى أعلى. بعد أن يكون كلُّ الماء قد تجمَّد بالفعل، تُكوِّن القشرة مسمارًا صلبًا يتَّجِه إلى أعلى. تلك المسامير نادرة الحدوث نسبيًّا؛ وذلك لأن تشكُّلها يعتمد على

التوازُن بين المعدَّل الذي ينضغط به السائل إلى أعلى عبْر الشقِّ بالقِشرة، والمعدل الذي يتجمَّد به الماء المُتبقِّي في المكعب.

يرجع تكوُّن النتوءات التي تُشبِه الحلقات على الجانب السُّفلي من الغطاء الثلجي الذي يُغطِّي بِركة الماء إلى التجمُّد الدَّوري الذي يحدُث مع انسياب الماء من أسفل الغطاء. في البداية، حين تكون البِركة مملوءةً بالمياه، تتشكَّل طبقة رقيقة من الجليد فوق المياه، وتمتدُّ من جانب البِركة إلى جانبها الآخر. وبينما ينساب الماء أسفل هذا الغطاء، يتسرَّب الهواء أسفل حافته الخارجية، وفي مرحلةٍ ما يتباطأ الانسياب أو يتوقَّف. يتجمَّد بعض الماء أسفل الجليد حيث يُقابل الهواء الماء ويُشَكِّل نتوءًا إلى أسفل. لاحقًا، يزيح الانسياب المُتزايد المزيد من الماء، فيعزل النتوء، وإذا صار الرَّشْح أبطأ ثانيةً أو توقَّف، فيتشكَّل نتوءٌ آخر إلى الأسفل بالقُرب من مركز بِركة الماء. ومِن ثَمَّ، يمكن أن يتشكَّل عددٌ من النتوءات قبل أن ينساب الماء كله من البِركة.

يمكن رؤية العديد من الأشكال الغريبة التي تتكوَّن على الجليد الذي يُغطي بِرَك المياه والبُحيرات نظرًا لتساقُط الثلوج بينما يكون الغطاء الجليدي طافيًا بدلًا من أن يكون ثابتًا في مكانه. يدفع وزن الجليد الطبقة إلى أسفل، أو يتسبَّب ضغط الماء في إحداث فتحة في أحد الأماكن الضعيفة. يمكن بعد ذلك أن ينتشِر الماء الذي يرتفع من القاع إلى السطح على الطبقة عبْر الجليد، ويُميِّز مساره من خلال إذابة بعض الجليد. إذا كانت الفتحة كبيرة إلى حدٍّ ما، فقد يتجمَّد الماء الذي يرتفع من القاع إلى السطح، مُكوِّنًا قُرصًا دائريًّا صغيرًا يطفو داخل نطاق تلك الفتحة. إذا حدثت كلُّ هذه الأشياء في أحد الأنهار، فيمكن لتدفُّق مياه النهر عبْر السطح السُّفلي غير المُستوي للقُرص أن يجعله يدور.

أما الأقراص الجليدية الأكبر التي تتشكَّل فوق بعض الأنهار في بعض فصول الشتاء، فيرجع تشكُّلها إلى وجود دوَّامة في النهر. عندما تتجمَّع الأطواف الجليدية القادمة عكس اتجاه التيار في الدوَّامة، فإنها تختلِط تدريجيًّا معًا حتى تُصبح طبقةً واحدة تتسبَّب الحركة الدوَّامية للمياه في دوَرانها. بينما يتشكَّل الجليد فوق باقي النهر، يمنع الدَّوَران المياه الموجودة بين الطبقة وباقي الجليد من التجمُّد، كما يصقل الاحتكاك الذي يحدُث بين الطبقة وباقي الجليد الطبقةَ تدريجيًّا حتى تُصبِح قرصًا دائريًّا.

إذا سُحِبَ غطاء جليدي في اتِّجاهين مُعاكِسين، كما قد يحدُث إذا كان الغطاء مُثبَّتًا على الصخور بينما تتدفَّق المياه أسفله، يُمكن أن يزداد الشق الذي يكون مُستقيمًا في بادئ الأمر، ويُصبح على شكل مُنحَنى الجيب مع تحركه بطول الغطاء الجليدي بأكمله.

شُوهدت تلك الشقوق المُتموِّجة في الألواح الزجاجية التي تُسحَبُ من الحمَّامات المائية ثم تُعَرَّضُ لعناصر تسخين، ممَّا يُعرِّض الزجاج إلى الضغط. يعتمد شكلُ الشقِّ على السرعة التي يتحرَّك بها اللَّوح الزجاجي، بحيث يمكن أن يكون الشقُّ مُستقيمًا (إذا كانت حركة اللَّوح بطيئة)، أو مُتموِّجًا (إذا كانت سرعته مُعتدلة)، أو يمكن أن ينقسِم الشقُّ الواحد إلى شقَّين أو أربعة شقوق (إذا كانت سرعة اللوح كبيرة).

عندما تتجمَّد المياه، فإنها تشكل بلُّورات جليدية سُداسية الشكل. يُسمَّى المحور الذي يمتدُّ عبْر مركز البلورة بالمِحور «ج» ويكون عموديًّا على الوجهين السُّداسيَّين. يميل الجليد إلى النموِّ بشكل أسرع بالتوازي مع الوجوه السداسية، فيما يُسمَّى بـ «المستوى القاعدي». لنفترِض أن إحدى البلُّورات الجليدية بدأت بالنمو ومحورها «ج» عموديًّا؛ ومِن ثَمَّ يكون مستواها القاعدي أفقيًّا، عندئذٍ تميل البلورة للنموِّ أفقيًّا وتُخلِّف وراءها سطحًا مُستويًا على الجليد. على العكس، لو بدأتِ البلورة بالنموِّ وكان محورها «ج» أفقيًّا، ومستواها القاعدي عموديًّا، فلن يُمكنها الدَّوَران لأنها ستَحتكُّ بالبلورات المجاورة، كما أن الطفو يرفعها قليلًا حتى يُحمَل مستواها القاعدي فوق المستوى العام للجليد بقليل. ومِن ثَمَّ، تُكَوِّن نتوءًا. إذا نحَتْ بلوراتٌ عديدة المَنْحى نفسه، فستُشكِّل سلسلة من النتوءات على سطح الجليد.

(٢١) مكعبات الثلج الغائمة

لماذا تكون مكعبات الثلج غائمة، وهل هناك أي طريقة لصُنع مكعبات ثلج نقيَّة (شفَّافة)؟

الجواب: يكون الثلج غائمًا نتيجة لتشتُّت الضوء من الهياكل والمواد الموجودة داخل الجليد. يمكن أن تكون بعض هذه المواد عبارة عن شوائب ركَّزتْها عملية التجميد. على سبيل المثال، مع تقدُّم عملية التجميد في الماء، فإنها تدفع بالشوائب إلى السائل المُجاور لواجهة السائل والجليد، وتُجبر الهواء المُذاب على تكوين فقاعاتٍ هناك. ومع تقدُّم عملية التجميد ودفع مزيدٍ من الهواء داخل تلك الفقاعات، تصير الفقاعات أطول ومُحاطة بالجليد. ومِن ثَمَّ، تمتدُّ «ثقوب» طويلة (تجاويف) نحوَ مركز مكعب الثلج.

لا يمكن لواجهة السائل والجليد أن تتقدَّم إلا من خلال توصيل الطاقة الحرارية من السطح إلى المكعب؛ حيث يُمكن أن يُزيحها الهواء البارد. تزداد المسافة المطلوبة لهذا التوصيل الحراري كلما زادت مساحة الواجهة، وكذا يتباطأ تقدُّمها. ومِن ثَمَّ، تكون الثقوب عادة أوسع بالقُرب من مركز المكعَّب (حيث يكون التقدُّم بطيئًا)، منها بالقُرب

إلى السطح (حيث يكون التقدُّم أسرع). تختلف بعض الثقوب في نصف القُطر نتيجة لدورات عملية التجميد داخل الثلاجة بين التشغيل والإيقاف. يمكن أن يظهر في الثلج المصنوع من محلول ملحي فقاعات هواء أكثر تعقيدًا عنها في الثلج المصنوع من ماء الصنبور: وفي الظروف المثالية يمكن أن يُشكِّل أشكالًا لولبيَّةً صغيرة أو أشكالًا مُتعرِّجة.

لصُنع ثلجٍ نقي، يمكن استخدام الماء المُقطَّر لتجنُّب وجود الشوائب، ويمكن غَلي الماء لمدة خمس عشرة دقيقة للقضاء على مُعظم الهواء المُذاب.

(٢٢) الأشكال التي تظهر داخل الثلج الذائب

إذا وُضِع مُكعَّب ثلج عادي، أو الثلج الطبيعي، في ضوء الشمس الساطع أو في ضوء مصباح أشعة تحت حمراء، فلماذا تظهر أشكال صغيرة داخل الجليد؟ كان الفيزيائي جون تِندَل أول من رصدَها في عام ١٨٥٨، وأطلق عليها اسم «الورود السائلة»، إلا أنها تُعرَف الآن باسم «أشكال تِندَل». قد تتمكَّن من رؤية تلك الأشكال بالعَين المُجرَّدة، إلا أن عدسة الصائغ المُكبِّرة أو أي عدسة مُكبِّرة عادية يمكنها أن تُظهِر تفاصيل تلك الأشكال، فبعضها سُداسي، والبعض يُشبه أوراق نبات السرخس، والبعض الآخر يُكوِّن أشكالًا بيضاوية بسيطة.

الجواب: تظهر الأشكال نتيجة اختراق الأشعة تحت الحمراء الآتية من ضوء الشمس، أو من ضوء المصباح، للجليد وامتصاص العيوب الموجودة في هيكل البلورة لها. تُوجَد بعض هذه العيوب في المناطق التي لا تكون الذرَّات فيها بالترتيب الصحيح، والبعض يُوجَد في مكان تحْتَكُّ فيه بلُّورتان إحداهما بالأخرى، وبعض العيوب الأخرى تكون موجودة في أماكن تواجد الشوائب. يذوب بعض الجليد أو يتبخَّر مع امتصاص ضوء الأشعة تحت الحمراء مما يُشكِّل تجويفًا يظهر كأحد أشكال تِندَل بسبب اختلافها عن باقي الجليد. تمتلئ بعض الفجَوات ببخار الماء فقط، ويحتوي البعض الآخر على كلٍّ من الماء السائل وبخار الماء. إذا كان الضوء شديدًا وعمليات الصهر والتبخير سريعة، تظهر تجاويف تُشبِه نبات السرخس. أما إذا لم يكن الضوء شديدًا بما يكفي، فستظهر تجاويف سُداسية الشكل. أما الأشكال البيضاوية فتمتلئ بالماء وتظهر حيثما يضغط الجليد على أحد الشقوق عند الطرفَين المُتقابِلَين. عندما يسطع ضوء الأشعة تحت الحمراء على الجليد في البداية، يمكن أن تظهر العديد من أشكال تِندَل في وقتٍ واحد، وسبب ذلك هو تحرُّر الضغط الموجود داخل الجليد أثناء تشكُّلها.

(٢٣) تجمُّد بِرَك الماء والبُحيرات

لماذا تتجمَّد بِرَك الماء والبحيرات والمسطحات المائية الأخرى بحلول فصول الشتاء الباردة من أعلى إلى أسفل؟ فإذا تجمَّدت بدلًا من ذلك من أسفل إلى أعلى، فلن تكون بها على الأرجح أي حياة مائية.

ما الذي يُسبِّب ظهور أشكال الجليد الشُّعاعية التي تتكوَّن على بعض البِرَك والبحيرات المتجمدة؟ تُشبِه تلك الأشكال برامق العجلات المُلتوية أو بتلات الأزهار.

الجواب: بينما تبرد مياه البحيرة من درجة ١٠ مئوية، مثلًا، وتصل إلى درجة التجمُّد، فإنها تُصبح أكثفَ من المياه الموجودة بالأسفل وتغُوص في القاع. ومع ذلك، إذا كانت درجة الحرارة أقلَّ من ٤ درجات مئوية يجعل التبريدُ الأكثر المياهَ الموجودة على السطح أقلَّ كثافة من المياه بالأسفل؛ ومن ثَمَّ تظلُّ موجودة على السطح حتى تتجمَّد. بعد ذلك ينتشر التجمُّد إلى أسفل داخل المياه. ومع ذلك، فإنه ينتشر فقط عن طريق نقل الطاقة الحرارية من الماء السائل إلى أعلى عبْر طبقة الجليد من خلال التوصيل الحراري. عندما تصبح طبقة الجليد أكثر كثافة، تتباطأ العملية ويمكن أن تتوقَّف تمامًا. (يُقال إن تجمُّد مياه البحيرات هو «عملية ذاتية التقييد»، بمعنى أنها تتوقف من تلقاء نفسها.) ومِن ثَمَّ، فمن غير المُحتمَل أن تتجمَّد البحيرة تمامًا خلال فصل الشتاء، وبذلك يمكن للحياة المائية أن تظلَّ على قيد الحياة.

أما إذا تجمَّدت البُحيرات من أسفل إلى أعلى، فعلى الأرجح لن يذوب الجليد تمامًا خلال فصل الصيف، إذ إنه سيكون معزولًا بالمياه التي تعلوه. وبعد بضع سنوات، ستتجمَّد الكثير من المسطحات المائية المفتوحة في المناطق المُعتدِلة على مدار العام.

يتكوَّن الماء السائل في أيِّ درجة حرارة من كُتَلٍ من جُزيئات الماء التي تتشكَّل وتتكسَّر بشكلٍ مُتكرر. ومع ذلك، عندما تقلُّ درجة حرارة الماء عن ٤ درجات مئوية وصولًا إلى نقطة التجمُّد، فإنَّ هذه الكُتَل تستمرُّ لفترةٍ أطول وتُصبِح أكثر اتِّساعًا، ويتطلَّب وجودها، في المتوسط، حجمًا أكبر ممَّا كانت عليه عندما تكون درجة حرارة الماء أعلى. لا ينطبق هذا التأثير على مياه البحر؛ إذ إن كثافتها تزداد باطِّراد وهي تبرُد وصولًا إلى نقطة التجمُّد، ولا تنخفِض الكثافة إلا عند تشكُّل الجليد.

إذا سقطت أشعة الشمس على بُحيرة ذات طبقةٍ رقيقة من الجليد، يمكن للضوء أن يُسخِّن الماء أسفل الجليد مباشرة حتى ٤ درجات مئوية، ممَّا يؤدي إلى غَوص المياه لأسفل

وارتفاع المياه الأخف والأدفأ لتحلَّ محلَّها. يكون هذا الخليط الشتوي ضروريًّا لبعض صور الحياة المائية.

إذا تساقط الثلج على بِركة ماء أو بُحيرة بها طبقة من الجليد العائم، يمكن أن يغمر وزن الثلج الطبقة الجليدية ويتسبَّب في أن تتسرَّب المياه عبْر الثقوب الموجودة في الطبقة أو فوق الحافة. وبما أن درجة حرارة الماء تكون أعلى من نقطة التجمد، تشقُّ المياه طريقها عبر الجليد وتُشكِّل قنوات عبْر الإذابة، وتتحرَّك بشكلٍ شُعاعي إلى الخارج من أحد الثقوب، بطول مساراتٍ ملتوية على الأرجح. إذا انخفضت درجة حرارة الهواء واختفَتْ أشعَّة الشمس، فيمكن أن تتجمَّد هذه المسارات المائية، وهو ما ينتج عنه شكلٌ لافت للنظر إما لبرامق أو بتَلات زهور.

(٢٤) تجميد المشروبات الغازية

لماذا تنفجر زجاجة المياه الغازية أو الجِعَة إذا تُركت لفترة طويلة بالمُجَمِّد؟ وإذا لم تُترك الزجاجة لفترة طويلة داخل المُجَمِّد، فلماذا تتجمد فجأة عندما تُفتَح؟ وإذا كان السائل باردًا (ولكنه لم يقترب من التجمُّد)، لماذا تخرج دُفْقة من الضباب الخفيف وبضع قطرات من الماء عند فتْح الزجاجة؟

الجواب: يتكوَّن المشروب الغازي، مثل الصودا أو الجِعَة، من الماء أساسًا، وعندما يتجمَّد الماء فإنه يتمدَّد لاستيعاب الترتيب المنظم لجزيئات الماء لتشكيل بِنية صُلبة. ومِن ثَم، عندما تصبح المياه الغازية باردة بشدة لدرجة أن الماء يبدأ في التجمُّد، يكون هناك ضغط كبير إلى الخارج يميل إلى كسر الزجاجة. تكون نقطة تجمُّد المشروب «مُثَبَّطَة»؛ أي إنها تكون أدنى من نقطة التجمُّد العادية للماء؛ وذلك لأن السائل يكون مُعرَّضًا للضغط ولأن الإضافات (خاصة الكحول) تتداخل مع قدرة جزيئات الماء على تكوين الثلج. ومع ذلك، تكون معظم حجرات التجميد باردة بما يكفي لتجعل زجاجة السائل تنفجر.

عندما تُفتَح الزجاجة، ينخفض الضغط الموجود بها فجأة إلى معدل الضغط الجوي، ويخرج الكثير من غاز ثاني أكسيد الكربون من المحلول، مما يؤدي إلى تكوين فُقَّاعاتٍ ترتفع إلى السطح العلوي. بافتراض أن درجة حرارة السائل فوق نقطة التجمُّد المثبطة مباشرة، فحالما ينخفض الضغط، سترتفع نقطة التجمُّد ثم يصبح السائل «أدنى» نقطة التجمُّد (الجديدة)؛ ومِن ثَمَّ يميل السائل إلى التجمُّد. ومع ذلك، فهو يحتاج إلى «مواقع تنوٍّ» حتى تتشكل بلورات الثلج الأولية، ويمكن للفُقَّاعات أن تُطلِق هذه العملية. إذا كانت

الزجاجة شفافة؛ فقد ترى أن عملية التجمُّد تبدأ عند أو بالقرب من السطح العلوي؛ حيث تتجمع الفُقَّاعات، ثم تتحرك إلى الأسفل، ربما بسرعة شديدة.

عندما تُفتَح زجاجة مشروب غازي بارد، فإن تمدُّد الغاز الموجود فوق السائل، المتجه إلى الخارج عبْر الفتحة، يتطلب وجود طاقة. يكون التمدُّد سريعًا بحيث إن النقل الوحيد الممكن للطاقة يكون من الطاقة الحرارية للغاز؛ ومِن ثَمَّ، يفقد الغاز الطاقة الحرارية ويصبح أبرد، مما يؤدي إلى تكثف بخار الماء الموجود في الغاز المتمدِّد ويتحول إلى قطرات ماء. تُشكِّل تلك القطرات المحمولة في الهواء الضباب الذي نراه عند فتحة الزجاجة.

(٢٥) انفجار الأنابيب

في المنازل التي تتعرض فيها أنابيب المياه للشتاء القارس، لماذا تتعرض الأنابيب للانفجار، ولماذا تكون أنابيب الماء الساخن أكثر عرضةً للانفجار من أنابيب الماء البارد؟

الجواب: يمكن أن ينفجر الأنبوب الذي يكون الماء فيه ثابتًا لا يتحرك نتيجة لتجمُّد الماء إذا شكَّل الجليد سِدادة تحبس الماء في منطقةٍ مغلقة بصمام. وكلما تجمَّد المزيد من الماء على السِّدادة، فإن ذلك الماء يتجمَّد ويشكِّل ضغطًا هائلًا على الماء المحبوس. وفي نهاية المطاف يمكن أن يكون الضغط عاليًا بما يكفي ليتشقق الأنبوب، وتكون هذه الاحتمالية أكبر في الأنبوب الذي ينقل الماء من خزانات التسخين بسبب الطريقة التي يمكن أن يتجمَّد بها الماء داخل هذا الأنبوب. في الوضع المثالي، يتجمَّد الماء عند نقطة التجمُّد صفر مئوية، ولكن عمليًّا لا بُدَّ أن تبرُّد المياه بضع درجات تحت نقطة التجمُّد قبل أن تتجمَّد. يُقال إن تلك المياه السائلة قد خضعت لـ «التبريد الفائق».

تحتوي مياه الصنبور التي لم تُسَخَّن في خزانات التسخين على العديد من الشوائب التي تعمل كمواقع تنوٍّ، وبمجرد تبريد الماء تبريدًا فائقًا بواقع بضع درجات، يحفز مواصلة إزالة الطاقة الحرارية من الماء عملية تشكل البلورات الثلجية. يُكَوِّنُ الماء أولًا جليدًا شجيريًّا (يشبه شكل نبات السَّرخس) ينمو داخل الماء الذي ما زال في حالته السائلة. بمجرد تَكَوُّن الجليد، تتشكَّل حلقة من الثلج بطول جدار الأنبوب وتنمو تدريجيًّا بشكلٍ شعاعي إلى الداخل حتى تُشكِّل سِدادة تغلق الأنبوب تمامًا. يكون للماء الموجود بين هذا الثلج والصمام المغلق متَّسع من الوقت للتكيُّف مع تمدُّد الماء أثناء نمو الحلقة الثلجية.

يتجمَّد الماء الذي سُخِّنَ في خزانات التسخين بطريقةٍ مشابهة، إلا أن تشكُّل الجليد الشجيري يمكن أن يتأخَّر كثيرًا، ربما لعدة أيام. والسبب هو أنه عندما يُسَخَّن الماء فإنه

يفقد الكثير من الشوائب التي يمكن أن تعمل كعاملِ تنوٍّ لتشكل الجليد. ومِن ثَمَّ، يمكن تبريد ذلك الماء تبريدًا فائقًا حتى يصل إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة الماء الموجود في أنبوب الماء البارد. عندما يبدأ الجليد بالتشكُّل أخيرًا، فإنه ينمو إلى الداخل شعاعيًّا على شكل جليد شجيري ويمكن أن يسِدَّ الأنبوب بسرعة. إذا نما الجليد حينئذٍ بطول الأنبوب، يمكن أن يُشكل تمدُّد الماء نتيجة لتجمده ضغطًا هائلًا على الماء المحبوس بين السِّدادة والصمام المغلق. وأخيرًا، يمكن أن ينفجر الأنبوب أو أحد الوصلات الأنبوبية التي تقع في مكانٍ ما بين السِّدادة والصمام، حتى ولو كان الجزء الذي ينفجر دافئًا.

سيسمح الانفجار للماء المحبوس بالخروج، وهو ما قد لا يتسبب في الكثير من الضرر. ومع ذلك، إذا لم يتم إصلاح الأمر قبل أن تذوب السِّدادة الجليدية، يمكن أن يتسبب فيضان الماء اللاحق في إحداث أضرار عديدة. لتجنُّب هذا الاحتمال، يترك الناس الذين يعيشون في مناخ قارس البرودة صنابيرَ المياه الخارجية مفتوحةً قليلًا خلال فصل الشتاء، بحيث لا يتسبب نمو السِّدادة الثلجية سوى في دفع المياه خارج الصنبور المفتوح بدلًا من تراكم الضغط الداخلي.

يمكن أن تكون السِّدادات الجليدية مفيدة في بعض الحالات. على سبيل المثال، يمكن أن تعمل إحدى السِّدادات الجليدية كصِمامٍ مؤقَّتٍ في جزء من الأنبوب الذي لا بد أن يتم إصلاحه عندما يتعذَّر غلق نظام أنابيب المياه بأكمله، كما هو الحال في المستشفيات أو المجمَّعات السكنية الكبيرة.

في بعض الحالات، لا بد أن يُنقَل الماء عبْر أنبوب بارد وجاف، ربما بسبب أعمال الإصلاح. يمكن أن تَفقد دُفقة الماء الأولى، أثناء انتقالها عبْر الأنبوب، الطاقةَ الحرارية إلى جدار الأنبوب؛ ومِن ثَمَّ تنخفض درجة حرارتها إلى نقطة التجمُّد. يحدث هذا الأمر على الأرجح في الأنابيب المدفونة أكثر مما يحدث في الأنابيب الموجودة فوق سطح الأرض (عند تساوي درجة الحرارة)؛ وذلك لأن الطاقة الحرارية تتسرَّب بسرعةٍ أكبر من جدران الأنابيب عن طريق الأرض المحيطة أكثر منها من خلال الهواء المحيط. . إذا كانت درجة حرارة الأنبوب تبلغ بضع درجات تحت نقطة التجمد، يمكن أن يصل الماء إلى درجة التبريد الفائق وأن يُشكل فجأة جليدًا شجيريًّا يَسِدُّ الأنبوب. ومع ذلك، إذا كان الأنبوب أكثر برودة (تكون درجة حرارته تحت درجة حرارة الماء المبرَّد تبريدًا فائقًا)، تتكوَّن حلقة من الجليد على جدار الأنبوب دون أن تنمو وتصبح جليدًا شجيريًّا، ويستمر الماء في التدفُّق.

(٢٦) لمسُ أو لعقُ أنبوبٍ بارد

إذا لمست عارضةً خشبية باردة وأنبوبًا معدنيًّا باردًا لهما نفس درجة الحرارة، لماذا ستشعر أن الأنبوب أبرد؟ لماذا يمكن أن تلتصق يداك بالأنبوب؟ في فيلم «أ كريسماس ستوري»، يقبل أحد الأطفال التحدي ويلعق أنبوبًا باردًا، فقط ليجد أن لسانه قد التصق به. من بين قواعد الحياة العديدة، لا تنسَ هذه القاعدة: لا تَلعق أنبوبًا باردًا أبدًا.

الجواب: يعتمد الإحساس بمدى برودة الجسم الملموس إلى حدٍّ كبير على معدل امتصاص هذا الجسم للطاقة الحرارية من أصابعك. يوصل المعدن الطاقة الحرارية أفضل بكثير من الخشب، ولذا نشعر أنه أبرد من الخشب، حتى عندما تكون درجتا حرارتهما متطابقة.

يمكن أن تلتصق الأصابع بسطحٍ معدني بارد؛ لأن الرطوبة الموجودة على الجِلد يمكن أن تتجمَّد على الفراغات الموجودة في السطح. (قد يتعرض اللسان للتجمُّد أكثر نظرًا لكونه أكثر رطوبة من الأصابع.) عادة ما يذوب الجليد وتتحرَّر الأصابع بصب ماء دافئ فوق المنطقة التي يلتصق فيها الجلد بالمعدن.

(٢٧) البروزات التي تتكوَّن في التربة شتاءً والبينجو الذي يتكوَّن في التربة الصقيعية

لماذا ترتفع التربة مكوِّنةً بروزات خلال فصل الشتاء البارد، وهو التأثير الذي يُعرف باسم «الانتفاخ الصقيعي»؟ لا يمكن فقط لتلك النتوءات أن تُلحِق الضرر بالطرق، بل إنها قد تُعرِّض أيضًا أي سائق يقود بسرعة عالية للخطر. قد تميل إلى إرجاع حدوث الانتفاخ الصقيعي إلى تمدُّد الماء العادي عندما يتجمد، إلا أن هذا التمدُّد لا يزيد من الحجم الكلي إلا بحوالي ١٠٪، وهو أقلُّ بكثير من أن يكون تفسيرًا مقنعًا في حالات الانتفاخ الضخمة.

كيف يمكن للطقس البارد كسْر الصخور؟ هل لا بد أن تخضع الصخرة إلى عملية متعاقبة من «دورات التجمُّد والذوبان» حتى تنكسر؟

ما الذي يتسبَّب في تكوين «البينجو» (قطعة أرضية جبلية بداخلها جليد)، وهي تلال مخروطية تكوَّنت في مناطق التُّرَب الصقيعية؟ يكون تل البينجو ضخمًا في بعض الحالات؛ إذ يبلغ طوله ٤٠ مترًا وقطره ٢٠٠ متر.

الجواب: عندما تنخفض درجة حرارة الطبقة العليا من التربة (أو الطبقة الموجودة أسفل الطريق مباشرة) تحت نقطة التجمُّد، يتجمَّد بعض الماء الموجود داخل المسام بين التربة والجزيئات ويتمدَّد، مما يتسبب في حدوث عملية «انتفاخ صقيعي مبدئية». ومع انخفاض كمية الماء السائل، ينخفض الضغط داخل باقي السائل أيضًا. تتعرض المياه السائلة التي تكون أعمق قليلًا إلى ضغط أكبر؛ ومِن ثَمَّ يرتفع بعضها إلى أعلى نحو الطبقة المجمَّدة. ومع وصول السائل إلى الطبقة، يتجمَّد ويتمدَّد بدوره أيضًا، مما يؤدي إلى حدوث عملية «انتفاخ صقيعي ثانوية» يمكن أن تزيد من ارتفاع التربة، وكذا تدمير الطريق.

تلحق الكثير من الأضرار بالطريق عندما يذوب الجليد الذي بداخله وأسفله، ثم يتشبع الحصى الموجود أسفل سطح الطريق بالماء. ومِن ثَمَّ، عندما تضغط سيارة (أو أسوأ من ذلك، شاحنة ثقيلة) على سطح الطريق، يزداد الضغط في الماء بشدة ويمكن أن يندفع الماء إلى أعلى في الجانب السفلي من الرصيف. يمكن أن يكون ضغط الماء هذا كافيًا لكسر الرصيف، ومع المزيد من حركة مرور المركبات، ينشق الطريق ويشكِّل حفرة يزداد عمقها تدريجيًّا مع زيادة حركة المرور. في الطرق ذات الأرصفة الرفيعة أو الدعامات الضعيفة، يمكن أن ينهار الطريق تحت هذا الضغط حتى يتكوَّن أخدود أو يحدث هبوط في منطقةٍ ما بالطريق. تهتز المركبة عندما تصل إلى أدنى نقطة خلال سيْرها بطول الطريق. وفي كلِّ مرة تضغط على الرصيف، قد ينتج عن ذلك تكوين منطقة هبوط أخرى. وبمرور الوقت، يصير الطريق شبيهًا بلوح الغسيل المُضَلَّع الذي كان يُستخدم قديمًا لغسل الملابس من خلال فرْكِها عليه.

عادة ما تكون الأضرار التي تلحق بالطرق أوسع نطاقًا أثناء فصول الشتاء المعتدلة من فصول الشتاء القاسية؛ وذلك لأن فصول الشتاء المعتدلة تمنح الماء وقتًا حتى يُسحَب تحت الطريق، بينما يحبس الصقيع الماء في مكانه لمدة طويلة. كما تكون الأضرار التي تلحق بالطرق أوسع نطاقًا إذا تعرَّض لعدة دورات من التجمُّد والذوبان، بدلًا من التعرُّض إلى موجةِ صقيعٍ شديدٍ واحدة.

عندما يتجمَّد الماء في أحد تصدعات الصخور، يتسبب تمدُّده في فتح طرف التصدع، مما يزيد من طول وعرض الصدع. كما يزداد طول الصدع وعرضه أكثر إذا دُفِعَ ماء إضافي إلى داخله، كما هو الحال في عملية الانتفاخ الصقيعي. ومع ذلك، تقل عملية دفع الماء هذه إذا كانت درجة الحرارة منخفضة للغاية؛ ومِن ثَمَّ تسير عملية تصدُّع الصخرة

بشكلٍ أسرع إذا كانت درجة الحرارة أقل بقليل من نقطة التجمُّد. وليس من الضروري حدوث دورات متتالية من تجمُّد الجليد وذوبانه. تكون الصخور الرسوبية أكثر عرضة للتصدُّع من الأنواع الأخرى. يكون كسر الصخور البلورية أكثر صعوبة ويتطلب فترات طويلة من التعرُّض لدرجات حرارة أدنى من درجة التجمُّد وإمدادات متكررة أو متواصلة من المياه.

لتلال البينجو نوعان وسببان على الأقل لتكوُّنِها. عادة ما يكون تل «البينجو الهيدروستاتيكي» عبارة عن جبلٍ معزولٍ ارتفع من بحيرةٍ إما تعرَّضت للجفاف أو الامتلاء. تقع أسفل البحيرة طبقة من مادةٍ شبه مائعة محاطة بتربة صقيعية، ويُستثنى من ذلك سطحُها العلوي. وبينما تفقد البحيرة ماءها السائل، يبدأ الصقيع في التكوُّن على السطح العلوي. وبينما تتجمد المواد إلى الداخل بداية من الجانبين أو من أسفل إلى أعلى، تُدفَع المياه خروجًا من المادة ويُحبَسُ في وسط منطقة البحيرة السابقة. ترفع هذه الدفعة تل البينجو إلى أعلى، وعندما تتجمد المياه، فإنها تُشكل الجزء الجليدي من التل.

عادة ما تتكتل «تلال البينجو الهيدروليكية» في مجموعاتٍ ويبدو أن المياه الجوفية التي تتسرب من التلال والجبال المجاورة هي ما تغذيها. تشق المياه الجوفية طريقها بطريقة أو بأخرى تحت التل وتتمدَّد عندما تتجمد، فترفع التل إلى أعلى قليلًا. أما بالنسبة لكيفية صعود المياه إلى أعلى فلا تزال غير مفهومة بالكامل. إذا كانت المادة الموجودة أسفل التل تتكوَّن من مسامٍ صغيرة، يمكن لقوى الخاصية الشعرية أن تسحب المياه إلى أعلى من خلال المادة؛ أي إن القوى الجزيئية التي تتسبب في تشبُّث المياه بالمواد وبنفسها، يمكنها أن تسحب السائل لأعلى عبْر الفراغات بين الأجسام المادية الصغيرة. (ومع ذلك، تتشكل بعض تلال البينجو الهيدروليكية على موادَّ لا تتكون من مسامٍ صغيرة.)

(٢٨) المضلعات الجليدية القطبية

لماذا تكون الأرض في بعض الأراضي المنخفضة بالقطب الشمالي ومناطق التندرا التي تقع جنوب القطب الشمالي مباشرة، مغطاةً بمضلعات جليدية ضخمة تكوَّنت بفعل الأوتاد الجليدية؟ يمتد الوتد الجليدي داخل الأرض لعدة أمتار ويصل عَرضه إلى بضع مئات من الأمتار.

الجواب: عندما تنخفض درجة حرارة الأرض إلى أقل من نقطة التجمُّد، فإنها تميل إلى الانكماش إلى الداخل (إلى أسفل)، مما يُحدِث ضغوطات بطول السطح. في بعض

الأماكن يمكن أن يكون الضغط كبيرًا بما يكفي ليُحدِث تصدعات في الأرض، كما هو الحال عندما تجفُّ بِركة من الطين وتتشقق. مع مرور الوقت، يمكن أن تتسع الشقوق الأرضية عموديًّا وأفقيًّا (بمعدل أكبر). وعندما يمتد أحد الشقوق المتنامية نحو شقٍّ موجود بالفعل، توجِّه الضغوطات الأرضية مسار هذا الشق المتنامي ليتقاطع مع الأخير عموديًّا. يكون الشق الموجود مسئولًا بالفعل عن هذه الضغوطات في الأرض ويميل إلى سَحْب الأرض بشكل متوازٍ مع ذلك الشق. إذا تقاطعت عدة شقوق بزاوية ٩٠ درجة، يظهر النمط الجليدي المضلع.

بعد أن يتشكل الشق، يمكن أن يملأه الجليد أو الصقيع أو الماء الذي يذوب من الجليد ثم يتجمد، وهو ما يكوِّن حينئذٍ الوتد الجليدي الذي يُشَكِّل جوانب المضلع. شُوهدت مضلعات شبيهة على كوكب المريخ؛ حيث تملأ الرمال الشقوقَ بدلًا من الجليد أو الثلج. (كما أن المريخ به مضلعات عملاقة يُفترض أن تشكُّلها يعود لأسباب أخرى غير ما ذكر سابقًا.)

(٢٩) الأحجار التي تُلفَظُ من تربة الحدائق والأراضي المنمطة

لماذا تُلفَظُ الحجارة من الأرض خلال فصل الشتاء في المناخات الباردة؟ في بعض الأماكن، مثل نيو إنجلاند، يكون محصول الحجارة وفيرًا للغاية بحيث يُجْمَعُ لبناء أسوار حجرية.

لماذا تُشَكِّلُ الحجارة الملفوظة في بعض الأماكن دوائرَ أو مضلعاتٍ أو خطوطًا؟ في بعض الأحيان يكون النمط منظمًا بشدة وواسع النطاق حتى يبدو وكأنه اصطناعيًّا. على سبيل المثال، توجد في جزيرة سبيتسبيرجن التي تقع شمال النرويج، أنساقٌ مذهلة من الدوائر الحجرية التي تحيط بتربة خالية نسبيًّا من الأحجار، فما الذي يتسبب في ترتيب تلك الأنماط الحجرية المختلفة بحيث تكون تلك الأشكال؟

الجواب: يدفع الانتفاخ الصقيعي بالأحجار إلى السطح، كما هو موضَّح في أحد البنود السابقة. ينخفض «خط التجمُّد»، الذي تكون فيه درجة الحرارة صفر درجة مئوية، عبْر الأحجار المدفونة أسرع من انخفاضه عبْر التربة المجاورة، ويرجع ذلك إلى إطلاق الطاقة الحرارية عندما تتجمد المياه في التربة. عندما ينخفض خط التجمُّد أسفل أحد الأحجار، يسحب الماء الإضافي من الأسفل وكذا من التربة المجاورة (التي لم تتجمد بعدُ)، تتجمَّد تلك المياه الإضافية وتتمدَّد، وهو ما يدفع الأحجار إلى أعلى. وكلَّما تحرك الحجر، يمكن للتربة أن تملأ الفراغ الذي يخلفه أسفله جزئيًّا وتثبته بحيث لا يهبط لاحقًا عندما يذوب

الجليد. وبعد حدوث ما يكفي من دورات تجمُّد وذوبان الجليد، يصل الحجر إلى سطح الأرض، وربما يُجْمَعُ لبناء سورٍ حجري.

عُثِرَ على الأحجار المهاجرة من أسفل التربة إلى سطح الأرض عندما استُخرجت الطبقات الرملية القديمة عن طريق قطعات عمودية. تقبع الأحجار على ارتفاعات مختلفة داخل جدران تلك القطعات. يبدو أن الرمال تكون مضغوطة فوق الأحجار، أما أسفلها، فيبدو أن المسارات تحدِّد المكان الذي ملأت فيه المادةُ الفراغَ الذي خلَّفته الأحجار التي تحرَّكت إلى أعلى.

تعود أنماط الأشكال الهندسية المختلفة التي تكوِّنها الحجارة إلى عقودٍ أو حتى قرون من الانتفاخ الصقيعي. عندما تخرج الأحجار من الأرض، فإنها تؤثِّر على سرعة انخفاض خط التجمُّد أسفلها خلال فترات التجمُّد اللاحقة، وهو ما يؤثِّر بدوره على كيفية دفع الأحجار الأخرى إلى أعلى. تنهار بعض الأحجار الموجودة على سطح الأرض أثناء الانتفاخ الصقيعي أسفل المنحدرات التي يكوِّنها الصقيع؛ ومِن ثَمَّ تتجمَّع. يمكن أن تُدفَع الأحجار الأخرى بطول تلال الحجارة التي تكوَّنت بالفعل؛ ومِن ثَمَّ تطيل من حواف تلك التلال. عندما تكون الأحجار كثيرة فإنها تُشكِّل دوائر أو مضلعات أو أشكال متاهات، أما عندما تكون قليلة، فإنها تشكِّل جُزُرًا، بينما تُكَوِّنُ خطوطًا عندما تكون على أرضٍ منحدرة. شُوهدت مثل هذه الأنماط على كوكب المريخ، مما يوحي بحدوث دورات تجمُّد وذوبان للمياه الجوفية هناك.

(٣٠) الجلاميد الجارفة

لماذا ينزلق جلمودٌ ضخم من فوق أحد المنحدرات إلى أسفل تدريجيًّا؟ يُطلق على هذا النوع من الجلاميد اسم «الجلاميد الجارفة»؛ وذلك لأن بعد انزلاقه، تتراكم كومة من التربة أمامه ويتشكَّل منحدر خلفه، كما لو كان يجري حَرثُ التربة بأحد الحقول.

الجواب: إن عملية تجمُّد وذوبان التربة الموجودة حول الجلمود تُضعِف قدرة التربة على تثبيت الجلمود في مكانه. عندما تتجمد التربة، يرتفع الجلمود إلى أعلى قليلًا بفعل تمدُّد المياه في التربة (المياه الموجودة بالأساس في التربة والتي تتسرَّب إلى تلك المنطقة من التربة المجاورة).

عندما تذوب التربة فإن مياهها، وأي مياه ذائبة من الثلج المتراكم حول الصخرة، تُلَيِّنُ الأرض. يمكن لقوة الجاذبية الواقعة على الجلمود أن تسحبه إلى أسفل المنحدر بعض

الشيء؛ ومِن ثَمَّ عندما يتحرك، يدفع كومة من التربة ويخلف وراءه مسارًا منحدرًا. وعلى الرغم من ذلك، تكون الحركة طفيفة؛ لأن الأرض أسفل المنحدر قليلًا لا تكون مشبعة بالمياه ولينة بما يكفي.

قصة قصيرة

(٣١) قنبلة القط النافق والاختفاء المتجمد

عندما التحقتُ بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا كطالب جديد، كان الطلاب الأكبر سنًّا يتناقلون قصة عن أحد الطلاب، لِندعوه باسم فْريد، والذي كان غاضبًا بشدة من طالب آخر، لِندعوه باسم هاري. في أحد الليالي عندما كان هاري بالخارج، تسلَّل فْريد إلى غرفة هاري وبحوزته قطٌّ نافِق ووعاء كبير من النيتروجين السائل أخذهما من مختبرات الجامعة.

أمسك فْريد القط النافق من ذيله وغمره في وعاء النيتروجين السائل ثم انتظر حتى صارت درجة حرارة جسم القط النافق تماثل درجة حرارة السائل البارد، ثم رفع القط المتجمد وقذف به إلى الحائط، فتحطَّم إلى العديد من القِطَع الصغيرة التي تبعثرت على السرير وفي أجزاءٍ أخرى من الغرفة. ذابت تلك القِطَع في غضون دقائق مُخلِّفة فوضى فظيعة. (كان طلاب معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا معروفين بمقالبهم الذكية، ولكن لم يُعرف عنهم أنهم أشخاص حساسون. وفي هذه الحالة، آمُلُ أن تكون القصة خيالية مجرد «أسطورة شعبية» اخترعها الطلاب الأكبر سنًّا.)

ثمَّة موقف مشابه تقوم عليه قصة من قصص الغموض عنوانها «ذا مان هو ديسابيرد» لإل تي ميد وروبرت إيوستيس؛ ففي قصتهما التي نُشِرَت عام ١٩٠١ في مجلة ستراند، هيَّأ الكاتبان القُرَّاء بذكاء للخطورة المعرَّض لها أوسكار ديجبي، الشخصية الرئيسية في القصة. جرى استدراج ديجبي لتناول العشاء مع أشخاصٍ يسعون إلى معرفته بوجود كنز كبير. علمت الشرطة بالأمر وخطورته وحاصرت المنزل بعد دخول ديجبي. كان من المستحيل حتى لفأر أن يخترق الحلقة التي كوَّنها رجال الشرطة حول المكان. وفي منتصف الليل، دخل رجالُ شرطةٍ المنزلَ وفتَّشوه بدقة، حتى إنهم شقُّوا الجدران، ولكن لم يكن هناك أي أثر لديجبي. وأثناء انتظارهم بالخارج، سمعوا صوت خبطة مكتومة لا أكثر، فما الذي حلَّ بديجبي؟

أُزيح الستار عن الإجابة عندما وجد أحد الرجال آثارًا طفيفة للدماء على آلة تكسير الأحجار التي كانت بالقرب من وعاء كبير من الهواء السائل. على ما يبدو، بعد أن غُمِسَ ديجبي وجُمِّدَ في السائل البارد، سُحِقَ باستخدام آلة تكسير الأحجار ثم بُعثرت أشلاؤه قبل أن تهجم الشرطة. ومع عدم وجود جثة، لم يكن بوسع رجال الشرطة فعل أي شيءٍ سوى أن ترتعد فرائصهم مما اكتشفوه.

(٣٢) تَكوُّن النُّدَف الثلجية

ما العامل المسئول عن تكوين الأشكال العامة لبلورات الثلج؟

الجواب: يبدو السؤال بسيطًا بشكل خادع؛ وذلك لأن الإجابة عليه لم تُحسَم بعدُ. تبدأ بلورة الثلج بالتنوِّي حول ذرة من الغبار، وتتجمع جزيئات الماء تدريجيًّا وترتبط بعضها ببعض بحيث تكوِّن شكلًا سداسيًّا، ويُقال إنها تكون متماثلة «تماثلًا سداسيًّا»؛ وذلك لأن البلورة تتكوَّن من ستة أقسام متطابقة تقريبًا متجمعة حول مركز (مثل أجزاء الكعكة). ينمو حجم البلورة كلما «انتشرت» (تدفَّقت) جزيئات أكثر عبْر السطح إلى أن تترابط هي أيضًا. تحدث معظم عملية النمو على الحواف والأركان؛ لأنه في تلك المناطق تكون البلورة الموجودة أكثر عرضة لبخار الماء الموجود في الهواء.

توجد طرقٌ عدة يمكن من خلالها أن تندمج تلك الجزيئات الإضافية في البلورة، وتعتمد على درجة حرارة وكثافة بخار الماء المجاور للبلورة. في حالة بعض القيم، تنمو البلورة على شكل صفيحة مسطحة؛ وفي حالة قيم الأخرى، فإنها تنمو على شكل غمد أو موشور أجوف أو عمود أو نجمة. وتُعتبر حقيقة الحفاظ على التماثل أمرًا مثيرًا للدهشة، وقُدِّمَت العديد من الآليات المقترحة لتفسير كيف يكون تصميم ونمو بلورة الثلج على كل طرف من طرفيها المتقابلين متماثلًا تقريبًا. ومع ذلك، فإن البلورة تكون صغيرة بما يكفي بحيث تكون الظروف البيئية التي تُحيط بكلِّ جوانبها مماثلة على الأرجح، ويبدو أن تلك الظروف هي ما تحدِّد شكل البلورة ونموها.

على الرغم من أن معظم النُّدَف الثلجية تكون متماثلة تماثلًا سداسيًّا، فقد التُقِطت صورٌ لنُدَفٍ ثلجيةٍ لها نظامٌ تماثليٌّ أعلى (تماثلٌ اثنا عشري وثمانية عشري واثنين وعشريني) ولكنها على الأرجح تكون عبارة عن ندفتين ثلجيتين ملتحمتين أو أكثر، تكون كل واحدة منهما متماثلة تماثلًا سداسيًّا.

(٣٣) التزلج

لماذا يمكن لزلاجةٍ أن تنزلق على الجليد؟

الجواب: يمكن للزلاجة أن تتحرك بسلاسة على الجليد؛ وذلك لأن الاحتكاك بينها وبين الجليد يذيبُ بعضًا منه، وهو ما يوفِّر طبقة رقيقة زَلِقة. كثيرًا ما يؤدي التزلج السريع، بإنتاجه طاقة حرارية أكبر، إلى تجربة تزلج أفضل، في حين أن التزلج البطيء، بضعف إنتاجه للطاقة، يمكن أن يكون صعبًا.

تعمل الزلاجة ذات التوصيل السيئ للطاقة الحرارية بشكلٍ أفضل؛ لأنها تحافظ على المزيد من الطاقة الحرارية عند منطقة التماس بينها وبين الجليد، بدلًا من توصيل الطاقة الحرارية إلى أعلى الزلاجة. يمكن للزلاجات ذات الألوان الداكنة أن تكون أدفأ في ضوء الشمس إذا امتصت أشعة الشمس تحت الحمراء بشكل أكبر، على العكس من الزلاجات ذات الألوان الأفتح. وإذا كان الأمر كذلك، فستكون زَلِقةً بشكلٍ أفضل حتى في الأيام الغائمة التي يكون ضوء الشمس فيها غير مباشرٍ.

إذا كان الجليد شديد البرودة، فإن الاحتكاك بين الزلاجة والجليد لن يجعلها زَلِقة بما يكفي؛ ومِن ثَمَّ يصبح التزلج صعبًا. يُشبِّه بعض مستكشفي القطب الشمالي سَحْب الزلاجات على نعالها فوق هذا الجليد الشديد البرودة، بالجهد المطلوب لسَحْب زلاجة على الرمال.

يمكن للزلاجة أن تتحرَّك بسلاسة أيضًا فوق الجليد، خاصة إذا كانت زلاجة سريعة؛ لأن الهواء المحبوس بين الجليد والزلاجة يساعد على دعمها، مما يقلِّل من الاحتكاك، وتصبح الزلاجة عندئذٍ شبيهة بالحوامة.

(٣٤) التزحلق على الجليد وصنْع كرات الثلج

لماذا يمكن للزلاجات الانزلاق على الجليد؟ هل يمكن أن يكون الجليد شديد البرودة بحيث يُعيق التزحلق؟ هل يصبح التزحلق أكثر صعوبة إذا كانت درجة حرارة الجليد أدنى من نقطة التجمُّد؟ لماذا يمكنك أن تصنع كرةً ثلجيةً من الجليد، ولماذا لا يمكنك أن تصنعها عندما يكون الجليد باردًا جدًّا؟

الجواب: يمكن للزلاجات أن تنزلق على الجليد فقط بسبب الطبقة الزلقة من الماء السائل الذي يكون موجودًا بالفعل على سطح الجليد أو الذي ذاب من الجليد بفعل الاحتكاك بين الجليد والزلاجة المتحركة. كما يُدفئ ذلك الاحتكاك الشفرة الجليدية والمسار

الجليدي وأجزاء الجليد وقطرات الماء التي تدحرجها الشفرة المتحركة إلى الجانبين. إذا كان هناك الكثير من الماء على سطح الجليد، فإنه يُحدِثُ قوة مقاومة ضد الشفرة، مما يجعل الانزلاق أكثر صعوبة. يمكن أن يشكل هذا الأمر مشكلةً عندما تكون درجة حرارة سطح الجليد أقل بقليل من التجمُّد، وخاصة في ضوء الشمس الساطع.

في الماضي، كانت طبقة الماء الزلقة تُعزى إلى «الذوبان عن طريق تغيُّر الضغط»؛ حيث يقلل الضغط الواقع على الجليد من شفرة التزلج الرفيعة نسبيًّا من القيمة العادية لنقطة التجمد، ألا وهي صفر درجة مئوية. وهكذا، إذا لم يكن الجليد باردًا جدًّا، فسيصبح الجليد الذي يقع أسفل الشفرة المتحركة مباشرة «فوق» نقطة التجمُّد فجأة وسيذوب. ومع ذلك، تُظهِر التجارب والحسابات أن الذوبان عن طريق تغيُّر الضغط له تأثير ضئيل أو معدوم على التزحلق على الجليد.

على الرغم من أن جزيئات الماء الموجودة في الجليد تكون مثبتة بإحكام في مكانها بفضل الروابط التي تجمع بعضها ببعض، قد تكون جزيئات الماء الموجودة على سطح الجليد غير محكمة كسابقتها؛ ومِن ثَمَّ تكون في حالة سائلة نوعًا ما تُسمَّى بحالة «ما قبل الذوبان» أو «الذوبان السطحي». تؤدي تلك الجزيئات غير المحكمة التي توجد داخل بقع رقيقة جدًّا بدلًا من تشكيل طبقةٍ موحدة، إلى احتكاك الزلاجة بها بشكلٍ أقل من الجليد الصلب نفسه.

لكي تصنعَ كرةً ثلجية، عليك أن تضغط وتُكَوِّرُ حَفنة من الثلج المفكك حتى يصبح كرة مضغوطة. عندما تنزلق الثلوج على بعضها أثناء تلك العملية تذوب أجزاء نتيجة لاحتكاكها ببعض ثم تتجمد مرة أخرى على هيئة جليد، وهو ما يجعل الثلج يتماسك مع بعضه. يمكن أيضًا للبقع الموجودة على الثلج، والتي تكون في حالةِ ما قبل الذوبان، أن تتجمد وتُكَوِّن جليدًا يربط الثلج ببعضه. إذا كان الثلج «رطْبًا» (يمكن أن تذيبه أنت بسهولة أو أن يذيبه الهواء الدافئ أو ضوء الشمس)، قد ينتهي الأمر بوجود الكثير من الجليد داخل الكرة بحيث تصبح كرة جليدية أكثر منها كرة ثلجية. تحظر القواعد التقليدية لمسابقة قذف كرات الثلج أن يستخدم الناس كرات الجليد؛ لأنها يمكن أن تكون في صلابة الصخور.

لا يمكنك صنْع كراتٍ ثلجيةٍ إذا كان الثلج باردًا للغاية؛ إذ إن الاحتكاك بين الأجزاء المنزلقة من الثلج لا يمكنه أن يذيب الثلج؛ ومِن ثَمَّ لا يمكن أن يُعاد تشكُّل الثلج ليصبح جليدًا، فبدون روابط جليدية ينهار الثلج ويتفكك.

(٣٥) المشي على الجليد

لماذا يكون المشي على الجليد أسهل بكثير إذا كان باردًا جدًّا؟ خلال أي مرحلة من المشي يمكن أن تكون عرضة للانزلاق والسقوط؟ لماذا تكون بعض أنواع الأحذية أفضل للمشي على الجليد (أقل عرضة للانزلاق) من غيرها؟

الجواب: خلافًا للاعتقاد السابق، يتسبب وقْع الأقدام على الأرجح في إذابة الجليد بشكلٍ ضئيل أو في عدم إذابته على الإطلاق. ومِن ثَمَّ، فالعامل الذي يمكن أن ينقذك من الانزلاق والسقوط هو وقوع قدْر كبير من الاحتكاك على حذائك. قد تصلح المواد الصلبة على نحوٍ أفضل للسير على الجليد الرطب (الجليد الذي يحتوي على طبقة من الماء المثلج أو الماء العادي)، أما المواد اللينة فتصلح على نحوٍ أفضل على الجليد الجاف. في الحالتين، تساعد الأحذية ذات الدبابيس في عملية المشي؛ إذ إنها بوضوح، تكون بمنزلة مسامير قصيرة تُدَقُّ في الجليد، شريطة ألا يكون الجليد مفرط البرودة.

المرحلة الأكثر خطورة في عملية المشي على الجليد هي «ضربة الكعب»، ألا وهي عندما تخطو إلى الأمام وإلى أسفل ضاربًا الجليد بكعب القدم؛ إذ إنك تعتمد على الاحتكاك لتوقف القدم، ولكن على الجليد تكون هناك فرصة جيدة للتغلب على الاحتكاك بين الكعب والجليد. حينئذٍ، تنزلق القَدَم إلى الأمام دون سيطرة؛ ومِن ثَمَّ إذا لم تحصل على دعمٍ كافٍ فستسقط. إذا تعرضت للسقوط على هذا النحو، فأنت تعرف الآن أنك تحتاج إلى التحرك بخطوات صغيرة على الجليد بحيث تكون هناك حاجة لقدْر أقل من الاحتكاك لوقف حركة القَدم المتجهة إلى الأمام. كما أنك تعرف الآن أيضًا أن عليك ألا تركض أو تقفز على الجليد إلى الأمام أبدًا، إلا إذا كنت تستمتع بالسقوط!

(٣٦) أكواخ الإسكيمو الجليدية

هل يمكن لكوخ الإسكيمو (مبنًى مخروطي الشكل يُبنى من كتلٍ من الجليد أو الثلج) أن يُحافظ على دفءٍ ساكنه عندما تكون درجة الحرارة بالخارج أسفل نقطة التجمُّد؟

الجواب: يوفِّر كوخ الإسكيمو المزيد من الحماية من البرد وليس مجرد منع الرياح؛ ومِن ثَمَّ فإنه يقلل من مخاطر التعرُّض للتبرُّد الريحي. النقطة الأساسية هي أن جدران الكوخ توفِّر عزلًا حراريًّا، بحيث لا تُفقَد الطاقة الحرارية التي تصدُر من جسم الإنسان أو من اللهب (حتى ولو كان لهب شمعة) إلا ببطء من خلال الجدران. تكون الأكواخ

الجليدية المصنوعة جيدًا مرتفعة عن الأرض بقليل ويتطلب الدخول إليها اتخاذ وضعية القرفصاء، ويكون بداخلها «دكة نوم» مرتفعة تشغل نحو ثلثي الأرضية الداخلية للكوخ، ويكون الدخول عبْر نفق يؤدي إلى ثُلُث الأرضية الآخر المنخفض. بمجرد دخول الكوخ، يصعد الشخص ليستلقي على دكة النوم. ولأن الهواء الأدفأ (الأخف) يرتفع، بينما ينخفض الهواء الأبرد (الأكثف)، يكون الهواء الموجود فوق دكة النوم مباشرة أدفأ بكثير من الهواء الموجود في الجزء المنخفض من الأرضية، وهو ما يسمح للشخص بأن ينام نومًا دافئًا نسبيًّا. (إذا بُني الكوخ وكانت به قمة مرتفعة، فلن تتحقق النتيجة السابقة؛ إذ إن الهواء الأدفأ سينتقل إلى أعلى بعيدًا عن دكة النوم.)

تقلِّل الجدران الأثخن أو الجدران التي لا يكون الجليد فيها مرصوصًا بتماسك (مع وجود الكثير من الجيوب الهوائية) من التوصيل الحراري عبْر الجدران؛ ومِن ثَمَّ تحافظ على دفء المكان بالداخل. لعزل الجزء الداخلي بصورة أكبر وتقليل أي سَحْب للطاقة الحرارية، يمكن سَدُّ الفراغات الموجودة بين كتل الجليد عن طريق وضع الثلج باليد على تلك الفراغات من الداخل والخارج. عادة ما يذوب الثلج الذي يَسُدُّ الفراغات والسطح الداخلي لكتل الجليد ثم يتجمد مرة أخرى مكوِّنًا طبقة جليدية واقية.

(٣٧) لفائف الثلج

في حالاتٍ نادرة، يمكن لعاصفةٍ ثلجية عاتية أن تُشَكِّل كراتٍ وأسطوانات كبيرة من الثلج في الحقول المفتوحة يبلغ قُطر بعضها عشرات السنتيمترات وتبلغ كتلتها حوالي ستة كيلوجرامات. تشبه الأسطوانات الثلجية أكياس النوم الملفوفة أو طبقة العشب الملفوفة التي طُوِيَت قبل عملية الزراعة، باستثناء أن الأسطوانات الثلجية تكون أحيانًا مجوَّفة من الداخل، فما الذي يتسبب في إنتاج هذه الأشكال الغريبة؟

الجواب: يُعتَقد أن لفائف الثلج تتشكل عندما تتساقط ثلوج جديدة على غطاءٍ متشكِّل بالفعل من الجليد القشري. إذا كانت درجة الحرارة قريبة من نقطة التجمُّد، يلتصق الجليد الجديد بالجليد القشري. وإذا كانت الرياح قوية، فيمكنها أن تجذب رقعة بارزة من الطبقة الجليدية المركبة وتلفها بطول الحقل. تسحب الرقعة أثناء دورانها المزيد من الجليد وينمو قطرها، وعندما تكون الرياح عاصفة، يمكن أن تتعثر اللفافة الثلجية في اتجاهات عديدة وينتهي بها الحال بشكلٍ شبيه بالكرة العادية أو بكرة القدم الأمريكية. ولكن عندما يكون اتجاه الرياح عامة في اتجاه واحد، يكون شكل اللفافة

الثلجية أسطوانيًّا. إذا كانت الرقعة الثلجية الأولى التي رفعتها الرياح طويلة، فسيكون الجزء الداخلي للأسطوانة مجوفًا.

كما يمكن أيضًا أن تتشكَّل لفائف ثلجية بواسطة النُّدَف الثلجية المفردة التي تدفع بها الرياح فوق الثلوج الجديدة أو من خلال الأحجار التي تُخلْخِلها الرياح من أماكنها وتدفع بها أسفل منحدرٍ ثلجي. ويمكن معرفة ذلك إذا فتحنا اللفافة الثلجية ووجدنا حجرًا بداخلها.

(٣٨) الانهيار الجليدي

ما الذي يتسبَّب في حدوث الانهيار الجليدي؟

الجواب: لا يوجد بعدُ تفسير كامل لما يُسبِّب حدوث الانهيار الجليدي، ويرجع ذلك إلى العديد من المتغيرات التي تلعب دورًا في هذا الأمر. ومِن ثَمَّ، لا تتوفر تكهنات جدية بشأن متى وأين قد يحدث انهيار جليدي. ومع ذلك، فهناك العديد من الأشياء المعروفة عن الانهيارات الجليدية. يبدأ «الانهيار الجليدي للجليد المفكك» عند نقطة في الجليد الجاف أو الرطب غير المتماسك، ويشبه الانزلاق إلى حدٍّ كبير انزلاق الرمل من أعلى كومة من الرمال. أما «انهيار ألواح الجليد» فهو حركة لوح جليدي متماسك نسبيًّا. يمكن أن يبدأ الانزلاق بعدة طرق، على سبيل المثال عندما يزداد الحِمْل الذي تسبِّبه الأمطار أو حركة أحد المتزلجين على اللوح الجليدي، أو عندما يسخن.

يلقى العديد من المتزلجين حتفهم كل عام بسبب الانهيارات الثلجية التي تتسبب حركتهم فيها، إلا أن تفاصيل ما يُطلِق شرارة عمل آلية الانهيار لا تزال غير مفهومة. تنطوي الآلية على وجود طبقة ضعيفة من الثلوج مدفونة تحت لوح الجليد. وإليك إحدى الطرق التي يمكن أن تتشكَّل بها هذه الطبقة الضعيفة: تتساقط الثلوج في بداية الموسم على الأرض التي لا تزال درجة حرارتها فوق التجمُّد، ثم تنخفض درجة حرارة السطح العلوي للثلج إلى ما دون نقطة التجمُّد. يدفع توزيع درجة الحرارة (التي تكون أدفأ في قاع الثلج وأبرد عند سطحه العلوي) بخار الماء إلى أعلى حيث يتكثف داخل النُّدَف الثلجية. تتحول النُّدَف الثلجية إلى ما يُعرف باسم «الثلج العميق» وهي عبارة عن مجموعة من حبيبات الثلج التي ليست مترابطة بإحكام، وهي التي تكون الطبقة الضعيفة من الثلوج. عندما تتساقط الثلوج الجديدة على تلك الطبقة، تصبح الأمور مهيأة لحدوث انهيارٍ

جليديٍّ؛ وذلك لأن الطبقة الضعيفة من الثلوج يمكن أن تُكْسَر؛ أي إن مقاومتها تكون ضعيفة تجاه الحركة الموازية لها، تمامًا كالزُّبد الذي يُفرَدُ على الخبز بالسكين.

يمكن أن يتسبب أحد المتزلجين في هذه الحركة خاصة إذا كانت قوة تزلُّجه إلى أسفل على سطح الجليد تُشكِّل ضغطًا على الطبقة الضعيفة. أما إذا كان سطح الجليد صلبًا نسبيًّا؛ فلن تؤثِّر حركة المتزلج على الطبقة الضعيفة من الثلوج ولن تتسبب في تحريك اللوح الجليدي. إذا كانت طبقة الجليد أقل صلابة، وقد تكون كذلك نتيجة لتسخين ضوء الشمس لها، يمكن أن يسبِّب الضغط الناتج عن حركة المتزلج تشقق الطبقة الضعيفة، فتبدأ حركة الانهيار. ومِن ثَمَّ، يمكن لقطاع من الجليد أن يكون آمنًا في الصباح الباكر حين يكون باردًا، بينما يُشكِّل خطرًا في وقتٍ لاحق من اليوم عندما تصير درجة الحرارة أدفأ.

(٣٩) الأنماط التي يُشكِّلها الثلج الذائب

عندما يذوب الثلج على الأرض أو على سطحٍ مرصوف، لماذا تتخذ كتل الثلج التي تدوم لفترة أطول دون أن تذوب في بعض الأحيان هيئة أنماط هندسية مثل الأشكال السداسية أو الصفوف؟

الجواب: تُشكل الثلوج والمياه الذائبة طبقة رقيقة على طبقة رقيقة من الأرض تتباين فيها درجة الحرارة أفقيًّا. أسفل هاتين الطبقتين لا تتغير درجة حرارة الأرض أفقيًّا. تكون بعض البقع في الجليد بالصدفة أقرب إلى الذوبان من بقية الجليد. لنأخذ واحدة من تلك البقع بعين الاعتبار. كي يذوب الثلج، فهو يحتاج إلى طاقة حرارية ليحرِّر جزيئات مياهه من البنية الصلبة لبلورة الجليد. يمكن أن يحصل الثلج على تلك الطاقة الحرارية من الجليد المحيط به حتى مسافة محدودة. ويتأخر ذوبان الثلج لأن الثلج المحيط يفقد طاقته الحرارية؛ ومِن ثَمَّ يُشكِّل كتل الجليد التي تدوم لفترة أطول دون أن تذوب. تحدد المسافة المحدودة التي نُقلَت الطاقة عبْرها المسافة التي تفصل كل كتلة عن الأخرى؛ ومِن ثَمَّ نحصل على كتل ثلجية تفصلها عن بعضها نفس المسافة تقريبًا.

(٤٠) إذابة الجليد المتراكم على الأرصفة باستخدام الملح

لماذا يذوب الجليد المتراكم على الأرصفة والطُّرُق خلال فصل الشتاء عندما يُرَشُّ بالملح؟ لماذا يُفَضَّل استخدام كلوريد الكالسيوم (الملح الصخري) أحيانًا عن استخدام كلوريد الصوديوم (ملح الطعام)، لأسباب أخرى غير المتعلقة بالتكلفة؟

الجواب: لنفترض أولًا أن هناك طبقة من الماء على سطحٍ جليدي وأن درجة حرارة كلٍّ من السائل والثلج صفر درجة مئوية؛ أي درجة حرارة تجمُّد الماء العادية. تكون الواجهة التي تفصل بين الماء السائل والماء المجمَّد عامرة بالنشاط على المستوى الجزيئي، وذلك لأن الجزيئات تترك الجليد باستمرار وتنضم إلى السائل، والعكس بالعكس. ومع ذلك، إذا تساوى عدد الجزيئات التي تترك الجليد مع عدد الجزيئات التي تنضم إليه، فلن تتغير كمية الجليد.

إذا رششت الملح في السائل، «تتفكك» جزيئات الملح إلى أيونات موجبة وأيونات سالبة، تتوقُ جزيئات الماء للتجمُّع حول كل نوع من الأيونات، ويُقال إن الأيونات تكون «مميَّأة». لا يمكن للماء أن ينضم إلى الجليد لأنه يكون متحدًا بهذا الشكل مع الأيونات. وبما أن الجليد ينضم له عدد أقل من جزيئات الماء، بينما يظل عدد جزيئات الماء الذي يتركه ثابتًا، تبدأ كمية الجليد في الانخفاض؛ أي يبدأ الجليد في الذوبان. إذا خفَّفَ الماءُ الذائب الخليط الملحي بما يكفي، يعود الوضع إلى تساوي عدد الجزيئات التي تنتقل من الجليد وإليه؛ ومِن ثَمَّ يتوقف الذوبان؛ وعند إضافة المزيد من الملح، تبدأ عملية الذوبان مرة أخرى.

تكون الجزيئات في الحالة السائلة أكثر نشاطًا من الجزيئات الحبيسة داخل البنية البلورية للجليد. عندما ينضم جزيء إلى الجليد، فلا بد أن يفقد جزءًا من طاقته؛ وعندما يترك جزيء الجليد، فلا بد أن يحصل على نفس القدْر من الطاقة. إذا تطابق عدد الجزيئات التي تنضم إلى الجليد وتخرج منه، فإن الطاقة التي تصدر أثناء إحدى العمليات توفِّر الطاقة اللازمة لبدء العملية الأخرى. ولكن عندما يقلِّل الملح من عدد الجزيئات التي تنضم إلى الجليد، فما الذي يمد الجزيئات التي تستمر بترك الجليد بالطاقة؟ إذا كان الماء–الجليد في الهواء الطلق، فسيأتي مخزون الطاقة من الرصيف والطريق والهواء. وعلى الرغم من أن الجليد يذوب، فإن درجة حرارة الماء–الجليد لا تتغيَّر وتظل عند نفس درجة حرارة البيئة المحيطة.

مع ذلك، إذا كانت كمية الطاقة الآتية من البيئة المحيطة بالماء–الجليد غير كافية، فلا بد أن توفِّر الجزيئات الطاقة لعملية الذوبان. يقلِّل فقدان الطاقة من درجة حرارة السائل أولًا، ثم من درجة حرارة الجليد. وفي مثل هذه الحالة، يُقال إن نقطة تجمُّد الماء «مُثَبَّطة» بسبب وجود الملح. تنخفض درجة الحرارة حتى يحدث تطابق مرة أخرى بين عملية خروج وانضمام الجزيئات من الجليد وإليه.

يمكن أيضًا رؤية انخفاض نقطة التجمُّد إذا بُرِّدَت المياه المالحة تدريجيًّا عبْر مجمِّد شديد البرودة. ومع ذلك، هناك حدٌّ لمدى الانخفاض الذي يمكن أن تصل إليه نقطة التجمُّد.

يكون الحد النهائي لكلوريد الصوديوم حوالي سالب ٢١ درجة مئوية، بينما يكون حوالي سالب ٥٥ درجة مئوية بالنسبة لكلوريد الكالسيوم. هذا الحد الأدنى لكلوريد الكالسيوم هو أحد الأسباب وراء استخدام الملح الصخري على الطرقات؛ إذ يمكنه أن يزيل الجليد من الطرق عند درجات حرارة أقل بكثير من ملح الطعام.

(٤١) المثلجات المصنوعة بالمنزل

يتكوَّن جهاز صنْع المثلجات المنزلي من علبة معدنية مركزية محاطة بطبقات من الملح والثلج المجروش، أما الهيكل الخارجي فهو عبارة عن وعاء خشبي. وبعد أن يبرد خليط الكريمة في الثلاجة، يُصَبُّ داخل العلبة وتُوضَعُ أداة تقليب. عندما كنت صغيرًا، كنتُ أَخفُق خليط الكريمة من خلال ذراع تدوير، أما الآن، فأقوم بتوصيل جهاز صنْع المثلجات بمقبس وأترك المحرِّك يقوم بالعمل اللازم.

لماذا يستخدم الخشب على الهيكل الخارجي لجهاز صنْع المثلجات؟ ولماذا تكون العلبة مصنوعة من المعدن؟ لماذا يُستخدم الملح والثلج المجروش؟ لماذا يجب خفْق خليط الكريمة؟ ألا يمكن تجميد الخليط في المجمِّد فحسب؟ ما الذي يحدث إذا لم تنخفض درجة حرارة خليط الكريمة بشكلٍ كبيرٍ تحت درجة التجمُّد العادية للماء؟ وماذا يحدث إذا انخفضت درجة الحرارة أكثر من اللازم؟

الجواب: تكون نقطة تجمُّد خليط الكريمة (درجة الحرارة التي يبدأ فيها الجليد بالتشكُّل داخلها) أقل من صفر درجة مئوية؛ لأن المكونات تتداخل مع عملية تكوُّن الثلج. للحصول على درجة حرارة منخفضة كهذه، عليك أن تضع الملح على الثلج المكتظ حول العلبة المعدنية (انظر البند السابق). يكون حينئذٍ الثلج وماؤه الذائب أبرد من درجة صفر مئوية؛ ومِن ثَمَّ يسحب الطاقة الحرارية من خليط الكريمة. ومع ذلك، يجب عدم استخدام الكثير من الملح وإلا فسيصبح الثلج والماء باردين للغاية فيسحبان الطاقة الحرارية من خليط الكريمة بسرعة كبيرة. في هذه الحالة، يتجمد مزيج الكريمة الموجود بجوار جدار الوعاء بسرعة ويُبطِئ من حركة الخفق. السَّحب التدريجي للطاقة الحرارية هو الأمر المطلوب بحيث تكون كل محتويات الخليط بالكامل في الحالة نفسها. أما بالنسبة للوعاء الخارجي الذي يحمل الثلج، فلا بُد أن يكون مصنوعًا من الخشب أو من أي مادة أخرى رديئة التوصيل للطاقة الحرارية بحيث لا تُذيب درجة حرارة الغرفة الجليد.

يُستخدم الثلج المجروش لأن مكعبات الثلج الأكبر حجمًا لا تصنع سوى نقاط تلامس قليلة مع جدار الوعاء؛ ومِن ثَمَّ تُبَرِّدُ خليط الكريمة ببطء شديد، وإذا خفقت الخليط بدون أن تبرِّده إلى الحد الكافي، فإنك ستقوم بفصل الزبدة بدلًا من صنْع الآيس كريم.

أما بالنسبة لعملية الخفق، فلها غرضان: (١) تعطُّل نمو بلورات الثلج في خليط الكريمة عن طريق تحريكها وتغطيتها بالكريمة. إذا تُركت البلورات حتى تنمو وتصير أكبر حجمًا، كما هو الحال إذا جُمِّدَ خليط الكريمة في أي مُجَمِّد عادي، فسيكون المنتج النهائي ذا قوام حُبيبي غير مستساغ. عندما يُخفَق خليط الكريمة، تبقى بلورات الثلج بحجمٍ صغير، ويكون المنتج النهائي ناعمًا عند تناوله. (٢) أما الغرض الآخر من الخفق فهو خفق فُقَّاعات الهواء داخل خليط الكريمة بحيث تصير المثلجات عبارة عن رغوة مجمَّدة، وليس قطعة كثيفة من الثلج. تستقر فُقَّاعات الهواء نتيجة لوجود كريات الدهون في خليط الكريمة. تُسمَّى الزيادة في الحجم التي تحدث نتيجة لوجود فُقَّاعات الهواء «الغمر». عندما تكون المثلجات خفيفة وهشة، قد يكون نصف حجمها عبارة عن هواء، مما يحدث غمرًا بنسبة مائة بالمائة.

بعد خفق الخليط، يُترَك ليستقر في البيئة الباردة التي يوفِّرها خليط الثلج والملح. أثناء هذه الفترة، يُقال إن الخليط يصبح «أقسى»؛ لأن الماء السائل المتبقي يُترَك ليتجمد. إذا سار كل شيءٍ بشكل جيد، يكون المنتج النهائي متجانسًا ذا بلورات صغيرة؛ ومِن ثَمَّ يكون ناعمًا سلسًا عند التذوق. ومع ذلك، إذا ذابت المثلجات ثم أُعيدَ تجميدها، فإنها ستمتلئ ببلورات الثلج المحببة.

سيصبح سائل الثلج حبيبيًّا إذا حُفِظَ في المُجَمِّد لفترة طويلة جدًّا (حتى إذا كانت درجة الحرارة دائمًا تحت نقطة التجمُّد)، وذلك لأن بلورات الثلج الصغيرة التي يلامس بعضها بعضًا ستندمج لتصبح بلورات ثلجية أكبر. (تحفز مخزونات الطاقة هذه العملية بسبب تقلص المساحة الكلية للسطح الناتج عن عملية الدمج.) يمكن أن تتعرض المثلجات المخزنة تخزينًا طويل الأمد لنفس النتيجة، باستثناء أن الغلاف الذي يحيط ببلورات الثلج يبطئ من هذه العملية.

يُقال إن الطيارين الأمريكيين الذين كانوا متمركزين في إنجلترا خلال الحرب العالمية الثانية كانوا يصنعون المثلجات عن طريق وضع علبة من خليط الكريمة في مقصورة الخلفية المخصصة لضابط المدفعية بطائراتهم المسماة «القلعة الطائرة»، بحيث تخضع لنفس البرودة والاهتزاز اللذين يتعرَّض لهما ضابط المدفعية الخلفي، وعندما كان الطيارون يعودون إلى قاعدتهم، كانت المثلجات جاهزة للأكل.

(٤٢) احتساء القهوة الساخنة، وتناول البيتزا الساخنة

لماذا يمكن احتساء (أو ربما رشْف) القهوة، التي يمكن أن تكون ساخنة بما فيه الكفاية لحرق أحدهم، دون أي أذًى؟ لماذا يكون الفم أكثر عرضة للحرق من تناول البيتزا الساخنة عنه من تناول حساء بنفس درجة سخونة البيتزا؟

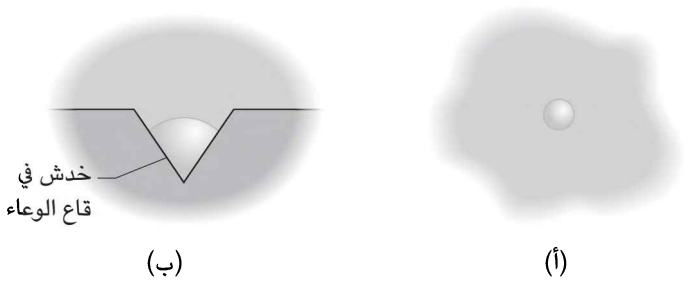
الجواب: من الواضح أن خطر التعرُّض للحرق يعتمد على درجة حرارة الطعام الذي يُوضَع داخل الفم، كما يعتمد أيضًا على كمية الطعام، ومدى قدرة الطعام على نقل الطاقة الحرارية إلى الفم، وطول مدة ملامسة الطعام للفم. يمكن ارتشاف القهوة بأمان حتى ولو كانت ساخنة للغاية لدرجة أن تحرق البشرة إذا انسكبت عليها، كما يمكن أن يحدث عندما يحمل الشخص كوبًا من القهوة أثناء القيادة. عندما يُسكب السائل الساخن، عادة ما تمتص الملابس كمية كبيرة منه؛ ومِن ثَمَّ تحافظ على الاتصال بين السائل والجلد لفترة كافية للغاية لنقل الطاقة الحرارية إلى البشرة.

في المقابل، لا ينتج عن الرشفة سوى دخول كمية صغيرة من السائل إلى الفم حيث لا يظل على اتصال بأي جزء من الفم سوى لفترة قصيرة. كما يساعد الرشف على عدم الاحتراق بطريقتين أخريين: (١) يُخلط الهواء بالسائل، فيبرد السائل. (٢) يفتت السائلُ إلى قطرات لا تَنقل الواحدة منها بشكل فردي سوى كمية صغيرة من الطاقة الحرارية حيثما لامست الفم من الداخل.

أي طعام يكون من ضمن مكوِّناته الجبن الساخن، خاصة إذا سُخِّنَ في فرن الميكروويف، لا بد أن يُتَنَاولَ بحرص لسببين: (١) قد لا يبدو سطح الجبن ساخنًا بشكل مميز، إلا أن كتلة الجبن نفسها تحمل الكثير من الطاقة الحرارية. (٢) الأسوأ من ذلك هو أن الجبن يمكن أن يلتصق بالسطح العلوي من الفم. في الواقع، يمكنك أن تحرق سقف فمك في غضون ثوانٍ وتعاني من الألم لأيام.

(٤٣) الماء المغلي

إذا غليت الماء في وعاء، لماذا تتكوَّن الفُقَّاعات قبل أن يصل الماء إلى نقطة الغليان؟ ولماذا تصل الضوضاء الصادرة من الوعاء إلى أقصاها قبل أن يغليَ الماء بالكامل؟ باختصار، كيف يغلي الماء عند تسخينه على موقد؟



شكل ٤-٥: بند ٤-٤٣: (أ) تمتلك فُقَّاعة الهواء الصغيرة في الماء سطحًا شديد الانحناء وقوة داخلية كبيرة. (ب) تمتلك الفُقَّاعة الهوائية الموجودة في شق سطحًا أقل انحناءً وقوة داخلية أصغر.

الجواب: إن أولى الفُقَّاعات التي تتشكل تمتلئ بالهواء وتُدفَع خارج المحلول بفعل زيادة درجة الحرارة. تظهر فُقَّاعات الهواء هذه في قاع الوعاء أولًا حيث تدخل الطاقة الحرارية الماء عن طريق الموقد.

عندما تتشكل إحدى فُقَّاعات الهواء، يميل ضغط الهواء إلى دفع سطحها للخارج، لكن التوتر السطحي (الذي يحدث بسبب الانجذاب المتبادل بين جزيئات الماء)، يميل إلى سَحْب السطح إلى الداخل. تتسم الفُقَّاعة الصغيرة ذات السطح الشديد الانحناء بتوتُّر سطحي كبير؛ ومِن ثَمَّ تنهار (شكل ٤-٥أ). ومِن ثَمَّ، لا تتشكل فُقَّاعات الهواء في الماء السائب، ولا حتى فوق قاع الوعاء.

ومع ذلك، «يمكن» للفُقَّاعات أن تتشكل داخل الشقوق (أو الخدوش) بطول قاع الوعاء حيث يكون سطحها في البداية أقل انحناءً (شكل ٤-٥ب)؛ ومِن ثَمَّ يحدث سَحْب داخلي قليل نسبيًّا من التوتُّر السطحي. يزداد الضغط الخارجي بثبات كلما خرج مزيد من الهواء من المحلول ليدخل الفُقَّاعة. وهكذا، فإن الفُقَّاعة تتمدَّد حتى تصبح كبيرة بما يكفي للخروج من الشق. وبما أن الفُقَّاعة أخف من الماء، فإنها ترتفع عبْر الماء. ينتهي هذا النشاط بمجرد دفع معظم الهواء خارج المحلول.

بعد ذلك بوقتٍ قصير، يصبح قاع الوعاء ساخنًا بما فيه الكفاية لتبخير الماء، ثم تتكوَّن فُقَّاعات البخار في الشقوق. في البداية، تنضغط كل فُقَّاعة بصورة شبه فورية

وتصدر «نقرة» تسري عبْر الماء والوعاء ثم إلى الهواء. وعندما يتبخَّر المزيد من الماء على صورة فُقَّاعات، تصبح في النهاية كبيرة بما يكفي للخروج من الشق والصعود إلى أعلى. ومع ذلك، فإنها تنضغط بمجرد أن ترتفع إلى ماء أكثر برودة حيث يتكاثف بخار الماء مرة أخرى ويتحول إلى سائل. مرة أخرى، كل انضغاط يصدر نقرة تسري عبْر الماء.

ومع استمرار ارتفاع درجة حرارة الماء، ترتفع الفُقَّاعات بشكلٍ تدريجي قبل أن تنضغط على نفسها ثم تصل في النهاية إلى السطح العلوي. وهناك تتفرقع مصدرةً صوتًا أخفَّ بكثير. حينها يكون الماء في حالة غليان كامل.

(٤٤) سلق البيض

ما الذي يحدِّد الوقت اللازم لسلق البيض جيدًا في الماء؟ لماذا يزداد الوقت المطلوب حين تحدث عملية السلق على ارتفاعات أعلى؟ لماذا عادة ما تتشقق قشرة البيض أثناء السلق، وكيف يمكن تجنُّب حدوث ذلك؟

الجواب: لسلق البيض جيدًا يجب أن تصل درجة حرارة الصفار إلى ٧٠ درجة مئوية. في عملية سلق البيض تكون الطريقة الوحيدة لزيادة درجة حرارة الصفار هي عن طريق توصيل الطاقة الحرارية من الماء إلى صفار البيض. يعتمد معدل التوصيل على الفرق في درجات الحرارة بين الماء والمكوِّنات الداخلية للبيضة. إذا تم وضع البيضة في ماء الصنبور ثم سُخِّنَ الماء تدريجيًّا إلى درجة الغليان، يستغرق وقت السلق ما بين عشر وخمس عشرة دقيقة تقريبًا. يقلُّ وقت السلق إذا وُضِعَت البيضة في الماء المغلي، ولكن عندئذٍ يتشقق قشر البيضة، مما يسمح بخروج مكوِّناتها إلى الماء.

يرتبط تأثير الارتفاع بقدرة جزيئات الماء على مغادرة سطح الماء بنجاح؛ ومِن ثَمَّ بقدرتها على التبخُّر. تترابط جزيئات الماء في درجة حرارة الغرفة على السطح بشكل غير مُحكم من خلال القوى الجاذبة فيما بينها. إذا ازدادت درجة حرارة الماء، فسيصبح لهذه الجزيئات طاقة حرارية أكبر (تتحرك بمزيد من الطاقة) ويمكن أن يتحرَّر بعضها من القوى الجاذبة تاركةً سطح الماء. تتصادم بعض هذه الجزيئات المحررة مع جزيئات الهواء وترتد إلى الماء مرة أخرى. ومع ذلك، عند نقطة غليان الماء، تفوق عملية فقْد الجزيئات عملية عودتها من الارتداد بنسبة كبيرة.

إذا غلينا الماء على ارتفاع أعلى، فإن كثافة جزيئات الهواء فوق الماء تصير أخف؛ ومِن ثَمَّ تقل فرصة الارتداد. حينئذٍ، يمكن أن تتجاوز عملية الفقدان عملية العودة من الارتداد

بشكل كبير، حتى عند درجة حرارة أقل من المطلوب في الارتفاع الأدنى. باختصار، تكون نقطة غليان الماء أقل في الارتفاع الأعلى. وهكذا، يصبح معدل توصيل الطاقة الحرارية إلى البيضة أبطأ، فتستغرق وقتًا أطول لتُسلَق جيدًا.

ستتصدع قشرة البيضة إذا كانت باردة عند وضعها في الماء المغلي. يعود حدوث التشقق إلى الضغط الخارجي للغاز الذي ينتج داخل البيضة. إذا زاد هذا الضغط بسرعة، يمكن أن تتصدع القشرة، وعندئذٍ، سترى سلسلة من فُقَّاعات الغاز ترتفع من الشق. يمكن أن تمنع عملية السلق الأبطأ البيضة من التشقق. يمكن أن تؤدي إضافة الملح إلى تخثر بياض البيض أثناء خروجه، وهو ما يؤدي إلى سَدِّ الشق. كما يمكن ثقب البيضة بإبرة لتوفير منفذٍ لخروج الغاز، وهو ما قد يمنع تراكم ضغط الغاز.

(٤٥) طهي الطعام على موقد أو فوق شعلة نار

لماذا يمكن أن يَحمرَّ لون اللحم إذا شُوي فوق شعلة (أو أسفلها)، أو قُلي في الزيت، أو طُهِي في الفرن، ولكنه لا يكتسب هذا اللون إذا سُلِقَ في الماء أو طُهِيَ في فرن الميكروويف؟ وعندما يَحمرُّ لون اللحم، لماذا لا يَحمر من الداخل كذلك وليس فقط من الخارج؟ إذا كنت تطهو قطعة لحم مشويٍّ ذات وزن معيَّن لفترة معينة، وكان لديك قطعة لحم مشوي لها «ضِعف» وزن الأولى، فهل يعني ذلك أنه يتحتم عليك «مضاعفة» وقت الطهي؟

الجواب: يَحمرُّ لون اللحم (وهو ما يُسمَّى بتفاعل ميلارد) عندما تتفاعل وحدة كربوهيدرات مع حمض أميني. وبما أن التفاعل يتطلب درجات حرارة عالية (أعلى من نقطة غليان الماء)، فلا بد من تسخين اللحم عن طريق اللهب أو جدران الفرن الساخنة أو الزيت الساخن. تنقل الطريقتان الأوليان الطاقة الحرارية إلى سطح اللحم عن طريق الأشعة تحت الحمراء بالأساس، أما الطريقة الأخيرة فتنقله عن طريق التوصيل والحمل الحراريين (من المقلاة عبْر الزيت الساخن). يسخن اللحم من الداخل تدريجيًّا بفعل الطاقة الحرارية التي تنتقل من السطح إلى الداخل، ولكن اللحم من الداخل لا يصبح أكثر سخونة من نقطة غليان الماء؛ ومِن ثَمَّ لا يَحمر لونه أبدًا. أما إذا طُهِيَ اللحم في الماء المغلي أو في فرن الميكروويف، فحتى السطح لا يتجاوز نقطة غليان الماء؛ ومِن ثَمَّ لا يمكن أن يَحمر لونه أبدًا.

يمكن تحمير بعض أنواع اللحوم، مثل شرائح اللحم البقري، على نار شديدة السخونة، ثم طهيها على نار متوسطة حسب الرغبة. يَحمر لون اللحم نتيجة لهذه العملية، ولكنها

لا تسدُّ مسام اللحم كما يظن بعض الطهاة، والدليل على ذلك هو أن اللحم لا يزال يفقد سوائله؛ ومِن ثَمَّ فالتحمير يكون غرضه إكساب اللحم مذاقًا في المقام الأول.

يمكن وصف اللحوم بأنها مصفوفة بروتينات تحتوي على كمية لا بأس بها من الماء. في البداية يتم الاحتفاظ بالماء جيدًا لأنه لا الجاذبية ولا الضغط بقوة بواسطة أي أداة من أدوات الطهي يمكنهما أن يدفعا الماء للخروج من مسام اللحم. ولكن مع زيادة درجة حرارة اللحم أثناء الطهي، يتحرَّر الماء ويمكن لكلٍّ من الجاذبية وأدوات الطهي دفعه للخروج من مسام اللحم. يُفقَد معظم الماء الموجود في أيِّ جزءٍ من أجزاء اللحم عندما تصل درجة حرارته إلى ٦٠ درجة مئوية، وعندما يخرج الماء، يتقلص اللحم. ومِن ثَمَّ، يمكن لشريحة لحم مطهوة جيدًا أن تكون صغيرة الحجم بشكلٍ مدهش.

يفضِّل بعض الناس طهي قطعة لحم مشوي على مدار عدة ساعات عن طريق وضع اللحم في موقدٍ درجة حرارته مضبوطة على درجة الحرارة النهائية المرغوب أن تصل إليها تسوية اللحم من الداخل، وهي أقل من نقطة غليان الماء. بهذه الطريقة، تفقد قطعة اللحم المشوي القليل من مائها أثناء الطهي؛ لأن الماء على السطح لا يتبخر تمامًا.

يمكن لطبخ قطعة لحم مشوية في فرنٍ حرارته أكثر حدة أو طبخ شريحة لحم على الفحم أن يكون صعبًا؛ لأنه يمكن تجاوز درجة الحرارة المرغوب أن تصل إليها تسوية اللحم من الداخل؛ ومِن ثَمَّ يفقد اللحم الكثير من طراوته بسبب التبخير ويصبح جافًّا. عندما يقترب الجزء الداخلي من اللحم من درجة الحرارة المرغوبة، يجب فحص اللحم بشكل متكرر، إما عن طريق مقياس درجة الحرارة الذي يُباع في الأسواق (المزدوج الحراري) أو أن يقطع الطاهي قطعة صغيرة لفحص لون اللحم من الداخل. يُعتبر اللون دليلًا غير دقيق على درجة الحرارة؛ لأنه عندما تتغير طبيعة الميوجلوبين الموجود في اللحم بسبب زيادة درجة الحرارة، يتغير لون اللحم من الأحمر إلى اللون البني الرمادي. (يكون الميوجلوبين في الحيوان الحي مسئولًا عن حمل الأكسجين المنقول إلى اللحم من الرئتين عن طريق الهيموجلوبين الموجود في الدم.)

يمكن أن يعتمد تحديد المدة الزمنية اللازمة لطهي قطعة لحم مشوي أو ديك رومي وفقًا لوزنه حسب إحدى الوصفات على التخمين وحسب؛ وذلك لأن كل فرن يكون له معدل تسوية يختلف عن الأفران الأخرى (لا تكون إعدادات درجة الحرارة متماثلة تمامًا)، كما أن قِطَع اللحم المختلفة توصِّل الطاقة الحرارية بمعدلات مختلفة. ومع ذلك، فهناك قاعدة عامة لذلك: إذا كان الوقت المناسب لتسوية قطعة لحم مشوي ذات وزن معين هو T،

فإذا كان الوزن أكبر بمرتين فإن وقت الطهي يساوي $2^{2/3}T$، وإذا كان الوزن أكبر بثلاث مرات، فإن الوقت يساوي $3^{2/3}T$. هل يمكنك تحديد النمط؟ يُرفَعُ معامل الضرب الخاص بالوزن إلى القوة ٢ / ٣.

(٤٦) طهي الطعام على نار المخيم

قد يشتمل الطهي على نار المخيم على أدوات طهي تقليدية (مثل المقلاة) وطُرُق طهي تقليدية (تُوضع المقلاة فوق اللهب)، ولكن يمكن أيضًا استخدام طُرُق طهي غير عادية، خاصة في موقف «الحفاظ على البقاء». كيف يمكنك استخدام رقائق الألومنيوم وعلبة معدنية كبيرة أو كيس من الورق أو الصخور أو البرتقال لطهي البيض أو اللحم مثلًا؟

الجواب: يمكن تجهيز رقائق الألومنيوم بحيث تعكس بعضًا من الأشعة تحت الحمراء الصادرة عن نار التخييم على الطعام حتى ينضج. واحدة من أفضل الطرق هي تثبيت رقاقة الألومنيوم كما لو كانت سقفًا مائلًا لكوخٍ بحيث تعكس الأشعة على الطعام الموضوع على «أرضية» الكوخ.

يمكنك تصميم موقد من أيِّ علبة كبيرة عن طريق قلْبِها وثقبِ ثقوب بالقرب من القمة وطي جزء من الأسفل. سيُسَخِّن الفحم الذي يُوضع في الطية العلبةَ من الداخل، مما يؤدي إلى تدفُّق الهواء الساخن من الفتحات الموجودة في الأعلى ويُمتَص الهواء البارد من خلال الطية. يمكنك الطهي مباشرة على السطح المستوي للعلبة المقلوبة، أو وضع علبة ثانية أصغر لطهي الطعام.

مكَّن تغليف الطعام في رقائق الألومنيوم ودفنه في الفحم (الذي قد يكون مُغطًّى بالتراب حينئذٍ). ومع ذلك، تميل بعض أجزاء الطعام إلى الاحتراق عندما تُطهى بهذه الطريقة. أفضل طريقة هي لف الطعام في طبقتين من رقائق الألومنيوم ووضع ورقة بينهما. يُبطئُ الهواء المتبقي في الفراغات بين هذه الطبقات الثلاث من نقْل الطاقة الحرارية إلى الطعام، مما يقلل من احتمالية ظهور البقع البنية ومن الاحتراق. يكمن مبدأ مشابه وراء الطهي باستخدام البرتقال: اقطع شريحةً من الثلث الأعلى للبرتقالة، ثم أفرغ بقية البرتقالة وضع الطعام في التجويف الداخلي، ثم ضع الجزء العلوي المقطوع فوقها وكأنه غطاء، ثم ضع البرتقالة عموديًّا في الفحم مباشرة. تقلل الرطوبة الموجودة في قشرة البرتقالة من فرصة حدوث بُقَعٍ بنية.

لا يمكن رفْع درجة حرارة الماء عادة فوق نقطة الغليان، التي تكون أقل بكثير من نقطة اشتعال الورق. لذلك، يمكن طهي الطعام في كيس ورقي ما دام يوجد ماء أو أي مادة مملوءة بالماء تُغطي الجزء السفلي من الكيس. على سبيل المثال، يمكن كسْر بيضة واحدة أو أكثر ووضعهما في كيس ورقي وطي الجزء العلوي عدة مرات لمنع الرطوبة من التسرُّب أثناء الطهي، وثقب الجزء العلوي بعصًا، ثم الإمساك بالعصا من الطرف المقابل، ووضع الكيس على الفحم الساخن. يمنع الماء الموجود في البيض درجةَ حرارة الجزء السفلي من الكيس من تجاوز نقطة غليان الماء، ولكنه يكون ساخنًا بما يكفي لإنضاج البيض.

يمكن طهي الدجاج (أو الطيور الأخرى) باستخدام الصخور الساخنة. لُفَّ الصخور الجافة برقائق الألومنيوم أولًا، ثم سخِّنها على الفحم الحار (لا تستخدم الصخور الرطبة لأنها عندما تسخن، يمكن أن يتبخر الماء الموجود بداخلها فجأة فتنفجر). عندما تكون الصخور ساخنة، ضعها داخل الدجاجة ولُفَّ الدجاجة برقاقة ألومنيوم، ثم غَطِّها بطبقات عديدة من ورق الصحف أو أوراق الشجر. ستنقل الصخور الطاقة الحرارية إلى الدجاجة لطهيها. سيعزل ورق الصحف أو أوراق الشجر الدجاجة، بحيث لا تصل الطاقة الحرارية إلى سطح الدجاجة فحسب ثم تُفقَد قبل أن ترتفع درجة حرارة الدجاجة بالشكل الصحيح (يجب طهي الدجاج جيدًا للقضاء على احتمال الإصابة بتسمم السالمونيلا).

(٤٧) طهي البيتزا

لماذا عندما تنضج البيتزا يذوب الجبن الموجود على سطحها جيدًا وتظهر بقع بنية فاتحة إذا كان الجبنُ كاملَ الدسم، ولكن لا يحدث ذلك لو كان الجبن خاليًا من الدسم؟

الجواب: تنضج البيتزا من خلال التوصيل الحراري القادم من صينية الخبيز، ومن الأشعة تحت الحمراء القادمة من جدران الفرن المحيط بها، ومن الحمل الحراري للهواء الساخن الموجود فوقها (خاصة إذا كانت ثمَّة مروحة تحرِّك الهواء). مع انتقال الطاقة الحرارية تدريجيًّا إلى الداخل كي تُنضِج العجين عمومًا، يفترض أن يذوب الجبن بتجانُسٍ على الجزء العلوي ثم يتحوَّل لونه ويصبح بنيًّا خفيفًا. يتغير لون الجبن إلى اللون البني حيثما تتشكل الفُقَّاعات في الجبن؛ أي حيثما يتبخر الماء لتكوين فُقَّاعات من البخار داخل الجبن. وبما أن قمم هذه الفُقَّاعات تصير رقيقة أثناء نضوج الفُقَّاعات، فيمكن أن تمتص طاقة حرارية كافية ليتحوَّل لونها إلى اللون البني.

إذا كان الجبنُ المستخدَم في البيتزا خاليًا من الدسم، فسيتبخر الماء بسرعة كبيرة من الجبن، كما أن خيوط الجبن الفردية الجافة لن تذوب وتندمج، بل ستحترق فحسب. لعلاج هذا الأمر، يُرَشُّ الجبن القليل الدسم أو الخالي من الدسم بطبقةٍ من الزيت عند تحضير البيتزا. تبطئ طبقةُ الزيت من عملية تبخر الماء من الجبن، بحيث يمكن للجبن أن يذوب ويندمج ويُكوِّن فُقَّاعات ويتحوَّل لونه إلى اللون البني.

(٤٨) تسخين الطعام في فرن الميكروويف

كيف تقوم الموجات الدقيقة لفرن الميكروويف بتسخين الطعام؟ لماذا يُستخدم قرص دوَّار في معظم أفران الميكروويف؟ هل تطبخ موجات الميكروويف الطعام من الداخل؟ لماذا لا يُحَمِّر فرن الميكروويف الطعام (ويُكسِبُهُ النكهات المميزة للأطعمة المحمرة) كما تفعل أفران الغاز أو الكهرباء؟

لماذا يجب ألا تُسخِّن كوبًا من الماء في الميكروويف أبدًا ثم تضيف إليه ملعقة من مسحوق القهوة الفورية أو الكاكاو؟ لماذا يجب ألا تستخدم فرن ميكروويف أبدًا في إنضاج بيضة في قشرتها أو في إنضاج بيضة منزوعة القشر، ولكن لا يزال صفارها في مكانه على الرغم من ذلك؟ لماذا قد يكون تناول المعجنات التي تم تسخينها في الميكروويف خطيرًا؟

الجواب: موجات الميكروويف هي أحد أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي، مثلها في ذلك مثل الضوء المرئي، باستثناء أن موجات الميكروويف يكون طولها الموجي أطول بكثير من الضوء المرئي (لا يعني «الإشعاع» في هذا السياق الإشعاع النووي؛ إذ تشير الكلمة إلى أن شيئًا ما يُشَع أو ينبعث). يمكن أن تخترق موجات الميكروويف معظم الأطعمة وتمتصها المياه الموجودة داخل الطعام. يُشكل جزيء الماء «ثنائي قطب كهربائي»، وهو النظير الكهربائي للمغناطيس الذي يكون أحد طرفيه ذا شحنة موجبة والآخر ذا شحنة سالبة (له «قطبان»؛ ومِن ثَمَّ يكون «ثنائي القطب»). يميل ثنائي القطب الكهربائي الموجود في أحد المجالات الكهربية إلى أن يصطف مع هذا المجال. يتذبذب المجال الكهربائي الموجود في شعاع موجات الميكروويف في الاتجاه والقوة؛ وبذلك، تكون جزيئات الماء في حالة تقلُّب مستمر في محاولة للحفاظ على هذا الاصطفاف.

تنتقل الطاقة من موجات الميكروويف إلى الجزيئات الموجودة في الأماكن المتقلبة حيث يكسِر هذا التقلُّب الروابط بين الجزيئات. تصبح تلك الطاقة المنقولة طاقة حرارية في

الماء، ومِن ثَمَّ تُسَخِّنُه وتُسَخِّنُ الطعام الذي يحتوي على الماء. لا يصبح الطعام أسخن من نقطة غليان الماء أبدًا، على العكس من الطعام الذي يُطبَخ في المواقد الغازية أو الكهربائية، وهو ما يمكن أن يُحيل لون سطح الطعام إلى اللون البُني في ظل درجات حرارة أعلى بكثير، وذلك عن طريق تغيير طبيعة مادة أوكسي ميوجلوبين الموجودة في اللحوم؛ ولذلك، عادةً ما يُوصف اللحم الذي وُضع في المايكروويف في كثيرٍ من الأحيان بأنه «طري ودون طعم»؛ لأنه يفتقر إلى النكهات والملمس السطحي المميز الذي يمكن أن توفِّره أفران الغاز أو الأفران الكهربائية.

ولأن موجات الميكروويف تخترق عيِّنة الطعام بالكامل، يمكنها تسخين العينة بأكملها في وقتٍ واحدٍ إذا كانت العينة صغيرة إلى حدٍّ ما، أو تسخين طبقتها الخارجية السميكة إذا كانت العينة كبيرة. في الحالة الأخيرة، سيكون الوقت مطلوبًا لتوصيل الطاقة الحرارية إلى مركز العيِّنة.

قد تكون الأجزاء الداخلية لشرائح البيتزا والمعجنات المحشوَّة بحلوى الجيلي (أو المربى) خطرة إذا سُخِّنَت في فرن الميكروويف وأُكِلَت على الفور؛ إذ إن الصلصة والجيلي يسخنان بسرعةٍ أكبر بكثيرٍ من القشرة الخارجية؛ لأنهما يحتويان على الكثير من الماء. لذلك، عند إخراج الطعام من الميكروويف، قد لا تشعر بسخونة القشرة، بينما قد تكون الصلصة أو الجيلي ساخنةً لدرجة أن بإمكانها حرق الفم من الداخل بسرعة.

يرسل جهاز دقيق يُسمَّى الماجنترون (صمام مغناطيسي إليكتروني) موجات الميكروويف. عادةً ما تدور عيِّنة الطعام الموضوعة على قرص دوَّار في حركة دائرية حتى تخترق أشعة الميكروويف كل جوانبها. استُخدمت مروحة معدنية ذات شفرات مائلة في نماذج الأفران القديمة لتعكس الشعاع في نطاق واسع من الزوايا بحيث «يمطر» الشعاع عيِّنة الطعام. دون هذا السيل من انعكاسات الأشعة أو دوران الطعام، توجد «بقع نشطة» (يسخن فيها الطعام بسرعة)، و«بقع خاملة» (يسخن فيها الطعام ببطء فحسب). يمكن تسجيل نمط البقع النشطة والخاملة عن طريق وضع طبقات متماثلة من الجبن فوق أرضية الفرن (مع إزالة القرص الدوار). تقع البقع النشطة في الأماكن التي يذوب فيها الجبن أولًا ويُكوِّن فُقَّاعات.

عندما يُسَخَّن الماء على موقد تقليدي بواسطة اللهب الذي يمتد بطول السطح السفلي للوعاء، تُبَخِّرُ الطاقة المنقولة من اللهب الماء ليُشكل فُقَّاعات من بخار الماء في الشقوق الموجودة بطول السطح الداخلي السفلي للوعاء. هذه الشقوق ضرورية. ولكي تتشكل

الفُقَّاعة وينمو حجمُها، لا بدَّ أن تقاوم التوتر السطحي لجزيئات الماء (تميل الفُقَّاعات إلى الاتحاد بعضها ببعض بسبب القوى الجاذبة التي فيما بينها). يكون لأي فُقَّاعة صغيرة في المياه السائبة فرصة ضئيلة لمقاومة التوتر السطحي؛ وذلك لأن سطح الفُقَّاعة الذي يلامس الماء يكون مقوَّسًا بشدة. يعني هذا التقوس أن القوى الداخلية الناتجة من الماء كبيرة للغاية؛ ومِن ثَمَّ ستنهار الفُقَّاعة على نفسها على الأرجح. ومع ذلك، إذا تكوَّنت فُقَّاعة صغيرة داخل أحد الشقوق، لا يكون سطحها الملامس للماء مقوَّسًا بشدة؛ ومِن ثَمَّ لا تكون القوى الداخلية بهذه الحدة، فلا يصبح بإمكان الفُقَّاعة أن تظل موجودة فحسب، بل أن تنمو أيضًا مع تبخر المزيد من الماء للانضمام إليها. ومِن ثَمَّ، فإن الشقوق الموجودة في السطح الداخلي السفلي للوعاء تُحَفِّز الغليان في عملية التسخين التقليدية.

عندما يُسَخَّن الماء إلى درجة الغليان فوق شعلة من اللهب، يتم تغذية الماء بالطاقة الحرارية على سطحٍ يمكن أن تتشكل فيه فُقَّاعات البخار. لا يمكن أن يتجاوز الماء نقطة الغليان لأنه بمجرد وصوله إلى هذه النقطة، تبدأ الطاقة الحرارية بتحويل السائل إلى بخار لتشكيل الفُقَّاعات.

أما عندما يُسَخَّن الماء في فرن الميكروويف، فالعملية تكون مختلفة للغاية؛ لأن الطاقة الحرارية تُمتَص في الماء السائب وليس على السطح. في الماء السائب، سيُسبِّب التوتر السطحي للماء انهيار أي فُقَّاعة بخار في طريقها للتشكُّل؛ لذلك، لا يتغير الماء من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية، ومع زيادة امتصاص الماء للطاقة الحرارية، ترتفع درجة الحرارة فوق نقطة الغليان العادية، ويُقال حينئذٍ بأن الماء «فائق الحرارة». أخيرًا، تبدأ فُقَّاعات البخار في التشكُّل على الرغم من التوتر السطحي الواقع على سطحها.

ومع ذلك، لنفترض أنك قمت بإخراج كوب من الماء الفائق الحرارة من فرن المايكروويف قبل أن تبدأ عملية إنتاج الفُقَّاعات. بدون وجود الفُقَّاعات، لن يكون هناك أيُّ دليل على أن الماء ساخن. إذا أفرغت ملعقة من المسحوق أو رقائق الثلج أو أي مادة أخرى ناعمة في هذه المياه الفائقة السخونة، فإن فُقَّاعات بخار الماء تتشكل فجأةً في جميع الزوايا والشقوق الموجودة على سطح تلك المواد. يمكن حينها أن يتحول الماء إلى حالة الغليان بقوةٍ شديدة، بحيث يُقذَف الماء الشديد السخونة من الكوب. من حينٍ لآخر، يُصاب أحد الأشخاص بحرقٍ بسبب هذه العملية.

على الأرجح ستنفجر البيضة أو صفار البيضة السليم أو أي إناء مغلق يحتوي على الماء في فرن الميكروويف. يُسَخَّنُ الماء حتى يصبح بخارًا ويندفع إلى الخارج فينفجر

الإناء وينفتح. في بعض الأحيان لا تنفجر البيضة إلا حينما تهتز أثناء إخراجها من فرن الميكروويف، وعندئذٍ، لا تُحدِثُ فوضى كبيرة فحسب، بل إنها قد تصيب أحد الأشخاص بحروق، ربما على مستوى سطح العين. يمكن أن تحدث انفجارات أصغر تُسمَّى «ضربات الميكروويف» مع أطعمة مثل الفاصوليا الخضراء والفاصوليا البيضاء التي تحتوي على كميات صغيرة من الماء تحميها قشرة محكمة.

ولا شك أن عملية إنضاج حبوب الفشار حتى تنتفخ في الميكروويف يُعتبر ضمن الانفجارات؛ إذ إن الماء الموجود داخل كلِّ حبةٍ يتبخر فجأةً ويفجِّر الحبة دافعًا بها إلى الخارج لتُكوِّن شكلًا رقيقًا هشًّا يليق بوجبةٍ ليلية خفيفة. ومع ذلك، فمجرد إمطار حبوب الفشار بموجات الميكروويف لن يُنتِج لنا حفنة كاملة من الفشار الناضج المنتفخ؛ وذلك لأن كل حبةٍ تحتوي على القليل من الماء. لإنضاج الفشار بسرعةٍ أكبر، يحتوي الجزء السفلي من كيس الفشار على بطاقة تحتوي على مواد تمتص موجات الميكروويف بسهولة. تنقل البطاقة التي تسخن بسرعةٍ كبيرة جدًّا الطاقة إلى الحبات التي تُلامسها حتى تنفجر؛ مما يؤدي إلى سقوط حبات أخرى على البطاقة. تستمر هذه العملية حتى تنضج وتنتفخ معظم الحبات.

يمثل فرن الميكروويف المُسَرِّب خطرًا واضحًا. (عادةً ما يحدث التسريب الأكثر شيوعًا حول باب الفرن الذي ينخفض من كثرة الاستخدام.) فلا يمكن لموجات الميكروويف أن تُسَخِّنَ أجزاءً من الجسم يجب ألا تتعرَّض لذلك (كالعينين على سبيل المثال) فحسب، بل يمكن أن تتسبب في ضررٍ طويل المدى أيضًا.

(٤٩) إنضاج حبوب الفشار

لماذا تنتفخ حبات الفشار عندما تنضج؟ بعبارةٍ أخرى، ما الذي يُسبب تمددها والصوت الناتج عن ذلك؟

الجواب: يعتبر الفشار نوعًا خاصًّا من الذرة يُزرَع لقدرته على الانفجار عند تسخينه بواسطة الهواء الساخن أو الدهون أو عند تسخينه في فرن الميكروويف. (تسخن حبات الفشار في فرن الميكروويف عن طريق امتصاص موجات الميكروويف مباشرة وعن طريق ملامسة بطاقة خاصة تَسخن بسرعة عن طريق امتصاص موجات الميكروويف.) يكون غلاف حبة الفشار عبارة عن حاوية صغيرة مغلقة من النشا والماء السائل. عند تسخين حبة الفشار، يتبخر هذا الماء جزئيًّا ولكنه يبقى سائلًا إلى حدٍّ كبير. يزداد الضغط نتيجة لاحتباس الماء داخل غلاف الحبة؛ ومِن ثَمَّ، تزداد نقطة غليان الماء المحتبس.

عندما تصل المياه إلى حوالي ١٨٠ درجة مئوية بضغط أكبر بثماني مرات من الضغط الجوي، تنفجر جدران الغلاف وتُفتَح، فينخفض الضغط إلى مستوى الضغط الجوي وتنخفض نقطة الغليان حتى تصل إلى نقطة الغليان العادية. وهكذا، يصبح الماء الموجود داخل الغلاف فوق نقطة الغليان فجأة ويتبخر بسرعة كبيرة بحيث يُفَجِّر التبخر النشا الساخن الذائب فينتفخ ليصير حجمه أكبر بعدة مرات من حجمه الأصلي. يُرسِل التمدُّد المفاجئ للحبة في مقابل الهواء موجةً صوتيةً عبْر الهواء، وهذا هو صوت «طقطقة» الفشار.

ونظرًا لأن انتفاخ حبة الفشار يمنحها الملمس الرقيق الهش المرغوب فيه، يرغب المصنعون في زيادة هذا الانتفاخ إلى أقصى درجة. يميل الفشار الذي يحتوي على كمية أكبر من الماء داخل غلافه لأن يُحدِث انفجارًا أشد عند نضوجه؛ ومِن ثَمَّ انتفاخًا أكبر. ومع ذلك فإن الفشار الذي يحتوي غلافه على ماء يتجاوز كمية معينة ينفجر بصورة ضعيفة عند نضوجه، هذا إذا نضج أساسًا؛ وذلك لأن الماء الإضافي يقلل من صلابة جدران الغلاف.

(٥٠) طهي البيض المخفوق

لماذا يتم تقليب البيض عند إعداد البيض المخفوق؟ ولماذا يجب طهيه على نارٍ هادئة؟

الجواب: لطهي البيض المخفوق، يمكن إضافة البيض (والحليب حسب الرغبة) إلى مقلاة معتدلة السخونة، ثم تحريكه بشكل مستمر. ينقسم الغرض من التحريك إلى شِقَّين: الرغبة في تفكيك بعض البروتينات المتماسكة في البيضة لتكوين خليط متجانس، وتفكيك أي تخثُّر قد يتشكَّل عندما تنكمش البيضة بسبب الحرارة. إذا توقَّفتَ عن التحريك، فستتلقَّى البيضة الممتدة بطول سطح المقلاة كميةً كبيرةً من الطاقة الحرارية، وتنضج حتى تصبح مقرمشة. أما إذا كانت المقلاة شديدة السخونة، فستخسر البروتينات جزيئات الماء المرتبطة بها أثناء تفكُّكها واكتسابها للحرارة. يُكَوِّنُ الماء قطراتٍ ثم كتلًا سائلة. يُفضِّلُ بعض الناس البيض الذي به ماء كتل سائلة، أما البعض الآخر، فيريد أن يكون البيض مطبوخًا لدرجة أن تجفَّ الكتل السائلة تمامًا (وهو ما قد يجعل طعم البيض المخفوق أشبه بطعم الورق المقوَّى).

إذا كانت عملية نقل الطاقة الحرارية بطيئةً بما فيه الكفاية لتجنُّب فصل الماء عن البروتينات، وإذا كان التحريك يمنع الإفراط في طهي البيض وتكوُّن تخثُّرات كبيرة، فيجب رفع البيض المخلوط عن النار مبكرًا حتى تُكمِل الطاقة الحرارية المتبقية في المقلاة طهيه. يصبح البيض عندئذٍ رطبًا (وليس مبللًا)، ذا ملمس متجانس وطعم لذيذ. يمكن إضافة

الملح عندما يكون البيض جاهزًا للأكل فقط؛ لأن استخدام الملح في أي وقت سابق يساعد على فصل الماء عن البروتينات. في حال إضافة الخضراوات أو غيرها من المنتجات إلى البيض المخفوق، أَزِلْ محتواها المائي عن طريق تجفيفها أو طهيها أولًا، وانتظر حتى آخر دقيقة تقريبًا لتقليبها مع البيض في المقلاة.

تختلف عجة البيض (الأومليت) عن البيض المخفوق في جانبَيْن على الأقل. أولًا: لإنتاج فُقَّاعات الهواء، يُفْصَلُ بياض البيض عن صفاره ويُخفق البياض لإدخال فُقَّاعات الهواء في خليط من البروتينات المتماسكة. يمكن بعد ذلك إعادة دمج هذا الخليط المشبَّع بالهواء مع صفار البيض. ثانيًا: يُرغَبُ في الحصول على طبقة مقرمشة ينضج داخلها باقي خليط البيض. ومِن ثَمَّ، يُترَكُ المزيج لمدة أطول قليلًا على المقلاة؛ بحيث تتكوَّن القشرة بطول القاع؛ حينئذٍ يمكن طيُّ قُرص الأومليت. يَنضَجُ خليط البيض بين السطح المقرمش العلوي والسطح السفلي، وتتمدَّد فُقَّاعات الهواء وفُقَّاعات البخار.

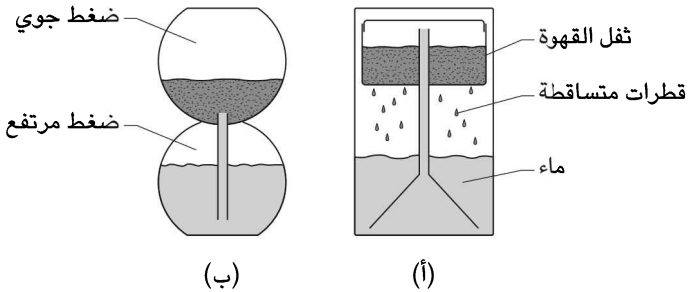
(٥١) الينابيع الساخنة المتفجِّرة وأجهزة تحضير القهوة

لماذا تُقذَفُ المياه والبخار والمواد الأخرى من ينبوعٍ ساخن متفجِّر، بدلًا من التدفُّق خروجًا منه وحسب؟ لماذا تنشط بعض الينابيع؛ مثل نبع أولد فيثفول الساخن المتفجر في حديقة يلوستون الوطنية، بشكل دوري نوعًا ما؟

يتألَّف أحد الأنواع الشائعة من أجهزة تحضير القهوة من قمع مقلوب يرتكز على نحوٍ غير محكم على القاع، ويدعم وعاءً علويًّا يحتوي على ثفل القهوة (انظر شكل ٤-٦أ). كيف تُعَد القهوة في جهاز تحضير القهوة؟

الجواب: راقبت كاميرا فيديو مثبتة في موقع نبع أولد فيثفول، الذي قد يكون أكثر نبع ساخن متفجِّر حَظِي بالدراسة في العالم، وهو يمتلئ بالمياه ثم ينفجر. هذا النبع في الواقع عبارة عن صدع يصل عمقه إلى ٢٠٠ متر تقريبًا. تتدفَّق المياه الباردة والساخنة والبخار من الشقوق الموجودة بطول جانبَي الصدع. أما بالنسبة إلى مصدر حرارة الماء الساخن، فهي الحمم البركانية المنصهرة الموجودة على عمق عدة كيلومترات.

يبدأ النشاط عندما تصبح بعض المياه الموجودة على عمق ستة أو سبعة أمتار في النبع أسخن من نقطة غليان الماء في ذلك العمق. (ترتفع نقطة الغليان كلما زاد العمق؛ لأن ضغط الماء يرتفع أيضًا كلما زاد العمق.) ترتفع الفُقَّاعات البخارية من مستوى الغليان، فتنقل الطاقة الحرارية إلى المياه بالأعلى، والتي تكون درجة حرارتها أقل من



شكل ٤-٦: بند ٤-٥١: (أ) القمع المقلوب لجهاز تحضير القهوة. (ب) الوعاء الزجاجي المستدير لجهاز تحضير القهوة.

درجة الغليان عند هذا العمق. ومع ذلك، تصل هذه المياه سريعًا إلى نقطة غليانها، ثم يؤدِّي التمدُّد المفاجئ للمياه، التي تتحوَّل سريعًا إلى بخار، إلى دفع عمود الماء والبخار من النبع الساخن المتفجِّر.

تتكرَّر العملية نفسها، ولكن يعتمد الوقت المطلوب على كمية المياه المتبقية في النبع الساخن المتفجِّر من الفوران السابق. عادةً ما تنقسم مدة فوران نبع أولد فيثفول إلى فترتين: فترة زمنية قصيرة وفترة زمنية طويلة؛ بحيث تتبع كل فترة منهما الأخرى.

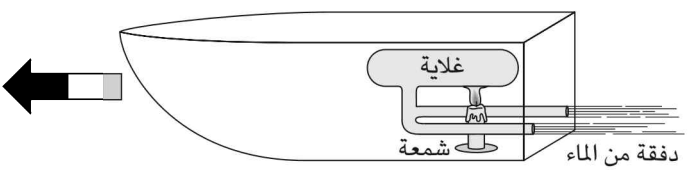
عندما يُوضَع قمع مقلوب لأحد أجهزة تحضير القهوة فوق موقد ساخن، يُسَخَّن الماء الموجود داخل القمع إلى نقطةٍ يتبخَّر فيها بعضه بطول السطح السفلي. يدفع التمدُّد المفاجئ للبخار السائل إلى أعلى عنق القمع الضيق، وينسكب الماء في الوعاء ويتقطَّر إلى أسفل عبْر ثفل القهوة. تتكرَّر العملية حتى تصبح القهوة مركَّزة تركيزًا مناسبًا.

يتكوَّن أحد الأشكال الأخرى الرائجة لأجهزة تحضير القهوة من وعاءين زجاجيَّين مستديرين أحدهما موضوعٌ فوق الآخر ومتصلين بإحكام بحشوة مطاطية لمنع التسرُّب (انظر شكل ٤-٦ب). يُوضع ثفل القهوة في الوعاء الزجاجي العلوي الذي يكون مفتوحًا عند القمة، ويُوضع الماء في الوعاء الزجاجي السفلي. يمتد أنبوب صغير من أسفل مستوى الماء بالوعاء الزجاجي السفلي إلى الوعاء العلوي. عندما يُسَخَّن الماء بالوعاء السفلي بشكل كافٍ، يدفع تمدُّد الهواء وبخار الماء الموجود فيه بمعظم الماء إلى الوعاء العلوي عبْر الأنبوب، وبعد ذلك يُوضع جهاز تحضير القهوة جانبًا. عندما يبرد الوعاء السفلي ويتكثَّف بخار الماء، ينخفض ضغط الهواء، ويصبح أقلَّ من الضغط الجوي. وبما أن الوعاء العلوي

يكون مفتوحًا، يكون الضغط الواقع على سائله هو الضغط الجوي. ونتيجةً لفرق الضغط بين الوعاءين، يُدفَع السائل مرة أخرى أسفل الأنبوب إلى الوعاء السفلي. تدفع هذه الحركة السائل عبْر ثفل القهوة وتزيد من فاعلية عملية التحضير. عندما يعود الماء كله إلى الوعاء السفلي، تكون القهوة جاهزة للصبِّ.

(٥٢) لُعبة قارب البُتْ بُتْ

يُدفَع القاربُ اللُّعبةُ الموضَّح في شكل ٤-٧ بواسطة دفقة من الماء الذي يخرج من الأنبوبين الممتدين عبْر «غلاية» حتى مؤخرة القارب. (يمكن أن تكون الغلاية مجرد مجموعة من عدة أنابيب ملفوفة.) لتجهيز القارب للإبحار، تُملأ الغلاية والأنابيب بالماء، ويُوضع القارب فوق بِركة من الماء، ثم تُوضع شمعة مضاءة أسفل الغلاية. عندما يسخن الماء في الغلاية ويتبخَّر، يدفع الضغط المتزايد بالماء إلى الأنابيب ثم خارجها نحو مؤخرة القارب.



شكل ٤-٧: بند ٤-٥٢: تدفع دفقة من الماء بالقارب اللُّعبة إلى الأمام.

السِّمة المثيرة التي تمتاز بها هذه الآلية أنه بمجرد القذف بالماء خارج القارب، لا تتوقَّف عملية الدفع، بل يُدفَعُ القارب إلى الأمام كل بضع دقائق بطريقة متقطعة. ما الذي يغذِّي عملية الدفع المستمر إذن؟

الجواب: عندما يُقذَف الماء من الأنابيب، ينتقل بعض البخار الذي تولَّد في الغلاية إلى الأنابيب؛ حيث يتكثَّف بسبب البيئة المحيطة التي تكون أبرد. تعمل كلٌّ من الحركة وعملية التكثيف على خفض الضغط في الغاز. مع انخفاض الضغط، يُسحَب الماء خلف القارب إلى داخل الأنابيب ويُعيد ملئها. ثم تُكرَّر دورة التفريغ وإعادة الملء نفسها ويُدفَع القارب إلى الأمام مرة أخرى.

إن الدفع السريع للماء يكون على شكل تيار نفَّاث موجَّه نحو المؤخرة، وهذا يحتم تحرُّك القارب إلى الأمام. لا يتحرك القارب للخلف خلال مرحلة إعادة الملء؛ لأن الماء المُمتَص لا يكون على شكل دفقة، بل يكون أبطأ، ويأتي من مجموعة واسعة من الزوايا (على شكل نصف قطر تقريبًا). ومن ثَمَّ، فإن القوة التي تميل إلى سَحْب القارب إلى الخلف تكون ضعيفة ولا يمكنها التغلُّب على مقاومة الماء للقارب. لذلك، يتحرَّك القارب للأمام خلال كل مرحلة من مراحل تصريف الماء، ولكنه يكون ثابتًا أثناء كل عملية إعادة ملء.

(٥٣) التأثيرات الحرارية على الأطوال

لماذا تُشَيَّد معظم الجسور على هيئة أقسام تفصل بينها فراغات قصيرة؟ لماذا شُيِّدَت خطوط السكك الحديدية القديمة باستخدام قضبان ذات أطوال قصيرة بينها فراغات متوسطة الطول؟ كانت تَصدُر عن هذه السكك الحديدية أصواتُ صلصلة صاخبة مزعجة؛ وذلك لأن عجلات القطار كانت تصطدم بهذه الفراغات ثم تهتز، فتهزُّ الركَّاب وتولِّد هذا الصوت. لماذا توجد تلك الفراغات في خطوط السكك الحديدية الحديثة؟

الجواب: تتمدَّد معظم المواد المستخدمة في بناء الجسور بفعل الحرارة وتنكمش بالبرودة. وإذا كانت تلك المواد معرَّضة إلى اختلافات كبيرة في درجة الحرارة على مدار العام، فلا بد أن يُؤخذ تغيُّر طولها في الاعتبار في مرحلة البناء، وإلا فسيؤدِّي التمدُّد إلى الانثناء.

شُيِّدَت خطوط السكك الحديدية في الأصل باستخدام قضبان ذات أطوال قصيرة وفراغات متوسطة الطول كي تسمح بهذا التمدُّد. أما خطوط السكك الحديدية الحديثة فلا توجد بها فراغات تقريبًا لتسمح بهذا التمدُّد؛ إذ إنها تكون عبارةً عن «قضبان ملحومة مُثبَّتة». وهي مثبَّتة بشكلٍ آمن على الروافد الخشبية العرضية بإحكام؛ بحيث يصبح حدوث الانثناء نادرًا. عادةً ما تكون السكك الحديدية في وضعها الطبيعي عندما تكون درجات الحرارة معتدلة.

عندما يبدأ النفط الساخن بالتدفُّق عبْر خط أنابيب النفط بطول قاع المحيط، قد يتعرَّض خط الأنابيب للانثناء نتيجة التمدُّد الحراري؛ وذلك لأنه غير مثبَّت في مكانه. لن يمثِّل الانثناء مشكلةً على الأرجح، إلا إذا كان شديدًا.

عندما صُنِّعَت الطائرة الكونكورد، كان تصميمها يسمح بالتمدُّد الحراري لجسم الطائرة أثناء الطيران فوق سرعة الصوت نتيجة التسخين الاحتكاكي الذي يتسبَّب فيه

الهواء المتدفِّق حول الطائرة. كانت درجة الحرارة ترتفع إلى ١٢٨ درجة مئوية تقريبًا عند مقدمة الطائرة، وإلى ٩٠ درجة مئوية تقريبًا عند الذيل، وكانت نوافذ الكابينة دافئة بشكل ملحوظ عند اللمس، كما كان طول جسم الطائرة يتمدَّد بنحو ١٢,٥ سنتيمترًا.

صُمِّمَت مواد طب الأسنان المستخدَمة في حشو التجاويف الناتجة عن تسوس الأسنان، وفي تصنيع تيجان الضروس، بعناية؛ بحيث يتطابق تمدُّدها الحراري وتقلُّصها مع الضرس المجاور، وإلا فسيصبح تناول المثلجات ثم شرب الكاكاو الساخن تجربةً لا تُنسى أبدًا.

أدَّت عوامل عديدة إلى انقطاع التيار الكهربي على نطاق واسع، خَلَّف ٥٠ مليون مواطن أمريكي وكندي بدون كهرباء في أغسطس عام ٢٠٠٣، ولكن أُبلِغَ عن حالة غريبة تحديدًا تخص أحد كَبْلات نقل الطاقة في ولاية أوهايو. كان التيار الذي ينتقل عبْر الكَبْل عاليًا في ذلك اليوم؛ ممَّا أدَّى إلى ارتفاع معدل التسخين داخله عن المعتاد. ومع ارتفاع درجة حرارة الكَبْل، زادت أيضًا أطواله الواقعة بين كل نقطتَي دعم؛ وهكذا بدأت أجزاؤه في التدلِّي. تدلَّى أحد أجزاء الكَبْل حتى اقترب بما يكفي من إحدى الأشجار، فأشعلت شراراته الشجرة وصولًا إلى الأرض. قضى هذا الأمر على قدرة الكَبْل على حمل التيار، ويبدو أن فقدانه قد ساهم في عدم استقرار منظومة شبكة الطاقة؛ ما أدَّى إلى إيقاف المنظومة عن العمل.

(٥٤) انهيار عربات التخزين في قطارات الشحن

تكون عربات التخزين في قطارات الشحن فائقة المتانة، ولا يمكن أن تتدمَّر إلا في حالات حوادث التصادم السريعة. ومع ذلك، يمكن أن تتدمَّر أيضًا عند تجاهل بعض مبادئ الفيزياء. إليكم حادثة وقعت بالفعل: في وقتٍ متأخر في ظهيرة أحد الأيام، كان طاقم العمل ينظِّف إحدى عربات التخزين من الداخل باستخدام البخار. ولأنهم لم يُنهوا مهمة التنظيف بنهاية نوبة عملهم، قرَّروا إغلاق العربة وانصرفوا. ولكن عندما عادوا في صباح اليوم التالي، وجدوا أن شيئًا ما قد سحقها، على الرغم من جدرانها الفولاذية الفائقة المتانة، وكأن مخلوقًا عملاقًا من المخلوقات التي تظهر في أفلام الخيال العلمي ذات الدرجة الثانية قد دهسها تلك الليلة في ثورة غضب. فما الذي سبَّب سحق عربة التخزين؟

الجواب: عندما نُظِّفَت عربة التخزين، تشبَّعت جدرانها بالبخار الشديد السخونة، وهو عبارة عن غاز من جزيئات الماء. تَرك طاقم التنظيف البخار داخل العربة عندما

أغلق جميع صمامات العربة في نهاية نوبة عمله. عند تلك النقطة، كان ضغط الغاز في العربة مساويًا للضغط الجوي؛ وذلك لأن الصمامات كانت مفتوحة ومعرَّضة للجو الخارجي أثناء التنظيف. وعندما بدأت العربة تبرد أثناء الليل، بَرَدَ البخار أيضًا وتكثَّف جزءٌ كبير منه؛ ما يعني أن عدد جزيئات الغاز ودرجة حرارته انخفضا، في حين ظل الحجمُ ثابتًا، ونتيجةً لذلك، انخفض ضغط الغاز. وفي وقتٍ ما من تلك الليلة، بلغ ضغط الغاز داخل العربة قيمةً منخفضة للغاية حتى صار الضغط الجوي الخارجي قادرًا على دفع الجدران الفولاذية إلى الداخل وسحق العربة. كان يمكن لطاقم التنظيف منع هذا الحادث عن طريق ترك الصمامات مفتوحة؛ بحيث يمكن للهواء دخول العربة للإبقاء على الضغط الجوي الخارجي والضغط الجوي الداخلي متساويين.

(٥٥) تجفيف الغسيل المُعَلَّق

قبل أن تصبح أجهزة تجفيف الملابس شائعة، كانت الملابس المغسولة «تُعَلَّق لتجفَّ» على حِبال الغسيل؛ إذ كانت الملابس تُثَبَّت على الأحبال بمشابك غسيل؛ بحيث تتدلَّى من الحبال التي كانت توضع في ضوء الشمس أو في الظل حتى تجفَّ. لماذا يجفُّ القميص المعلَّق بهذا الشكل؟ بالتحديد، لماذا تبدأ عملية التجفيف من أعلى ثم إلى أسفل؟

الجواب: قد تعتقد أن القميص المعلَّق على حبل الغسيل يجفُّ من أعلى إلى أسفل؛ لأن المياه تتسرَّب عبْره إلى الأسفل ثم تتساقط من جزئه السفلي. وفي الواقع، أنت مُحِقٌّ، على الأقل بالنسبة إلى الثلاثين دقيقة الأولى من عملية التجفيف. عندما تتسرَّب المياه إلى الأسفل، فإنها تُكَوِّن قطرات تصبح في النهاية كبيرة بما يكفي لتتحرَّر من الملابس وتسقط. ومع ذلك، عندما يتوقَّف هذا التسرُّب، يظل القميص مبلَّلًا. إذا سخَّنتْ أشعة الشمس القميص فحسب، فسيجف القميص بأكمله بنفس المعدل تقريبًا، وليس من الأعلى إلى الأسفل. تُعزى عملية التجفيف من أعلى إلى أسفل إلى الحمل الحراري للهواء الذي يحدث بطول القميص بسبب تغيُّرات درجة الحرارة.

يظل القميص مبلَّلًا حتى بعد تسرُّب الماء وتساقطه منه؛ لأن التوتر السطحي يحبس الماء في مسام القماش (الفراغات المفتوحة بين الأنسجة). لِنتدبَّرْ موقف قُطَيرة ماء داخل أحد المسام الرأسية. يكون لهذه القُطَيْرة سطح مُقوَّس يحيط به الهواء من الأعلى ومن الأسفل. يُنتِج تقوُّس السطحين قوةً خالصة على القُطَيْرة نتيجة التوتر السطحي (الذي يحدث بسبب التجاذب المتبادل بين جزيئات الماء). إذا كان الجزء العلوي من المَسَمِّ أعرض

من الجزء السفلي، يكون اتجاه القوة الخالصة نحو الأسفل، في نفس اتجاه قوة الجاذبية على القُطَيْرة؛ ومِن ثمَّ يتحرَّك الماء إلى أسفل. مع ذلك، إذا كانت قمة المَسَمِّ أضيق من الجزء السفلي، يكون اتجاه القوة الخالصة الناتجة عن التوتر السطحي نحو الأعلى، ويمكنها أن تُبقي على القُطَيْرة في مكانها على الرغم من قوة الجاذبية. تبقى قُطَيْرات الماء المحبوسة داخل تلك المسام في القميص بعد أن تتوقَّف عملية تسرُّب الماء وتساقطه.

يتبخَّر الماء تدريجيًّا من هذه القطيرات المحبوسة. تتطلَّب عملية التبخر طاقةً لتحرير جزيئات الماء من السطح. وهكذا، يحمل الماء المتبخِّر بعض الطاقة من القُطَيْرة المتبقية، فيبرِّدها ويبرِّد النسيج المحيط والهواء. وبما أن الهواء يصبح أكثر كثافةً عندما يبرد، ينخفض هذا الهواء البارد بطول القميص، ويلتقط الرطوبة من القطيرات المنحبسة بالأسفل. وهكذا، يبدأ خط التجفيف الذي يفصل بين الجزء الجاف والمبلل من القميص في أعلى القميص، ثم يُدفَع إلى الأسفل بواسطة الهواء البارد النازل.

إذا كنت تبحث عن عذرٍ فيزيائي للاستجمام تحت ضوء الشمس لساعات، يمكنك أن تُعلِّق قميصًا مبتلًّا وتقول إنك تفحص مسيرة خط التجفيف من أعلى القميص إلى أسفله نتيجة عملية التجفيف الحراري.

(٥٦) المعاطف الدافئة

إذا دخلت غرفة باردة وأنت ترتدي ملابس الشاطئ، لماذا تشعر بالبرد؟ كيف يمكن لمعطف أن يبقيك دافئًا؟

الجواب: أنت تشعر بالبرد عندما تفقد طاقة حرارية أكثر من الطاقة الحرارية التي تحصل عليها من البيئة المحيطة، وهناك أربعة أنواع من فقدان الطاقة الحرارية: (١) في حالة التوصيل الحراري، تفقد الطاقة عن طريق التلامس المباشر مع جسم آخر أبرد من درجة حرارة جسمك، وهو ما يحدث عندما تجلس على مقعد بارد. (٢) في حالة الإشعاع، تفقد الطاقة عن طريق إصدار الأشعة تحت الحمراء إلى بيئتك المحيطة، كما أنك تكتسب الطاقة عن طريق امتصاص الأشعة تحت الحمراء التي تنبعث من البيئة المحيطة، ولكن إذا كانت البيئة أبرد من درجة حرارتك، فسيكون هذا الاكتساب أقل من خسارتك للطاقة. (٣) في حالة الحَمل الحراري، تفقد الطاقة أثناء مرور الهواء بجانبك، فإذا كان الهواء أبرد من درجة حرارتك، فستفقد الطاقة الحرارية عن طريق اصطدام جزيئات الهواء بك. (٤) يمكنك أيضًا فقدان الطاقة من خلال عملية تبخُّر العَرَق من بشرتك، وهذا هو أحد

الأسباب التي تجعلك تتعرَّق عندما تمارس الرياضة. يتطلَّب التغيير من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية طاقةً، وهي تأتي من بشرتك. إذا تعرَّقت وأنت معرَّض لنسيمٍ أو ريح، يزداد معدل التبخر؛ ومِن ثَمَّ يزداد معدل فقدان الطاقة.

الغرض من ارتداء المعاطف (أو الملابس بشكل عام)، هو تقليل فرصة حدوث كل هذه الأنواع من فقدان الطاقة. على سبيل المثال، تُقلِّل جلود الحيوانات — مثل الجلد المدبوغ — من فقدان الحَمل الحراري والتبخر الناتجَيْن عن التعرُّض إلى الرياح من خلال حجزها خارج الجسم. كذلك يمكن للمعطف أن يوفِّر طبقةً من الهواء شبه المحتجز حول جزء من جسمك، ولأن الهواء يُوصِّل الطاقة الحرارية بشكل رديء، تساعدك تلك الطبقة في عزله. يساعد ارتداء طبقات متعددة من الملابس أسفل المعطف بشكل أكبر في ذلك؛ لأنك حينئذٍ تكون لديك طبقات متعددة من الهواء شبه المحتجز لعزل جسدك.

يساعد فراء المعطف على إبقائك دافئًا؛ وذلك لأن الهواء يكون محتجَزًا نسبيًّا ما بين الفراء. ومع ذلك، إذا كنت تقف في مهب الرياح، يتطاير الهواء من بين الفراء بسهولة. ومن ثَمَّ، تكون أكثر دفئًا إذا ارتديت المعطف مقلوبًا، بحيث يكون الفراء بالداخل حتى لا يتعرَّض للرياح.

إذا عرَّضت بشرتك العارية، مثل بشرة الوجه أو الأصابع، إلى الرياح الباردة، فإن مدى شعورك بالبرودة يتحدَّد بشكل تقريبي بواسطة «مؤشِّر برودة الرياح»؛ أي درجة الحرارة التي تتسبَّب في نفس الشعور بالبرد في حال عدم وجود رياح. يعتبر حساب مؤشر برودة الرياح حسابًا دقيقًا أمرًا معقدًا؛ وذلك لأنه ينطوي على قدرتك على التكيف مع الهواء البارد؛ إذ يتكيَّف بعض الناس بسهولة شديدة، والبعض الآخر يتكيَّف بصعوبة. تكمن خطورة الرياح الباردة بطبيعة الحال في احتمالية الإصابة بعضة الصقيع التي تحدث عندما يبدأ الجلد في التجمُّد. عادةً لا يتجمَّد الجلد عند درجة حرارة أعلى من سالب ١٠ درجات مئوية، بغض النظر عن سرعة الرياح، ولكن تزداد احتمالات الخطر بسرعة في حالات درجات الحرارة الدنيا وسرعات الرياح الكبرى.

(٥٧) النباتات الدافئة

عندما يتصادف تساقط الثلوج في أواخر فصل الشتاء على نبات «ملفوف الظربان» Symplocarpus foetidus الذي ينمو في أمريكا الشمالية وآسيا، لماذا لا يلبث الثلج المتكوِّن حول الملفوف أن يذوب؟ يمكن أن تتكوَّن فجوة حول الملفوف خلال الثلوج الكثيفة.

الجواب: يُعَدُّ ملفوف الظربان واحدًا من النباتات القادرة على رفع درجة حرارتها فوق درجة حرارة البيئة المحيطة. ومِن ثَمَّ، يمكن لملفوف الظربان أن يُذيب الثلج المتجمع حوله؛ لأن الثلج يفقد طاقة أكبر عن طريق الأشعة تحت الحمراء المنبعثة نتيجة ارتفاع درجة حرارته. على غرار الطيور والثدييات، يُقال إن هذه النباتات تتمتع بقدرة «التنظيم الحراري»؛ وذلك لأنها قادرة على الحفاظ على درجة حرارتها حتى مع تغيُّر درجة حرارة البيئة المحيطة. قد تكون بعض النباتات، مثل النورة الزهرية (مجموعة من الزهور الصغيرة، أو الزهيرات) التي من جنس «شجرة الحب» Philodendron selloum، دافئةً عند لمسها (أي تكون أكثر دفئًا من الإنسان) وتولِّد الطاقة الحرارية بمعدلٍ يضاهي ما تولِّده قطة صغيرة. (يقول روجر إس سيمور، أحد الباحثين الرئيسيين في هذا المجال، إنه يتخيَّل في بعض الأحيان أن هذا النبات عبارة عن قطة تنمو على ساق.)

(٥٨) فراء الدب القطبي

لماذا يكون شعر فراء الدببة القطبية مجوَّفًا؟

الجواب: تحبس شعرات فراء الدب القطبي البيضاء الأجزاء المرئية من ضوء الشمس والأشعة تحت الحمراء؛ لأن تلك الأجزاء تُعكَسُ وتُنقَلُ إلى أسفل حتى تصل إلى جلد الدب؛ حيث تُمتَص وتزيد من الطاقة الحرارية للجلد (تمتص الشعرات أيضًا الأشعة فوق البنفسجية من ضوء الشمس، إلا أن الأشعة فوق البنفسجية لا تسهم كثيرًا في رفع درجة حرارة الدب). تُحفَظ الطاقة الحرارية للجلد جزئيًّا؛ لأن الشعرات مجوفة وتوصِّل الطاقة الحرارية بشكل رديء (فكرة أن الشعر المجوَّف يعمل بشكلٍ ما كألياف ضوئية هي مجرد خرافة).

(٥٩) الأردية السوداء وخراف الصحراء السوداء

يُعتَقَدُ عادةً أن الملابس البيضاء تُضفي شعورًا بالبرودة عن الملابس السوداء عندما يكون الإنسان في بيئة حارة وجافة. ومع ذلك، يختار البدو الذين يعيشون في درجات الحرارة المرتفعة بصحراء سيناء ارتداء الملابس السوداء أحيانًا بدلًا من الملابس البيضاء. فلماذا يختارون ذلك؟

إذا كنت تائهًا في الصحراء، فهل تزيد فرصتك في البقاء على قيد الحياة إذا تجرَّدت من ملابسك لتقضي على ما امتصصته من ضوء؟

غالبًا ما تكون خراف البدو سوداء، ولا يعود ذلك إلى الاستيلاد الانتقائي، ولكنه يعود إلى التكيُّف الطبيعي مع البيئة على ما يبدو. لماذا يساعد الفراء الأسود تلك الخراف على البقاء؟

الجواب: قد تمتص الأردية السوداء المزيد من أشعة الشمس وتزيد درجة حرارتها بصورة أكبر من الملابس البيضاء، إلا أن درجة حرارة الهواء داخل الملابس ودرجة حرارة بشرة البدوي لا تعتمد على لون الملابس في المقام الأول؛ فالارتفاع في درجة حرارة الرداء الأسود يعادله على الأرجح الحَمل الحراري الأكبر للهواء الذي يمر عبْر الرداء: يدخل الهواء من الأسفل، ويرتفع نتيجة التسخين ويخرج من عند الرقبة؛ إذ يشبه الرداء المدخنة إلى حدٍّ ما. إذا تعرَّض البدوي لرياح عاصفة، يدعم انتفاخ الثوب عملية دوران الهواء بشكل أكبر.

إذا كنتَ في صحراء ولا مفر من ارتداء ملابس ضيقة لا تسمح بالكثير من دوران الهواء، فستسخن الملابس البيضاء بشرتك بدرجة أقل من الملابس السوداء. لا يُفضَّل عادةً أن تخلع ملابسك بسبب خطر التعرُّض لحروق الشمس. وإذا كان لديك وفرة من الماء، فلا بد أن تكون الملابس مسامية؛ بحيث تعطيك عملية تبخُّر العَرَق من بشرتك شعورًا بالترطيب. أما عندما يكون الماء شحيحًا، فستحتاج إلى الملابس لتقليل الفقد الذي ينتج عن التبخُّر الذي يحدث على بشرتك، وإلا فستُصاب بالجفاف بشكل خطير في مدةٍ زمنيةٍ وجيزة. في رواية الخيال العلمي الكلاسيكية «الكثبان» للكاتب فرانك هربرت، يعيش سكان الصحراء في بيئة شديدة القسوة؛ بحيث يرتدُون بَزَّات محكمة الغلق للاحتفاظ برطوبة الجسم الثمينة.

يسمح فراء الخراف الأسود لها بالبقاء على قيد الحياة خلال شتاء سيناء القاسي. لا يشكِّل لون الفراء فرقًا إلا حينما تتعرَّض الخراف لضوء الشمس المباشر، فحينئذٍ يدفئ لونُ الفراء الأسود الذي يمتص ضوء الشمس بصورة أكبر أجسامَ الخراف ويقلِّل من عملية الأيض. وبما أن غذاء الخراف يكون شحيحًا في فصل الشتاء، يصبح الأيض المنخفض ميزة.

(٦٠) معدل تبريد فنجان من القهوة

لنفترض أنك صنعت فنجانًا ساخنًا من القهوة، ولكنك لا تنوي شربه حتى وقت لاحق، ولْنفترض أيضًا أنك تتناول قهوتك مع الحليب؛ فهل عليك، كي تحصل على قهوة ساخنة قدْر الإمكان عند احتسائها، أن تضيف الحليب فور صنعها أم قبل أن تبدأ في احتسائها

مباشرة؟ هل يجب تقليبها في غضون ذلك؟ هل يجب أن تضع بها ملعقة؟ هل للملعقة المعدنية تأثير مختلف عن الملعقة البلاستيكية؟ هل يعتمد معدل تبريد القهوة على كَوْن لون الكوب (أو حتى السائل) أسود أو أبيض؟

الجواب: توجد ثلاثة عوامل يجب الموازنة بينها في هذا الصدد: (١) كلما كانت درجة حرارة القهوة أعلى، فقدت الحرارة أسرع (في حال كان هذا هو العامل الوحيد المهم، إذن فلا بد أن يُضاف الحليب على الفور لتقليل درجة الحرارة ومعدل الفقدان). (٢) إضافة كمية من الحليب البارد إلى القهوة الساخنة ينتج خليطًا ذا درجة حرارة متوسطة؛ سيكون انخفاض درجة حرارة القهوة أكبر كلما كانت أسخن عندما يُضاف الحليب (في حال كان هذا هو العامل الوحيد المهم، فعدم إضافة الحليب في التو يكون أفضل). (٣) من المحتمل أن يقلِّل وجود الحليب من تبخر الماء، وكذا فقدان الحرارة المتصل بذلك.

ذكرت مجموعة من الباحثين أن القهوة الداكنة تبرد بنسبة ٢٠٪ أسرع من القهوة الفاتحة في الظروف العادية. ربما يرجع ذلك إلى العامل الثالث وليس إلى أي اختلاف في انبعاث الأشعة تحت الحمراء. كذلك وجدوا أيضًا أنه إذا كان الحليب أبرد من درجة حرارة الغرفة (قد يكون أُخرِجَ من الثلاجة للتو)، فستكون القهوة أسخن إذا أُضيف الحليب على الفور. ومع ذلك، لو كان الحليب أدفأ من درجة حرارة الغرفة (وهو أمر نادر الحدوث)، فسيعتمد الوقت الصحيح لإضافة الحليب على عدة عوامل، بما في ذلك الوقت الذي ترغب مكوثه في الانتظار حتى تحتسي قهوتك؛ لذا عليك بإضافة الحليب على الفور بصورة عامة.

يُعجِّل التقليب بالتبريد؛ لأنه يرفع السائل الساخن إلى السطح ليتبخَّر. إذا تُرِكَت ملعقة معدنية في القهوة، فإنها ستُوَصِّل الحرارة بطولها (مثل «الزعنفة الحرارية») حتى تسخن بأكملها، أما الملعقة البلاستيكية فعلى الأرجح لن يكون لها تأثير يُذكر.

أما مسألة اللون، فتنطوي على المعدل الذي يُصدِر عنده السطحُ الطاقةَ. في حالة الضوء المرئي، يُشِعُّ السطح الأبيض طاقةً أكبر من السطح الأسود، إلا أن الفقدان الرئيسي للحرارة من سطح الكوب (أو السائل نفسه) من خلال الانبعاث يحدث في نطاق الأشعة تحت الحمراء. وبالنسبة إلى هذا النطاق، تصدر الأسطح البيضاء والسوداء الانبعاث نفسه تقريبًا؛ ومِن ثَمَّ يكون لون الكوب غير مهم.

إذا وُضِعَ غطاء على فنجان من القهوة أو وُضِعَت طبقة من الكريمة المخفوقة عليها، فسيحافظ كلٌّ منهما على القهوة ساخنةً لفترة أطول بسبب التبخر المتناقص وفقدان الحرارة المرتبط به.

(٦١) سرُّ برودة الماء داخل الأواني الفخارية المسامية

في المناخات الحارة الجافة، لماذا يكون الماء المحفوظ داخل وعاء مصنوع من الفخار المسامي (الراشح) باردًا عندما يكون الوعاء موضوعًا في مكانٍ ظليل ومعرضًا للريح؟ عندما اصطحبني والداي في جولة بالسيارة في جنوب غرب الولايات المتحدة، وضعوا كيسًا مساميًّا لحفظ الماء على ممتص الصدمات الأمامي للسيارة. وعندما توقَّفنا لشرب الماء، كان الهواء والسيارة ساخنَيْن بشدة، إلا أن الماء كان باردًا دومًا. فلماذا كان باردًا؟

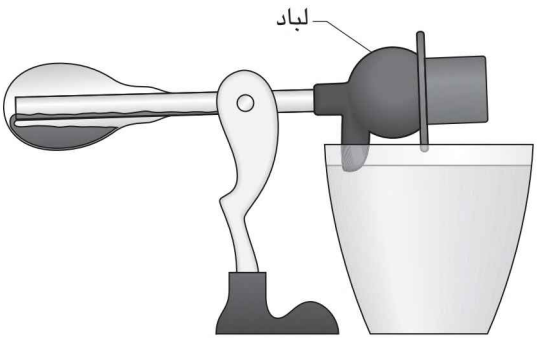
الجواب: تترك جزيئاتُ الماء أثناء التبخر الجسمَ الأساسي للماء لتتحرَّك عبْر الهواء المحيط. تُستنفَد الطاقة لتحرير تلك الجزيئات من قوى الجذب بين الجزيئات على سطح الماء. وتُسترجَع الطاقة إذا تسبَّبت حركة عشوائية في إعادة هذه الجزيئات إلى السطح (تعود إلى السطح نتيجة اصطدامها بجزيئات الهواء). ولكن إذا كان الهواء نسيمًا، تُنتزَع تلك الجزيئات المحرَّرة، ولا يمكنها إرجاع الطاقة. في هذه الحالة، يفقد سطح الماء الطاقة، وإذا كان فقدان الطاقة سريعًا بما يكفي، تنخفض درجة حرارة الماء قبل أن يحدث انتقال كبير للطاقة إلى الماء من البيئة الدافئة المحيطة. وهكذا، إذا وُضِعَ وعاء مسامي في الظل، يمكن للنسيم أن يُبَرِّد الماء من خلال نزع جزيئات الماء المتبخرة التي تسرَّبت عبْر جدار الوعاء. وبالمثل، إذا كانت سيارة والديَّ تظلِّل كيس الماء الموضوع عليها، يمكن أن يُبَرِّد الهواءُ المار الماءَ عن طريق تبخير الجزيئات التي تسرَّبت عبْر جدار الكيس.

تُستخدَم عملية التبريد هذه بطرقٍ أخرى أيضًا. على سبيل المثال، عند القيام بنزهة في يومٍ حارٍّ، يمكن أن يظل الطعام والنبيذ باردَيْن نسبيًّا لساعات إذا كانا موضوعين في وعاء فخاري مسامي محكم الغلق غُمِرَ بالماء حتى التشبُّع. يمكنك في الواقع الحفاظ على انتعاشك في يومٍ حارٍّ عن طريق غمر ملابسك بالماء ثم الوقوف في مكانٍ ظليل مُنَسَّم.

يُقال إن الضفدع الأمريكي الجنوبي (Phyllamedusa sauvagei) يستخدم التبريد التبخيري بطريقة فريدة من نوعها. عادةً ما يقضي هذا الضفدع يومه وعيناه مغلقتان، ولكن عندما تزيد درجة حرارة جسمه عن ٤٠ درجة مئوية في يومٍ حارٍّ، يفتح الضفدع عينَيْه بشكل دوري ويغلقهما. عندما تكون عيناه مفتوحتَيْن، تبرزان وتَبرُدان عن طريق التبخر. وعندما تكونان مغلقَتَيْن، تتراجعان وتضغطان على الدماغ. وهكذا، يمكن للضفدع على ما يبدو أن يُبَرِّدَ دماغه عن طريق التبخر الذي يتم وعيناه مفتوحتان.

(٦٢) لُعبة الطائر ناقر الماء

تحظى لُعبة الطائر ناقر الماء (انظر شكل ٤-٨) بشعبية داخل الفصل الدراسي وخارجه. كي يبدأ الطائر بهز رأسه، لا بد أن تبلِّل الرأس. بعد ذلك، يميل الطائر تدريجيًّا إلى الأمام حتى يدور فجأةً في اتجاه شبه أفقي، وبعد ارتداده مرة أو مرتين، يصحِّح الطائر اتجاهه. إذا جهَّزت كوبًا من الماء يمكن أن يغمس فيه الطائر منقاره، فسيكرِّر الطائر عملية غمس منقاره دون توقُّف. فما الذي يدفع الطائر للقيام بهذه الحركة؟ هل توجد طرق أخرى لجعل الطائر يهزُّ رأسه دون أن يبلِّله بالماء؟ في هذه الحالة، سيهزُّ الطائر رأسه حتى في وجود رطوبة عالية، وهو العامل الذي يوقف الاهتزاز عندما يستخدم الماء.



شكل ٤-٨: بند ٤-٦٢: لُعبة الطائر ناقر الماء وهي على وشك أن ترتدَّ مرة أخرى إلى وضعها المستقيم.

الجواب: يكون الجزء السفلي من جسم الطائر ممتلئًا جزئيًّا بسائل يتبخَّر بسهولة، وعادةً ما يكون هذا السائل كلوريد الميثيلين. تحتوي الفراغات المفتوحة في الجسم والرأس على بخار هذه المادة الكيميائية. يكون رأس الطائر ومنقاره مغطَّيَيْن بالريش، ويتكوَّن العنق من أنبوب يمتد من الرأس إلى الجسم. في مكانٍ ما بطول الرقبة، يدعم الطائرَ محورٌ حرٌّ للدوران حول الساقين وقاعدة اللعبة.

بعد رش الرأس بالماء، يبدأ الماء في التبخر في الهواء المحيط. وبما أن تحوُّل السائل إلى بخار يتطلَّب طاقة حرارية، فإن التبخر يبرِّد اللباد والرأس والبخار الموجود داخل الرأس

(يساعد النفخ في اللباد على التبخر). مع انخفاض درجة حرارة البخار داخل الرأس، ينخفض ضغطه بالتبعية. بما أن تجويف البخار في الجسم لا يتصل مباشرة بالبخار الموجود داخل الرأس، يظل ضغط البخار أعلى، ويؤدِّي الفرق في الضغط بين التجويفين إلى دفع السائل بشكل تدريجي عبْر الأنبوب. يجعل انتقال السائل رأس الطائر ثقيلًا ويجعله يدور حول المحورين الداعمين الموجودين في الساقين. يكون الدوران تدريجيًّا في البداية، ثم يدور الطائر فجأةً للأمام باتجاهٍ شبه أفقي، ثم يرتد إما لأعلى قليلًا من حافة كأس الماء أو بعيدًا عن الأجزاء الداعمة للساق التي تحدُّ من دورانها.

عندما يكون الطائر في وضعٍ شبهِ مستوٍ تقريبًا، يرتفع الطرَف السفلي من الأنبوب فوق السائل الموجود في جسم الطائر، فيتصل تجويفا البخار لحظيًّا؛ ومِن ثمَّ يتكافآن في الضغط. أثناء الارتداد لأعلى، يسمح ميل الأنبوب للسائل بالتدفُّق من الرأس إلى الجسم مرة أخرى، وهو ما يعيد التوزيع الأصلي للوزن، فيصحِّح عندئذٍ الطائر من حركته بالكامل. إذا بلَّل الطائر منقاره أثناء النقر في الماء، يتسرَّب الماء المضاف عبْر اللباد الموجود على رأسه، وتتكرَّر عملية غمر منقاره في الماء مرة أخرى.

توجد طرق عديدة لبدء لُعبة الطائر ناقر الماء دون بَلِّ رأسه بالماء. على سبيل المثال، يمكن وضع الكحول على رأسه بأكمله؛ وهو ما من شأنه أن يتبخَّر حتى وإن كانت درجة رطوبة الهواء مرتفعة. (على سبيل المثال، يفي استخدام مشروب الويسكي القوي بالغرض، إلا أنه قد يفسد لباد الطائر.) يمكن وضع الطائر في أشعة الشمس الساطعة وتظليل رأسه والأجزاء العليا من رقبته فيما عدا جسمه. وإذا دُهِنَ جسمه باللون الأسود، فقد يدفع ذلك أيضًا إلى زيادة معدل حركة الطائر بشكل محموم.

قصة قصيرة

(٦٣) لُعبة الطائر ناقر الماء العملاقة

في ستينيات القرن العشرين، اقتُرِحَ استخدام نسخة مكبَّرة من لُعبة الطائر ناقر الماء كحلٍّ مثالي لمطالب الري في منطقة الشرق الأوسط القاحلة (تعود براءات الاختراع لمحرِّكاتٍ مشابهة إلى عام ١٨٨٨)؛ بحيث يُوضع طائر بطول قناة مملوءة بالماء، وبمجرد أن يبدأ تشغيل الطائر من خلال رشِّ الماء على رأسه المغطَّى باللباد، ينخفض إلى الأمام ويدفع مغرفةً وأنبوبًا مثبَّتين إلى تعبئة المياه من القناة ثم سكْبها على مستوًى أعلى من الأرض (الحقل). وكل مرة ينخفض الطائر فيها إلى الأمام، يتسنَّى له بَلُّ منقاره في مياه القناة.

لزيادة إنتاجية العمل، يمكن تثبيت أنبوب تعبئة ثانٍ بالجانب الآخر من الطائر، بينما يكون الطائر موضوعًا بين قناتين متوازيتين. ومع تمايله إلى الأمام وإلى الخلف، يمكن توصيل المياه من قناة منخفضة إلى قناة أخرى أعلى تكون بنفس ارتفاع مستوى الحقل.

سأشارك معكم مشروعًا أكثر جرأةً: لنفترض أننا نصبنا طائرًا عملاقًا في المياه الضحلة الموجودة قبالة ساحل كاليفورنيا، وأن الحبال المُوصَّلة بالطائر ستُوصَّل بتروس مثبتة على جهازٍ موضوع على الشاطئ، وكلما انخفض الطائر وملأ منقاره بالماء، أجبر التروس على الدوران، ويمكن أن تتحوَّل الحركة إلى طاقة كهربية. يمكن لسربٍ من هذه الطيور العملاقة التي تصطفُّ بطول ساحل كاليفورنيا أن تعمل على تعويض احتياجات الولاية المتعطشة للكهرباء.

تراجعتُ عن اقتراح هذا المشروع عندما وجد أحد الشركاء خطرًا محتملًا؛ فقد عُرِف عن الناس عبْر التاريخ أنهم يعبدون مصادر الطاقة، مثل النار والشمس؛ ومِن ثَمَّ يكمن الخطر في اقتراحي في أنه قد تظهر طوائفُ تعبد الطائرَ ناقر الماء، وأن أعضاءها سيُعرِبون عن شديد امتنانهم للطيور ناقرة الماء من خلال الاصطفاف على الشواطئ ومحاكاة حركاتها بالتزامن؛ وبما أننا لدينا ما يكفي من الطوائف بالفعل، فقد قرَّرتُ التخلي عن الفكرة.

(٦٤) الأنابيب الحرارية وإبر طهي البطاطس

يمكن طهي لحم خنزير مشوي أو ديك رومي كبير في وقت أقل، إذا وُضِعَ أنبوب حراري داخل اللحم بزاوية متجهة إلى أعلى. يتكوَّن الجهاز من أنبوب مجوَّف ومغلق به فتيل وكمية قليلة من السائل (ربما الماء). أما الطرَف السفلي، فعبارة عن أسطوانة معدنية كبيرة صلبة أو قطعة ضيقة بها عدة زعانفُ حرارية. قد تبدو الطبيعة المجوَّفة للأنبوب غير صحيحة؛ فالمقصود نقل الطاقة الحرارية من بيئة الفرن الساخنة إلى اللحم من الداخل. ولذلك، ألن يكون استخدامُ قضيب معدني صلب أفضلَ في نقل الطاقة الحرارية؟

يُدخِل العديد من الطهاة عند خبز البطاطس إبرةً (أو قضيبًا معدنيًّا على شكل إبرة) داخل البطاطس لتوصيل الطاقة الحرارية إلى البطاطس من الداخل. بما أن المعادن تُوَصِّلُ الطاقة الحرارية بصورة أفضل من البطاطس، فيفترض أن تقلِّل الإبرة الوقت اللازم لطهي البطاطس. لماذا إذن تفشل معظم «إبر طهي البطاطس» هذه في تقليل وقت الطهي العادي الذي يستغرق ساعة بمقدارٍ لا يزيد على دقيقة أو اثنتين؟

الجواب: يُوَصِّل القضيب المعدني الصلب الطاقةَ الحراريةَ إلى قطعة اللحم المشوي من الداخل من خلال التوصيل الحراري، ولكن العملية تكون بطيئة. تكون عمليةُ التوصيل أسرعَ بكثير عند استخدام الأنبوب الحراري. في الواقع، عندما يكون الجزء الداخلي من اللحم باردًا، قد ينقل الأنبوب الحراري الطاقة الحرارية أسرعَ بعدة آلاف من المرات من قضيب معدني صلب بنفس الحجم.

يرجع النقل السريع للطاقة إلى السائل الموجود في الأنبوب وتصميم النهاية المكشوفة. نهاية الأنبوب لها مساحة سطح كبيرة؛ لذا تمتص الطاقة الحرارية بسهولة من الهواء الساخن، ومن خلال اعتراض الإشعاع الحراري داخل الفرن. يتبخَّر السائل الموجود داخل الأنبوب في النهاية، وهو ما يستهلك كمية كبيرة من الطاقة الحرارية. بعد ذلك، يرتفع البخار الساخن عبْر الأنبوب المائل إلى الجزء الداخلي الأبرد للَّحم. تؤدِّي البيئة الباردة إلى تكثيف البخار وإطلاق كل الطاقة الحرارية المستخدَمة في تبخيره. بعد ذلك، تُوَصَّل الطاقة الحرارية المنبعثة بعيدًا عن الأنبوب وعبْر اللَّحم. وفي هذه الأثناء، إما أن يسري التكاثف إلى أسفل الأنبوب مرة أخرى أو على طول الفتيل، وعندما يصل إلى الجزء السفلي من الأنبوب، يتبخَّر مرة أخرى وتتكرَّر هذه الدورة. بما أن عمليتَي التبخير والتكثيف تنطويان على الكثير من الطاقة الحرارية، فإن نقل الطاقة الحرارية إلى اللحم يكون أسرعَ بكثيرٍ ممَّا لو جرى توصيل الطاقة بطول قضيب معدني مصمت.

تفشل إبرة طهي البطاطس العادية في تقليل وقت الطهي بشكل ملحوظ؛ لأن النهاية المكشوفة تكون صغيرة جدًّا، فلا تمتص الطاقة الحرارية من الفرن إلا ببطء شديد. إذا كانت النهاية المكشوفة أضخم، أو كانت ذات زعانف حرارية، فسيتم الأمر بنجاح.

(٦٥) المرايا الضبابية

لماذا تُصبح المرآة أو النافذة الزجاجية ضبابية إذا أخذتَ حمَّامًا ساخنًا عندما يكون الهواء المحيط باردًا؟ ولماذا يبدأ الضباب بالتجمُّع بالأعلى؟ ولماذا يمكنك منْع هذا إذا وضعت طبقة رقيقة من الصابون (أو المنظف) على المرآة قبل الاستحمام؟ (يمكنك أيضًا، بدلًا من ذلك، استخدام قمة قالب الصابون أو إصبع مغطًّى بالمنظف لكتابة رسالة على المرآة. تكون الرسالة غير مرئية تقريبًا قبل أن يبدأ الشخص التالي في الاستحمام، ولكن بمجرد تجمُّع الضباب على الأجزاء غير المغطاة، تظهر الرسالة؛ لأن الأجزاء المغطاة بالصابون أو المنظف تكون واضحة جلية.)

لماذا تظهر المياه أحيانًا على الطرقات رغم عدم وجود أمطار، ورغم أن كل الأشياء الأخرى جافة؟ في يوم شتوي بارد، لماذا يتكاثف الهواء على الجزء الداخلي من النافذة الزجاجية بدلًا من السطح الخارجي؟ هل يرجع ذلك إلى أن الرطوبة تكون أعلى في الداخل؟ لا، عادةً ما تكون الرطوبة أقل. (لهذا قد يُصاب الناس في الأجواء الباردة بـ «جفاف الجلد» خلال فصل الشتاء، وتكون الصدمات الكهروستاتيكية أكثر شيوعًا في الشتاء مقارنةً بالصيف.)

الجواب: غالبًا ما تُسمَّى كمية بخار الماء الموجودة في الهواء «الرطوبة النسبية» مقارنةً بـ «حدِّ التشبع». على سبيل المثال؛ إذا كانت الرطوبة النسبية تبلغ ٥٠ بالمائة، فيعني هذا أن كمية البخار تساوي نصفَ حدِّ التشبُّع. يمكن أن تصل الرطوبة النسبية أثناء الاستحمام بالماء الساخن في غرفة مغلقة إلى ١٠٠ بالمائة، وبعد ذلك، بينما يدفع ماء الاستحمام الساخن ببخار ماء إضافي إلى الهواء، يتكاثف بعض البخار ويشكِّل قطرات على الأسطح المختلفة، بما في ذلك المرآة.

السبب الآخر لتجمُّع القطرات على المرآة، هو أن حدَّ التشبع يكون أقل بالنسبة إلى الهواء الأبرد. فإذا كانت المرآة باردةً عند الاستحمام، فإنها ستبرِّد الهواء الشديد الرطوبة الذي يصل إليها، وتقلِّل حدَّ تشبُّع الهواء، وتؤدِّي إلى تكثُّف بعض البخار. عادةً ما يملأ الهواء الساخن الرطب الذي يخرج من الدش الجزء العلوي من الحمام. وهكذا، تبدأ القطرات بالتكثُّف على الجزء العلوي من المرآة.

على الرغم من أن المرآة قد تبدو نظيفة، فإنها تكون مغطاةً بالغبار وبطبقات أخرى رقيقة (مثل المادة الدهنية التي تكون موجودة في بصمة الإصبع). تنجذب جزيئات الماء المكثَّف بقوة بعضها إلى بعض أكثر من انجذابها لما يوجد على المرآة؛ ولذلك تسحبها جاذبيتها المتبادَلة حتى تكوِّن كُريَّات صغيرة تغطِّي المرآة وتقلِّل قدرتها على عكس الصور بوضوح.

يمكن منع تكوُّن هذه القطرات عن طريق دهن الزجاج بطبقة رقيقة من الصابون؛ إذ إنه يقلِّل التوتر السطحي للماء (نتيجة الانجذاب المتبادل بين جزيئات الماء)، وهكذا تنتشر المياه على هيئة طبقة متجانسة عبْر المناطق المغطاة بالصابون. ينتج عن تجانس طبقة الماء استعادة وضوح ما تعكسه المرآة. يمكنك الحصول على نفس التأثير وبنفس الجودة تقريبًا إذا استخدمتَ المادة الدهنية التي تفرزها أصابعك بدلًا من الصابون.

يمكن أن يصبح الطريق مبلَّلًا في بعض الأحيان، بينما يبقى كلُّ شيء آخر جافًّا، إذا كان السطح يشعُّ طاقته الحرارية ويصبح باردًا بما يكفي. عندئذٍ، يُبَرِّدُ الطريق الهواء المجاور، وقد يقلِّل أيضًا من حدِّ تشبُّع الهواء. في هذه الحالة، يتكثَّف بعض بخار الماء الموجود في الهواء على سطح الطريق.

(٦٦) تكثُّف بخار الماء على النظارات

لماذا تتشكَّل قطرات ماء على العدسات عندما يدخل شخص يرتدي نظارة طبية غرفةً دافئة بعد أن كان بالخارج في الجو البارد؟ إذا امتنع الشخص عن مسح العدسات وتنظيفها وانتظر لبرهة بدلًا من ذلك، فلماذا تبدأ العدسات بالانجلاء؟ وأيُّ جزءٍ فيها يبدأ بالانجلاء أولًا؟

لماذا تكسو العدسات طبقةً ضبابيةً إذا خرج أحد الأشخاص من غرفة ذات درجة حرارة عادية ثم دخل غرفة ساونا؟ ولماذا تنجلي العدسات وتتضح الرؤية مرة أخرى؟ وفي أيِّ جزء من العدسات تبدأ عملية الانجلاء في هذه الحالة؟ هل تعتمد نقطة بداية الانجلاء على شكل إطار العدسات أم على كيفية انحنائها؟

الجواب: في كلتا الحالتين، تُبَرِّدُ العدسة الهواء المجاور لها، وتقلِّل من حدِّ تشبُّع الهواء وتؤدِّي إلى تكثيف بعض من بخار الماء على العدسة (انظر البند السابق). يتجمَّع السائل المكثَّف بعد ذلك ويسبِّب ضبابية العدسات. بعبارة أخرى؛ تعرقل القطرات المتجمِّعة انتقال الضوء لدرجةٍ لا يمكن عندها رؤية الصور بوضوح.

عندما يدخل شخصٌ غرفةً دافئة بعد أن كان بالخارج في الطقس البارد، تبدأ عملية انجلاء العدسات عند الحافة الأقرب إلى الأنف. يسخِّن الأنف هذا الجزء من الحافة بالإشعاع، وبالتوصيل من خلال الحافة الداعمة للنظارة على الأنف أو من خلال الهواء المتخلِّل، وعن طريق الحمل الحراري الذي يحدث عندما يرتفع الهواء الذي سَخَّنَهُ الأنف. تُوصَّلُ الطاقة الحرارية بعد ذلك إلى العدسة وعبْرها، وتُسَخِّنها وتُبَخِّرُ قطرات الماء، ومن ثَمَّ تنجلي العدسة وتعود كما كانت.

عندما يدخل أحد الأشخاص غرفة الساونا، تكون عملية انجلاء العدسات مختلفة؛ لأن فرق درجة الحرارة بين الهواء والعدسة يكون أكبر، وفي هذه الحالة لا يكون الأنف ذا أهمية كبيرة في عملية الانجلاء، بل الأهم من ذلك هو قطرات الماء التي تتشكَّل على العدسة. عندما يتكثَّف بخار الماء متحوِّلًا إلى سائل، لا بد أن تتخلَّى الجزيئات عن بعض طاقتها. في

الساونا، تُسخِّن الطاقة المحرَّرة كلًّا من العدسة وإطارها. ومع ذلك، تزداد درجة الحرارة بشكلٍ أسرع بالقرب من مركز العدسة؛ لأن الإطار عادةً ما يمتلك قدرة أكبر على استيعاب الحرارة (يتطلَّب طاقة حرارية أكبر كي تزيد درجة حرارته). أما المصدر الآخر للطاقة الحرارية، فهو الحَمل الحراري لهواء الساونا الساخن أمام العدسة.

إذا كان السطح الخارجي للعدسة مسطَّحًا، فسيحدث الانجلاء أولًا في مركز العدسة، وينتشر تدريجيًّا وصولًا إلى الحافة. وإذا كان السطح الخارجي للعدسة مقوَّسًا إلى الخارج، فسيعزِّز بروز السطح في الهواء عملية الانجلاء بمركز العدسة. أما إذا كان السطح الخارجي للعدسة مقوَّسًا إلى الداخل، فسيكون المركز بعيدًا نسبيًّا عن الهواء ولا يسخن بنفس السرعة. قد تبدأ عملية الانجلاء في الحالات القصوى بالقرب من الحافة على الرغم من سعتها الحرارية الكبيرة.

(٦٧) تجمُّع المياه في المناطق القاحلة

كيف تتمكَّن الخنفساء الناميبية التي تعيش في صحراء ناميب القاحلة في جنوب أفريقيا، من جمْع مياه الشرب من ضباب الصباح الباكر الذي يهبُّ فوق الصحراء؟ كيف يتمكَّن الناس الذين يعيشون في صحراء أتاكاما في شمال شيلي من جمع المياه من الهواء الذي تدفعه الرياح من المحيط الهادئ؟

الجواب: تقف الخنفساء في وضعٍ يُسمَّى وضع «حصاد الضباب» موجِّهةً رأسها إلى أسفل على الجانب المقابل للرياح من الكثبان الرملية، ورافعةً مؤخرتها في الرياح؛ بحيث تشكِّل بجسمها انحناءً منحدِرًا. تغطِّي الجزء الخلفي من جسمها أجنحةٌ خلفية مغطاة بنتوءات يتباعد بعضها عن بعض بشكلٍ عشوائي. هذه النتوءات «قابلةٌ للاتحاد مع الماء»؛ أي إنه يمكن لجزيئات الماء الارتباط بها. تكون الأجزاء المنخفضة بين النتوءات شمعية؛ ومِن ثَمَّ تكون «رافضةً للاتحاد مع الماء»؛ أي إنه لا يمكن لجزيئات الماء الارتباط بها. يتجمَّع الضباب الرقيق على نتوءٍ من النتوءات ويُكوِّن قطرة ماء. عندما تكون القطرة صغيرة، تكون قوى الاتحاد مع الماء التي تحافظ على وجودها فوق النتوء أكبر من وزن القطرة، وهو ما يميل إلى سَحْب القطرة إلى أسفل بطول جسم الخنفساء المنحني. وفي النهاية، تصبح القطرة كبيرة بما يكفي لتتحرَّر من النتوء وتنزلق على المنحدر إلى الأسفل، مسترشدةً جزئيًّا بالنتوءات الأخرى التي تقابلها، حتى تصل إلى فم الخنفساء حيث تبتلعها.

يجمع الناس الذين يعيشون في صحراء أتاكاما المياهَ من الضباب الذي تدفعه الرياح من المحيط عن طريق نَصْب شِباك كبيرة يمكن للماء أن يتكثَّف عليها ويشكِّل قطرات. وأخيرًا، تكون القطرات كبيرة بما يكفي لتنزلق إلى أسفل الشباك تجاه المنطقة المخصصة لتجميع الماء. يمكن جمع ١١ ألف لتر تقريبًا من الماء في يومٍ واحد، وهو ما يكفي قريةً بأكملها.

عملت بعض الأبنية الحجرية الموجودة الآن في شبه جزيرة القرم، فيما يبدو، كشِراكِ تكثيف يتجمَّع عليها النَّدى في الليالي الشديدة الرطوبة. بعد غروب الشمس، تُصدِرُ الأحجار الأشعة تحت الحمراء نحو سماء الليل. في ليلة صافية، من المحتمل أنها تُصدر طاقةً نحو السماء أكبر مما تُصدره السماء نحوها؛ ومِن ثَمَّ تبرد حتى تصبح أقل من درجة حرارة الهواء. يتكثَّف بخار الماء الذي يلامسُ الأحجار الباردة نسبيًّا، مشكِّلًا قطرات. عندما يزيد حجم القطرات، تصبح في نهاية المطاف كبيرة بما يكفي لتتحرَّر من مكانها وتتدفَّق إما نحو جزء منخفض في الحجر مخصَّص لتجميع الماء، أو في أنابيب تُنقَلُ إلى حاوية مركزية. إلا أن كفاءة جمع المياه بهذه الطريقة كانت ضعيفة للغاية على الأرجح.

توضِّح بعض كتب الحِفاظ على البقاء أنه يمكن جمع الندى من خلال استخدام أحد الشِّراك. تحفر أولًا حفرة يبلغ عرضها مترًا تقريبًا، ويبلغ عمقها مترًا في التربة أو الرمل في مكان مشمس، وتُوضع عُلبة مفتوحة من الأعلى أسفل الحفرة وأنبوب للشرب يمتد من قاع العلبة حتى قمة الحفرة، ثم تُوضع ورقة من البلاستيك في الحفرة بمَيل؛ بحيث تكون درجة انحدارها ٤٥ درجة تقريبًا، وأن تتمركز أدنى نقطة فيها فوق العلبة مباشرةً. يُثبَّت الجزء العلوي من الورقة البلاستيكية بحفنة من التراب أو الصخور حول حافة الحفرة. عندما تدفأ هذه الأجزاء في ضوء الشمس (يشبه هذا الأمر الصوبة الزراعية)، يتبخَّر الماء من التربة في قاع الحفرة. عندما تغرب الشمس وتبرد الحفرة، يتكثَّف بخار الماء ويشكِّل قطرات على الجانب السفلي من الورقة البلاستيكية. وبمجرد أن تصبح قطرات الماء كبيرة بما يكفي، تنزلق إلى أدنى نقطة في الورقة وتسقط في العلبة. بعد أن يتجمَّع ما يكفي من الماء في العُلبة، يمكن شفط الماء وشربه من الأنبوب. كذلك يمكن تقطيع الصبار ووضعه في الحفرة ليزوِّدها بالمزيد من الرطوبة، كما يمكن استخدام مياه البحر؛ لأنها عندما تتبخر، تتخلَّص من الملح.

ما القصص التي تُقال عن تَكَوُّن بِرَكِ النَّدى التي توفِّر مياه الشرب للبشر أو الحيوانات سوى مجرد أساطير؛ وذلك لأن الندى لا يوفِّر سوى القليل جدًّا من الماء الذي لا يمكنه التجمُّع لتكوين بِركة كبرى.

(٦٨) الشقوق الطينية

لماذا يتشقَّق الطين؛ بحيث تكون الشقوق عادةً في البداية متعامدة بعضها على بعض عند نقاط التقاطع؟ لماذا يمكن للشقوق بعد ذلك أن تتخذَ شكل مضلع (بحيث يشبه الطين الأرضية المُبَلَّطة)؟ ولماذا يمكن لحواف هذا الشكل المضلع أن تنثني بشدة إلى أعلى، لدرجة أن تلتف طبقته العليا بعضها على بعض مكوِّنةً أنبوبًا يتحرَّر من الأرض ويتدحرج بعيدًا؟

لماذا تتكوَّن مضلعات عملاقة في الأحواض الجافة بعض الأحيان بعد هطول الأمطار؟ يمكن أن يصل طول هذه المضلعات إلى ٣٠٠ متر، وتتكوَّن بواسطة تشقُّقات قد يصل عرضها إلى متر واحد، وعمقها إلى خمسة أمتار.

الجواب: عندما تجفُّ طبقةٌ مسطحة من الطين ببطء، بدءًا من السطح، ينكمش الجزء العلوي من الطبقة ويشكِّل ضغوطات (إذ تسحب الأجزاء المحيطة واحدًا من الأجزاء) في حين تُثبِّت التربة الجزء السفلي من الطبقة في مكانه. يصبح الضغط كبيرًا بما يكفي عند نقاط عشوائية على السطح لكسره، ممَّا يقلِّل من الضغط عامة. تنمو هذه الشقوق طولًا أفقيًّا ورأسيًّا (وصولًا إلى التربة الأساسية). عندما ينمو شقٌّ متنامٍ في اتجاه شق موجود بالفعل، يميل الضغط في السطح إلى توجيه حركة الشق المتنامي ليشكِّل تقاطعًا عموديًّا (شكل ٤-٩أ). (يكون ميل السطح إلى التشقق أضخم بالتوازي مع الشق الموجود.) بعد المرحلة الأوَّلية من تكوين الشقوق، يتشكَّل نظام ثانوي من التشققات في الطين. يمكن أن تبدأ كل هذه الشقوق على شكل خط مستقيم، ولكنها عندما تمتد إلى الجزء الأكبر من الطين، عادةً ما «تتشعَّب» (تنقسم) كما في شكل ٤-٩ب. واعتمادًا على المعدل الذي يجفُّ الطين به، عادةً ما يميل تقاطع الشقوق الثانوية مع الشقوق الأولية إلى تقسيم الطين إلى مضلعات.

إذا جفَّت الطبقة العليا الرقيقة من المضلع بسرعة، فإنها تنكمش، ويمكن أن يتسبَّب هذا الانكماش في أن تنثني الطبقة وتصبح مقعرة. وبمجرد أن ترتفع الحواف، يمكن للجانب السفلي من الطبقة أن يجفَّ وأن تنثني الطبقة بما يكفي لتكون على شكل أنبوب. نادرًا ما يجفُّ المضلع الطيني في سطحه العلوي بصورة أبطأ من الطبقات الطينية السفلى، وربما يكون ذلك نتيجة النزح السريع كما يحدث على المنحدرات، وعندئذٍ يمكن أن تنثني الحواف «إلى الأسفل».

تتشكَّل المضلعات العملاقة كما يبدو لنفس الأسباب التي تتشكَّل بها المضلعات الصغيرة.

شكل ٤-٩: بند ٤-٦٨: (أ) شقٌّ متنامٍ يصنع تقاطعًا عموديًّا مع شق موجود بالفعل. (ب) شقٌّ متنامٍ يتشعَّب ليكمل تشكيل المضلع.

تُعتبر الشقوق والمضلعات المتشكِّلة في الطين أمثلة على نمط التكسير الناجم عن «الجفاف». يمكنك أن تجد العديد من الأمثلة الأخرى، مثل جفاف الدهان، وجفاف خليط نشا الذرة والماء، وجفاف مزيج الماء وثفل القهوة. إذا جَرَّبتَ المثالين الأخيرين، فستجد أن الحجم القياسي للمضلعات يعتمد على عمق طبقة التشقُّق: فالمضلعات ذات الحجم الأصغر تحدث داخل طبقة أرقَّ، إلى أن تصبح الطبقة رقيقة جدًّا، بحيث تُشَكِّلُ نمطًا شاذًّا غير منتظم، بدلًا من المضلعات. يمكن أيضًا تغيير النمط عن طريق تشحيم الجزء السفلي من الإناء، لتقليل الاحتكاك بين المادة والإناء؛ إذ يؤدِّي الاحتكاك الأقل (ضغط أقل) إلى تشققات أقل.

(٦٩) انتفاخ عُلَب العصير على متن الطائرات

حتى في حال عدم فقدان الضغط بكابينة الطائرة، يمكن أن تجد بعض العُلَب مفتوحة عند وصولها إليك. على سبيل المثال، يمكن أن تكون عُلبة كريمة القهوة مفتوحة بطول الحافة عند قمَّتها المرنة. وإذا لم تكن كذلك، لاحظها جيدًا وستجد أنها منتفخة عند القمة إلى الخارج، إلا أنه عندما تهبط الطائرة لاحقًا، يختفي الانتفاخ تدريجيًّا. فما الذي يتسبَّب في فتح أو انتفاخ قمة العُلبة أثناء الطيران؟

يمكن أن تؤدِّي حالات فيزيائية مشابهة لمواقف مضحكة خلال رحلة مملة إذا قام أحد الأشخاص بِرَجِّ عُلبة عصير محكمة الغلق، ثم فتح الرقاقة المعدنية التي تغلِّف قمتها

باستعجال، فمن المحتمل أن يندفع العصير ويُغرقَ هذا الشخص. أما المسافر المُحنَّك، فيعلم جيدًا أنه لا بد أن يفتح الرقاقة المعدنية ببطء، وألا تكون فتحة العلبة مواجهة له.

لماذا تؤلمك أذناك أحيانًا عند ارتفاع الطائرة؟ ولماذا تبدوان «مسدودتين» أحيانًا بعد أن تنزل من الطائرة؟

الجواب: يتم الحفاظ على ضغط الهواء في الطائرة ميكانيكيًّا، لكنه يكون أقل من ضغط الهواء على الأرض. لذلك، عندما ترتفع الطائرة ويقل ضغط الهواء، يميل الهواء أو الغازات الأخرى الموجودة داخل العُلَب المرنة للكريمة والعصير والصلصات التي تُضاف إلى السلطة إلى التمدُّد، وفي بعض الأحيان، يُفتَح الغلاف الذي يُغلق العُلب بإحكام. إذا كانت عُلبة العصير أو صلصة السلطة مغلقة وقمت بهزِّ محتوياتها، فإنك بذلك تغطي الجانب السفلي للغطاء بطبقة من محتويات العلبة. وإذا نزعت الغطاء فجأة، فسيدفع تمدُّد الغاز الداخلي بمحتويات العلبة إلى الخارج من خلال الفتحة.

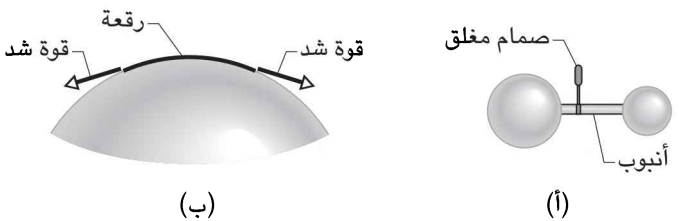
يعود الشعور بعدم الارتياح الذي يمكن الشعور به في الأذنين أثناء الطيران إلى ضغط الهواء داخل الأذن الوسطى، التي تقع خلف طبلة الأذن. عادةً ما يكون ضغط الهواء فيها متكيفًا؛ بحيث يكون مساويًا لضغط الهواء المحيط عبْر القناة السمعية، التي تمتد حتى الجزء الخلفي من الأنف والحلق. ومع ذلك، إذا لم تفتح القناة السمعية أثناء إقلاع الطائرة، يكون ضغط الهواء الخارجي على طبلة الأذن هو الضغط المنخفض لكابينة الطائرة، بينما يكون ضغط الهواء الداخلي هو الضغط الأرضي. عادةً ما يؤدِّي اختلاف الضغط إلى دفع طبلة الأذن إلى الخارج. يمكن تجنُّب هذه المشكلة عن طريق التثاؤب أو البلع، وهو ما يؤدِّي إلى فتح القناة السمعية بحيث يمكن تقليل الضغط الأعلى في الأذن الداخلية.

عندما تهبط الطائرة، يزداد الضغط الخارجي حتى يصل إلى قيمته على مستوى الأرض، وعندئذٍ عادةً ما يدفع اختلاف الضغط طبلة الأذن إلى الداخل. قد لا تكون هذه المشكلة سهلة الحل؛ لأن الضغط المنخفض في الأذن الداخلية يميل إلى إبقاء القناة السمعية مغلقةً. ومع ذلك، قد يؤدِّي التثاؤب والبلع إلى فتح القناة والسماح لضغط الهواء في الأذن الداخلية بالارتفاع إلى قيمته العادية على مستوى الأرض.

يمكن أن يكون الضغط المنخفض في الطائرة مزعجًا في بعض الأحيان؛ إذ من الممكن أن تنفجر الزجاجات أو حتى عُلب المشروبات التي تبدو محكَمة الغلق إذا كانت موضوعة في حقيبة؛ وذلك لأن المنطقة المخصَّصة لوضع الأمتعة في الطائرة لا تكون معرَّضة للضغط عادةً. يمكن أن تحدث مشكلةٌ مشابهة إذا شُحِنَت جثة شخص متوفًّى في منطقة الأمتعة؛ إذ لا بد من إحكام غلق التابوت.

(٧٠) نفخ البالونات والفُقَّاعات

إذا قمت بنفخ بالون مطاطي كُروي الشكل، فلماذا تكون عملية النفخ صعبة في البداية، وأيسر كثيرًا عندما يكون البالون منفوخًا جزئيًّا؟ وإذا كان البالون أسطواني الشكل، فلماذا يبدأ الانتفاخ في مكانٍ بعينه، بدلًا من البالون كله؟ وبينما تستمر في نفخ البالون، لماذا ينتقل الانتفاخ بطول البالون؟



شكل ٤-١٠: بند ٤-٧٠: (أ) فُقَّاعتان (أو بالونان) يربط بينهما أنبوب ذو صمام مغلق. (ب) قوى الشد على الجانب الأيمن والأيسر من إحدى الرُّقع الموجودة على سطح الفُقَّاعة.

نفترض أن فُقَّاعتين من الصابون ذواتَي قُطرين مختلفين متصلتان بواسطة أنبوب يحتوي على صمام مغلق (شكل ٤-١٠أ)، فماذا سيحدث للفُقَّاعتين إذا فُتِحَ الصمام بحيث يمكن للهواء أن يتدفَّق بينهما؟ وإذا استعضت عن الفُقَّاعتين ببالونين مطاطيين، فماذا يحدث عند فتح الصمام؟

الجواب: إذا نفخت فُقَّاعةً من الصابون كُروية الشكل، يجب أن توفِّر ضغطَ هواء أكبر من ضغط الهواء الموجود داخل الفُقَّاعة. يعتمد ضغط الهواء الداخلي على درجة انحناء سطح الفُقَّاعة. لفهم هذه النقطة، نُلقي نظرةً على إحدى الرُّقع على السطح (شكل ٤-١٠ب). سنجد أن الأجزاء المجاورة من السطح تشدُّها من الجانبين. يكون الشد في الجانب الأيسر وفي الجانب الأيمن إلى الداخل جزئيًّا حول مركز الفُقَّاعة؛ هذا الجزء الداخلي هو ما يحدِّد ضغط الهواء. عندما تكون الفُقَّاعة صغيرة وشديدة الانحناء، يكون السَّحب الداخلي على الرقعة كبيرًا؛ ومِن ثَمَّ يكون الضغط الداخلي كبيرًا أيضًا، ويصعب نفخ

الفُقَّاعة. عندما تكون الفُقَّاعة أكبر ويكون انحناؤها أقل، يكون السَّحب الداخلي صغيرًا؛ ومِن ثَمَّ يكون الضغط الداخلي قليلًا أيضًا، فيصبح نفخ الفُقَّاعة أسهل.

يختلف البالون المطاطي في أن تمدُّد غشائه أثناء النفخ يعمل على زيادة الضغط. أثناء المراحل الأولية للنفخ، تدفع مقاومة التمدُّد الضغط للأعلى وتتطلَّب ضغطًا كبيرًا منك إذا كنت تريد نفخ البالون أكثر. ومع ذلك، بمجرد وصول البالون إلى حجمٍ معين، يعمل الانخفاض اللاحق في مدى الانحناء على خفض الضغط الداخلي؛ ومِن ثَمَّ يصبح النفخ أكثر سهولة. يزيد من هذه السهولة انخفاضُ مقاومة تمدُّد المطاط عندما يكون بنفس حجم البالون تقريبًا (بينما تشتد المقاومة مرةً أخرى عندما يكون البالون أكبر حجمًا بكثير).

العامل الآخر المهم هو أنك عندما تنفخ بالونًا فإنك تُدخِل فيه كمية معيَّنة من الهواء من رئتيك: «حجم النَّفَس». عندما يكون البالون صغيرًا، يتطلَّب الحجم الإضافي زيادة مساحة السطح بشكل كبير؛ مما يزيد بشكل ملحوظ مقاومةَ المزيد من التمدُّد. وعندما يكون البالون كبيرًا، يكون الحجم الإضافي صغيرًا مقارنةً بحجم البالون الحالي، ولا يتطلَّب زيادة كبيرة في مساحة السطح، ولا زيادة في تمدُّد المطاط.

تكمن غرابة بعض البالونات المطاطية في أنها، حتى وإن كانت كُروية تمامًا، قد لا تصبح كُروية على الإطلاق عندما يكون نفخها في نطاقٍ معين. بعد انتهاء مرحلة النفخ السهل، وقبل أن يصير صعبًا مرةً أخرى عندما يُمَطُّ المطاط بشدة، قد ينتفخ البالون انتفاخًا ملحوظًا عند أحد الجوانب. علَّقَ إم جيه سيويل، الأستاذ بجامعة ريدينج، على هذه الظاهرة الغريبة قائلًا: «على مدار النطاق الكامل لانتفاخ البالون، لا تُفضِّل الطبيعة الشكل الكُروي، حتى عندما يكون ذلك متاحًا.»

عندما تقوم بنفخ بالون أسطواني، فإنه ينتفخ أولًا عند أضعف نقطةٍ فيه، وهي عادةً ما تكون الجزء الأقرب إلى الفتحة. يكون القسم الذي ينضم إلى الانتفاخ وصولًا إلى الجزء الذي لم يُنفخ بعدُ مقوَّسًا بطول البالون. وعندما تنفخ هواءً إضافيًّا، يساعد التوتر الحادث في الجزء المقوس على مَطِّ البالون هناك، ويتحرَّك الجزء الأمامي من الانتفاخ بطول البالون.

عندما يصلُ أنبوب مفتوح بين فُقَّاعتين، يحرِّك الضغط العالي داخل الفُقَّاعة الصغيرة الهواءَ عبْر الأنبوب إلى الفُقَّاعة الكبيرة التي يكون الضغط بداخلها أصغر. تنهار الفُقَّاعة الصغيرة على نفسها، بينما تتمدَّد الفُقَّاعة الكبيرة. يحدث هذا عادةً، دون أن يلاحظه أحد، على سطح الجِعَة التي تحتوي على فُقَّاعات من ثاني أكسيد الكربون. لا تكون الفُقَّاعات

متصلة عبْر أنبوب بالطبع، لكن يمكن لغاز ثاني أكسيد الكربون أن «ينتشر» من فُقَّاعة إلى أخرى عبْر جدران الفُقَّاعة. تفقد الفُقَّاعات الصغرى غازاتها التي تمتصها الفُقَّاعات الكبرى المجاورة وتنهار في النهاية، وهي عملية تُعرف باسم «ظاهرة إنضاج أوستفالد». ومع ذلك، يكون معدل انتشار النيتروجين أقل بكثير من انتشار ثاني أكسيد الكربون؛ ولذلك فإن أنواع الجِعَة (مثل جعة «جينيس ستاوت») التي تحتوي على النيتروجين بدلًا من ثاني أكسيد الكربون، عادةً ما تدوم فُقَّاعاتها لوقتٍ أطول.

إذا استعضت عن الفُقَّاعات بالبالونات، فقد تكون النتائج مختلفة؛ فبالاعتماد على إجمالي كمية الهواء الموجود فيها، يمكن أن تنتهي بها الحال بأن يكون لها نصف القطر نفسه، أو أن تكون واحدة منها أكبر من الأخرى.

(٧١) صنع الكعك على ارتفاعات عالية

لماذا يستدعي إعداد وصفة كعكة الملائكة المزيد من الطحين والماء عند صنْع الكعك على ارتفاعات عالية؟

الجواب: يعتمد ارتفاع الكعكة على تمدُّد فُقَّاعات الهواء المحبوسة داخل الخليط المخفوق، وعلى إنتاج البخار أثناء عملية تبخر الماء (الذي يأتي جزء منه من البيض). ونظرًا لأن الضغط الجوي يكون أقل على الارتفاعات الأعلى، يمكن أن تتوسَّع الفُقَّاعات لدرجة أن تتزعزع القاعدة وتنهار الكعكة. أحد الحلول هو تقليل السكر، الذي يرقِّق قاعدة الكعكة؛ بحيث تصبح أكثر تماسكًا وأقل حلاوةً. أما الحل الآخر، فهو زيادة كمية الدقيق حتى تصير الكعكة أكثر تماسكًا، ويمكن أيضًا تقليل كمية الخميرة لتقليل إنتاج الفُقَّاعات.

يغلي الماء عند درجة حرارة منخفضة في الارتفاعات الأعلى مقارنةً بمستوى سطح البحر؛ وهو ما يعني أن الكعكة ستفقد المزيد من المياه بالبخر عند إعدادها على ارتفاعات عالية؛ لأن التبخُّر يكون أسهل. لتعويض الفقدان، تستدعي الوصفة إضافة المزيد من الماء.

(٧٢) احتساء الشمبانيا في نفق التيمز

في نوفمبر عام ١٨٢٧، عندما تم الانتهاء من بناء النفق أسفل نهر التيمز في لندن، نزل كبار الشخصيات إلى النفق للاحتفال بإتمام بنائه، ونظرًا لأن النفق كان تحت الضغط أثناء البناء (للمساعدة في حجز المياه الموجودة في الأرض تحت النهر)، فقد دخل كبار

الشخصيات غرفةَ معادلةِ الضغط أولًا؛ حيث زاد الضغط حتى تكافأ مع ضغط النفق. أثناء وجودهم داخل النفق، شرب كبار الشخصيات نخب إتمام المشروع، إلا أن الشمبانيا لم تَفُرْ بالفُقَّاعات كثيرًا عند فتح الزجاجات. ومع ذلك، استمرَّت الاحتفالات حتى عاد كبار الشخصيات إلى السطح عبْر غرفةِ معادلةِ الضغط.

عندما خُفِّضَ ضغط غرفة معادلة الضغط إلى الضغط العادي (الضغط الخارجي)، شعر كبار الشخصيات بعدم الراحة، بل وتعيَّن إرجاع أحدهم إلى غرفة معادلة الضغط (كي يُوضَع في مكانٍ ذي ضغط مرتفع مرة أخرى)، فماذا كانت المشكلة؟

الجواب: يخرج ثاني أكسيد الكربون الذائب في الشمبانيا من المحلول لتكوين الفُقَّاعات (الزَّبَد) عند فتح الزجاجة. تكون المحتويات تحت ضغط كبير قبل ذلك، ويكون بخار ثاني أكسيد الكربون الموجود أعلى الزجاجة متوازنًا مع ثاني أكسيد الكربون الموجود في المحلول. أي إن جزيء ثاني أكسيد الكربون، في المتوسط، الذي يترك المحلول ليكون جزءًا من البخار يقابله جزيء ثاني أكسيد كربون آخر يترك البخار ليذوب في المحلول. ومع ذلك، بمجرد فتح الزجاجة، ينخفض ضغط بخار ثاني أكسيد الكربون، ولبعض الوقت لا يكون ثاني أكسيد الكربون في حالة توازن. وهو ما يعني خروج المزيد من ثاني أكسيد الكربون من المحلول بدلًا من الدخول فيه مرة أخرى؛ وهذا ما يتسبب في تدفُّق الفُقَّاعات بطبيعة الحال: بخار ثاني أكسيد الكربون المحاط مؤقتًا بطبقة من السائل.

هذا هو ما يحدث عادةً، ولكن في النفق المضغوط كان ضغط الهواء كبيرًا بما فيه الكفاية؛ بحيث لم تتشكَّل الفُقَّاعات؛ ومِن ثَمَّ، ظل الكثير من ثاني أكسيد الكربون في المحلول. عندما احتست الشخصيات البارزة الشمبانيا، كانوا قد ابتلعوا بالفعل الكثير من ثاني أكسيد الكربون المذاب، وعندما تركوا القفل الهوائي وتعرَّضوا لضغط الهواء المنخفض، تمكَّن ثاني أكسيد الكربون المذاب من الخروج من المحلول، وهو ما يؤدِّي عادةً إلى انتفاخ الأعضاء الداخلية المختلفة، فيتسبَّب في التجشؤ (في أفضل الأحوال)، أو في انتفاخ المعدة والمثانة (في أسوئها).

حتى وقت قريب، كان على عمال البناء العملُ تحت ضغط أثناء بناء الأنفاق تحت الأنهار والخلجان. عندما كان ينتهي العمال من نوبة عملهم ويعودون إلى السطح، كان عليهم أن يخضعوا لجدول لتخفيف الضغط مثل الغواصين الذين يغوصون في أعماق البحار. تكمن المشكلة في أنه عندما يُتنفَّس الهواء تحت الضغط، تُدفَع جزيئات النيتروجين من الهواء إلى مجرى الدم، وعندما يخرج العامل من الجزء المضغوط من النفق، يسمح

الضغط المنخفض على الجسم وفي الرئتين للنيتروجين المذاب بتشكيل فُقَّاعات. تميل الفُقَّاعات إلى التحرُّك مع اتجاه تدفُّق الدم، وتُجمَّع على هيئة «قُطَيْرات» إذا انتقلت إلى الأوردة الكبرى (نحو القلب)، أو أن تتجمَّع وتحجب تدفُّق الدم إذا انتقلت إلى الأوردة الصغرى (بعيدًا عن القلب). في كلتا الحالتين، يمكن للضحية أن تعاني من ألمٍ رهيب ومن خطر التعرُّض للإعاقة على المدى الطويل، أو حتى الموت.

تُحفَرُ الأنفاق في الوقت الحاضر باستخدام آلات الحفر التي يتم توجيهها عن بُعد، ويذهب العمال إلى القسم المضغوط من النفق بوتيرة أقل. (في بعض الحالات، لم تَعُد الأنفاق تُحفَر، ولكنها تُبنَى من أجزاء مبنية مسبقًا تُسقَط في قاع النهر ثم تُجَمَّع.)

قصة قصيرة

(٧٣) لسانٌ عالق داخل زجاجة

عقدت فتاة صغيرة العزمَ على الحصول على آخر قطرة من قطرات مشروب الشوكولاتة، فتشبَّثت بالزجاجة ودفعت بلسانها داخلها، ثم سحبت الهواء بحدة لتسحب السائل إلى داخل فمها، فعلق لسانها بالداخل؛ لأنها خفَّضت ضغط الهواء داخل الزجاجة عن طريق إزالة بعض الهواء؛ فهي إما امتصَّت بعض الهواء عندما كانت تحاول سحب السائل، أو دفعت بعضًا منه إلى الخارج عبْر لسانها وهي تدس لسانها في الزجاجة. في كلتا الحالتين، كان الفرق في الضغط بين الهواء الداخلي والهواء الخارجي يعني أنها لن تستطيع إخراج لسانها، ولم يتمكَّن أيٌّ من طاقم الطوارئ من تحرير لسانها حتى وصل قاطع زجاج محترف ومعه جهاز مخصص لقطع الزجاج.

(٧٤) الرعد في فصل الشتاء

لماذا يكون حدوث العواصف الرعدية (ومِن ثَمَّ الرعد والبرق) أقلَّ احتمالًا في ظروف الشتاء أكثر من ظروف الصيف؟

الجواب: تحدث العواصف الرعدية عندما يكون الجزء السفلي من الغلاف الجوي غير مستقر؛ أي عندما ترتفع حُزَم من الهواء الدافئ بسرعة بسبب الطفو (إذ إنها تكون أقل كثافةً من الهواء البارد). يكون هذا هو الحال عندما تنخفض درجة حرارة الهواء

بشكلٍ حادٍّ مع الارتفاع؛ إذ تُدفَع حزمة من الهواء الدافئ الموجود بالقرب من الأرض إلى أعلى في الهواء البارد.

ومع ذلك، إذا كان الهواء يحتوي على بخار الماء، فلن تكون هناك حاجة إلى تغيُّر درجة الحرارة بصورة متطرفة. والسبب هو أنه مع ارتفاع الحزمة الهوائية الدافئة، يمكن أن يتكثَّف بعض بخار مائها ليشكِّل قطرات. يُطلِق هذا التغيير من البخار إلى السائل كميةً كبيرةً من الطاقة الحرارية؛ مما يجعل الحُزَم أكثر دفئًا. ومِن ثَمَّ، يزيد طفو الحزمة فتتسارع نحو الأعلى، وهو ما يمهِّد الطريق لعدم الاستقرار وحدوث العواصف الرعدية.

في ظروف الشتاء، يكون الانخفاض في درجة الحرارة مع الارتفاع تدريجيًّا عادةً، كما أن حُزَم الهواء الموجودة بالقرب من الأرض تكون باردة جدًّا لدرجة أنها لا تحتوي على قدْر كبير من بخار الماء. ومع انخفاض تسارع حركة الحُزَم إلى أعلى، يكون الهواء مستقرًّا جدًّا؛ بحيث لا تتشكَّل العاصفة الرعدية. ومع ذلك، في بعض الأحيان، سمعتُ هدير الرعد أثناء إحدى العواصف الثلجية.

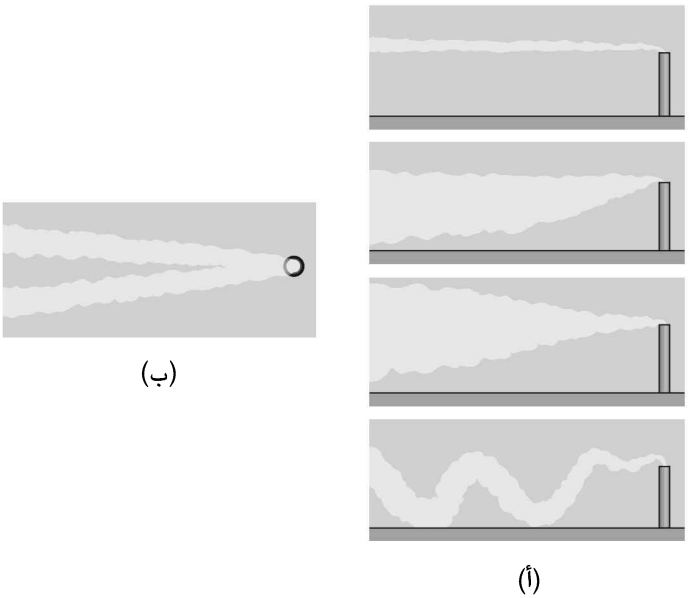
(٧٥) الدخان الصادر من أعمدة المداخن

عندما تكون الرياح عاصفة، يمكنها أن تعصف بعمود الدخان أو البخار المتكثِّف الصادر من عمود المدخنة ليكوِّن نمطًا فوضويًّا دائم التغيُّر. ولكن ماذا يحدث عندما تكون الرياح منتظمة؛ سواء من حيث التوقيت أو الارتفاع؟ ألا ينبغي أن يرتفع عمود الدخان بميلٍ على المستوى العمودي أثناء اتساعه؟ من الغريب أن ذلك قد لا يحدث، وبدلًا من ذلك قد يشكِّل واحدًا من الأنماط الموضَّحة في شكل ٤-١١أ. فما السبب وراء تكوُّن هذه الأشكال؟ لماذا تنقسم بعض أعمدة الدخان التي تحنيها الرياح إلى عمودين (انظر شكل ٤-١١ب)؟

في الأيام الساكنة، ترتفع معظم أعمدة الدخان وتنتشر أفقيًّا لتشكِّل حرف V مستقيمًا. لماذا تُصدِر بعض المداخن أعمدة دخان ضيقة ثم تتسع شيئًا فشيئًا؟

الجواب: في بعض المداخن الصناعية، يُدفَع الغاز إلى أعلى؛ بحيث يقل احتمال تراجعه مع الدخان الذي يحمله إلى الأرض وخلق مشكلة تلوث. لن يحدث المزيد من ارتفاع الغاز إلا إذا كان الغاز أشد سخونةً من الهواء المحيط. يخلق الفرق في درجة الحرارة طفوًا يسرِّع حركة الغاز لأعلى. في المداخن الأخرى، بما في ذلك مداخن مدافئ المنازل، لا يُدفَع الغاز ميكانيكيًّا ويعتمد ارتفاعه بالكامل على عملية الطفو.

حتى إذا كان الغاز في البداية أكثر سخونةً من الهواء، فقد يكون غير قادر على الارتفاع؛ لأن هذا الارتفاع سيبرِّد الغاز، ويعود التبريد إلى انخفاض ضغط الهواء مع



شكل ٤-١١: بند ٤-٧٥: (أ) أعمدة الدخان التي تَصدُر من المداخن في رياح مستقرة أفقية. (ب) مسقط رأسي يبيِّن عمود دخان ينقسم إلى عمودين.

الارتفاع. عندما ترتفع حزمة من الغاز، فإنها تتمدَّد في مقابل انخفاض الضغط. تأتي الطاقة الناتجة عن التمدُّد من الحركة العشوائية لجزيئات الغاز؛ إذ إنها تفقد الطاقة كلما بطَّأت حركتها، التي ينتج عنها انخفاض في درجة حرارة الغاز. إذا انخفضت درجة حرارة الغاز إلى ما هو أدنى من درجة حرارة الهواء، يُقال حينها إن الغاز يتعرَّض إلى «طفو سالب»، ويُجبَر على الهبوط مجددًا.

يتأثَّر ارتفاع الغاز أيضًا بالمحتوى المائي للغاز؛ فإذا بُرِّد الغاز حتى يصل إلى النقطة التي يتكثَّف فيها بخار الماء مشكِّلًا قطرات، فإن تحوُّل البخار إلى سائل يُطلِق طاقةً تساعد على تسخين الغاز على الرغم من أن الغاز يكون في حالة تمدُّد. لا بد من وضع اعتبارات مشابهة لعملية هبوط الغاز؛ إذ يؤدِّي ضغط الهواء المتزايد في هذه الحالة إلى تقلص الغاز وتسخينه. وإذا استمرت عملية هبوطه، فلا بد أن يظل أكثر برودةً من الهواء.

تُحدِّد درجة الحرارة النسبية للغاز والهواء الاتجاه الذي يتخذه الغاز، ولكن يعتمد شكل عمود الدخان الذي تحنيه الرياح على الاضطراب الهوائي (الدوامات الهوائية). إذا كان الاضطراب يتكوَّن من دوامات صغيرة، فسيتمدَّد العمود تدريجيًّا ويتحرك بعيدًا عن المدخنة شيئًا فشيئًا. أما إذا كانت الدوامات أكبر، فقد يتداخل الدخان مكوِّنًا شكل «حلقات». (يكون التداخل وهميًّا إلى حدٍّ ما؛ لأن أي حزمة من الغاز لا تتحرَّك لأعلى أو لأسفل، ولكن في خط شبه مستقيم. يرجع ظهور الحلقات إلى سلسلة من الحُزَم الدخانية التي تُدفَع للتحرُّك في خطوط مستقيمة مختلفة بسبب الاضطراب الهوائي.)

كمثال على ذلك، تدبَّر «الشكل المخروطي» الذي يحدث عندما يتسبَّب ارتفاع الغاز في برودته بسرعة؛ بحيث يكون أقل من درجة حرارة الهواء، في حين أن أي عملية انخفاض للغاز تسخِّنه بسرعة فوق درجة حرارة الهواء. عندئذٍ يحتجز الغاز جزئيًّا بطول ارتفاع عمود المدخنة تقريبًا، ولكن يمكن لاضطراب هوائي خفيف أن يخلطه تدريجيًّا بشكلٍ أفقي. يحدث الانتشار المروحي للدخان عندما تزداد درجة حرارة الهواء بصورة ملحوظة مع الارتفاع، وهي حالة تُعرَف باسم الانقلاب الحراري. عندئذٍ يُحبَس الغاز بشكل أضيق، ويمكن للاضطراب الهوائي أن يخلطه أفقيًّا فحسب. وفي كلتا الحالتين، إذا كانت أجزاءٌ من الغاز مرتفعةَ الحرارة، فيمكن لهذه الأجزاء أن تندفع إلى أعلى، وهو ما يشكل أعمدة دخان جانبية.

إذا انقسم عمود من الدخان، فيعود هذا الانقسام إلى الارتفاع السريع للغاز من مركز المدخنة وارتفاعه الأبطأ بطول جدرانها. عند تشكُّل عمود الدخان، يبدأ الغاز في الانتشار لأعلى عبْر مركز المدخنة وإلى الأسفل بطول جانبَيْها. تقسم هذه الحركة الدوامية عمود الدخان إلى عمودين، ثم يتحرَّك هذان العمودان المنقسمان باتجاه الرياح في اتجاهين منفصلين.

عندما تُصدِر إحدى المداخن الغاز ببطء (كما يحدث في المدفأة عندما تكون النار منخفضة والفتحة الموجودة في الجزء العلوي من المدخنة واسعة)، لا بد أن ينكمش عمود الدخان أولًا، وأن تزداد سرعته قبل أن يتسع ليشكِّل حرف V. يكون الانكماش نسخة معكوسة مما يحدث لتيار ماء يتدفق بسلاسة عندما يهبط من صنبور.

(٧٦) إشارات الدخان والسحابات الدخانية التي تشبه فطر عيش الغراب

عرف الأمريكيون الأصليون كيف يرسلون إشارات عبْر مسافات طويلة من خلال التحكم في الدخان الناتج عن شعلة نار؛ فقد كانوا يضعون الكثير من الأغصان في النار لزيادة

الدخان، ثم يغطُّون النار ببطانية مبلَّلة لفترة وجيزة. عندما كانوا يسحبون البطانية، كان الدخان يتصاعد في الهواء ويمكن لمراقبٍ بعيدٍ رؤيته. إذا كانت عملية إرسال الإشارات تتم في الصباح الباكر أو في وقتٍ متأخر من بعد الظهيرة، فلماذا كان الدخان يتمدد أفقيًّا عندما يصل إلى ارتفاع معين؟ كان الدخان يشبه عندئذٍ قمة فطر عيش الغراب التي تشبه القبعة أو انفجار قنبلة ذرية.

كما استخدم الأستراليون الأصليون النيران في إرسال الإشارات، ولكنهم اختاروا رفع المواد المحترقة على عِصيٍّ طويلة بدلًا من تغطيتها ببطانية. وكلما رفع عدة أشخاص العِصيَّ، ألقى آخرون بأغصان جديدة على النار. كان رفعُهم للعصي يزيد من تدفق الهواء عبْر النار فيشتد لهيبها، وعزَّزت الأغصان المضافة من تدفق الدخان. لو تطورت الإشارات الدخانية حتى صارت على شكل «قبعات فطر عيش الغراب»، ولو نَسَّقَ السكان الأصليون جهودهم بعناية، لأمكنهم إرسالُ ست قبعات دخانية، تصطف كل واحدة منها فوق الأخرى. كيف يتحكَّم السكان الأصليون في الارتفاع الذي تظهر عليه كل قبعة دخانية؟

لماذا تُصدِرُ الانفجارات الكبيرة، بما في ذلك الانفجارات النووية التي تحدث على مستوى سطح الأرض وفوق مستوى سطح الأرض، سحابات دخانية تشبه شكل فطر عيش الغراب؟

الجواب: تنتشر نفثات الدخان أفقيًّا عند الارتفاع الذي يبرد فيه الغاز الذي يحمل الدخان إلى درجة حرارة الهواء المحيط (انظر البند السابق). يبرز ظهور القبعات الدخانية بشكل ملحوظ عندما يمر الهواء بحالة انقلاب حراري (تزداد درجة حرارة الهواء مع الارتفاع)، مثلما قد يحدث عندما تكون الأرض باردةً في وقت مبكر أو في وقت متأخر من اليوم. تحكَّم الأستراليون في ارتفاع كل قبعة دخانية عن طريق ضبط مدى حدة اشتعال النار. فكلما زادت درجة الحرارة داخل النار، ارتفعت نفثة الدخان والغازات الساخنة أعلى وأعلى.

في الحرب العالمية الثانية، استُخدمت طبقات من الدخان لإخفاء الأهداف، مثل المصانع، من الهجوم الجوي الليلي، وخاصةً في الليالي التي كان يضيئها نور القمر بوضوح. كانوا يُصدِرون دخانًا كثيفًا زيتيًّا أسودَ من خلال حرق زيت السولار في نفس الآلات التي تُستخدم لتغطية البساتين بالدخان في الليل عندما تكون الثمار مهددة بالتعرض للصقيع. لم يكن الدخان يرتفع بشكل ملحوظ؛ لأنه لم يكن شديد الحرارة عندما خرج من المدخنة العالية المثبَّتة على موقد؛ ومِن ثَمَّ فإنه يشكِّل طبقة مسطحة يمكنها إخفاء أي هدف، إلا عندما يهب النسيم.

يُنتِج الانفجار النووي كرة نارية متقدة تسخِّن الهواء بسرعة، ثم يرتفع هذا الهواء سريعًا ويمتص الهواء الموجود على ارتفاع سطح الأرض والأوساخ والحطام ورطوبة الماء إلى أعلى لتشكِّل شكل ساق عيش الغراب. وكما في حالة الحرائق، يبرد الهواء في نهاية المطاف حتى يصل إلى درجة حرارة الهواء المحيط، ثم ينتشر أفقيًّا ويشكِّل قبعة عيش الغراب.

(٧٧) نار المدفأة

لماذا لا يمكنك أبدًا الحصول على نار جيدة إذا أضفتَ مادةً قابلة للاشتعال حول قطعة حطب واحدة؟ ولماذا من الأفضل، بدلًا من ذلك، أن يكون لديك ثلاث قطع من الحطب على الأقل؟ لماذا يجب تحريك الحطب من حين إلى آخر أثناء احتراقه؟ كيف تدفِّئ نيران المدفأة الغرفة الموجودة فيها؟ لماذا يصدر دخان من المدفأة المبنية بشكل سيئ داخل الغرفة، بينما لا يحدث ذلك إذا كانت مبنيةً بشكل جيد؟

ما الغرض من الواجهات الزجاجية التي تُباع لتغطية فتحة المدفأة؟ هل توجد طريقة أكثر فاعليةً لتكديس الحطب؛ بحيث يمكن أن تدفئ النيران الغرفة بشكل أفضل؟

الجواب: سيحترق سطح الحطب عندما ترتفع درجة حرارته فوق قيمة معينة؛ «درجة حرارة الاحتراق» أو «درجة حرارة الاشتعال». قد ينتج عن إضافة مادة قابلة للاشتعال احتراقُ جانبَيْ قطعة الحطب، ولكن بعد أن تستهلك المادة المشتعلة؛ فإن انبعاث الأشعة تحت الحمراء من سطح قطعة الحطب والحمل الحراري للغازات الساخنة بعيدًا عن الحطب يخفِّض من درجة حرارة السطح إلى ما دون درجة حرارة الاحتراق. للإبقاء على قطعة الحطب مشتعلة، ستحتاج إلى قطعة حطب أخرى أو قطعتين إلى جانبها. حينئذٍ ستُسَخِّن الأسطح المحترقة بعضها بعضًا من خلال الإشعاع والحَمل الحراري للغاز الساخن، أو من خلال التوصيل الحراري عبْر الهواء الوسيط، وتبقى درجة حرارة الحطب أعلى من درجة حرارة الاحتراق.

ناسَبَ هذا الوصف نار المخيم، ولكن نار المدفأة تختلف؛ لأنها تكون داخل مكان مغلق يحيط بها جزئيًّا. يشكِّل الغاز والطوب الحراري في أعلى المدفأة طبقة ساخنة تُصدر أشعة تحت حمراء إلى الأسطح المحترقة؛ مما يساعدها على البقاء ساخنة. كما أن وجود الحطب المشتعل داخل مكان مغلق جزئيًّا يمكن أن يحدَّ من كمية الأكسجين المطلوبة؛ مما يحدُّ من عملية الاحتراق. في الحالة المثالية، يحدث الاتزان بين الطاقة الحرارية التي تُصدرها النار، والطاقة الحرارية التي تُفقَد من خلال الحَمل الحراري للغازات الساخنة

أعلى المدخنة (على أمل ألا تخرج هذه الغازات إلى داخل الغرفة)، وبين التوصيل الحراري عبْر الجدار الخلفي للمدفأة، والإشعاع الذي يخرج إلى داخل الغرفة. يمكن أن تنتج عن هذا الاتزان زيادةُ اشتعال النار إذا أُضيف المزيد من الحطب، أو إذا زاد تدفُّق الهواء داخل المدفأة وأعلى المدخنة.

يعود سبب الدفء في الغرفة بشكل كبير إلى الإشعاع الحراري الذي يُرسَلُ عبْر المساحات المفتوحة بين قِطَع الحطب. يتم تحريك قطعة الحطب أحيانًا لنقل المناطق غير المحترقة إلى المنطقة الفارغة الموجودة بين قِطَع الحطب الأخرى. يواجه عندئذٍ جزءٌ من السطح المحترق الغرفةَ، ويوفِّر إشعاعًا حراريًّا لفترة وجيزة، بينما يشتعل السطح الذي نُقِلَ حديثًا إلى الداخل ويشتد لهبه.

يرتفع الهواء الساخن وغازات الاحتراق إلى المدخنة، ويمر في جزء ضيق يتحكَّم في مدى نطاقه «صمام تنظيم تيار الهواء». يزيد الطفو من ارتفاع الغازات؛ وذلك لأن درجة حرارتها العالية تجعلها أخفَّ من الهواء الموجود داخل الغرفة وخارجها. تسحب المدخنة الأطول الغازات سحبًا قويًّا (عملية السَّحب داخل المدخنة)؛ لأنها تسمح للطفوية بتسريع الهواء والغازات إلى سرعةٍ أكبر بكثير قبل أن تصل إلى القمة. وإذا هبَّت الرياح على قمة المدخنة، فإنها تُخرِج الغازات والهواء المتسربَيْن، وتعزِّز من عملية سحبهما. أما إذا كانت المدخنة ذات سَحب رديء، فإنها «تنفث دفقات» من الغازات الساخنة بالتناوب مع دخول الهواء الخارجي البارد إلى المدخنة.

قد تقوم المدخنة بنفث الدخان داخل الغرفة لعدة أسباب. أحد الأسباب المحتملة لذلك، هو أنه عندما يُسحَب الهواء إلى داخل المدفأة، يصطدم بالجدار الخلفي ثم يدور متجهًا إلى الأمام مرة أخرى نحو الغرفة بعد أن يمر فوق النار، ويحمل في طريقه بعضًا من الدخان معه. تحتوي المدفأة الجيدة التصميم على مساحة داخلية مرتفعة؛ بحيث تحجب الجدران الأمامية دوران الهواء. إذا كان صمام تنظيم تيار الهواء أو الجزء المتصل به من المدخنة مفتوحًا للغاية، فقد يؤدِّي سَحب الهواء الخارجي إلى إرسال الدخان إلى الغرفة. عندما تكون النار منخفضة، أو عندما تكون المدفأة كبيرة للغاية، تمثِّل هذه التيارات الهوائية الهابطة مُشكِلةً.

بما أن المدفأة تدفئ الغرفة في المقام الأول من خلال الإشعاع الحراري، تكون الجدران الموجودة بالخلف وعلى الجانبين مائلةً في كثير من الأحيان؛ حتى تشتِّت الإشعاع إلى داخل الغرفة. يتوجَّه الإشعاع بشكل أكبر إذا كُدِّسَت قطع الحطب على دعامة، تشكِّل شِقًّا،

بحيث تُوضع قطعة كبيرة من الحطب بالخلف، والقطع الأصغر في الجزء العلوي والسفلي من الشق. تُحتوى النار داخل الشق، ويواجه الجمر الغرفة بدلًا من طوب المدفأة.

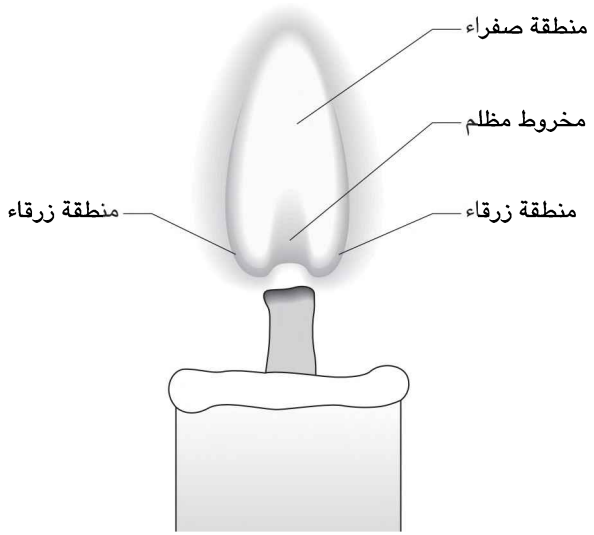
وبما أن النار تمتص الهواء من الغرفة، فإنها تسحب الدفء من الغرفة. للتخفيف من عمليةِ الفقدِ هذه، يمكن تركيب هيكل زجاجي خارجي مقاوِم للحرارة بطول المدفأة. يسمح الزجاج برؤية النار ويعكس الطاقة الحرارية التي يتلقاها إلى الغرفة، بينما يمنع أيضًا الفقد الكبير للهواء الدافئ من الغرفة. يظل الهواء الذي يُسحَب من خلال المنافذ المفتوحة على مستوى الأرضية يغذي اشتعال النار؛ حيث يكون هواء الغرفة هناك في أبرد درجاته.

بالنسبة إلى بعض المدافئ، يمكن أن يحدث تدفق عكسي للهواء عندما لا تكون هناك نار في المدفأة. عادةً ما تكون هذه المدافئ ظليلة وغير معرَّضة لأشعة الشمس؛ لذلك يمكن أن تحتوي على هواء بارد نسبيًّا، في حين أن أشعة الشمس تسخِّن الهواء الخارجي. يكون الهواء البارد في المدخنة أشد كثافةً وأثقل من الهواء الخارجي؛ ولذلك يهبط إلى الجزء السفلي من المدخنة ويخرج إلى داخل الغرفة، فيدفع الهواء من خلال الأبواب أو النوافذ المفتوحة، أو من خلال الشقوق التي تحيط بها.

يحدث تدفُّق متساوٍ للهواء في بعض الكهوف ذات الفتحات المتعددة، والتي تكون فيها إحدى الفتحات أعلى بكثير من الأخرى. تعمل عندئذٍ الممرات التي تمتد من الفتحة السفلية إلى الفتحة العلوية كمدخنة. عندما يكون هواء المدخنة أدفأ من الهواء الخارجي، كما هو الحال في الشتاء، يتدفَّق الهواء خلال الفتحة السفلية ويخرج من خلال الفتحة العلوية، وعندما يكون العكس صحيحًا، يتدفق الهواء في الاتجاه العكسي، ويُقال عندئذٍ إن الكهف «يتنفس».

(٧٨) لهب الشمعة

كيف تحترق الشمعة؟ أي؛ كيف تستهلك وقودها؟ لماذا يغلب اللون الأصفر على الضوء الصادر من لهب الشمعة؟ ولماذا تتكوَّن مناطق ذات لون أزرق عادةً على امتداد جانب اللهب (انظر شكل ٤-١٢)؟ لماذا يوجد مخروط مظلم بين الفتيل والجزء الأصفر من اللهب؟ لماذا تُصدِر بعض الشموع الدخان؟ ولماذا يضطرب لهب بعضها الآخر؟ لماذا يكون السُّخَام الناتج من اللهب أسود اللون، ومع ذلك، يصدر دخان أبيض اللون من الشمعة التي أُطفِئَت لتوها؟



شكل ٤-١٢: بند ٤-٧٨: تركيب لهب الشمعة.

الجواب: يتكوَّن الوقود الشمعي للشمعة من البارافين أو الستيارين (حمض الستياريك الدهني) أو من مزيج منهما. يعترض الإشعاعُ الحراري الصادر من اللهب الشمعَ فيذيبه ويسيله. يُسحَب السائل إلى أعلى الفتيل عن طريق الخاصية الشعرية (أي إن جزيئات الفتيل تجذب جزيئات السائل، المتماسكة معًا بفعل التجاذب المتبادل). بينما يرتقي الشمع الفتيل، فإنه يتبخَّر بفعل بيئة اللهب الساخنة، ثم يُحمَلُ إلى أعلى وإلى الخارج أيضًا عبْر تدفُّق الغازات الساخنة (الحَمل الحراري).

تُحمَل بعض الهيدروكربونات التي يُطلقها التبخير إلى المخروط المظلم فوق فتيل الشمعة مباشرة، ولكن درجة حرارتها على الأرجح لا تكون أسخن من نحو ٦٠٠ إلى ٨٠٠ درجة مئوية. تكون هناك حاجة إلى الأكسجين لحرق الهيدروكربونات، إلا أنه لا بد أن ينتشر داخل اللهب، ولكن لا يصل الكثير منه إلى منطقة المخروط المظلمة (يُقال إن لهب الشمعة نوع من أنواع «اللهب المنتشر»). ولذا، مع انخفاض درجة الحرارة وفي وجود

القليل من الأكسجين، لا تبعث الهيدروكربونات الموجودة في المخروط المظلم الكثير من الضوء.

تُحمَل بعض الهيدروكربونات إلى المناطق الزرقاء، التي يُقال إنها «مناطق تفاعل». هناك، يتفاعل الأكسجين الوفير مع الهيدروكربونات ويُكَسِّرُها إلى جزيئات أصغر ويُكَوِّنُ المنطقة الأكثر سخونةً من اللهب. تحتوي هذه الجزيئات الأصغر على جزيئات الكربون (C_2) والهيدروكربون (CH). عندما تُنتَج هذه الجزيئات في حالة استثارة، فإنها تسارع إلى فقدان حالة الاستثارة عن طريق إصدار الضوء في سلسلة من الأطوال الموجية المحددة. تقع معظم الانبعاثات الساطعة عند الطرف الأزرق من الطيف المرئي، وهكذا يُرى اللون الأزرق وهو ينبعث من جانب اللهب. (في غرفةٍ مظلمة قد يظهر وهج خافت يحيط بلهب الشمعة، إلا أن هذا الوهج يرجع إلى تشتت ضوء اللهب داخل العين. وغالبًا ما يصوِّر الفنانون هذا الوهج عن طريق رسم خطوط قصيرة متموجة تمتد من لهب الشمعة.)

إن الهيدروكربونات التي ترتفع إلى الجزء الأصفر من اللهب من منطقة المخروط المظلمة، أو من المنطقة التي تتفاعل فيها، تشكِّل جزيئات صلبة صغيرة من الكربون تحترق في الأكسجين بعد ذلك. تصبح الجسيمات شديدة السخونة؛ بحيث تكون ساطعة، وهو ما يجعل الضوء الأصفر غالبًا على ضوء الشمعة.

إذا كان معدل دخول الهيدروكربونات إلى المنطقة الصفراء يتطابق مع المعدل الذي تُستهلَك به الجزيئات الصلبة، فلا يصدر اللهب دخانًا. ومع ذلك، إذا كان معدل الإمداد كبيرًا جدًّا (كما يمكن أن يحدث عندما يكون الفتيل عريضًا للغاية)، يمكن للهب أن يُصدِر دخانًا؛ أي أن تَصدُر منه أدخنة مظلمة؛ ألا وهي جسيمات الكربون التي لم تحترق بشكل كامل في اللهب. إذا أدخلت مشبكَ ورقٍ في لهب أيِّ شمعة، فسيمكنك مقاطعة عملية الاحتراق؛ ومن ثم تحفيز إطلاق السُّخَام الذي يحيط بمشبك الورق من كل جانب.

إذا لم يتطابق معدل تزويد الوقود مع معدل احتراقه، فيمكن أن ينطفئ اللهب أو أن يرتعش. ينطفئ اللهب إذا أخفق في تسييل ما يكفي من الوقود، أو إذا فشلت الخاصية الشعرية في سحب ما يكفي من الوقود إلى الفتيل لإبقاء اللهب مشتعلًا. بينما يحدث الارتعاش في حالة وجود آلية تغذية راجعة بين اللهب وإمدادات السائل. على سبيل المثال، لنفترض أن اللهب يتوهج؛ ومِن ثَمَّ يزيد الإشعاع الحراري وكمية الشمع المسال، فإذا كان الفتيل بطيئًا في جلب هذا السائل الإضافي إلى اللهب، يستهلك الوهج الوقود المتاح في الجزء العلوي من الفتيل ويخبو اللهب. عندما يصل السائل الإضافي أخيرًا إلى قمة الفتيل، يتوهج اللهب مرة أخرى، وتتكرَّر الدورة.

لإطفاء لهب الشمعة، لا بد أن تنفخ اللهب لفترة كافية، ليس لإزالة جسيمات الكربون المتوهجة في المنطقة الصفراء والهيدروكربونات المتفاعلة في المنطقة الزرقاء فحسب، ولكن أيضًا لإزالة الهيدروكربونات التي ستتبخَّر من الفتيل الساخن أثناء النفخ. في الواقع، بعد أن تنطفئ الشمعة، تظل الهيدروكربونات تتبخر من الفتيل، ولكنها لا تَعُد تُشكِّل جزيئات كربون وتحترق. إذا بقيت جزيئات فردية، فمن المحتمل أنك لن تلاحظها، ولكنها إذا تجمَّعت معًا، فإن ذلك يزيد من تشتيتها للضوء بما يكفي لترى دفقة ناعمة بيضاء ترتفع من الفتيل.

(٧٩) رش ألسنة اللهب بالماء

لماذا يكتم الماء الحريق الذي ينتج عن الخشب المحترق؟ لماذا يقوم رجال الإطفاء عادةً بضبط فوهة خرطوم الحريق بحيث يخرج منه الماء على هيئة رذاذ ناعم، بدلًا من أن يكون تيارًا متصلًا؟ عندما يقتحم رجال الإطفاء غرفة مشتعلة مغلقة، فلماذا يرشون سقف الغرفة عادةً بدلًا من الأرض، حتى لو كان الحريق موجودًا على الأرض فقط؟

الجواب: يمكن للماء إخماد الحريق أو تقليص نطاقه من خلال عمليات عديدة: (١) يمتص الماء الطاقة الحرارية من الأسطح المشتعلة ومن نواتج البخار (الذي قد يكون مشتعلًا)؛ ومِن ثَمَّ يبرِّدها بما يكفي بحيث لا تعود في حالة اشتعال. (٢) يمتص الماء بعض الإشعاع الحراري الذي ينبعث من المواد المشتعلة؛ ومِن ثَمَّ يقلِّل من احتمال أن تصبح المواد المحيطة ساخنةً بما يكفي لتشتعل هي الأخرى. (٣) يشغل الماء حيزًا في الهواء؛ ومِن ثَمَّ يقلِّل من كمية الأكسجين التي تصل إلى المواد المشتعلة التي تحتاج إلى الأكسجين لمواصلة الاشتعال.

في العملية الأولى، يعتمد المعدل الذي يتم فيه امتصاص الطاقة الحرارية على المساحة السطحية للماء؛ لأن المساحة الكلية للسطح تزداد إذا تحوَّل تيار الماء إلى رذاذ؛ لذا تُضبَط فوهة الخرطوم لإصدار الرذاذ.

عندما تحترق غرفة مغلقة، يُستنزَف الأكسجين المطلوب بعد وقت قليل، تاركًا وقودًا غير محترق في الهواء. في الواقع، قد تواصل المواد الساخنة الموجودة في الغرفة إطلاق الوقود غير المحترق. ولأن هذا الوقود يكون ساخنًا، فهو عادةً ما يتجمَّع بالقرب من السقف. ومِن ثَمَّ، إذا فتح رجل الإطفاء الغرفة فجأةً، فعادةً ما يتدفَّق الهواء عبْر الجزء السفلي من

الفتحة ويزوِّد الغرفةَ بالأكسجين الذي لا يلبث أن يصل إلى الوقود غير المحترق بالقرب من السقف. ينفجر هذا الوقود فجأةً متحولًا إلى ألسنة لهب، ونتيجة تدفُّق الهواء داخل الجزء السفلي من الفتحة، يتدفَّق هذا الوقود المحترق إلى الخارج عبْر الجزء العلوي من الفتحة. يقابل الوقودَ غير المحترق الذي تسرَّب خارج الغرفة الهواءُ الغزير، وهو ما ينتج عنه تكوُّن كرة نارية تندفع خارج الغرفة فيما يُعرف باسم «انفجار الدخان» (الانفجار الذي يمكن أن تُحدثه النيران أثناء محاولة إخمادها)، أو «فيضان نار الحريق». تحدث هذه العملية برمتها في لمح البصر؛ بحيث يمكن أن تحيط الكرة النارية برجل الإطفاء الذي فتح باب الغرفة. لذا، عند فتح الباب، يرشُّ أحد رجال الإطفاء الماء على الفور بالقرب من السقف ليُبَرِّد الوقود الساخن الذي يطفو هناك؛ ومِن ثَمَّ يقلِّل من فرصة حدوث انفجار الدخان. يبدو أن فرصة حدوث انفجار الدخان والحاجة إلى تنفيذ هذا الإجراء الوقائي زادت؛ لأن الغرف والمباني أصبحت تُبنى لتكون غير منفذة للهواء، بغرض تقليل تكلفة تبريدها أو تدفئتها في الظروف الجوية القاسية.

(٨٠) الحرائق الناتجة عن زيت الطهي

يمكن لزيت الطهي العادي أن يشتعل ذاتيًّا (ينفجر إلى ألسنة لهب) إذا تجاوزت درجة حرارته ما يُسمَّى بـ «نقطة الاشتعال». على سبيل المثال، يشتعل زيت الكانولا ذاتيًّا عند درجة حرارة تصل إلى ٣٣٠ درجة مئوية. يمكن أن يطفئ الماء الحريق، ولكن هل يجب استخدامه لإطفاء زيت الطهي المحترق، مثلما يحدث عندما تلتقط مقلاةُ زيتٍ النارَ من الموقد وتشتعل؟

الجواب: تنص النصيحة النموذجية بشأن التعامل مع حريق زيت الطهي على إخماده بغطاء أو أي قطعة معدنية مصمتة أخرى، لمنع إمداد الأكسجين، ولاحتواء الزيت الساخن. إذا ألقيت الماء على الزيت الساخن، فإن القطرات تدخل الزيت كما تدخل بِركة من المياه المتجمعة، إلا أن كل قطرة تنقسم بعد ذلك إلى العديد من القطرات. تسخن هذه القطرات بسرعة في الزيت، ولا تلبث أن تتحوَّل إلى بخار. ومع تمدُّد الماء السائل ليصبح بخار ماء، فإن الزيادة المفاجئة في الحجم تدفع بالزيت الساخن في العديد من الاتجاهات. لا يبرد هذا الزيت المحمول في الهواء أثناء الطيران، ويمكنه أن يحرق الجلد أو سطح الطاولة، وإذا اصطدم باللهب مباشرةً أو من خلال التناثر، فيمكنه أن يشتعل وينتشر

بطول الجدران. ومِن ثَمَّ، فإن رشَّ دفقة من الماء على مقلاة من الزيت المحترق يمكن أن يكون كارثيًّا بسبب تحويل الماء السائل إلى غاز متفجِّر.

(٨١) حرائق الأشجار وحرائق الغابات

كيف تنتشر حرائق الحشائش، مثل التي شهدتها المناطق الريفية في ولاية تكساس؟ كيف تنتشر حرائق الغابات؟ وكيف تُشعِلُ البيوت عندما تصل إلى منطقة مأهولة؟

الجواب: تنتشر حرائق الحشائش بوجه عام بسبب اللهب الذي يكون موجودًا على طول حافة النار التي تلامس المواد التي لم تحترق، والواقعة خلف حافة النار مباشرة. تزيد سرعة انتشار النار إذا دفعت الرياح باللهيب فوق الحافة وصولًا إلى المواد التي لم تحترق. كما تزيد سرعة انتشارها أيضًا إذا كانت المواد التي لم تحترق أعلى نسبيًّا، كما يحدث عندما تنتشر ألسنة النار صاعدةً جوانب أحد الوديان. يمكن للجمر المحترق، الذي يحمله الغاز الساخن القادم من النار، أن يقع على المادة التي لم تحترق فيشعلها.

تنتشر حرائق الغابات التي تكون فيها المادة الموجودة بالقرب من الأرض مشتعلة بنفس الطريقة تقريبًا، أما «الحرائق التاجيَّة» التي يحترق فيها حتى الغطاء الشجري العلوي، فتنتشر بشكل مختلف تمامًا. تُنقَل الطاقة من النار إلى المواد التي لم تحترق عن طريق الإشعاع الحراري في المقام الأول. يكون الوضع مشابهًا إذا وقفت أمام نار مشتعلة؛ إذ إنك تشعر بالدفء، بل وبالسخونة الشديدة، بسبب اعتراضك للإشعاع الحراري. في حالة الحرائق التاجيَّة، تصبح المواد التي لم تحترق ساخنة للغاية بحيث تشتعل؛ ومِن ثَمَّ تنتشر النار. ينشأ الإشعاع الحراري في منطقتين رئيسيتين: المواد الصلبة المحترقة (جذوع الأشجار) والغازات المشتعلة (في لهب النيران التاجيَّة). يُحجَب الإشعاع الصادر من المواد الصلبة بواسطة الجسيمات المحمولة جوًّا والأشجار، ولا يخترق المواد غير المحترقة بشكل جيد. يمكن للإشعاع الصادر من اللهب أن يخترقها بشكل أفضل؛ خاصةً إذا كانت الرياح تحني ألسنة اللهب في اتجاه المادة غير المحترقة؛ بحيث يتجه جانب اللهب (أو طوله الكامل) إلى الأسفل مواجهًا المواد غير المحترقة بشكل أو بآخر. عندئذٍ، تعترض المواد غير المحترقة معظم الإشعاع الصادر من جانب اللهب.

عندما يقترب الحريق التاجي من أحد المنازل، عادةً ما تسخن الجدران الخارجية التي تواجه النار حتى تصل إلى نقطة الاشتعال. ومع ذلك، يمكن أن تساعد الأفاريز

المائلة في حماية الجدران من الإشعاع الحراري، كما يمكن للأشجار التي تقع بين الجدران والنار أن تحمي الجدران. أما أفضل الحالات، فهي تلك التي تحترق فيها الأشجار بشكل ضعيف ولا تساهم في تغذية الحريق التاجي. (يمكن بالطبع، أن يشتعل المنزل عن طريق الجمر الذي يتساقط على سقفه.)

(٨٢) العواصف النارية

في إحدى الليالي، أثناء الحرب العالمية الثانية، كانت طائرات الحلفاء تقصف مدينة دريسدن الألمانية بالقنابل الحارقة. عندما بدأ القصف، كانت الرياح المحيطة في المنطقة ضعيفة؛ إذ كانت تبلغ سرعتها أربعة أمتار في الثانية فقط تقريبًا، فلماذا زادت سرعة الرياح إلى ٢٠ مترًا في الثانية (أي أكثر من ٤٠ ميلًا في الساعة)؟ (قدَّرَ بعض رجال الإطفاء أن سرعة الرياح كانت أكبر من ذلك، ربما ٥٠ مترًا في الثانية.)

الجواب: بعد ٣٠ دقيقة تقريبًا من بدء القصف، انتشرت الحرائق عبْر المدينة بعضها نحو بعض، واندمجت في حريق واحد هائل، وهو ما أوجد الشروط المطلوبة لفرن الصهر، فأصبحت شوارع المدينة بمنزلة فرن صهر كبير. تسارعت الغازات الساخنة بشدة إلى أعلى؛ لأنها كانت أخفَّ من الهواء البارد المحيط بها، وبردت عندما ارتفعت من خلال إطلاق أشعة تحت حمراء واختلاطها بالهواء المحيط، ولكن عملية التبريد كانت بطيئة بما يكفي؛ بحيث ارتفع عمود الغازات الساخنة نحو سبعة كيلومترات. في الجزء العلوي من العمود، انتشرت الغازات أفقيًّا؛ لأنها كانت بنفس درجة حرارة الهواء المحيط بها.

هذا التدفُّق الضخم للغاز لأعلى سَحَبَ (امتص) الهواء بطول الأرض إلى المنطقة المحترقة، وهو ما أحدث رياحًا قوية أجَّجت من اشتعال النيران. تنشر الرياح الحريق في المعتاد، ولكن التدفُّق الإشعاعي في دريسدن حافظ على النار ثابتةً، وهو ما خلق حالةً تُعرف باسم «العاصفة النارية». تسبَّب الحريق في خسائر فادحة في الأرواح وتدمير شبه كامل للمباني في المنطقة.

في بعض العواصف النارية، يبدأ تيار الهواء المتجه لأعلى في التحرك حلزونيًّا، مُشَكِّلًا دوامة. تُنتِج الحرائق الصغرى (التي لا تكون أقل حدةً) أيضًا دوامات تشبه الزوابع الترابية، وتُعتبر هذه الدوامات خطيرة؛ لأنها تساعد في نشر المواد المحترقة.

(٨٣) تنظيم درجات الحرارة في التلال والمباني

تُعرف تلال النمل الأبيض في شمال أستراليا بالتلال المغناطيسية، ليس لأن التلال أو النمل الأبيض مغناطيسيان فعلًا، بل لأن هذه التلال العالية وتدية الشكل تميل نحو الشمال والجنوب، كما لو أنها إبرة بوصلة. الاسم الصحيح لهذا النوع من النمل الأبيض هو «النمل الأبيض المغناطيسي»؛ وذلك لأن اتجاهات التل تقع على طول خطوط الطول. لماذا يفضِّل النمل الأبيض هذه الاتجاهات لبناء تلاله؟

في المناخات المعتدلة؛ حيث لا يكون الصيف شديد الحرارة، يمكن أن تظل بعض المباني دافئةً بشكل خانق حتى بعد فتح نوافذها. هل هناك طريقة لتحسين تهوية مبنًى كهذا؛ بحيث يمكن تجنُّب التكلفة المرتفعة لتبريده عبْر استخدام مكيفات الهواء؟

الجواب: تلال النمل الأبيض المغناطيسي مصمَّمة بذكاء للحفاظ على درجة الحرارة الداخلية. يمتص الوجه الطويل العريض على الجانب الشرقي من الوتد الكثيرَ من أشعة الشمس في وقت ارتفاع الشمس، بينما يمتص الوجه المعاكس أشعة الشمس في وقت الغروب. عندما تكون الشمس في كبد السماء، يقع ضوء الشمس على مساحة مقطع عرضي صغير نسبيًّا. أي إن المساحة التي تُرى من الأعلى تكون أصغر من المساحة التي تُرى من الجانب الغربي أو الشرقي. ومِن ثَمَّ، فإن كمية ضوء الشمس الممتصة خلال اليوم الحار تكون أقل من تلك التي تُمتص خلال ساعات الصباح والمساء الباردة. وبصفة عامة، تكون درجة الحرارة داخل التل ثابتة تقريبًا طوال اليوم.

تتضمَّن بعض المباني الآن، مثل بعض المباني في إنجلترا، «برجًا شمسيًّا» يتكوَّن جانبُه (أو أحد أركانه) المواجه للشمس خلال النهار من الزجاج الشفاف. تحتوي قمة البرج على فتحة تهوية يمكن فتحها أو غلقها حسب الحاجة، ويكون الجزء السفلي من البرج متصلًا بكل طابق في المبنى. تدفئ الشمس الهواء في البرج، ونظرًا لأن الهواء الأدفأ يكون أخفَّ من الهواء البارد، يتحرَّك هذا الهواء الدافئ إلى أعلى البرج ويخرج من خلال فتحة التهوية، ويسحب الهواء إلى الداخل عبْر أيِّ نوافذ مفتوحة في المبنى. إذا صُمِّمَ المبنى والبرج بشكل صحيح، يمكن أن يكون هناك تدفُّق مستمر للهواء عبْر جميع الغرف المفتوحة في المبنى.

تُظهِر المباني التقليدية في إيران تكيُّفًا رائعًا مع البيئة هناك، وتتَّسم بكونها حارةً خلال النهار وباردةً خلال الليل. إن المباني متقاربةً بحيث يظلِّل كل واحد منها الآخر. يحتوي بعضها على «أبراج الرياح» التي تمتص الرياح؛ بحيث يمكن للرياح دفع الهواء

إلى أسفل البرج من خلال نفق تحت الأرض (حيث تُبَرِّدُ الأرض الهواء)، ثم إلى الطابق السفلي من المبنى. وإذا كانت المياه متوافرة، على جدران النفق الرطبة أو على شكل نافورة في الطابق السفلي، يُبَرَّدُ الهواء أكثر من خلال تبخُّر الماء. أي إن الطاقة الحرارية تُؤخَذ من الهواء أو النفق أو ماء النافورة لتُغيِّر الماء من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية.

تكون بعض المباني مقبَّبة بغطاء مفتوح في الأعلى، عندما تمر الرياح أمام الغطاء، فإنها تمتص الهواء الدافئ في الجزء الداخلي من قمة القبة وتحمله بعيدًا. يسمح ذلك بدخول الهواء البارد إلى المبنى على مستوى الأرض، أو (الأفضل من ذلك) على طول الأنفاق الواقعة تحت الأرض.

(٨٤) الدفء داخل الصوبات الزراعية والسيارات المغلقة

لماذا تكون الصوبة الزراعية دافئة نسبيًّا؟ هل تكون مصنوعةً من نوعٍ معيَّن من الزجاج الذي يحبس الإشعاع الحراري (الأشعة تحت الحمراء) بشكلٍ من الأشكال؟ لماذا تصبح السيارة المغلقة ساخنة من الداخل في حال تُركت معرَّضة لأشعة الشمس المباشرة في يومٍ حارٍّ؟

الجواب: السبب الرئيسي في أن الصوبة الزراعية تكون دافئةً هو أن كونها مغلقةً يقطع دوران الهواء أو يحدُّ بشدةٍ منه؛ ومِن ثَمَّ لا يُسمَح للهواء الدافئ بالارتفاع والخروج من الصوبة الزراعية ليحل محلَّه هواءٌ أبرد يتدفَّق بطول الأرض، كما لا يُسمَح للنسيم بأن يحل محل الهواء الدافئ الداخلي. (تقول إحدى الخرافات الشائعة إن السقف الزجاجي أو البلاستيكي للصوبة الزراعية يحبس الإشعاع الحراري بطريقةٍ أو بأخرى. لسوء الحظ، ولأنه غالبًا ما يُستخدَم مصطلح «تأثير الصوبة» لوصف عملية الاحتباس الحراري التي يُحبَسُ فيها الإشعاع الحراري بواسطة الغلاف الجوي للأرض، يُعَمَّم عادةً نفس المفهوم بطريق الخطأ على الصوبات الزراعية.)

تكون السيارات المغلقة المركونة في ضوء الشمس المباشر في يومٍ حارٍّ كالصوبة الزراعية. يمكن أن تصبح السيارة من الداخل ساخنة بشدة بسبب انعدام دوران الهواء. في الواقع، إذا دخلت أشعة الشمس من خلال الزجاج الأمامي للسيارة، يمكن أن تصبح لوحة عدَّادات السيارة وعجلة القيادة ساخنتَيْن بدرجة كافية لحرق الجلد. يمكن لإحداث دوران الهواء، عن طريق فتح نوافذ السيارة قليلًا أو فتح أبوابها، أن يخفض (ببطء) من درجة الحرارة. بما أن الطلاء الأسود يمتص الضوء المرئي بسهولةٍ أكبر من الطلاء الأبيض،

فقد تعتقد أن السيارة السوداء تكون أشد حرارة من السيارة البيضاء. ومع ذلك، ترجع عملية تسخين السيارة في المقام الأول إلى امتصاص الأشعة تحت الحمراء، وليس الضوء المرئي، وعلى الأرجح يمتص لونا الطلاء النطاق نفسه تقريبًا من الأشعة تحت الحمراء.

(٨٥) الجزر الحرارية

لماذا عادةً ما تكون درجة الحرارة في المناطق الحضرية، وخاصةً في وسط المدن، أدفأ من المناطق الريفية المحيطة بها؟ على سبيل المثال، قد يكون الطقس في المدينة حارًّا خانقًا خلال فصل الصيف، بينما يكون لطيفًا في الريف. هل تَنتُج هذه «الجزر الحرارية» الحضرية في المقام الأول من وجود تركيز أعلى للآلات المولِّدة للحرارة في المدن؟

قد تبدأ مظاهر قدوم الربيع في الظهور بشكلٍ ملحوظ في المدينة بسبب وجود الجزر الحرارية، وذلك بشكلٍ أسرع من الريف، وقد يتأخَّر قدوم الخريف وفقدان الأشجار لأوراقها، كما يمكن أن يكون الندى أندَر في المدينة منه في الريف.

الجواب: تسهم العديد من العوامل في تكوُّن الجزر الحرارية في المناطق الحضرية؛ مثل المباني الشاهقة التي تحجب وتعيد توجيه الرياح التي من شأنها أن تبرِّد المكان. نتيجةً للتبخر، يكون هناك فَقْد أقل للطاقة الحرارية؛ إذ تُصرَفُ الأمطار والثلوج عبْر نظام الصرف الصحي، كما يساعد استخدام الملح أيضًا على إزالة الثلوج من الطرق. أيضًا تميل مواد الرصف والبناء إلى امتصاص أشعة الشمس وتخزينها أكثر من المناطق العشبية أو المُشْجِرَة.

إذا كانت المباني بنفس الارتفاع تقريبًا وتبرد عن طريق بث حرارتها من الأسطح ليلًا، يمكن أن تتكوَّن طبقة من الهواء البارد على مستوى الأسطح. يمكن أن تُعيق هذه الطبقة صعود الهواء الدافئ من مستوى الشارع؛ ومِن ثَمَّ تحبس الطاقة الحرارية داخل المدينة. إذا كانت المدينة مغطاة بطبقة سميكة من الجسيمات التي يحملها الهواء (التلوث)، فيمكن أن يكون الوضع أسوأ؛ إذ يمكن أن يشعَّ السطح العلوي للطبقة حرارته نحو السماء، وهو ما يوفِّر مزيدًا من التبريد عند مستوى الأسطح. وعلى الرغم من أن درجة حرارة المدينة تهدأ إلى حدٍّ ما خلال الليل، فإنها لن تكون بنفس درجة برودة الريف.

في المناطق الحارة، كما هي الحال في جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية، يمكن أن يشكِّل امتصاصُ الأسطحِ أشعةَ الشمسِ خطرًا كبيرًا. على سبيل المثال، يمكن أن تصل حرارة الرصيف الأسفلتي بسهولة إلى ٧٠ درجة مئوية، وهو ما يتجاوز الدرجة التي

يمكن لأي سطح عندها أن يحرق الجلد حال ملامسته له، والبالغة ٤٤ درجة مئوية. إذا لمس أي شخص الرصيف، مثل ضحايا حادث مروري، فقد يعاني من حروق شديدة. بل وحتى الوقوف في موقف سيارات فارغ مغطًّى بالأسفلت يمكن أن يكون أمرًا صعبًا؛ نتيجة الأشعة تحت الحمراء الشديدة التي تَصدر من الأسفلت.

(٨٦) الديناميكا الحرارية للأربطة المطاطية

إذا قمتَ بشدِّ رباط مطاطي بسرعة ووضعتَه على شفتك العليا في هذه الأثناء، فلماذا يصبح الرباط المطاطي دافئًا بما يكفي لتصبح حرارته ملحوظة لشفتك؟ أَبْعِدِ الرباط المطاطي وهو لا يزال مشدودًا عن شفتك لبضع دقائق، ثم ضعه على شفتك مرةً أخرى واتركه لينكمش بسرعة. لماذا يصبح باردًا عند الانكماش؟

الجواب: يتكوَّن مطاط الرباط المطاطي من سلسلة من الجزيئات الطويلة الملفوفة بطريقة تشبه المكرونة الاسباجيتي، وبها العديد من الوصلات المتقاطعة. عندما تَشدُّ الرباط المطاطي، تتمدَّد هذه الجزيئات، ويؤثِّر جزء من حركة الشد هذه على الحركة الحرارية للجزيئات؛ ومِن ثَمَّ يرجع الدفء الذي تشعر به على شفتك إلى الحركة الحرارية المتزايدة. إذا تركتَ الرباط المطاطي ينكمش، فستبدأ الجزيئات في التحرك حتى تتكدس، وتأتي الطاقة اللازمة للقيام بهذه الحركة من الطاقة الحرارية للجزيئات؛ ومِن ثَمَّ يصبح الرباط المطاطي باردًا.

إذا دُفِّئ رباط مطاطي، فإن الطاقة الحرارية الإضافية للجزيئات تسمح للجزيئات بالالتفاف بشكل أقوى؛ ومِن ثَمَّ يقل طول الرباط المطاطي. إذا بُرِّدَ الرباط المطاطي، فإن فقدان الطاقة الحرارية يعني أن الجزيئات لن تتمكَّن من الالتفاف بعضها حول بعض بنفس درجة الإحكام السابقة؛ ومِن ثَمَّ يزداد طول الرباط المطاطي.

يمكن الاستفادة من حقيقة أن الرباط المطاطي ينكمش عند التسخين ويتمدَّد عند التبريد في آلةٍ من الآلات، حتى وإن كانت الآلة مستحدثة لهذا الغرض فحسب. تُثبَّت عجلة بحيث تدور حول محورها المركزي، يقابل محورٌ ثانٍ محور الدوران وتمتد الأربطة المطاطية من هذا المحور الثاني إلى المحيط الخارجي للعجلة. تعني مقابلة المحور الثاني لمحور الدوران أنَّ تمدُّد الأربطة المطاطية لا يكون متماثلًا حول العجلة؛ إذ تكون بعض الأربطة مشدودة أكثر من الأخرى. تُغمَر العجلة بعد ذلك إلى عمق نصف قطرها في حاوية من الماء الساخن. تتسبَّب الطاقة الحرارية الصادرة من الماء في انكماش الأربطة

المطاطية المغمورة، ثم يؤدِّي عدم تماثل الأربطة المطاطية إلى دوران العجلة ببطء. تبرد الأربطة المطاطية عند خروجها من الماء وتصبح أقل تمددًا، وعندما تُغمَر في الماء مجددًا، تنكمش مرةً أخرى.

(٨٧) رياح الفون أو رياح الشينوك

«فون» هو الاسم الشائع الذي يُطلَق على الرياح الجافة الدافئة التي تهبُّ أسفل المنحدرات الجبلية. رُصِدَ هذا النوع من الرياح في الأصل في جبال الألب؛ حيث يمكن لرياح الفون أن تهبَّ فجأةً وتُذيب المنحدرات الثلجية وتبخرها بصورة هائلة. في الولايات المتحدة، يُطلَق على هذا النوع من الرياح التي تهبُّ على المنحدرات الشرقية لجبال روكي اسم «رياح الشينوك»، نسبةً إلى قبيلة الشينوك. في مثال صارخ، رفعت رياح الشينوك، التي هبَّت على مناطق هارف بمونتانا، درجة الحرارة من سالب ١٢ إلى ٦ درجات مئوية (أو من ١١ درجة فهرنهايت إلى ٤٢ درجة فهرنهايت) في ثلاث دقائق تقريبًا. فما الذي يُسبِّب هبوب رياح الفون أو الشينوك؟

الجواب: رغم أن العديد من العوامل التي تسهم في تكوين هذه الرياح لم تُعرَف بالكامل بعدُ، فقد جرى تحديد بعضها. في حالة رياح الشينوك، يجفُّ الهواء أثناء تحرُّكه من المحيط الهادئ إلى جبال روكي ثم لأعلى على الجانب المواجه للرياح من جبال روكي، من خلال تكثيف معظم بخار مائه. يُطلِقُ هذا التغيُّر من الحالة السائلة إلى الحالة البخارية طاقةً؛ ومِن ثَمَّ يصبح الهواء أدفأ مما يكون عليه عادةً في حال عدم حدوث هذا التغيُّر. عندما يتحرَّك الهواء بعدئذٍ فوق جبال روكي وإلى أسفل نحو المنحدرات التي تقع عكس اتجاه الرياح، فإنه يزداد دفئًا؛ لأنه يتحرَّك نحو ضغوط أكبر على نحوٍ متزايد (قد تلاحظ حدوث نفس التأثير عند نفخ إطار درَّاجة هوائية). وهكذا، عندما يصل الهواء إلى قاعدة جبال روكي، يكون دافئًا وجافًّا نسبيًّا؛ ومِن ثَمَّ يمكن أن يُذيب أيَّ ثلج بسرعة ويُبَخِّرَهُ.

وصف أحد الباحثين كيف قاد سيارته من وادٍ بارد نحو ريح الشينوك التي كانت قد التقطت الرطوبة من خلال تبخير الثلوج. وفي غضون ثوانٍ من قيادة السيارة عكس اتجاه الرياح، غُطِّي زجاجه الأمامي البارد بالصقيع مع تَكَثُّف الرطوبة عليه من الرياح. لو كان يقود سيارته بنفس سرعة السير على الطريق السريع، لكان من الممكن أن يصير عجزه المفاجئ عن الرؤية من خلال الزجاج الأمامي أمرًا كارثيًّا.

(٨٨) تحدِّي رش الماء المغلي على الجسم

يتجلَّى أحد الأمثلة على «السحر» في تحدِّي رش الماء المغلي على الجسم، الذي يقوم به متَّبِعو ديانة الشنتو في اليابان. في هذا الاختبار يغمس أحد المؤدِّين حُزمتَيْن من أغصان الخيزران في الماء المغلي ويقذف بالماء المغلي في الهواء، فيُغرِق نفسه والنار المشتعلة أسفل قِدْرِ الماء المغلي. تتدفَّق سُحُب من البخار الكثيف من النار عندما يصطدم الماء بها، إلا أن المؤدِّي لا يتأذَّى. لماذا لا يحرق الماء المغلي ذلك المؤدِّي؟

الجواب: يتكون الماء الذي قُذِفَ في الهواء من العديد من القطرات الصغيرة التي تبرد سريعًا؛ لأنها تحمل كمية قليلة من الطاقة الحرارية التي يمكن نقلها بسرعة إلى أسطحها، ثم إلى الهواء العابر. قد تكون القطرات دافئةً عندما تسقط على المؤدِّي، إلا أنها لن تحرق الجلد. إذا قُذِفَت نفس الكمية من الماء في الهواء دفقةً واحدةً، فإنها ستفقد طاقةً أقل في الهواء؛ لأن مساحة سطحها تكون أقل من المساحة الكلية للقطرات المنفردة؛ لذا، عندما تسقط تكون أكثر حرارةً من القطرات المنفردة، ويمكن أن تحرق الجلد. (بلا شك، إذا صَبَّ المؤدِّي الماء المغلي على جلده، فلن يبرد الماء على الأرجح إطلاقًا قبل أن يسقط عليه، ومن المؤكد أنه سيحرق الجلد.)

(٨٩) الطاقة في الغُرف المُدَفَّأة

افترض أنك عُدتَ إلى مسكنك البارد بعد المشي على الثلج في يومٍ شتويٍّ بارد. أول ما يخطر ببالك هو إشعال الموقد، ولكن لماذا تفعل ذلك بالضبط؟ هل هذا لأن الموقد سيزيد من تخزين الطاقة الداخلية (الحرارية) للهواء في المسكن حتى يصبح لدى الهواء في النهاية ما يكفي من الطاقة الداخلية ليحافظ على دفئك؟ على الرغم من أن هذا المنطق يبدو مقنعًا، فإنه معيب؛ لأن مخزون الطاقة الداخلي للهواء لن يتغيَّر بإشعال الموقد. ولكن كيف ذلك؟ وإذا كان الأمر كذلك، فلماذا تهتم بإشعال الموقد من الأساس؟

الجواب: لا يكون المسكن غير مُنفِّذٍ للهواء (وفي الواقع لو كان كذلك لما كان آمنًا). مع زيادة الموقد لدرجة حرارة الهواء، تغادر جزيئات الهواء من خلال فتحات مختلفة؛ بحيث يظل الضغط داخل المسكن متناسبًا مع الضغط الجوي بالخارج. وعلى الرغم من أن الطاقات الحركية لباقي الجزيئات تزداد، فإن الطاقة الحركية «الكلية» لا تزداد بسبب وجود عدد «أقل» من الجزيئات داخل المسكن.

لماذا يكون المسكن أكثر راحةً عندما تكون درجة حرارته أعلى؟ عادةً ما تشعر بالبرودة؛ لأنك (١) تُصدِرُ الأشعة تحت الحمراء، و(٢) تتبادل الطاقة مع جزيئات الهواء التي تصطدم بجسمك. إذا قمتَ بزيادة درجة حرارة الغرفة بإشعال الموقد، فإنك بذلك (١) تزيد من كمية الأشعة تحت الحمراء التي تسقط على جسدك من أسطح المسكن (الجدران، السقف، الأرضية، الأثاث ... إلخ)، لتحل محل الطاقة التي تفقدها من خلال الأشعة تحت الحمراء، و(٢) تزيد الطاقة الحركية لجزيئات الهواء المتصادمة وتكتسب المزيد من الطاقة منها.

(٩٠) الاتجاه الذي يُوضع فيه مستودع تخزين الثلج

قبل اختراع الثلاجة، كان الناس في المناخات الشمالية القارسة يُخزِّنون ثلج الشتاء في مستودع لتخزين الثلوج؛ حتى يستخدموه في الصيف. إحدى الخصائص المطلوبة لإقامة مستودع جيد لتخزين الثلج هي الاتجاه الذي سيُقام عليه؛ إذ يُقال إن فتحته لا بد أن تواجه الشرق حتى تتدفَّق أشعة الشمس داخل المستودع بعد فترة وجيزة من شروق الشمس. ولكن ألا يبدو ذلك غير صحيحٍ؟ ألن تُسَخِّن أشعة الشمس المباشرة المستودع من الداخل؛ ومِن ثَمَّ تُذيبُ الثلج؟

الجواب: كان الهدف من تحديد اتجاه مستودع تخزين الثلج هو القضاء على تدفُّق الهواء المحمَّل بالرطوبة (أو على الأقل التقليل منه)؛ إذ إنه إذا دخل هذا الهواء إلى المستودع، فسيتكثَّف على الأسطح الباردة للثلج. كي يتكثَّف الماء لا بد أن يفقد كمية كبيرة من الطاقة الحرارية؛ بحيث يمكن لجزيئات الماء أن تستقر في حالة سائلة. وهذا الإطلاق للطاقة الحرارية إلى الثلج يُسرِّع من عملية ذوبانه.

لذلك، كانت خطة البناء تقضي بأن يدخل ضوء الشمس إلى المستودع خلال الفجر لتدفئة الهواء الداخلي وتقليل الرطوبة وفرصة حدوث التكثُّف. كانت مشكلة التكثُّف أسوأ خلال الليل على الأرجح، ولكن الشمس لا تُشرق ليلًا؛ لذا كان استخدام أشعة الشمس الصباحية أفضلَ حلٍّ ممكن.

(٩١) لعبة مقياس الإشعاع وعكس اتجاهها

اخترع ويليام كروكس مقياس الإشعاع في عام ١٨٧٢ لقياس الطاقة المنبعثة من مصدر الضوء، ولكنه أصبح في الوقت الحاضر لُعبة مستحدثة تُباع في متاجر العلوم. يتكوَّن

الجهاز من مصباح زجاجي محكَم الغلق ومفرَّغ جزئيًّا من الهواء، وبداخله أربع زعانف رأسية مثبَّتة على محور معدني يدور حول إبرة عمودية. تكون الزعانف بنفس ترتيب الألوان: بيضاء على أحد الجوانب، وسوداء على الجانب الآخر. عندما يُوضع الجهاز بالقرب من أحد مصادر الضوء، تدور الزعانف والمحور حول الإبرة العمودية، وتزداد سرعة دورانها عندما يكون الضوء أسطع. ما الذي يسبِّب هذا الدوران؟ وما اتجاهه؟ (هل يبدأ الجانب الأسود من الزعانف في الدوران أولًا، على سبيل المثال؟) وكيف يمكن عكس اتجاه الدوران؟

الجواب: غالبًا ما تُعزى الحركة إلى ضغط الضوء، إلا أن هذا التأثير يكون ضئيلًا جدًّا؛ بحيث لا يمكن ملاحظته في اللُّعبة، وبالإضافة إلى ذلك، فإنه قد يؤدِّي إلى دوران معاكس لما يُرى بالفعل. إليك السبب: الضوء يمكنه دفع أحد الأجسام، ويكون الدفع أكبر إذا انعكس الضوء من هذا الجسم. وهكذا، فإن الضوء الذي يسقط على الزعانف سيدفع الجوانب البيضاء أكثر من الجوانب السوداء، ويُفترض أن تقود الجوانب السوداء حركة الدوران. إذا كان المصباح مفرَّغًا من الهواء بالكامل تقريبًا، فسوف تدور الزعانف على هذا النسق بالفعل.

ومع ذلك، فإن الضغط على الزعانف يَرجع إلى الهواء المتبقي الذي يُحدث تأثيرًا أكبر «بكثير». يُصبح الجانب الأسود من الزعانف أدفأ من الجانب الأبيض؛ لأن الضوء (الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي) يُمتَصُّ أكثر على الجانب الأسود أكثر من الجانب الأبيض، ولأنه عندما تصطدم جزيئات الهواء المتبقية بإحدى الزعانف تقوم بدفعها فتتحرَّك. وكلما تحرَّك الجزيء بشكلٍ أسرع، زاد الضغط. تتحرَّك جزيئات الهواء على الجانب الأسود من الزعنفة بشكلٍ أسرع من تلك الموجودة على الجانب الأبيض بسبب اختلاف درجة الحرارة؛ ومِن ثَمَّ فإن الضغط الواقع على الجانب الأسود يكون أكبر من ذلك الواقع على الجانب الأبيض، وتدور الزعانف حول الإبرة الداعمة، ويقود الجانب الأبيض حركة الدوران. بعد فترة، يصل جانبا كلِّ زعنفة إلى درجة الحرارة عينها (يصلان إلى «التوازن الحراري»)، ويختفي تأثير الدفع وتتوقَّف الزعانف عن الدوران.

لعكس حركة الدوران، ضَعِ اللُّعبة في الثلاجة، سيفقد الجانب الأسود من كل زعنفة الطاقة الحرارية أسرع قليلًا من الجانب الأبيض عن طريق الأشعة تحت الحمراء؛ ومِن ثَمَّ تكون درجة حرارة الجانب الأبيض عندئذٍ أعلى، فينال دفعة أكبر من الهواء. مرةً أخرى، يستمر الدوران حتى يتم الوصول إلى التوازن الحراري.

(٩٢) آبار المياه والعواصف

عندما كانت جدتي صغيرة، كانت مياه الشرب تُضَخُّ يدويًّا من إحدى آبار المياه. وقد زعمتْ أنه أثناء الطقس العاصف، كانت عملية ضخ المياه أسهل، ولكن الماء كان به الكثير من المواد العالقة، فلم يكن آمنًا للشرب. يبدو أن هذا الأمر لم يكن يتأثَّر بهطول الأمطار، كما يبدو أن الآبار الارتوازية تكون حساسة للطقس، فتتدفَّق بحرية أكبر أثناء الطقس العاصف. ولكن مرةً أخرى، لا يعتمد الأمر على سقوط الأمطار، فما الذي يجعل الآبار تستجيب للعواصف؟

الجواب: على الرغم من أن مستوى المياه العام في البئر تحكمه الأمطار المحلية أو ذوبان الجليد، فإن التغيرات في الضغط الجوي يمكن أن تُحدِث تفاوتًا في مستوى المياه بعدة سنتيمترات. عندما ينخفض الضغط الجوي أثناء العاصفة، يرتفع مستوى البئر؛ ومِن ثَمَّ قد يؤدِّي تدفق المياه الزائدة إلى التقاطها رواسب كافية من الأرض تجعل الماء غير صالحٍ للشرب.

يمكن للهواء في أحد أنظمة الكهوف أيضًا أن يستجيب للتغيرات في الضغط الجوي؛ فعندما ينخفض هذا الضغط، يتدفَّق الهواء خارج الكهف، وعندما يزداد الضغط، يتدفَّق الهواء إلى داخل الكهف. تكون الحركة ملحوظة أكثر عند التدفق عبْر ممر ضيق؛ وذلك لأن سرعة الهواء تكون أكبر.

(٩٣) طيران الحشرات وسباحة الروبيان في شكل عمود يشبه عمود الدخان

لماذا تُشكِّل الحشرات (مثل البعوض والنمل الطائر) في بعض الأحيان شكل عمود فوق الأشجار؟ يمكن أن تتجمَّع «أعمدة الحشرات» هذه بكثافة حتى تشبه سحابة الدخان، كما لو أن الشجرة بها حريق صغير. في بعض الأحيان، تُشكِّل الحشرات تلك الأعمدة فوق البساتين وأبراج الكنائس. ذات مرة، سارع أحد أقسام الإطفاء لإخماد حريقٍ بكنيسة، ليكتشفوا أن هذا العمود المتجمِّع فوق البرج مجرد حشرات فحسب.

لماذا يُشكِّل الروبيان الذي يعيش في المياه المالحة الضحلة في بعض الأحيان عمودًا فوق صخرة تحت الماء معرَّضة لضوء الشمس؟ لماذا يرتفع العمود، الذي يمكن أن يكون كثيفًا جدًّا، من تلك الصخرة، ولكنه يميل بعيدًا عن اتجاه ضوء الشمس؟

الجواب: قد لا تبرد الأشجار بسرعةٍ في وقتٍ مبكر من المساء كما تبرد الأرض المحيطة؛ ومِن ثَمَّ قد يرتفع الهواء الدافئ منها. يبدو أن الحشرات تنجذب إلى ذلك الهواء الدافئ، وربما تنجذب أيضًا إلى الرطوبة التي قد تتكثَّف خارجةً منها عندما يبرد الهواء الصاعد.

يرتفع جمبري المياه المالحة في عمود حراري مماثل من الماء الذي يُسخِّنه ضوء الشمس. على الرغم من أنه يستمتع بالدفء، وربما المغذِّيات التي يمكن أن تحملها المياه الدافئة أيضًا، فإنه لا يحب أشعة الشمس؛ ولذلك يميل بعيدًا عن اتجاه ضوء الشمس كلما ارتفع. وبمجرد وصوله إلى سطح الماء، فإنه يسبح مرةً أخرى إلى القاع ويعاود الدخول في عمود الحَمل الحراري، ليصعد إلى الأعلى عن طريقه مرةً أخرى.

الفصل الخامس

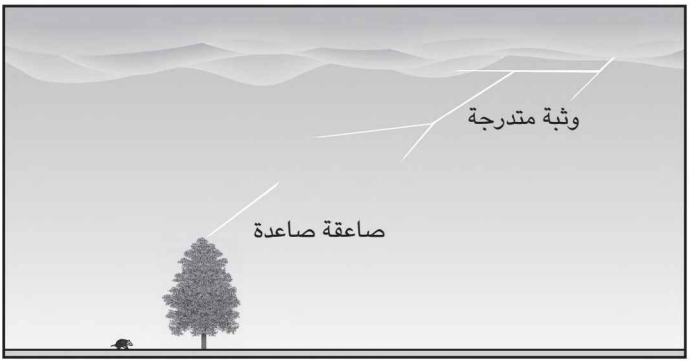
الكهرباء والمغناطيسية

(١) البرق

ما الذي يسبِّب البرق، ولماذا يَنتج عنه صوت وضوء؟ وحيث إن البرق يمكن رؤيته من مسافةٍ عظيمة، فهل البرق كبير؟

الجواب: البرق تفريغ لشحنةٍ كهربية (شرارة) كبيرةٍ جدًّا بين السُّحب والأرض. وعلى الرغم من أن تفاصيل التفريغ دُرست وقيست، فإن كلًّا من السبب الأساسي للشحنات في السُّحب، والحدث المسبِّب للبرق، ليسا مفهومَين تمامًا. أما التفسير المبدئي لوجود الشحنات، فهو أن التصادمات بين البَرَد والبلورات الثلجية الأصغر حجمًا تنقل إلكترونات إلى البَرَد، ثم تسقط الإلكترونات بعد ذلك إلى قاعدة السحابة. وبما أن الإلكترونات سالبة الشحنة، تصبح القاعدة مشحونة بشحنةٍ سالبة؛ ولأن قمة السحابة فقدت تلك الإلكترونات، فإنها تصبح مشحونة بشحنةٍ موجبة. غير أن كميةً ضئيلة من الشحنة الموجبة تبقى أيضًا في مكانٍ ما بالقرب من القاعدة.

بطبيعة الحال، تحتوي الأرض على كمٍّ هائل من الإلكترونات التي تستطيع التنقُّل، ولكن عندما تعلوها سحابةٌ مشحونة، فإن الشحنة السالبة في قاعدة السحابة تطرد هذه الإلكترونات. وبما أن الأرض تحت السحابة تفقد إلكترونات، فإنها تصبح مشحونة بشحنةٍ موجبة، ينتج عن هذه الشحنة وترتيب الشحنات في السحابة مجالٌ كهربيٌّ كبير بين الأرض والسحاب. وإذا تجاوز المجال قيمةً حرجةً معينة، يحدث تفريغٌ كهربي، يبدأ من قاعدة السحابة؛ حيث تقفز بعض الإلكترونات فجأةً نحو المقدار الضئيل من الشحنة الموجبة هناك.



شكل ٥-١: بند ٥-١.

تبدأ «وثبة متدرجة» حينئذٍ في شقٍّ طريقها نحو الأرض، مؤيِّنةً الذرات (بإزالة الإلكترونات الخارجية) وجالبة بعض الشحنات السالبة من السحابة إلى الأرض. هذا التسلل أضألُ كثيرًا من أن تراه، ويحدث على مسافة ٥٠ مترًا في المرة الواحدة (لذا سُمِّي «متدرجًا»)، مع العديد من التشعُّبات المتَّجهة إلى أسفل. وعلى الرغم من أن البرق عادةً ما يبدو عموديًّا بالنسبة إلى الناظر إليه من الأرض، فإن مساره أفقي بالدرجة الأولى. فقط عندما يقترب المسار من الأرض، يبدو البرق وكأنه «يلاحظ» الأجسام، مثل شجرة عالية على الأرض.

تنشأ قنوات من الذرات المتأيِّنة من تلك الأجسام، باتجاه الأعلى، وحينما يتصادف أن تلتقي واحدة من هذه «الصواعق الصاعدة» بوثبةٍ متدرجة هابطة، تكمل «مسارًا موصِّلًا» بين الأرض والسحاب؛ فإن المجال الكهربي على امتداد المسار يعمل على تسريع الإلكترونات القريبة من الأرض، باتجاه الأسفل. هذا التفريغ للإلكترونات إلى الأرض، المُسمَّى «الصاعقة العكسية»، يستمر بتسارعٍ على امتداد المسار الموصِّل، حتى الوصول إلى قاعدة السحابة. ولأن الإلكترونات يتم تسريعها، فإنها تتصادم بقوةٍ مع جزيئات الهواء على امتداد المسار؛ مما يؤدي إلى ضرب الإلكترونات، ورفع درجة حرارة الجزيئات بقدْرٍ كبير. وبفعل الحرارة، يتمدَّد الهواء بسرعةٍ كبيرة، مُنتجًا موجةً صدمية، هي «ضربة» الرعد. وحالما تعود الإلكترونات الحرة للاتحاد مع جزيئات الهواء، ينتج ضوء البرق

الساطع. وعلى الرغم من أن البرق يمكن أن يكون ساطعًا وقويًّا، فإن المسار الموصِّل الذي تحدث هذه العملية كلها على امتداده يقلُّ قُطره عن سنتيمتر واحد على الأرجح.

وبمجرد نشوء المسار الموصِّل، يمكن للسحابة أن تُرسِل إلى الأسفل نبضاتٍ عدة من الإلكترونات، بينما يتحرك المزيد من الإلكترونات من سائر السحابة إلى أعلى نقطة في المسار. لربما ترى تلك النبضات المتعددة على هيئة ضربة برق وامضة. وإذا عصفت ريحٌ قوية بجانبَي المسار في أثناء النبضات المتعددة، فلربما ترى «شريطًا» ساطعًا من البرق، لا ضربةً واحدة.

تتضمن معظم البروق وثباتٍ متدرجةً متجهة إلى أسفل، ونقلًا للإلكترونات من السحابة إلى الأرض. ومع ذلك، فإن الوثبة المتدرجة المتَّجهة إلى أسفل يمكن أيضًا أن تبدأ في السحابة من المنطقة الأعلى المشحونة بشحنةٍ موجبة، ثم يتم نقل الإلكترونات بعد ذلك من الأرض إلى السحابة. ويمكن كذلك أن تبدأ الوثبة المتدرجة من الأرض، أو على الأغلب، من المنشآت العالية، مثل ناطحات السحاب، وتمضي متَّجهة إلى أعلى. وستقوم هذه الوثبة المتدرِّجة المتجهة إلى الجزء السفلي من السحابة بنقل الإلكترونات إليها. ويمكنك التعرُّف على بروق الوثبة المتدرجة المتجهة إلى أعلى، من واقع أنها تتفرع باتجاه الأعلى. أما البرق العنكبوتي، ذلك العرض الضوئي الجميل المنتشر والمتحرك ببطء، الذي يزيِّن أسفل السُّحب العاصفة، فعادةً ما يكون تفريغًا للشحنات بين سحابةٍ وأخرى في المراحل الأخيرة من العاصفة.

(٢) البرق: الناس والأبقار والخراف

لماذا تكون ضربة البرق مميتة في العادة؟ لماذا تتمزَّق ملابس ضحية البرق وحذاؤه عنه؟ إذا علِقَ شخص في الخارج خلال عاصفةٍ برقية، فما الذي يمكنه فعله للتقليل من الخطر؟ على سبيل المثال، هل على المرء أن يختبئ تحت شجرة أم عليه أن يقف في حقل مفتوح؟ هل يقف ملازمًا مكانه، أم ينحني، أم يركض؟ لماذا قد يقف شَعر المرء، وهل هذه علامة على الخطر؟

كيف يمكن أن يهدِّد خطر البرق مجموعاتٍ من الناس، مثل اللاعبين في الملعب خلال مباراة للبيسبول؟ على أي حال، يمكن أن يضرب البرق واحدًا فقط من اللاعبين، ولكن في بعض الأحيان، قد يُصعَق اللاعبون كلهم.

في العاصفة البرقية، لماذا تكون الأبقار والجياد والخراف في العادة أكثر عُرضة للخطر من البشر؟

وفقًا لقصصٍ متواترة، فإن بنجامين فرانكلين، العالم ورجل الدولة الأمريكي الشهير، أطلق طائرةً ورقية إبَّان اقتراب إحدى العواصف الرعدية لكي يبرهن على الخواص الكهربية لمثل تلك العواصف. فلماذا لم يقتله البرق؟

الجواب: قد يتعرض المرء للإصابة أو يلقى مصرعه تأثرًا بالبرق، بطُرقٍ خمسٍ رئيسية:

(١) الطريقة الأكثر بديهية، هي من خلال ضربة البرق المباشرة، التي يمكن أن تُرسِل كميةً كبيرة من التيار الكهربي (الإلكترونات المتحركة) عبْر الصدر، متسبِّبة في إيقاف القلب، وشلِّ حركة العضلات اللازمة للتنفس، وإحداث حروقٍ داخلية. وإذا كانت الضحية مبتلَّة بشدة، فحينئذٍ قد يظل قدْرٌ كبير من التيار خارج الجسم؛ ومِن ثَمَّ قد لا تكون ضربة البرق مُهلِكة.

(٢) قد تحدث الإصابة أيضًا إذا كان المرء على تماسٍّ مع جسمٍ جامد ضَرَبه البرق، سيارة مثلًا؛ حينها ينتقل بعض التيار الكهربي إلى الشخص.

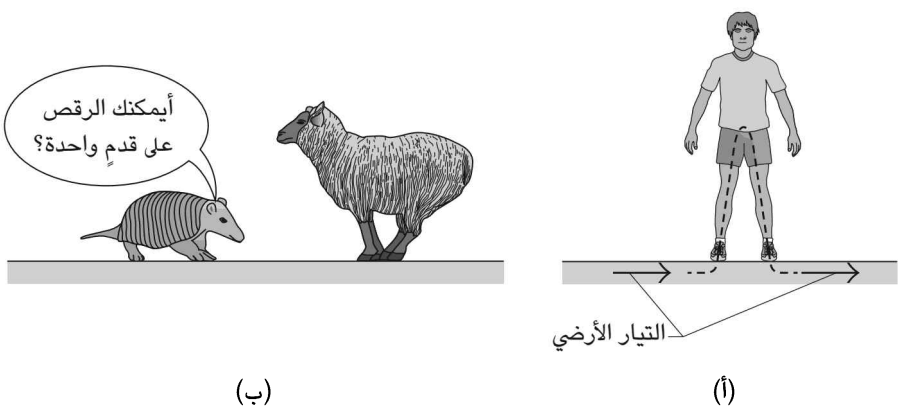
(٣) يمكن كذلك أن يتعرض المرء للأذى في أثناء وقوفه بالقرب من جسمٍ ما ضَرَبه البرق، شجرة مثلًا. وقد يقفز جزء من التيار الكهربي إلى الضحية عبْر الهواء، فيما يُعرَف بـ «الوميض الجانبي». وإذا كانت الضحية محظوظة، فقد يكون التيار ضئيلًا جدًّا بما لا يُسبِّب الوفاة.

(٤) ثمَّة طريقة أكثر تعقيدًا تؤدِّي إلى الإصابة أو الوفاة، وتكمن في «التيار الأرضي»؛ أي تيار البرق المار بالأرض. إذا كانت الضحية واقفةً وإحدى قدميها أقرب إلى مكان الضربة من الأخرى، يمكن للتيار الأرضي أن يصعد مارًّا بإحدى الساقَين، ويهبط عبْر الأخرى (شكل ٥-٢أ). وإذا كانت كمية التيار قليلة كفاية، فربما تتعرَّض الضحية للشلل بصورةٍ مؤقتة فقط. يمكن للتيار الأرضي أن يصعق مجموعةً من الناس، مثل اللاعبين في مباراة للبيسبول.

(٥) أما الطريقة الخامسة فهي الأكثر تعقيدًا. فكما شُرح فيما تقدَّم، فإن الوثبة المتدرِّجة التي تشقُّ طريقها مُتسلِّلة نزولًا من السحابة، في البروق الشائعة، يقابلها صاعقةٌ صاعدةٌ قصيرة، يخضع فيها الهواء للتأيُّن. وحالما يتم الاتصال، يحدث التفريغ الكامل لقدْرٍ كبير من التيار. تحدث أيضًا صواعقُ صاعدةٌ أخرى دون أن تتصل مع الوثبة المتدرجة. وعلى الرغم من أن تيار البرق الكامل لن يسري في تلك الصواعق الصاعدة ذات

النهايات المسدودة، فإنها مع ذلك قنوات تُنتزع فيها الإلكترونات من جزيئات الهواء. وإذا سرت صاعقة كهذه عبْر شخصٍ ما، فربما يكون تدفُّق الإلكترونات خلاله مُميتًا.

في بعض الأحيان تكون الحروق على جلد الشخص «شجرية» (تشبه السرخس في تشعُّبها، وهو نمط يُعرف بـ «نمط ليشتنبرج»)؛ لأن التيار ينتشر إلى الخارج على سطح الجلد، من نقطة بدايةٍ معينة. (أي شخص ذي مخيِّلة خصبة ربما يتخيَّل النمط على أنه صورة فوتوغرافية لزهرة أو منظرٍ طبيعي أو قائدٍ ديني مفضَّل، لكن البرق لا يصنع صورًا فوتوغرافية، ولا يرسم تصاوير دينية.) إذا كان المرء يرتدي شيئًا معدنيًّا، ولو حتى حمالة صدر مدعومة بسلكٍ معدني، فإن درجة حرارة المعدن قد ترتفع بما يكفي لحرق الضحية. وإذا كان حذاء الشخص وملابسه مبتلَّة جدًّا، فلربما تُنتزع عنه وتطير، حالما يسخن التيار الماء مُسبِّبًا تحوُّله السريع إلى بخار، مع زيادةٍ هائلة في الحجم.



شكل ٥-٢: بند ٥-٢: (أ) يستطيع تيارٌ أرضي من ضربة برقٍ أن يَمرُق عبْر الجسد بسبب تباعُد الرِّجلَين. (ب) خروف يحمي نفسه من التيار الأرضي.

إن النصيحة المُثلى لشخصٍ عالق في الخارج خلال عاصفة هي أن يتحرك بعيدًا عن الأشجار والمباني العالية الأخرى الموصلة للكهرباء، والتي قد يستهدفها البرق. حاول أن تجد واديًا أو منطقةً منخفضة أخرى، وأن تخفض رأسك لئلا يطاله البرق، وأن تنحني

وتضم ساقيك إحداهما إلى الأخرى، لتُقلِّل احتمالية انتقال التيار الأرضي عبْر الجسم. ربما يكون الركض خيارًا جيدًا، حتى لو تُرك الرأس مرتفعًا؛ وذلك لوجود قدم واحدة فقط على الأرض في كل حركة. في العادة تكون الأبقار والجياد والخراف أكثر عرضةً من البشر لخطر التيار الأرضي لأن قوائمها الأمامية منفصلة بقدْر كبير عن قوائمها الخلفية؛ مما قد ينتج عنه كمية أكبر من التيار الأرضي الساري عبْر الجسم. يستطيع البشر أن يقفوا بقدمين مضمومتين، لكن الخراف لا تستطيع ذلك (شكل ٥-٢ب).

عندما يصعق البرق أحدهم، فإن القلب غالبًا ما يعود إلى العمل من جديد بصورةٍ آلية، لكن الرئتين لا تعودان بعد توقفهما؛ لذا فإن جعل الضحية تتنفس مجددًا، عن طريق الإنعاش فمًا لفم، يُعدُّ ذا أهميةٍ بالغة. وثَمَّةَ حاجة إلى استخدام جهاز مزيل للرجفان إذا فشل القلب في العودة إلى العمل، أو إذا كان في حالة اختلاج.

ويمكن أن يصل البرق أحيانًا إلى ضحيته داخل أحد المنازل، بحيث يدخل عبْر هوائي تلفاز خارجي (وأرضي، لكن ليس هوائي «آذان الأرنب» الذي يكون أعلى جهاز التلفاز)، أو خط الهاتف (ولكن ليس الهاتف المحمول ولا الهاتف الموصَّل بألياف ضوئية)، أو أنابيب المياه، أو الأسلاك الكهربية المنزلية. بصفةٍ عامة، في أثناء العاصفة البرقية، العب مباراة ورق هادئة، أو تحدَّث مع أحدهم على هاتفك المحمول، وأجِّل الاستحمام لما بعد العاصفة.

وثَمَّةَ نقطةٌ أخرى متعلقة بالسلامة: أكثر أوقات حدوث البرق هي عند بدء هبوب العاصفة، لكنه قد يستمر في الحدوث في نهايتها، ومن حينٍ لآخر يخرج الأشخاص الأقل حذرًا من مخابئهم في وقتٍ مبكر أكثر مما ينبغي، ويهلكهم البرق.

إذا وقف شعر المرء، فإن المجال الكهربي بين الأرض والسُّحُب قويٌّ جدًّا، وربما يضرب البرق في أي لحظة؛ ولذلك، فعلى هذا الشخص أن يختبئ على الفور. (وبالطبع ليس هذا وقتًا مناسبًا لالتقاط صورة للشعر المضحك. اهرب! اختبئ!) في الترتيب العادي للشحنات؛ حيث تكون قاعدة السحابة مشحونة بشحنةٍ سالبة، والأرض مشحونة بشحنةٍ موجبة، تصبح خصلات الشعر كلها مشحونة بقوة بشحنةٍ موجبة؛ ولذا ينافر بعضها بعضًا، وتحاول أن تتحرك مبتعدة بعضها عن بعض بأقصى قدْر ممكن، حتى لو توجَّب عليها أن تتحرك إلى أعلى، عكس قوة الجاذبية التي تخضع لها.

ووفقًا لقصص لم يتم التحقُّق منها رواها صيادون، فإن سُحُب العاصفة قد تتسبَّب في جعل سنانير الصيد ترفرف فوق الماء مباشرةً بعد إلقائها. وإذا كانت القصص

صحيحة، فلا بد أن كلًّا من السنارة وسطح الماء مشحونان بنوع الشحنة نفسه. قد تكون المياه مشحونة بسبب السُّحب التي تعلوها، وقد تكون السنارة مشحونة للسبب نفسه، أو بسبب أنها اكتسبت الشحنة حينما سُحبت بَكَرتها في أثناء إلقائها.

لم يَمُت بينجامين فرانكلين خلال تجربة الطائرة الورقية، لأنه لم يَقم بالتجربة قطُّ. فلن يُطيِّر طائرةً ورقية إبَّان اقتراب عاصفة إلا شخص لديه قدرةٌ متدنية للغاية للحكم على الأمور؛ وفرانكلين كان شخصًا متوقِّد الذكاء، لكنه على الرغم من ذلك أعطى الانطباع بأنه نفَّذ تجربة الطائرة الورقية.

(٣) البرق: المَرْكبات

لماذا يكون المرء في مأمنٍ من البرق عادةً وهو داخل السيارة؟ ولماذا لا تكون الطائرة في مأمنٍ من البرق على الأرجح؟

الجواب: تُعَد السيارة مكانًا جيدًا جدًّا للاختباء من البرق؛ لأن جسم السيارة يوصِّل الكهرباء؛ ولذلك، فإذا ضرب البرق السيارة، فإن التيار سيبقى على الأرجح في الجسم الخارجي لها. لكن السيارة المكشوفة (مع سقف غير موصِّل للكهرباء) تُوفِّر حمايةً منخفضة، وربما لا تُوفِّر السيارة ذات الهيكل البلاستيكي أي حماية. يجب على الشخص الذي يستقلُّ سيارةً في أثناء عاصفةٍ برقية تجنُّب لمس الهيكل الخارجي للسيارة، أو أي شيءٍ متصل بهوائيٍّ خارجي. وقد يكون من المفيد إبقاء النوافذ مغلقة؛ لأنها مغطاة بماء المطر (وهو موصِّل للكهرباء). في العادة، يكون للسيارة أربعة إطارات ضعيفة التوصيل للكهرباء، ولكن هذه الإطارات لا تعطي ضمانة ضد تعرُّض السيارة لضربة البرق التي وثبت لعدة كيلومترات في هواءٍ ضعيف التوصيل للكهرباء.

وبسبب أن الطائرة مصنوعة من المعدن، فإنها هي الأخرى توفِّر حماية لمستقلِّيها، غير أن الطائرات المصنوعة من موادَّ غير مُوصِّلة، تشبه نوعًا ما السيارة المكشوفة، وتُوفِّر حمايةً أقل.

بالطبع حين تطير الطائرة فإنها تكون أكثر عُرضةً للخطر من السيارة؛ لأن المعدات الإلكترونية الحساسة اللازمة للطيران قد تتضرَّر أو يُدمِّرها التيار الكهربي المباشر، أو المجال الكهرومغناطيسي الذي يصنعه البرق بصورةٍ لحظية. وإذا وصل التيار إلى خزانات الوقود، إما بصورةٍ مباشرة وإما عبْر تيار من الوقود غير المحترق المقذوف من أحد المحركات، فحينئذٍ قد تنفجر الخزانات.

حينما تكون الطائرة جزءًا من المسار الموصِّل لعاصفةٍ برقية، فإن المسار الذي يسلكه التيار عبْر الطائرة، يعتمد عادةً على الموضع الذي تضربه الصاعقة بصورةٍ أساسية. فإذا أصابت الضربة مقدمة الطائرة، فستسري الصاعقة على الأرجح عبْر الطائرة، وتخرج من المؤخرة. أما إذا كانت الضربة قريبة من المؤخرة، فحينئذٍ يكون المخرج على الأرجح قريبًا منها.

ويمكن للطائرة أيضًا أن تستهل عملية التفريغ الكهربي البرقية، حتى في السُّحب التي ليس فيها بروقٌ أخرى. ولجميع هذه الأسباب، وبسبب الاضطرابِ الحادِّ الذي يحدث في العاصفة، فإن الطيارين يتجنَّبون العواصف الكهربية، وأي نظام سحابي يُحتمل أن تستهلَّ فيه الطائرة عملية البرق. ومع ذلك، فمعظم الطائرات التجارية، يضربها البرق في النهاية.

(٤) البرق: الأشجار والأبراج والأرض

لماذا يمكن أن ينسف البرقُ شجرةً أو أن يتسبَّب في اندلاع النيران؟ كيف يمكن للمباني العالية أن تتفادى أضرار البرق؟ كيف للبرق أن يحفر خندقًا أو يُنتج تكويناتٍ رملية (تشبه المنحوتات) تُسمَّى «عيدان الصواعق»؟

الجواب: عندما يضرب البرق شجرة، يمكن أن يترك فيها علامة، أو ينسف قطعًا من اللِّحاء، أو الشجرة كلها، أو أن يُضرِم فيها النار، أو ألَّا يفعل بها شيئًا. يعتمد الضرر على درجة رطوبة اللحاء، وما إذا كان البرق ينفذ إلى النُّسغ أم لا. وإذا نفذ تيارٌ كافٍ إلى النسغ، فإن النسغ قد يتبخَّر بسرعةٍ كبيرة، بحيث يفجِّر تمدُّدُه الشجرة. إن التمدُّد السريع لمياه المطر تحت طبقة من اللحاء قد يفجِّر اللحاء، أو يصنع شرخًا فيه. لا تتسبب معظم ضربات البرق للأشجار في إشعال النار فيها، ربما لأن التيار يكون خفيفًا جدًّا بحيث لا يُسَخَّن اللحاء بما يكفي لاشتعاله، ولكن تسبب الضربات المتعددة اشتعال النار (وهكذا تحدث حرائق الغابات)؛ لأنها تدوم لثانية واحدة؛ ومِن ثَمَّ تُسَخِّن الشجرة إلى حدٍّ كبير.

وقد يبدأ البرق من مبنًى عالٍ إذا أرسل المبنى وثبةً متدرجة إلى سحابةٍ معلَّقة أعلاه. يُحمَل التيار الموجود في الضربة، عبْر مانعات الصواعق المثبتة على المبنى، أو عبْر الهيكل المعدني الخارجي للمبنى. حينما يضرب البرق مبنًى — مثل كنيسة ذات برجٍ بارز — دون حماية من مانعة الصواعق، يمكن للتيار أن يُفجِّر المناطق الرطبة، كما في حالة الشجرة، ويمكن للنار أن تشتعل في الخشب إذا سرى التيار الكهربي لمدةٍ طويلة بما يكفي.

عندما يضرب البرق أرضيةً مبتلة، فإنه يُبخِّر المياه بسرعةٍ كبيرة؛ مما يلقي بالتراب إلى جانبٍ واحد، صانعًا خندقًا. كما أن انفجار الهواء الناتج عن التسخين المفاجئ له بسبب ضربة البرق يمكن أن يحفر الأرض.

عندما يضرب البرق رمال الكوارتز، يمكن للتيار أن يرفع درجة حرارة الرمال فوق نقطة الانصهار. سرعان ما تبرد الرمال، مُشكِّلة تكوينًا أسطوانيًّا متماسكًا ورفيعًا، بامتداد المسار الملتوي الذي اتخذه التيار عبْر الرمال، ويُدعى التكوين الناتج من الرمال المنصهرة «عود الصاعقة»، وهو ذو قيمةٍ كبيرة عند استخراجه سليمًا من أحد الشواطئ.

(٥) البرق الخرزي والكروي

ما الذي يصنع الكرات المضيئة التي تُرى أحيانًا (ويتم تصويرها) في العواصف الكهربية؟ إن «البرق الخرزي» عبارة عن سلسلة من الكُرات الساطعة، أو بقع الضوء الممدودة بعض الشيء، التي يخلِّفها في السماء شعاع من البرق. أما «البرق الكروي» فهو كرةٌ مضيئة أكثر غموضًا، يبلغ قطرها حوالي ٢٠ سنتيمترًا، وتطفو فوق الأرض لعدة ثوانٍ. يختفي بعضها بهدوء، ويُحدِث بعضها الآخر فرقعةً انفجارية عند اختفائه. هناك تقارير تفيد بأن البرق الكروي يستطيع النفاذ خلال الزجاج (من أحد جانبيه إلى الآخر) دون الإضرار بالزجاج. لطالما شُوهد هذا البرق الكروي ينزلق بين خطوط الكهرباء، وعبْر الطوابق الداخلية (من مقبس حائط إلى آخر). كما شُوهد يطفو في ممرات الطائرات، من أحد الأطراف إلى الآخر (ما يجعل الإقبال على مقاعد الممر، بالتأكيد، أقل من غيرها). حينما تلمس كرة البرق شخصًا ما، فقد يُصعَق الشخص، أو يسقط أرضًا، أو يُصاب بحروق، أو بضررٍ عقلي؛ لذا إذا رأيت برقًا كرويًّا فابتعد عنه.

الجواب: ليس هناك تفسيرٌ متفَق عليه للبرق الخرزي؛ إذ يُحتمل أن تكون الخرزات هي المناطق التي تظل حارة؛ ومِن ثَمَّ مضيئة، بعدما يبرد باقي مسار البرق بما يكفي بحيث لا يظل مضيئًا، وربما تكون النقاط الساخنة المتبقية هي النقاط التي التوى المسار عندها.

ليس هناك تفسير متفَق عليه للبرق الكروي. في الواقع، هناك العديد من النظريات، لكن لا واحدة منها تستطيع التنبؤ بالخواص المرصودة للبرق الكروي، وبخاصة عمره الزمني. هناك نوعٌ مشابه من الكرات المضيئة، يُسمَّى «كرة البلازما» يمكن إنتاجه في المعمل أو في محطة للطاقة، عندما يحدث تفريغٌ كهربيٌّ قوي. خلال التفريغ، تكون

جزيئات الهواء متأيِّنة؛ بعبارة أخرى، فإن الإلكترونات تكون منزوعة من الجزيئات؛ لذا تكون المنطقة محتوية على شحناتٍ سالبة وأخرى موجبة. ستدوم تلك الحالة (البلازما) لأقل من ثانية، قبل أن تعود الإلكترونات والجزيئات المتأيِّنة للاتحاد.

وعلى الرغم من أن هذا العمر الزمني أقلُّ كثيرًا من العمر المنسوب للبرق الكروي ومقداره عدة ثوانٍ، فإن التفسير الأكثر استقرارًا للبرق الكروي، هو أنه كرة بلازما ناتجة عن ضربة برق مباشرة، أو صاعقة صاعدة. فمن المحتمل أن يؤين التفريغ الكهربائي الهواء أو المواد (الأرض، أو مانعة الصواعق، أو غير ذلك) في الطرف الأدنى من الضربة أو الصاعقة. ومع ذلك، إذا أنتج البرق كرة بلازما، فيجب أن يكون لدى الكرة طبيعةٌ فريدة؛ لتدوم لعدة ثوانٍ، بدلًا من الانهيار بسرعة. وبالإضافة إلى ذلك، يجب ألا تكون حارةً جدًّا؛ لأن الكرة لا ترتفع لأعلى مثلما يرتفع الهواء الساخن. وكذلك لا يمكنها ببساطة أن تكون مثل نار القديس إلمو؛ ذلك التفريغ المرئي الذي يحدث عند رءوس المواد الموصلة؛ لأن البرق الكروي يتحرك، في حين أن نار القديس إلمو لا تتحرك. حتى الآن، ليس لدينا نموذجٌ مقنع لبنية البرق الكروي.

(٦) عفاريت البرق

لعقود من الزمن، كان الطيارون الذين يُحلِّقون في أثناء الليل على مقربة من عواصف رعدية، يُبلِغون من آنٍ لآخر عن رؤية ومضاتٍ ضخمة، تعلو سُحُب العاصفة بكثير، مباشرةً بعد رؤية البرق أسفل السحاب. ومع ذلك، كانت الومضات العالية الارتفاع سريعة وخافتة للغاية، إلى حد أن معظم الطيارين ظنوها مجرد هلاوس. ثم في التسعينيات من القرن العشرين، صُوِّرت الومضات بالفيديو، وسُمِّيت «العفاريت». فإذا كانت العفاريت مرتبطة بالبرق الذي يحدث بين الأرض والسحب، فلماذا لا تظهر إلا أعلى السُّحُب على ارتفاعٍ كبير، وليس فوقها مباشرة؟

الجواب: إننا لا نفهم عفاريت البرق جيدًا، لكننا نعتقد أنها تنتج حينما يحدث برقٌ قوي على نحوٍ خاص، بين سُحُب العاصفة والأرض، وبالتحديد حينما ينقل البرق كميةً هائلة من الشحنات السالبة من الأرض إلى السُّحُب. وبعد هذا الانتقال مباشرة، تكتسب الأرض الواقعة تحت السُّحب توزيعًا معقَّدًا من الشحنات الموجبة. تَصنع الشحناتُ السالبة في السُّحب، والموجبة على الأرض، مجالًا كهربيًّا فوق السُّحب، وبين السُّحب والأرض.

يعمل هذا المجال على تأيين الذرات والجزيئات في الهواء، بعبارةٍ أخرى، ينزع منها إلكترونات. ومع ذلك فإن عملية التأيين يمكن أن تحدث فقط إذا تجاوز المجال الكهربي قيمة حرجة معينة، وتلك القيمة تعتمد على كثافة الهواء. فوق السحاب مباشرة، يكون المجال الكهربي قويًّا، لكن كثافة الهواء كبيرة جدًّا بما لا يسمح بتأيُّنه. أما على ارتفاعٍ أعلى فوق السحابة، فإن المجال يكون أضعف إلى حدٍّ ما، لكن كثافة الهواء تكون أقل إلى حدٍّ كبير، ويحدث التأين؛ لذا فعلى الارتفاعات الأعلى، لا يحرر المجال الكهربي الإلكترونات من الجزيئات فحسب، بل إنه أيضًا يُسرِّعها لتصطدم حينئذٍ بجزيئاتٍ أخرى، أهمها النيتروجين، مما يجعل الذرات تشعُّ ضوءًا. ووفقًا لبعض الباحثين، فإن عفريت البرق هو مجموعة انبعاثاتٍ ضوئية من الجزيئات المشاركة في مثل هذه الاصطدامات. غير أن الآلية الكاملة لعفريت البرق يرجح أن تكون أكثر تعقيدًا من نموذج التصادم هذا. وبالإضافة إلى ذلك، فإن على الباحثين أن يفسِّروا الأشكال المختلفة للعفاريت، وكذلك «الجن»، وهي عبارة عن بِنًى حلقيةِ الشكل، تتمدد بعيدًا عن عفاريت البرق.

(٧) مانعات الصواعق

أحقًّا تحمي مانعة الصواعق المبنى من ضربة البرق، ولو كان الأمر كذلك، فكيف توفِّر مثل هذه الحماية؟ وهل تزيد المانعة احتمالات أن تضرب صاعقةٌ المبنى؟ وهل يجب أن يكون الطرف العلوي للمانعة حادًّا أم غير حاد؟

الجواب: يتمثل الغرض الأساسي من مانعة الصواعق، في إعطاء البرق مسارًا سهلًا إلى الأرض، في حال اقتربت الوثبة المتدرجة للصاعقة من المبنى؛ ومِن ثَمَّ، فلكي تؤدِّي مانعة الصواعق عملها، فلا بد أن تكون متَّصلة بالمنطقة الرطبة الموصِّلة للكهرباء، تحت سطح الأرض. وليس للمانعة تأثير على المنطقة التي تنطلق منها الوثبة المتدرجة، عبْر قاعدة السحابة، وفي الحقيقة، ليس لها تأثير، إلى أن تهبط الوثبة المتدرجة مقتربة من الأرض، وحينها فقط تنطلق صاعقة صاعدة (يحدث التأيُّن على امتدادها) من مانعة الصواعق، لتلتقي بالوثبة. يكمل اللقاء مسارًا مشحونًا ومتأينًا، بين الأرض وقاعدة السحاب. ويُؤمل حينئذٍ ألا يدخل التيار الناتج عن التفريغ إلى المبنى أو إلى حوائطه؛ حيث قد يصعق شاغلي المبنى، أو يتسبب في اشتعال النار.

لكي تقوم مانعة الصواعق بعملها، يجب أن تمتد فوق النقطة الأعلى في المبنى. وكقاعدة عامة، فإنها حينئذٍ توفر حماية في منطقةٍ تُشبه مخروطًا مقلوبًا، رأسه هو رأس

مانعة الصواعق، وأي وثبةٍ متدرجة تأتي ضمن هذا المخروط التخيُّلي، يُفترض بها أن تضرب مانعة الصواعق، بدلًا من المبنى.

في الماضي، اعتقد الناس أن الطرف العلوي لمانعة الصواعق يجب أن يكون حادًّا ليجتذب البرق، ويستند هذا الاعتقاد إلى حقيقة أن الحافة الحادة تصنع مجالًا كهربيًّا أقوى مما تصنعه الحافة غير الحادة. وحيث إن المجال الكهربي القوي قد يزيد احتمالية صعود الصاعقة الصاعدة، للالتقاء بالوثبة المتدرجة، فربما نستنتج أن الحافة الحادة مرغوب فيها. ومع ذلك، فإن الحجة المقابلة، تقول إن الحافة الحادة، تزيد من تأيُّن جزيئات الهواء حول مانعة الصواعق؛ مما يُقلِّل من فرص تكوُّن الصاعقة الصاعدة.

من الصعب إجراء التجارب على مانعات الصواعق؛ لأن الترتيبات المعملية لن تكون مطابقة أبدًا للترتيبات الطبيعية، والترتيبات الطبيعية تعتمد على فرص حدوث البرق. ومع ذلك، فإن التجارب تشير إلى أن الحواف غير الحادة بعض الشيء يضربها البرق أكثر من الحواف الحادة.

ولأن مانعة الصواعق لا تستطيع التأثير على حدوث البرق، فإنها لا يمكنها حث التفريغ الكهربي من سحابة مشحونة بالكهرباء. وهكذا فإن مانعة الصواعق لا تستنزف الشحنات من السُّحب وتجعل حدوث البرق أقل احتمالية، مثلما توقَّع في الأصل بنجامين فرانكلين، مخترع مانعات الصواعق.

(٨) السترات وزحاليق اللعب وغرف العمليات الجراحية

إذا خلع شخصٌ معطفه أو سُتْرته في أثناء العمل على كمبيوتر، فقد يخرب الكمبيوتر. إذا تزحلق طفل نزولًا على زحلوقة لعب بلاستيكية، وهبط ليجد شخصًا آخر، فقد يعاني الطفل من مفاجأة مؤلمة. إذا لم يرتدِ جرَّاحٌ النوعَ الملائم من الأحذية في أثناء إجراء عملية جراحية، فقد يتأذى المريض بصورةٍ تهدِّد حياته. ما وجه الخطورة في هذه الحالات؟ ولماذا يقلُّ الخطر عندما تكون الرطوبة عالية؟

الجواب: حينما تتلامس المواد المختلفة، قد يتم سحب الإلكترونات من سطح إلى آخر، تاركة السطح الأول مشحونًا بشحنةٍ موجبة، والثاني بشحنةٍ سالبة. وإذا تم الاحتكاك بين السطحين، فإن نقاطًا أكثر تتلامس؛ ومِن ثَمَّ فإن شحنات أكثر تنتقل. وكذلك فإن الخدوش الناجمة عن الاحتكاك قد تزيد من انتقال الإلكترونات.

تُسمَّى هذه الانتقالات «كهرباء الاحتكاك» أو «التماس الكهربي». إذا كان الهواء رطبًا، فإن السطوح تحدث لها معادلة شبه فورية للشحنة، بفضل المياه المحمولة في

الهواء. ولكن إذا كان الهواء جافًّا، فقد تُصبح السطوح مشحونة بشحنةٍ عالية، إلى حد أن الشرر سيقفز في الهواء من سطحٍ مشحون إلى آخر. في العادة يكون الشرر بين سطحٍ مشحون ومادةٍ موصِّلة؛ شخصٍ آخر على سبيل المثال، أو شيءٍ معدنيٍّ. إذا مشى شخص على نوعٍ معينٍ من السجاد في يومٍ جافٍّ، وأصبح مشحونًا بشحنةٍ سالبة مثلًا، فربما تقفز شرارة بين إصبعه المدود ومقبض بابٍ معدني، أو شيء موصول كهربيًّا بالأرض؛ صنبور مياه مثلًا، أو لوحة مفاتيح كمبيوتر.

يحدث انتقال الشحنات عندما يلمس حذاءٌ السجادة، ثم يتحرك إلى أعلى ويبتعد عن السجادة، بينما يمشي الشخص. يترك التماس الحذاءَ مع فائضٍ من الإلكترونات. وعندما يتحرك الحذاء بعيدًا عن السجادة، يسوق التنافر المتبادَل بعضًا من هذه الإلكترونات الفائضة إلى باقي جسم الشخص؛ ومِن ثَمَّ فإن كل خطوة تعمل على زيادة عدد الإلكترونات الفائضة على الجسم، واضعة إياه في جهدٍ كهربي يبلغ عدة آلاف من الفولتات.

وإذا لمس الشخص شيئًا موصِّلًا آخر، فإن بعضًا من الإلكترونات الفائضة — على الأقل — ينتقل إلى ذلك الشيء. وإذا حدث التماس مع الجزء الحر من الجسم، مثل ظهر اليد أو جانب الذراع، يحدث نقل الإلكترونات على مساحةٍ كبيرة، بما يكفي لإمكانية ألَّا يشعر الشخص بالنقل. ومع ذلك، فإذا وضع الشخص أحد أصابعه بالقرب من الشيء الموصِّل، فربما يشعر «إلى حدٍّ كبير» بتدفُّق الإلكترونات؛ فبسبب أن الإصبع جسمٌ مُدبَّب، تستطيع الإلكترونات الفائضة عليه أن تنتج مجالًا كهربيًّا قويًّا بين الإصبع والشيء الموصِّل. ويمكن أن يكون هذا المجال قويًّا بما يكفي لسحب الإلكترونات من جزيئات الهواء الوسيطة، صانعًا مسارًا موصِّلًا بين الإصبع والشيء الموصِّل. ويمكن حينئذٍ بسهولة أن تتحرك الإلكترونات الفائضة على الشخص، من الإصبع وخلال المسار الموصِّل، في شرارة يمكن رؤيتها وسماعها والإحساس بها. وإذا أردت تلافي الشرر، فاستخدِم جزءًا حرًّا من جسمك للتماس بدلًا من الإصبع، أو أمسك بمفتاحٍ معدني، بحيث يأخذ المفتاح الشرارة (إن إحداث الشرر عند شحمة أذن صديق في «هجومٍ تسلُّلي» هو طريقةٌ مضمونة لإنهاء الصداقة).

تُسبب بعض أنواع الأقمشة انتقالاتٍ للشحنات عندما تلمس الجلد أو أقمشةً أخرى. معروف أن السُّترة تُحدِث شررًا عندما تُخلَع في طقسٍ جاف. وقد يصبح الطفل الذي يتزحلق نزولًا على زحلوقة بلاستيكية مشحونًا بشحنةٍ كبيرة، إلى حد أن الطفل قد يسقط من الزحلوقة بجهد كهربي يبلغ ١٠ آلاف فولت. إذا وصل الطفل إلى جسم آخر، وخاصة

إذا كان الجسم الآخر موصِّلًا متصلًا بالأرض، فقد تقفز شرارة مؤلمة بشدة، بين الطفل والجسم، لمعادلة شحنة الطفل.

ويمكن أن يكون حدوث الشرر خطيرًا للغاية في العمليات الجراحية. وإذا كان هناك أي بخار قابل للاشتعال، فقد تتسبب شرارة في اشتعال البخار. ومع ذلك، فإن الاستخدام الشائع لمواد التخدير القابلة للاشتعال ألغي في خمسينيات القرن العشرين؛ وبذلك تراجع ذلك الخطر. يمكن أن يتسبب حدوث الشرر بين سطحين في قتل إنسان، إذا كان أحد السطحين موجودًا داخل الجسم. في العادة يوفِّر الجلد مقاومةً كبيرة لتدفق الإلكترونات؛ ومِن ثَمَّ يحمي القلب، لكن إذا كان تدفق الإلكترونات موجَّهًا مباشرة إلى السوائل الموصِّلة داخل الجسم، فإن تدفق التيار عبْر القلب قد يكون كافيًا لتخريب النظام الكهربي الطبيعي لضربات القلب. وتثير احتمالية مثل هذه «الصدمة الميكْروويَّة» قلق فِرَق الجراحة بقدْرٍ كبير، إلى حد أنهم يختارون ملابسهم بما يُقلِّل فرصة حدوث الشرر، وتكون أحذيتهم في العادة ذات توصيلٍ جزئي للكهرباء؛ لكي تُصرِّف الشحنات إلى الأرضية بالسرعة ذاتها التي تتكوَّن بها بسبب الملابس. وتكون الأرضية كذلك ذات توصيلٍ جزئي؛ لتستطيع الشحنات بعدئذٍ الانتقال إلى وصلةٍ أرضية.

وفي العادة، يرتدي العاملون في المكاتب والصناعة، الذين يستخدمون الكمبيوتر أو الأجهزة الإلكترونية الحساسة الأخرى، أساور مؤرَّضة لتوفير ممرٍ موصِّل بين أجسامهم والأرض. عادة ما لا يكون المسار عالي التوصيل، وبذلك تنخفض الشحنة على الشخص على نحوٍ تدريجي، لا سريعٍ جدًّا مثلما في الشرارة.

(٩) السيارات ومضخات الوقود واستراحات الطرق

عندما تخرج من سيارات معينة وتعود لتغلق الباب، لماذا تُصعَق؟ (لماذا لا تُصعَق في كل السيارات؟) وعندما تدلف ببطءٍ إلى نقطة تحصيل الرسوم، لماذا يتردد موظف التحصيل في مد يده لأخذ نقودك على الفور؟

إن بخار البنزين سريع الاشتعال، ولكن تزويد سيارة بالبنزين في محطة للبنزين يُعَد آمنًا نسبيًّا، إلا إذا كنت تُدخن بحماقة، أو سكبت البنزين على جزء من السيارة شديد السخونة. وبالرغم من ذلك، يتسبب بعض الناس دون قصد في إشعال النيران في أثناء ضخ البنزين إلى سياراتهم. في بعض الحالات التي سُجِّلت بالفيديو، يُدخل شخص مضخة البنزين في فتحة البنزين في السيارة، ويضبط التدفُّق على الوضع الآلي، وبعدئذٍ يعود إلى

داخل السيارة لطلب الدفء، أو للبحث عن شيءٍ ما، بعد بضع دقائق، يترجَّل الشخص من السيارة ليباشر إنهاء الضخ، ولكن بينما يدنو من ذراع المضخة، يشتعل البخار. لماذا يحدث ذلك؟

الجواب: تكتسب السيارة المتحركة شحنة كهربية نتيجة احتكاك الإطارات بالأسفلت، وهو ما ينقل الإلكترونات من سطحٍ إلى آخر؛ لأن القوى الكهربية الجاذبة على أحد السطحين تغلب القوى الكهربية الجاذبة على السطح الآخر. لنفترض أن الإلكترونات تُسحَب من الأسفلت إلى الإطار؛ يمكن أن تتحرك هذه الإلكترونات عندئذٍ عبْر الإطار، مرورًا بالوصلات المعدنية في السيارة، بحيث تشحن السيارة بجهدٍ كهربي يبلغ ١٠ آلاف فولت أو أكثر من ذلك.

إذا أوقفت سيارتك؛ ومِن ثمَّ توقَّف أيضًا نقل الشحنات بين الإطارات والأسفلت، فإن الشحنات الموجودة على السيارة ستتسرب عبْر الإطارات. ومع ذلك فإن معدل التفريغ ذاك يتوقف على مدى جودة توصيل الإطارات للكهرباء. فإذا كانت الإطارات مصنوعة من أسود الكربون الموصِّل (المتماسك بفعل بوليمرات)، يكون التفريغ سريعًا إلى حدٍّ كبير. أما إذا كانت مصنوعة — بدلًا من ذلك — من سيليكا غير موصِّلة (مترابطة بالبوليمرات)، فربما يستغرق التفريغ وقتًا طويلًا.

لنفترض أن إطارات سيارتك جيدة التوصيل؛ ومِن ثَمَّ تستغرق السيارة أكثر من دقيقةٍ واحدة لتُفرغ قدْرًا كبيرًا من شحنتها. ولنفترض أيضًا أنك تخرج من السيارة فور توقُّفها، ولا تلمس إلا مقبضًا بلاستيكيًّا (غير موصِّل) لتفتح الباب. عندما تعود لتدفع الباب المعدني مغلِقًا إياه، فإن فائض الإلكترونات على السيارة سيقفز عبْر الهواء الفاصل بينكما، ليصل إلى أصابعك؛ ومِن ثَمَّ قد يصل بعضٌ منها إلى جسمك، أو ينتقل عبْر جسمك إلى الأرض؛ ونتيجةً لذلك، تقفز شرارة بينك وبين السيارة. إنها طريقةٌ خالية من الكافيين تُنبِّهك بعد قيادةٍ صباحية إلى العمل أو المدرسة. ومع ذلك، فإذا أردت تلافي الصدمة، فعليك إما الانتظار لبضع دقائقَ إضافيةٍ للسماح للشحنات بالتسرب، أو دفع الباب لإغلاقه باستخدام قدمك أو مؤخرتك؛ فاستخدام شيءٍ غير حاد، مثل مؤخرتك، سيُقلِّل من فرص تأيُّن جزيئات الهواء، الذي يسمح بحدوث الشرر.

عندما تركب سيارةً، ربما تظل متعادلًا كهربيًّا إذا لم تلمس إلا الأجزاء البلاستيكية (غير الموصلة) بداخل السيارة، ولكنك تظل مشحونًا بالتأثير. أي إن الإلكترونات القابلة للحركة في جسمك تميل إلى التحرك بعيدًا عن الإلكترونات التي تتراكم على أجزاء السيارة

الموصِّلة المحيطة بك. لنفترض أنك قُدت سيارتك إلى نقطة تحصيل الرسوم، بينما أنت مشحونٌ كهربيًّا على هذا النحو. إذا تقاربتَ أنت وموظَّف التحصيل مباشرةً لتبادُل النقود أو بطاقة الرسوم، يمكن أن تقفز شرارة بينكما؛ إذ يحاول بعض هذه الإلكترونات الموجودة على جسمك الهرب من بعضها الآخر.

يُستبعَد حدوث الشرر في الأيام الرطبة لأن الرطوبة المحمولة في الهواء تعادل الشحنة على كلٍّ من جسمك والسيارة؛ لذا، في اليوم الجاف، من المرجح أن ينتظر الموظف بضع عشرات من الثواني، قبل أن يمد يده إليك؛ للسماح للشحنة الموجودة على السيارة بأن تتسرب، وللشحنة (المنتجة بالتأثير) عليك، بأن تنخفض. ومع ذلك، إذا كنت حينها قد انتظرت في طابور، فإن الشحنات ستختفي على الأرجح ريثما تصل إلى نقطة التحصيل.

يتسبب تدفُّق البنزين إلى خزان البنزين الخاص بالسيارة في بعض حرائق المحطات؛ وذلك بسبب خاصية تتعلق بتصميم مدخل خزان البنزين، لكن هذه الخاصية التصميمية أُصلِحَت الآن. تمثلت المشكلة في أن البنزين يصبح مشحونًا في أثناء تدفُّقه عبْر أنبوب أو قناة. إن البنزين الملاصق مباشرةً للجدار، فيما يُسمى بـ «الطبقة الحدودية»، لا يتحرك، وبينما يتدفَّق باقي البنزين متجاوزًا الطبقة الحدودية، تُنقل الإلكترونات من الطبقة الحدودية إلى البنزين المتحرك؛ ونتيجةً لذلك، تكون الطبقة الحدودية مشحونةً بشحنةٍ موجبة، ويتدفَّق البنزين المشحون بشحنةٍ سالبة، إلى داخل خزان البنزين.

إذا كان الخزان بلاستيكيًّا ومِن ثَمَّ غير موصِّل، فإن هذه الشحنة السالبة تتجمَّع على السطح الداخلي وتطرد الإلكترونات الموجودة في أي جزءٍ موصِّل من السيارة يكون قريبًا منها. تتحرك هذه الإلكترونات المطرودة بعيدًا عن الخزان، ويمكن أن تنتهي الحال ببعضها إلى خرطوم البنزين، وإذا أحدثَتْ شرارة عند الخرطوم، يمكن للشرارة أن تُشعِل بخار البنزين المتصاعد في أثناء تدفُّق البنزين. ولحل المشكلة، يصل الخرطومُ السيارةَ بالأرض، لكيلا تتمكَّن الشحنات من التجمُّع على السيارة بالقرب من الخرطوم.

يمكن أن يصبح الشخص مشحونًا كهربيًّا داخل السيارة، حتى لو كانت متوقِّفة؛ لأن الاتصال بين ملابس الشخص ومادة مقعد السيارة قد ينتج عنه نقلٌ كبير للشحنات. لنفترض أن شخصًا ما بدأ في تزويد سيارته بالوقود، باستخدامِ مضخَّةٍ مضبوطة على الوضع الآلي، ثم عاد إلى داخل السيارة لسببٍ ما. بعد احتكاكه بمقعد السيارة، قد يعود الشخص إلى المضخة مع كميةٍ كبيرة من الشحنات. إذا قفزت شرارة بين الشخص

والمضخة، يمكن أن تُشعِل بخار البنزين وتتسبَّب في اندلاع حريق. يستطيع المرء تفادي الخطر من خلال عدم العودة إلى السيارة، أو عبْر معادلة الشحنة عن طريق لمس قطبٍ معدني قبل لمس مضخة الوقود.

تأخذ سيارة السباق استراحة بعد السير بسرعةٍ كبيرة؛ ومِن ثَمَّ بعد اكتساب شحنة كهربية كبيرة نتيجة الاحتكاك بين الإطارات والأسفلت. وعادةً ما يجب على طاقم العمل في الاستراحة أن يشرعوا على الفور في تزويد السيارة بالوقود، إما بخرطوم أو بحاوية وقود مقلوبة. سريعًا ما تُنتِج العملية بخارًا من الوقود عند مدخل التزويد بالوقود في السيارة، ولتجنُّب حدوث الشرر (الذي قد يكون كارثيًّا) في ذلك البخار، يجب أن تُوصَّل السيارة بالأرض فور توقُّفها (يمكن مد قضيب موصِّل طويل إلى الهيكل المعدني للسيارة) أو أن تُزوَّد بإطارات جيدة التوصيل، بحيث تتسرب الشحنة بسرعةٍ عبْر الإطارات. ومع ذلك، فليس الحل الأخير مرغوبًا فيه دائمًا؛ لأن الإطارات الموصِّلة للكهرباء (لنتذكر أنها تحتوي على أسود الكربون) تبلى في العادة أسرع من الإطارات غير الموصِّلة (المحتوية على السيليكا).

قصة قصيرة

(١٠) تبادل العلك الصاعق

ننقل هنا قصةً كلاسيكية وردت في دوريةٍ فيزيائية في عام ١٩٥٣؛ اللعبة التي تصفها خطيرة، لا تغامر بتجريبها. كان هناك أستاذ للفيزياء يقود سيارته ببطءٍ كبير، حينما مرَّ اثنان من أصدقائه بسيارتهما بجانبه، محاكيَين سرعته. مدَّ الصديق الجالس في مقعد الراكب من السيارة الثانية يده (بينما كانت السيارة تتحرك) ليعطي لفافة علك للأستاذ. عندما تقلصت المسافة الفاصلة بين يدَيهما إلى بضعة سنتيمترات، حدث بينهما «تفريغ كهربي مروِّع»، شلَّهما للحظات. ولحُسن الحظ، لم ينعطف الأستاذ نحو السيارة الأخرى قبل أن يتمكن من استعادة عافيته وتحكُّمه في سيارته.

حدثت الشرارة لأن حركة السيارتين شحنت الأستاذ والشخص الآخر بقدْرٍ مختلف من الشحنات، وربما بشحناتٍ مختلفة الإشارة. وعندما اقتربت يد أحدهما من يد الآخر بالقدْر الكافي، قفزت الإلكترونات من إحداهما عبْر الهواء، لتصل إلى الأخرى، لكي تقلل فرق الشحنة.

(١١) خطورة المسحوق السابح في الهواء

لماذا تكون الشرارة الكهربية خطيرة في حالة المسحوق المحمول في الهواء، مثلما يحدث في منجم للفحم أو مطحن للدقيق؟

الجواب: حين تكون حبيبات المسحوق مجتمعة فإنها قد لا تحترق جيدًا، لكن عندما تكون محمولة في الهواء، يُحاط كل جسيم بالهواء؛ ومِن ثَمَّ تملك إمداداتٍ وفيرة من الهواء تسمح لها بالاحتراق بسرعةٍ كبيرة. في الحقيقة، بمجرد أن يبدأ الاحتراق عند أي نقطة من المسحوق، تُنقل الطاقة الحرارية عبْر المسحوق (من حبة إلى التي تليها) بسرعةٍ كبيرة تؤدي إلى انفجار المسحوق. وهذا يعني أن قدْرًا كبيرًا من الطاقة ينبعث بطريقةٍ غير منضبطة، مع تزايدٍ سريع في الضغط ودرجة الحرارة. في صومعة حبوب، قد يدمر الانفجار ببساطة بنيةَ الصومعة، وفي منجم للفحم، قد يقتل عمال المنجم. وبالرغم من احتياطات اليوم، تستمر هذه الانفجارات في الحدوث بصورةٍ متكررة.

في بعض الحالات، يمكن لشرارةٍ ناتجة عن تفريغ كهربائي أن تستحث انفجارًا، إذا وفَّرت القدْر الكافي من الطاقة. ويمكن أن ترتبط الشرارة بالمعدات الكهربية المعطوبة، ولكن يغلب أكثر أن تكون بسبب جسمَين مشحونين يفرغ أحدهما شحنته إلى الآخر، أو بسبب جسمٍ مشحون يفرغ شحنته إلى الأرض، عند نقطةٍ مؤرضة ما.

على سبيل المثال، في سبعينيات القرن العشرين، وقع انفجار في مسحوق قطع الشوكولاتة، بينما كانت تُقذف إلى صومعة عبْر أنبوب بلاستيكي. وبينما كانت حبيبات المسحوق تخرج مهتزة من الأكياس إلى نظام الأنابيب، وبينما كان بعضها يلامس بعضًا ويلامس جدران الأنابيب أثناء تحرُّكها عبْر نظام الأنابيب، أصبحت الحبيبات مشحونة. وعندما انطلقت من الأنبوب الأخير إلى الصومعة، قفزت شرارة بين الحبيبات ونقطةٍ مؤرضةٍ ما في الصومعة. لربما بدأت الشرارة بالحبيبات المحمولة في الهواء، في أثناء سقوطها نحو الكثيب الذي تشكَّل بالفعل في الصومعة. وثَمَّة احتمال آخر، فلربما بدأت الشرارة عند قمة المخروط الذي يشكِّله الكثيب، بينما تنزلق الحبيبات على حواف الكثيب المائلة (بلغ المجال الكهربي قوَّته القصوى عند قمَّة الكثيب، أو بالقرب منها، لذا فلربما بدأ هناك الشرر الذي يؤيِّن فيه مجالٌ كهربيٌّ قويٌّ جزيئاتِ الهواء).

في الواقع، لربما حدث الشرر بصورةٍ متكررة في الصومعة، لكن بلا طاقةٍ كافية لإشعال الحبيبات. وقد حدث الانفجار مصادفة، عندما تجاوزت طاقة إحدى الشرارات (أو ربما عدة شرارات مجتمعة شبه متزامنة) القيمة الدنيا اللازمة لحدوث الانفجار. لا

يستطيع المهندسون القضاء على الشحنات الساكنة والشرر في صناعات المساحيق، وبدلًا من ذلك، يحاولون الإبقاء على طاقة الشرر دون تلك القيمة الدنيا اللازمة للانفجار.

(١٢) خطورة العبوات المضغوطة

إذا تعرَّض رذاذٌ مسحوقٌ جافٌّ أو سائلٌ صادر عن عبوة مضغوطةٍ للهبٍ مكشوف، كما في المطبخ، فلماذا قد يتحول الرذاذ إلى «قاذف لهب»؟ (إياك ورشَّ الرذاذ بالقرب من لهب مكشوف؛ لأن الأمر قد ينتهي بك إلى إضرام النار في نفسك وفي الغرفة!) ولماذا تنفث بعض العبوات المضغوطة شعلاتٍ من اللهب، حتى عندما لا يكون البخاخ قريبًا من لهبٍ مكشوف؟

الجواب: ربما تكون الجزيئات في بخاخ الرذاذ قابلة للاشتعال، والسرعة العالية لخروجها من العبوة قد تجعل من العبوة قاذفَ لهبٍ فعَّالًا. إذا كانت العبوة تنفث مسحوقًا جافًّا، فيمكن أن تصبح حبيبات المسحوق، والعبوة نفسها، مشحونة. وإذا لم تكن العبوة متماسة مع شيءٍ موصِّل، مثل الإنسان، يمكن أن تتراكم الشحنة، إلى أن تصبح بالقدْر الكافي لجعل العبوة والمسحوق المنفوث يطلق أحدهما الشرر نحو الآخر. إذا وفَّرتْ تلك الشرارة طاقةً كافية، فسيشتعل المسحوق. ومع ذلك، فإذا لمس شخصٌ ما العبوة، كما هي الحال على الأغلب، فحينئذٍ يمكن أن ينتقل جزءٌ كبير من الشحنة إلى الشخص، ولا يتبقى منها على العبوة ما يكفي للتسبُّب في حدوث شرارة.

(١٣) خطورة رشِّ الماء

عندما يُفتَح الدُّش في حمامٍ نمطي بينما الباب مقفول، لماذا يمكن أن يتكوَّن مجالٌ كهربيٌّ قويٌّ في هواء الغرفة؟ وما الذي يصنع المجالات الكهربية القوية الموجودة بالقرب من شلالات المياه؟ في أزمنة ماضية، كان يتم تنظيف صهاريج الشحن في السفن الناقلة للنفط الخام عن طريق رشِّها بالماء من الداخل، تحت الضغط، وقد سبَّبت تلك الممارسة انفجار الخزانات في بعض الأحيان. ولمنع مثل هذه الانفجارات، كان يتم تقليل كمية الأوكسجين داخل الخزان، من خلال ضخ غازٍ خامل إليه، ولكن لماذا ظلت الخزانات تنفجر؟

الجواب: عندما تضرب المياه سطحًا صلبًا، وتصنع رذاذًا مثلما تفعل بحوض الاستحمام، تصبح القطرات مشحونة كهربيًّا: في العادة تصبح القطرات الأكبر حجمًا

مشحونةً بشحنةٍ موجبة (تفقد إلكترونات)، وتصبح القطرات الأصغر في العادة مشحونة بشحنةٍ سالبة (تكتسب تلك الإلكترونات المفقودة). ولأن القطرات الأكبر تسقط من الهواء بسرعةٍ إلى حدٍّ ما، فلا يبقى سابحًا في الهواء إلا القطرات الأصغر المشحونة بشحنةٍ سالبة. إذا كانت التهوية رديئة، فيمكن أن يتزايد عدد قطرات الماء المشحونة المحمولة في الهواء بصورةٍ كبيرة، مكوِّنًا مجالًا كهربيًّا كبيرًا، غير أن هذه الحالة لا تشكِّل خطرًا في الحمام، ولا بالقرب من شلال المياه.

أثناء تنظيف خزان النفط، تصبح قطرات الماء مشحونة حينما تغادر خرطوم المياه على هيئة رذاذ، وحينما ترتطم بأرضية الخزان وحوائطه، مالئة إياه بغيمة من الماء المشحون. يمكن أن يقفز الشرر حينئذٍ بين تلك الجسيمات المشحونة المحمولة في الهواء، وبين موصِّلٍ كبير، أو صنبور المياه، أو نقطةٍ مؤرضة. إذا كان الخزان ما يزال يحتوي على أبخرة من شحنة النفط الخام، فيمكن للشرر أن يشعل البخار، متسبِّبًا في انفجاره.

يتمثَّل أحد الحلول لتفادي هذا الخطر في ضخ غازٍ خامل إلى الخزان، قبل التنظيف، بحيث يمكن أن تكون كمية الأوكسجين أقل من اللازم لحدوث انفجار. ومع ذلك، كانت العملية معيبة من الأصل؛ لأن المولِّد المسئول عن التزويد بالغاز، تسبَّب في انفصال الشحنات داخل الغاز (أصبح الغاز مشحونًا). وإلى أن تم اكتشاف المشكلة وحلُّها، ظلت الخزانات تنفجر أثناء تنظيفها.

(١٤) توهُّج الزلاجات

ما الذي يسبِّب توهج الزلاجات الذي يلاحظه أحيانًا المتزلِّجون أثناء الليل؟

الجواب: عندما تهبط زلاجة على الثلج، تنتقل شحنةٌ كهربية بين الزلاجة والثلج. بصورة عامة، تُسمَّى الآلية الفعلية لعملية الانتقال «التكهرب بالتلامس» أو «التكهرب بالاحتكاك». وعلى الرغم من أن هذه الآلية معقَّدة، فإنه يمكننا القول ببساطة إن الإلكترونات (الحرة الحركة) يمكن أن تُسحَب (تُنقَل) من سطحٍ إلى آخر.

لنفترضْ أن الزلاجة ليست معدنية، ولا تحتوي على مسامير معدنية؛ حينئذٍ بينما تتراكم الشحنة على الجزء السفلي من الزلاجة، بسبب انتقال الإلكترونات، تصبح مادة الزلاجة مستقطَبة كهربيًّا. بمعنى أن الشحنات الموجبة والسالبة داخل الجزيئات تصبح منفصلة قليلًا بعضها عن بعض. ينتج عن ذلك مجالٌ كهربي يمتد بسمك الزلاجة، بحيث يمتلك الجزآن العلوي والسفلي من الزلاجة شحناتٍ متضادة الإشارات. على سبيل المثال،

إذا سحبَت الزلاجة إلكتروناتٍ من الثلج، يصبح أسفل الزلاجة مشحونًا بشحنةٍ سالبة، ويصبح أعلاها مشحونًا بشحنةٍ موجبة (تصبح الزلاجة حينئذٍ بمنزلة مكثفٍ كهربي).

عندما تنزلق زلاجة على الثلج، يتجلَّى ذلك التأثير الكهربي بقدْرٍ أكبر، ويمكن أن يقفز العديد من الشرارات الصغيرة بين الثلج وبين الجزء العلوي أو السفلي من الزلاجة. وفي الليل، حين تكون العين معتادة على الظلام، قد يرى المتزلِّج بعضًا من تلك الشرارات.

(١٥) كارثة هيندنبيرج

كان المنطاد هيندنبيرج — فخر ألمانيا وأحد أعاجيب عصره — طوله يعادل نحو ثلاثة ملاعب لكرة القدم؛ ما جعله أكبر آلةٍ طائرة صُنِعَت على الإطلاق. وعلى الرغم من أنه كان يُحلِّق بـ ١٦ خلية من غاز الهيدروجين الخطير القابل للاشتعال، فقد قام بالعديد من الرحلات العابرة للمحيط الأطلسي، دون حوادث. وفي الحقيقة، لم تتعرض المناطيد الألمانية، التي اعتمدت كلها على الهيدروجين، لأي حوادث بسببه. ومع ذلك، ففي ٦ مايو ١٩٣٧ وبينما كان المنطاد هيندنبيرج يستعد للهبوط في محطة الملاحة الجوية الأمريكية، في ليكهرست، نيو جيرسي، اندلعت فيه النيران.

وكان طاقم المنطاد قد انتظر إلى أن غادرت عاصفةٌ مطيرة المنطقةَ جزئيًّا، وما إن أُنزلت حبال الهبوط من المنطاد إلى طاقم المحطة، حتى شُوهدت تموُّجات على النسيج الخارجي له، على بُعد حوالي ثلث المسافة من المؤخرة. وبعد ثوانٍ، شبَّ لهيب من تلك المنطقة، وأضاء وهجٌ أحمر الحيز الداخلي للمنطاد. وفي غضون حوالي ٣٠ ثانية، هوى المنطاد المحترق إلى الأرض؛ مما تسبَّب في مقتل ٣٦ شخصًا، وإصابة آخرين كثيرين بحروق. لماذا احترق هذا المنطاد بعد العديد من الرحلات الآمنة التي قامت بها مناطيد مزوَّدة بالهيدروجين؟

الجواب: بينما كان المنطاد هيندنبيرج يستعد للهبوط، وبعد إنزال حبال الهبوط إلى طاقم المحطة، أصبحت الحبال رطبة (ومِن ثَمَّ قادرة على توصيل التيار الكهربي) بسبب المطر. قامت الحبال بتأريض الإطار المعدني الذي كانت متصلة به، بمعنى أنها خلقت مسارًا موصِّلًا بين الإطار المعدني للمنطاد، وبين الأرض، جاعلة الجهد الكهربي للإطار مساويًا للجهد الكهربي للأرض. كان من المفترض بذلك أن يؤرض النسيج الخارجي للمنطاد أيضًا، إلا أن هيندنبيرج كان أول منطاد تكسو نسيجه طبقاتٌ عازلةٌ مختلفةٌ عديدة، ذات مقاومةٍ كهربيةٍ كبيرة (كان توصيلها للكهرباء ضعيفًا جدًّا)؛ لذا ظل النسيج

عند الجهد الكهربي للغلاف الجوي، حينما كان المنطاد على ارتفاع حوالي ٤٣ مترًا. وبسبب العاصفة المطيرة، كان الجهد كبيرًا مقارنة بالأرض.

كان ذلك موقفًا خطيرًا؛ فقد كان النسيج واقعًا تحت جهدٍ كهربيٍّ مختلف بقدْرٍ كبير عن الإطار المعدني للمنطاد. وعلى ما يبدو، سَرَت الشحنة عبْر سطح النسيج الخارجي المبتلِّ، ثم أطلقت شرارة إلى الداخل، نحو الإطار المعدني للمنطاد. هناك رأيان أساسيان حول الطريقة التي تسببت بها الشرارة في الحريق. أحد الرأيين يقول إن الشرارة أشعلت الطبقات العازلة. ويقول الرأي الآخر إن أحد حبال الهبوط مزَّق خلية هيدروجين، مما أطلق الهيدروجين بين تلك الخلية والنسيج الخارجي للمنطاد. (يؤيد هذا الرأي ما أُبلغ عنه من ظهور تموجات في النسيج.) وبعد ذلك، أشعلت الشرارة ذلك الهيدروجين. في أيٍّ من الحالين، أشعل الحريق بسرعة خلايا الهيدروجين، وأسقط المنطاد. ولو كانت الطبقات العازلة على النسيج الخارجي لهيندنبيرج أكثر توصيلًا للكهرباء (مثل عوازل المناطيد الأقدم منه والأحدث)، لما حدثت كارثة هيندنبيرج — على الأرجح.

(١٦) نار نقَّالة

في العادة، يُعالَج ضحية الحريق بينما هو مستلقٍ على نقَّالة في غرفةٍ مغلقةٍ مملوءة بالهواء المشبَّع بالأوكسجين. وحالما تنتهي جلسة المعالجة، يسحب عامل المستشفى النقَّالة والمريض من الغرفة إلى الترولي؛ ليتم إخراجه. في واقعتين على الأقل، اشتعلت النيران في النقالة عند طرفها الذي غادر الغرفة أخيرًا. لا شك أن نقالةً مشتعلة تُقلُّ مريضًا يعاني بالفعل من حروق تُعَد حالةً خطيرة، ومن البديهي أن تندلع النيران بسهولة في الهواء الغني بالأوكسجين، لكن يظل سؤال يطرح نفسه: ما الذي أدَّى إلى اشتعال النار في النقالتين؟

الجواب: سرعان ما أدرك المتحرون عن الأمر أن انفصالًا للشحنات حدث بين المريض والنقالة. لنفترض أن المريض فقد إلكترونات انتقلت إلى النقالة، التي أصبحت تبعًا لذلك مشحونة بشحنةٍ سالبة. أُزيحت بعد ذلك بعض الإلكترونات الموجودة في الإطار المعدني تحت النقالة، تاركة أعلى الإطار مشحونًا بشحنةٍ موجبة. بعدئذٍ، أصبح هذا النظام المكوَّن من النقالة المشحونة بشحنة سالبة، والإطار المعدني المشحون بشحنةٍ موجبة بمنزلة مكثف؛ أي تلك الأداة الكهربية المستخدمة في تخزين الشحنات في الدوائر الكهربية.

هل يُحتمل أن تتسبب شرارة بين النقالة والإطار المعدني في إشعال النقالة؟ لا يبدو ذلك؛ لسببين: (١) أن المجال الكهربي بينهما لم يكن كافيًا لتأيين الذرات (لإزالة الإلكترونات من الذرات، بحيث يصبح هناك ممرٌّ موصِّل تستطيع الإلكترونات عبْره أن تنتقل من النقالة إلى الإطار). (٢) أن الطاقة المرتبطة بالشحنات لم تكن كافية للتسبب في الحريق.

ومع ذلك، تغيَّر الوضع عندما سُحبت النقالة بعيدًا عن الإطار المعدني؛ لأن الشحنة على النقالة دُفع بها حينها إلى منطقة متناقصة الحجم، بحيث صارت قريبة من الشحنة الموجودة على الإطار المعدني تحتها. عزز ذلك التركيز للشحنة من المجال الكهربي، والطاقة المرتبطة به، إلى أن انطلقت شرارة بين النقالة والإطار، بطاقةٍ كافية لإشعال النقالة.

(١٧) التوهُّج عند نزع شريط لاصق

بعد تكييف عينيك مع الظلام لحوالي ١٥ دقيقة، انزع شريطًا لاصقًا من بكرته بوتيرةٍ ثابتة. ما الذي يسبِّب الوهج الخافت على امتداد الخط الذي ينفصل عنده الشريط عن البكرة؟ إذا نزعتَ الشريط بالقرب من هوائي مذياعٍ مضبوط عند محطة غير مستخدَمة (فارغة)، فلماذا يولِّد النزع ضجيجًا في المذياع؟ ولماذا تستطيع الرطوبة العالية القضاء على كلٍّ من الوهج وضجيج المذياع؟

الجواب: عند تمزق اللصق الموجود على الشريط، ثم انفصاله عن ذلك الشريط الذي ما زال في البكرة، تتجمع جزيئات مشحونة (إلكترونات وأيونات موجبة الشحنة) في رقعتين على السطحين. تميل الرقعتان إلى معادلة إحداهما للأخرى، من خلال إحداث شرارة، قبل انفصال السطحين أحدهما عن الآخر بقدْرٍ كبير، إما بالقفز بين السطحين، أو على امتداد أحدهما. ولأن الهواء يسري داخل المسافة التي تزداد اتساعًا بين السطحين، فإن الشرر يقفز عبْر الهواء. يتكون الشرر بصورةٍ رئيسية من إلكترونات، ويتكون الهواء بصورةٍ رئيسية من جزيئات من النيتروجين؛ لذا، حين يقفز الشرر من رقعةٍ سالبة الشحنة إلى رقعةٍ موجبة الشحنة، تميل الإلكترونات إلى الاصطدام مع جزيئات النيتروجين؛ مما يستثيرها. تتخلص الجزيئات على الفور تقريبًا من حالة الإثارة، عن طريق بث ضوء ضمن اللون الأزرق من الطيف المرئي (بالإضافة إلى الضوء فوق البنفسجي). يتألف الوهج الخافت الذي يُرى على امتداد خط الانفصال، من ضوءٍ يبثه الشرر وجزيئات النيتروجين المتخلِّصة من حالة الإثارة.

كذلك يبثُّ الشرر ضوءًا ضمن طيف التردُّد الراديوي. وهكذا، عندما يُنزَع الشريط بالقرب من هوائي مذياع، فإن الهوائي يلتقط بعضًا من انبعاثات التردُّد الراديوي. وتتناسب شدة ضجيج المذياع مع شدة الضوء المرئي.

توفِّر الرطوبة العالية نداوة تتسرب مع الهواء إلى خط الانفصال. تعمل النداوة على معادلة الرقع المشحونة على الشريط، مُتخلِّصةً من الشرر.

في الأيام التي كانت فيها الصور الفوتوغرافية تُلتقَط على فيلم، مثَّل الشررُ إزعاجًا كبيرًا في عملية معالجة الفيلم؛ فحينما كان يجري فك الفيلم من بكراته، أو تمريره على بكراتٍ دوَّارة، كان يَحدث شرر عند انفصال السطوح، كان الفيلم يُعرَّض للضوء في المواضع التي ينطلق فيها الشرر؛ ولذا كان يُشاهَد نمط من الشرر عند معالجة الفيلم في وقتٍ لاحق (وهو ما لا يريده أحد في صورةٍ فوتوغرافية عائلية).

(١٨) البقدونس والمريمية وإكليل الجبل والزعتر

إذا نُزع شريطٌ لاصق عن سطحٍ بلاستيكي، ثم نُثر بخفة خليطٌ ناعم من مسحوقَين فوق المنطقة التي كان الشريط ملصوقًا عليها، فلماذا ينفصل نوعا المسحوق، بحيث يتجمع أحدهما في منطقةٍ معينة، ويتجمَّع الآخر في مناطق أخرى؟

يمكن كذلك لخليط المساحيق المنثور بخفة أن يكشف شيئًا عن الشرارة، مثل الشرارة التي قد تتولَّد عندما يمشي شخص على سجادةٍ معينة، ثم يقرِّب أنامله من جسم أو أنبوبٍ معدنيٍّ كبير. أولًا تُثبَّت حواف رقعةٍ مربعة من ألياف البولي إيثيلين تريفثاليت (تحمل الاسم التجاري «مايلر»)، على خزانةٍ معدنية، مثلًا. ثم يمشي شخص على السجادة ليصبح مشحونًا (لن تفي أي سجادة بالغرض، وقد تفسد الرطوبة العالية التجربة). إذا قرَّب الشخصُ المشحونُ أنملتَه (أو مفتاحًا معدنيًّا يمسكه في يده) من المايلر، فإن ثمَّة شرارة تقفز فجأة عبْر الفجوة. لماذا يكشف اتجاه تدفق الإلكترونات في تلك الشرارة عما إذا كانت رقعة المايلر منثورًا عليها بخفة مزيج من مسحوقَين ناعمَين؟

وإليك طريقة وضع المسحوقين: يمكن أن يكونا أعشابًا مطحونة طحنًا ناعمًا، أو مسحوق حبر من آلة تصوير (تحذير: قد تسبب المساحيق فوضى وقد تفسد الملابس وأجهزة الكمبيوتر.) يؤدي استخدام مساحيق مختلفة الألوان إلى جعل الانفصال واضحًا أكثر. تُوضع المساحيق في وعاءٍ مرن، مع مسامير معدنية، ثم يُرجُّ الوعاء بقوة لكي تختلط المسامير بالمساحيق. إذا كان الوعاء له صمام عند فتحته، فإن ضغطةً سريعة للوعاء

ستتسبب في جعل خليط المساحيق يتدفق فوق السطح البلاستيكي. لا يلزم إلا بخَّةٌ وجيزة من المسحوق. إذا لم يتوافر وعاءٌ قابل للضغط، فيمكن أن يُنثر المسحوق (بخفة) فوق السطح مباشرة للسماح للمسحوق بأن يتساقط على السطح؛ ومِن ثَمَّ يمكن إمالة السطح وهزُّه بلطف، لإزالة أي مسحوقٍ فائض عن الحاجة.

الجواب: حينما تُرَجُّ مساحيقُ معينةٌ معًا، فإن الاتصال بين الأنواع المختلفة من الحبيبات يسبب انفصالًا للشحنات، بمعنًى آخر، سيكتسب أحد النوعين إلكترونات على حساب النوع الآخر. وحينما يُنزع الشريط اللاصق عن سطح غير موصِّل، فإنه يترك رُقعًا من الشحنات السالبة ورقعًا من الشحنات الموجبة. ستتناقص الشحنات سريعًا بسبب رطوبة الهواء (وتتناقص أيضًا إذا كان «السطح غير الموصِّل» يوصِّل بعض الشيء بالفعل). ومع ذلك، إذا نُثر مزيج المساحيق بخفَّة فوق المنطقة، بحيث تتساقط الحبيبات على المناطق المشحونة، فإن الحبيبات السالبة الشحنة ستتجمع في الرُّقَع الموجبة الشحنة، والحبيبات الموجبة الشحنة ستتجمع في الرُّقَع السالبة الشحنة. إذا كان للمسحوقين لونان مختلفان (مثل الحبر الأسود والقرفة البنية)، فستُرى الرقعتان. تنجح بعض مخاليط المساحيق أكثر من غيرها، على سبيل المثال، البابريكا المطحونة، وحبر آلة التصوير، يعملان معًا جيدًا، لكن البابريكا والدقيق يجذب أحدهما الآخر بقوة، إلى درجة أنهما يتجاهلان فعليًّا الرُّقَع المشحونة في الموقع المنثور عليه المزيج، ويستقرَّان متَّحدَين.

حينما تقفز شرارة بين أنملة ورقعة من المايلر مثبتة على موصِّلٍ كبير (مثل رف معدني)، فإن تدفق الشحنة يترك مناطق مشحونة في المايلر، على الأقل إلى أن تُعادِل رطوبة الهواء تلك المناطق. إذا نُثر مزيج من مسحوقَي الكمون والحبر على المايلر بخفة، فسوف يكشف عن نوع أو نوعَين عامَّين من الأنماط، تُسمَّى «أنماط ليشتنبرج» تيمنًا بجورج كريستوف ليشتنبرج، الذي اكتشفها في عام ١٧٧٧.

إذا أصبح الشخص مشحونًا بشحنةٍ سالبة بمشيه على السجادة، وأصبح نتيجة لذلك يملك فائضًا من الإلكترونات، فإن الإلكترونات تقفز من أنملته إلى المايلر، وتصنع رقعةً دائرية من الشحنات السالبة على المايلر، في مركزها الشرارة (قد تظهر خطوطٌ شعاعيةٌ دقيقة). وإذا أصبح الشخص بدلًا من ذلك مشحونًا بشحنةٍ موجبة، وامتلك إلكتروناتٍ قليلةً جدًّا، فإن الإلكترونات تتحرر من ذرات المايلر، وتتدفَّق عبْر الخطوط المتشعبة، نحو نقطة الشرارة، ثم تقفز من تلك النقطة إلى الأنملة. تُترَك الخطوط المتشعبة مشحونة بشحنةٍ موجبة؛ لذا، إذا أظهر نثر المسحوق على المايلر رقعةً دائريةً مشحونة بشحنةٍ

سالبة، فإن الشخص مشحون بشحنةٍ سالبة، أما إذا أظهر خطوطًا متشعبةً مشحونة بشحنةٍ موجبة تلتقي في نقطةٍ واحدة؛ فإن الشخص مشحون بشحنةٍ موجبة. لدى بعض ضحايا البرق حروق على شكل خطوط متشعِّبة، صنعها البرق على جلودهم.

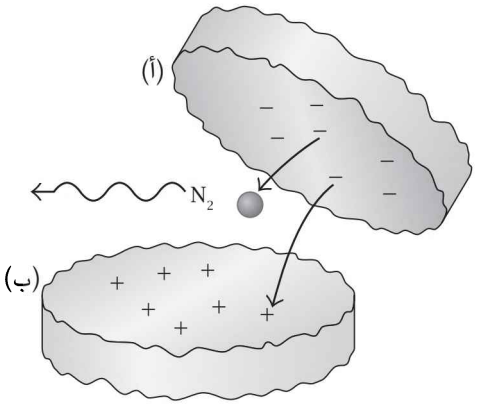
يبيع بعض متاجر المواد العلمية، قوالب خطوط متشعبة جميلة، تم صنعُها على هيئة أسطوانات صغيرة أو ألواح زجاجية. لصناعة قالب، تُحرَّك عينة الزجاج عبْر شعاعٍ صادر من مسرِّع الإلكترونات (آلة تسرِّع الإلكترونات كهربيًّا لتصل إلى سرعةٍ عاليةٍ جدًّا)؛ بحيث تتوقف الإلكترونات داخل الزجاج، وتُحتجَز هناك. ثم يُوضع الزجاج (على الفور) على لوحٍ مؤرَّض، بينما يُضغَط بموصِّل مدبَّب مؤرَّض، على السطح المقابل للزجاج. ينتج عن التركيز العالي للإلكترونات في الزجاج مجالٌ كهربيٌّ كبيرٌ جدًّا، خاصة عند الموصِّل المدبَّب، حيث تحدث الشرارة. تؤدي الحرارة العالية الناتجة عن الشرارة إلى كربنة الزجاج، على امتداد مسار الشرارة، خالقة مسارًا موصِّلًا، حينئذٍ يتشعب المجال الكهربي من ذلك المسار إلى سائر الزجاج. يحدث الشرر على امتداد خطوط المجال الكهربي الجديدة تلك، منتجًا المزيد من المسارات المكربنة، إلى أن تتسرب الإلكترونات التي تركها المسرِّع، إلى الموصِّل المدبب؛ يشكل مجموع المسارات المكربنة، البنية المتفرعة الشبيهة بالشجرة، التي تظهر داخل الزجاج.

(١٩) توهُّج الوينترجرين داخل الخزانة

قم أنت وأحد أصدقائك بتكييف عيونكما على الظلام لمدة حوالي ١٥ دقيقة، داخل خزانة أو في الخارج في ليلة غير مقمرة. ثم اجعل صديقك يمضغ حلوى «لايف سيفر» بالوينترجرين (حلوى على شكل طوق نجاة بحري، مزودة بزيت الوينترجرين) مع فتح فمه بأقصى اتساعٍ ممكن؛ لتتمكَّن من رؤية ما بداخله. لماذا تنتج كل قضمة وميضًا خافتًا من الضوء الأزرق في البداية، ولماذا تفشل القضمات اللاحقة في إنتاج الضوء؟ (إذا لم تُرِد أن تأكل الحلوى فاضغطها بين فكي كماشة حتى تتفتت.)

لماذا يوجد لماء التونيك صبغة زرقاء خفيفة؟

الجواب: في كل مرة تكسر فيها القضمة واحدة من بلورات النعناع السكرية إلى قِطَع، يُرجح أن ينتهي الأمر بالقِطَع إلى اكتساب شحنات مختلفة. لنفترض أن إحدى البلورات تنقسم إلى القطعتين (أ) و(ب)، بحيث إن (أ) مشحونة بشحنةٍ سالبة، و(ب) مشحونة بشحنةٍ موجبة (شكل ٥-٣). عندئذٍ سيقفز بعض من الإلكترونات من (أ) عبْر الفجوة،



شكل ٥-٣: بند ٥-١٩: قطعتان من حلوى لايف سيفر بالوينترجرين، أثناء سقوط إحداهما بعيدًا عن الأخرى. تتصادم الإلكترونات القافزة من سطح القطعة (أ) ذي الشحنة السالبة، إلى سطح القطعة (ب) ذي الشحنة الموجبة، مع جزيئات النيتروجين (N_2) في الهواء.

ليصل إلى (ب). ولأن الهواء انتقل إلى الفجوة بعد تكسُّر البلورة، فإن هذه الإلكترونات تقفز عبْر الهواء، وتنقل تلك الإلكترونات التي تتصادم مع جزيئات النيتروجين في الهواء، الطاقةَ إلى الجزيئات، مثيرة إياها. وعندما تفقد الجزيئات حالة الإثارة، تبثُّ أشعة تقع في نطاق الأشعة فوق البنفسجية، لا يمكنك أن تراها، ومع ذلك، فإن جزيئات الوينترجرين على سطح قطع الحلوى تمتص الضوء فوق البنفسجي وتبث ضوءًا أزرق يمكنك أن تراه؛ وهو الضوء الصادر من فم صديقك. تُسمى عملية امتصاص الضوء الذي ينتمي إلى نطاقٍ موجيٍّ معيَّن (هنا، في نطاق الأشعة فوق البنفسجية) ثم بثه في نطاقٍ موجي أطول (هنا، الضوء الأزرق) بـ «التفلور».

يُشبه الكينين الموجود في ماء التونيك زيت الوينترجرين، من حيث إنه يمتص الضوء فوق البنفسجي، ثم يبث ضوءًا أزرق، مكسبًا ماء التونيك صبغته الزرقاء الباهتة. يمكنك أن ترى الصبغة جيدًا إذا كان ماء التونيك قريبًا من مصباح فلوري في غرفةٍ مظلمة. حينئذٍ سيحوِّل الكينين بعض الضوء فوق البنفسجي الصادر من المصباح إلى ضوءٍ أزرق. يقل التأثير إذا كانت الإضاءة تمر عبْر جدارٍ بلاستيكي أو زجاجي، مثل زجاجة من

ماء التونيك؛ لأن البلاستيك والزجاج يمتصان الضوء فوق البنفسجي. ويزداد التأثير إذا أضأت ماء التونيك بمصباحٍ ذي ضوءٍ أسود (فوق بنفسجي).

(٢٠) أضواء الزلزال

في بعض المناطق، يُشاع أن الزلازل تضفي لونًا أحمر على سماء الليل، أو يُصاحبها مناطق مضيئة على الأرض، أو أجسام مضيئة تتحرك عبْر الهواء. ما الذي يسبب هذه الأضواء، التي تُسمى إجمالًا «أضواء الزلزال»؟

الجواب: ما تزال أضواء الزلزال مثيرة للجدل إلى حدٍّ كبير، على الرغم من مئات التقارير وعدد من الصور الفوتوغرافية الموثوق بها للأضواء. قد يتخذ الضوء أكثر من شكلٍ واحد، وقد يكون له أكثر من سبب. من بين التفسيرات العديدة للأضواء تفسيران: (١) يمكن أن ينبعث الضوء عندما تُوضع الصخور تحت ضغطٍ كافٍ للتصدع؛ فيُنتج التصدع غبارًا ناعمًا وغازًا وإلكتروناتٍ حرة، يُحتمل أن تثير الإلكترونات بعدئذٍ جزيئات الهواء، متسببة في جعلها تشعُّ ضوءًا. (٢) قد تحرر الحركة الزلزالية غازاتٍ قابلةً للاشتعال محتجزة في باطن الأرض، والأضواء هي الانبعاثات الناتجة عند اشتعال هذه الغازات، المفترض به أن يَحدث بسبب الشرر بين السطوح أو الجسيمات المشحونة.

(٢١) نار القديس إلمو ووهج الأنديز

ما الذي يسبب الشرر الكهربي الذي يُرى أحيانًا على قمة صاري سفينة أو على رءوس أجسامٍ مستدقَّة أخرى؟ يُسمى هذا الشرر «نار القديس إلمو» أو «الهالة». ما الذي يسبب الوهج النادر جدًّا الذي يُرى أثناء الليل على قمم الأنديز البعيدة؟

الجواب: تنتج نار القديس إلمو عن انهيار كهربي للهواء المحيط بأجسام موصِّلة ومدببة إلى حدٍّ ما، مثل صاري السفينة، أو الهوائي، أو جناح الطائرة. عندما يكون المجال الكهربي في الهواء أقوى من العادي، يمكن أن يكون قويًّا جدًّا عند رأس جسم موصِّل؛ حيث يمكن أن تتجمَّع الشحنات التي في الجسم. وإذا تخطَّت قوة المجال في الهواء المجاور للرأس قيمةً حرجةً معينة، فقد يسحب المجال إلكترونات من جزيئات الهواء، ويسرِّعها. وعندما تتصادم هذه الإلكترونات مع جزيئات الهواء، فإنها تثير الجزيئات وتجعلها تتحرك حركةً أسرع أيضًا. يُنتِج افتقاد الجزيئات المحتوم لحالة الإثارة ضوءًا يمكن رؤيته. وتعني

زيادة سرعة الجزيئات، أن درجة حرارة الهواء تزيد؛ مما قد يؤدِّي إلى سماع أزيز أو هسهسة تُسمَع أحيانًا مع التفريغ الكهربي. ولا تُعَد نار القديس إلمو خطيرة.

ليس لدينا فهْم لوهج الأنديز، ومشاهداته نادرة للغاية. لا أعتقد أنه من نوعية نار القديس إلمو؛ لأن الراصد عليه أن يكون قريبًا بالقدْر الكافي ليرى الضوء الصادر من مثل هذه التفريغات الكهربية الصغيرة النطاق. الأرجح أن يكون تفريغاتٍ واسعة النطاق، ناتجة عن الثلوج المتحركة المشحونة على قمم الجبال.

(٢٢) خطوط الجهد العالي

لماذا تنتقل الطاقة الكهربية بجهدٍ كهربيٍّ عالٍ وشدة تيار منخفضة، لا بشدة تيار عالية وجهدٍ منخفض؟ (لأن الطاقة هي حاصل ضرب الجهد في شدة التيار، يمكن أن تكون الطاقة هي نفسها في الحالتين.) لماذا يتم النقل باستخدام التيار المتردِّد (رمزه AC، وفيه يتباين التيار في الحجم والاتجاه) لا باستخدام التيار المستمر (رمزه DC، وفيه لا يتباين التيار)؟

عندما يتطلب خط جهدٍ عالٍ لنقل الكهرباء الإصلاح، لا تستطيع شركة الخدمات أن توقف تشغيله؛ فربما تقطع الكهرباء عن مدينةٍ كاملة. بل يجب أن تتم الإصلاحات بينما الخطوط «ساخنة» كهربيًّا؛ بمعنى كونها ما تزال نشطة. تتضمن تقنية الإصلاح طائرةً مروحية تحوم إلى جوار خط الجهد العالي، بينما يجلس فنيٌّ على أحد طرفَي المنصة المتصلة بإطار الهبوط تحت المروحية. كيف يتفادى الفني أن يُصعق أثناء اقترابه من الخط ثم إمساكه؟

في بعض المناطق، تُشكِّل خطوط الجهد العالي تهديدًا خطيرًا لمجتمعات الطيور. من البديهي أن الطيور قد تتعرض للأذى أو تُقتل إذا ارتطمت بالخط مباشرةً. لكن ما وجه الخطورة في أن تحطَّ الطيور على خط، أو على عمود أو برج يدعم خطًّا؟

الجواب: عندما تُرسَل الكهرباء خلال أحد الخطوط، يُفقَد جزء من الطاقة الكهربية في صورة طاقةٍ حرارية، في أثناء تصادم الإلكترونات (التي تصنع التيار) مع الذرات والجزيئات على امتداد المسار الموصل، تعادل كمية الطاقة المفقودة بهذه الطريقة، حاصل ضرب مقاومة الخط في مربع شدة التيار؛ ومِن ثَمَّ، لتقليل الفقد، تُنقل الطاقة الكهربية بشدة تيار منخفضة. ولتلبية طلبٍ معين على الطاقة، هذا يعني أن الجهد يجب أن يكون عاليًا؛ ٧٦٥ ألف فولت على سبيل المثال. عند نقطة التوزيع، حيث تُنقل الطاقة إلى المنازل،

يغير المحول الكهرباء إلى جهدٍ أقل (أكثر أمنًا) وإلى شدة تيار أعلى (يمكن تحديدها بقواطع ومصهرات كهربية).

كان المصدر الكهربي الأصلي في الولايات المتحدة هو التيار المستمر، الذي أنتجته شركة توماس إديسون، وبعد ذلك، قدَّم جورج ويستينجهاوس مصدرًا للتيار المتردِّد. كانت المنافسة بين الرجلَين حاميةً نوعًا ما، وكلاهما يحاول إثبات أن طريقته في النقل آمنة أكثر من الطريقة الأخرى. نفَّذ ممثلو إديسون إثباتات عديدة على الملأ، صعقوا فيها الكلاب بالكهرباء بوقاحة، ليُظهروا خطورة التيار المتردد. ومع ذلك، فاز ويستينجهاوس في المنافسة في نهاية المطاف، والسبب الأول في ذلك عملي؛ فقد استطاع أن ينقل الكهرباء بجهدٍ عالٍ، ثم استخدم محولات لتغييره إلى جهدٍ أقل في المنازل. وفي المقابل، لم يستطع إديسون أن ينقل الكهرباء بجهدٍ عالٍ؛ ومِن ثَمَّ كان سيحتاج إلى بناء محطةٍ لتوليد الكهرباء كل أربعة أو خمسة كيلومترات، وهو أمرٌ من الواضح أنه غير عملي.

عندما يقترب فنيٌّ من خط جهدٍ عالٍ «ساخن» ليصلحه، فإن المجال الكهربي المحيط بالخط يجعل جسم الفني له نفس الجهد الكهربي للخط تقريبًا. وللمساواة بين الجهدين، يمدُّ الفني بعد ذلك إلى الخط «عصًا» موصلة؛ فتقفز شرارة بين الخط وطرف العصا البعيد؛ مما قد يسبب خدرًا للذراع لبعض الوقت. ولتلافي الصعق الكهربائي، يجب أن يكون الفني معزولًا عن أي شيء موصول كهربيًّا بالأرض. وللتأكد من استمرار احتفاظ الجسم بجهدٍ كهربيٍّ واحد — هو جهد الخط الذي يجري العمل عليه — يرتدي الفني سترةً موصلة، وقلنسوة وقفازات، جميعها متصلة كهربيًّا بالخط، من خلال العصا.

ربما يستطيع طائر أن يحطَّ بأمان على خط جهدٍ عالٍ، لأن مقاومته للتيار أكبر من مقاومة الجزء من الخط الواقع بين قدميه. ومع ذلك، إذا حطَّ طائر على قربٍ كافٍ من جزءٍ مؤرَّض من عمودٍ أو برجٍ داعم، يمكن أن يتسبب في حدوث «دائرة قصر» في الخط، فيما يُطلق عليه «الومضة الكهربية»؛ إذ يسري التيار من الخط عبْر الطائر وإلى الأرض، وهو ما يقتل الطائر.

وعلى الرغم من أن هذا النوع من الومضة الكهربية ممكن الحدوث، فالنوع الأكثر شيوعًا يتعلَّق بمخلفات الطيور (مزيج البول والبراز الذي يخرجه الطائر). فإذا حط الطائر على جزء من العمود أو برج الدعم المؤرَّض، مثل عارضة، يكون الخط تحته متوترًا؛ فحينئذٍ يمكن لأي إفرازاتٍ سائلة أن تصل الطائر بالخط، مسببةً ومضةً كهربية. ويمكن أن تُمثِّل المخلَّفات مشكلة، حتى لو لم تكن سائلة بصفةٍ خاصة؛ لأنها قد تتراكم

مع الوقت، ثم بسبب المطر أو المطر المتجمِّد أو الثلج أو الجليد الذائب، قد يصل تيارٌ من الماء المخلفاتِ بالخط كهربيًّا. وتُعَد مثل هذه الوصلات الكهربية مشكلة بالفعل في الأماكن التي يوجد فيها الكثير من الثلج والجليد، ولكن مخلفات الطيور تجعل المشكلة أكثر سوءًا؛ لأن قدرة الماء على توصيل الكهرباء تزداد حين يمتصُّ أيونات من المخلفات.

(٢٣) شدة التيار والفولتية والناس

أي هذين يمكن أن يؤذي أو يقتل شخصًا: شدة التيار، أم الجهد الكهربي (الفولتية)؟ كيف يتضرَّر الشخص؟ ما الذي يفسِّر خطورة العمل بالأجهزة الكهربية على أرضيةٍ مبتلة، وهو شيء يتم تحذيرنا جميعًا منه؟

الجواب: يحدث الضرر لجسم الإنسان بسبب مرور التيار (تدفُّق الإلكترونات) عبْر الجسم. يتعلق الجهد الكهربي بالتدفُّق المحتمل للتيار، ويمكن ربطه بالطاقة المتوافرة للتدفق، أو بالقوة التي تدفع الإلكترونات إلى الحركة.

على سبيل المثال، في الولايات المتحدة، إذا لمست يدٌ واحدة سلكًا منزليًّا حيًّا (مكهربًا)، في حين تلمس اليد الأخرى وصلة «مؤرَّضة» (موصلة كهربيًّا بالأرض)، يكون فرق الجهد بين اليدَين ١١٠ فولت؛ مما يمكن أن يسبب تيارًا بين اليدَين. ومع ذلك، فإن كمية التيار تعتمد أيضًا على «مقاومة» الجسم الكهربية للتيار. في العادة تكون المقاومة ناتجة بالدرجة الأولى عن البشرة، والبشرة الجافة ذات مقاومة عالية؛ لذا، عندما «يمسك» كهربائيٌّ عن طريق الخطأ ١١٠ فولت بين يديه، فإن المقاومة العالية للبشرة قد تُبقي التيار فيما دون الكمية القاتلة.

ومع ذلك، إذا كانت البشرة رطبة، أو فيها قروح مفتوحة، أو مغطاة بمادةٍ هلاميةٍ موصلة، يلاقي التيار مقاومةً صغيرة، ويمكن أن تسري كميةٌ خطيرة من التيار في الجسم. بالمثل، إذا وقف شخص على أرضيةٍ مبتلة في أثناء لمسه لسلكٍ حيٍّ (أو جهازٍ كهربيٍّ غير مؤرَّض)، يمكن أن تسري كميةٌ خطيرة من التيار بين يده وقدميه.

وعلى الرغم من أن الاستجابة لمرور التيارات الكهربية عبْر الجسم تختلف بين الناس، والأجناس، وأجهزة التيار المستمر والتيار المتردِّد، فها هي بعض الاستجابات العامة:

- أقل من ٠٫٠٠١ أمبير من التيار: لا تأثير.
- ٠٫٠٠١ أمبير: وخز أو شعور بالحرارة.

- من ٠٫٠٠١ إلى ٠٫٠١٠ أمبير: تقلُّصٌ لا إرادي للعضلات، وألم.
- من ٠٫١٠ إلى ٠٫٥٠ أمبير: رجفانٌ بطيني.
- من ٠٫٥٠ إلى بضعة أمبيرات: يتوقف القلب، لكنه قد يعود إلى العمل إذا توقف التيار.
- أكثر من بضعة أمبيرات: يتوقف القلب، وينقطع التنفس، وتحدث حروق.

إذا سبَّب التيار تقلُّصًا لا إراديًّا للعضلات فقط، فربما يكون التقلُّص في البداية مؤلمًا وحسب. ومع ذلك، إذا كانت الضحية غير قادرة على التخلص من مصدر التيار، فقد تتناقص مقاومة الجسم تدريجيًّا؛ مما يسمح تدريجيًّا بمرور المزيد من التيار عبْر الجسم، ويزيد من الألم والخطورة معًا. وإذا جرت محاولة إنقاذ عن طريق سحب الضحية بعيدًا عن المصدر، فقد ينتهي الأمر بإصابة المنقذ بتقلُّصٍ لا إرادي للعضلات، و«تصلُّبه فوق» الضحية الأولى، مواجهًا التزايد التدريجي نفسه للتيار.

وإذا دخل القلب في حالة رجفانٍ بطيني، فإن انقباضه وانبساطه العشوائيين غير المنتظمين لن يضخَّا الدم، مع ما في ذلك من عواقبَ وخيمةٍ على المخ؛ لذا تبرز الحاجة على وجه السرعة إلى فريق إنقاذ لديه جهاز لإزالة الرجفان.

إذا أُوقف التيار القلب، كما يحدث بالفعل باستخدام جهاز إزالة الرجفان، يمكن للقلب أن يُعيد تشغيل نفسه. ومع ذلك، فإن التنفس الذي يتوقَّف بسبب انقباض عضلات الصدر قد لا يعود إلى العمل من تلقاء نفسه. حينئذٍ ستحتاج الضحية إلى الإنعاش فمًا لفم، ليعود التنفس قبل أن يُدمِّر نقصُ الأكسجين المخَّ.

تحدث الحروق بسبب تصادمات الإلكترونات المتحركة (التي يتألَّف منها التيار) مع الذرات والجزيئات على امتداد مسار التيار في الجسم. إذا كانت الحروق خارجية، يمكن أن يتمَّ علاجها، لكن الحروق الداخلية من الصعب علاجها.

قصة قصيرة

(٢٤) تصرُّفٌ طائش

في وقت متأخر من إحدى الليالي تلقَّى الدكتور ميلتون هيلبيرن، رئيس الفحص الطبي في مدينة نيويورك، مكالمةً هاتفية بشأن أسرةٍ منكوبة: تُوفي أحد أفرادها تلك الليلة في إحدى محطات مترو الأنفاق في المدينة، إثر إلقاء نفسه، على ما يبدو من أحد أرصفة الانتظار،

على القضبان في الأسفل. في ذلك النظام، يكون القضيب الثالث «ساخنًا»، بمعنى أنه يعمل بمنزلة مصدر للكهرباء التي تُشغِّل قطارات مترو الأنفاق. بدا أن الضحية صُعق كهربيًّا بأن لامس القضيب الثالث وأحد القضيبَين الآخرَين على الأقل؛ مما أدَّى إلى تأريض القضيب الثالث والسماح لكميةٍ كبيرة من التيار بالسريان في جسد الضحية.

بناءً على طلب من الأسرة، أجرى الدكتور هيلبيرن فحصًا لجثة الضحية، لكنه لم يجد دليلًا ماديًّا على السكتة الدماغية أو النوبة القلبية؛ مما كان سيدل على أن الضحية انهار لا إراديًّا وسقط على القضبان. لكن مع ذلك، وجد الدكتور حروقًا محيرة على إبهام الضحية وسبابة يده اليمنى، وكذلك على منطقةٍ حساسة من جسده.

بعد ذلك بدأ الدكتور هيلبيرن في التحرِّي حول خلفية الرجل، ليكتشف أن الضحية كان يصير عدائيًّا عندما يسكر؛ ولاستعراض عدائيته، اعتاد أن يتبوَّل علانية. استنتج الدكتور هيلبيرن أن آخر تصرُّفٍ عدائي قام به الضحية كان التبول من رصيف الانتظار على القضبان في الأسفل، بما في ذلك القضيب الثالث، غير مدرك أن البول موصِّلٌ جيد للكهرباء؛ وقد خلَّف سريان التيار عبْر الضحية تلك الحروق التي وُجدت على إبهامه وسبابته والجزء الحساس من جسده.

(٢٥) استخدام الكهرباء في العمليات الجراحية

الجراحة الكهربية إجراءٌ طبي يصدر فيه مسبارٌ موصِّلٌ دقيق تيارًا متردِّدًا عالي التردد على المريض. وهي تسمح للجرَّاح بشق جرح، وتسمح أيضًا في الوقت نفسه بتخثير الأوعية الدموية المكشوفة (بالتسخين) لكيلا يحدث أي نزيف لا داعي له.

يجب أن يكون القضيب الكهربي (وكذلك منطقة الجرح) جزءًا من دائرةٍ كاملة، لكي ينشأ التيار الكهربي. في أحد أنواع العمليات، تتألف الدائرة من المسبار، والمريض، وقطبٍ كهربيٍّ موضوعٍ تحت المريض. في الأيام الأولى لممارسة هذه العملية، كان المرضى ينتهي بهم الحال إلى الإصابة بحروقٍ شديدة! هل تعرف السبب (الواضح ربما)؟

ما الخطورة عند استخدام القطب الكهربي في أحد الأعضاء المتصلة بالجسم من خلال ساقٍ نحيلة، مثلما قد يحدث عندما تُستخدم الجراحة الكهربية في عملية الختان؟

الجواب: يُرَكَّز التيار عمدًا على منطقة الجرح، لكن لا بد أن يُسمَح له بالانتشار على مساحةٍ أكبر بكثير؛ حيث يُوضع القطب الكهربي تحت المريض. وإذا لم يحدث هذا فسيحرق التيار الجسم لدى اتصاله بالقطب الكهربي الموجود بالأسفل؛ لذا فإن القطب

الكهربي السفلي يكون واسع التأثير (لنشر التيار) وهو مُعَدٌّ على هذه الهيئة ليتصل جيدًا مع الجسم، لا ليتصل مع بضع مناطق منه فقط، ولا ليتصل فقط بما حول المناطق العظمية حيث قد يتركز التيار. في الأيام الأولى لممارسة هذه العملية، لم تُتخذ احتياطات السلامة هذه، وكان المرضى يُصابون بحروقٍ بالغة.

عند استخدام القطب الكهربي في أحد الأعضاء المتصلة بساق، يميل التيار إلى التركُّز عند قاعدة الساق، وهي حالة تُعرف باسم «احتشاد التيار»؛ ومِن ثَمَّ يمكن أن تُسخَّن قاعدة الساق وتُدمَّر بسرعة، وقد حدث ذلك في عملياتٍ مأساويةٍ عديدة قبل فهْمنا لخطورة احتشاد التيار.

(٢٦) الحرائق والانفجارات الجراحية

تتخذ الفرق الجراحية احتياطاتٍ استثنائية للتأكد من عدم حدوث حرائق أو انفجارات على مقربة من العملية الجراحية المُجراة على مريضٍ ما، أو فيها. قبل خمسينيات القرن العشرين، كان المخدِّر القابل للاشتعال يُمثِّل خطرًا بالغًا. ومنذ ذلك الحين، تناقصت معدَّلات الحرائق والانفجارات، ولكنها ما زالت لم تصل إلى الصفر. وإليك مثالَين وقعا غير بعيد:

ثَقب القصبة الهوائية: عندما خضع رجلٌ شديد البدانة لعمليةٍ جراحية لعلاج انقطاع النفس الانسدادي النومي (انسداد مجرى الهواء المرتبط بالشخير) تم إجراء ثَقب للقصبة الهوائية؛ لإمداد المريض بالأكسجين، من خلال شقٍّ جرح في القصبة الهوائية في الرقبة. في هذه العملية، يُفتَح جرحٌ في القصبة الهوائية، ويُدخَل أنبوب (أنبوب القصبة الهوائية) لحمل أكسجينٍ صافٍ بنسبة ١٠٠ بالمائة إلى المريض. ومع ذلك، فإن الطبقة الكثيفة من الدهون في رقبة المريض جعلت عملية ثَقب القصبة الهوائية صعبة، واستمر الدم في التسرب. عند نقطةٍ ما، أُغلق أحد الأوعية الدموية النازفة بالقرب من جرح القصبة الهوائية عن طريق التخثير الكهربي، الذي يُطبَّق فيه تيار متردِّد عالي التردد، لتسخين الوعاء الدموي. اشتعلت المنطقة المجاوِرة للجرح على الفور، منتجة لهبًا قفز إلى ارتفاع نصف متر فوق الرقبة. تم إخماد اللهب بتغطيته بأغطية جراحية، ثم إطفاء ما تبقَّى منه باستخدام محلولٍ ملحي. ما الذي سبَّب الحريق؟

استئصال السلائل: في أثناء عملية تنظير القولون، يتم إدخال منظار للقولون عبْر الشرج، للبحث عن السلائل الموجودة في القولون وإزالتها. عندما يُعثَر على إحداها، فإنها

تُطوَّق وتُستأصل عن طريق تسخينها بواسطة تيارٍ مُرسَل عبْر الطوق. وبعد ذلك تُكوى نقطة اتصال السليلة بجدار القولون، باستخدام التيار لمنع أي نزيف. وخلال مرحلة الكي في واحدة من مثل هذه العمليات الروتينية، حدث انفجار مدوٍّ، واندفع لهبٌ أزرق من الطرف الحرِّ لمنظار القولون، لمسافة حوالي متر، وصرخ المريض وحاول مغادرة الطاولة. ما الذي سبَّب الانفجار؟

الجواب: ثَقب القصبة الهوائية: سخَّن التيار المستخدم في التخثير الكهربي الدهون الكثيفة القريبة من منطقة الجرح، التي كانت مغمورة في الأكسجين الصافي؛ وسرعان ما اشتعلت النار في الدهون. في حالاتٍ أخرى، حين حدث اشتعال للنار في عملية ثقب القصبة الهوائية أو في عملٍ جراحي يتضمن الفم أو الأنف أو الحلق، أشعل جهاز تسخين كهربي أو شعاع ليزر أجزاءً من البلاستيك المستخدَم في العملية (يمكن أن يحترق البلاستيك بسهولة في وجود الأكسجين الصافي).

استئصال السلائل: يُنتِج الجهاز الهضمي للإنسان غازَي الهيدروجين والميثان، وهما قابلان للاشتعال والانفجار. على سبيل المثال، ٤٠٪ من الغاز في الأمعاء الغليظة قد يكون هيدروجين وميثان. وكما يعلم الكثير من الشباب، فإن الغاز الذي يُطلَق من الأمعاء قابل للاشتعال، مما يُستخدَم أحيانًا في عروض مسلية. إذا تم الكي الكهربي في وجود الهيدروجين والميثان والأكسجين، فإن التسخين (أو الشرر) قد يؤدي إلى انفجار الغاز، وإحراق الأمعاء وتمزيقها؛ ومِن ثَمَّ، فإن أي عملياتٍ جراحية من هذا النوع تتطلَّب أن تكون الأمعاء فارغة؛ ولذا يصوم المريض لمدة تصل إلى يوم كامل. وإذا ظل هناك قلق، فقد يغمر الجراحُ الأمعاءَ قبل العملية بغازٍ غير قابل للاشتعال.

ويمكن أن تنتج الغازات القابلة للاشتعال في المعدة أيضًا، عندما لا تكون خاليةً جيدًا (يكون بواب المعدة ضيقًا جدًّا، وهي حالة خطيرة تُسمَّى ضيق البواب). وللتخلُّص من بعض الضغط الذي يسببه الغاز في المعدة، قد يتجشأ الشخص. في إحدى الحالات المسجَّلة، أشعل رجل سيجارة، في الوقت نفسه الذي تجشَّأ فيه رغمًا عنه: اندفعت السيجارة من فمه كأنها صاروخ، واحترقت شفاهه وأصابعه. وفي حالة أخرى، كان رجل منحنيًا على طاولة لإشعال سيجارة، باستخدام قدَّاحة شخص آخر، اندفع التجشُّؤ عبْر الأنف، واندفع لهب من فتحتَي أنفه؛ ما جعله يبدو كأنه تنينٌ نافث للنيران آتٍ من القرون الوسطى. وفي حالة ثالثة، فتح جراح المعدة باستخدام مشرطٍ كهربائي، بدلًا من المشرط العادي. وصل

الشرر الناتج عن المشرط الكهربائي إلى الغاز الداخلي، الذي اشتعل حينئذٍ واحترق بلهبٍ أزرقَ ساطع، لمدة عشر ثوانٍ.

(٢٧) بطارية الليمون ووخز حشوات الأسنان

يمكن صنع بطاريةٍ بسيطة وغير مألوفة، بإدخال مجسٍّ من الزنك (مسمار مجلفن) في ليمونة، ثم إدخال عملةٍ نحاسية في شقٍّ طولي في جانب الليمونة. يبلغ فرق الجهد بين المسمار والعملة حوالي ١ فولت. إذا وُصِّلت عدة بطاريات ليمون كهذه «على التوالي» (واحدة بعد الأخرى) مع مصباح صغير، فسيضيء المصباح، ولو بخفوت. وإذا وُصِّلت بمكثف أيضًا، يمكن تخزين الشحنة التي تولِّدها في المكثف، ثم تُوضع لاحقًا في فلاش كاميرا، لإطلاق الوميض. كيف تستطيع بطارية الليمون صنع تيار وفرق جهدٍ كهربي؟ يمكن أيضًا لأطعمة أخرى أن تحلَّ محلَّ الليمون.

لعلك لاحظت إنتاجًا مشابهًا للتيار وفرق الجهد، إذا كانت لديك حشواتٌ معدنية في أسنانك، وإذا مضغت — لسببٍ ما — شريحة معدنية مثل ورق الألومنيوم. ما الذي يُسبِّب الوخز الذي تشعر به في السن وفي أجزاء اللثة القريبة منها؟

تُعَد تغطية ما يتبقى من الطعام بورق الألومنيوم ممارسةً شائعة. ومع ذلك، إذا بقي الطعام في وعاءٍ من الفولاذ المقاوم للصدأ، وإذا تلامس الورق مع الطعام، فقد ينتهي به الأمر بالذوبان في الطعام عند نقاط التلامس هذه. فما الذي يُسبِّب ذلك؟

الجواب: إن ذرات أي مادة لها قابليةٌ معينة لاكتساب إلكترونات أو لفقدها، بالتبادل مع ذراتٍ أخرى مجاورة من مادةٍ مختلفة. عندما يتم إدخال مسمارٍ مجلفن في ليمونة، يميل الزنك الموجود على المسمار إلى فقد إلكترونات، ليتحوَّل إلى أيونات زنك موجبة الشحنة، وهناك جهدٌ كهربيٌّ مُعيَّن يرتبط بهذه القابلية. بالقرب من العملة النحاسية في الليمونة، تميل أيونات الهيدروجين في عصارة الليمون إلى أن تصبح ذرات هيدروجين مُحايدة، وهناك جهدٌ كهربي مُعيَّن يرتبط بهذه القابلية. إذا رُبط المسمار كهربيًّا بالعملة، باستخدام سلك، فإن الإلكترونات التي يفقدها الزنك عند المسمار يمكن أن تتحرَّك عبْر السلك، لتكتسبها أيونات الهيدروجين؛ وبناءً على ذلك، تستطيع بطارية الليمون هذه أن تُولِّد تيارًا (تدفقًا للإلكترونات) عبْر السلك، وهذا التيار يُحرِّكه فرق جهد كهربي بين المسمار والعملة المعدنية (أو بالأحرى عصارة الليمون القريبة من العملة).

يحدث فَقدٌ واكتسابٌ مشابه للإلكترونات عندما يلمس ورق الألومنيوم حشوةَ أسنانٍ معدنيةً، في وجود اللعاب بين السطحَين في أماكنَ عديدة. تعمل التركيبة «ورق – لعاب – حشوة» عمل البطارية، بحيث ترسل تيارًا عبْر نقاط التماس المباشر بين الورق والحشوة، أو عبْر العلكة المحيطة بالنقطة.

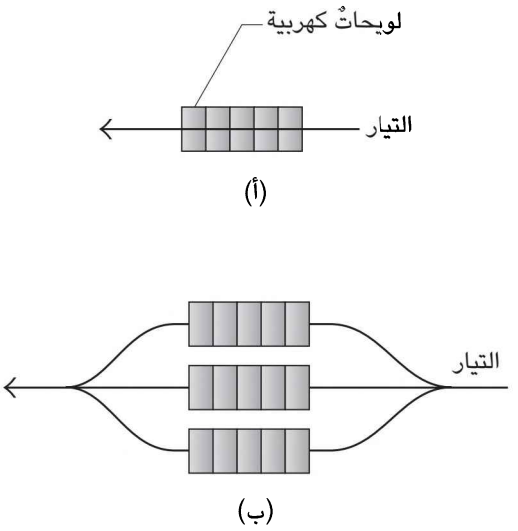
تحدث عمليةٌ مشابهة في حالة الفولاذ المقاوِم للصدأ وورق الألومنيوم. تستطيع التركيبة «فولاذ – طعام – ورق» أن تعمل عمل البطارية، مرسلةً تيارًا عبْر نقاط التلامس المباشر بين الورق والإناء الفولاذي (بامتداد حوافِّ الإناء على الأرجح؛ حيث عادةً ما يُضغط الورق عليها)؛ فبينما يتأكسد الورق، وتُحوَّل جزيئات الألومنيوم إلى أيونات ألومنيوم، تذوب الأيونات في الطعام، خاصةً إذا كان الطعام شبيهًا بصوص الطماطم. ها هي نصيحة لتخزين الطعام: استخدم غطاءً بلاستيكيًّا بدلًا من ورق الألومنيوم، أو وعاءً بلاستيكيًّا بدلًا من الوعاء الفولاذي المقاوِم للصدأ.

(٢٨) السمك والأنقليس الرعَّاد

إن الأسماك، مثل الرعَّاد العملاق من نوع «توربيدو نوبيليانا» الذي يعيش في شمال الأطلنطي، والأنقليس الرعَّاد من نوع «إلكتروفوريس» الذي يعيش في الأمازون؛ يمكنها أن تُنتِج تيارًا كهربيًّا يكفي لقتل فريستها أو صعقها، أو حتى لصعق إنسان (على سبيل المثال، يفرغ سمك التوربيدو الكهرباء في نبضةٍ شدَّتُها ٥٠ أمبير، عند حوالي ٦٠ فولت). في سالف الأزمان، كانت الأسماك الرعَّادة تُستخدم أحيانًا لأغراضٍ طبية، مثلما كانت سمكة رعَّادة توضع مباشرةً على موضع الألم، في حالة الصداع المزمن (نوع بدائي من العلاج بالصدمة). كانت الخصائص الكهربية للأسماك معروفة لقدامى الصيادين، الذين سرعان ما عرفوا أنواع الأسماك التي لا ينبغي جذبها بأيدٍ عارية، ولا التعامل معها باستخدام حربة موصِّلة.

يُنتِج كثير من الأسماك الأخرى مجالاتٍ كهربية، لتشقَّ طريقها في المياه المعتمة أو الخافتة الإضاءة، أو لتحديد مواقع الأشياء، بما في ذلك بعضها لبعض. في الحقيقة، هذه الأسماك تستطيع تغيير مجالها الكهربي بهذه الطريقة لتعرِّف نفسها. كيف يستطيع حيوان أن يُنتِج تيارًا، وجهدًا كهربيًّا، ومجالًا كهربيًّا؟

الجواب: يمكن تتبُّع مصدر التأثيرات الكهربية للأسماك، وصولًا إلى خلايا تُعرف باسم «اللويحات الكهربية»، وهي شبيهة بالخلايا العصبية والعضلية. عادةً ما يُمرِّر



شكل ٥-٤: بند ٥-٢٨: (أ) سلسلة من خمس لويحاتٍ كهربية داخل أنقليس رغَّاد. (ب) نظامٌ متوازٍ مكوَّن من ثلاث سلاسل من اللويحات الكهربية.

غشاء اللويحات الكهربية أيونات البوتاسيوم، لكنه لا يُمرِّر أيونات الصوديوم؛ ولذا تختلف تركيزات الصوديوم والبوتاسيوم عبْر الغشاء الخلوي، ولأن هذه الأيونات مشحونة؛ يُنتِج هذا الفرق في التركيز فرقًا في الجهد الكهربي عبْر الغشاء.

عندما تريد السمكة تفريغ شحنتها، تُغيِّر نبضةٌ عصبيةٌ الغشاءَ بحيث يستطيع تمرير أيونات الصوديوم؛ فيتغير على الفور الفرق في الجهد الكهربي عبْر الغشاء، وتتدفَّق الجسيمات المشحونة من خلاله (بمعنى أن هناك تيارًا يعبر الغشاء). فرق الجهد الكهربي وكمية التيار كلاهما صغير المقدار. ومع ذلك، يمكن أن تمتلك السمكة عدة آلاف من اللويحات الكهربية، موصَّلة على التوالي (واحدةً بعد الأخرى) (شكل ٥-٤أ) لتكوين الجهد الإجمالي وشدة التيار الإجمالية.

يُفترض بالتيار الإجمالي أن يغادر السمكة من أحد طرفيها (الرأس أو الذيل)، ويجتاز الماء (ومِن ثَمَّ قد يعبر فريسة أو إنسانًا)، ثم يدخل إلى السمكة من جديد من

الطرف المقابل. ومع ذلك، إذا امتلكت السمكة سلسلة واحدة فقط من اللويحات الكهربية، فإن كمية التيار الإجمالية التي تُنتجها السمكة قد تصعقها أو تقتلها هي نفسها. ولتجنُّب هذا المصير، تملك السمكة مئات السلاسل الموصَّلة على التوازي (شكل ٥-٤ب)، لكي يتوزَّع التيار الإجمالي بالتساوي بين هذه المسارات المتوازية. بناءً على ذلك، يكون التيار على امتداد أحد المسارات عبْر السمكة، غير كافٍ لإيذائها.

تختلف الأسماك الرعَّادة التي تعيش في المياه المالحة، عن تلك التي تعيش في المياه العذبة؛ لأن المياه المالحة توفِّر مقاومةً أقلَّ بكثيرٍ للتيار الكهربي؛ ولذلك تحتاج أسماك المياه المالحة عددًا أقل من اللويحات الكهربية في كل سلسلة، للحصول على تيارٍ كافٍ يشقُّ المياه المحيطة ليصعق الفريسة أو يقتلها.

لا يلجأ السمك الرعَّاد الضعيف إلى إرسال نبضةٍ من التيار عبْر المياه المحيطة؛ وبدلًا من ذلك، تُولِّد اللويحات الكهربية الخاصة بها ببساطةٍ مجالًا كهربيًّا ضعيفًا في الماء، على سبيل الاستشعار. ولأنها شديدة الحساسية لقوَّة هذا المجال، تستطيع أن تعرف عندما تدخل أجسامٌ أخرى إلى هذا المجال، مُسبِّبة تغييرًا فيه. وبالإضافة إلى ذلك، تستطيع الأسماك الرعَّادة تغيير المجال بطريقةٍ مميزة حتى تتواصل مع الأسماك الأخرى التي تنتمي إلى نوعها نفسه.

(٢٩) الشحن بالغبار والرمال والثلوج المثارة

كيف يمكن للثلج المثار أن يُكهرِب سياجًا سلكيًّا؟ في بعض الأحيان، يجمع سياجٌ سلكيٌّ طويل كميةً كبيرة من الكهرباء، لدرجة أن الشخص الذي يلمسه يتلقَّى صدمةً كبيرة، وقد يصل به الأمر إلى أن يسقط أرضًا.

عندما تثير الرياح الغبار أو الرمال أو الثلوج بشدة، كما في عواصف الغبار والدوامات الترابية والأعاصير، لماذا تُشحَن المواد بشحنةٍ عالية؟ في حالاتٍ قليلة نظر فيها الناس داخل قُمع إعصار وعاشوا ليحكوا ما حدث، وصفوا باطنًا مضاءً بضوءٍ متلألئ، يخالطه تفريغاتٌ طويلة للشحنات.

ما السبب وراء أمثلة الكهربة العديدة هذه؟

الجواب: إن العملية التي تصبح بها الثلوج المثارة مشحونة ليست مفهومة تمامًا بالنسبة لنا، لكن ها هي الطرق الرئيسية: إذا تصادمت بلورتان متعادلتان كهربيًّا لهما

درجتا حرارةٍ مختلفتَين، تصبح البلورة الأدفأ مشحونة بشحنةٍ سالبة، وتصبح البلورة الأبرد مشحونةً بشحنةٍ موجبة. وإذا كان طرفا بلورةٍ ثلجيةٍ متعادلة كهربيًّا مختلفَين في درجة الحرارة، يكون الطرف الأدفأ مشحونًا بشحنةٍ موجبة، والطرف الأبرد مشحونًا بشحنةٍ سالبة؛ ومِن ثَمَّ، فإذا كُسرت البلورة الثلجية في أحد التصادمات، فإن القطعتين تفترقان، وكلتاهما تحمل شحنةً ذات إشارةٍ مخالفة للأخرى. وبمجرَّد شحن البلورات، فإنه يمكنها شحن السياج عبْر لمسه.

بشكلٍ عام، فإن الغبار الذي يُثار في الهواء نتيجة عاصفة أو دوامة ترابية (زوبعة) أو إعصار، يصبح مشحونًا عبْر الاتصال بينه وبين الأرض وحبيبات الغبار الأخرى (يكفي الاتصال بين جسمين لجعل الإلكترونات تنتقل من جسم إلى الآخر)، ويعتمد كون الغبار مشحونًا بشحنةٍ موجبة أو سالبة، على طبيعة كلٍّ من الغبار والأرض. في بعض الحالات، يفقد الغبار إلكترونات حينما يلمس الأرض؛ ومِن ثَمَّ يصبح مشحونًا بشحنةٍ موجبة، وفي حالاتٍ أخرى يكتسب الغبار إلكترونات؛ ومِن ثَمَّ يصبح مشحونًا بشحنةٍ سالبة. وبمجرَّد أن يصير محمولًا في الهواء، يمكن أن تتبادل حبيبات الغبار الشحنات من خلال التصادمات.

يمكن للدوامات الترابية على المريخ أن تكون أكبر بكثير من تلك التي على الأرض؛ ولذا قد تكون مشحونة بقدْرٍ أكبر بكثير. ومع ذلك، فهناك حدٌّ لمقدار الشحنة الذي قد تحمله دوامةٌ ترابية. وها هو برهان ذلك: بينما تزداد كمية الشحنة، يزداد أيضًا المجال الكهربي عند سطح الدوامة الترابية. في نهاية المطاف يصبح المجال الكهربي قويًّا جدًّا، إلى حد أن السطح يبدأ في إطلاق الشرر (بمعنًى آخر: يبدأ التفريغ)، مما يستنزف إلكترونات السطح. وبمجرَّد الوصول إلى مرحلة إطلاق الشرر، فإن أي شحنةٍ مُكتَسبة عبْر حركة الدوامة الترابية، تُفقَد فورًا على هيئة شرر.

لا يُشحَن الإعصار فقط عبْر الغبار الذي يثيره، ولكن أيضًا بالشحنات الكهربية الموجودة في العاصفة الرعدية الكبيرة التي أنتجته؛ ولذلك فمن المرجَّح أن يكون الضوء الذي يُرى في أقماع الأعاصير ناتجًا عن التفريغات بين جيوب الغبار المشحونة وبين الحطام. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون بعض الأضواء المصاحبة للإعصار مجرد برقٍ عادي. ومع ذلك، فإن الفكرة القديمة القائلة إن الإعصار يسبِّبه تدفُّقٌ مستمر تقريبًا للتيار بين السُّحب والأرض جرى التخلي عنها.

(٣٠) التفريغ الكهربي الشبيه بالبرق فوق البركان

إن الأعمدة التي تتصاعد من بعض البراكين الثائرة، مثل بركان ساكوراجيما في اليابان، تُولِّد تفريغاتٍ كهربيةً تومض فوق فوهة البركان، مضيئة السماء ومرسلة موجاتٍ صوتية تشبه الرعد. ما الذي يسبِّب عروض الصوت والضوء هذه؟

الجواب: تَنتُج التفريغات الكهربية عن جسيماتٍ مشحونةٍ محمولة في الهواء بفعل الأعمدة التي تبرز من البركان أو تُقذَف منه. قد تسيطر على العمود شحنةٌ موجبة، ولكن عادة ما يحتوي العمود على مناطقَ مشحونة بشحنةٍ سالبة. يمكن أن تفرغ بعض هذه المناطق شحناتها إلى بعضها الآخر، أو إلى الأرض، ويمكن للتيار الناتج عن التفريغ أن يسخِّن الهواء بشدة، إلى حد تمدد الهواء بسرعةٍ أكبر من سرعة الصوت؛ ويرسل مثل هذا التمدُّد موجةً صدمية تصل إلى الراصد (الذي يُؤمل أن يكون على مسافةٍ آمنة) على هيئة انفجار مدوٍّ.

هناك مؤثراتٌ عديدة قد تكون مسئولة عن وجود الجسيمات المشحونة في الأعمدة البركانية: (١) إذا تلاقت المياه فجأة مع حممٍ منصهرة، فيمكن أن تتجمَّع قطرات الماء، فيما يُسمى «تأثير لايدنفروست»، وتطفو على طبقة من البخار. تنقسم أي قطرةٍ كبيرة من هذا النوع إلى قطراتٍ مشحونة أصغر حجمًا، يحملها بعد ذلك إلى الغلاف الجوي العمود المندفع من الهواء الساخن وبخار الماء. (٢) تصبح الصهارة مشحونة عندما تتكسر، إما باصطدامها بالماء، أو بشقِّها للحافة العلوية للأنبوب البركاني، ثم تُقذَف في العمود.

بمجرد أن ترتفع الجسيمات المشحونة في الهواء، يمكن للاصطدامات أن تنقل الشحنة من جسيمٍ إلى آخر، أو حتى أن تسبب شحنًا إضافيًّا، مثلما يحدث في الغبار الذي تثيره الرياح.

(٣١) التلوث البكتيري في العمليات الجراحية

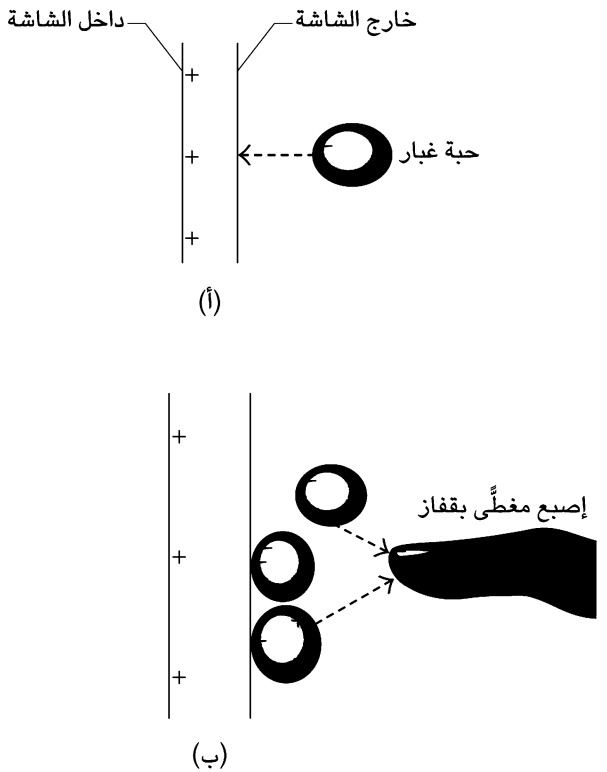
تتخذ الفِرَق الجراحية إجراءات استثنائية لمنع إصابة المريض بالعدوى البكتيرية؛ توضع الكمامات، وتُنظف الأيدي جيدًا وتُغطَّى بالقفازات، وتُعقَّم الأدوات بتعريضها لدرجةِ حرارةٍ عالية وبغمرها في الكحول. اكتُشف حديثًا مصدرٌ مخادع للبكتيريا في غرف العمليات الجراحية، وهو مصدر غفلنا عنه لسنوات. ها هو أحد الأمثلة على هذا الموضوع: في عمليةٍ جراحية بالمنظار، يتحكم الجرَّاح في جهاز ألياف ضوئية، يدخل الجسم عبْر

جرح أو عبْر الحلق أو القولون، ينقل جهاز الألياف الضوئية صورة للداخل، ويعرضها على شاشة عرض. يستطيع الجراح أن يعزز جهاز الألياف الضوئية، أو أن يستخدم الأدوات الجراحية المتصلة به، على سبيل المثال، يمكن تطويق سليلة واستئصالها. تتمثل إحدى مميزات استخدام جهاز الألياف الضوئية في أن الجراح الرئيسي يستطيع تنسيق جهود أعضاء الفريق، من خلال الإشارة إلى الأهداف على الشاشة؛ حيث يمكن للجميع بسهولة أن يروا سير العملية.

يكمن في مكانٍ ما من هذه العملية مصدرٌ خفيٌّ للتلوث البكتيري. هل تستطيع اكتشافه؟

الجواب: لتكوين صورة على شاشة العرض، خاصة في الأجهزة التقليدية، تُطلَق الإلكترونات نحو الشاشة من مؤخرة الجهاز. ولجذب هذه الإلكترونات، يتم الإبقاء على الشاشة مشحونةً بشحنةٍ موجبة. تجذب الشاشة المشحونة كذلك جسيماتٍ عالقةً في الهواء تطفو في أنحاء غرفة العمليات، مثل الوبر والغبار وخلايا الجلد. إذا كان أحد الجسيمات المحمولة في الهواء مشحونًا بشحنةٍ سالبة، فإنه يلتصق بالسطح الخارجي للشاشة، وأما إذا كان بدلًا من ذلك متعادلًا كهربيًّا، فيمكن أن يُسحَب بعض إلكتروناته إلى جانب الجسيم الأقرب إلى الشاشة؛ ما يمنح الجسيم «شحنة مستحثة»؛ حيث يكون أحد الجانبين سالب الشحنة، والآخر موجب الشحنة (شكل ٥-٥أ). يُسحَب الجزء السالب نحو الشاشة المشحونة بشحنةٍ موجبة، بينما يُبعَد الجزء الموجب عنها. ولأن الجانب السالب أقرب إلى الشاشة، فإن السحب نحو الشاشة يربح في لعبة شد الحبل هذه.

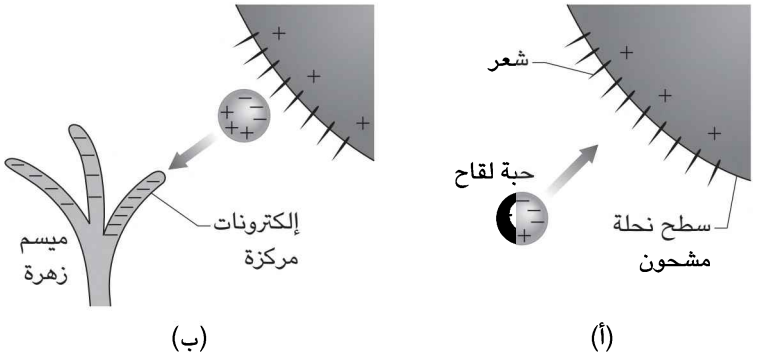
ولأن العديد من الجسيمات التي تتجمَّع على سطح الشاشة الخارجي تحمل بكتيريا، تصبح الشاشة ملوثةً بالبكتيريا. لنفترض أن أصابع الجراح الموضوعة في القفازات تقترب لتكون على بُعْد سنتيمترات قليلة من الشاشة، مشيرة إلى جزءٍ مُعيَّن من الصورة في أثناء شرح مسألةٍ جراحية لباقي الفريق مثلًا؛ تسحب الشاشة المشحونة بشحنة موجبة إلكترونات من داخل الأصابع إلى الأنامل (شكل ٥-٥ب)، ثم تتسبب الأنامل المشحونة بشحنةٍ سالبة في تجمُّع الجسيمات (المحمولة في الهواء أو التي على الشاشة) على القفازات عند أطراف الأصابع؛ وعندما يلمس الجراح المريض بعد ذلك بقفازاته الملوَّثة، تنتقل البكتيريا في النهاية على جسم المريض أو (الأسوأ) إلى داخله. ولتجنُّب هذا الخطر، يُحذَّر الجراحون اليوم من تقريب أصابعهم من شاشة الفيديو.



شكل ٥-٥: بند ٥-٣١: (أ) مقطعٌ عرضيٌّ لشاشة عرض موصَّلة بجهاز فيديو. تنتج الشاشة المشحونة بشحنةٍ موجبة شحنةً مستحثة على حبة غبار قريبةٍ متعادلة كهربيًّا. (ب) إصبع مغطًّى بقفاز (ليس موضحًا بالأبعاد الحقيقية) يوجد بالقرب من الشاشة، يملك شحنةً مستحثة، ويستطيع جذب حبيبات الغبار من الهواء ومن الشاشة.

(٣٢) النحل والتلقيح

يساعد النحل في تلقيح الأزهار من خلال جمع حبوب اللقاح من زهرةٍ ما وحملها إلى زهرةٍ أخرى. وليست هذه العملية عارضة؛ بمعنى أن النحلة لا تحتكُّ بحبوب اللقاح من قبيل الصدفة، وبدلًا من ذلك، فإن حبوب اللقاح تقفز في الواقع إلى النحلة عند الزهرة الأولى، ثم تقفز منها عند الزهرة الثانية. فما الذي يتسبب في جعل حبوب اللقاح تقفز؟



شكل ٥-٦: بند ٥-٣٢: (أ) سطح النحلة المشحون بشحنةٍ موجبة يفصل الشحنات في حبة اللقاح. تقفز الحبة إلى النحلة. (ب) تقفز الحبة من النحلة إلى الإلكترونات المركَّزة على ميسم الزهرة.

الجواب: بعدما تغادر النحلة خليتها، عادةً ما تصبح مشحونة بشحنةٍ موجبة خلال طيرانها عبْر الهواء. وعندما تحوم النحلة بالقرب من مئبر زهرة (شكل ٥-٦أ)، ويكون المئبر متعادلًا كهربيًّا، فإن المجال الكهربي الناجم عن النحلة ينتج «شحنةً مستحثة» في بعض حبيبات اللقاح على الزهرة. هذه الحبة متعادلة كهربيًّا، لكن المجال الكهربي للنحلة يعيد توزيع شحنة الحبة؛ فينتقل بعض إلكتروناتها إلى الجانب المواجه للنحلة، ليكون قريبًا بقدْر الإمكان من النحلة المشحونة بشحنة موجبة؛ تترك هذه الحركة الجانب الآخر من الحبة مشحونًا بشحنة موجبة. ما زالت الحبة متعادلة كهربيًّا، لكنها الآن تملك شحنةً سالبة على جانب، وشحنةً موجبة على الجانب الآخر.

يُسحَب الجانب السالب نحو النحلة، بينما تدفع النحلة الجانب الموجب بعيدًا عنها. ولأن الجانب السالب أقرب إلى النحلة، ترجح كفة السحب، وتقفز الحبة عبْر الهواء لتستقر على النحلة (إنها في الواقع تستقر على شعرات النحلة، وإذا لمست جسم النحلة المشحون، فستفقد إلكتروناتها؛ حينئذٍ لن يتبقَّى لحبة اللقاح إلا الموجبة فقط؛ وبذلك ستُطرد من على النحلة، ولن تتم رحلتها إلى الزهرة التالية).

يتم توصيل حبوب اللقاح إلى الزهرة التالية عندما تقترب النحلة من ميسم الزهرة، الذي يكون موصلًا كهربيًّا بالأرض. يسحب مجال النحلة الكهربي إلكترونات من الميسم،

لتكون قريبة بقدْر الإمكان من النحلة؛ ما يجعل أعلى الميسم مشحونًا بشحنةٍ سالبة (شكل ٥-٦ب). ما زالت حبة اللقاح على النحلة مسحوبة نحو الشحنة المنتشرة على النحلة، لكنها الآن تُسحَب بقوةٍ أكبر نحو الشحنة المركَّزة عند قمة الميسم؛ لذا، تقفز الحبة من النحلة إلى الميسم، ملقِّحة الزهرة.

قصة قصيرة

(٣٣) النمل الناري والأجهزة الكهربائية

عندما انتقل النمل الناري الأحمر، واسمه العلمي «سولينوبسيس إنفيكتا»، شمالًا إلى الولايات المتحدة قادمًا من أمريكا الوسطى، أخذت أسراب من النمل تهاجم الأجهزة الكهربية وتُدمِّرها في الأماكن المفتوحة (مثل صناديق التحكم في إشارات المرور الضوئية) وما جاورها من مبانٍ. تمثَّل أحد التفسيرات الأولية في أن النمل الناري كان منجذبًا إلى المجالات الكهربية أو المجالات المغناطيسية (أو كليهما) الخاصة بالدوائر الكهربية؛ كان ذلك مثيرًا للاهتمام للغاية؛ إذ كيف يمكن لنملة أن ترصد أيًّا من نوعي المجال؟

ومع ذلك، عندما تمعَّن الباحثون في سلوك النمل، اكتشفوا تفسيرًا أبسط بكثير: فبينما يزحف النمل عشوائيًّا إلى الصناديق الكهربية، يحدث مصادفة أن تقصر نملة الدائرة، من خلال توصيلها بين سلكَين عاريَين، أو بين سلكٍ عارٍ والأرض. إما أن تموت النملة، أو تستشيط غضبًا (يملك النمل الناري بالفعل مزاجًا حادًّا). وسواء كانت النملة حية أو ميتة، فإنها تطلق موادَّ كيميائيةً تثير النمل القريب منها، الذي تتجه أسرابه حينئذٍ إلى النملة الأولى ويصبح مُكهرَبًا أيضًا. في النهاية يصبح هناك عددٌ كبيرٌ جدًّا من النمل الميت، الذي يقصر الجهاز، إلى أن يطفئ قاطع الدائرة التيار، أو يُدمَّر الجهاز بسبب كمية التيار الكبيرة جدًّا.

(٣٤) التغليف البلاستيكي للطعام

عندما تَلفُّ غلافَ طعامٍ بلاستيكيًّا حول إناءٍ زجاجي أو بلاستيكي، وتضغط الغلاف على الإطار، لماذا يظل الغلاف في مكانه؟ ربما تستطيع أيضًا أن تقلب الإناء رأسًا على عقب، دون سكب المحتويات، مثلما نرى أحيانًا في إعلانات التلفزيون التجارية.

الجواب: على الأرجح يحتوي غلاف الطعام البلاستيكي، على مناطقَ مشحونةٍ، عندما تسحب قطعة من لفافة التغليف من البكرة الموجودة في علبة التوزيع. تُركت الشحنات هناك أثناء عملية التصنيع: بحيث إن المناطق التي فيها زيادة في الإلكترونات، مشحونة بشحنةٍ سالبة، والمناطق التي فيها غياب للإلكترونات مشحونة بشحنةٍ موجبة. المناطق المشحونة بشحناتٍ ذات إشاراتٍ مختلفة، يجذب بعضها بعضًا، وهذا هو أحد الأسباب التي تجعل لفافة البلاستيك تنطبق ملتصقة على نفسها (وهو ما يجعلها غير قابلة للاستخدام) أو ملتصقة بالبكرة.

عندما تُوضع لفافة تغليف الطعام على إطار إناء، تنتقل الشحنة بين السطحين، فيما يُعرف بـ «التكهرب بالتلامس». على سبيل المثال، قد تَسحب لفافة تغليف الطعام بعض الإلكترونات من الإطار إلى الغلاف، تاركة ذلك الجزء من الإطار مشحونًا بشحنةٍ موجبة؛ حينئذٍ، فإن الغلاف المشحون بشحنةٍ سالبة، والإطار المشحون بشحنةٍ موجبة، سيجذب أحدهما الآخر.

بالإضافة إلى ذلك، فإن نوعًا من قوة الجذب بين الجزيئات، تُسمى «قوة فان دير فالس»، يمكن أن يعمل بين الإطار والغلاف. تأتي هذه القوة نتيجة تفاعل يُسبِّب فيه انفصالٌ طفيف للغاية بين الشحنات الموجبة والسالبة في أحد الجزيئات على أحد السطحين؛ انفصالًا مشابهًا للشحنات في الجزيء الأقرب إليه، على السطح الآخر. ويُقال إن كل انفصال للشحنات هو «قطبيةٌ ثنائيةٌ كهربائية»، وإن القطبين على السطحين يجذب أحدهما الآخر. وعلى الرغم من ضعف هذا الجذب فإنه يستطيع الإبقاء على الغلاف ملتصقًا بالإطار، أو يسبِّب انكماش الغلاف على نفسه.

(٣٥) الذباب على السقوف، والأبراص على الجدران

تستطيع الذبابة أن تلتصق بسطحٍ أملس؛ لأنها تُفرز زيتًا يلتصق بكل من السطح ورجل الذبابة. وبعض الخنافس يمكنها أن تلتصق بسطحٍ أملس من خلال آلية امتصاص. ولكن ماذا عن البُرص؟ إن أقدامه جافة ولا يمكنها أن تقوم بالامتصاص. ومع ذلك فإن البرص يمكنه أن يجري على جدار أملس، وأن يزحف على بعض السقوف، متحركًا إلى الأمام أو إلى الخلف. فكيف يُثَبِّت نفسه على السطح، وكيف يخلع نفسه بسرعة لكي يستطيع الجري عبْر السطح؟

الجواب: تحتوي قدم البرص على حوالي نصف مليون شعرة، تُعرف باسم «الهُلَب». وتحتوي كل هُلبة على مئات النتوءات ذات النهايات المثلَّثة أو على شكل ورقة شجر، تُعرف باسم «المِبْسَط» (لأن لها شكل المِبْسَط). عندما يضغط البرص بهلبة على الجدار، تلتصق كل هذه الشعيرات بالجدار، بقوة تُعرَف باسم قوة فان دير فالس؛ تنتج هذه القوة عن التفاعل الكهربائي الذي يسبِّب فيه انفصالٌ طفيف بين الشحنات الموجبة والسالبة على أحد سطحين؛ انفصالًا مماثلًا للشحنات الموجبة والسالبة على السطح الآخر. يُقال إن كل انفصال للشحنات هو «قطبيةٌ ثنائية كهربية»، وإن القطبين على السطحين يجذب أحدهما الآخر. يحدث هذا الترتيب في مليون نقطة أو أكثر عندما يضع البُرص قدمه على أحد الجدران. وعلى الرغم من أن كل قوة فان دير فالس ضعيفة على حدة، فإن مجموع هذه القوى على القَدم يستطيع دعم البُرص. وحتى لو كان الجدار وعرًا على المستوى المجهري، تضع القدم عددًا كافيًا من الشعيرات على الجدار لدعم البُرص.

تتخذ كل هُلبةٍ زاويةً معينة مع الجدار، ويحدث الالتصاق عندما تبقى هذا الزاوية صغيرة نسبيًّا. ولكي يزيل التصاق قدمه أثناء الجري، يخلع البُرص الهلبة عن الجدار، من خلال الابتعاد عنه بما يزيد الزاوية، ثم تبتعد الشعيرات واحدة بعد الأخرى، محررة الهلبة.

(٣٦) فطيرة المارينج

عند عمل فطيرة المارينج، يُخفَق بياض البيض أولًا، إلى أن يتماسك بعض الشيء، ثم تُخفَق معه حفنة من السكر، ويكون المزيج جاهزًا عندئذٍ، ليُضاف إلى العجين ويُخبز.

لماذا تُفسِد أيُّ كمية من صفار البيض، وإن قلَّت، فطيرةَ المارينج؟ لماذا يُخفَق بياض البيض، ولماذا يتماسك عندما يُخفَق؟ ولماذا يُفسِد الخفق الزائد عن الحد فطيرةَ المارينج؟

الجواب: يتكوَّن بياض البيض من عدة أنواع من البروتينات، وهي جزيئاتٌ ضخمة ذات بِنًى معقَّدة ثلاثية الأبعاد. يتمثل أحد أهداف خفق البياض في حل تلك الجزيئات جزئيًّا، عن طريق كسر بعض نقاط تجاذبها الداخلية الأضعف من غيرها. تتضمن الروابط الأضعف الرابطة الأيونية (حيث تَجذِب الشحنات ذات الإشارات المتخالِفة بعضها بعضًا)، وقوى فان دير فالس (حيث الشحنات الموجبة والسالبة المنفصلة في مكانٍ واحد في الجزيء، تجذب شحناتٍ موجبةً وسالبةً منفصلة في مكانٍ مجاور)، وروابط هيدروجينية

(حيث يعمل الهيدروجين عمل الرابطة البينية لإبقاء ذرتَين معًا). وبمجرد حل البروتينات يرتبط بعضها ببعض، مكونة شبكة.

ثمَّة سببٌ آخر لخفق بياض البيض وهو احتجاز الهواء في هذه الشبكة. وهنا يمكن للصفار أن يفسد الحلوى؛ لأنه ثقيل جدًّا وأكثر لزوجة من أن يسمح للهواء الكافي بأن يُضاف. يريد الطاهي أن يضع المارينج في الفرن وفيه الكثير من فُقَّاعات الهواء؛ حيث ستمدد الحرارة هذه الفُقَّاعات، جاعلة الحلوى أكثر خفة. إذا خُفق بياض البيض بالطريقة الصحيحة، تُحاط فُقَّاعات الهواء بشرائح صغيرة من الماء، ترتبط بشبكة بياض البيض. ستتمدد هذه الشرائح مع فُقَّاعات الهواء المتمدِّدة، مبقية على الهواء محتجزًا في المارينج. ومع ذلك، إذا خُفق بياض البيض أكثر من اللازم، ينفصل الماء عن البروتينات، وتصبح الشبكة شديدة الجمود (مترابطة بدرجة كبيرة) بما لا يسمح بتمددها في الفرن بصورة ملائمة. وحينئذٍ فإن فُقَّاعات الهواء تنفتح فحسب؛ مما يتسبب في هبوط المارينج، وهو أمرٌ كابوسي بالنسبة للطاهي. ولتجنُّب الخفق المفرط، يتوقَّف الطاهي الخبير عن خفق بياض البيض عندما يفقد لمعانه ويصبح على وشك تشكيل قطرات من الماء.

إذا خُفق بياض البيض في وعاءٍ نحاسي، يأخذ البياض بعض ذرات النحاس، التي ترتبط بأجزاء الكبريت. ولا تستطيع هذه الأجزاء حينئذٍ أن تندمج في شبكة البروتين؛ مما يمنع الشبكة من التماسك القوي، إلى حد أنها تطرد الماء.

(٣٧) صوص برنيز

يُعَدُّ صوص برنيز صعب التحضير بصورةٍ واضحة، ويمكن أن «يسوء» تحضيره، حتى لو قام الطاهي بعمل كل شيء بالطريقة الصحيحة. إنه مزيجٌ دافئ، يتكون بصورةٍ رئيسية من الخل المخفَّف والنبيذ وصفار البيض والزبد، ويُقدَّم مع اللحوم الحمراء المشوية والدجاج والسمك والبيض المسلوق بدون قشر. يُفترض بالصوص أن يكون خليطًا متجانسًا من مكوناته، لكنه قد يفسد إذا انفصل الزبد فجأة عن باقي المكونات، مكوِّنًا تكتلات سيئة المنظر. السؤال هنا هو: لماذا يتكتل الزبد عندما يفشل تحضير الصوص؟ وما الذي يمنع الزبد عادةً من التكتل؟

الجواب: يمكن النظر إلى الصوص بإحدى طريقتين عامتين: الأولى أنه «معلق غرواني» من جسيماتٍ شبه صلبة (دهن الزبد) في سائل مكوَّن بصورةٍ أساسية من الماء وحمض الخليك (الخل). والثانية أنه أيضًا «مستحلب»؛ أي إنه انفصال لسائلَين غير

امتزاجيَّين (السوائل التي لا تختلط معًا، وهي هنا دهن الزبد والماء)، مع تشكيل دهن الزبد لقطرات صغيرة في الماء.

في النموذج الغرواني، تميل قطرات الدهن إلى جذب بعضها بعضًا عبْر قوةٍ ضعيفة تُعرف باسم قوة فان دير فالس، التي تنتج عن القطبية الثنائية الكهربية (انفصال للشحنات الموجبة والسالبة) في الجزيئات. ومع ذلك، تمتلك القطرات أيضًا شحنات سالبة على سطوحها؛ لذا فبينما يتحرك بعضها نحو بعض، منذرة بالتلامس والاندماج، فإن التنافر بينها يعمل على إبقائها بعيدة. يأتي الخطر عندما يُسخَّن الصوص؛ لأن القطرات حينئذٍ تتحرك بطاقةٍ أعلى ويمكن أن تتصادم رغم التنافر الكهربي بينها. إذا بدأت القطرات بالفعل في الترابط معًا (يُسمى ذلك «التلبُّد») فقد تكون المشكلة وجود شحنة صغيرة جدًّا على سطوح القطرات. ينصح الكثير من الطهاة بمزج عصير الليمون بقوَّة مع الصوص. يكسر هذا المزج الزبد المتلبد، ويُحتمل أن يزوده عصير الليمون بشحناتٍ إضافية للإبقاء على القطرات الناتجة منفصلة.

في نموذج الاستحلاب، تكون قطرات الدهن «مُثبَّتة» (أي محفوظة في صورة قطرات، بدلًا من السماح لها بالتلبد) بفضل جزيئات الليسيتين الموزَّعة على سطوحها. لدى كل جزيء من الليسيتين، الذي يأتي من صفار البيض، طرفٌ مرتبط بالماء (يُسمى «طرفه القطبي») يمتدُّ من السطح إلى الماء. يقيم هذا الطرف روابط مع جزيئات الماء، لكي تُحاط كل قطرة دهن بطبقة من الماء مقيدة إلى الأطراف القطبية لجزيئات الليسيتين. تتداخل هذه المياه المقيدة في تلبد القطرات. إذا بدأ الصوص في التلبد، فقد لا يكون لديه الليسيتين الكافي. لذا ينصح الكثير من الطهاة، بمزج المزيد من صفار البيض في الصوص بقوة، لكسر تلبد الزبد وإمداده بالمزيد من الليسيتين.

عمليًّا، فإن الخفق الشديد وأيًّا من حَلَّي عصير الليمون أو صفار البيض سينجحان (ومِن ثَمَّ لا يعطي الحل دليلًا واضحًا على النموذج الصحيح للصوص). يعرف الطاهي الماهر أن أيًّا من الحلَّين يجب ألا يُستخدم بإفراط وإلا فسد طعم الصوص أو مظهره، حتى لو لم يكن فيه تلبد. ويعلم الطاهي الماهر أيضًا أن التسخين المفرط يخرِّب العملية؛ لأنه عند درجات حرارة عالية، تكون الحركة الحرارية للقطرات أكبر (مما يزيد احتمالية تصادم بعضها ببعض) ويتخثر صفار البيض (يصبح سيئ المنظر ولا يعود يساعد في تثبيت الصوص).

(٣٨) أحجار المغناطيس

اكتُشفت الصخور المغناطيسية التي تنشأ بصورةٍ طبيعية، المُسماة أحجار المغناطيس، قبل وقتٍ طويل، ومن أبرز مكتشفيها الصينيون الذين عاملوها في البداية على أنها بدعة، ثم أدركوا لاحقًا قيمتها في البوصلات الملاحية. كيف تصبح الصخور ممغنطة، ولماذا لا تصبح كل الصخور ممغنطة؟

الجواب: إن حجر المغناطيس عبارة عن قطعة من الحديد الخام الذي يستطيع الاحتفاظ بمغناطيسيته بعد مغنطته؛ ولذا يُعَد نوعًا من «المغناطيس الدائم». يَنتج هذا الاحتفاظ بالمغناطيسية عن تأثير كمومي تشاركي في التفاعل بين الإلكترونات الموجودة في ذرات الحديد. في الطبيعة، يمكن أن يُمغنَط الحديد الخام عبْر عمليتين: أن يُسخَّن ثم يُبرَّد في المجال المغناطيسي للأرض، وأن يكون قريبًا من تيارٍ شديد الضخامة في صاعقةٍ برقية.

في أولى هاتين العمليتين، يُسخَّن الحديد الخام في سيل من الحمم، ثم يُبرَّد. عندما يكون الحديد الخام ساخنًا جدًّا، يفقد خواصه المغناطيسية؛ لأن الطاقة الحرارية تعطل التفاعل التشاركي بين الإلكترونات. وعندما يبرد الخام ويُستعاد ذلك التفاعل التشاركي، يميل الاتجاه المغناطيسي للإلكترونات إلى محاكاة اتجاه المجال المغناطيسي للأرض في الموقع الذي يوجد فيه الخام. كلما كان ذلك الاصطفاف داخل الخام أفضل، كان حجر المغناطيس الناتج أقوى. يمكن إيجاد أحجار المغناطيس الناتجة عن هذه العملية في العروق المدفونة في مناجم الحديد، أو الظاهرة على السطح نتيجةً للتجوية.

في العملية الثانية، يمر تيارٌ كبير من البرق خلال الصخرة، أو قريبًا جدًّا منها. يصطف المجال المغناطيسي الناتج عن حركة الإلكترونات في ذلك التيار، مع الاتجاه المغناطيسي لبعض مُرَكَّبات الحديد في الصخرة، وتحافظ الصخرة على هذا الاصطفاف بعد انتهاء البرق. عادةً ما يحدث هذا النوع من حجر المغناطيس قريبًا من السطح (لأن البرق عادةً لا يخترق الأرض لأكثر من بضعة أمتار) وغالبًا ما يوجد في رُقَعٍ معزولة.

(٣٩) المجال المغناطيسي للأرض وعلم الآثار

لأن مجال الأرض المغناطيسي يتغير شيئًا فشيئًا، فإن اتجاه الشمال الذي تحدده البوصلة يتغيَّر أيضًا. ولأسبابٍ كثيرة، يريد الباحثون أن يعرفوا اتجاه الشمال المغناطيسي في أزمنةٍ معينة في الماضي، ولكن من النادر إيجاد سجلات تاريخية لقراءات البوصلة. ومع ذلك،

يستفيد الباحثون من الأفران القديمة ذات الجدران الطينية، التي كانت تُستخدم في صناعة الفخار، ومن اللوحات الفنية القديمة جدًّا، مثل الجداريات الموجودة في «مكتبة الفاتيكان الرسولية»، وهي رواق شهير في الفاتيكان. كيف يمكن لفرن أو لجدارية أن يحدِّد اتجاه الشمال المغناطيسي؟

الجواب: يحتوي الطين الموجود في جدران وأرضية الأفران القديمة على أكاسيد الحديد الماجنتيت والهيماتيت. تحتوي خامات الحديد هذه في العموم على حبيباتٍ مفردة، يوجد فيها «نطاقات»، وهي مناطق تكون فيها المجالات المغناطيسية للمادة منتظمة. تتكون حبة الماجنتيت من نطاقاتٍ متعددةٍ مجهرية؛ وتتكون حبة الهيماتيت من نطاقٍ واحد، قد يكون باتساع مليمتر واحد.

عندما يُسخَّن الطين إلى عدة مئاتٍ من الدرجات المئوية (عندما يُستخدَم الفرن) تتغيَّر نطاقات كلا النوعين من الحبيبات. في الماجنتيت تتغيَّر جدران النطاقات لكي تنمو النطاقات الأكثر اصطفافًا مع المجال المغناطيسي للأرض، بينما تنكمش النطاقات الأخرى. وفي الهيماتيت تدور النطاقات لتصبح أكثر اصطفافًا مع مجال الأرض. وتكون نتيجة كلتا العمليتَين أن الطين يكتسب مجالًا مغناطيسيًّا مصطفًّا مع مجال الأرض. عندما يبرد الفرن بعد الاستخدام، يظل ترتيب النطاقات والمجال المغناطيسي للطين قائمًا، وهو تأثير يُعرَف باسم «المغناطيسية الحرارية الدائمة».

ولتحديد اتجاه مجال الأرض في آخر مرة سُخِّن فيها الفرن وبُرِّد، يحدد عالم الآثار مساحةً صغيرة على الأرضية، ويقيس بحرصٍ اتجاهها، بالنسبة إلى الأفق وإلى الشمال الجغرافي (القطب الشمالي)، ثم يُزيل ذلك القطاع من الأرضية. ثم بتحديد اتجاه المجال المغناطيسي للقطاع، بالنسبة إلى أبعاد القطاع؛ ومِن ثمَّ بالنسبة إلى موقعه في الفرن، يستطيع عالم الآثار أن يحدِّد اتجاه مجال الأرض في المرة الأخيرة التي استُخدم فيها الفرن. وإذا حُسب عمر الفرن باستخدام التأريخ بالكربون المُشِع، أو غيره من التقنيات، يعرف عالم الآثار أيضًا الوقت الذي كان فيه لمجال الأرض ذلك الاتجاه.

يحتوي العديد من اللوحات الجدارية القديمة على الهيماتيت، وأصباغ الفنانين عبارة عن معلق من موادَّ صُلبةٍ متنوعة في حامل سائل. عندما يُوضع صبغ على جدار، في أثناء عمل جدارية، تدور كل حبة هيماتيت في السائل، إلى أن تصطفَّ مع المجال المغناطيسي للأرض. وعندما يجفُّ الطلاء، تُحتجز حبيبات الهيماتيت في مكانها؛ ومِن ثمَّ تُسجل اتجاه مجال الأرض المغناطيسي في زمن رسم الجدارية.

يستطيع الباحث أن يُحدِّد اتجاه مجال الأرض في زمن رسم الجدارية، عن طريق تحديد اتجاه حبيبات الهيماتيت في الطلاء. يُلصق شريطٌ لاصقٌ قصير على جزءٍ من الجدارية، ويُقاس اتجاه الشريط بحرص، بالنسبة إلى الأفق وإلى اتجاه الشمال المغناطيسي الحالي. عندما يُنزع الشريط عن الجدارية، يحمل طبقةً رقيقة من الطلاء. في المعمل، يُوضَع الشريط اللاصق في جهازٍ معيَّن لتحديد اتجاه حبيبات الهيماتيت في تلك الطبقة من الطلاء.

(٤٠) تعقيدات التصوير بالرنين المغناطيسي

إن «التصوير بالرنين المغناطيسي» تقنية لتصوير ما بداخلِ جسمٍ ما (بشر، وحيوانات، وحفريات، وأجسام كثيرة أخرى). كانت التقنية تُسمى في الأصل «الرنين المغناطيسي النووي»، لكن يُقال إن الاسم تغيَّر إلى التصوير بالرنين المغناطيسي، عندما رضخت عيادة كليفلاند (في كليفلاند، أوهايو) للضغط الشعبي، بعد الإعلان عن التخطيط لإقامة منشأة «نووية». (لم يدرك عموم الناس على ما يبدو أن كلمة «نووية» تشير إلى الجسيمات المركزية في كل الذرات، بما في ذلك أجسامهم نفسها.)

يستخدم التصوير بالرنين المغناطيسي موجاتٍ تنتمي إلى طيفٍ تردُّديٍّ مُعيَّن (يُقال إنها موجاتٌ راديوية) لاختراق الجسم، وقلب بعض البروتونات في بعض الأنوية داخل الجسم. تصطف هذه البروتونات في الأساس مع مجالٍ مغناطيسيٍّ كبير، وبعد أن تقلبها الموجات الكهرومغناطيسية، تستعيد اصطفافها سريعًا إلى حدٍّ ما. تُسجِّل أجهزة المراقبة تطور ذلك الاصطفاف، وتُحوِّل برامج كمبيوتر بالغة التعقيد هذه التسجيلات إلى صور للمواد المحتوية على هذه البروتونات. تُعدُّ هذه العملية آمنة بالكامل؛ لأن المجال المغناطيسي والموجات الراديوية لا تسبب أي ضرر. في الواقع، فإن الموجات الراديوية الصادرة من محطات الراديو القريبة، وهوائيات الاتصالات، وحتى أقمار الاتصالات الصناعية، تخترقك طوال الوقت.

إذا كانت العملية آمنة، فلماذا إذن أُصيب المرضى بحروق خلال هذه العملية، في حالات «نادرةٍ جدًّا»؟ ولماذا شعر بعض المرضى ممن لديهم وشوم بـ «وخز» أو «تنميل» فيما حول الوشوم، ولماذا أُصيب بعضهم بحروقٍ بالغة؟ لماذا لا يُسمَح بالعملية أو لا يُنصَح بها للمريض الذي لديه غرسات معدنية (مثل تلك التي تكون في العين، أو الجفن، أو تركيبات الأسنان، أو تحسينات معينة للثدي، أو جزء من صمام للقلب)؟ لماذا لا يُنصَح عادة بهذه العملية للشخص الذي اعتاد العمل في لحام المعادن، أو أعمال خراطة المعادن؟

الجواب: قبل إدراك الخطر، كان بعض المرضى يُصاب بحروق عندما كان يُسمح للأقطاب الكهربية الخاصة بمراقبة حالة المريض بلمسه في أكثر من نقطة. في إحدى الحالات وُصِّل مقياس تأكسُج بإصبع مريض تحت التخدير. لم يشكل ذلك التوصيل الوحيد بين الإصبع وجهاز الفحص (الذي كان خارج جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي)؛ أي خطر. ومع ذلك، حدث أن السلك الممتد من الإصبع، لمس ذراع المريض؛ حينئذٍ، فإن الجزء من السلك بين الإصبع والذراع، والجزء من الذراع بين هاتين النقطتين، عمِلا بكفاءة بمنزلة دائرةٍ موصلة كاملة. وعندما شُغلت الموجات الراديوية، صنع مجالها المغناطيسي سريع التغير تيارًا كهربيًّا في هذه الدائرة. أدَّت المقاومة الكبيرة للتيار في نقطتي التماس بين الجلد والسلك إلى حرارةٍ عالية جدًّا وحرق هناك. ومع ذلك، لأن المريض كان تحت التخدير، لم تُكتشف الإصابة إلا بعد فصل المريض عن جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي.

وحدثت إصابةٌ أخرى لمريضٍ بحروق بطريقةٍ مختلفة، عندما عمل قطبٌ كهربي «طويل» امتد إلى المريض، بمنزلة هوائي استقبال لموجات الراديو؛ نشأ مجال كهربي ملحوظ بامتداد القطب، وكان المجال في نهاية القطب قويًّا بما يكفي للتسبب في حدوث شرر أصاب المريض بحروق.

تحتوي بعض الأصباغ السوداء أو السوداء المائلة إلى الزرقاء، في الوشم أو الكحل الدائم، على «مادةٍ مغناطيسيةٍ حديدية» (أكسيد الحديد الأسود). عندما يُنقل مريض لديه مثل هذه الأصباغ، إلى مجالٍ مغناطيسي أو منه، في جهاز بالتصوير بالرنين المغناطيسي، أو عندما تتغير قوة المجال المغناطيسي، تميل المادة المغناطيسية الحديدية إلى تغيير اتجاهها، مثلما تُغيِّر إبرة البوصلة اتجاهها عندما تُوضع في مجال مغناطيسي، أو تُخرَج منه. يشعر بعض المرضى بذلك على هيئة وخز أو شد للجلد. في الحالات القليلة التي احترق فيها الجلد، كان تصميم الوشم يحتوي على دائرةٍ كاملة (أو شبه كاملة) من الأصباغ المغناطيسية الحديدية. ومن المحتمل أن تكون الموجات الراديوية قادرة على توليد تيار في مثل هذه الدائرة، ويكون التيار شديدًا بما يكفي لتسخين الجلد وحرقه.

جعلت الغرسات المعدنية تحليل التصوير بالرنين المغناطيسي معقَّدًا؛ لأنها تعمل على تشويه الصورة. وإذا كانت تتكون من موادَّ مغناطيسيةٍ حديدية، فيمكن أيضًا أن تدور مثل إبرة بوصلة، عندما يُنقَل المريض إلى المجال المغناطيسي أو منه. في الغالب لا تكون الحركة ملحوظة، ولكن تدوير صمام قلب معدني أو رصاصةٍ فولاذيةٍ مغروسة قد يكون خطيرًا. ويثير القلقَ أيضًا تحرُّك غرسات العين أو ما يعلَق بالعين من مخلفات

اللحام أو خراطة المعادن. في الماضي، كانت الأجزاء المغناطيسية الحديدية المستخدمة في بعض غرسات الثدي، تميل إلى أن تسخن، بفعل التيارات الكهربية المستحثة، ومع ذلك، فإن فنيي التصوير بالرنين المغناطيسي يعون الآن هذه الاحتمالات، وقد وضعوا إرشاداتٍ توجيهية من أجل حمايتك.

قصة قصيرة

(٤١) البحث المغناطيسي عن رصاصة جارفيلد

في عام ١٨٨١، تلقَّى جيمس جارفيلد، رئيس الولايات المتحدة آنذاك، عيارَين ناريَّين، أطلقهما مهاجم في محطة للسكك الحديدية في واشنطن العاصمة. ورغم أن إحدى الرصاصتَين بالكاد خدشت إحدى ذراعيه، فقد استقرت الأخرى تحت بنكرياسه. ومع ذلك، لم يستطع الأطباء تحديد مكان الرصاصة الثانية؛ لأنهم لم يكن لديهم أي طريقة للبحث داخل الجسم دون فتحه. ولأن أحد الضلوع أدَّى إلى انحراف الرصاصة بعد دخولها إلى جسم الرئيس، لم يوفِّر الجرح نفسه أدلةً كافية حول مكان الرصاصة.

عرض ألكسندر جراهام بيل — الذي يرتبط اسمه باختراع التليفون — المساعدة، باستخدام ما أسماه «ميزان تعيين». تكوَّن الجهاز من (أ) مغناطيس كهربي يعمل بالبطارية و(ب) ملف صغير موصَّل بجهاز استقبال تليفوني (الجزء الخاص بالاستماع في التليفون في ذلك الوقت). ولأن البطارية كانت ترسل تيارًا منتظمًا عبْر المغناطيس الكهربي، صنع المغناطيس الكهربي مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا. أمسك بيل الملف الصغير في ذلك المجال، بحيث كان المجال متعامدًا على مستوى الملف. وإذا غيَّر المجال بطريقةٍ ما عبْر الملف الصغير، فسيظهر التيار في الملف الصغير وينتج صوت طقطقة في جهاز الاستقبال.

تمثَّلت خطة بيل في تمرير المغناطيس الكهربي والملف الصغير على جسم جارفيلد. إذا مر الجهاز فوق الرصاصة، ستغير الرصاصة كمية المجال المغناطيسي واتجاهه عبْر الملف الصغير؛ وبهذا يمكن الكشف عن الرصاصة من خلال صوت الطقطقة التي ستنتجها.

لسوء الحظ، كانت الرصاصة مصنوعة من الرصاص؛ ولذا لم تغيِّر المجال بقدْرٍ كبير (كان الفولاذ سيغيره بقدْرٍ أكبر بكثير). وأيضًا، كانت الرصاصة بعيدة جدًّا عن سطح جسم جارفيلد، بما لا يكفي للتسبب في تغييرٍ كبيرٍ في المجال. بعد محاولاتٍ عديدة، آيس بيل من البحث؛ وتُوفي جارفيلد بعد حوالي شهر.

(٤٢) المغانط والوشوم وحُلي الجسد

لماذا يستطيع مغناطيسٌ قوي أن يلتصق بجلدٍ يحتوي على وشم ذي خطوط سوداء أو سوداء مائلة إلى الزرقاء، ويجذبه؟ لطالما كانت حُلي الجسد رائجة، لكن بعض الناس يختارون تثبيتها باستخدام المغانط، بدلًا من الخضوع للثَّقب. ما خطورة ارتداء حلقات للأنف مثبتة مغناطيسيًّا؟

الجواب: عادةً ما يتم عمل الخطوط السوداء والسوداء المائلة إلى الزرقاء في الوشوم، عن طريق حقن الجلد بصبغ من أكسيد الحديد (الماجنتيت)، الذي هو مادةٌ مغناطيسية حديدية وتنجذب إلى أي مغناطيسٍ قوي. ومِن ثَمَّ، يستطيع المغناطيس القوي أن يلتصق بموضع الوشم. والأكثر غرابة، أن المغناطيس القوي قد يُسبِّب انتقال الماجنتيت خلال الأدمة، ليتجمع تحت المغناطيس، فيما بين الأدمة والبشرة.

يمكن استخدام هذا الميْل للانتقال في إزالة الوشوم. في البدء، يُستخدم ليزر يبث نبضاتٍ ضوئيةً في نطاقٍ قريب من الأشعة تحت الحمراء (يقع بالكاد خارج النطاق المرئي)، بهدف خلخلة وتشتيت أصباغ الحبر في الأدمة، وفتح الطريق نحو البشرة. ثم يُلصَق مغناطيسٌ صغير لكنه بالغ القوة فوق الوشم؛ لسحب بعض من الأصباغ المغناطيسية الحديدية إلى أعلى عبْر البشرة إلى المغناطيس حيث يمكن إزالتها؛ ومِن ثَمَّ يصبح الوشم أقل وضوحًا.

تجلَّى أحد أخطار ارتداء حُليٍّ جسديةٍ مغناطيسية في حالة فتاة أرادت ارتداء حلقاتٍ مغناطيسية كحلقات أنف. كانت كل حلقة مثبتة بمغناطيسٍ موضوع داخل المنخر، في الجهة المقابلة لجانبها الخارجي. ومع ذلك، عندما حاولت الفتاة إضافة الحلقة الثانية، انجذب المغناطيسان أحدهما إلى الآخر بقوة، وقفزا إلى الحاجز الأنفي (الجزء الفاصل بين المنخرين) في أعلى الأنف. وهناك التصقا معًا بشدة داخل الحاجز الضيق؛ مما استدعى أن تذهب الفتاة إلى غرفة الطوارئ في أحد المستشفيات لكي يُزال المغناطيسان.

(٤٣) الإفطار ومغناطيسية البقر

إذا مرَّرت مغناطيسًا قويًّا فوق لبنٍ رائب ونوعٍ معين من حبوب الإفطار، لماذا تتجمع الحبوب على المغناطيس؟ ولماذا يشيع انزلاق المغانط إلى بطون المواشي؟

الجواب: يُعلَن عن هذه الأنواع من الحبوب بوصفها «مُعَزَّزة بالحديد»؛ ما يعني أنها تحتوي على برادة حديد، لإضافة الحديد إلى غذائك. بالمثل، تحتوي بعض الأوراق

المصرفية (النقود الورقية) على مركبات حديد في حبر الطباعة؛ ما يجعل الورقة تنجذب نحو المغناطيس القوي.

تهدف مغانط الأبقار إلى جمع نفايات الحديد التي تبتلعها الأبقار عرضيًّا عند تناولها للعشب أو التبن، لكيلا يتسنى لنفاية الحديد تدمير سائر الجهاز الهضمي للبقرة. ليست المغانط غالية الثمن، ويمكنك أن تجدها في متجر مستلزمات الأبقار المفضل لديك.

(٤٤) القيثارات الكهربية

عقب ظهور موسيقى الروك في منتصف خمسينيات القرن العشرين بوقتٍ قصير، تحوَّل عازفو القيثارة من القيثارات الصوتية إلى القيثارات الكهربية؛ لكن كان جيمي هندريكس هو أول مَن استوعب القيثارة الكهربية بوصفها آلَةً إلكترونية. لقد سطع نجمه في الستينيات، وهو يعزف بريشته على الأوتار ببراعة، متخذًا موضعه هو وقيثارته أمام مُكبِّر الصوت بحيث يحافظ على رد الفعل الصوتي، ثم يضرب الأوتار لتصدر أصواتها فوق ردِّ الفعل ذاك. لقد دفع الروك إلى الأمام، من أنغام بودي هولي، إلى السايكدليا في أواخر الستينيات، وإلى بدايات الهيفي ميتال عند لِيد زِبلين، وطاقة فريق جوي ديفيجن المتفجِّرة في السبعينيات، وما زالت أفكاره تُلهم موسيقى الروك حتى اليوم. ما الذي يميز القيثارة الكهربية عن القيثارة الصوتية، ومكَّن هندريكس من تعظيم استفادته من هذه الآلة الإلكترونية؟

الجواب: في الوقت الذي يعتمد فيه الصوت في القيثارة الصوتية، على الرنين الصوتي الناتج في جسم الآلة، من خلال تذبذب الأوتار، تُعدُّ القيثارة الكهربية آلَةً مصمتة؛ لذا ليس فيها رنين. بدلًا من ذلك، تُلتقَط ذبذبات الأوتار المعدنية بواسطة «رافعات» كهربية، ترسل إشاراتٍ إلى مضخِّم، وعددٍ من مكبِّرات الصوت.

يلتفُّ السلك الذي يصل الرافع بالمضخِّم حول مغناطيسٍ صغيرٍ موضوعٍ تحت الوتر مباشرة. يُنتِج المجال المغناطيسي الخاص بهذا المغناطيس قطبًا شماليًّا وآخر جنوبيًّا في مقطع الوتر الذي يعلوه مباشرة. يكون لدى هذا المقطع عندئذٍ مجاله المغناطيسي الخاص. وعندما يُنقر على الوتر، ويتذبذب تبعًا لذلك، فإن حركته بالنسبة إلى الملف تغيِّر مجاله المغناطيسي داخل الملف، مولدة تيارًا كهربيًّا فيه. وبينما يهتزُّ الوتر باتجاه الملف وبعيدًا عنه، يتغير اتجاه هذا التيار بالتردُّد نفسه الذي تتبعه ذبذبات الوتر؛ ومِن ثَمَّ ينقل التيار وتيرة التذبذب إلى المضخِّم ومكبر الصوت.

في القيثارة الكهربية من نوع ستراتوكاستر، هناك ثلاث مجموعات من الروافع، موضوعة عند الطرف القريب من الأوتار (في الجزء العريض من جسم القيثارة). تُعدُّ المجموعةُ الأقرب إلى الطرف القريب هي الأفضل في التقاط ذبذبات الأوتار العالية التردد، أما المجموعة الأبعد عن الطرف القريب فتعد هي الأفضل في التقاط الذبذبات المنخفضة التردد. وبوضع مفتاح تبديل على القيثارة، يستطيع العازف أن يختار المجموعة، أو المجموعتين اللتين سترسلان الإشارات إلى المضخِّم ومكبِّرات الصوت.

ومن أجل تحكمٍ أكبر في موسيقاه، كان هندريكس أحيانًا يعيد لفَّ السلك في ملفات الروافع الخاصة بقيثارته، ليغيِّر عدد اللفات. وبهذه الطريقة، كان يغيِّر كمية التيار التي تتولَّد في الملف؛ ومِن ثَمَّ يغيِّر حساسية الملف لذبذبات الأوتار.

(٤٥) مضخمات القيثارة الكهربية

لقد غيَّرت كلٌّ من فيزياء الجوامد وإلكترونيات الجوامد الحياة المعاصرة تغييرًا جذريًّا؛ فعلى سبيل المثال، اعتمدت الكمبيوترات المبكرة على صمامات مفرغة ضخمة الحجم، واحتلت مساحةَ غرفةٍ كبيرة. أما اليوم، فتعتمد كمبيوترات أقوى بكثير على ترانزستوراتٍ صغيرة في دوائرَ متكاملةٍ، ولا تشغل سوى مساحة حِجرك (أو أقل). تبدو الصمامات المفرَّغة شيئًا من الماضي، بل إنها في الواقع لم تَعُد تُدرَّس لطلاب الهندسة الكهربائية. ومع ذلك، يصرُّ كثير من عازفي القيثارة من موسيقيي الهارد روك اليوم، على استعمال مضخمات تستخدم صمامات مفرغة، ويتجنبون تلك التي تستخدم الترانزستورات. لماذا يختار هؤلاء العازفون مضخمات الصمامات بدلًا من مضخمات الترانزستورات؟

الجواب: إن الذبذبات الميكانيكية التي يصنعها العازف على وترِ قيثارةٍ كهربية تنتج ذبذباتٍ كهربيةً في ملفٍ رافعٍ موضوعٍ تحت الوتر مباشرة. يجب أن تُضخَّم هذه الذبذبات الكهربية لكي تجعل نظام مكبرات الصوت ينتج صوتًا يسمعه الجمهور. عندما راج استخدام القيثارة في موسيقى الروك في أوائل الستينيات، كانت المضخمات تستخدم الصمامات؛ لأن مضخمات الترانزستور لم تكن موثوقة بعدُ. تطور الروك إلى السايكدليا ثم إلى الهيفي ميتال، وقوَّى عازفو القيثارة مضخماتهم لكي يبهروا جماهيرهم. يسبب مثل هذا التضخيم العالي باستخدام مضخمٍ صمامي تشويشًا كبيرًا في الصوت النهائي، وسرعان ما أصبح ذلك التشوش ملحوظًا في صوت الروك.

لا تنتج مضخمات الترانزستور النوع نفسه من التشويش عندما تتم تعليتها؛ فهي تنتج صوتًا «نظيفًا» كما يُقال؛ ولهذا السبب يستبعدها عازفو الروك اليوم، لأنها لا تنتج صوت الروك «اللائق». ذات مرة، قال جيمي هندريكس؛ الذي كان أول مَن فهم القيثارة الكهربية ومضخمها، باعتبارها آلةً موسيقية مركَّبة: «إنني أحب حقًّا مضخماتي الصمامية القديمة من نوع مارشال؛ لأنه عندما يعلو الصوت تمامًا، لا يمكن لشيء أن يتفوَّق عليها ...»

(٤٦) الشفق

إذا كنتَ في الخارج في ليلةٍ مظلمة، وسط مرتفعاتٍ عالية، فلربما تستطيع رؤية شفق؛ وهو «ستار» شبحيٌّ من الضوء يتدلَّى من السماء. ليس هذا الستار محليًّا فقط؛ فقد يمتد بارتفاع عدة مئات من الكيلومترات، وبطول عدة آلاف من الكيلومترات، بحيث يطوق الأرض على هيئة قوس. ومع ذلك، فإن سُمكه يبلغ حوالي مائة متر فقط. ما الذي يصنع هذا العرض الضخم، وما الذي يجعله قليل السُّمك إلى هذه الدرجة؟

الجواب: قد يرتبط الشفق أحيانًا بانفجارات شمسية إذا أثَّرت الجسيمات المنبعثة من الانفجار على المجالين المغناطيسي والكهربي في الغلاف الجوي للأرض.

يحدث الشفق عندما يتم تسريع الإلكترونات على ارتفاعات تتراوح بين ٣ آلاف و١٢ ألف كيلومتر، ثم توجيهها على امتداد خطوط المجال المغناطيسي للأرض إلى دوائر العرض الأعلى، باتجاه القطبَين المغناطيسيَّين الشمالي والجنوبي. ولأن خطوط المجال تتقارب هبوطًا نحو القطب، تنتقل الإلكترونات إلى ارتفاعاتٍ أقلَّ؛ حيث يكون الهواء أعلى كثافة، وتتصادم الإلكترونات مع ذرات وجزيئات، متسببة في إثارتها. ثم تفقد الذرات والجزيئات حالة الإثارة، من خلال بث الضوء؛ والشفق هو هذا الضوء (المرئي واللامرئي) الذي ينبعث. على سبيل المثال، ينبعث الضوء الأخضر عن ذرات الأكسجين، والضوء الزهري عن جزيئات النيتروجين. ومع ذلك، فقد يكون الضوء خافتًا للغاية، إلى حد ألَّا نلاحظ إلا الضوء الأبيض فقط، وفي بعض الأحيان، قد يبدو أن العرض يتحرك عبْر السماء، كما لو كانت الريح تحرِّكه، ولكن تلك الحركة خادعة.

ونظرًا لأن الإلكترونات يتم توجيهها عبْر خطوط المجال المتقاربة، فإنها تتقارب متجمعة في منطقة ضيقة إلى حدٍّ كبير؛ ومِن ثَمَّ فإن الذرات والجزيئات الموجودة في تلك

المنطقة الضيقة هي فقط ما يشارك في بث ضوء الشفق. ومع ذلك فهذا التفسير البسيط يتنبأ بشفقٍ أكثر سماكة مما يتم رصده، ويتم الآن البحث عن تفسيراتٍ أكثر تعقيدًا.

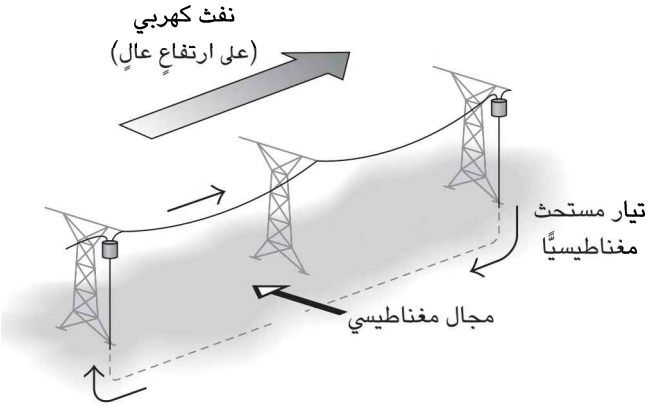
(٤٧) التوهجات الشمسية وانقطاع الكهرباء

في الساعة ٢:٤٥ من صباح يوم ١٣ مارس ١٩٨٩، تعطَّل نظام الشبكة الكهربية بالكامل في مقاطعة كيبك الكندية، تاركًا ملايين الناس دون كهرباء في تلك الليلة الباردة. وفي الحقيقة، تعطَّل الكثير من أنظمة شبكات الكهرباء في نصف الكرة الشمالي في تلك الليلة، مشكِّلًا كابوسًا للمهندسين الذين يعملون على صيانة الأنظمة. لم يكن السبب زيادة مفاجئة في الطلب على الطاقة، ولا عطلًا ناجمًا عن معدات متقادمة. في الواقع، كان السبب انفجارًا — توهُّجًا شمسيًّا — حدث على سطح الشمس قبل ثلاثة أيام. كيف يمكن لانفجارٍ شمسي أن يعطِّل نظام شبكةٍ كهربية؟

الجواب: في التوهج الشمسي، تمتد حلقة من الإلكترونات والبروتونات خارجة من سطح الشمس. تنفجر بعض التوهجات الشمسية، قاذفة تلك الجسيمات المشحونة إلى الفضاء. في ١٠ مارس ١٩٨٩، انفجر توهُّجٌ شمسيٌّ عملاق باتجاه الأرض. وعندما وصلت الجزيئات بعد ثلاثة أيام، نقلت طاقتها إلى الغلاف المغناطيسي للأرض، وهو منطقة عالية الارتفاع، يتحكم في ديناميكاتها المجالان المغناطيسي والكهربي. وتحديدًا، بثت الجسيمات طاقة في «النفث الكهربي» هناك.

ولأن النفث الكهربي عبارة عن تيارٍ كهربي، فإنه يصنع مجالًا مغناطيسيًّا حول نفسه، يشمل الأرض وخطوط الكهرباء الطويلة في نظام الشبكة الكهربية. إن تأثير هذا المجال المغناطيسي على خطوط الكهرباء — أو بالأحرى، الطريقة التي تغيَّر بها هذا المجال — هو ما سبَّب المشكلة في كيبك.

عند طرف أحد خطوط الكهرباء هذه، يرفع محوِّلُ رفعٍ الجهدَ الكهربي، لكي تُنقَل الطاقة الكهربية عبْر الخط بجهدٍ كهربي عالٍ جدًّا. وعند الطرف الآخر من الخط، يخفض محوِّل خفضٍ الجهدَ الكهربي إلى القيمة المنخفضة المستخدمة في المنازل. يتكوَّن المحوِّل من ملفَّين (الملف «الأساسي» و«الثانوي») بعددٍ مختلف من اللفَّات التي تلتف حول قلبٍ حديدي. يُولِّد التيار المتردد العادي في الملف الأساسي، تيارًا متردِّدًا في الملف الثانوي، بفولتيةٍ أعلى أو أقل، تبعًا لامتلاك الملف الثانوي لفَّاتٍ أكثر أو أقل من الأساسي.



شكل ٥-٧: بند ٥-٤٧: يصنع النفث الكهربي (التيار) مجالًا مغناطيسيًّا عبْر دائرةٍ عموديةٍ مكوَّنةٍ من خطٍّ ناقل، والأرض، والأسلاك المؤرضة للمحولات (تقع داخل الأسطوانات الموجودة عند أطراف الخطوط الناقلة). تُولِّد التغيرات في المجال تيارًا مستحثًّا جيومغناطيسيًّا، خلال الدائرة.

كلا المحولين على الخط مؤرَّض؛ بمعنى أنهما موصَّلان بالأرض. عندما يصنع نفثٌ كهربيٌّ مجالًا مغناطيسيًّا، فإن المجال المغناطيسي يمكن أن يمر عبْر دائرةٍ نشطة (شكل ٥-٧) تتكون من خط الكهرباء (الجزء العلوي من الدائرة)، والخطوط الأرضية (أسفل الدائرة). ومع ذلك، فإن عبورَ مجالٍ مغناطيسيٍّ ثابتٍ لهذه الدائرة، لا يسبِّب مشكلة، بل تحدث المشكلة عندما يتغيَّر المجال.

في ليلة انقطاع الكهرباء، كان المجال يتغيَّر بحدة وبصورةٍ مفاجئة؛ لأن الطاقة الصادرة عن التوهج الشمسي تسبَّبت في تغيُّر النفث الكهربي على نحوٍ مشابه. وكلما تغيَّر مجالٌ مغناطيسي في حلقة، فإنه يصنع تيارًا في الحلقة. عندما يحدث مثل هذا التيار بسبب النفث الكهربي، يُسمَّى التيار «التيار المستحث جيومغناطيسيًّا». وهكذا، في ليلة انقطاع الكهرباء، حمل الخط الناقل تيارًا مستحثًّا جيومغناطيسيًّا كبيرًا ومتغيرًا بصورةٍ مفاجئة، إلى جانب تياره العادي.

يعتمد نقل الطاقة عبْر نظام الشبكة الكهربية على التغيرات الملائمة في الفولتية وشدة التيار عبْر النظام. وقد عطَّل وجودُ التيارِ المستحثِّ جيومغناطيسيًّا في المحوِّلات في نظام

كيبك؛ قدرة المحوِّلات على نقل التيار المتردد، من المحول الأساسي إلى الثانوي. ونتج عن ذلك أن كانت الفولتية وشدة التيار في المحول الثانوي مضطربتين بشدة، ولم تعودا متغيرتين بالطريقة الملائمة؛ وقد عطَّل هذا الاضطراب نقل الكهرباء، وأحرق بعض المحولات، مسببًا تعطل النظام. واليوم، كلما انفجر توهجٌ شمسي باتجاه الأرض، حَذَّر مهندسو شبكات الكهرباء على الفور من وقوع اضطرابات بالشبكة.

يمكن أن ينشأ التيار المستحث جيومغناطيسيًّا في أي موصلٍ طويل، مثل كابلات الاتصالات، وخط الأنابيب العابر لألاسكا. في الحقيقة، لُوحظ الأمر للمرة الأولى (لكن دون أن يُفهَم) حين كانت خطوط التلغراف الطويلة تُستخدم قبل حوالي ١٥٠ عامًا: في بعض الأيام كانت الخطوط تحمل بالفعل تيارًا كهربيًّا دون أن تُوصَّل ببطارياتها كما اقتضت العادة. يمكن أن ينشأ التيار المستحَثُّ جيومغناطيسيًّا كذلك في الأرض نفسها؛ مما قد يؤثِّر على التآكل الحادث في خطوط الأنابيب الطويلة والموصلة كهربيًّا بالأرض.

في عمليةٍ مشابهة لتلك التي تُسبِّب التيار المستحَثَّ جيومغناطيسيًّا، يمكن أن يتولد التيار في الكابلات البحرية الطويلة نتيجة لحركة المياه، مثل حركة المدِّ والجزر. ولأن المياه موصلة وتتحرَّك خلال المجال المغناطيسي للأرض؛ يسري التيار الكهربي عبْر الماء (وبالتبعية خلال الكابل الموضوع في الماء)، ويكمل الدائرةَ التيارُ المرتدُّ عن قاع البحر.

(٤٨) الضفادع الطافية

يمكن أن يرتفع ضفدع (أو حيوانٌ صغيرٌ آخر) بتأثير مجالٍ مغناطيسي ناتج عن ملفٍّ لولبي (ملف من السلك الحامل للتيار الكهربي). ومع ذلك، فمن الواضح أن الضفدع ليس ممغنطًا؛ وإلا لارتطم الضفدع بالباب المعدني للثلاجة في كل مرة تقافز فيها في المطبخ. وفي وجود مجالٍ مغناطيسيٍّ كبير بما يكفي، يمكن أن تُرفَع أنت أيضًا، لكنك بالتأكيد لن تعاني من تأثير باب الثلاجة. كيف يمكن لهذه المواد البيولوجية أن تُرفَع؟

الجواب: أصبحت ضفادعُ عديدةٌ مشهورة الآن بأنها تطفو في المجال المغناطيسي لملفٍّ لولبي. (لا تعاني الضفادع من بأس؛ فالإحساس يشبه الطفو على سطح الماء، وهو ما تستمتع به الضفادع.) وُضع الملف اللولبي رأسيًّا، ووُضع الضفدع بالقرب من طرفه العلوي؛ حيث ينتشر المجال المغناطيسي من الملف اللولبي. وعلى الرغم من أن الضفدع ليس ممغنطًا في العادة، فإنه يكتسب خصائص مغناطيسية عند وضعه في مجال مغناطيسي. يُعَد الضفدع (وكذلك البشر ومواد أخرى عديدة) مادةً ذات «مغناطيسيةٍ معاكسة». في

مادةٍ كهذه، يُغيِّر المجال المغناطيسي إلكترونات الذرات، مُتسبِّبًا في جعل المادة مغناطيسية؛ لذا، عندما يُوضع ضفدع في المجال المغناطيسي المنتشر أعلى ملف لولبي؛ يدفع المجال الضفدع إلى أعلى، ويرتفع الضفدع إلى النقطة التي يتعادل فيها الدفع إلى أعلى، مع السَّحب إلى أسفل بفعل الجاذبية؛ وهناك يطفو الضفدع.

إذا استعضنا عن الضفدع بمغناطيسٍ صغير، سيصبح المغناطيس الصغير غير مستقرٍّ ولن يطفو. يختلف الضفدع عن المغناطيس الصغير في أن خصائصه المغناطيسية تعتمد على قوة المجال المغناطيسي الناتج عن الملف اللولبي. على سبيل المثال، إذا تحرك الضفدع بعيدًا عن الملف، إلى حيث يكون المجال أضعف، فستضعف خصائصه المغناطيسية أيضًا، في حين لن تتغير خصائص المغناطيس الصغير.

من الممكن جعل مغناطيسٍ صغير يطفو، إذا دار وأدى حركة المبادرة مثل لعبة النحلة الدوارة. تعتمد اللعبة المتعة التي يُسوَّق لها تحت العلامة التجارية ليفيترون، على هذه الفكرة: نحلةٌ دوارةٌ مغناطيسية تدور بسرعة، وتطفو لبضعة سنتيمترات فوق لوح سيراميك ممغنط. ومع ذلك، لأن الهواء يبطئ دوران النحلة الدوارة، يصبح معدل الدوران في النهاية بطيئًا جدًّا بما لا يسمح باستقرار النحلة الدوارة، وتسقط أخيرًا.

(٤٩) صوت الفوران الصادر من مغناطيس

اضبط مشغل أشرطة كاسيت سمعية (كانت الموسيقى تُسَجَّل سابقًا على أشرطة مغناطيسية) على وضع التشغيل دون إدخال شريط كاسيت (أو بإدخال شريطٍ فارغ) وأدرْ مفتاح التحكم في الصوت إلى أعلى درجة، ثم عرِّض رأس التشغيل لمغناطيسٍ قوي. لماذا تسبب الحركة صوت فوران في المشغل؟

الجواب: إن رأس التشغيل في جهاز الكاسيت مغناطيسية حديدية، تتكون من عدة نطاقات مغناطيسية، أو مناطق تتماثل فيها الخصائص المغناطيسية، وتنتج مجالًا مغناطيسيًّا في اتجاهٍ مُعيَّن. ومع ذلك، يختلف اتجاه المجال من نطاق إلى آخر. فعندما تُقرِّب المغناطيس من رأس التشغيل، تتغير النطاقات فجأة، لتجعل مجالاتها المغناطيسية مصطفة مع مجال الأرض المغناطيسي. وبينما تتغير مجالات هذه النطاقات، ينتج تيارٌ متغير في ملفٍّ ملفوف حول رأس التشغيل. تُضخَّم هذه التغييرات في التيار، وتُنقَل إلى مكبر صوت حيث يُسمَع صوت فوران؛ هو صوت التيار الآتي والذاهب، بينما يتغير المجال المغناطيسي للنطاقات.

(٥٠) كهرباء تسري فيك في محطة القطار

نعيش كلنا داخل المجال الكهربي للأرض؛ ما يجعل الجهد الكهربي بمحاذاة الأنف مختلفًا عنه عند القدمين. لماذا إذن لا نشعر بسريان تيارٍ كهربي في أجسامنا؟

في بعض الأحيان، كان الناس المنتظرون بالقرب من قضبان قطار يعمل بالكهرباء يلاحظون وخزًا عندما يلمسون جسمًا موصلًا، مثل أنبوب موصل بالأرض. فما الذي يسبب الوخز؟

الجواب: ليس هناك تيارٌ يسري فينا بسبب المجال الكهربي للأرض؛ لأن كثافة الجسيمات المشحونة في الهواء المحيط بنا أصغر من أن توفِّر تيارًا ملموسًا.

إذا كان القطار يعمل كهربيًّا بواسطة خطٍّ علوي، فهو على الأرجح يحمل تيارًا مترددًا. ولأن هذا النوع من التيار يتغير باستمرار، من حيث القوة والاتجاه، فإن المجال المغناطيسي الذي ينتجه في المنطقة المحيطة يتغيَّر من حيث الاتجاه والقوة أيضًا. وهذا التغيُّر في المجالات المغناطيسية الحادث في الموصلات ينتج تياراتٍ كهربية، ولكنها على الأرجح أصغر من أن يلاحظها أحد. ومع ذلك، إذا لمس الشخص جسمًا موصلًا أكبر حجمًا، مثل لافتة معدنية، فقد تكون التيارات أكبر ويمكن ملاحظتها.

الفصل السادس

البصريات

(١) أقواس قُزَح

لماذا تَظهر أقواسُ قُزَح في بعض زخَّات المطر وليس كلها؟ ولماذا تكون على شكل أقواس نصف دائرية؟ هل يُمكن أن يُشكِّل قوس قزح دائرة كاملة؟ كم يَبعُد عنا قوس قزح؛ وهل يمكنك أن تذهب إلى أحد أطرافه؟ لماذا عادةً ما تظهر أقواس قزح في الصباح الباكر فقط، أو في آخر النهار؟

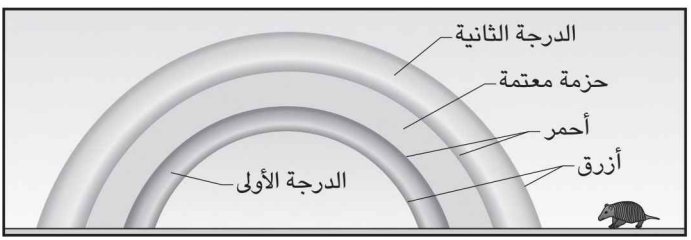
في العادة، ترى قوسَ قزحَ واحدًا فقط، لكنك قد تجد اثنين أحيانًا، كلاهما عبارة عن قوس شبه دائري حول نقطة مشتركة. ما هي هذه النقطة؟ ولماذا يكون تسلسل الألوان في القوسين معكوسًا؟ ولماذا تكون المنطقة بين القوسين داكنة نسبيًّا؟ ولماذا يكون القوس العلوي أعرض وأكثر خفوتًا من السُّفلي؟

لماذا عادةً ما تكون قوائم القوس أكثر سطوعًا وحمرة من قمَّته؟ ما الذي يصنع الحِزَم الرقيقة الشاحبة التي تُرى أحيانًا تحت القوس السُّفلي مباشرةً؟

لماذا تُرى الألوان في حزمتَين فقط، وليس على امتداد السماء الماطِرة؟ إذا أمكن وجود قوس قزح ثالث، فهل يكون قريبًا من القوسين الأوَّلين؟ هل يُمكن للرعد أن يُغيِّر قوس قزح؟

الجواب: تَنتج أقواس قزح عندما تُحلل قطراتُ الماء المتساقطة ضوءَ الشمس الأبيض إلى ألوانه المتعدِّدة، مُركِّزة الألوان في حزمة؛ تُسمى حزمة قوس قزح. وبما أن ضوء الشمس الساطع يجب أن يضيء القطرات، فإن أقواس قزح لا تُرى عندما يكون

الغطاء السَّحابي واسع النطاق. يتعرَّض الضوء لعملية «انكسار» (يَنحني مساره) عندما يدخل إلى قطرة ماء ويَخرج منها. ويَعتمِد مدى الانكسار على اللون؛ فمثلًا، لأن مسار الضوء الأزرق مُنحنٍ أكثر من مسار اللون الأحمر، يخرج الضوءان الأزرق والأحمر من القطرة بزاويتَين مُختلفتَين قليلًا.



شكل ٦-١: بند ٦-١.

تنطوي أقواس قزح الأكثر حدوثًا على أشعة ضوء تَدخل إلى قطرة، وتنعكس مرة عن السطح الداخلي لها، ثم تخرج باتجاهك. يُسمى قوس قزح هذا «قوس قزح الرئيسي» أو «قوس قزح من الدرجة الأولى»؛ لأن فيه انعكاسًا واحدًا يكون فيه اللون الأحمر أعلى من الأزرق. أما «قوس قزح من الدرجة الثانية» الذي يتطلَّب انعكاسين داخليَّين، ففيه تسلسل الألوان المعاكس، بسبب انطوائه على مواقع هندسية مختلفة لمسارات الضوء. يسمح الانعكاس الإضافي بنشرٍ أبعدَ للألوان داخل كل قطرة، مما يَنتج عنه قوس أعرض وأكثر خفوتًا. كما يكون القوس خافتًا لأنَّ بعض الضوء يتبدَّد عند كل نقطةِ انعكاسٍ بينما يُغادر القطرة، تاركًا للقوس ضوءًا أقل.

إنَّ كل قطرات المطر المُتساقطة المُضاءة تكسر الضوء وتفصل الألوان، ولكن تلك القَطرات الموجودة عند زوايا معيَّنة هي وحدها التي تُرسل الأشعة الملونة باتجاهك. يجب أن يكون قوس قزح الدرجة الأولى عند الزاوية ٤٢ درجة تقريبًا من «النقطة المضادة للشمس»، وهي النقطة المُقابلة مباشرة لموقع الشمس بالنسبة لك. لإيجاد قطرات المطر، وجِّه ذراعك الممدودة نحو النقطة المضادة للشمس (عند ظل رأسك) ثم ارفع ذراعك إلى أعلى، أو في اتجاه آخر بزاوية ٤٢ درجة. ستُشير ذراعك عندئذٍ إلى الموضع الذي تُعطيك

القطرات فيه قوس قزح من الدرجة الأولى. ستكون قطرات قوس قزح الدرجة الثانية عند زاوية قدرها ٥١ درجة تقريبًا من النقطة المضادة للشمس.

وبما أن القطرات يجب أن تكون عند زوايا محدَّدة بالنسبة إلى النقطة المضادة للشمس، فإن أقواس قزح تشكل أقواسًا دائرية حول تلك النقطة. من موقع عالٍ، مثل طائرة، يُمكنك أن ترى دوائر كاملة. ليس لأقواس قزح مسافة حقيقية منك؛ فكل القطرات الموجودة على الزاوية المناسبة يُمكنها الإسهام في الألوان (بصرف النظر عن بُعْدها عنك). لذلك، لا يُمكنك المشي إلى نهاية قوس قزح (لإيجاد جَرَّة من الذهب). وأيضًا، قوس قزح الذي تراه شخصي؛ فالشخص الواقف بجانِبِك يرى ألوانًا من مجموعة مختلفة من القطرات.

في العادة يكون قوس قزح مرئيًّا فقط في الصباح الباكر أو آخر النهار؛ لأن النقطة المضادة للشمس تكون مُنخفِضة كثيرًا عن الأفق في منتصف النهار. ومع ذلك، فقد تستطيع رؤية قوس قزح إذا نظرت إلى الأسفل، من نقطة عالية.

أما أقواس قزح من الدرجتَين الثالثة والرابعة (تتطلَّب ثلاثة وأربعة من الانعكاسات الداخلية، على الترتيب)، فتقع في أقواس دائرية حول الشمس (بدلًا من النقطة المضادة للشمس)، لكنها تكون باهتة للغاية، بحيث لا يُمكن رؤيتها في وهج الضوء القادم من هذا الجانب من السماء. هناك تقارير نادرة عن مُشاهَدات لأقواس قزح من الدرجة الثالثة، ولكن الألوان كانت ناتجة عن البلورات الثلجية على الأرجح. ويقع قوس قزح الدرجة الخامسة (خمسة انعكاسات داخلية) بين أقواس قزح من الدرجتين الأولى والثانية، ولكنه أكثر خفوتًا من أن يُرى، مثله مثل كل أقواس قزح الممكنة الأخرى.

تكون المنطقة التي تتوسَّط قوسين من الدرجتين الأولى والثانية، مُظلمة مقارنةً بالمناطق الموجودة أسفل القوسين وأعلاهما؛ لأن القطرات في تلك المنطقة المتوسِّطة لا تُعيد توجيه أشعة الضوء إليك، بينما القطرات في الأسفل والأعلى تفعل ذلك.

عادةً ما تكون قوائم قوس قزح أكثر سطوعًا وحمرةً من قمَّته، بسبب عوامل عدة، أحدها يتعلق بحجم القطرات وشكلها. تكون ألوان قوس قزح أكثر تمايزًا في القطرات الأكبر حجمًا؛ لأن مسار الضوء الإضافي في القطرات الأكبر يسمح للألوان بالانفصال أكبر. ومع ذلك فإن مقاومة الهواء تُسَطِّح القطرات الأكبر حجمًا بينما تسقط. يمر الضوء عند القوائم عبْر مقطع عرضي دائري أفقي من كل قطرة؛ وهذا المقطع العرضي مثالي لإنتاج ألوانٍ ساطعة مُتمايزة. في قمة قوس قزح، يمر الضوء عبْر مقطع عرضي غير دائري، مما يَنتج عنه ألوان أكثر خفوتًا وأقل تمايزًا.

وقد تكون القوائم أكثر سطوعًا أيضًا؛ لأن القطرات فيها مضاءة إضاءةً أفضل بضوء الشمس الملتف تحت السُّحب المعلَّقة. وتكون القوائم أكثر حمرة إذا فقَدَ ذلك الضوء كل ألوان الطيف، ما عدا طرفه الأحمر، بينما ينتقل مسافة طويلة عبْر الهواء ليصل إلى القطرات.

إن الحِزَم الخافتة التي يُمكن رؤيتها أسفل قوس قزح الدرجة الأولى مباشرة، وفوق قوس قزح الدرجة الثانية مباشرة (في حالات أكثر ندرة)، تُسمى «الزوائد». تكشف الزوائد عن أن ألوان قوس قزح لا تُنتجها قطرات تعمل عمل منشورات بسيطة. بل إن قوس قزح هو في الواقع «نمط متداخل» تُنتجه موجات الضوء المارة عبْر كل قطرة، ثم يحدث التداخل. إن الألوان التي تراها عادةً هي الأجزاء الأكثر سطوعًا من النمط المتداخل. على سبيل المثال، ينتج الأحمر الساطع حيثما تكون موجات اللون الأحمر المتداخِلة مُترافِقة بعضها مع بعض؛ ومِن ثَم يُعزِّز بعضها بعضًا.

إذا كان للقطرات الحجم نفسه تقريبًا، فربما ترى الزوائد الباهتة. وعندما تكون القطرات متفاوتة الأحجام، تتداخَل الزوائد بقدرٍ أكبر، لا يُمكن معه تمييزها، ولا ترى إلا إضاءة بيضاء باهتة في العموم.

وعلى الرغم من أن نماذج أقواس قزح البسيطة تعمل بنجاح مع القطرات الأكبر من ٠٫١ مليمتر، فإن نماذج أكثر تعقيدًا تلزم للقَطرات الأصغر حجمًا، وما زالت قيد البحث.

يتسبب الرعد في تذبذب قطرات الماء، مما يُشوِّه الألوان أو يزيلها، وذلك بسبب تشوُّه شكل القطرات. وكذلك فإن التذبذبات الناتجة عن عصف الريح أثناء تساقط القطرات ربما تشوه الألوان، خاصة في حالة القطرات الأكبر حجمًا.

(٢) أقواس قزح غريبة

لماذا يكون بعض أقواس قزح أبيض، وبعضها أحمر؟ إلامَ ترجع ندرة الألوان وقلَّتها في أقواس قزح التي تُرى في ضوء القمر؟ ما أشكال وألوان الأقواس التي تُرى في الضباب، أو على سحابة، أو على عشب مُغطًّى بالندى؟ إذا رأيت قوس قزح على مسطَّح مائي، بينما يظهر قوس قزح آخر فوق تلك المياه، فهل الأول مجرد انعكاس للثاني؟

في حالات نادرة، يُمكن أن نرى حزمة من الألوان تبدو عمودية، مجاورةً للجزء السفلي من قوس قزح عادي. ما الذي ينتج هذه الحزمة الإضافية؟

يُنتج الضوء المرئي قوسَ قزح العادي. فهل تُنتج الأضواء تحت الحمراء وفوق البنفسجية أقواس قزح أيضًا؟

الجواب: يكون انفصال الألوان في قوس قزح أصغر في حالة القطرات الأصغر حجمًا. ويتمثل أحد أسباب ذلك في أنه في حالة القطر الأصغر، تقلُّ فرصة الألوان في الانتشار داخل القطرة. وإذا كانت القطرات صغيرة جدًّا، تتداخل الألوان لتنتج قوس قزح أبيض.

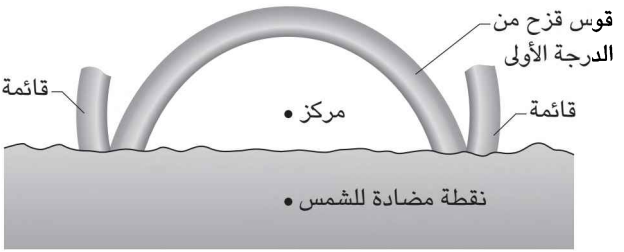
يمكن أن يظهر قوس قزح أحمر، عندما تكون الشمس مُنخفِضة. وبما أنه يتحتَّم حينئذٍ أن يقطع ضوء الشمس مسافة طويلة عبْر الغلاف الجوي، فإن الضوء المشتَّت من جزيئات الهواء على امتداد المسار يُزيل الجزء الأكبر من الطرف الأزرق في الطيف المرئي، وتصبح القطرات مضاءة بصورة رئيسة بالضوء الأحمر.

في الليل، يُمكن أن تظهر أقواس قزح في ضوءٍ من القمر، ولكنَّها تَفتقِر إلى الألوان؛ لأنَّ عينيك ترصدان الألوان بقدْر ضئيل في الظلام. تَندر ملاحظة أقواس قزح المضاءة بضوء القمر، بسبب خفوتها، ولأنَّ الناس لا يتحرون أقواس قزح في الليل.

يُمكن أن تُرى أقواس قزح في الضباب، أو على جانبَي سحابة، أو على عشب مغطًّى بالندى، ولكن يصعب تعيينها؛ لأن القطرات غالبًا ما تكون أصغر كثيرًا من أن تعطي ألوانًا مُتمايزة، وقد تضيع الأقواس في الوهج العام. إنها حِزَم بيضاء على شكل قطوع زائدة أو ناقص، بسبب منظور رؤيتك لها على سطح أفقي. يُمكنك أيضًا أن ترى قوسًا على مسطَّح مائي إذا كان سطح البِركة مغطًّى جزئيًّا بقطرات طافية.

إذا تشكَّل قوس قزح عادي فوق مسطَّح مائي، فقد ترى في الماء «قوس قزح انعكاسيًّا». ومع ذلك فهذا القوس الانعكاسي ليس انعكاسًا لقوس قزح الذي تراه فوق الماء؛ لأن مجموعة مُختلفة من قطرات المطر هي المسئولة عن تكوينه. فلتكوين قوس قزح انعكاسي، يجب أن تدخل أشعة الضوء إلى قطرات المطر، وتَنعكِس مرةً (أو مرتَين) داخلها وتُغادِرها، ثم تنعكس عن سطح الماء إليك. تقع القطرات التي تفعل كل هذا على زوايا نظر مختلفة عن القطرات التي تعطيك قوس قزح عادي. ونتيجةً لذلك، لا يتداخَل قوس قزح الانعكاسي مع قوس قزح العادي.

إنَّ الحزمة الرأسية الظاهرية، التي تُرى أحيانًا بالقرب من قائمة قوس قزح عادي، تَنتج أيضًا عن انعكاسٍ للضوء عن سطح الماء. ومع ذلك، ففي هذه الحالة، يَنعكِس الضوء أولًا عن سطح الماء، ثم يُضيء قطرات المطر. تقع هذه القطرات على زاوية مناسبة من منظورك، بحيث تُرسل لك أشعةً ملوَّنةً تُنتج الحزمة الرأسية (شكل ٦-٢). في بعض الحالات النادرة قد ترى قوسَ قزح إضافيًّا كاملًا يعلو قوس قزح العادي. (يُفسَّر هذا



شكل ٦-٢: بند ٦-٢: يستطيع الضوء الذي يعكسه الماء أن يُشكِّل قوس قزح، مركزه نقطة أعلى من قوس قزح الدرجة الأولى. هنا، تظهر قائمتا قوس قزح الإضافي فقط.

القوس الإضافي أحيانًا خطأً بأنه قوس قزح من الدرجة الثالثة.) يتمركز قوس قزح العادي حول النقطة المضادة للشمس، بينما يتمركز قوس قزح الإضافي حول نقطةٍ مزاحة فوق النقطة المقابلة للشمس، بفعل التغيُّر في الموقع الهندسي نتيجة للانعكاس. إذا كانت قوائم القوس الإضافي هي فقط الظاهرة، فقد تبدو رأسية، بينما هي في الحقيقة مُنحنية.

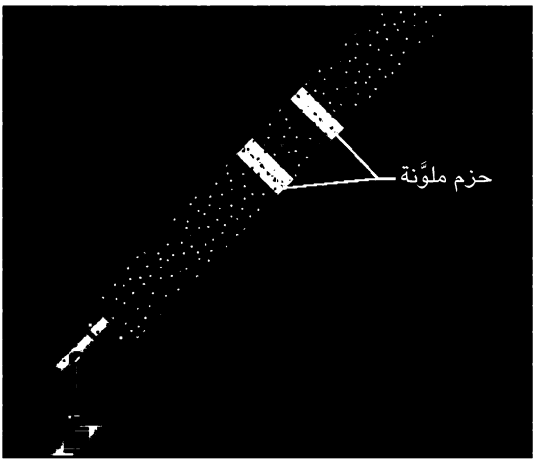
يُمكن أيضًا لكلٍّ من الضوءين، فوق البنفسجي وتحت الأحمر، تكوينُ حِزَم من قوس قزح. وعلى الرغم من أن هذه الحزم لا تَظهر لأعيننا وليس لها لون بالمعنى الدارج، فإنه يُمكن رصدها باستخدام معدات خاصة.

(٣) أقواس قزح اصطناعية

عندما يُنثَر الماء في ضوء الشمس المباشر بالقُرب منك، لماذا يُمكنك رُؤية قوسَي قزح متداخلَين جزئيًّا؟ حينما يُوجَّه ضوء كشاف بزاوية باتجاه الأعلى خلال مطر خفيف في الليل، لماذا يُمكنك رؤية حزمتَين ساطعتين فيه (شكل ٦-٣)؟

في بعض المواقع يُمكن أن نرى في الشارع شيئًا شبيهًا بقوس قزح، حتى حينما يكون الشارع جافًّا. ثمَّة تقارير نادِرة عن أقواس قزح شُوهدت في الوحل وفي أماكن أخرى غير متوقَّعة. ما الذي يصنع هذه الألوان؟

بإمكانك رؤية أقواس قزح صغيرة على قطرة واحدة من الماء تتدلَّى من مشبك ورق إذا سلَّطت شعاعًا من الضوء على القطرة في غرفة مظلمة تمامًا. وبقدْر من الإمعان،



شكل ٦-٣: بند ٦-٣: الحزم المُلوَّنة التي تُرى في شعاع صادر عن أحد الكشافات في ليلة ماطرة.

يُمكِنُك رؤية بُقَع ملوَّنة، هي عبارة عن أقواس قزح من الدرجات العشر الأولى (أي ما يصل إلى عشرة انعكاسات داخلية).

الجواب: عندما تكون قطرات الماء قريبة، ترى كل عين القطرات من منظور مُختلف؛ لذا ترى قوسي قزح مُتداخلَين جزئيًّا فقط. وعندما تكون القطرات بعيدة، يكون لدى عينَيك في الأساس المنظور نفسه، ويَتطابق القوسان تمامًا.

يَنكسِر الضوء الصادر من الكشاف، ويَنقسِم إلى ألوان، بفعل قطرات المطر المُتساقِطة عبْر الشعاع. تقع بعض القَطرات على زوايا صحيحة من منظورك، بحيث تُرسل أشعة قوس قزح إليك. تَرتبِط الحزمة الأبعد عن الكشاف بقَوس قزح الطبيعي من الدرجة الأولى (قوس قزح الطبيعي الأدنى)، في حين تَرتبِط الحزمة الأُخرى بقوس قزح الطبيعي من الدرجة الثانية. وبينما يدور شعاع الضوء، فإن مواقع القطرات التي تُرسِل أشعة قوس قزح إليك تتحرَّك أعلى وأسفل الشعاع؛ ومِن ثَمَّ تتحرك الحزم هي الأخرى. تكون ألوان الحزم داكنة إلى حدٍّ كبير؛ لأن عينيك لا تُحسنان رصد الألوان في الليل.

أما أقواس قزح في الشوارع الجافة، فتنتج عن الكرات الزجاجية الشفافة الصغيرة التي تُضاف أحيانًا إلى خطوط تحديد المسارات في الشارع لتَعكس ضوء السيارة إلى السائق مرةً أخرى، لكي تكون الخطوط أكثر وضوحًا في الليل. إذا انفصلت كرات كثيرة وتناثرت في الشارع، فإنها تحلل ضوء الشمس المباشر إلى ألوانه، تمامًا مثلما تفعل قطرات المطر. أما أقواس قزح الغريبة الأخرى، فمن الصعب أكثر تفسيرها، لكنها تنتج على الأرجح عن قطرات الماء، أو شذرات الزجاج، أو الجسيمات الأخرى التي تُقسِّم الضوء الأبيض إلى ألوانه.

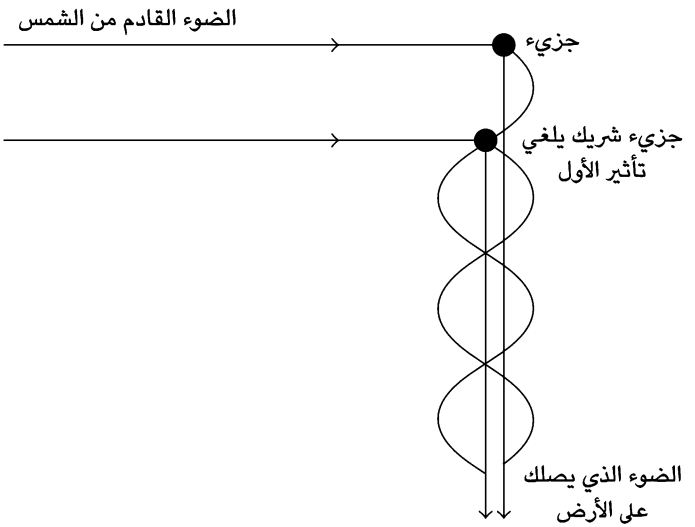
(٤) سماء النهار ليست مظلمة

لماذا تكون السماء مُشرِقةً خلال النهار؟ بطريقةٍ ما، على ما يبدو، يُغيِّر الغلاف الجوي من مسار الضوء ويُوجِّهه نحوك. ومع ذلك، إذا كان الهواء شفافًا، فلماذا لا يمرُّ ضوء الشمس من خلاله دون أن يَنحرِف؟

غالبًا ما يُجاب عن هذا السؤال بالإحالة إلى مبدأ «تشتُّت رايلي»، وهو نموذج يُفسِّر كيفية تشتُّت الضوء من جزيئات الهواء. أشار ألبرت أينشتاين إلى أنه إذا كانت هذه الإجابة كاملةً ووافية، لكانت سماء النهار مُظلِمة.

اتباعًا لحُجَّته، لننظر إلى جزيء هواء يُشتِّت الضوء نحوك من الأعلى. لتبسيط الأمر، سنَفترِض أن ضوء الشمس له طول موجي واحد فقط، وبأنك تتلقَّى أيضًا الضوء الذي تُشتِّته الجزيئات الأخرى التي تقع على طول المسار الذي يمتدُّ من الجزيء الأول إليك. يجب عندئذٍ أن يكون أحد هذه الجزيئات في وضعٍ بحيث تصلُ الموجة الضوئية التي يرسلها لك بالتوازي على المسار المقابل تمامًا لمسار الموجة الضوئية التي يُرسلها لك الجزيء الأول. تُلغي كلٌّ من الموجتين الأخرى وتُحدِثان ظلامًا (انظر شكل ٦-٤). بما أنه، في المتوسِّط، يكون لكل جزيءٍ جزيءٌ آخر شريك يُلغي الضوء الذي يُرسله الأول نحوك؛ إذن فمن المفترض ألا تستقبل أي ضوء، وأن تكون السماء مُظلِمَة، باستثناء المنطقة التي تحيط بالشمس مباشرةً، أليس كذلك؟

الجواب: يتشتَّت الضوء من جزيئات الهواء وفقًا لنموذج رايلي، ومن المفترض أن تنطبق حجة أينشتاين. لكن كما أشار أينشتاين نفسه فإن السماء ليست مظلمة لأن كثافة الغلاف الجوي ليست واحدة. علاوةً على ذلك، تتحرك الجزيئات بشكل مستمر وتتراكم لفترة وجيزة، مما يَستبعد احتمالية أن تلغي الجزيئات الشريكة في أي لحظةٍ



شكل ٦-٤: بند ٦-٤: تُلغى الموجات الضوئية عندما يُبعثرها جزيئان يَبعُد أحدهما عن الآخر بنصف الطول الموجي.

الضوءَ المشتَّت من كل الجزيئات الأخرى؛ فالسماء تكون مُشرقةً نظرًا إلى عدم تماثُل كثافة جزيئات الهواء وتفاوتها عبْر الزمن.

(٥) ألوان السماء

لماذا تكون السماء زرقاء نهارًا؟ هل يعود هذا اللون الأزرق إلى المياه أو الهَبَاء الجوي الموجودين في الهواء، أم نتيجة لجزيئات الهواء نفسها؟ ماذا سيحدث لهذا اللون الأزرق إذا كان الغلاف الجوي أسمَك أو أرفع؟ لماذا ليسَت السماء بنفسجية اللون (ذات لون أزرق داكن)؟

لماذا تكون المنطقة التي بالقرب من الأفق أكثر بياضًا من السماء القريبة؟ ما هو الجزء الأكثر زرقة في السماء؟ لماذا لا يكون للسماء لون واحد؟ هل تكون السماء زرقاء في

ليلة مقمرة؟ (على الرغم من أن السماء تكون مظلمة جدًّا بحيث تعجز عيناك عن تمييز أي لون، إلا أنها قد تكون ملوَّنة.)

لماذا يكون لون غروب الشمس أحمر؟ ألا ينبغي أن تكون الألوان الأخيرة هي خليط من الأحمر والأصفر يَنتُج عنه لون برتقالي؟ لماذا يوجد أحيانًا تبايُن لوني حاد في المنطقة الحمراء من السماء؟

الجواب: تميل السماء أثناء النهار إلى الزرقة بالأساس لأن جزيئات الهواء تُشتِّت بقوة أكبر الطرفَ الأزرق من الطيف من ضوء الشمس أكثر من الطرف الأحمر. وهكذا، عندما تنظر إلى السماء بعيدًا عن الشمس، فإنك بذلك تَعترض الضوء الغالب عليه اللون الأزرق. لا يكون اللون الأزرق أزرق خالصًا؛ لأنك تعترض أيضًا ألوانًا باهتة أخرى قد شتَّتَتْها جزيئات الهواء.

على الرغم من أن اللون البنفسجي يتشتَّت بقوة أكبر من الضوء الأزرق، فلا تَبدو السماء بنفسجية لأن اللون البنفسجي الموجود في ضوء الشمس يكون أبهت من اللون الأزرق، ولأنَّ عينيك أيضًا أقل حساسية في تمييز اللون البنفسجي عنها من تمييز الأزرق.

يُطلَق على هذا النوع من التشتُّت الذي تُحدِثه الجزيئات «تشتُّت رايلي» نسبة إلى نموذج طوَّره اللورد رايلي في نهاية القرن التاسع عشر. كان اللورد رايلي مقتنعًا في البداية بأن الغاز النقيَّ (الذي لا يوجد به هباء جوي أو غبار) شفَّاف؛ ومِن ثَمَّ كان لون السماء الأزرق بالنسبة إليه ناتجًا عن تشتت الضوء من الجسيمات الصغيرة وليس من الجزيئات.

على الرغم من أن الماء وجزيئات الأوزون في الغلاف الجوي تمتصُّ الطرف الأحمر للطيف، ومِن ثَمَّ تترك الطرف الأزرق، إلا أنَّها لا تُضفي اللون الأزرق الملحوظ على السماء. يوجد القليل من الماء في الغلاف الجوي، قدْرٌ قليل لا يصنع امتصاصه فارقًا، كما أن ضوء الشمس ينتقل أثناء النهار مسافات قصيرة جدًّا عبْر طبقة الأوزون بحيث لا يَصنع امتصاص الأوزون فارقًا.

تكون السماء عند الأفق بيضاء؛ لأن الضوء القادم من الجزيئات البعيدة يَخضع لتشتُّت مُتعدِّد قبل أن يصل إليك. ترسل الجزيئات الأقرب الضوء الأزرق في اتجاهك كما تفعل الجزيئات الأبعد. ومع ذلك، فإن المسافة الطويلة التي يقطعها الضوء من الجزيئات الأبعد يَعني أنه يَخضع لتشتُّت إضافي، بينما يُصبح المكوِّن الأزرق أضعف. يَغلب اللون الأحمر أخيرًا على هذا الضوء ويَمتزِج مع الضوء الذي يَغلب عليه اللون الأزرق القادم من الجزيئات الأقرب ليَخلُقا اللون الأبيض للأفق.

تكون سماء الليل زرقاء، إلا أن الضوء يكون شديد الخفوت بحيث لا يميِّز جهازك البصري لونه. ومع ذلك، يُمكن أن يظهر اللون الأزرق في الصور الفوتوغرافية ذات زمن التعرُّض الطويل.

عندما ترى غروب الشمس، فإنك تعترض الضوء الذي قطع مسافة طويلة عبْر الغُلاف الجوي للأرض بدلًا من الضوء الذي يَنتقل من الشمس إلى الأسفل عبْر الغلاف الجوي مُباشرة. تُشتِّت جزيئات الهواء الطرف الأزرق من الطيف على مدار هذه المسافة الطويلة، تاركةً بصورة رئيسية الطرف الأحمر والأصفر من الطيف موجَّهَين نحوك. من المفترض أن تكون ذروة شدة اللون عند طول موجي يبلغ حوالي ٥٩٥ نانومترًا، ولا بد أن يكون اللون الصافي برتقاليًّا. ومع ذلك، يميل اللون في أغلب حالات غروب الشمس أكثر إلى اللون الأحمر؛ وذلك لأن الجسيمات الصغيرة في الغلاف الجوي تُساعد في تشتيت جميع الألوان ما عدا اللون الأحمر.

أحيانًا، قد يكون هناك انقسامٌ حادٌّ في ألوان السماء أثناء غروب الشمس إذا شاهَدْتَه خلال فترة من فترات «الانقلاب الحراري» التي تزداد فيها درجة حرارة الهواء مع الارتفاع. وعندما يمر الضوء الموجود بالقرب من غروب الشمس عبْر مثل هذا التباين في درجة حرارة الهواء، ينكسر ولا تعترض أنت مساره. إلا أنك لا تزال تعترض الضوء القادم من أجزاء مُنخفِضة قليلًا وأخرى مرتفعة قليلًا من السماء، ولكن نظرًا لوجود جزء مفقود في المشهد الذي تراه، لا يمتزج لون الجزء السفلي مع لون الجزء الأعلى من السماء بسلاسة.

(٦) الجبال الزرقاء والبيضاء والغيوم الحمراء

لنفترض أنك تَفحص ألوان سلسلة من الجبال المظلمة التي تمتدُّ بعيدًا. لماذا تكون الجبال الواقعة على مسافة مُتوسِّطة زرقاء اللون والجبال الأبعد قليلًا أكثر زرقة، بينما يكون لون الجبال التي تظهر على امتداد خطِّ الأفق أبيض؟ لماذا تَصطبغ الحقول الثلجية البعيدة بعضَ الشيء، والمعرَّضة للضوء المبهر، باللون الأصفر أحيانًا؟ لماذا تكون الغيوم البعيدة جدًّا حمراء اللون أحيانًا؟ قد تظن أن هذا التلون يحدث فقط أثناء غروب الشمس عندما تكون بعض أجزاء السماء حمراء، ولكن يمكن أن يحدث ذلك أيضًا حتى عندما تكون الشمس في كبد السماء.

الجواب: كما هو موضَّح في الجواب السابق، تكون الجبال الواقعة على مسافة متوسِّطة زرقاء اللون؛ لأن الهواء الموجود بينك وبين الجبل يُشتِّت الطرف الأزرق من

الطيف نحوك أكثر من الطرف الأحمر؛ ومِن ثَمَّ ترى المشهد المظلم للجبل يتخضب باللون الأزرق. وإذا كان أحد الجبال أبعدَ قليلًا، يكون هناك المزيد من الهواء بينك وبين الجبل ليُشتِّت الضوء الغالب عليه اللون الأزرق؛ ومِن ثَمَّ، تكون الصبغة الزرقاء أكثر وضوحًا. أما إذا كان الجبل يقع على خطِّ الأفق، فسيبدو أبيض اللون لنفس السبب الذي يجعل أفق السماء نفسها تبدو بيضاء اللون (انظر البند السابق).

إنَّ لون الحقول الثلجية البعيدة المضاءة بضوء ساطِع يَختلِف عن لون الجبل الواقع على المسافة عينها؛ لأنَّ الحقل الثلجي يُشتِّت الضوء الأبيض نحوكَ بينما لا يفعل الجبل ذلك. وبينما يَنتقِل الضوء المُشتَّت من جانب الحقل الثلجي نحوك، فإنَّ الطرف الأزرق من الطيف يَضعُف بسبب التشتُّت الناتج عن وجود جزيئات الهواء في الطريق، ويَميل اللون الأصفر على الهيمنة على الضوء الواصل إليك. ومع ذلك، تُرسل إليك جزيئات الهواء المضيئة التي تقع بينك وبين الحَقل الثلجي ضوءًا يَغلِب عليه الطرف الأزرق من الطيف. ويَنتُج عن امتزاج الضوء الغالب عليه اللون الأزرق من جُزيئات الهواء بالضوء الغالب عليه اللون الأصفر والأحمر من الحقل الثلجي، ضوء أبيض ذو صِبغة صفراء.

تمامًا كالحقول الثلجية البعيدة، تُشتِّت السُّحب البعيدة الضوءَ الأبيض الساطع تجاهَك، وهو ما قد يَجعلك تظن أن السُّحب سيكون لها نفس الصبغة الصفراء. ومع ذلك، يُمكن أن يكون لإحدى السُّحب البعيدة لون أحمر مَلحوظ. ويعود هذا الاختلاف في التلوُّن إلى قدرتك على رؤية السُّحب التي تقع على مسافات أبعدَ مِن الحقول الثلجية. تعني المسافة الإضافية أن الضوء القادم من السُّحب يَخضع إلى المزيد من التشتُّت بواسطة جزيئات الهواء التي تُضفي الصبغة الحمراء على هذا الضوء.

(٧) علامة الخطر بالنسبة للبحارة

هل المثَل الشائع «تُبهِج سماء الليل الحمراء قلوبَ البحَّارة، أما سماء الصباح الحَمراء فتُنبِّئهم بالخسارة» صحيح؟

الجواب: قد يكون هناك شيء من الصحة في هذا المثل حين تَقترِب العواصف من جهة الغرب وتُكوِّن ما يُعرَف باسم «نظم العواصف». إذا كانت السماء جهة الغرب حمراء عند الغروب، تكون المنطقة الغربية خالية مِن غيوم العواصف التي مِن شأنها أن تحجُب أشعة الشمس التي تحفُّ انحِناء الأرض، وعلى الأرجح ستتمتَّع بطقس جيِّد لبضعة أيام.

ومع ذلك، إذا كانت السماء جهةَ الشَّرق حمراء عند شروق الشمس، تكون المنطقة الشرقية خاليةً من غيوم العواصف، وقد تأتي العاصفة التالية من الغرب في وقت قريب.

(٨) غروب الشمس والبراكين

لماذا تَجعل الانفجارات البركانية ألوانَ غروب شمس أخَّاذةً في جميع أنحاء العالم؟ على ما يبدو، كانت حالات الغروب الفريدة هذه هي مصدر الإلهام في العديد مِن لوحات الرسام النرويجي إدفارد مونك، بما في ذلك لوحتُه الشَّهيرة «الصرخة»، التي تُصوِّر شخصًا يُعاني من يأسٍ وجودي وتَصطبغ السماء بلونٍ أحمر دامٍ مِن خلْفه. كان مونك قد شاهد غروب الشمس بألوانه الأخَّاذة في موطنِه في النرويج بعد ثورة بركان جزيرة كراكاتوا بالقُرب من جاوة في عام ١٨٨٣. قذَف هذا الانفجار البُركاني بالرماد في الغلاف الجوِّي العُلوي، وانتشر الرماد في جميع أنحاء العالم. لا بد أن مونك قد وجد مشهد غروب الشمس مُخيفًا ومُنذِرًا بالخطر عندما وصَل الرماد إلى دوائر العرض الشمالية العُليا للنرويج.

الجواب: يُشكِّل الرماد والجسيمات الأخرى التي تتصاعَد بفعل ثورة البركان طبقةً على ارتفاع حوالي ٢٠ كيلومترًا. يُكوِّن جزء من هذه الموادِّ ثاني أكسيد الكبريت الذي يتفاعل مع الأوزون عند هذا الارتفاع، مُكوِّنًا الكبريتات التي تترسَّب بعد ذلك لتُشكِّل الهباء الجوي.

هذه الطبقة من الرماد والهَبَاء الجوي تُغلِّف الأرض. والألوان التي تراها في السماء عند غروب الشمس هي مَزيج من أشعة الشمس المشتَّتة من تلك الطبقة ومِن جزيئات الهواء الموجودة أسفلها وأعلاها. يَميل الضوء الذي يَصل إليك «من أسفل الطبقة» إلى اللون الأحمر لأنَّه يمرُّ عبْر الجزء الكثيف من الغلاف الجوي؛ حيث يفقد الكثير من اللون الأزرق بسبب التشتُّت الناتج عن وجود جزيئات الهواء الوفيرة على طول مساره. يمرُّ الضوء الذي يصل إليك من هذه الطبقة أيضًا عبْر الغلاف الجوي المُنخفِض، ولكنه قد يَخسر بعضًا من ضوئه الأحمر لعملية امتصاصِه من قِبَل الأوزون. يمرُّ الضوء الذي يَصِل إليك من أعلى الطبقة عبْر هواءٍ أرقَّ ولا يَخسر سوى القليل من لونه الأزرق. عندما تنظر إلى السماء في وقت غروب الشمس، يُمكنك اعتراض/مواجهة الضوء بمجموعة متنوِّعة من الألوان المُذهِلة التي يُمكن أن تَختلِف في كل جزء من أجزاء السماء وتَختلِف أيضًا من ليلة لأخرى. وبما أنه من المُمكن أن يستمر وجود الهَبَاء الجوي والرماد البركاني لأَشهُر، يستمرُّ الغروب الأخاذ بدوره في الحدوث.

إذا حجبت السُّحب البعيدة الموجودة أسفل الأفق الغربي بعضًا من الضوء الذي يصل إلى الطبقة السُّفلى من الطبقة، سترى تنوُّعات أفقية في اللون قد ينتج عنها ظهور الغروب بتوزيعات لونية مختلفة بصورة لافتة للنظر على الجانب الأيمن والأيسر من الشمس.

(٩) حلقة الأسقف

في أغسطس عام ١٨٨٣، حدث انفجار بركاني ضخم في جزيرة كراكاتوا بالقرب من جاوة، جنوب شرق المحيط الهادي. وفي شهر سبتمبر من نفس العام، وصَف القسُّ سيرينيو، أحد أساقفة هونولولو، ظهور «هالة غريبة ممتدة من الضوء تبعُد عن الشمس من عشرين إلى ثلاثين درجة كنا نراها في السماء كل يوم وطوال اليوم، وكانت عبارة عن ضباب أبيض يَصطبِغ باللون الوردي الذي يتدرَّج إلى اللون الأرجواني الفاتح أو البنفسجي، ومن خلفها يظهر لون السماء الأزرق.» ما الذي يتسبب في ظهور هذه الهالة التي تُعرف الآن باسم «حلقة الأسقف»، والتي غالبًا ما تصاحب حدوث الانفجارات البركانية الكبيرة؟ وما الذي يحدِّد حجم الهالة ولون إطارها؟

الجواب: يرجع السبب في تكوُّن حلقة الأسقف إلى «انكسار» الضوء الذي تتسبَّب فيه الجسيمات الصغيرة التي يَقذفها البركان إلى الغلاف الجوي العلوي (الانكسار هو نوع من أنواع تشتُّت الضوء؛ وهو يَعني في هذا السياق أن الجسيمات الصغيرة تنشر الضوء الأبيض فيُظْهِرُ ألوانه المختلفة). تستقر الجسيمات الأكبر الناتجة عن ثورة البركان خارج الغلاف الجوي، ولكن الجسيمات الصغيرة تظلُّ عالية وتَنتشِر حول العالم بواسطة الدوران الجوي على ارتفاعات عالية. عندما تنظر إلى جانب الشمس، بالإضافة إلى ضوء السماء الطبيعي، فإنك تَعترِض أيضًا الضوء الذي انكسر متجهًا نحوك بفعل هذه الجسيمات الصغيرة. يَصنع هذا الضوء الإضافي منطقة دائرية هائلة السطوع حول الشمس، كما لو كانت تُوجد حلقة حول الشمس.

يعتمد حجم الحلقة على مدى انكسار الضوء، الذي يكون أكبر بالنسبة للجزيئات الأصغر. يمكن أن تكون حافة الحلقة حمراء لأن الضوء الأحمر، ذو الطول الموجي الأطول في الطيف المرئي، يكون أكثر انكسارًا (انتشارًا). وهكذا، يمكن للجسيم الموجود على حافة الحلقة إلى يمينك، مثلًا، أن يُشتِّت الضوء الأحمر ويوجهه نحوك، لكن ليس الضوء الأزرق الأقل تشتُّتًا. ومع ذلك، يمكن أن تكون حافة الحلقة بنفسجية اللون إذا اعترضَت كلًّا من الضوء الأحمر المنكسر والضوء الأزرق الطبيعي للسماء عند حافة الحلقة. تتمتَّع الحلقة

بحافةٍ أكثر وضوحًا وثراءً بالألوان إذا كانت جميع جزيئات الغبار لها الحجم نفسه تقريبًا، ومِن ثَمَّ تُشتِّت الضوء بالطريقة نفسها. أما إذا كان للحلقة مجموعة واسعة من الأحجام المختلفة لجزيئات الغبار، تكون الحلقة خفيفة ومائلة إلى البياض.

(١٠) الانحناءات التي تُميِّز التباين بين السُّحب

أثناء رحلتك الجوية القادمة، افحَص شكل السُّحب بالقرب من النقطة المقابلة للشمس مباشرة. من المحتمل أن ترى المزيد من الأشكال في السُّحب في المنطقة التي تقع بزاوية مقدارها حوالي ٤٢ درجة من النقطة المقابلة للشمس أكثر من المناطق الموجودة خارج هذه المنطقة. فلماذا تتغيَّر أشكال السُّحب هكذا؟

الجواب: يُمكنُك تمييز أشكال في السحاب عندما يكون هناك تبايُن جيِّد بين المناطق التي تُشتِّت أشعة الشمس المشرقة والمناطق المُجاورة التي تُغطِّيها السُّحب. يحدث أكثر صور تَشتُّت الضوء سطوعًا بواسطة قطرات الماء الموجودة في السحاب بزاوية ٤٠ درجة مئوية من النقطة المقابلة للشمس، وهكذا ترى التباين الأفضل في تلك المنطقة.

(١١) ألوان السماء أثناء كسوف الشمس

لماذا يَتحوَّل الأفق خلال كسوف الشمس الكامل إلى اللون الأحمر بينما تُصبح السماء العلوية أكثر زرقةً مما هي عليه قبل الكسوف أو بعده؟

الجواب: عادةً، يكون لون الضوء القادم من اتجاه الأفق أبيض. تُشتِّت جزيئات الهواء التي لا تبعد عنك كثيرًا الضوء الأزرق في اتجاهك أكثر من الضوء الأحمر، بينما تُشتِّت جزيئات الهواء الأكثر بُعدًا نفس التوزيع اللوني تجاهك، ولكن نظرًا لأن الضوء لا بد أن يقطع مسافة أكبر للوصول إليك، فإنه يَفقِد الكثير من لونه الأزرق بسبب عمليات التشتيت التي تُحدثها جزيئات الهواء الأُخرى على طول الطريق؛ ومِن ثَمَّ تساهم الجزيئات الأقرب بالضوء الأزرق، بينما تساهم الجزيئات الأبعد بالضوء الأحمر، وبما أن المزيج يبدو أبيض اللون، يبدو الأفق أبيض اللون كذلك. ومع ذلك، عندما تكون في الظل الذي يحدثه الكسوف الشمسي الكامل، لا تكون الجزيئات القريبة مضيئة، فلا تتلقَّى سوى الضوء الأحمر القادم من الجزيئات البعيدة، وهكذا يبدو الأفق أحمر اللون.

تكون السماء أكثر زرقة أثناء الخسوف الكلي؛ لأن الظل يُلغي الضوء الذي يتشتَّت نحوك من الجزء السفلي من الهواء العلوي. يصطبغ هذا الضوء عادةً باللون الأحمر؛ لأنه

حتى يصل الضوء إلى الهواء العلوي، فإنه ينتقل عبْر الجزء الأكثف من الغلاف الجوي. يفقد الضوء على طول الطريق الكثير من لونه الأزرق بسبب التشتُّت الذي تُحدثه جزيئات الهواء الوفيرة التي يتعرض لها في طريق، وهكذا، عندما يتشتَّت نحوك أخيرًا من الهواء العلوي يكون اللون الغالب عليه هو الأحمر. أما الضوء الذي يتشتَّت نحوك من الجزء الأعلى من الهواء العلوي، فينتقل عبْر الجزء الأقل كثافة من الغلاف الجوي، ويُقابل عددًا أقل من الجزيئات؛ ومِن ثَمَّ يفقد قدْرًا أقلَّ من لونه الأزرق. وهكذا، عندما يتشتَّت أخيرًا متجهًا نحوك من الهواء العلوي، يكون لا يزال محتفظًا بمعظم لونه الأزرق. يكون لون السماء العلوية عادة مزيجًا من الضوء الأحمر من الهواء السفلي، والضوء الأكثر زرقة من الهواء الأعلى. ومع ذلك، يلغي الكسوف الضوء الأحمر، وبذلك تصبح السماء العُلوية أكثر زرقة من المعتاد أثناء الكسوف.

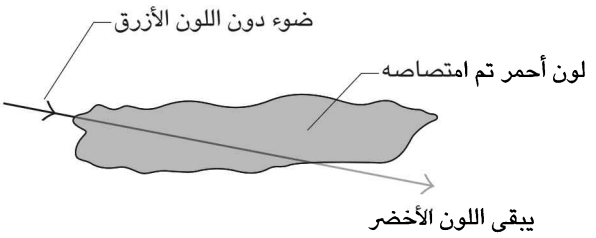
(١٢) عندما يتحول لون السماء إلى اللون الأخضر، اختبئ في القبو

عندما كنت صغيرًا وكنت أعيش في تكساس، كانت جدتي تأخذنا دائمًا إلى القبو كلما حوَّلت عاصفة شديدة لون السماء إلى الأخضر؛ لأنها (وآخرين) اعتقدت أن اللون الأخضر يشير إلى احتمال حدوث إعصار. لماذا يتغيَّر لون السماء إلى هذا اللون بدلًا من أن تُصبح مُظلِمة فحسب؟

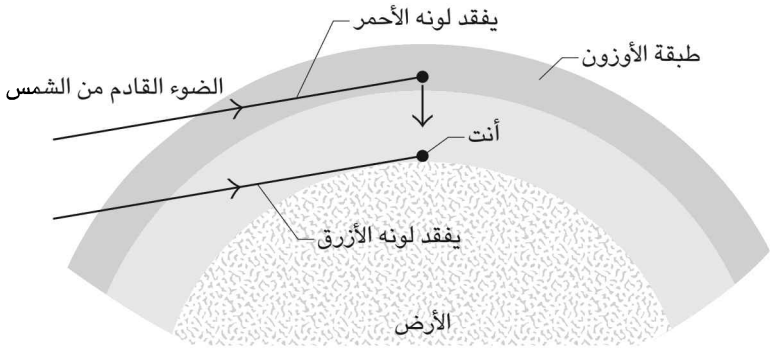
الجواب: لا بد أن تتوفَّر سمتان ليتكون اللون الأخضر في السماء: (١) لا بد أن يكون الضوء الساقط قد فقَدَ طرفه الأزرق من الطيف المرئي نتيجة تشتُّته بواسطة جزيئات الهواء؛ ومِن ثَمَّ فلا بد أنه يأتي من شمسٍ منخفضة. (٢) عندما يمر هذا الضوء عبْر قطرات الماء الموجودة في سحابة من السُّحب، يمتص الماء الطرف الأحمر من الطيف المرئي. إذا كانت لأجزاء من السحابةِ السماكةُ المناسبة (كما هي الحال في العواصف العاتية)، يظهر ضوء يُمكن تمييزه من السحابة التي يكون طرفاها الأحمر والأزرق من الطيف المرئي مُستنزَفان، وبذلك يظهر هذا الضوء باللون الأخضر أو الأخضر والأصفر، وهي الألوان المتبقية في الطيف المرئي (انظر شكل ٦-٥).

(١٣) تعزيز زرقة السماء العلوية

لماذا تتحوَّل السماء العلوية إلى اللون الأزرق أثناء غروب الشمس؟ ألا يجب أن تُصبح حمراء لأن غروب الشمس أحمر؟



شكل ٦-٥: بند ٦-١٢: يَفقد الضوء القادم من شمسٍ منخفضة الطرَف الأحمر من الطيف في السحاب، ولا يبقى سوى الضوء الأخضر.



شكل ٦-٦: بند ٦-١٣: يُصبِح ضوء الشمس الذي يمرُّ عبْر الغلاف الجوي السفلي أحمر. ويُصبح ضوء الشمس الذي يمر عبْر طبقة الأوزون أزرق.

الجواب: أثناء غروب الشمس انتقل الضوء الذي يتشتَّت نحوك من السماء إلى تلك المنطقة على طول مسار مائل طويل عبْر الغلاف الجوي وعبْر الأوزون أيضًا في طبقة الستراتوسفير (شكل ٦-٦). وبما أن الأوزون يمتصُّ الطرف الأحمر من الطَّيف، وبما

أن الضوء يَنتقِل عبْر الأوزون حتى الآن، يُصبح اللون الأزرق هو اللون الغالب على هذا الضوء حتى قبل أن يتشتَّت نحوَك. يُعزِّز هذا اللون الأزرق السماء العلوية الزرقاء أصلًا فيَجعلها أكثر رزقة أثناء غروب الشمس، خاصة بعد حوالي ٢٠ دقيقة من اختفاء الشمس خلفَ الأُفق.

(١٤) الرقعة الداكنة والحدود الوردية التي تظهر أثناء وقت الغروب

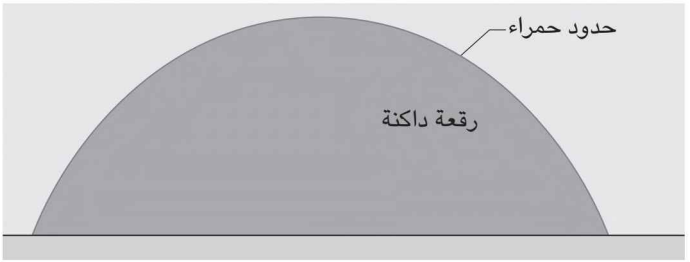
لماذا تَرتفِع رقعة داكنة من الأفق جهة الغرب أثناء غروب الشمس (شكل ٦-٧أ)؟ ولماذا غالبًا ما يكون الطرَف العلوي للرقعة، والذي يُسمى «حزام فينوس»، أحمر أو برتقالي اللون؟ ولماذا يكون الجزء الداخلي من الرقعة أزرق باهتًا في بعض الأحيان؟

الجواب: الرُّقعة المُظلِمة هي ظل الأرض المنعكس على الغلاف الجوي؛ يرتفع الظل جهة الشرق بينما تَنخفِض الشمس جهة الغرب. تُضاء قمة الظل بالضوء الذي يحمرُّ لونه أثناء انتقاله الطويل عبْر الغلاف الجوي؛ حيث تُشتِّت الكثير من جزيئات الهواء اللون الأزرق من ضوء الشمس (شكل ٦-٧ب). يتشتَّت نحوك مرة أخرى عندئذٍ بعض الضوء الذي يصل إلى قمَّة الظل؛ ومِن ثَمَّ يبدو لون القمة أحمر.

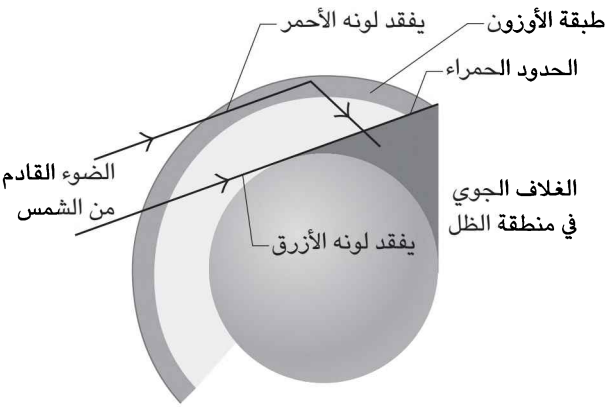
يوجد العديد من الأسباب التي تجعل اللون الداخلي للظل أزرق؛ أولًا: لا يمكن أن يكون الضوء الذي يأتي من داخل الظل قادمًا مباشرة من الشمس، ولكن لا بد أن يتشتَّت هناك بفعل الهواء العالي الارتفاع الذي يكون لا يزال مضاءً بشكل مباشر. ونظرًا لأن الهواء العالي الارتفاع يكون رقيقًا، فلا يفقد هذا الضوء الكثير من اللون الأزرق مثل الضوء الذي يَنتقِل عبْر الهواء المُنخفِض الارتفاع. إذا انتقل الضوء بدرجة كبيرة عبْر طبقة الأوزون، فإنه يصبح أكثر زرقة؛ لأن الأوزون يمتص الطرف الأحمر من الطيف. يتشتَّت بعض هذا الضوء الغالب عليه اللون الأزرق في الظل ثم يتشتَّت نحوك. يمكنك في بعض الأحيان رؤية هذا الضوء الخافت الغالب عليه اللون الأزرق لأن خلفية الظل تكون مُظلِمة.

(١٥) أعمدة ساطعة ومظلمة في السماء

عندما تكون الشمس منخفضة في بعض الأحيان، تمتد أعمدة ساطعة ومظلمة عبْر السماء على شكل مروحي، وتتباعَد عن السُّحب الموجودة بالقُرب من الشمس أو تتقارَب نحو السُّحب الموجودة بالقرب من النقطة المُقابِلة للشمس تمامًا. إذا كنت محظوظًا للغاية،



(أ)



(ب)

شكل ٦-٧: بند ٦-١٤: (أ) ترتفع رقعة داكنة جهة الشرق أثناء الغروب. (ب) يشكل الضوء الأحمر حدودًا لظل الأرض في السماء. يَصطبِغ الجزء الداخلي من الرقعة بضوء أزرق باهت.

فقد ترى أعمدة من الضوء تَنتشِر فوق معظم السماء. لماذا تظهر هذه الأشعة؟ ولماذا لا تكون متوازية؟ ومع ذلك، فالشمس بعيدة جدًّا بحيث تكون أشعة الشمس متوازية تقريبًا.

الجواب: يُطلَق على هذه الأشعة مجموعة متنوعة من الأسماء، بما في ذلك «أشعة الشمس» و«أشعة بوذا» و«أصابع بوذا». تكون الأشعة مُتوازية تقريبًا، ولكنها تبدو

مُتباعِدة أو متقاربة طبقًا لمنظور رؤيتنا. (يُمكن توهُّم رؤية تَقارُب مُماثل إذا نظرت بطول مسارات السكك الحديدية المُستقيمة التي تمتدُّ لمسافات طويلة أمامك.) عادةً ما تتشكَّل أعمدة الضوء عندما تُلقي السُّحب القريبة من مجال رؤيتِك للشمس بظِلالها عبْر السماء. إذا كانت تُوجد سحابة صغيرة واحِدة فقط، سيكون ظلها عبارةً عن عمود مُظلِم، أما إذا كانت السُّحب أكثر امتدادًا، فسترى أعمدة من الأشعة الساطعة نتيجةً لتغلغُل الضوء عبْر المساحات الفارغة في السُّحُب. (في بعض الأماكن، يمكن أن تتشكل الأعمدة عندما يتسلَّل الضوء عبْر قمم الجبال.) يتشتَّت حينئذٍ بعض الضوء نحوك من الغبار أو المطر أو الثلج أو الهَبَاء الجوي أو من جزيئات الهواء التي تكون موجودة على طول مسار الضوء؛ يُمكنك رؤية أعمدة الضوء الساطع وتمييزها نتيجة لتبايُنِها مع المناطق المتوسطة الإضاءة من الظل.

تصعب رؤية أعمدة الضوء التي تكون فوق رءوسنا مباشرة؛ لأن من هذا المنظور سننظر عبْر عرضها الضيق؛ ومِن ثَمَّ نَعترِض فقط القليل من الضوء المشتَّت. تسهل رؤية الأعمدة عندما ننظر تجاه الشمس أو إلى النُّقطة المقابلة للشمس مُباشرة؛ لأنَّنا حينئذٍ ننظر إليها بطول امتدادها نسبيًّا. يعني هذا أنك تَعترِض المزيد من الضوء المشتَّت مما يُعزِّز من التباين مع الظلال.

تُرَى أعمدة ضوء مشابهة عندما تمر أشعة الشمس الساطعة المباشرة عبْر هواء معبَّأ بالأَتربة في غرفة ذات إضاءة خافتة. يُمكننا رؤية أعمدة الضوء هذه لأن الغبار يُشتِّت الضوء نحوك ولأن هذا الضوء المشتَّت لا يَضيع في الضوء الساطع المعتاد الذي يَنعكس من الأثاث الموجود خلف أعمدة الضوء.

(١٦) الشبورة الزرقاء والحمراء والبنية

بعض الجبال ذات الغطاء النباتي، مثل جبال بلو ريدج في ولاية تينيسي الأمريكية، و«الجبال الزرقاء» في أستراليا، تُعرَف بشبورتها الزرقاء. لا تكون الشبورة بسبب الدخان؛ وذلك لأن تلك المناطق تكون غير مأهولة نسبيًّا، كما لا تكون بسبب الغبار الذي تَحمله الرياح؛ وذلك لأن اللون الأزرق يختفي أثناء الرياح القوية. كما أنها ليست ضبابًا كذلك؛ لأنها تكون أوضح خلال الطقس الحار. فما الذي يُنتِج هذه الشبورة الزرقاء؟

في بعض الأحيان، عندما يكون المُحيط أو الأرض مُغطَّيان بالشبورة، فقد يكون هذا السطح غير مرئي مِن طائرة تُحلِّق على ارتفاعات عالية. لماذا تكون هذه الشبورة غالبًا حمراء اللون؟

لماذا تكون الشبُّورة في المدينة بُنيَّة اللون عادةً؟ هل يَرجع اللَّون إلى امتِصاص جسيمات الشبورة لألوان معيَّنة؟ أم هل تَشتُّت الضوء الحادث بسبب الجسيمات يترك ضوءًا بنيًّا؟ هل يَعتمِد اللون على ألوان الخلفية التي تنظر إلى الشبورة مقابلها؟

إذا نظرت نحو الشمس عبْر شبورة كثيفة، لماذا تكون الشمس محطَّة بمنطقة بيضاء ساطعة؟ ولماذا تكون المنطقة المُحيطة بالشمس حمراء اللون أحيانًا؟

الجواب: تعود الشبورة الزرقاء إلى الهَبَاء الجوي الذي يُنتَج عندما يُطلِق الغطاء النباتي جزيئات كبيرة، مثل التيربينات. كما قد تُطلَق جزيئات الشمع من النهايات الحادَّة لإبر الصنوبر ومن أسطح النباتات الأخرى عندما تتكوَّن حقول كهربائية قوية أثناء مرور سُحُب مشحونة كهربيًّا. في كلتا الحالتَين، تكون الجُسَيمات صغيرة بما يَكفي بحيث إنها تُفضِّل تشتيت الضوء الأزرق نحوَكَ مِن ضوء الشمس الذي يُضيئها، تاركة المنطقة من حولها على شكل شبورة زرقاء.

أما الشبورة الحمراء فيُحتمَل تكوُّنها بسبب الغبار والهَبَاء الجوي الأكبر حجمًا نسبيًّا (يكون قُطره حوالي ٠٫١ ميكرومتر). الجسيمات التي تكون بهذا الحجم تَنحو إلى تشتيت الضوء الأحمر من ضوء الشمس.

تتكوَّن الشبورة في المدينة من قطرات الماء التي تحلَّلت فيها مركبات مختلفة. أحد هذه المركبات هو ثاني أكسيد النيتروجين الذي يمتصُّ ما يكفي من الألوان في ضوء الشمس بحيث يجعل ضوء الشبورة بُنِّي اللون. وكذا يُمكن أن يلعب لون الخلفية، مثل لون المباني المصنوعة من الطوب، دورًا إذا كان معظم الضوء الذي يُنير الشبورة قادمًا من الخلفية.

عندما تنظر إلى الشمس من خلال شبورة كثيفة، تُشتِّت الجسيمات العالقة أشعة شمس إضافية نحوك. يحدث التشتُّت في المقام الأول في الاتجاه الأمامي؛ ومِن ثَمَّ تُرَى أسطع منطقة بالقرب من الشمس. عندما تكون الشمس مرتفعة، تُضيء أشعة الشمس البيضاء الشبورة؛ ومِن ثَمَّ فإن المنطقة المحيطة بمجال رؤيتك للشمس ستكون بيضاء على الأرجح. أما عندما تكون الشمس منخفضة، فتكون الشبورة مُضاءة بالضوء الذي احمرَّ نتيجةً لمروره الطويل عبْر الغلاف الجوي؛ ومِن ثَمَّ تصبح المنطقة المحيطة حمراء.

(١٧) الأضواء القادمة من مدينة بعيدة

عندما تقود سيارتك ليلًا نحو مدينة بعيدة، لماذا ترى وهجًا برتقاليًّا قذرًا في سمائها؟ لماذا يغلب على الضوء القادم من شجرة عيد ميلاد اللون الأحمر حتى ولو كانت الشجرة مغطاة بالفعل بأضواء ذات ألوان مختلفة؟

الجواب: تلعب عدة عوامل دورًا في تلوين المنطقة التي تقع فوق أي مدينة بعيدة، أحدها هو لون أضواء المدينة نفسها. حتى لو كانت الأضواء بيضاء، فستكون المنطقة برتقالية أو حمراء على الأرجح إذا كانت هناك شبورة فوق المدينة. عندما يتشتَّت الضوء من الشبورة وينتقل إليك، يتقلَّص الطرف الأزرق من الطيف من خلال التشتُّت من جزيئات الهواء الموجودة على طول الطريق، ولا يصلك سوى الطرف الأحمر من الطيف فقط. بالإضافة إلى ذلك، قد يُرسل التشتُّت الأوَّلي للضوء بواسطة الشبورة انتقائيًّا الطرف الأحمر من الطيف نحوك إذا كانت الجسيمات بحجم ٠٫١ ميكرومتر أو أكبر نسبيًّا.

إذا نظرت إلى شجرة عيد الميلاد البعيدة، فإن الضوء الأزرق الذي يَنتقِل نحوك يُضعف بالمثل عن طريق التشتُّت الذي يَخضع له من الهواء الوسيط. إذا كانت المسافة كافية، فلن ترى سوى الأضواء الحمراء المعلَّقة على الشجرة.

(١٨) كم يَبعد الأفق؟

هل يَمنعك الأُفق الموجود عند انحناء الأرض من رؤية أي نقطة أبعد على سطح الأرض؟ كيف تَعتمِد المسافة إلى الأفق على ارتفاعك فوق سطح الأرض؟ هل يظلُّ الأفق جليًّا إذا ارتفعت أكثر؟

الجواب: نظرًا لأن كثافة الهواء تَنخفِض مع الارتفاع، فقد يقع الأفق المرئي فيما وراء انحناء الأرض. تُدبر أشعة الضوء التي تنشأ خارج الانحناء وتتَّجه نحوك بشكل عام. إذا انتقلت الأشعة في خط مُستقيم، فإنها ستَنتقِل فوق رءوسنا مباشرة ولن تُرى، إلا أن الانخفاض في كثافة الهواء الذي تواجهه في أثناء صعودها لأعلى يؤدي إلى انكسارها (انحنائها) نحو الأسفل قليلًا تجاهك. قد تعترض جزءًا من هذه الأشعة؛ ومِن ثَمَّ ترى أفقًا خلف انحناء الأرض. وعمومًا، كلما كنت مرتفعًا، بدا الأفق أبعد. ومع ذلك، بالنسبة للارتفاعات التي تَزيد عن بضعة كيلومترات، يَختفي الأفق المديد بسبب الضبابية التي تنتج عن التشتُّت الشامل للضوء بواسطة الجسيمات الموجودة في الغلاف الجوي.

(١٩) لون السماء الملبَّدة بالغيوم

لماذا يتغيَّر لون السماء الملبَّدة بالغيوم في الريف مع تغيُّر الفصول، فيبدو أكثر خضارًا في الصيف منه في فصل الشتاء؟

الجواب: يعود اللون الأخضر الذي يظهر أثناء الصيف إلى الضوء الذي يتشتَّت من النباتات أولًا، ثم يتشتت نحوك من القطرات الموجودة في السُّحب.

(٢٠) خرائط في السماء

في الحقول الجليدية التي تقع في أقصى الشمال، تظهر خرائط كبيرة للتضاريس المحيطة في بعض الأحيان عند قاعدة السُّحب المُنخفِضة أو الشبورة. يُطلق على هذه الخريطة اسم «الوميض الجليدي» أو «الخريطة السحابية»، وهي تُمكِّن المسافر من اختيار مسار عبْر حقل الجليد في حالة التجديف في قوارب الكَياك أو فوق الجليد في حالة التزلُّج. يُمكن أن تُظهر هذه الخريطة أكثر من ثلاثين كيلومترًا من حقل الجليد. فما هو سبب الوميض الجليدي؟ وهل يُمكن أن تُرى تلك الخرائط تحت ظروف أخرى؟

الجواب: تَعكس المناطق الجليدية مِن ضوء الشمس على قاعدة السُّحب المُنخفضة أكثر مما تعكسه على المسطَّحات المائية؛ ومِن ثَمَّ يُحاكي تغيُّر درجات الإضاءة على قاعدة السُّحب المُنخفِضة الحقل الجليدي؛ حيث تُناظر المناطق الداكنة الممرات المائية، بينما تناظر المناطق الأسطع المناطق الجليدية. يُمكن أن تظهر خرائط مشابهة على الشبورة المنخفضة.

(٢١) لماذا تصبح السماء أكثر سطوعًا عند تساقط الثلوج

لاحَظَ بعضُ المُراقبين أنه خلال ضباب فصل الشتاء، تتحسَّن الرؤية بشكل ملحوظ عندما تبدأ الثلوج في التساقط. وعندما لا يكون هناك ضباب ولكن تكون السماء ملبَّدة بالغيوم، يَبدو أن درجة السطوع تزداد بسرعة إذا بدأت الثلوج في التساقُط. لماذا يُغيِّر الثلج درجة الرؤية والسطوع؟

لماذا يكون الثلج الموجود في الأفق أكثر سطوعًا من ذلك الموجود في السماء القريبة عندما تكون السماء ملبَّدة بالغيوم؟

الجواب: عندما تتساقط الثلوج عبْر الضباب، تُزيح بلورات الثلج بعض قطرات الماء العالقة. كما أنها تَسرق جزيئات الماء من هذه القطرات التي تَبقى عالقة، مما يُقلِّل

من حجم القطرات. يمكن لكلا العاملَين أن يُقلصَ من حجم الضباب ويُحسِّنَ درجة وضوح الرؤية. في الأيام الصافية التي تكون السماء فيها خالية من الضباب يزيد التساقط المفاجئ للثلوج من درجة السطوع؛ وذلك لأن الضوء ينعكس ساطعًا من الثلج الذي سقط حديثًا على الأرض.

في يوم ملبَّد بالغيوم، يكون الثلج الموجود في الأفق أكثر سطوعًا من السماء القريبة لثلاثة أسباب: (١) تُشتِّت قطراتُ الماء الموجودة في السُّحب ضوءَ الشمس إلى الأمام بشكل أساسي؛ ومِن ثَمَّ فإنك ستَعترض المزيد من الضوء القادم من الجزء العلوي من السماء الملبدة بالغيوم أكثر من الجزء الواقع بالقرب من الأفق. وبذلك، تكون السماء القريبة من الأفق مظلمةً نسبيًّا. (٢) يُشتِّت الثلجُ الضوءَ بقوة في جميع الاتجاهات؛ ومِن ثَمَّ فإنك ستعترض كمية كبيرة من الضوء القادم من الثلج الموجود بالقرب من الأفق، وبذلك يكون الثلج ساطعًا. (٣) عندما ترى حدودًا تفصل بين المناطق التي تختلف في درجات السطوع، فإن نظامك المرئي سيُعزز هذا الاختلاف حتى يجعل هذه الحدود أكثر وضوحًا.

(٢٢) نهاية شعاع ضوء الكشاف

استُخدمت الكشافات في الحرب العالَمية الثانية لتحديد موقع طائرات العدو في الليالي الحالكة؛ أما في هذه الأيام فتُستخدم لجذب الناس لحضور العروض الأولى للأفلام. لماذا ينتهي شعاع ضوء الكشاف عند نقطةٍ ما فجأة بدلًا من التلاشي، أو بدلًا من أن يمتدَّ «إلى الأبد»؟

الجواب: يَضعُف الشعاع على امتداد طوله لأنه يَنتشِر ولأن الهواء والجسيمات التي يَحملها تشتِّت الضوء. (إذا لم يكن يوجد شيء يُشتِّت الضوء في اتجاهك، فإنك لن ترى شعاع الضوء.) يكون الخُفوت الناجم عن التشتُّت سريعًا، مما يُنهي امتداد الشعاع بصورة مباغِتة عند نقطةٍ ما.

قصة قصيرة

(٢٣) شعاع شمس الانقلاب الشتوي في نيوجرانج

نيوجرانج هو عبارة عن تل كبير بناه إنسان العصر الحجري الحديث في حوالي عام ٣١٥٠ قبل الميلاد، ويقع في دولة أيرلندا حاليًّا. يتكون التل من تعريشة حجرية يَعلوها

طين، بها مدخل واحد يواجه الجنوب وممرٌّ يبلغ طوله عشرين مترًا يمتدُّ إلى منتصف التل. تقع فتحة صغيرة، «فتحة السقف»، فوق البلاطة الحجرية وتُشكِّل الجزء العلوي من المدخل. على مرِّ العصور، لم يكن لفتحة السقف هذه وظيفة حتى عام ١٩٦٩. عند شروق الشمس في الانقلاب الشتوي، تُرسل الشمس شعاعًا رفيعًا من الضوء عبْر مربَّع السقف وبطول المَمر لتُضيء حجرة الدفن التي تقع في مركز التل. لا يحدث هذا التعامد من قبيل الصدفة، ولكنه صُمِّم ليكون كذلك بعدما كافح أُناس العصر الحجري الحديث ليضعوا تعريشتهم الحجرية في المكان المناسب عند بناء نيوجرانج.

تحدُث تأثيرات بصرية مشابهة في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا: بحلول غروب الشمس في أيامٍ معينة، يتصادف أن ترسل الشمس ضوءها عبْر المدخل الرئيسي (طريق ماساتشوستس ٧٧) بطول أحد المَمرات الرئيسية على بُعد ٢٥١ مترًا. وعلى الرغم من عدم وجود حجرةِ دفن رسمية في نهاية ذلك المر، فقد تعرَّض العديد من الطلاب إلى الموت الأكاديمي في ذلك المر أو بالقرب منه.

(٢٤) الوميض الأخضر

عندما تغرب الشمس في أفقٍ صافٍ، فقد ترى وميضًا أخضر مُبهرًا أثناء اختفاء الجزء العلوي من الشمس. لا يكون هذا الوميض صورة تَلَويَّة؛ وذلك لأنه قد تم تصويره فوتوغرافيًّا بالفعل، ويُمكن رؤيته أيضًا أثناء شروق الشمس. عند دوائر العرض المرتفعة، يمكن أن يكون الوميض مرئيًّا لأوقات أطول، لمدة ثلاثين دقيقة على الأرجح، أثناء تحرُّك الشمس في الأفق خلال شروقها في نهاية ليلة شتوية طويلة. عادةً ما تكون الآفاق الصافية، كالتي تكون فوق المُحيطات، ضرورية لهذا الأمر.

على الرغم من أنه شيء نادِر الحدوث، يُمكن رؤية وميضٌ أحمر عندما تغيب الشمس أسفل سحابة بينما تكون منخفضة في السماء. (سواء كنت تبحث عن الوميض الأخضر أو الأحمر، توخَّ الحذرَ الشديد عند النظر إلى الشمس مباشرة؛ إذ إن الضوء يُمكن أن يُدمِّر شبكية العين بكل سهولة حتى إذا لم تَشعُر بأي ألم. لا تنظر مطلقًا إلى الشمس المرتفعة مباشرة لأكثر من ثانية واحدة، ولا تستخدم المنظار أو التليسكوب. عندما تكون الشمس على وشك الغروب، يكون الضوء أخفت نتيجةً للامتصاص الذي يتعرَّض له الضوء أثناء المسافة الكبيرة التي يقطعها عبْر الغلاف الجوي ليَصل إليك؛ ومِن ثَمَّ تكون المشاهَدة أكثر أمنًا.)

ما الذي يتسبَّب في حدوث الوميض الأخضر والأحمر؟

الجواب: تشترك عدة عوامل في إحداث الوميض الأخضر. العامل الرئيسي في ذلك هو انفصال الألوان في ضوء الشمس؛ حيث يتسبب الغلاف الجوي للأرض في انحراف مسار الضوء. وإليك بالتفسير التقليدي: عندما تكون الشمس مُنخفِضة، تنتشر صورتها قليلًا حسب اللون. يشكِّل الضوء الأحمر الجزء الأدنى من صورة الشمس، بينما يشكل الضوء الأصفر والأخضر والأزرق الصور الأعلى تدريجيًّا. لن ترى سوى صورة واحدة مجمعة حتى تبدأ الشمس في الغروب، ولكن بمجرد انخفاض الحافة العلوية للشمس أسفل الأفق، تُلغَى صور الطرف الأحمر والأصفر من الطيف، ولا تبقى سوى الصور الموجودة في الطرفين الأزرق والأخضر. ومع ذلك، تكون الصورة الزَّرقاء مُعتِمة للغاية، بحيث لا يمكن تمييزها بسبب تشتُّت الضوء أثناء المسافة الكبيرة التي يقطعها عبْر الغلاف الجوي. ومِن ثَمَّ يسيطر اللون الأخضر على الصورة الخاطفة الأخيرة؛ الوميض الأخضر.

ومع ذلك، فهناك عامل آخر يُضاف إلى هذا التفسير التقليدي؛ فإذا شاهدت الشمس وهي تغرب، تتوقَّف مستقبلات الضوء الموجودة في العين والمسئولة عن رؤية الطرف الأحمر من الطيف — يُقال إنها تكون مُبيضة. إذا كان آخر ضوء تراه من الشمس يَغلب عليه اللون الأصفر، فستراه أخضر نتيجةً لعملية التبييض التي ذكرناها سلفًا. وإذا حدث أن استدرت ناظرًا فجأةً نحو الشمس في الغروب بينما يكون آخر ضوء لا يزال مرئيًّا، فقد ترى اللون الأخير كما هو فعلًا — ألا وهو اللون الأصفر — وهو ما ستُظهره الصور الفوتوغرافية أيضًا. لا يمثل هذا التغيُّر في اللون نتيجة للتأثيرات الفسيولوجية مشكلة في حال كنت تُشاهد شروق الشمس؛ وذلك لأن مستقبلات الضوء الموجودة في العين لا تتعرَّض عندئذٍ للتبييض.

إذا كان هذا التفسير كاملًا، فلماذا لا نرى وميضًا أخضر مع كل غروب للشمس في الأفق الصافي؟ وكيف يُمكِن التقاط هذا الوميض الأخضر وتسجيله في الصور الفوتوغرافية؟ يوجد عامل إضافي آخر، ألا وهو عامل الندرة. يُمكن أن يعزز الوميض طبقات الغلاف الجوي التي تختلف فيها درجات الحرارة. يُمكن أن تؤدي الطبقات أحيانًا إلى فصل الحافة العلوية من صورة الشمس وتُعظِّم حجمها. وعندما تتحول الحافة العلوية المعظمة إلى اللون الأخضر، تكون هذه هي أفضل فرصة لرؤية الوميض الأخضر. وتحت هذه الظروف، يمكن أن يحدث الوميض الأخضر حقًّا ويمكن تصويره فوتوغرافيًّا.

يحدث الوميض الأحمر النادر عندما تبرز الشمس المُنخفضة من أسفل أحد السُّحب بحيث لا ترى سوى صورتها الحمراء فحسب، بينما تكون الألوان الأخرى مرتفعة جدًّا

بحيث يتعذَّر مرورها أسفل السُّحب. على ما يبدو، تعود الندرة إلى الحاجة لأن تكون الشمس منخفضة تمامًا، ولكنها لا تزال مرئية من أسفل طبقة السُّحب البعيدة.

(٢٥) أشكال مشوهة للشمس المنخفضة

إذا تأملت الشمس مليًّا عندما تكون منخفضة في أفق صافٍ، فقد تجد أنها تبدو بيضاوية الشكل بدلًا من أن تكون دائرية. كما تبدو مقسمة أيضًا إلى طبقات أفقية، ولها شكل مشوَّش آخر (مثل حرف الأوميجا الكبير Ω) أو تتألف من صور منفصلة. لماذا تتغيَّر الصورة بهذه الطرق؟

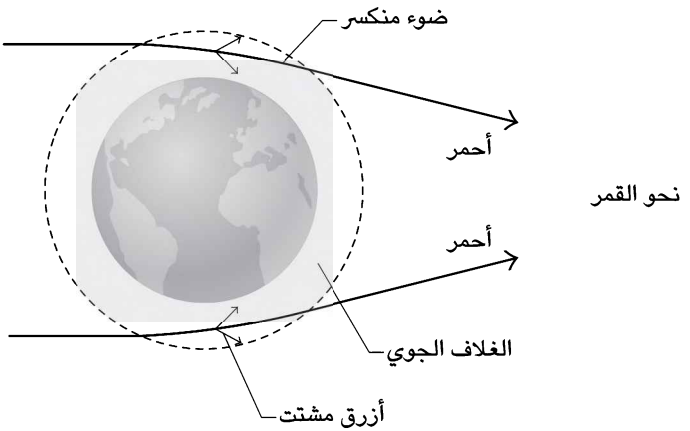
الجواب: عندما تكون الشمس منخفضة، يمكن أن تنزاح صورتها لأعلى بفعل انكسار (انحناء) المسار الذي يتَّخذه الضوء أثناء مروره عبْر الغلاف الجوي للأرض. علاوة على ذلك، نظرًا لانخفاض كثافة الغلاف الجوي بالأعلى، يَنزاح الجزء السفلي من صورة الشمس إلى أعلى أكثر من الجزء العلوي من الصورة. هذا التبايُن في انزياح الصورة يُقلِّل من ارتفاعها؛ ومع عدم تغيُّر العرض الأفقي، تصبح الصورة بيضاوية الشكل ويكون محورها القصير رأسيًّا. ويكون الانزياح الحادث في الصورة كبيرًا، بحيث إنه عند وصول صورة الشمس إلى الأفق، ربما تكون الشمس نفسها قد صارت أسفل انحناء الأرض بالفعل.

تَنتُج التشوُّهات الأعقد للصورة من انكسار أشعة الشمس بواسطة الماء الساكن أو مِن انكسار الأشعة عبْر طبقات الغُلاف الجوي حيث تَختلِف درجات الحرارة. في نموذج بسيط للغُلاف الجوي السُّفلي، تَنخفِض درجة حرارة الهواء مع الارتفاع، ولكن إذا كانت هناك طبقات تزيد فيها درجة الحرارة، يمنحك التغيير في الانكسار صورة للشمس مقسَّمة إلى طبقات، أو صورة واحدة تتكوَّن من أجزاء مُنفصِلة. يُمكن للطبقات أيضًا أن تنتج صورة سرابية للشمس تَلتحِم مع الجزء السُّفلي من صورتها الطبيعية، مما ينتج عنه صورة غير دائرية بشكل واضح.

(٢٦) القمر الأحمر أثناء الخسوف

عندما يكون القمر داخل ظل الأرض بالكامل أثناء الخسوف الكامل للقمر، لماذا يصبح القمر أحمر اللون لفترة وجيزة؟ لماذا لا يظهر باللون الأحمر عندما يكون الخسوف جزئيًّا فحسب، عندما تكون نسبة التغطية ٥٠٪ على سبيل المثال؟

الجواب: خلال الخسوف الكامل للقمر، من المفترض ألا يكون القمر مضاءً على الإطلاق. ومع ذلك، تنكسر أشعة الشمس التي تمر عبْر الغلاف الجوي للأرض في الظل وتُضيء القمر بشكل خافت. وبينما يمرُّ الضوء عبْر الغلاف الجوي، يتلاشى الطرف الأزرق للطيف نتيجة للتشتُّت الذي يتعرض له من جزيئات الهواء، وهكذا يُهيمِن على القمر الضوء الغالب عليه الطرف الأحمر من الطيف (شكل ٦-٨). ينعكس حينئذٍ بعض الضوء نحوَك من سطح القمر، وهو ما ينتج عنه القمر الأحمر.



شكل ٦-٨: بند ٦-٢٦: تَفقِد الأشعة مكوِّنَها الأزرق عند المرور عبْر الغلاف الجوي للأرض.

أما خلال الخسوف الجزئي للقمر، فإنك لا تَعترض الضوء الأحمر الذي ينعكس من الجزء المظلل من القمر فحسب، بل الضوء الأبيض الأكثر سطوعًا الذي يَنعكِس من باقي القمر. لن يُمكِنَك تمييز الضوء الأحمر القاتم في وجود الضوء الأبيض الأكثر سطوعًا، إلا إذا توفَّرت تغطيةٌ لما لا يقل عن ٧٠٪ من القمر؛ ومِن ثمَّ يبدو الجزء المظلل مظلمًا فحسب. وبالمثل، لا يُمكنك تمييز الضوء الأحمر في أثناء المراحل المبكرة أو المتأخرة من خسوف القمر الكامل؛ وذلك لأنك تعترض الكثير من الضوء الأبيض.

(٢٧) الوميض التاجي

عندما يُومض البرق في الجسم الأساسي لإحدى السُّحب، قد ترى ضوءًا ساطعًا يخرج متعرجًا من قمة السحابة. هل هذا السطوع الذي يُسمى بـ «الوميض التاجي» أو «الوهج الخاطف»، عبارة عن تفريغ كهربي استثنائي أم انعكاس غريب للضَّوء من البرق؟

الجواب: الوميض التاجي هو انعكاس الضوء من البرق بواسطة بلورات الثلج التي تكون عبارةً عن رقائق مسطَّحة سداسية الشكل. عادةً ما تسقط هذه الرقائق وجانبها المسطح يتجه إلى أسفل. ومع ذلك، بعد التفريغ الكهربائي البرقي، تهتز الرقائق ويستقر بعضها لفترة وجيزة في الاتجاه الذي يعكس ضوء الشمس أو ضوء البرق نحوك. يظل السبب وراء اهتزاز الرقائق مجهولًا؛ فهو إما يُعزى إلى الموجة الصوتية الصادرة من البرق (التي تصل إليك على هيئة صوت الرعد) أو إلى التغيُّر في المجال الكهربائي للجسيمات المشحونة الموجودة داخل السحابة.

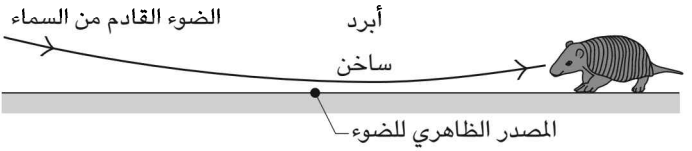
(٢٨) سراب الواحة

في الأيام الحارة، قد تشاهد بِركة مياه بعيدة تمتد على الأرض، ولكن بمجرد وصولك إلى تلك المنطقة تجد أنها جافة تمامًا. يبدو الماء حقيقيًّا، ذا لون أزرق وبه تموُّجات صغيرة. لا يمكن فقط رؤية ظاهرة «سراب الواحة» التقليدية، بل يُمكن تصويرها فوتوغرافيًّا كذلك.

يُمكنك في كثير من الأحيان رؤية السراب ليلًا إذا دقَّقتَ النظر في الضوء القادم من سيارة بعيدة آتية في اتجاهِك. أيضًا، قد ترى أسفل المكان الذي ترى فيه الضوء الأمامي مباشرةً شعاعًا من الضوء يمتدُّ على الطريق. إذا كان الشعاع باهتًا، فإذن أنت ترى انعكاسًا ضعيفًا لضوء المصباح الأمامي على الطريق. أما إذا كان الشعاع ساطعًا، فمن المحتمل أن ترى سرابًا ناتجًا عن ضوء المصباح الأمامي. ما الذي يُنتج هذا النوع من السراب؟ هل يستطيع طائر يُحلِّق فوق أحد الطرق رؤية سراب الطريق؟ أي، هل يُمكن أن ينخدع الطائر ويعتقد أن الطريق بالأسفل هو جدول مائي؟

الجواب: إنَّ سراب الماء الذي يمتد على الأرض البعيدة هو في الواقع صورة لجزء من السماء يقع فوق الأفق مباشرة في ذلك الاتجاه. تمتصُّ الأرض (أو أي سطح آخر) ضوء الشمس وتسخِّن الهواء المجاور. إذا انخفضَت درجة حرارة الهواء بشكل ملحوظ مع الارتفاع، يُمكن أن يظهر سراب الواحة. عندما يَنتقِل الضوء من السماء المُنخفِضة نحو

الأرض، مرورًا بالهواء، مع تزايد درجة حرارة بصورة متواصلة، فإنه ينكسر (ينحني) باستمرار إلى الأعلى حتى يتجه أخيرًا نحو الأعلى بزاوية مُنخفضة نسبة إلى الأرض (شكل ٦-٩).



شكل ٦-٩: بند ٦-٢٨: مسار الضوء من السماء المُنخفِضة وانكساره بفعل التغيُّر في درجة حرارة الهواء. يرى المراقب أن مصدر الضوء يأتي من الأرض.

إذا اعترضتَ هذا الضوء، فسيُفسِّر دماغك تلقائيًّا أن مصدره نقطة مضيئة على الأرض بطول امتداد مستقيم وعكسي لشعاع الضوء المُعترَض. هذه النقطة المضيئة، بالطبع، مجرَّد وهْم، ولكنها تبدو حقيقية. علاوة على ذلك، إذا كان الأصل الفعلي للضوء قادمًا من السماء الزرقاء، فيُمكِن أن تظهر النقطة المضيئة باللون الأزرق كما لو كانت ماء. وإذا كان الهواء مُضطربًا، فإن عملية انكسار الضوء ستَتفاوت بشكل ملحوظ وستَتراقص نقطة الضوء كما لو كانت موجات تتراقص على صفحة الماء.

يُمكن أن يظهر سراب الواحات في البيئات الباردة؛ لأنه لا يتطلَّب وجود هواء ساخن، بل انخفاض في درجة حرارة الهواء مع الارتفاع فحسب. وعادةً ما يُمكن رؤيته على الطرقات لأن معظم الأرصفة تمتصُّ أشعة الشمس وسرعان ما تُسَخِّن الهواء المُجاور. عادة ما يكون السراب أكثر وضوحًا إذا كنتَ ترى المشهد بالقرب من الأرض أو كنت تنظر من خلال عدسة تلسكوبية إلى أرضٍ بعيدة.

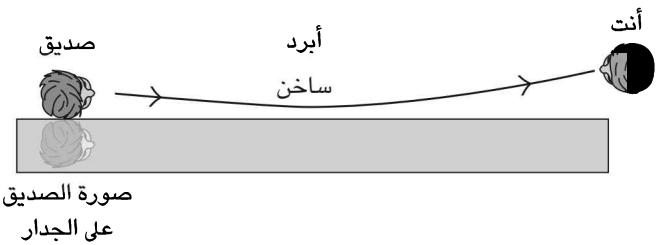
يمكن للأجسام البعيدة أيضًا أن تُصدِر صورًا سرابية إذا انكسر الضوء منها عبْر الهواء بالقرب من الأرض. يُطلَق على هذا النوع من السراب، وكذا سراب الواحة، اسم «السراب الأدنى»؛ وذلك لأن الصورة تظهر «تحت» مصدر الضوء.

أما النُّسخة الليلية من السراب فتعود إلى وجود طبقة من الهواء الساخن الذي يقع على الطريق. قد يظلُّ الرصيف ساخنًا من التسخين النهاري الذي تحدثه الشمس، ولكن إطارات السيارات والشاحنات المارَّة قد تدفئه أيضًا.

بما أن التغيُّر في الاتجاه الذي ينتقل فيه الضوء يكون طفيفًا، فلا يُمكن للطيور المحلقة أن ترى سراب الماء على أي من الطرق الموجودة أسفلها. قد يرى الطائر سرابًا بعيدًا كالذي نراه، ولكن السراب يتحرَّك باستمرار كلما تحرَّك الطائر، على غرار الكيفية التي يتحرَّك بها سراب الماء على طول الطريق أثناء قيادة السيارة.

(٢٩) سراب الجدار

يُمكن رؤية شكل مختلف من أشكال السراب أحيانًا إذا نظرت بطول جدار طويل يواجه الشمس. قف عند طرف الجدار على أن تكون عينك قريبة من سطحه، بينما يقف صديق لك عند الطرف الآخر. قد ترى صورة تُشبه المرآة لصديقك على الجدار وتبدو متَّصلة عند بعض النقاط به. بل وقد تتمكَّن من رؤية صورتين سرابيتَين لصديقك. لقد قمت بتصوير مثل هذه الصور السرابية بعدسة تلسكوبية مُثبتة على كاميرا وضعتها بملاصقة الجدار. حقَّقت هذه التقنية أفضل النتائج عندما وقفتُ عند أحد أركان الجدار؛ بحيث كانت العدسة موجهة مباشرة بطول الجدار.



شكل ٦-١٠: بند ٦-٢٩: منظر علوي لجدار يسخن من أشعة الشمس. يَنكسِر مسار شعاع الضوء بفعل التغيُّر في درجة حرارة الهواء، فيظهر السراب على الجدار.

الجواب: يَنطبِق نفس التفسير الموضَّح بالجواب السابق على سراب الجدار، فيما عدا أن في هذه الحالة تكون طبقة الهواء الساخن عمودية على الجدار. تَخترِق بعض الأشعة التي تخرج من صديقك الهواء الساخن وتَنكسِر بعيدًا عن الجدار قليلًا (شكل ٦-١٠).

إذا كانت عيناك، أو الكاميرا، قريبتَين بما يكفي من سطح الجدار، فستَعترض تلك الأشعة بحيث يبدو وكأن مصدرها هو الجدار نفسه.

(٣٠) وحوش الماء وعرسان البحر والسراب الواسع النطاق

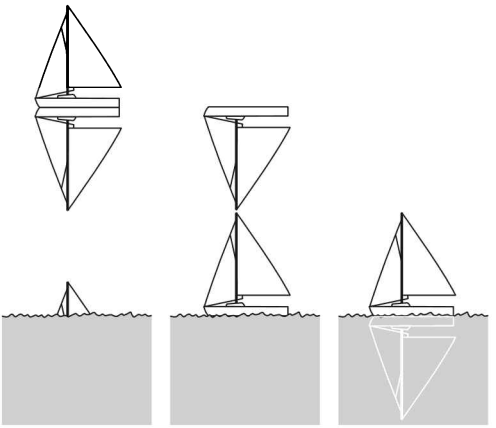
في بعض الأماكن في وقت متأخِّر من بعد الظهيرة أو في الصباح الباكر، يُمكن لنوع معيَّن من السراب أن يَسمح لك برؤية جبل يقع خارج انحناء الأرض؛ ومِن ثمَّ يفترض ألا يكون مرئيًّا. قد يبدأ السراب كبُقعة ضبابية فوق الأفق ثم يصير أكثر وضوحًا حتى يُصبح شكل الجبل مميزًا.

قد يُفسِّر هذا النوع من السراب كيف اكتشف إريك الأحمر جزيرة جرينلاند. تقول الأسطورة إنه عندما نَفَاه رفاقه الآخرون من رجال الفايكنج من أيسلندا، توجه مباشرة نحو أقرب جزء من جزيرة جرينلاند، على الرغم من أنه لم يَكن من المُفترَض أن تكون حتى الأجزاء الأعلى من جرينلاند مرئية من الأجزاء الأعلى لأيسلندا في الظروف العادية. ربما كان يرى بين الحين والآخر سرابًا لأقرب جزء في جرينلاند، فعلم بوجود أرض هناك.

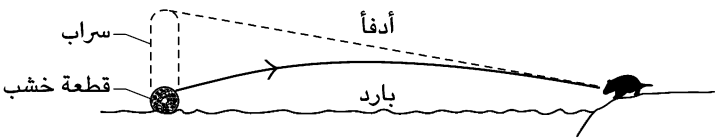
قد تكون مُشاهَدات الوحوش المائية، مثل وحش بحيرة لوخ نس، أمثلة على سراب مُماثل، ولكنه أكثر محلية. فعند توفُّر المنظور المناسب وفي ظل ظروف بعينها، قد تبدو قطعة من الخشب تطفو فوق سطح الماء وكأنها تمتدُّ إلى أعلى مثل رقبة الوحش، فلا يُعدُّ من الممكن تمييز أنها مجرد قطعة من الخشب. كما أن العنق قد يبدو وكأنه يهتزُّ كما لو كان الوحش يسبح في الماء.

طبقًا لبحَّارة القرون الوسطى، كان عرسان البحر عبارة عن وحوش ضخمة تخرج من قلب البحر. كان لهم أكتاف كالرجال، ولكن دون أيادٍ، وكان خصرهم نحيلًا. وبما أنه لم يرهم أي شخص عن قُرب على الإطلاق، فلم يكن يَعرف أحد ما إذا كان لهم جلد مثل جلد الإنسان أم قشور مثل قشور الأسماك. أما حوريات البحر فقد كن يتشابهْن مع أمثالهنَّ من الذكور، ولكن كان لهن أثداءٌ وشعرٌ ثقيل وأيادٍ ذاتُ أصابع متلاصِقة وذيولٌ. كيف يُمكن أن تظهر مثل هذه الكائنات الخارقة؟ ولماذا لم يعد يُسمَعُ عنها أي شيء عندما بدأ استخدام السفن ذات الأسطح المرتفعة؟

تظهر الأجسام البعيدة أحيانًا على هيئة صور متعدِّدة في مشهد يُشبه عرض العرائس الورقية. يُظهرُ شكل ٦-١١أ بعض الأمثلة الكلاسيكية التي تتضمَّن صورًا للمراكب الشراعية البعيدة، ولكن دون التشوُّش الذي يكون موجودًا عادة.



(أ)



(ب)

شكل ٦-١١: بند ٦-٣٠: (أ) سراب يشبه الدمية الورقية. (ب) مسار الضوء القادم من قطعة خشب طافية.

يُعتبَر أجمل أنواع السراب هو سراب «فاتا مورجانا» الذي تبدو فيه الأجسام البعيدة على شكل أبراج أحد قِلاع القصص الخرافية. تقول الأسطورة إنَّ القلعة هي المنزل البلوري للجنِّية مورجانا. في بعض الحالات يُمكن أن يوهم سراب مماثل بأن الأشخاص البعيدين يسيرون على الماء الذي يفصل بينك وبينهم.

في عام ١٥٩٧ عندما علق طاقم القبطان وِليم بارنتس على جزر نوفا زيمليا التي تقع في المحيط المتجمِّد الشمالي أثناء عملية البحث عن المَمرِّ الشمالي الشرقي، رأى بعضهم أول ظهور للشمس بحلول نهاية الظلام الشتوي الطويل، وذلك على الرغم من أن الشمس كانت لا تزال تحت الأُفق بـ ٤٫٩ درجات مئوية، فكيف تمكَّنوا من رؤيتها؟ غالبًا ما تكون

مثل هذه الصور السرابية للشمس مشوَّهة بشدة بحيث تبدو الشمس على هيئة كومة من الفطائر. عادةً ما تظهر تلك الصور في «نافذة» مُظلِمة تتوسَّط السماء، وتكون السماء أكثر سطوعًا أعلاها وأسفلها.

«تأثير هيلينجر» هو أحد أنواع السراب الذي يبدو وكأنه يَرفع الأفق (عند البحر عادة) بحيث يبدو مسطَّحًا أو على هيئة طبق. يُصبح الأفق أثناء «تأثير هافجيردنجر» (وهي كلمة أيسلندية تعني «أسوار البحر») غير مُنتظِم الشكل كما لو كان محاطًا بهياكل رأسية موضوعة عشوائيًّا.

على الطريق السريع رقم ٩٠ بالولايات المتحدة، بالقُرب من مارفا بولاية تكساس، أفاد مراقبون بظهور مستمر لأضواء متحرِّكة ليلًا. تمتد هذه الأضواء المتذبذبة التي تُعرف باسم «أضواء مارفا» بطول السماء حتى منطقة ميتشيل فلات إلى جنوب الطريق السريع مباشرة.

كيف تتشكَّل هذه الأنواع المختلفة من السراب؟

الجواب: يرجع حدوث جميع أمثلة السراب المختلفة إلى انكسار أشعة الضوء من مساراتها المستقيمة المُعتادة بفعل طبقات الهواء التي تتفاوَت فيها درجات الحرارة مع الارتفاع. (انظر البند الذي يتناول موضوع سراب الواحة.) في الأمثلة الأكثر تعقيدًا قد تلعب عدة عوامل دورًا، بحيث يُسهِمُ كل عامل على حِدَة في ظهور صور سرابية تكون مقلوبة أحيانًا، بحيث تُشبه عرض الدمى الورقية أو صورًا مركبة مشوَّشة وتمتدُّ بشكل غريب.

إن مشاهدات وحش بحيرة لوخ نس، أو مانيبوجو وحش بحيرة مانيتوبا، تتضمَّن على الأرجح صورًا مشوشة لجذوع الأشجار أو غيرها من الأجسام التي تطفو في المياه البعيدة. تتوفَّر الشروط المثالية لحدوث مثل هذا السراب عندما تُبَرِّد المياه الباردة الهواء الذي يقع فوقها مباشرة، بينما يُدفئ ضوء الشمس الهواء الأعلى. حينئذٍ، تنكسر بعض أشعة الضوء من قطعة الخشب، مثلًا، وتتجه إلى أسفل بحيث تحيد عن مسارها الأوَّلي إلى أعلى بحيث يُمكنك اعتراضها (انظر شكل ٦-١١ب). يكون الانكسار طفيفًا، لذا يجب أن تكون بالقرب من مستوى الماء كي تَعترِض الضوء.

قد ترى صورًا متعدِّدة أو صورة واحدة مُمتدة لا يُشبه أي منهما قطعة خشب، ويرجع ذلك إلى الاختلاف الفعلي في درجة الحرارة مع الارتفاع. إذا تفاوَتَ الانكسار بسبب التغيُّرات السريعة في توزيع درجة الحرارة، فقد يبدو الجسم الذي يُشبه الأفعى في الماء وكأنه يَسبح. وعندما يظهر سراب مثل هذا، فإنه يظهر فوق مصدر الضوء وهو ما يُطلَق عليه اسم «السراب العلوي».

تدعم الإحصائيات إمكانية أن يكون وحش بحيرة لوخ نيس سرابًا. فقد وقعت حوالي ٧٧٪ من مشاهدات هذا الوحش في الفترة من شهر مايو حتى شهر أغسطس عندما تسخن المياه ببطء أكبر من الهواء، ما يؤدِّي إلى زيادة في درجة حرارة الهواء مع الارتفاع. بينما وقعت حوالي ٨٤٪ من المشاهدات عندما كانت المياه هادئة نسبيًّا، وهو شرط آخر يُعزِّز توافره رؤية أحد أشكال السراب الأعلى. علاوةً على ذلك، فالأشخاص الذين ذكروا هذه الملاحظات كانوا موجودين بالقرب من مستوى المياه؛ حيث يَعترضون الأشعة المنكسرة.

أما بالنسبة لحوريات وعرسان البحر، فقد كانوا على الأرجح صورًا ممتدَّة ومشوشة لحيوانات الفظ وللحيتان كما رآها البحارة الذين كانوا موجودين بالقرب من سطح الماء. يختفي السراب إذا كان المراقبون قريبين جدًّا من الحيوانات أو مرتفعين جدًّا عنها بحيث لا يَستطيعون اعتراض الضوء الذي ينكسر ويخلق السراب. لذا، بعدما زاد ارتفاع السفن عن سطح الماء، قلَّت الإفادات المتعلقة برؤية هذه الكائنات الأسطورية.

يرجع ظهور سراب الفاتا مورجانا إلى انكسار الضوء الذي يُطيل عموديًّا صورة الأجسام الصغيرة البعيدة بحيث تبدو وكأنها أبراج أو جدران. على سبيل المثال، إذا رأيت شخصًا بعيدًا فوق كتلة مائية متوسِّطة الحجم، فقد تصبح هذه الصورة صورة سرابية عُلوية، عندئذٍ، سترى معظم جسم الشخص البعيد كصورة مرفوعة، بينما ستبدو القدمان، غير المرئيتين، مغمورتين في الماء كما لو كان الشخص يسير فوق الماء.

يُمكن أحيانًا رؤية الجبال، الأبعد من أن تُرى بالعين مباشرة، عن طريق السراب إذا انكسرت بعض أشعة الضوء الصادرة منها حول انحناء الأرض. كما يُمكن أن تُوجَّه صور الشمس أيضًا حول الانحناء. المثال الأبرز هو سراب نوفايا زيمليا الذي تَنكسِر فيه الأشعة الضوئية إلى الأسفل على ارتفاع عالٍ وتمرُّ أمام سطح كوكب الأرض وتعود إلى ارتفاعات عالية، ثم تَنكسر إلى أسفل مرة أخرى، كما لو كانت مقيدَّة بأنبوب كبير مقوَّس. وبالرغم من أن الصورة المُوَجَّهة إلى الشمس تظل ساطعة رغم انتقالها الطويل عبْر الغلاف الجوي، إلا أنَّ أجزاء السماء المحيطة تُصبح مظلمة بسبب التشتُّت الذي تُحدثه جزيئات الهواء، فتنتهي الحال بهذه الأجزاء إلى أن تُصبحَ نافذة مظلمة حول صورة الشمس. والمناطق الأكثر سطوعًا فوق وأسفل هذه النافذة هي أجزاء من السماء القريبة.

يتضمَّن تأثيرا هيلينجر وهافجيردنجر انكسار الضوء إلى أسفل أيضًا بفعل الهواء الذي تَزداد درجة حرارته مع الارتفاع. يتضمَّن تأثير هافجيردنجر وجود بقع غير منتظمة من درجة حرارة الهواء، بينما يتطلَّب سراب نوفايا زيمليا وسراب هيلينجر توزيع درجة حرارة الهواء بحيث تكون مُستقرَّة على نطاق واسع.

يكون الانكسار الجوي للضوء ليلًا مسئولًا عن ظهور مجموعة من الأضواء الغريبة سريعة الزوال مثل أضواء مارفا. يُمكن أن تكون مصادر تلك الأضواء نجومًا أو كواكب تقع بالقرب من الأفق (حيث تكون الصور صورًا سرابية دونية) أو أضواء المصابيح الأمامية لسيارة أو قطار بعيد (حيث تكون الصور صورًا سرابية عُلوية). أضواء مارفا هي مثال على سراب أضواء المصابيح الأمامية للسيارات الذي ينتج من السيارات البعيدة التي تتَّجه نحو مارفا على طريقٍ سريع يمر عبْر منطقة ميتشيل فلات. يجب على مراهقي مارفا أن يكونوا شاكرين لهذا المثال الحي لعلم البصريات؛ لأنه يَمنحهم عذرًا جاهزًا ليُوقفوا سياراتهم في الظلام بطول الطريق السريع رقم ٩٠.

(٣١) شبحٌ يَختبئ وسط الأزهار

هل يُمكنك تفسير ظهور صورة شبحية في القصة التالية؟ في عصر أحد الأيام الحارة، كانت سيدة تجمع الزهور من فوق الأرض المُشبعة بالبخار بينما كانت الشمس مائلة قليلًا إلى الجانب. فجأة، لاحظت السيدة حركة أمامها، ولكنَّها أدركت شيئًا فشيئًا أنها كانت ترى صورة مفصَّلة وملوَّنة لنفسها. ومن نافلة القول أنَّ رؤية هذا الشبح سرعان ما أثارت حفيظة السيدة فهرَبَت على الفور.

الجواب: ربما تكونت الصورة الشبحية بالطريقة التالية: انعكست أشعة الشمس من جسم السيدة إلى القطرات الموجودة في ضباب يَرتفع من الأرض الرطبة الحارة. وهناك، يعود بعض الضوء المشتَّت من القطرات إلى السيدة. أعتقد أن الشمس كانت تضيء السيدة بشدة، بينما كان الضباب في المنطقة الظليلة، مما يجعل الضوء المشتَّت ملحوظًا للعين المجرَّدة. تشبه هذه العملية حينئذٍ بقدر ما صور الأشباح الموجودة في مُتنزَّه عالم ديزني؛ حيث تُعرَض الصور الساطعة على ستارة رقيقة مسامية بحيث تكون بالكاد مرئية في الإضاءة الخافتة.

(٣٢) النجوم المُتلألئة الراقصة

لماذا عندما ترى جسمًا بعيدًا عبْر الهواء فوق النار أو فوق سطح ساخن، مثل طريق مضاء بنور الشمس، تهتزُّ صورة هذا الجسم، وهو التأثير الذي يُطلَق عليه اسم «التراقُص البصري»؟ لماذا تُصبح رؤية هذا التذبذب أكثر صعوبة فوق الطريق عند قدمَيك عنها في الطريق الأبعد؟

لماذا تتلألأ النجوم؟ هل تتلألأ أكثر في الصيف أم الشتاء؟ لماذا يتغيَّر لونها في بعض الأحيان؟ لماذا لا يتلألأ القمر ولا الكواكب؟ وإذا كنت في الفضاء وتنظر إلى النجوم، فهل ستَتلألأ أيضًا؟

الجواب: يعود التراقُص إلى اضطراب الهواء الذي يُحدِثه السطح الساخن. ومع مرور أشعة الضوء من أحد الأجسام عبْر هذا الاضطراب، يَكسر التفاوت المستمر في كثافة الهواء الأشعة في اتجاهات عشوائية متغيِّرة؛ ومن ثَم تصبح الصورة الناتجة مُذبذَبة ومُتراقِصة.

كي يكون تأثير التراقُص ملحوظًا للعين فلا بد أن تقطع أشعة الضوء مسارًا طويلًا عبر طبقة الهواء الساخن والمُضطرِب. إذا نظرت بشكل شبه عمودي إلى سطحٍ ساخن مثل الرصيف، فإن الأشعة التي تستقبلها تكون قد قطعت مسافة قصيرة جدًّا من خلال الاضطراب بحيث لا تظهر بشكل متراقص. أما إذا نظرت إلى السطح برؤية مائلة، فستكون الأشعة قد قطعت مسافات أبعد بكثير عبْر الاضطراب؛ ومِن ثَمَّ يُمكِنُك أن ترى التأثير المتراقص الذي تحدثه. عادةً ما يعني هذا الشرط أن السطح الساخن لا بد أن يكون بعيدًا، كجزء بعيد من الطريق على سبيل المثال. وحتى في هذه الحالة قد لا يكون التأثير المتراقص ملحوظًا إذا كان سطح الطريق مُتجانسًا. يكون التأثير المُتراقِص أكثر وضوحًا إذا كان الطريق به نمط خطوط متمايلة.

في بعض الأحيان ترى تأثيرًا مرتبطًا بذلك التراقص، إذ يُمكن أن تظهر ظلال معتمة عابرة على سطح أبيض مسطَّح؛ وذلك لأنَّ الهواء المضطرب يكسر ضوء الشمس الذي يمرُّ عبره. في بعض الأحيان، يركز الانكسار ضوء الشمس على رقعة ساطعة نسبيًّا، وأحيانًا يزيد من وهج أشعة الشمس، بحيث تنتشر مُشَكِّلَةً رقعة مظلمة نسبيًّا. يُمكن أن يُؤدِّي النسق غير المُستقر للهواء الدافئ الذي يتدفَّق تحت الهواء البارد أيضًا إلى تكوين ظلال مُعتِمة ومُتراقِصة. وبما أن الهواء الدافئ يكون أقل كثافة من الهواء البارد، فيكون الحد بين درجتي الحرارة المُتفاوتتَين غير مستقر ويميل إلى تكوين أشكال تشبه الموجات يُمكنها تركيز الضوء في بعض المناطق ونشره في مناطق أخرى.

تغير صور مشابهة لانكسار ضوء النجوم بواسطة الغلاف الجوي، ظاهريًّا، موقع النجم سريعًا وبشكل طفيف. تكون الحركة الظاهرية مرئية لأن النجم، من زاوية رؤيتك، يكون عبارة عن نقطة ساطعة في قلب خلفية مظلمة. علاوةً على ذلك، تُغيِّر تباينات طور موجات الضوء التي تصل إليك. عندما تصل موجات الضوء بالتوافق بعضها مع بعض (متجانسة)، يكون تداخُلُها تداخلًا بنَّاءً ويكون النجم أكثر سطوعًا؛ أما عندما تكون خارج الطور التوافُقي، فيكون تداخلها تداخلًا هدَّامًا ويكون النجم في أكثر حالاته إعتامًا.

يَختصر نظامك المرئي صورة النجم خلال فترة زمنية قصيرة، ولكن تظل الاختلافات في وضعِ النجم ودرجة سطوعه مرئية. أما إذا كنتَ في الفضاء، فلن تتلألأ النجوم، ولكنها ستظل تبدو وكأن لها رءوسًا صغيرة؛ وذلك لأن الضوء يتشتَّت داخل عينَيك.

أما القمر والكواكب فيَشغلان حيزًا كبيرًا في رؤيتك بما يمنع تلألؤهما. فعلى الرغم من أن كل نقطة من القمر، على سبيل المثال، تتلألأ كما تتلألأ النجوم تمامًا، فإن هذه النقاط ليسَت نقطة واحدة مَعزولة من الضوء في قلب خَلفية مظلمة؛ ومن ثَم يكون التذبذُب غير ملحوظ.

تتلألأ النجوم بصورة أكبر في فصل الصيف؛ نظرًا لأن الجو المحيط يكون أكثر تقلبًا بسبب التسخين الإضافي الذي تحدثه الشمس أثناء وقت النهار.

إذا كان النجم قريبًا من أفق صافٍ، فقد يُصبح لونه متقلبًا كذلك. يَسمح المرور الطويل لضوء النجم عبْر الغلاف الجوي لجزيئات الهواء والغبار والهباء الجوي بتشتيت بعض الألوان المُكَوِّنة للضوء؛ ولا يُصبح النجم حينئذٍ بلونه الأصلي، الذي قد يكون أبيض. تتسبَّب التغيرات المستمرة في عملية تشتُّت الضوء في تغيير اللون الذي نراه.

(٣٣) شرائط الظل

لعدَّة دقائق قبل وبعد أي كسوف كلي للشمس، يمكن أن تُغطَّى الأرض بشرائط باهتة ومموجة، عرض كلٍّ منها بضعة سنتيمترات. يفيد بعض المراقبين أن الشرائط هذه تتحرك. فما الذي ينتج الشرائط؟

في عام ١٩٤٥، أبلغ رونالد آيفز عن شكل آخر من أشكال الشرائط المظلمة الفرقة، والذي رصده في ست مناسبات مختلفة، بينما كان ينظر إلى أسفل من نقطة مرتفعة على الأراضي المسطحة أثناء غروب الشمس. كانت الأشرطة بعرض عدة كيلومترات وكانت تنتقل بسرعة ٦٠ كيلومترًا في الساعة. فما الذي أنتج هذه المجموعة من الشرائط؟

الجواب: يرجع ظهور شرائط ظل الكسوف على الأرجح إلى تركيز أشعة الشمس (ما ينتج عنه الشرائط الساطعة) وتشتُّتها (ما ينتج عنه الشرائط المظلمة) عند مرورها عبْر جيوب الهواء المضطربة في الغلاف الجوي للأرض. تكون درجة وضوح الرؤية أفضل عندما يكون الكسوف شبه مكتمل ولا يشكل الجزء المرئي من الشمس سوى هلالٍ ضيق. حينئذٍ، يشغل الضوء زاوية صغيرة جدًّا في مجال رؤيتنا، ويمكن أن يؤدي إعادة توجيه الضوء بواسطة الجيوب الهوائية المضطربة الموجودة على ارتفاعات عالية إلى إنتاج شرائط

مرئية تتوازى مع الهلال. عندما يكون الكسوف أقل اكتمالًا ويكون جزءٌ أكبر من الشمس مرئيًّا، تكون الجيوب المضطربة التي تحدث الشرائط أكثر انخفاضًا، وتكون الشرائط أقل وضوحًا (تكون «باهتة» بصورة أكبر). يصعب رؤية الشرائط، حتى في أفضل حالاتها؛ لأن التباين بين الشرائط الساطعة والمظلمة المُتجاوِرة يكون ضعيفًا. نظرًا لأن الاضطراب يتغيَّر بسرعة، تختلف الشرائط وتبايُنها أيضًا. يمكن أن يُضفي هذا التباين في الشرائط وهم وجود حركة.

على الأرجح، يعود حدوث ظاهرة الشرائط المظلمة النادِرة، هذه والتي لم تُدْرَس إلا بالكاد، إلى تركيز وتشتُّت أشعة الشمس بفعل الاضطراب الموجود في الغلاف الجوي. كانت تلك الشرائط مرئية لآيفز لأن غروب الشمس كان يقلص الجزء المرئي من الشمس، كما هي الحال في الكسوف. لم يكن آيفز ليلحظ تلك الشرائط إذا كان موجودًا على مستوى الأرض.

(٣٤) حلقة زاوية الاثنتين والعشرين والشمس الكاذبة

تكون الشمس محاطة أحيانًا بدائرة ساطعة قد يكون لونها أحمر بطول حافتها الداخلية، وأزرق بطول حافتها الخارجية. تُساوي الزاوية بين الدائرة ومركزها ٢٢ درجة؛ لذا تُعرف هذه الظاهرة باسم «حلقة زاوية الاثنتين والعشرين». (يُمكنك قياس هذه الزاوية بسهولة: افتح يدك ومدَّ ذراعك نحو الشمس على أن تكون راحة يدك موجَّهة إلى الخارج. الجزء الذي تراه من السماء بطول خط مستقيم بين أطراف أصابعك والإصبع الصغيرة يشغل حوالي ٢٢ درجة.) أحيانًا ما تكون الشمس محاطة من أحد الجوانب، أو من الجانبَين، ببقعة مشرقة ذات لون برَّاق، وتُسمى هذه البقعة الساطعة بـ «الشمس الكاذبة». ما الذي يتسبَّب في ظاهرة حلقة زاوية الاثنتين والعشرين والشمس الكاذبة؟

الجواب: تحدث حلقة زاوية الاثنتين والعشرين نتيجة لانكسار (انحناء) أشعة الشمس بفعل بلورات الثلج الموجودة على ارتفاعات عالية. البلورات عبارة عن أعمدة سُداسية تُسمى «البلورات الرصاصية» تسقط على جانبها العريض في الغالب. عندما يمرُّ ضوء الشمس عبْر بلورة رصاصية، فإنه يَنكسِر ويسير في اتجاهٍ جديد بزاوية ٢٢ درجة أو أكبر من زاوية مساره الأوَّلي. يتركز الانحراف عند ٢٢ درجة؛ ومِن ثَمَّ يصل الضوء إلى أقصى درجات السطوع عند هذه الزاوية. عندما تنظر بعيدًا عن الشمس ٢٢ درجة في أي اتجاه نحو هذه البلورات الثلجية المتساقطة، فإنك تعترض بعضًا من هذا الضوء الساطع وترى جزءًا من الحلقة.

قد تكون الحلقة ملوَّنة؛ وذلك لأن الانكسار الذي تُحدثه البلورات يفصل الألوان في ضوء الشمس الذي يكون أبيض اللون في البداية. ينكسر الضوء الأحمر بدرجةٍ أقل قليلًا من الضوء الأزرق، فتنتهي الحال بأقصى درجات اللون الأحمر سطوعًا بالظهور داخل الحافة الداخلية من الحلقة.

تَرجع ظاهرة الشموس الكاذبة أيضًا إلى الانكسار الذي تُحدثه البلورات السداسية، إلا أن البلورات في هذه الحالة تكون مسطحة بدلًا من أن تكون عمودية. تسقط هذه «البلورات الصفيحية» وقمَّتها تتَّجه إلى أسفل وتكون في حالة اهتزاز. تعيد تلك البلورات توجيه الضوء نحوك فقط إذا كانت تقع بطول خط أفقي تقريبًا عبْر الشمس؛ لذا تقع الشموس الكاذبة إلى اليسار واليمين من الشمس. عندما تكون الشمس مُنخفِضة، تكون الشموس الكاذبة على بُعد حوالي ٢٢ درجة منها؛ بينما تكون الشموس الكاذبة أبعدَ عن الشمس قليلًا عندما تكون الشمس أعلى. عادةً ما تكون الشموس الكاذبة ملوَّنة بسبب عملية فصل الألوان التي تُحدثها البلورات، ويكون الجزء الأحمر هو الأقرب إلى الشمس.

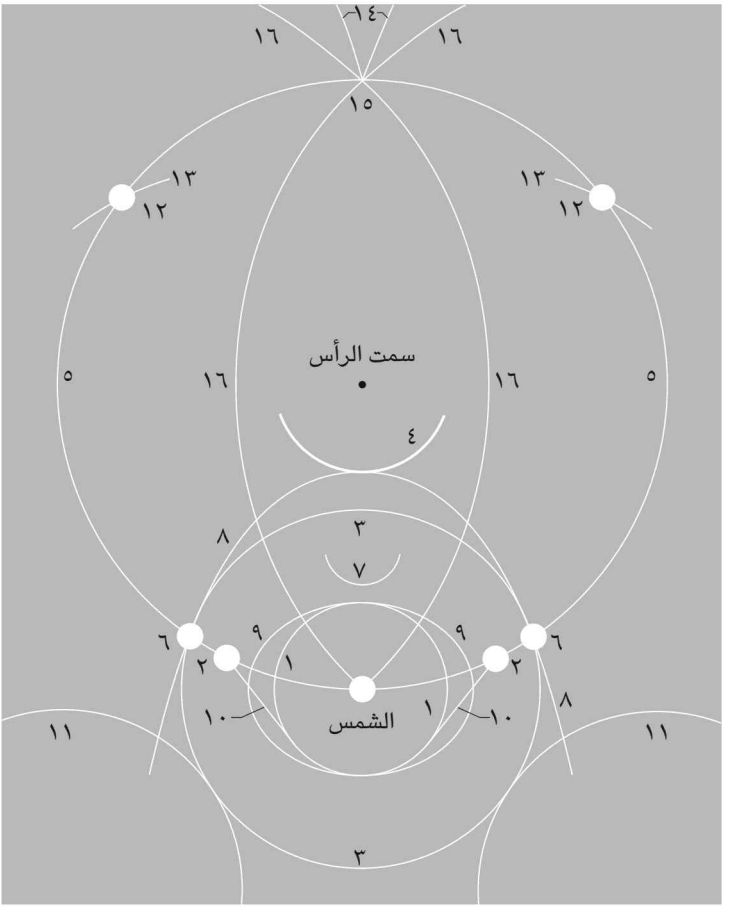
يُمكن أن تظهر حلقة زاوية الاثنتين والعشرين والشموس الكاذبة حتى أثناء الصيف؛ وذلك لأن بلورات الثلج تظلُّ قادرةً على التشكُّل في الهواء البارد العالي الارتفاع.

(٣٥) سماء تمتلئ بالحلقات والأقواس والبُقَع المضيئة

فضلًا عن حلقة زاوية الاثنتين والعشرين والشموس الكاذبة التي ذُكرت في البند السالف، قد تظهر العديد من الحلقات والأقواس والأعمدة والبقع المضيئة الأخرى في السماء. يُظهر شكل ٦-١٢ بعض هذه الاحتمالات، ولكن لا يُمكن أن تظهر كل هذه الاحتمالات بالتزامن في الوقت نفسه؛ لأنها قد تتطلَّب ارتفاعات مختلفة للشمس. ويُمكن أن تتغيَّر أشكالها أيضًا مع ارتفاع الشمس. كما أن بعضها شديد الندرة، حتى إنه لم يرصده أو يُصوِّره سوى القليل من الناس.

أحد المناظر التي تُرى عادةً هو «عمود من الضوء» يمتد فوق الشمس أو القمر أو أسفلهما. قد تكون قادرًا على رؤية مثل هذه الأعمدة التي تمتد في سماء الليل قادمة من المصابيح التي تُحدِّد الشوارع أو مواقف السيارات.

عندما تكون مسافرًا في طائرة، قد ترغب في البحث عما يُعرف باسم «الشمس الثانوية»، وهي نقطة مضيئة تقع أسفل صورة الشمس وتبدو وكأنها تتبع حركة الطائرة. ما سبب هذه المظاهر المختلفة؟



شكل ٦-١٢: بند ٦-٣٥: بعض المُشاهَدات المحتمل رؤيتها في السماء الساطعة: (١) حلقة زاوية الاثنتين والعشرين. (٢) الشموس الكاذبة نسبة إلى حلقة زاوية الاثنتين والعشرين. (٣) حلقة زاوية الست والأربعين. (٤) قوس قزح مقلوب. (٥) الدائرة الشمسية. (٦) الشموس الكاذبة نسبة إلى حلقة زاوية الست والأربعين. (٧) قوس باري. (٨) أقواس المَماس الأفقية العلوية نسبة إلى حلقة زاوية الست والأربعين. (٩) الأقواس المماسية نسبة إلى حلقة زاوية الاثنتين والعشرين. (١٠) أقواس لوفيتز. (١١) أقواس المماس الأفقية السفلية نسبة إلى حلقة زاوية الست والأربعين. (١٢) بقعة البارانثيليون. (١٣) الأقواس البارانثيليونية. (١٤) أقواس الأنثيليون ذات الزوايا المُنحرِفة الضيقة. (١٥) بقع الأنثيليون. (١٦) أقواس الأنثيليون ذات الزوايا المنحرفة العريضة.

الجواب: يعود حُدوث هذه المظاهر إلى البلورات الثلجية المُتساقطة التي تَعترض أشعة الشمس وتعيد توجيهَها نحوك. يَحدث بعضها نتيجةً للبلورات الرصاصية، والبعض الآخر للبلورات الصفيحية (انظر الجواب السابق). يتضمَّن بعضها، كما في «قوس القزح المقلوب»، انكسار الضوء عبْر البلورات، بينما يتضمَّن البعض الآخر انعكاس الضوء عن البلورات. والقليل منها، كما في «أقواس لوفيتز»، يتطلَّب وجود بلورات صفيحية تدور بسرعة أثناء تساقطها.

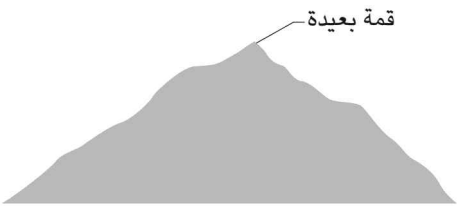
يُمكن أن يُعزى ظهور عمود الضوء الذي يمتد فوق الشمس أو القمر أو أسفلهما إما إلى البلورات الرصاصية وإما إلى البلورات الصفيحية، ولكن الأخيرة تكون مسئولة عن حدوث هذا الأمر فقط عندما تكون الشمس منخفضة أو القمر. في هذه الحالة، ينعكس الضوء إليك من الوجه المسطح للصَّفائح أثناء تساقطها إلى الجانب تقريبًا. تلطخ التقلُّبات الطفيفة في اتجاهات البلورات المنطقة التي تتلقَّى أنت الضوء منها؛ ومِن ثَمَّ تُشكِّل العمود. عندما تكون الشمس أو القمر أعلى، يرجع ظهور العمود إلى الضوء الذي يَنعكِس من جوانب البلورات الرصاصية التي تسقط بمِحوَرِها الطويل أفقيًّا. عند كل نقطة على طول كل عمود من الأعمدة، تكون بعض البلورات مائلة بما يَكفي لتعكس ضوء الشمس تجاهك. ويُشكِّل مجموع هذه الانعكاسات العمود.

أما الشمس الثانوية فهي في الواقع نسخة من عمود الضوء، والاختلاف الوحيد هو أنك تنظر إلى البلورات الصفيحية في هذه الحالة. عندما تكون جميعها على نسقٍ أفقي تقريبًا، فإنها تنتج صورة للشمس تُشبه صورة المرآة.

(٣٦) ظلال الجبال

إذا دقَّقت النظر في أحد ظلال الجبال وأنت تَقف بالقُرب من قمة الجبل عندما تكون الشمس مُنخفِضة، فستجد أن الظل مثلَّث الشكل وقمته تمتد بعيدًا عنك (انظر شكل ٦-١٣). لماذا تكون كل ظلال الجبال تقريبًا مثلَّثة الشكل، بصرف النظر عن الشكل الفعلي للجبل أو التفاصيل الموجودة على جانبَيه؟ لماذا يمتدُّ عند قمة الظل شكل يُشبه المسمار إما يسارًا وإما يمينًا عندما تكون واقفًا أسفل قمة الجبل مباشرة؟

الجواب: عندما تكون واقفًا على قمة أحد الجبال، يتشكَّل الظل على الأرض وفي الهباء الجوي الذي يَدنوك. يكون معظم الظل بعيدًا للغاية بحيث تكون تفاصيل جوانب الجبال صغيرة جدًّا فلا يُمكِن تمييزها. يعود الشكل المثلثي للظل إلى المنظور؛ حيث يبدأ



شكل ٦-١٣: بند ٦-٣٦: ظل الجبل على الهباء الجوي الموجود بالأسفل كما يُرى بالقُرب من القمة.

جانِبا الظلِّ إلى اليسار واليمين منك، ولكن يبدو أنهما يَتلاقيان عند نقطة بعيدة على الأرض وفي الهباء الجوي. يشبه الشكل المدبَّب لجانبَي الظل قضيبَي السكك الحديدية المُستقيمَين اللذَين يبدو أنهما يتلاقيان عند الأفق إذا نظرت بطول امتدادهما. والظل نفسه يشبه شكل ظلك على العُشب عندما تكون الشمس منخفضة؛ إذ تبدو قدماك بحجمهما الطبيعي بينما يكون ظل رأسك مدببًا.

عندما تقف أسفل قمة الجبل مباشرةً وفي منطقة ظل الجبل، فإنك تَنظُر عبْر الهَبَاء الجوي الظليل (بدلًا من أن تنظر إليه من أعلى). وإذا وقفتَ في وسط ظل الجبل بالضبط، تظل قمة جانبَي الظل مدبَّبة الشكل وتمتدُّ بعيدًا عنك مباشرة، ولكن نهاية الظل قد يبدو أنها تمتد إلى الأعلى. أما إذا انتقلت من المركز إلى يسارك على سبيل المثال، فأنت بذلك تزيح القمة وظلَّها إلى يمينك. علاوة على ذلك، بما أنك ترى الظل عبْر الهباء الجوي، ففرصة إزاحة أي جزء من الظل تزداد مع ابتعاد هذا الجزء عنك. وبذلك يكون ظل القمة هو الأكثر إزاحة كونَه الأبعد. عندما تتبع الظل المدبب الذي يمتدُّ بعيدًا عنك، ستجده لا يَنحني فقط إلى الأعلى، بل يميل إلى اليمين أيضًا مكوِّنًا شكلًا يُشبه المسمار عند نهايته.

(٣٧) ظلال السحب المتلاشية

لنفترض أنك تُحلِّق فوق المحيط بينما تنتشر السحب الركامية بعرض السماء. لماذا ستتمكَّن من رؤية ظلالها إذا كنت تجلس على جانب الطائرة الذي تُضيئه الشمس، ولكنك لن تراها إذا كنت تجلس على الجانب المقابل؟

الجواب: عندما تَنظر نحو المحيط من جانب الطائرة الذي تُضيئه الشمس، فإن معظم الضوء الذي تعترضه يكون ضوء الشمس الذي انعكَسَ أو تشتَّت من سطح الماء. يُسمى هذا الضوء «البريق». وإذا اعترضَتْ سحابةٌ جزءًا من ضوء الشمس قبل أن يصل الضوء إلى الماء، فسترى ظلًّا على الماء. تفتقر المنطقة الظليلة إلى البريق، ومن ثَمَّ تكون أغمق من المياه المحيطة.

أما على الجانب الآخر من الطائرة، فيكون انعكاس الضوء وتشتُّته في المقام الأول بعيدًا عنك. وعلى الرغم من أن بعض الضوء المعترَض يكون انعكاسًا للسماء، فمعظمه يكون «ضوءًا صاعدًا»؛ ألا وهو الضوء القادم من الشمس ومن السماء، والذي يَخترق سطح الماء ثم يتشتَّت مرةً أخرى عبْر سطح الماء بواسطة المواد المعلقة (أو القاع). عندما تلقي سحابة بظلالها على هذا الجانب من الطائرة، فإنها لا تُقلِّل من عملية صعود الضوء في المنطقة الظليلة لأنَّ بقية السماء لا تزال تضيء تلك المنطقة. وهكذا، لا يُمكنك رؤية الظل. ومع ذلك، إذا انحرف الظل من الماء إلى الأرض، فإنه يُصبح ملحوظًا فجأة. حينئذٍ لا تكون هناك عملية صعود للضوء، ويكون الضوء الوحيد الذي تَعترِضه من الأرض هو ضوء الشمس الذي يتشتَّت من الأرض (وليس الضوء القادم من السماء). تَحجُب السحابة ضوء الشمس في المنطقة الظليلة وتمنع هذا التشتُّت من الحدوث؛ ومن ثَم ستتمكَّن من رؤية الظل.

(٣٨) ألوان مياه المحيط

لا يكون لمياه المحيط لون واحد؛ فقد يتنوع لونها من لون السماء الأزرق الصافي إلى اللون الرمادي للسماء الملبَّدة بالغيوم. وفي بعض الأحيان قد تكون بيضاء أو ضاربة إلى الحُمرة، أو قد تكون ذات لون أخضر مُزرَقٍّ، أو خضراء أو صفراء. بل بين الحين والآخر قد تكون بُنِّيَّة اللون. فما السر وراء هذه الألوان؟ ولماذا يَعتمِد اللون غالبًا على زاوية رؤيتك لسَطح المحيط؟

بينما تَسبح في المياه العميقة، أمسِك بجسمٍ أبيض مُستوٍ أفقيًّا. لماذا يَختلِف لون السطح العلوي للجسم عن لون سطحه السفلي؟

الجواب: يعود تنوُّع ألوان مياه المحيط إلى العديد من العوامل التي تلعب دورًا في هذا الأمر. لنَفترض أن المياه نقية وأنه لا يوجد غلاف جوي وأن قاع المياه شديد العمق بحيث لا يُشتِّت الضوء تجاهك. عندئذٍ سيكون لون المياه أسود ذا مسحة باهتة من

اللون الأزرق؛ بسبب جزيئات الماء التي تمتصُّ الطرف الأحمر من الطيف وتُشتِّت الطيف الأزرق.

في ظروف أقل مثالية، يُمكن أن تغير المواد العالقة لون المياه من خلال امتصاص أو تشتيت ألوان بعينها من الضوء انتقائيًّا. وبالمثل، يُغير السطحُ السُّفليُّ اللونَ عن طريق الامتصاص الانتقائي، شريطة أن يكون الماء ضحلًا بما يَكفي بحيث يكون الضوء القادم من الأسفل ملحوظًا.

تؤثر السماء قليلًا في لون المياه. إذا كانت السماء زرقاء، فقد تبدو المياه أكثر زُرقة؛ وذلك لأنك تعترض بعضًا من ضوء السماء الذي يَنعكس منها. وبالمثل، إذا كانت السماء رمادية اللون، فقد يُصبح لون المياه رماديًّا بدوره. ومع ذلك، إذا وقفت في مواجهة الوهج اللامع القادم من صفحة الماء في يومٍ مشمس، فستجد على الأرجح أن الماء يبدو أبيض اللون؛ وذلك لأن معظم الضوء الذي تعترضه يكون ضوء الشمس الذي ينعكس من المياه مكوِّنًا ذلك الوهج.

الضوء الذي يضيء السطح العلوي للجسم الأبيض المغمور في المياه له لون داكن؛ وذلك لأن الامتصاص والتشتُّت يُغيِّران طبيعة الضوء أثناء انتقاله إلى أسفل عبْر الماء. يتغيَّر لون الضوء الذي يضيء السطح السفلي بصورة أكبر؛ لأن الضوء يَنتقِل عبْر الماء لمسافة أبعد (إلى أسفل ثم إلى أعلى مرةً أخرى)؛ لذا، تَختلف الدرجات اللونية للسطحَين العُلوي والسفلي.

(٣٩) انعكاس لمعان الشمس والقمر

ما الذي يُفسِّر شكل المنطقة الساطعة التي تكون موجودةً على المسطَّحات المائية عندما تكون الشمس منخفضة أو يكون القمر منخفضًا فوق الماء؟ كيف يتغيَّر الشكل مع تغيُّر ارتفاع الشمس أو القمر؟

عندما يكون القمر قريبًا من الأفق نسبيًّا، فقد ترى مثلثًا مظلمًا فوق المنطقة المضيئة على الماء، فما الذي يتسبَّب في تكوُّن هذا المثلَّث المظلم؟

الجواب: إذا كانت المياه مسطَّحة تمامًا، فسترى صورة تشبه صورة المرآة للشمس أو القمر على الماء الواقع أسفل الأفق. ستكون الصورة أسفل الأُفق بالمسافة نفسها التي يعلوها بها مصدر الضوء. ومع ذلك، عندما يكون سطح الماء مغطًّى بالأمواج، ينعكس الضوء من عددٍ لا يُحصى من الأسطح المائلة؛ وهو ما سيجعلك ترى الكثير من الصور

السريعة الزوال للشمس أو القمر، وذلك كلما وحيثما وُجِدَ ميل على سطح الماء ليُرسِل إليك انعكاسًا. في المتوسِّط، تقع هذه الصور في شكل بيضاوي أو في مسار (يُسمى كلاهما «مسار اللمعان») يمتد بعيدًا عنك؛ حيث يتقارَب الجانبان الأيسر والأيمن لمنطقة الصور المنعكسة نحو نقطة الأفق أسفل الشمس أو القمر مباشرة. تكون منطقة الصور بيضاوية الشكل عندما يكون القمر أو الشمس مرتفعًا، بينما تكون على شكل مسار يمتد إلى الأفق عندما يكون القمر أو الشمس منخفضًا.

يُحتمل أن يكون المثلث المظلم الذي يقع فوق مسار اللمعان القمري وهمًا نتيجةً للتباين؛ إذ إن مسار اللمعان أسفل الأفق مباشرةً يقع بجوار السماء المُظلمة فوق الأفق مباشرة.

(٤٠) حلقات الضوء

عادةً ما تتشوَّه الصور التي تعكسها الأمواج على سطح الماء بسرعة بالغة، بحيث لا يمكنك تمييزها، ولكن يمكنك التقاط صورة ثابتة لها من خلال استخدام كاميرا ذات غالق سريع. إذا فرضنا أنك تقوم بتصوير انعكاس صاري السفينة، فقد تجد في الصورة أن هذا الجزء من الصاري عبارة عن خطٍّ مُتعرِّج، بينما تشكل الأجزاء الأخرى حلقات منفصلة ومُغلَقة. قد لا يصعب تفسير السبب وراء الصورة المتعرِّجة، ولكن ما الذي يُنتِجُ الحلقات؟ هل يمكن أن توجد حلقات منفصلة وغير مكتملة؟ تُشكِّل الأجسام الأخرى أيضًا انعكاسات غريبة؛ فبعض الأجزاء من الأرض ينتج عنها صور تُعرف باسم «البِرَك الأرضية» (بُقَع منفصلة من صور الأرض)، بينما ينتج عن بعض أجزاء السماء صور تُعرف باسم «البِرَك السماوية».

الجواب: يرجع التشوُّه الذي يظهر في الخطوط المتعرجة أو في الحلقات إلى انحناء الأمواج. عندما تكون صورة الصاري عبارة عن حلقة مُغلقة، تنتهي الحال بالسماء الموجودة على أحد جوانب الصاري بأن تظهر داخل الحلقة، بينما السماء الموجودة على الجانب الآخر من الصاري تظهر خارج الحلقة. أما بالنسبة لشكل الحلقات، فهي دائمًا ما تكون مكتملة عندما تكون انعكاسًا لأجسامٍ طويلة كالصاري. ومع ذلك، يمكن أن ينتج عن مصدر نقطة الضوء انعكاسًا معقدًا ذا «نهايات مفتوحة» تَتناسب مع عملية فتح وغلق غالق الكاميرا.

(٤١) الظلال والألوان التي تنعكس على صفحة الماء

لماذا يُمكنك رؤية ظلك في بِركة موحلة أو في بِركة ضحلة صافية ولكن لا يُمكنك ذلك في بِركة عميقة وصافية؟ لماذا يجب أن تكون المياه مُوحلة للغاية حتى ترى ظلال الأشخاص الآخرين؟

بينما تُلقي بظلٍّ على سطح مائي ذي موجات صغيرة عشوائية الاتجاه، افحَصِ السَّطح الذي يُحيط بظل رأسك. تمتد خطوط ساطعة من الظل تُشبه شعاع العجلة، كما وصفها الشاعر والت ويتمان بشكلٍ جميل في قصيدة «عبور قارب بروكلين» بديوانه «أوراق العشب». فما الذي يتسبَّب في ظهور شكل شعاع العجلة هذا؟

في مياه صافية يبلغ عمقها حوالي متر تقريبًا، افحص حافات بقع الضوء التي تشكَّلت في الجزء السفلي بواسطة ضوء الشمس الذي ينسلُّ عبْر أوراق الشجر بالأعلى. إذا كانت الشمس خلفك، فستكون البُقَع بيضاء. أما إذا كنتَ تواجه الشمس، فسيكون للبقعِ حافات ملونة ذات لون أحمر على الجانب القريب ولون أزرق على الجانب البعيد. فما السبب وراء ظهور هذه الألوان، ولماذا يعتمد شكلها على اتجاه وقوفِك؟

الجواب: ستتمكَّن من رؤية الظل فقط إذا كان أكثر إعتامًا مما يُحيط به، كما هي الحال عندما يَنعكِس ظلُّك على الرصيف. إذا صببتَ ماءً رائقًا على الرصيف فسيُصبِح ظلُّك أقل وضوحًا؛ لأن السطح العلوي للمياه يَعكِس إليك صورة السماء والأجسام التي تُحيط بك. وبما أن بعض الصور المنعكسة تُغطِّي على ظلك، فلا تكون هذه المنطقة داكنة كما كانت من قبل.

يكون تبايُن ظلك مع ما يحيط به أضعف إذا كان الماء الصافي أعمق؛ وذلك لأن السطح السفلي لم يعد يُشتِّت الضوء بقوة تجاهك. ومع ذلك، إذا كان الماء عكرًا نسبيًّا، يُصبح ظلُّك ملحوظًا أكثر؛ وذلك لأن الضوء يَتشتَّت تجاهك من المواد العالقة في الماء الموجود حول ظلِّك. حينئذٍ يصبح ظلك ثلاثي الأبعاد بدلًا من أن يكون انعكاسًا مسطحًا على الرصيف. ولهذا السبب قد لا تكون قادرًا على رؤية ظلِّ شخص آخر لأنَّك عندما تنظر إليه، يكون منظور رؤيتك بطول مسار مائل عبْر كلٍّ من المنطقتَين المضاءة والظليلة من الماء. إذا زادت تدريجيًّا عكارة الماء بحيث يرتفع الظل تدريجيًّا نحو سطح الماء، وإذا كان الماء موحلًا بشدة، فسيَنعكِس الظل على السطح ويُرى بسهولة.

عندما تتحرك الأمواج فوق الماء الصافي نسبيًّا، تُرَكِّزُ الأمواج الضوء داخل الماء حيث تُشتِّته المواد العالقة حينئذٍ خارج الماء مرة أخرى. إذا اعترضتَ هذا الضوء المُشتَّت، سترى

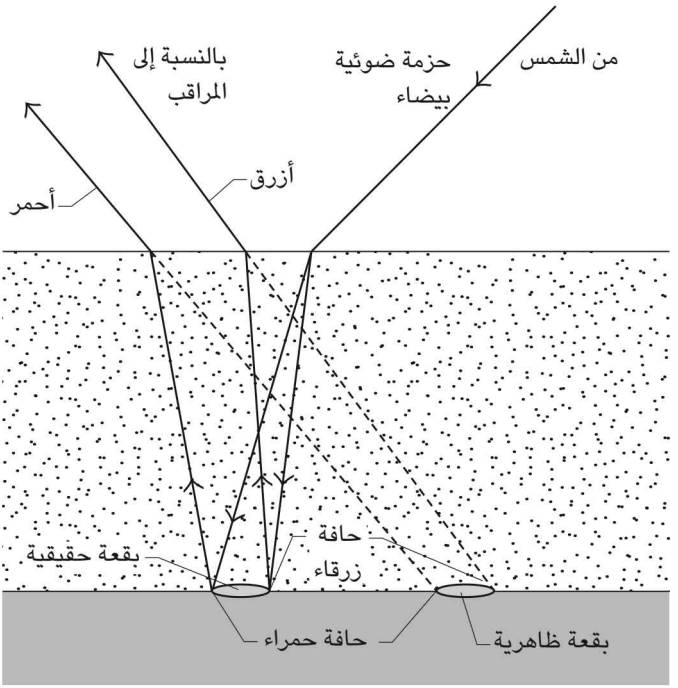
خطوطًا ساطعة حيث يكون الضوء متركزًا، وخطوطًا قاتمة حيث لا يكون كذلك. تقع الخطوط بموازاة خط يفصل بين الشمس وعينَيك. ومن ثَم ستبدو وكأنها تتلاقى عند النقطة المقابلة للشمس مباشرة (أو يشعان إلى الخارج منها)؛ أي داخل إطار ظل رأسك. (يُشبه شكلها التلاقي الظاهري لقضيبَي السكك الحديدية عندما تنظر إليهما على امتداد البصر). يُعتبر الدوران الظاهري لأشعة الضوء التي تشبه شعاع العجلة مجرد وهم يفرض فيه دماغك نظامًا على نمطٍ عشوائي مُتغيِّر.

تظهر بقع الضوء في المياه الضحلة الصافية باللون الأبيض عندما تكون الشمس خلفك، على الرغم من أن ضوء الشمس في كل حزمة ضوئية يَنقسم إلى ألوان مختلفة بمجرَّد دخوله الماء. تصطدم الأشعة الحمراء والزرقاء الموجودة في أيِّ حزمة ضوئية بقاع بِركة الماء عند نقاط مختلفة وتتشتَّت في اتجاهات عديدة. ومع ذلك، فالأشعة التي تَعترضها عيناك لا بد أن تسير بطول طريقها الأصلي مرةً أخرى، ألا وهو اتجاه الشمس. وهكذا، تمتزج الألوان مرةً أخرى عند خروجها من الماء، ومن ثَم فأنت تعترض الضوء الأبيض وترى بقعة بيضاء على قاع البِركة.

أما عندما تكون في مواجهة الشمس، فإنك بذلك تَعترض الأشعة الملوَّنة القادمة من نقاط التشتُّت المختلفة في قاع البِركة (شكل ٦-١٤). يَغلِب اللون الأبيض على البقعة التي تراها على قاع البِركة والتي تكون تجسيدًا لحزمة ضوئية ضيقة؛ لأنك تَعترض من نقاط الحزمة الضوئية الأشعة بكل ألوانها. ولكن من النقاط التي تقع بطول الحافات القريبة والبعيدة من البقعة ستتمكَّن من رؤية ألوان مختلفة. يُكَوِّنُ الضوء الأزرق الحافة البعيدة من البقعة؛ حيث يَنكسِر الشُّعاع الأول من ضوء الشمس داخل الماء: يَنكسِر الشعاع الأزرق أكثر وتَنتهي به الحال في مكان أسفل البِركة أبعد من المكان الذي تقف فيه وأبعد من باقي الألوان. وبالمثل، يُكَوِّنُ الضوء الأحمر الحافة القريبة من البقعة؛ وذلك لأن الشعاع الأحمر يَنكسِر بصورة أقل وتَنتهي به الحال بالقُرب منك. وهكذا، تُشتِّت الحافة البعيدة الضوء الأزرق نحوك، بينما تُشتِّت الحافة الأقرب الضوء الأحمر.

(٤٢) لون ظلك

إذا تأملت لون ظلك على ثلجٍ حديث، فمن الممكن أن تجده ملوَّنًا. فما السبب في تلون الظل؟ وهل من المُمكن أن يختلف اللون؟



شكل ٦-١٤: بند ٦-٤١: يرى المُراقب الذي يواجه الشمس حواف ملوَّنة في قاع بِركة.

الجواب: لا بد أن يكون الظل أسود، لكن إذا كانت السماء زرقاء، فمن المُمكن أن يُضيء ضوء السماء الثلج المظلَّل فيَمنحه لونًا أزرق باهت. وإذا تأملت ظلك على سطح آخر، فمن المُمكِن أن يُلوِّن لونُ السطح ظلَّك. وإذا كانت المنطقة المحيطة بظلك فاقعة اللون، فمن الممكن أن ترى اللون المُكمِّل في ظلك، وهذا وهم نابع من نظامك البصري. ويُمكنك أن ترى بوضوح هذا التلون في ظلال الفنانين على المسارح عندما يكون مسلطًا عليهم ضوء كشاف ملون فاقع الإضاءة.

(٤٣) رؤية الجانب المظلم للقمر

عندما يكون ٧٥ في المائة من جزء القمر المواجه لك مضيئًا بفعل ضوء الشمس، لماذا تستطيع رؤية الجزء المتبقِّي البالغة نسبته ٢٥ في المائة رغم عدم وجوده في ضوء الشمس؟

الجواب: السبب في الإضاءة الخافتة للجزء المظلم من القمر هو «ضوء الأرض»، وهو الضوء المشتَّت من الأرض. فأنت ترى جزءًا من الضوء الذي شتَّته القمر ليعود مرة أخرى إلى الأرض. ومن خلال فحص ذلك الضوء العائد يستطيع الباحثون معرفة كيف يبدو ضوء الأرض لمُشاهِد في الفضاء السحيق. تبدو السماء زرقاء تمامًا بالنسبة إلينا، وهي زرقاء تمامًا أيضًا للمُشاهد من الفضاء. بالإضافة إلى ذلك، فإن ضوء الأرض يكشف ضوء الأشعة تحت الحمراء الذي تُشتته النباتات. ويُجري الباحِثُون هذا العمل على أمل أن يكشف تحليل ضوء أي كوكب يَدور حول أحد النجوم عن إمكانية وجود غلاف جوي ونباتات في هذا الكوكب.

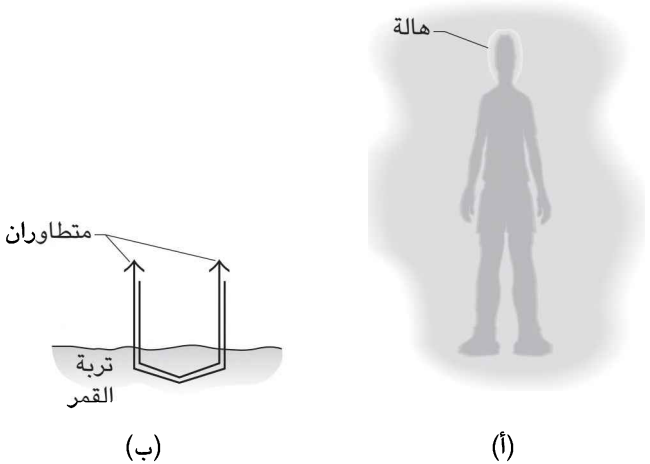
(٤٤) الهالة ولمعان التقابل

تأمَّل ظل رأسك على العشب في صباح يكون فيه العشب مبتلًّا بالندى. قد يكون الظل محاطًا بضوء ساطع يُطلَق عليه «الهالة» (انظر شكل ٦-١٥أ). يُمكِن أن ترى أماكن ساطعة مشابهة حول ظلِّك في بيئات أخرى كثيرة، مثل العُشب الجاف أو النباتات الأخرى أو المسطحات المائية الضحلة التي تعلوها الدوامات، وغيرها من الأسطح الجافة والخَشِنة. من الممكن أيضًا أن ترى خيطًا لامعًا صادرًا من ظلِّ سيارة متحرِّكة عندما يمتد الظل على حقل تكسوه الحشائش.

عندما تكون على متن الطائرة، ابحث عن الهالة على الأرض الواقعة عند نقطة ظل الطائرة (النقطة المقابلة للشمس مباشرةً). وبينما تُغطِّي نقطة الظل الحشائش والأشجار والأراضي الخلاء والرصيف والسحب، تظهر الهالة وتختفي. إذا كنت قريبًا من الأرض فمن الممكن أن ترى ومضات ضوء ساطعة تظهر فجأة داخل الهالة. وإذا كنت فوق الأرض فمن الممكن أن ترى خطًّا داكنًا رفيعًا يمتدُّ من الهالة. فما الذي يُنتج الهالة والومضات الساطعة والخط الداكن؟

عند إضاءة نباتات معيَّنة مُغطَّاة بالندى ليلًا باستخدام كشَّاف وامِض أو وميض كاميرا، فإن الشخص الذي يَحمل الكشَّاف أو المصباح الوامض سيرى النباتات متوهِّجة، في حين أن الشخص الواقف بعيدًا عند الجانب لن يرى ذلك التوهج. فما سبب هذا التوهج، ولماذا لا تتوهج كل النباتات بهذه الطريقة؟

وبمجرد اكتمال القمر يزداد سطوع أي منطقة مضيئة على سطحه فجأة، ويُطلَق على هذه الظاهرة «لمعان التقابُل». في الحقيقة، من الممكن أن تصبح هذه المنطقة أكثر



شكل ٦-١٥: بند ٦-٤٤: (أ) ظل على الحشائش المرَطَّبة بالندى في حالة اقتراب الشمس. (ب) طريق شعاعين عبْر تربة القمر.

لمعانًا بنسبة ٢٥ في المائة عندما يكون القمر بدرًا مقارنة بأي يوم سابق أو لاحق. فما السبب في هذه الزيادة المُفاجِئة في ضوء الشمس الذي يُشتِّته سطح القمر؟ (قبل أن يَهبط رواد الفضاء على القمر، كانت وكالة ناسا قلقة من أن يتسبَّب تشتُّت ضوء الشمس العائد من تربة القمر في عمًى لرواد الفضاء على القمر إن لم تكن خوذاتهم مزوَّدة بحاجز واقٍ مناسِب يُمكِّنُهم من الرؤية.)

عند جز الحشائش أو ملعب رياضي بطريقة معينة، يُشبه العشب رقعة الشطرنج بمربعاتها الفاتحة والقاتمة. فما السبب في هذا الاختلاف في السطوع؟ هل للقَول المأثور «العشب أكثر اخضرارًا عند الجانب الآخر من السور» أي قيمة علمية؟

الجواب: تدبَّر أولًا العشب الجاف. عندما تنظر إلى المنطقة المُحيطة بظل رأسك لن ترى إلا أنصال الحشائش وليس الظلال التي تلقيها؛ لأن الظلال واقعة خلف الأنصال؛ ومن ثَم فإن المنطقة ساطعة لأنك تستقبل فقط ضوء الشمس المنعكس منها. وعندما تنظر بعيدًا عن المنطقة الساطعة ستبدأ في رؤية بعض ظلال الأنصال، وسيقلُّ السطوع العام. ومن ناحية أخرى، ستكون المنطقة المحيطة بظل رأسك ساطعة.

أما الهالة المحيطة بالأرض الجافَّة فمن المُمكن أن يكون سببها الانخفاضات الصغيرة في الأرض التي تتَّخذ شكلًا أشبه بالأركان قائمة الزوايا. هذه المناطق تعكس الضوء مرة أخرى إلى مصدره، فتَعترض أنت بعضًا من هذا الضوء العائد. وقد تُسهم الأشكال والمواد الأخرى الموجودة على الأسطح في عودة إضافية للضوء، لا سيما عندما يكون السطح مساميًّا وبه «أنفاق». فعندما تنظر حول ظل رأسك ستجد ضوءًا مُشتَّتًا عائدًا لك عبْر دواخل الأنفاق لكنك لا تراه عندما تنظر بعيدًا إلى الجانب.

وعندما يكون العُشب مغطًّى بقطرات الندى من المُمكن أن يدخل الضوء إلى قطرة الندى، ويَنعكِس من السطح الخلفي ونصْل ورقة العشب ثم يترك القطرة عائدًا تقريبًا نحو الشمس. إذا نظرتَ إلى العشب المحيط بظلِّ رأسك فستعترض بعضًا من هذا الضوء العائد؛ ومن ثَم سيكون العشب ساطعًا. أما إذا نظرت على العشب الموجود على الجانب فلن تعترض أيًّا من الضوء العائد، ومن ثَم لن يكون العُشب هناك بنفس السطوع.

تركز القطرة الكروية ضوء الشمس على بُقعة صغيرة واقعة تقريبًا خلف السطح الخلفي. ويكون الضوء العائد أكثر سطوعًا إذا وُجد نصْل العشب عند نقطة التركيز، لكن عادةً ما ترتكز القطرة مباشرةً على النصل. رغم ذلك، تَكتسي أنواع معينة من الأوراق بشُعَيرات رفيعة يمكن أن تحمل القطرة فوق سطح الورقة نسبيًّا. وتعطي هذه الأوراق هالة ساطعة جدًّا.

عندما يُضيء مصباح كشَّاف قطرات الندى على النباتات يعود جزء من الضوء في الاتجاه العام للكشَّاف في صورة هالة. ويكون الضوء العائد أكثر سطوعًا إذا كانت القطرات شبه كروية. على الأوراق الشمعية لنباتات معيَّنة فتَميل القطرات إلى التحبُّب في صورة كريات؛ ومن ثَم عندما يُوجَّه شعاع الضوء على هذا النبات يبدو النبات مشعًّا مقارنةً بالنباتات الأخرى.

وأما الومضات الساطعة التي تراها داخل الهالة أثناء التحليق بالطائرة فتعود إلى «العواكس الرجعية» التي تكون عادةً حُبَيبات بلاستيكية أو زجاجية ترسل الضوء مرةً أخرى إلى مصدره. فعلى سبيل المثال، من المحتمل أن يحتوي دهان لافتة المرور على عواكس رجعية صغيرة مثبتة لإرسال الضوء من كشَّافات السيارة إلى قائدها مرةً أخرى كي يرى اللافتة بسهولةٍ ليلًا. وعندما يمرُّ ظل الطائرة على هذه اللافتة، فإنك تعترض جزءًا من الضوء الذي يرسله الدهان مرة أخرى إلى الاتجاه العام للشمس. أما الخط القاتم الذي يُصاحب الهالة أحيانًا فهو ظلُّ خطِّ التكثُّف «الخط النفاث» الذي تتركه الطائرة.

وإذا كانت الطائرة مُنخفِضة على نحوٍ يَسمح لك برؤية ظلها على الأرض، فقد تجد شريطًا ساطعًا محيطًا بظلها. من المُمكن أن يكون سبب هذا الشريط هو الضوء المشتَّت العائد إلى اتجاه الشمس العام من قطرات الماء الموجودة على النباتات (ومِن ثَمَّ الهالة) أو من الممكن أن تكون هذه القطرات محمولة في الهواء. ومع ذلك، من الممكن أن ترى شريطًا ساطعًا حتى مع عدم وجود قطرات الماء (كما هي الحال في الأراضي الجافة أو القاحلة). بالإضافة إلى ذلك، من المُمكن أن ترى شريطًا ساطعًا حول ظلِّ طائرة «أخرى»، وبالتأكيد من غير الممكن أن تكون قطرات الماء هي السبب في ظهور هذا الشريط. في هذه الحالة، يكون هذا الشريط الساطع وهمًا إدراكيًّا. عندما توجد منطقة قاتمة (مثل ظل الطائرة) بجوار منطقة أكثر سطوعًا في مدى رؤيتك، فإن جهازك البصري ينتج شريطًا ساطعًا (يعرف باسم «شريط ماتش») على طول الحد الفاصل بين المنطقتَين.

عندما يصل ضوء الشمس إلى سطح القمر فمِن الممكن أن يتشتَّت تقريبًا في أي اتجاه. ومع ذلك، فإن التشتُّت الأكثر سطوعًا يكون في الاتجاه العام للشمس بسبب طريقة تعزيز الموجات الضوئية بعضها لبعض في ذلك الاتجاه. فمن المُمكن أن يتخذ شعاعان ضوئيان منفصلان نسبيًّا المسار نفسه عبْر تُربة القمر لكن في اتجاهين مُتقابلين، ثم يخرجان عائدَين إلى الشمس (انظر شكل ٦-١٥ب). ومَوجتا هذَين الشعاعين «متطاورتان» (في الطور نفسه) تقريبًا ومِن ثَمَّ تُعزِّز كلٌّ منهما الأخرى؛ أي تجتمعان لجعل الضوء ساطعًا. وعندما يكون القمر بدرًا فإننا نتحرك إلى هذا الضوء الساطع المُشَتَّت نحو الشمس؛ ولذلك يكون القمر ساطعًا جدًّا. وعندما نعترض طريق الضوء المشتت في الليالي الأخرى، تكون الأشعة قد خرَجَت بطرق عشوائية من تربة القمر ولا يعزز بعضها بعضًا في العموم، ومِن ثَمَّ يكون القمر أقل سطوعًا.

بعض أنواع النباتات الحزازية يمكنها أيضًا تشتيت الضوء بسطوع نحو الشمس وتُعزِّز موجات ذلك الضوء بعضها بعضًا. ومن الممكن أن ترى عودة ذلك الضوء الساطع إذا كانت نقطة ظلِّك ساقطة على نباتات حزازية بعيدة نسبيًّا، لكن يكثر عادةً رؤية ذلك الضوء في الصور الجوية المُلتقَطة لمناطق النباتات الحزازية.

أما تصميم الشطرنج الناتج عن تقليم الحشائش فيعود إلى اتجاه أنصال الحشائش الذي تتركه آلة جز الحشائش. ففي بعض المناطق تكون الأنصال موجَّهةً بحيث تعكس لك الضوء، وفي مناطق أخرى لا تكون كذلك، بل ترى بعض ظلالها.

قد يبدو العشب على الجانب الآخر من السور أكثر اخضرارًا؛ لأن زاوية النظر المائلة التي تنظر منها قد لا تكشف لك عن التُّربة البُنِّية السُّفلية التي تراها بسهولة عندما تنظر

إلى الأسفل مباشرةً. (بالتأكيد يوجد درس عن الحياة والعلاقات في هذا المثل، لكني أتركه لك لتعرفه بنفسك.)

(٤٥) أمواج حقول الحبوب

في بعض الأحيان قد يبدو أنه توجد حركة موجية في حقول الحبوب والأعشاب الطويلة، فتبدو المناطق الساطِعة والقاتمة كما لو كانت تتحرَّك فوق سطح الحقل مثلما تتحرَّك الأمواج فوق سطح المحيط. تَختفي هذه الحركة التي تُشبه الأمواج إذا اقتربت كثيرًا من الحقل. فما سبب هذه الحركة؟

الجواب: تعود هذه الأمواج الظاهرية إلى الرياح التي تدفع الحبوب أو الحشائش إلى الاهتزاز. عندما تكون جوانب النبات مواجهةً لك فإنها تعكس نحوك الضوء، فتمنح المنطقة مظهرًا ساطعًا. وعندما تكون الجوانب غير مواجِهة لك كثيرًا (كأن يكون الساق مُنحنيًّا نحوك أو بعيدًا عنك) يكون الانعكاس بالنسبة إليك أقل وتبدو المنطقة أكثر قتامة. ومع غُدُوِّ الرياح ورواحها، يأتي ويذهب المظهر الساطع والمظهر القاتم. ولكي تَحصُل على انطباع حركة الأمواج يجب أن تكون بعيدًا عن النباتات بالقَدر الكافي كي لا ترى تفاصيلها.

(٤٦) الهالة

إذا وقفتَ على جبل وأَولَيتَ ظهرك إلى الشمس ونظرت إلى الأسفل في الضباب الكثيف الذي يضيئه ضوء الشمس المباشر، فقد ترى نسقًا من الحلقات الملوَّنة حول ظل رأسك. يُطلق على هذا النسق «الهالة» أو «الهالة المقابلة» أو «قوس بروكن». من الممكن أن تشعر أنك قديس لأنك لن ترى أبدًا مثل هذا النسق حول رأس أحد الأصدقاء.

في الغالب يُمكن أن تشاهد الهالة عندما تُحلِّق فوق غيومٍ ممتدة. وتتكون هذه الهالة حول نقطةٍ في مواجهة الشمس مباشرةً. وإذا كانت الطائرة قريبة على نحوٍ معقول من الغيوم على نحو يمكنك من رؤية ظلها، فسوف تتمركز الهالة عند نقطة في الظل تُماثِّل موقعك في الطائرة. في الغالب تتخذ الهالة شكلًا دائريًّا لكن في بعض الأحيان من الممكن أن تتشوَّه كثيرًا ويُصبح شكلها بيضاويًّا. إذا كانت النقطة المقابلة للشمس تمر بين السحب والأرض على نحو متقطع، فسوف تأتي الهالة وتذهب وقد يحلُّ محلَّها في بعض الأحيان «هالة ساطعة» ناتجة عن ميل الأرض إلى تشتيت الضوء لتُعيدَه مرةً أخرى إلى الشمس.

فما سبب الهالة؟ وما تسلسل الألوان فيها؟ وكيف يعتمد الحجم الزاوي للهالة على حجم قطرات الشبورة أو السحب بالأسفل؟

الجواب: السبب في الهالة هو تداخُل الضوء الذي تُشتِّته قطرات الماء الصغيرة ليعود إلى الشمس. وعندما تُعيق جزءًا من الضوء المشتت العائد إلى الشمس فإنك ترى الهالة. والتشتيت نوع من «الحيود» ينتشر فيه الضوء ويتعرض للتداخُل؛ فتُعزز بعض الموجات موجات أخرى (تداخل بنَّاء) وتميل موجات أخرى إلى إلغاء غيرها (تداخل هدَّام). ونتيجة ذلك يتكوَّن نسق تنتهي فيه الألوان المختلفة إلى اتجاهات مختلفة.

ونموذج الحيود بالنسبة إلى القطرات الصغيرة في الهالة في غاية التعقيد. إليك هذا التفسير البسيط: يتكوَّن التشتيت من مُكوِّنَين ضوئيَّين. يتكون المكون الأول من موجات ضوئية تدخل القطرة وتنعكس داخليًّا ثم تخرج عائدة إلى الشمس. أما المكون الثاني فيتكون من موجات ضوئية تنزلق على السطح الخلفي للقطرة ثم تتوجه عائدة إلى الشمس. يتعرَّض هذان المُكوِّنان إلى التعزيز أو الإلغاء، ونتاج تداخُل القطرات الكثيرة يكون نسقًا من شرائط ساطعة دائرية، يسود فيها اللون الأحمر خارج النسق ويسود فيها اللون الأزرق داخل النسق.

يَعتمِد الحجم الزاوي للهالة على حجم القطرات، فكلما كَبُر حجم القطرات صَغُر حجم الهالة. تتباين أحجام القطرات عادةً عبْر نطاق واسع؛ ومِن ثَمَّ تميل الألوان إلى التداخل ويُصبح من الصعب تمييزها. أما إذا كان النطاق ضيقًا، فمن الممكن أن نُميِّز الألوان ونرى أطيافًا كاملة عديدة (من الأزرق إلى الأحمر).

تتشوَّه الهالة فتُكوِّن شكلًا بيضاويًّا إذا كانت الشمس مُنخفضةً، وإذا كنت تشاهد الهالة ممتدة على جدار طويل من السحُب يتغير فيه حجم القطرات حسب المسافة التي تبعدها عنك.

(٤٧) الهالة الشمسية والهالة القمرية

الهالة منطقة ساطعة تُحيط بالشمس أو بالقمر. وتتكوَّن هذه المنطقة في بعض الأحيان من حلقات ملوَّنة. وقد لاحظتُ ذات مرةٍ هالةً قمرية مكوَّنة من مجموعتَين من الحلقات الملونة وأجزاء من مجموعة ثالثة خارجية، وكان منظرها ساحرًا. فما السبب في الهالة، وما هو تسلسل الألوان فيها؟ ولماذا تُصبح الألوان مرئيةً أحيانًا فحسب؟ وما الذي يُحدِّد حجم الهالة؟

الجواب: تحدث الهالة الشمسية والهالة القمرية نتيجة حيود الضوء أثناء مروره على قطرات الماء في السحب في طريقه إليك. والحيود نوع من التشتُّت ينتشر فيه الضوء في نسق متداخل. جزء من الموجات يُعزِّز بعضه بعضًا ليُنتج ضوءًا ساطعًا، بينما الجزء الآخر يلغي بعضه بعضًا ليُنتج ظلامًا. يَنشُر الحيود ألوان الضوء الأبيض في الأصل، وينتشر اللون الأحمر بزاوية أكبر من زاوية اللون الأزرق. ونتيجة لذلك، فغالبًا ما تكون الحافة الخارجية للهالة حمراء اللون. يعتمد مدى انتشار الألوان على حجم القطرات. فترى حلقات مميَّزة من الألوان عندما تكون القطرات متطابقة في الحجم تقريبًا ويكون قُطرها بضعة ميكرومترات. وعندما تختلف أحجام القطرات على نطاق واسع، تتداخل الألوان لتُكوِّن هالة بيضاء (ذات حافة حمراء باهتة على الأرجح).

والحلقات المحيطة بالشمس في لوحة «الكرم الأحمر» التي رسمها فنسنت فان جوخ ليس لها علاقة على الأرجح بالهالة، بل رسَمها ليُمثِّل الإشعاع. لقد اعتاد على رؤية هذه الحلقات حول مصادر الضوء نظرًا لتأثُّر رؤيته بالأعراض الجانبية لاستخدام نبات القمعية لأغراض علاجية بمُستوًى يُسبِّب السُّمِّية.

(٤٨) هالة الزجاج المتجمد

عند المرور على نافذة زجاجية متجمِّدة في ليلة باردة قد تجد أن المصابيح الداخلية محاطة بحلقات ملونة. فلماذا تظهر تلك الحلقات؟ ولماذا تكون محاطة بحلقة قاتمة؟

الجواب: تُشبه هالة الزجاج الهالة الجوية المذكورة في البند السابق، فكلتاهما سببُهما حيود الضوء بفعل قطرات الماء، لكن قطرات الماء هنا تكثَّفت على الزجاج. والحلقة القاتمة الخارجية هي جزء من نسق الحيود تصل فيه الموجات الضوئية إلى عينيك وهي غير مُتطاورة بعضها مع بعض؛ ومِن ثمَّ يُلغي بعضها بعضًا.

وإذا كانت النافذة المتجمِّدة مُتحرِّكة كما هي الحال في القطار، فمن الممكن أن ترى الهالة على كل مصدر ضوء مارٍّ، بحيث تبدو الهالة وكأنها تندفع أمامك. أما إذا كان مصدر الضوء يَرتعِش مثلما تفعل مصابيح الشوارع الزئبقية، فقد ترى أيضًا أشرطة رأسية ساطعة وقاتمة فوق الهالة.

(٤٩) السحب المُتَقزِّحة اللون

لماذا تتلوَّن بعض السحب بألوان باهتة مثل الوردي والأخضر في أغلب الأحيان؟

الجواب: عندما يَبلُغ قُطْر قطرات الماء أو بلورات الثلج بضعة ميكرومترات فإنها تحيد (تنشر) ضوء الشمس في صورة نسَقٍ مُتداخل تعزز فيه الموجات بعضها البعض أو تلغي بعضها البعض. فعند زوايا انتشار معيَّنة تكون الأمواج الضوئية مُتطاورة، فيعزز بعضها البعض؛ ومِن ثمَّ تكون النتيجة هي الضوء الساطع. وفي زوايا أخرى تكون الأمواج الضوئية غير مُتطاوِرة، ويلغي بعضها البعض؛ ومِن ثمَّ تكون النتيجة البهتان أو الظلام. ويُسفر هذا عن ألوان مختلفة في زوايا مختلفة. إلا أن انتشار الألوان يَعتمد على حجم القطرات أو البلورات؛ فإذا كانت كلها مُتماثلة في الحجم، تصبح الألوان فاقعة، أما إذا اختلفت الأحجام، فسوف تتداخل الألوان لتُعطيَ لونًا باهتًا أو بياضًا.

ونظرًا لأن الضوء يحيد في الاتجاه الأمامي بصورة أساسية، فيجب أن تكون السحابة محاذية تقريبًا لمنظورك للشمس كي تحجب بعض الألوان. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون السحابة رقيقةً (رفيعة) وإلا فسيحدث انتشار الألوان في كل مرة يمرُّ فيها الضوء عبْر السحاب لدرجة تجعل الألوان شديدة التداخل بما يحولُ دون تمييزها. وفي السُّحب السميكة فلا تظهر الألوان إلا عند الحواف الرفيعة.

(٥٠) القمر الأزرق

تعيش جدتي في بلدة في تكساس، وهي بلدة صغيرة للغاية لدرجة أنه، حسب قولها، لم يَحدث فيها أمر مُثير للاهتمام إلا حين حل «قمر أزرق». فما هو القمر الأزرق؟

الجواب: تَحدُث ظاهرة القمر الأزرق نتيجة الأهباء الجوية المُكوَّنة من جزيئات تتراوح أقطارها بين ٠٫٤ و٠٫٩ ميكرومتر. ومن المُحتمَل أن تكون هذه الجزيئات قد انطلقت إلى الغلاف الجوي العُلوي بفعل بركان أو حريق في إحدى الغابات. مِن المُمكن أن يكون حجمها مناسبًا منذ البداية لِتكوِّن القمر الأزرق، أو مِن المُمكن أن تكتسب الحجم المناسب مع تكثُّف الماء عليها. عندما يَنتقل ضوء القمر عبر الجزيئات، تتشتَّت الأجزاء الحمراء والصفراء من الطيف إلى جانب رُؤيتك، وتستقبل بصورة أساسية الأجزاء الزرقاء والخضراء المُزرقَّة. وإذا كان القمر قريبًا من الأفق، فلا بد أن يسلك الضوء مسارًا طويلًا عبْر الغلاف الجوي لدرجة أن الهواء يُشتِّت مُعظم اللون الأزرق؛ ومِن ثمَّ ترى قمرًا أخضر. وتَنطبق كلتا النتيجتَين على لون الشمس الذي يُمكن أن يكون أزرق أو أخضر عند رؤيته عبْر الهباء المناسب.

(٥١) أضواء الضباب الصفراء

هل تستطيع أضواء السيارة الصفراء أن تخترق الضباب على نحوٍ أفضل من الأضواء البيضاء؟

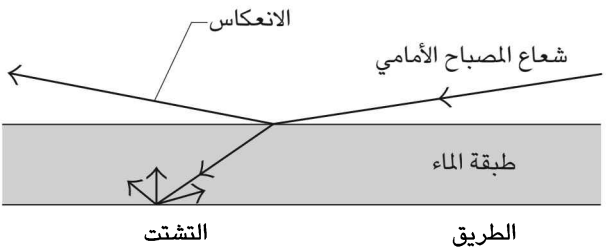
الجواب: إذا كان قُطر قطرات الضباب أصغر من ٠٫٢ ميكرومتر تقريبًا، فسوف يتشتَّت الطرف الأزرق والأخضر من الطيف أكثر من الطرف الأحمر والأصفر. في الواقع، تَخترق الأضواء الصفراء الضباب على نحوٍ أعمق من أي لونٍ آخر، ويُمكن أن تتشتَّت أو تنعكس مرتدة إليك عبْر الطريق. أما إذا كان قطر القطرات أكبر نسبيًّا؛ أي حوالي ٠٫٦ ميكرومتر، فقد تكون النتيجة معاكسة، وسيكون اللون الأزرق أو اللون الأخضر أفضل اختراقًا. وإذا كانت القطرات أكبر كثيرًا، فسوف يكون اختراق الألوان كلها مُتماثلًا تقريبًا. ولتعقيد الأمر على نحو أكبر فمِن المُمكن أن تَحتوي القطرات على ملوثات تمتصُّ ألوانًا معيَّنة. ومِن ثَمَّ فليس لدينا جواب محدَّد في هذا الصدد.

(٥٢) قتامة الرمال المبتلَّة

لماذا تكون الرمال وهي مبتلَّةٌ أكثرَ قتامةً منها عند جفافها؟ لماذا الشعر المبلول أغمق من الشعر الجاف؟ ولماذا أثناء القيادة على الطريق ليلًا دون وجود إضاءة من مصابيح الشوارع، تكاد تختفي خطوط الطريق الملوَّنة أثناء المطر؟

الجواب: عندما تكون الرمال جافة يتناثر معظم الضوء مرةً أو مرتين فقط قبل أن يَترك الرمال، وتمتص الرمال قدرًا قليلًا من الضوء، فتكون الرمال فاتحةً وربما برَّاقة. وعندما تكون الرمال مبتلَّة يتشتَّت الضوء مراتٍ كثيرة ولا يُغادر الرمال منه إلا النزر اليسير، فتُصبح الرمال أكثر قتامة. ويوجد نموذجان يُفسِّران التشتُّت الإضافي للضوء عندما تكون الحبيبات مغطَّاة بالماء: (١) يُمكن أن يكون الضوء محبوسًا داخل طبقة الماء ويُمتَص تدريجيًّا مع انعكاسه المتكرِّر داخل الطبقة. وهذا يُفسِّر لماذا يكون الشعر أكثر قتامةً عندما يكون مُبتلًّا. (٢) عندما تكون حُبيبات الرمال مبتلَّة، فإن الضوء يتشتَّت في الاتجاه الأمامي — أي على نحوٍ أعمق في طبقة الرمال — ومِن ثَمَّ تقل فرصة الضوء في الخروج مرةً أخرى.

عندما يكون الطريق جافًّا يُشتِّت سطحُ الطريق في كل الاتجاهات الضوءَ الصادرَ عن مصابيح السيارة الأمامية؛ فيعود لك قدرٌ كافٍ من الضوء لتُميِّز الخطوطَ وبعض



شكل ٦-١٦: بند ٦-٥٢: تُقلِّل طبقة الماء على الطريق كمية الضوء الواصل إلى سطح الطريق.

معالم ملمس سطح الطريق. وعندما يكون الطريق مغطًّى بطبقة من الماء يتعرض بعض الضوء الصادر عن المصابيح الأمامية إلى الانعكاس كالمرآة عند سطح طبقة الهواء والماء، ويُنير سطحَ الطريق قدرٌ أقل من الضوء (انظر شكل ٦-١٦). بمجرَّد تشتُّت أي ضوء من سطح الطريق فلا بد مِن مروره عبْر سطح طبقة الهواء والماء مرةً أخرى ليصل إليك. عند هذا السطح يَنعكِس بعض الضوء (وربما معظم الضوء اعتمادًا على الزاوية) مرتدًّا إلى سطح الطريق. ونتيجة كل هذه العوامل فإنَّ الضوء العائد لك قد يكون خافتًا للغاية على نحو يَحول دون تمييز خطوط وملامح الطريق.

(٥٣) ألوان الجليد والثلج

لماذا عادةً ما يكون لون الثلج أبيض، ولماذا يكون لون الحُفرة المحفورة في الثلج أزرق في بعض الأحيان؟ وما هو لون الجليد؟ ولماذا تبدو الكُتَل الجليدية في القطب الجنوبي خضراء في بعض الأحيان بينما لا تبدو الكُتَل الجليدية في القطب الشمالي خضراء أبدًا؟

الجواب: عندما تشاهد الثلج في ضوء الشمس الأبيض، فأنت تعترض الضوء المنعكس من أسطح البلورات وأيضًا الضوء المُنتقِل عبْر بعض البلورات. يحتفظ الضوء المنعكس ببياض ضوء الشمس الواقع على السطح. ويتعرَّض الضوء المار عبْر بعض البلورات لامتصاص بسيط عند طرف الطيف الأحمر وتنتهي به الحال أزرق اللون نسبيًّا، لكن هذا التلون يكون باهتًا للغاية على نحو يحول دون رؤيتك له؛ ومِن ثمَّ يبدو الثلج أبيض. وإذا

وصل الضوء إلى حفرة عبْر الانتقال من خلال الثلج العلوي، فإنه يمر عبْر عدد هائل من البلورات. وفي هذه الحالة قد يصبح اللون الأزرق ملحوظًا.

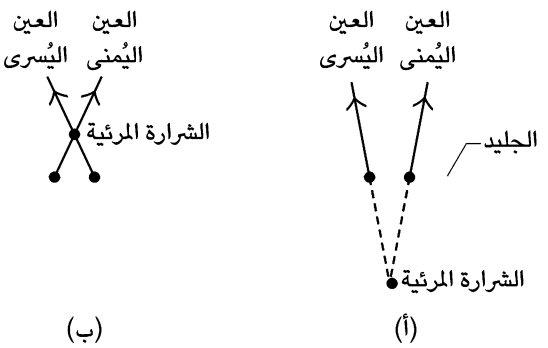
تتلون أجزاء كبيرة من الجليد، كما هي الحال مع الجبال الجليدية، باللون الأزرق إذا انتقَلَ الضوء لمسافة متر تقريبًا عبْر الجليد، إما من جانب لآخر وإما فقط من خلال الارتداد من الجانب الأول بعد التشتُّت من الشوائب الداخلية. إلا أن بعض الجبال الجليدية المنشقَّة عن الجروف الجليدية في القطب الجنوبي تبدو خضراء على نحوٍ واضح. والسبب في هذا اللون الأخضر هو امتصاص الضوء الأزرق من قِبل العوالق النباتية البحرية التي أضيفت تدريجيًّا لقاعدة الجرف الجليدي أثناء تجمُّد مياه البحر حتى القاعدة. ويُحوِّل امتصاص اللون الأزرق لونَ الضوء المنتقل عبْر الجليد إلى اللون الأخضر. وإذا انقلب الجزء الجليدي بعد انشقاقه يظهر الجليد أخضر اللون على الجبل الجليدي الناتج. لا تظهر الجبال الجليدية الخضراء في القُطب الشمالي، والسبب المُفترَض هو أن الجروف الجليدية تتحرك وتنشق في البحر سريعًا جدًّا على نحو يحول دون تراكُم العوالق النباتية على نحوٍ ملحوظ.

(٥٤) المرايا الجليدية وشرارات الجليد

عادةً ما يكون انعكاس ضوء الشمس من الحقل الجليدي مُبهرًا ويشع باللون. فما سبب هذه الظاهر المعروفة باسم «المرايا الجليدية»؟ وما سبب الشرارات الشائعة ذات الألوان الخافتة التي يُمكِن رؤيتها في الحقل الجليدي؟ ولماذا يبدو في الغالب أن الشرارات الجليدية توجد فوق سطح الجليد أو أسفله؟

الجواب: تظهر المرايا الجليدية في الأيام الساطعة المشمسة عندما تذوب الطبقة العليا من الجليد مُكوِّنةً طبقة رقيقة من البلَّورات الثلجية. تأتي الطاقة الحرارية اللازمة للذوبان من ضوء الشمس الذي يَخترق طبقة الجليد ويَنعكِس مرات كثيرة إلى أن يُمتَص معظمه. ثم تَنتقِل الطاقة الحرارية إلى السطح حيث تذوب أجزاء صغيرة من الجليد؛ ومِن ثمَّ يعيد الهواء البارد تجميدها. ونتيجة لذلك تتكون طبقة من البلورات الثلجية تعمل كالمنشور الزجاجي في ضوء الشمس فتُرسل الضوء الساطع وتفصل لك الألوان.

أما الشرارة الجليدية الأكثر شيوعًا فتعود إلى البلورات الثلجية نفسها التي تعمل كالمنشور الزجاجي فتكوِّن نقاطًا ملوَّنة. ونظرًا لأن عينَيك منفصلتان، فإن كلًّا منهما ترى مجموعة مختلفة من الشرارات في الجليد القريب. وعندما توجد الشرارة التي تراها إحدى



شكل ٦-١٧: بند ٦-٥٤: يمكن لشرارتي جليد متقاربتين الإيهام بوجود شرارة واحدة إما (أ) أسفل سطح الجليد وإما (ب) فوق سطحه.

العينَين بجوار شرارة تراها العين الأخرى فإن العقل من تلقاء نفسه يَدمج الشرارتَين ويجعلك تتوهم أن الشرارة الواحدة توجد إما فوق سطح الجليد أو أسفله. تبدو الشرارة الواحدة أسفل سطح الجليد عندما ترى العين اليُسرى شرارة على «يسار» الشرارة التي تراها العين اليمنى (انظر شكل ٦-١٧أ). وتبدو الشرارة الواحدة فوق السطح الجليدي عندما ترى العين اليُسرى شرارة على «يمين» الشرارة التي تراها العين اليمنى (انظر شكل ٦-١٧ب).

(٥٥) الرؤية الضبابية وعمى الثلج

ما الظروف التي تؤدِّي إلى حالة فقدان الرؤية والاتجاه في الحقل الجليدي، والمعروفة باسم «الرؤية الضبابية»؟ إذا كان الضوء ساطعًا، فلماذا تختفي الظلال؟ في بعض الأحيان يمكن أن يُؤذي الابيضاض الجليدي العين، وربما يؤدِّي إلى العمى الدائم (عمى الثلج). هل حدوث الرؤية الضبابية في الأيام المشمسة أكثر احتمالًا من حدوثها في الأيام الغائمة؟

الجواب: يوجد نوعان للرؤية الضبابية. فعندما تَضرب العاصفة الثلجية الأرضية الجليدَ السائب وتجعل الرؤية قاصرةً على عدة أمتار، فإنك قد تضل الطريق بعد السير لمسافة قصيرة فحسب. ويحدث نوع آخر من الرؤية الضبابية عندما يُغطي الجليد الأرض

وتغطي الغيوم البيضاء السماء. ونظرًا لأنَّ الأرض والسماء تَعكِسان الضوء بسطوع، فإن الإضاءة تصبح منتشرة لدرجة تمنع تكون الظلال. عندما تكون الأرض في درجة سطوع السماء والسحب العلوية يختفي الأفق وتندمج السماء والجليد في سطح أبيض واحد. في هذه الحالة ستشعر كما لو كنتَ في فضاء أبيض فسيح. ويروي فيلهلمر ستيفانسون في مذكراته وقصصه عن السنوات الخمسة التي قضاها في الرحلات الاستكشافية القُطبية، فيقول: إن الرؤية الضبابية لم تكن واردة في الأيام الصحوة أو الأيام شديدة الغيومة، بل إنها كانت تُهدِّده في الأيام التي تغطي فيها السحب الغائمة السماء بقدر يكفي لحجب الشمس ويَسمح أيضًا بوصول قدر كافٍ من ضوء الشمس. في هذه الحالة قد يعجز المرء عن رؤية كتلة جليدية في نصف طوله، فما بالك بالكُتَل الصغيرة التي قد تتسبَّب في تعثره.

وإذا كان الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية ساطعَين فمِن المُمكن أن تتسبَّب الرؤية الضبابية في ألم للعينَين وربما تؤدي إلى العمى الدائم. وحتى العصور الحديثة ظلَّ بعض السكان الأصليين في كندا وألاسكا يُقلِّلون من تعرُّضهم للضوء من خلال ارتداء نظارة مكونة من قطعة من الخشب أو العظام ذات شق رفيع على كل عين.

(٥٦) نظارات التزلج الصفراء

يَزعم بعض المُتزلِّجين أن الكتل الجليدية الصعبة التبيُّن يمكن رؤيتها على نحو أفضل في الأيام الضبابية من خلال نظارة ذات زجاج أصفر. يوصي أيضًا المستكشف القطبي الشهير فيلهلمر ستيفانسون باستخدام نظارات ذات عدسات برتقالية للتجوُّل في الحقول الجليدية والثلجية. فهل تتحسَّن الرؤية فعليًّا باستخدام هذه العدسات الصفراء في تلك المواقف؟

الجواب: إليكم السبب الذي قد يَجعل النظارات الصفراء فعَّالة: يُقلِّل الضباب من القُدرة على رؤية الكتل الجليدية لأنه يُشتِّت ضوء الشمس على ظلال تلك الكتل ويجعل ظلالها أقل وضوحًا؛ لأنها تكاد تكون غير مُتباينة مع الجليد المحيط بها. وإذا كان الضباب مكوَّنًا من جزيئات شديدة الصغر (ذات قطر أقل من ٠٫٢ ميكرومتر) فإنها تشتت الجزء الأزرق والأخضر من الطيف أكثر من تَشتيتها للجزء الأحمر والأصفر، ويتشتَّت قدر قليل من الضوء الأصفر في مناطق الظلال. وعند ارتداء نظارة شمسية صفراء بحيث ترى فقط الضوء الأصفر المشتَّت من الجليد، فقد تكون أكثر قدرة على تمييز الظلال وإدراك وجود الكتل الجليدية.

أثمة سبب آخر وهو أن النظارات الشمسية قد تعزز سطوع المشهد الظاهري (وليس الفعلي) سواء أكان جليديًّا أم لا. ويعود هذا التأثير إلى عمل المُستقبلات الضوئية العصوية

في الشبكية. وعند تحفيز تلك المستقبلات بالضوء في الطرف الأصفر والأحمر من الطيف، وليس بضوء الطرف الأزرق والأخضر، فإن إشارة تلك المستقبلات للمُخ تتفاعَل مع إشارة المستقبلات الضوئية المخروطية في الشبكية مما يؤدِّي إلى زيادة في السطوع الظاهِري.

(٥٧) إظلام الجليد

عندما تذوب بحيرة متجمِّدة في فصل الربيع، لماذا تتحوَّل أجزاء من الجليد إلى لون داكن؟

الجواب: أحد الأسباب هو أنه عند ذوبان الجليد يتحول السطح العلوي إلى بِنية هشة من بلورات عمودية في عرض قلم الرصاص يتخلَّلها الماء. في السابق كان الجليد ساطعًا نظرًا لانعكاس ضوء الشمس منه بالتَّساوي، أما الآن أصبح ضوء الشمس يَنعكِس مرات كثيرة بين البلورات، فيَزداد إظلامًا مع كل انعكاس. ونظرًا لقلة الضوء المنعكس لك يصبح الجليد أكثر إظلامًا.

ثمة سبب آخر، وهو أنه عندما تتجمَّد المياه سريعًا يندفع الهواء المُتحلِّل إلى الفقاعات المحصورة في الجليد. ونظرًا لأن معدل التجمُّد يكون عادةً أسرع قرب سطح الماء، فإن الطبقة العلوية من الجليد تحتوي على الكثير من الفقاعات الحبيسة. وكل فقاعة من الفقاعات تُشتِّت ضوء الشمس وتمنح الجليد مظهرًا أبيض ساطعًا. وفي فصل الربيع تذوب أجزاء من طبقة الجليد العلوية فتكشف طبقات الجليد السُّفلية المحتوية على عدد أقل من الفقاعات الحبيسة. ولذلك، فإن أجزاء الطبقة السُّفلية المكشوفة تكون أكثر إظلامًا من أجزاء الطبقة العُلوية المُتبقية.

(٥٨) السحب الساطعة والسحب القاتمة

لماذا معظم السُّحب بيضاء وساطعة؟ لماذا بعض السحب قاتمة؟ لماذا حوافُّ بعض السحب القاتمة ساطعةٌ (سحابة ذات «بطانة فضية» مثلما يقول القول المأثور)؟

الجواب: السُّحب بيضاء لثلاثة أسباب: (١) تُشتِّت قطرات الماء الألوان المُختلفة في ضوء الشمس الأبيض بالتساوي تمامًا. (٢) تمتصُّ السحب قدرًا قليلًا من الضوء ومِن ثَمَّ لا تتلوَّن من الامتصاص. (٣) تُشتِّت السحب ضوء الشمس مرات عديدة قبل أن يتَّجه نحوك. أي مجموعة سحب صغيرة تَمتلِك تلك الصفات الثلاث ستكون بيضاء في ضوء الشمس. وقد تبدو السحابة سوداء مقارنة بمُحيطها أو لأنها سميكة على نحوٍ يَحول

دون اختراق قدر كبير من الضوء لها. والسحابة القاتمة، بل ربما السوداء كما تبدو من الأرض، ستكون بيضاء وساطعة إذا شُوهدت من على متن طائرة. ومن هذا المنظور، ستكون السحب القاتمة فقط هي تلك التي لا يُنيرها ضوء الشمس المباشر.

تشتُّت قطرات الماء في السحابة الضوء في اتجاه الأمام تشتيتًا قويًّا، بينما يكون تَشتيت الضوء في أي اتجاه آخر أضعف. ومِن ثَمَّ فإذا كانت السَّحابة القاتمة قريبة من الشمس من منظورك، فإن القطرات على حافة هذه السحابة سوف تُشتِّت الضوء بقوة في اتجاهك. وعلى الرغم من أن داخل السحابة قاتم من منظورك، فإن هذا التشتيت القوي من الحافة الرقيقة سيجعل الحافة ساطعة نسبيًّا. وإذا لم تكن السحابة قريبة من الشمس، فستَفتقر الحافة إلى هذا التشتيت القوي للضوء في اتجاهك ولن ترى حافة ساطعة.

(٥٩) السحب المضيئة ليلًا

في المناطق القريبة من دائرة العرض ٥٠ تظهر عادةً سُحُب غائمة فضِّية ضاربة إلى الزرقة بعد فترة من غروب الشمس، لا سيما أثناء الصيف في الجزر البريطانية والدول الإسكندنافية. فما سبب هذه السحب التي يُطلق عليها «السحب المضيئة ليلًا»؟ لماذا تُرى فقط بعد فترة من الغروب، ولماذا تتخذ أحيانًا مظهرًا مَوجيًّا؟ ولماذا ظهرت لأول مرة عام ١٨٨٥؟ ولماذا زادَ سطوعها وعدد مرات ظهورها في العموم (لكن ليس دائمًا) منذ ذلك الحين؟

الجواب: تتكوَّن السُّحب عند ارتفاعات عالية (حوالي ٨٠ كيلومترًا) في جزء من الغلاف الجوي يُعرَف باسم «الميزوسفير». ومِن ثَمَّ يُطلَق عليها أحيانًا «سحب الميزوسفير». ونظرًا لوقوعها على ارتفاعات عالية، فإنها تظلُّ مضيئة بضوء الشمس حتى عندما يكون الظلام قد غشيك منذ ساعة أو ما يَقرُب من ذلك. وعلى الأرجح تتكوَّن هذه السحب من أجزاء صغيرة من التراب الذي قد يأتي من المذنَّبات وزخَّات الشهب والبراكين (في بعض الأحيان). وهذه السُّحب رقيقة للغاية على نحو يَحول دون رؤيتها في النهار أو أثناء الغروب. وقد يكون السبب في مظهرها الموجي هو «موجات الكثافة» (وهي تَذبذُبات شبه مَوجية في الضغط ودرجة الحرارة، يُطلَق عليها غالبًا «موجات الجاذبية») التي تَنتقِل عبْر السحب.

ومن الواضح أن أول ظهور للسحب المضيئة كان بسبب انفجار بركان كراكاتوا عام ١٨٨٥ بالقُرب من جاوة. وأطلق هذا الانفجار الهائل كلًّا من الأتربة والماء لارتفاعات عالية. وعلى ارتفاع ٨٠ كيلومترًا تقريبًا تجمَّع الماء على التراب البركاني (وربما أيضًا على

التراب المُذنَّبي والشُّهبي) ليُشكِّل جزيئات صغيرة (أصغر من الميكرومتر) كوَّنت أول سحب مضيئة مُعلَن عنها. ويعود السبب في الزيادة العامة في عدد السحب المضيئة وسطوعها منذ عام ١٨٨٥ إلى زيادة إنتاج غاز الميثان بفعل الصناعة وحقول الأرز ومدافن القمامة والغازات التي تُطلِقها الماشية. يَصعد غاز الميثان إلى الطبقة العليا من الغلاف الجوي ويتعرض لتغيُّرات ويسفر عن زيادة جزيئات الماء وأجزاء الجليد في السحب المضيئة ليلًا.

(٦٠) أنت في المرآة

إليك سؤالًا شائعًا عن الصور في المرآة المسطَّحة: لماذا تظهر صورتك معكوسة إلى اليسار واليمين ولا تظهر مقلوبة من أعلى وأسفل؟

افترض أن قمة المرآة المسطَّحة مُتوافِقة مع قمة رأسك؟ فما طول المرآة اللازم لترى قدمَيك فيها؟ هل يَعتمد الجواب على مسافة وقوفِك من المرآة؟ هل إذا تحرَّكت بعيدًا عن مرآة مسطَّحة فسترى فيها في هذه الحالة قدرًا أكبر من جسمك أم قدرًا أقل؟

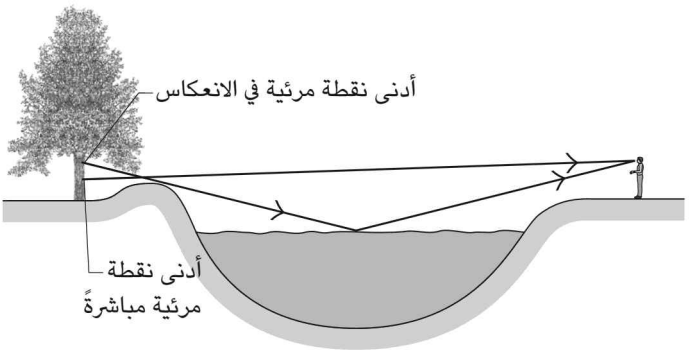
الجواب: صُورتك في مرآة مسطَّحة هي انعكاس من الأمام للخَلف وليست انعكاسًا من اليسار لليمين. لاحظ على سبيل المثال أن كل ما هو على يسارك يظلُّ على يسارك في الانعكاس. ويحدث الارتباك إذا أدرت نفسك ذهنيًّا حول محور رأسي إلى أن تصبح محاذيًا لصورتك في المرآة. وما ستُطلِق عليها في هذه الحالة يدك اليمنى ستكون في الواقع صورة يَدِكَ اليُسرى. رغم ذلك، فإن المرآة لا تقوم بهذا الدوران. ولترى ذلك، التفِت إلى اليمين بحيث تَقترب ذراعك اليسرى من المرآة، ولاحظ أن الدوران الذهني لم يَعُد له معنًى.

إذا كانت قمة المرآة مُحاذية لقمة رأسك فيجب أن تكون المرآة نصف طولك فقط لترى قدمَيك فيها. في هذه الحالة سيُمكنك رؤية رأسك من خلال انعكاسه في قمة المرآة، وسترى قدمَيك من خلال انعكاسهما في أسفل المرآة. ولا تتغيَّر هذه الانعكاسات إذا غيَّرت مسافة وقوفك من المرآة.

(٦١) انعكاسات الماء ومرآة المسرح

إذا نظرت إلى منظر طبيعي أثناء مُشاهَدة انعكاسه على المياه الهادئة، فهل سيكون الانعكاس صورة مرآتية للمَنظر الطبيعي؟

إذا نظرت إلى انعكاس السقف العُلوي أو وجهك في فنجان الشاي، فلماذا تكون الصورة مشوَّهة قُرب جدار الفِنجان؟ إذا أمسكت فنجان الشاي في ضوء الشمس عندما



شكل ٦-١٨: بند ٦-٦١: شعاع مباشر وشعاع منعكس يصلان إلى المشاهد عبْر مسارين مختلفين.

تكون الشمس مرتفعة في الأفق، فلماذا ترى صورتَين صغيرتَين للشمس في اتجاهات معينة للفنجان؟ لماذا تكون التشوُّهات قُرب جدار الفنجان مختلفة إذا كان الفنجان ممتلئًا لدرجة ارتفاع السائل فوق حافة الفنجان نسبيًّا؟

عند إمالة فنجان لبن نصف ممتلئ بحيث يغطي اللبن جزءًا فقط من قاع الفنجان، لماذا يكون هذا الجزء من القاع محاطًا بشريط شفاف؟

إذا نظر مُمثِّل (على المسرح أو في التليفزيون أو في السينما) في مرآة ورأيت وجه المُمثل في مُنتصِف المرآة، فماذا يرى المُمثل في المرآة؟

الجواب: يختلف المنظور المباشر والمنظور المنعكس في المرآة في العموم لأنَّ الأشياء الموجودة في المقدمة تحجب الأشياء الموجودة في الخلفية بطرق مختلفة نسبيًّا. والسبب في ذلك هو أنه لكي تصل إليك الأشعة المباشرة فإنها على الأرجح تكون شبه أفقية وتكون الأشعة المنعكسة متَّجهة في البداية إلى أسفل نحو الماء (انظر شكل ٦-١٨).

في فنجان الشاي يتقوَّس سطح السائل نسبيًّا قُرب جدار الفنجان لأن تماسُك الماء والتصاق الماء بالجدار يَسحب السائل أعلى الجدار. (يقال عادةً إنَّ هذا التسلُّق سببه «التوتر السطحي» للماء.) يتصرف سطح السائل كالمرآة فيُصدر صورًا مرآتية لكل ما هو فوقه. وفي حين يُعطي الجزء المسطح صورًا مشوهة، فإن الجزء المقوَّس للداخل (المقعر) يصغِّر الصور. وإذا حملت فنجان شاي في ضوء الشمس عندما تكون الشمس المُرتفعة

في السماء في ظهرك في العموم فسوف ترى صورتَين مُصغَّرتَين للشمس؛ إحداهما يُرسلها لعينَيك السطح المقوَّس عند جدار الفنجان، والأخرى يرسلها أولًا السطح المقوس إلى السطح المسطح ثم تنعكس إلى عينَيك.

إذا كان الفنجان مُمتلئًا فإن سطح السائل قرب حافة الفنجان يَبرز للخارج (يكون «محدبًا»). ومرة أخرى ستُصبح الصور مصغرة، شبيهة نسبيًّا بالصور التي نراها في مرايا المتاجر لمنع السرقة.

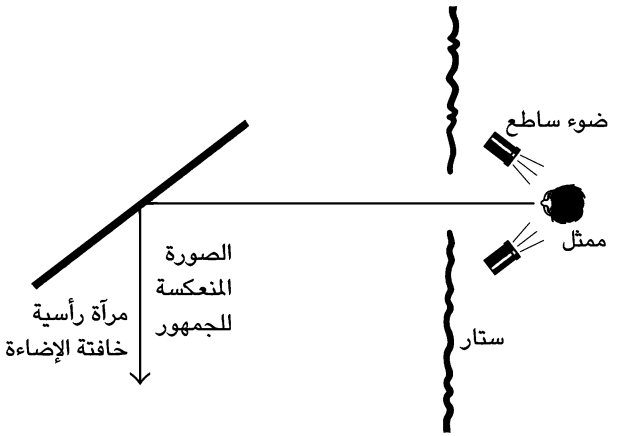
فنجان اللبن أبيض لأنَّ الضوء يخترق أولًا سطح اللبن ثم يتشتت لك من جزيئات اللبن (مثل الدهون). هذا الضوء المشتَّت يكون ساطعًا على نحو يكفي لحجب أي انعكاس مرآتي على سطح اللبن. أما منطقة الشريط الشفاف المحيطة باللبن في الفنجان المائل فتَحتوي على عدد من الجزيئات أقل نسبيًّا؛ ومِن ثمَّ يكون الضوء الذي تُشتِّته لك الجزيئات خافتًا. بالإضافة إلى ذلك، فإن السطح المقوَّس يُركز الضوء الذي يعكسه السطح. ونتيجة ذلك يكون الشريط ساطعًا لا ملامح له.

يُوَجَّه المُمثل إلى حمل مرآة ليَعكِس صورة وجهه للكاميرا أو للجمهور. إلا أن ما يراه المُمثل في المرآة ليس وجهه وإنما الكاميرا أو الجمهور. علاوة على ذلك، فقد ظهر هذا التضليل البصري والخطأ المقصود في العديد من اللوحات.

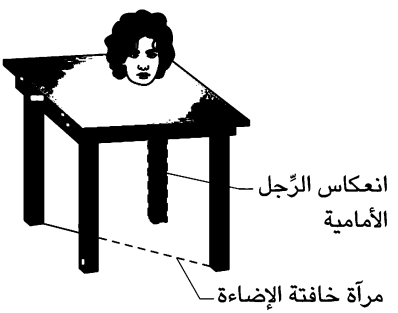
(٦٢) شبح بيبر والرأس الذي لا جسم له

عام ١٨٦٣ اخترع جون هنري بيبر، الأستاذ في معهد لندن للفنون التطبيقية، خدعة هي عبارة عن شبح يتحرَّك ويتحدَّث طافيًا في منتصف الهواء على المسرح. وفي العروض الجانبية في السيرك والمعارض كانت ثمة أنواع رائجة مُشابهة لهذه الخدعة. وفي هذه العروض كان من المُمكِن عندما يدخل المرء خيمة العرض ذات الإضاءة الخافتة أن يجد رأس شخص على الطاولة. وكان هذا الشخص يتحدث على الرغم من أن المكان الموجود أسفل الطاولة خاوٍ. فكيف تنفَّذ هذه الخدع؟

الجواب: شبح بيبر عبارة عن انعكاس صورة المُمثل على مرآة كبيرة أو لوح زجاجي على المسرح (انظر شكل ٦-١٩أ). فيقف المُمثل في جانب مخفي من المسرح بعيدًا عن منظور الجمهور المباشر، ويُسَلَّط عليه الضوء في حين يَبقى المسرح خافت الإضاءة. وعلى الرغم من أن الجمهور يَستطيع رؤية الصورة المُنعكِسة، فإنهم لا يستطيعون رؤية أي دليل على السطح العاكس.



(أ)



(ب)

شكل ٦-١٩: بند ٦-٦٢: ترتيبات من أجل (أ) شبح بيبر و(ب) الرأس الذي لا جسم له.

أما الرأس الذي لا جسم له فهو تحت الطاولة لكن مخفي عن الرؤية بفِعل مرآة. فعندما تنظر أسفل الطاولة ترى صورة مُنعكِسة لرِجل الطاولة الأمامية، لكن يَبدو أن هذه الصورة هي رِجل الجانب البعيد من الطاولة (انظر شكل ٦-١٩ب)، ومن هنا يأتي الوهم المتمثِّل في أن أسفل الطاولة خالٍ.

(٦٣) ميل نوافذ موظفي المراقبة الجوية

لماذا النَّوافذ المُحيطة بمنطقة عمل برج المُراقبة الجوي مائلة وحافاتها العلوية بارِزة للخارج؟ يميل الزجاج الأمامي للسيارة في الاتجاه المعاكس كي يَمنح السيارة الانسيابية. فكيف يُمكن أن يتداخل هذا التصميم مع رؤية قائد السيارة لما يراه أمامه؟

الجواب: إذا كانت نوافذ برج المراقبة عمودية فسوف يرى المُراقِبون الجويُّون انعكاسات أنفسهم ولوحات التحكُّم في النوافذ. ونظرًا لأنهم يَحتاجون إلى رؤية واضحة للمرور الجوي في المطار، لذلك فالنوافذ مائلة للخارج وتُرسل الانعكاسات غير المرغوب فيها إلى السقف المَدهون بالأسود لامتصاص الضوء.

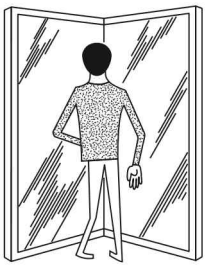
نظرًا إلى مَيل الزجاج الأمامي للسيارة إلى الداخل، فإنَّ قائد السيارة يرى انعكاسًا للوحة عدادات السيارة فوق ما يراه أمامه. وإذا كانت لوحة العدادات، أو أي شيء عليها، ساطعًا فسيَجِد السائق صعوبة في رؤية المَركبات القاتمة القادمة.

(٦٤) الصور في مرآتَين أو ثلاث مرايا

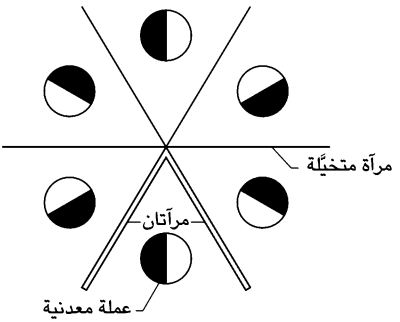
كم صورة لنفسك تراها أثناء الوقوف أمام مرآتَين مسطحتَين مُتجاورتَين بحيث تشكلان زاوية، مثل المرايا التي قد تَجدها في متجر الملابس (انظر شكل ٦-٢٠أ)؟ هل يعتمد عدد الصور على زاوية وقوفك ومكانك أمام المرايا؟ كم عدد الصور التي تراها عند إضافة مرآة ثالثة بحيث تُصبح محصورًا داخل مثلَّث من المرايا؟ ماذا ترى إذا وقفت بين مرآتَين متوازيتَين (أو شبه متوازيتَين) أثناء النظر إلى إحداهما؟

الجواب: لتحديد عدد الصور في المرآتَين، ارسم أولًا منظرًا علويًّا للمرآتَين ثم تحرك مرة في اتجاه عقارب الساعة ومرةً عكس اتجاه الساعة، وأضف مرايا متخيَّلة تُكوِّن الزاوية نفسها مع المرآتَين الحقيقيتَين، كما في الشكل ٦-٢٠ب. كل شريحة جديدة تُضيفها إلى هذه الدائرة ستضمُّ صورة إضافية. ويأتي الجزء الصعب عندما تُضيف الأجزاء البَعيدة إلى الرسم لأنها من المُمكن أن تتداخل. وهذه الأجزاء من المُمكن أن تضيف ما بين صورة إلى أربع صور اعتمادًا على مدى تداخل الصور وعلى مكان وقوفك بين المرايا.

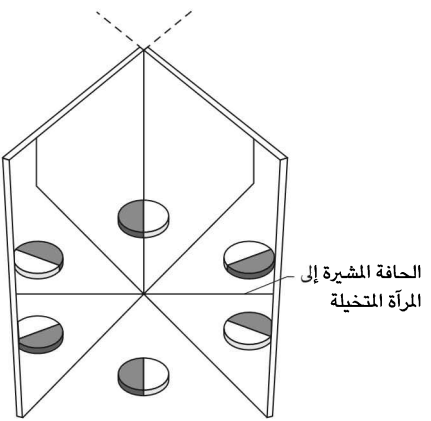
قم الآن بإحصاء عدد الصور في الرسم. هذا هو العدد الذي تَراه عندما تنظر في المرآتَين الحقيقيتَين (خمس صور في شكل ٦-٢٠جـ). بالإضافة إلى ذلك ستجد أجزاء شرائح الدائرة محاطة بصورتَي المرآتين نفسهما.



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل ٦-٢٠: بند ٦-٦٤: (أ) الوقوف بين المرآتَين. (ب) مخطط للصور. (جـ) الصور التي ستراها.

عند إضافة مرآة ثالثة لحَصرك في مثلَّث يُصبح عدد الصور لا نهائيًّا من الناحية النظرية؛ لأنه من المُمكِن حبس الضوء الصادر منك أو من الأشياء الأخرى داخل المثلث، فيَنعكِس لمرَّات كثيرة. أما من الناحية العملية، فإن عدد الصور محدود؛ لأنَّ الامتصاص والانعكاسات المشوَّهة تُضعف الصور تدريجيًّا وتجعلها غائمة، لا سيما في حالة المرايا الرخيصة التي تكون أسطحها العاكسة خلف الزجاج.

يَحدُث أمر مُشابه إذا وقفت بين مرآتَين متوازيتَين مع النظر في إحداهما. من الناحية النظرية سترى عددًا لا نهائيًّا من الصور لذراعك المَمدودة، مثلًا، مُتوازيةً مع المرايا. إلا أنك تستطيع رؤية صور عديدة لرأسك فقط إذا كانت المرايا مائلة نسبيًّا. هل يُمكِنك تفسير ذلك؟

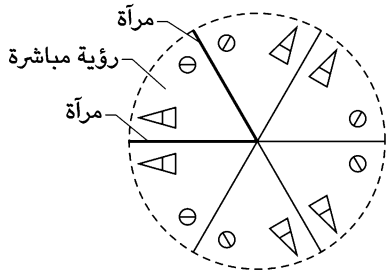
ثمَّة جهاز مُبتكَر يَستخدِم مرآةً مُوازية لمرآة نصف مطلية (عاكسة جزئيًّا)، ويوجد بين هاتَين المرآتَين مصابيح صغيرة. وعندما تنظر إلى الجهاز عبْر المرآة نصف المطلية سترى انعكاسات عديدة للمَصابيح مما يُوهم بوجود مجموعة من المصابيح تتراجع بعيدًا عنك إلى عمق كبير. وفي بعض الأحيان تكون المرآة الخلفية ذات جزء محدَّب بحيث يكون مركز مجموعة المرايا ممتلئًا أيضًا بصور المصابيح.

(٦٥) المشاكيل

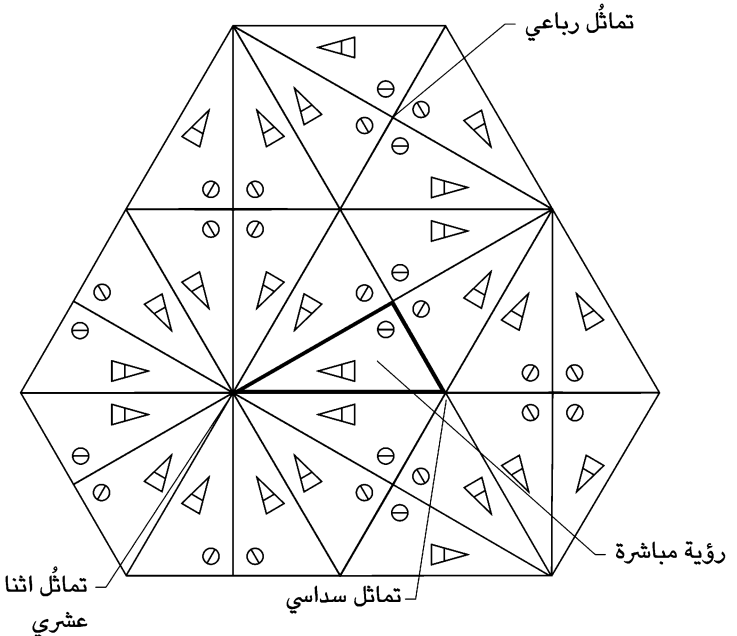
في المِشكال التقليدي الرخيص الثمن يُمكن أن ترى مجموعة واحدة من الصور المُرتَّبة على نحو مُتماثل حول نقطة مشتركة. فكيف تُنتِج المشاكيل الأغلى ثمنًا مجموعات كثيرة من الصور؟ كم عدد الأنواع الكثيرة المختلفة من الترتيبات المُتماثلة التي يُمكِن أن توجد داخل المِشكال الواحد؟ أي ترتيبات للمرايا تنتج صورًا لا تتغيَّر (تتبدَّل) عند تغيير زاوية النظر في الآلة؟

إذا كانت المرايا مائلة بحيث تكون الفتحة عند أحد الطرفين أصغر من الطرف الآخر، فماذا سترى داخل المشكال؟ كيف تُنتِج أنواع معيَّنة من المشاكيل ألوانًا في حالة عدم وجود أي شيء ملوَّن (كزجاج أو بلاستيك ملوَّن) عند الطرف الآخر؟ ما أنواع الصور التي تراها في أنبوب دائري لامع من الداخل؟

الجواب: مُعظم المشاكيل الرخيصة تَحتوي على مرآتَين تمتدان على طول الأنبوب والزاوية بينهما مقدارها ٦٠ درجة. يُنتِج هذا الترتيب خمس صور منعكسة متجمعة حول نقطة تلاقي المرآتين عند الطرف البَعيد من الأنبوب (انظر شكل ٦-٢١أ). يحتوي



(أ)



(ب)

شكل ٦-٢١: بند ٦-٦٥: (أ) الصور المرئية في مشكال ثنائي المرايا. (ب) جزء من مجال الصور المرئي في مشكال ثلاثي المرايا بزوايا ٩٠ درجة و٦٠ درجة و٣٠ درجة.

التجمُّع أيضًا على رؤية مباشِرة لما يوجد بين المرآتَين عند الطرف البعيد. ومِن ثَمَّ يوجد «تماثل سداسي» في العرض. وإذا تغيرت الزاوية، تغيَّر عدد الصور ونوعية التماثل (انظر البند السابق).

تحتوي المشاكيل الأفضل على ثلاث مرايا أو أربع. (وعلى الأرجح يكون الطلاء العاكس موضوعًا على السطح الأمامي لكل مرآة؛ لأنه عندما يكون الطلاء على السطح الخلفي سوف يَنعكِس الضوء من كلٍّ من الطلاء ومقدمة الزجاج. وتَمنح الانعكاسات الناتجة المُزاحة نسبيًّا صورًا ضبابية.) وبوجود ثلاث مرايا أو أربع ترى مجموعة كبيرة من الصور عند الطرف البعيد للمشكال. وإذا كوَّنت المرايا الثلاث مُثلثًا مُتساوي الأضلاع، فستكون الصور مرتبة في مجموعات ذات تماثُل سداسي. وإذا كونت المرايا أي نوع آخَر من المثلَّثات فسيتكون نوعان أو ثلاثة أنواع مختلفة من التماثل في المجموعات. ويوضِّح شكل ٦-٢١ب مثالًا على ذلك.

باستثناء الترتيبات الأربعة التالية للمرايا فما ستراه سيتغير مع تغير زاوية النظر في المشكال: (١) إذا كان المشكال مكوَّنًا من أربع مرايا فسوف تكون مثلثًا أو مربعًا عند الفتحة. وإذا كان المشكال يحتوي على ثلاث مرايا فسوف تُكوِّن (٢) مثلثًا متساوي الأضلاع، أو (٣) مثلثًا قائم الزاوية بزاويتَين ٦٠ درجة و٣٠ درجة، أو (٤) مثلثًا قائم الزاوية بزاويتَين تبلغ كلٌّ منهما ٤٥ درجة.

وإذا نظرت من الطرف الأوسع لِمشكال به مرايا مائلة، فسيُنتِج انعكاس الصور كرة جيوديسية تبدو طافية في فضاءٍ خالٍ. وإذا نظرت من الطرف الأضيق فسيَبدو كما لو كنت داخل الكرة الجيوديسية.

يمكن أن تنتج الألوان التي تراها داخل المشكال من قِطَع بلاستيكية عديمة اللون مطوية بين مرشحي استقطاب.

وإذا نظرت إلى مصدر ضوء نقطي عبْر أنبوب دائري لامع من الداخل فسوف ترى سلسلة من الحلقات الضيقة.

(٦٦) متاهة المرايا

كانت قاعة المرايا الموجودة في لوسرن بسويسرا متاهة مرايا معقَّدة، سرعان ما كنت أتوه فيها. كانت أرضيتها مكوَّنة من مثلثات متساوية الأضلاع. وكان مثبتًا على حافات بعض المثلثات مرايا بالطول الطبيعي. وكنت عندما أقف عند أي مثلث من المثلثات أرى ستة

ممرات واضحة تمتدُّ بعيدًا عني، ومجموعة مختلطة من الصورة المنعكسة بين الممرات. فما الذي يخلق وهْم الممر؟ وماذا يوجد عند نهاية كل ممر؟ هل يستطيع أحد الأشخاص الاختباء مني في متاهة المرايا أم هل الحيز الداخلي كله مرئي من أي اتجاه في المتاهة؟

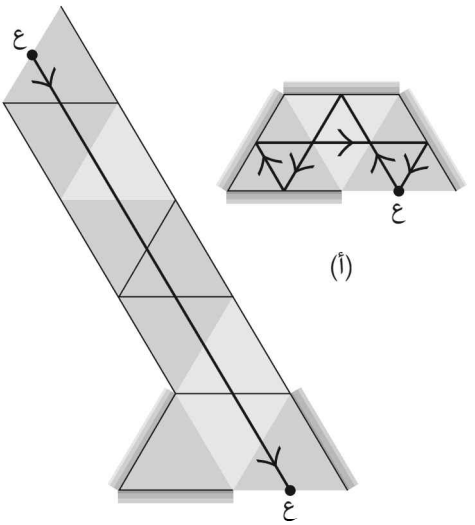
الجواب: تكوَّنت الممرات في قاعة المرايا بسبب أشعة الضوء المنعكسة بزوايا قياسها ٦٠ درجة من المرايا. يوضِّح شكل ٦-٢٢أ نسخة مبسطة من تلك المتاهة. فإذا وقفت عند النقطة «ع» فسوف يتركك شعاع الضوء ويَنعكِس أربع مرات داخل المتاهة ثم يعود إليك. وعندما تنظر في اتجاه الشعاع العائد سترى ممرًّا يَمتدُّ بعيدًا عنك (انظر شكل ٦-٢٢ب)، وستكون صورتك في نهاية الممر لأن شعاع الضوء صدر عنك. في هذه النسخة المبسَّطة لا يستطيع أحد الاختباء داخل المتاهة لأن كل جزء مثلث من الأرضية يظهر مرةً واحدة على الأقل في الممر. أما في متاهة أخرى أكثر تعقيدًا فقد يتمكَّن الشخص من الاختباء منك. على سبيل المثال، هل النقط «أ» أو «ب» أو «ج» مرئية في الممرات من النقطة «ع» في شكل ٦-٢٢ج؟

(٦٧) التصويب بالليزر في العروض

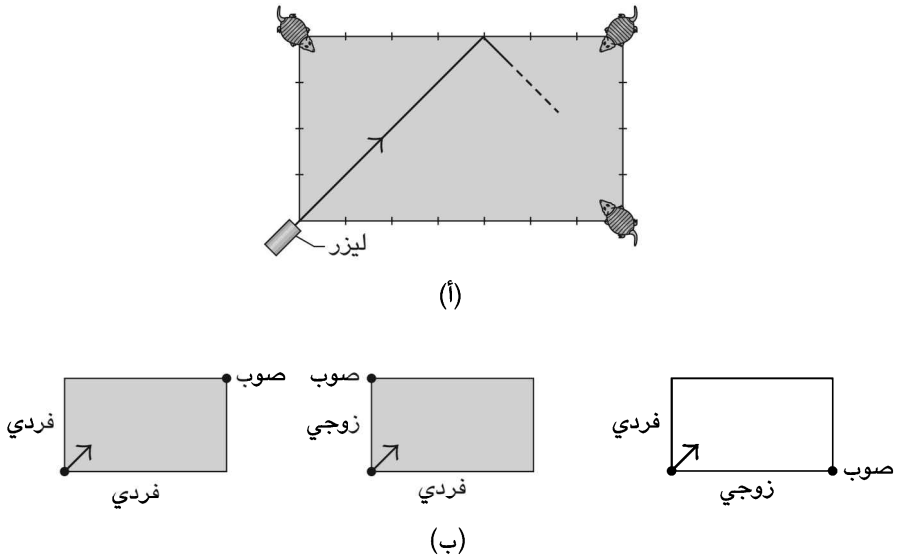
أثناء التجول بين عروض المهرجان والمرور على الألعاب التي تَعتمِد على المهارة والحظ وجدتَ لعبة جديدة اسمها «التصويب على الأهداف بالليزر». ونظرًا لافتتانك بالأمر دخلت العرض لتجد نفسك في زاوية غُرفة مستطيلة جدرانها مغطَّاة بمرايا عاكسة على نحو مثالي (انظر شكل ٦-٢٣أ). وعند هذا الركن يوجد ليزر قوي مثبَّت في مكانه أفقيًّا وبزاوية ٤٥ درجة نحو الجدران. وعند كل جدار آخر يَبتسِم لك الهدف المتمثل في حيوان مدرَّع مَصنوع من الصلصال.

يَشرح لك الحارس الواقف خلفك أن عليك إطلاق الليزر بعد أن تُخمِّن أولًا إذا ما كنت ستُصيب الهدف، وأي هدف ستصيبه. ويوضِّح لك أيضًا أن الغرفة مصمَّمة بدقة ليكون طولها ٧ وحدات وعرضها ٤ وحدات. ثم يغادر الحارس فجأة كما لو كان الركن الذي تقف فيه هو الهدف الحقيقي.

هل ستُصيب هدف الصلصال أم ستصيب نفسك أم سينعكس الضوء حول الغرفة إلى أن يمحوه الامتصاص البسيط عند كل انعكاس في النهاية؟ ماذا سيحدث إذا كانت أبعاد الغرفة ٧ وحدات و٣ وحدات أو ٨ وحدات و٣ وحدات؟ وفي النهاية تضغط على الزناد بشجاعة بينما تحاول تخيُّل الانعكاسات المتعدِّدة التي ستخلقها.



شكل ٦-٢٢: بند ٦-٦٦: (أ) منظر علوي لقاعة مرايا بسيطة. شعاع الضوء يتركك عند النقطة «ع» ويعود لك عبْر الانعكاسات. (ب) الممر الذي تراه. (جـ) قاعة مرايا أكبر قائمة على أرضية مكونة من مثلثات. الخطوط العريضة تُمثِّل الجدران المرآتية.

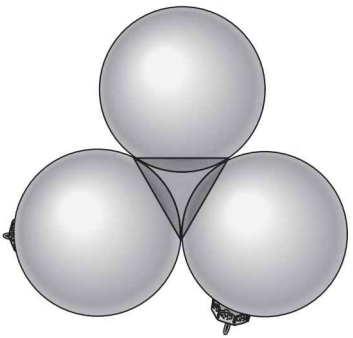


شكل ٦-٢٣: بند ٦-٦٧: (أ) منظور علوي لغرفة ذات جدران من المرايا. (ب) تحديد الركن الذي ستُصوِّب عليه.

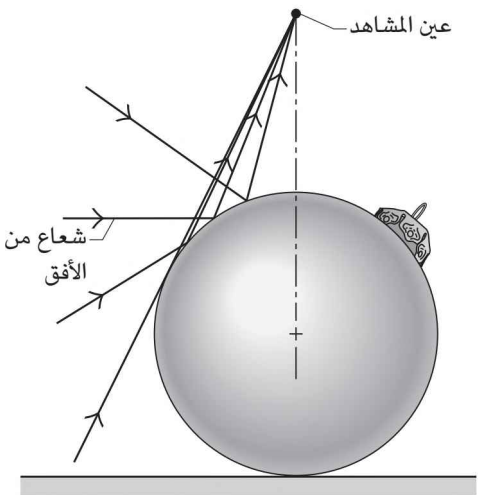
الجواب: ما دام طول وعرض الغرفة كلاهما رقم صحيح، فلن تصيب نفسك وكن متأكدًا من أنك ستُصيب هدف الصلصال. ولمعرفة الهدف الذي ستُصيبه يُمكنك تتبُّع الطلقة على مخطط للغرفة أو استخدام الطريقة التالية. إذا كان من المُمكِن اختصار نسبة الطول إلى العرض (على سبيل المثال يُمكن اختصار ٨ / ٤ إلى ٢ / ١) فافعل ذلك، ثم استعن بالنتائج الثلاثة المُمكنة المبيَّنة في شكل ٦-٢٣ب التي تُمثِّل فيه الأبعاد الفردية والزوجية للجوانب مفتاحَ الحل.

(٦٨) مثلثات قاتمة وسط الزخارف

ضع عن قرب مجموعة من الكرات اللامعة المزخرفة (مثل تلك التي تُوضع في شجرة الكريسماس) في طبقة واحدة على قماش أسود أو ورقة سوداء. عندما ستنظر إلى الأسفل على هذه المجموعة وخلفك ضوء ساطع سترى انعكاسات مشوهة لنفسك. ومن الغريب



(أ)



(ب)

شكل ٦-٢٤: بند ٦-٦٨: (أ) المثلث القائم المشاهَد في مجموعة الكرات العاكسة. (ب) انعكاس أشعة الضوء من الكرة إلى المشاهد.

أن الكرات ستبدو سداسية مع وجود مثلَّثات قاتمة بين كل مجموعة مكوَّنة من ثلاث كرات مُتجاوِرة (انظر شكل ٦-٢٤أ). وإذا أشرت إلى إحدى هذه الكرات، فستُشير صورتك

في كل الكرات الأخرى نحو الواحدة التي أشرت إليها. هل يمكنك تفسير هذه النتائج؟ يمكنك رؤية الانعكاسات على نحو أفضل باستخدام الكرات العاكسة الأكبر حجمًا التي تُباع كزخارف للحدائق.

الجواب: افترض أنك وضعتَ كرة عاكسة على مساحة واسعة، كالأرضية. عندما تَنظر لأسفل إلى الكرة سترى صورًا مشوَّهة لنفسك وكل ما يُحيط بك تقريبًا. و«الأفق» محدَّد بكل ما يُرسل شعاعًا شبه أفقي نحو الكرة (انظر شكل ٦-٢٤ب). توجد صورة الأفق فوق «خط استواء» الكرة. وترى الأرضية بين الأفق وخط الاستواء.

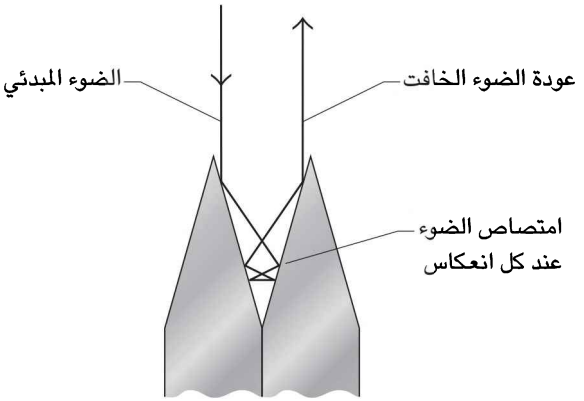
وإذا وضعت كرتَين عاكستَين مُتجاورتَين فسوف تعكس كلٌّ منهما الأشعة كما في شكل ٦-٢٤ب إلا أنَّ الأشعة القادمة من أسفل الأفق يُمكنها الآن أن تَنعكِس مرات عديدة قبل أن يستقبلها المراقب من أعلى. ونظرًا لامتصاص قدرٍ من الضوء عند كل نقطة انعكاس، فإن هذه الأشعة تكوِّن صورًا أكثر إعتامًا.

وإذا رتبت مجموعة مِن ثلاث كرات، فستكون مجموعة الصور أكثر تعقيدًا وستَحتوي على الكثير من الصور المُعتمة نظرًا لوجود العديد من الانعكاسات تحت الأفق. في أي كرة من الكرات يوجد الأفق على طول خطٍّ شبه مستقيم، وتراكب الخطوط المستقيمة في الكرات الثلاثة يُكوِّن مثلثًا. تتَّسم الصور الموجودة داخل المثلَّث بالإعتام بسبب الانعكاسات المتعدِّدة. ونظرًا لأن الكرات تَحجب على الأرجح الضوء المُحيط من الوصول إلى الأرضية المكشوفة بين الكرات، فحتى رؤية المشاهد المباشرة للأرضية داخل المثلث ستكون قاتمة.

لكي تَفهم لماذا صور إصبعك المُنعكِسة تُشير كلها إلى كرة واحدة، جرب أولًا الإشارة إلى اليمين أمام مرآة مسطَّحة واحدة. تُشير إصبعك وصورتها نحو نقطة مشتركة ناحية اليمين. ستجد النتيجة نفسها إذا وضعت بدلًا من المرآة كرةً عاكسة، باستثناء أن السطح العاكس مُقوَّس الآن. وأي كرة عاكسة أخرى مثل الموجودة في مجموعة الكرات سوف تُعطي أيضًا صورة تُشير في اتجاه إصبعك.

(٦٩) تحوُّل السطح اللامع إلى الأسود الحالك

تتَّسم شفرة الموسى المزدوج الحد العادي باللَّمَعان. أما إذا خزنت الكثير من الشفرات معًا ثم ضغطت على هذه المجموعة، فإن جانب المجموعة المرصوص فيه الجوانب الحادَّة سيُصبح أسود. فكيف يُمكن أن تصبح الأسطح اللامعة سوداء؟



شكل ٦-٢٥: بند ٦-٦٩: شعاع ضوء يَنعكِس بين حافتَين مائلتَين لشفرتَي موسيَين.

من الواضح أن الكرتون الأسود أكثر سوادًا من الكرتون الأبيض. هل يُمكنك التوصل إلى طريقة يمكن من خلالها أن يصبح الكرتون الأبيض أكثر سوادًا من الكرتون الأسود عند إضاءة كلٍّ منهما بالمصباح نفسه؟

الجواب: عندما يدخل شعاع الضوء الفراغ الموجود بين الحافات المائلة للشفرات المُتجاوِرة، فإنه يَنعكس مرات عديدة قبل الخروج (انظر الشكل ٦-٢٥). وحوالي ٤٥ في المائة من الضوء الساقط يُمتَص عند كل انعكاس؛ ومن ثَمَّ فإن الضوء الذي يُغادر الشفرات في النهاية ينخفض في شدَّته ليصبح فقط نسبة مئوية قليلة من شدته المبدئية، مما يَمنح المظهر القاتم.

لكي تَجعل الكرتون الأبيض أكثر سوادًا من الكرتون الأسود اصنَع صندوقًا من الكرتون الأبيض، واجعل «خارج الصندوق» قاتمًا بحبرٍ أسود غير لامع، واثقُب ثقبًا في أحد جوانب الصندوق جاعلًا قُطر الثُّقب أقل من ١٠ في المائة من طول حافة الصندوق. ثم وجِّه مصباحًا نحو الجانب المثقوب. سوف يَتشتَّت الضوء الذي يدخل هذا الثقب مراتٍ عديدة داخل الصندوق. عند كل نقطةِ تَشتُّت لن يمتص الكرتون الأبيض إلا قدرًا قليلًا من الضوء، لكن نظرًا للتشتُّت مراتٍ عديدة فإن الضوء الذي يَخرج في النهاية من الثقب يكون خافتًا بشكلٍ كبير.

على النقيض من ذلك، فإن الضوء الذي يُنير خارج الصندوق المطلي بالحبر يمتصُّه الحبر امتصاصًا كبيرًا، لكن نظرًا لتشتت هذا الضوء لمرةٍ واحدة فقط فإنك تعترض من الضوء الآتي من خارج الصندوق قدرًا أكبر من ذلك الآتي من داخل الثقب. وهكذا يكون الثقب (الذي ينقل الضوء من الحيز الداخلي الأبيض) أكثر قتامةً من الكرتون الأسود.

(٧٠) العواكس المرجعية

«العاكس المرجعي» هو وسيلة تعكس شعاع الضوء إلى مصدره بصرف النظر عن زاوية دخول الضوء إلى الوسيلة. عادةً ما تُخاط رقائق من العواكس المرجعية الدقيقة في ملابس العدَّائين لزيادة قابلية رؤيتهم ليلًا؛ فعندما تلمع مصابيح السيارة الأمامية على العواكس المرجعية يُرسَل الضوء مرة أخرى إلى قائد السيارة بحيث يلاحظ العدَّاء ويتجنبَّه. فلماذا إذن لا ترى صورة مرآوية (أو حتى صورة مشوهة) لوجهك عندما تنظر إلى رقاقة عواكس مرجعية قريبة منك؟

في بعض الأحيان تُثبَّت العواكس المرجعية على الطرق لتُصبح الحارات المرورية واضحة عندما يكون الطريق مظلمًا (إما بسبب الأمطار أو بسبب ضعف الإضاءة). وتُضاف رقاقات العواكس المرجعية أيضًا إلى العديد من إشارات المرور بحيث تصبح الإشارة أكثر وضوحًا في الليل. وقد ترى أدلة على وجود هذه العواكس المرجعية أثناء الطيران نهارًا؛ فعندما تكون على مستوًى مُنخفِض انظر بالقرب من ظل الطائرة. في بعض الأحيان ستجد وميضَ ضوء خاطفًا عندما ينعكس ضوء الشمس في الاتجاه العام للشمس بفعل العواكس المرجعية الموجودة على الإشارات. (وسترى على الأرجح ومضات ضوء أخرى بعيدة عن نقطة ظل الطائرة، وتلك الومضات تعود إلى انعكاسات مرآوية لضوء الشمس من أسطح معدنية أو زجاجية أو من المسطحات المائية.)

تتمتع رقاقات العواكس المرجعية بقدرة مدهشة على إزالة التشوُّه من شعاع الضوء. على سبيل المثال، يُمكن عرض شريحة فوتوغرافية من خلال طبقة بلاستيكية مموجة (تشتت الصورة من على الشريحة) ومِن ثَمَّ عبْر الرقاقات. وعندما يعود الضوء عبْر البلاستيك وإلى شاشة المشاهَدة، يكون التشوُّه الذي نشأ عند المرور الأول قد أزيل إلى حدٍّ كبير وأصبحت الصورة شبه كاملة.

فكيف يعمل العاكس المرجعي؟ وكيف يُزيل التشوُّه؟

الجواب: العواكس المَرجعية لها نوعان رئيسيان هما العواكس الكروية والركنية. عندما يدخل شعاع الضوء كرةً فإنه يَنحني ويتجه نحو مؤخرة الكرة حيث ينعكس ثم يخرج من الكرة متوجهًا مرة أخرى إلى مصدر الضوء. وعندما يدخل شعاع الضوء أحد الأركان (مثل ركن أحد المكعَّبات أو ثنية في رقاقة بلاستيكية)، فإنه ينعكس من الواجهتَين الداخليتَين مرتَين أو ثلاث مرات ثم يُغادر الركن متوجهًا مرةً أخرى نحو مصدر الضوء. وإذا كانت العواكس المَرجعية من أي من النوعين مثالية، فإن الضوء سوف يعود مباشرةً إلى مصدر الضوء. أما العاكس المَرجعي للعدَّاء فهو غير مثالي، فهو يَنشر الضوء العائد نسبيًّا بحيث يرى قائد السيارة بعضًا منه.

إذا أمسكت شريطًا من هذه العواكس المرجعية أمام وجهك فلن ترى صورة وجهك. والسبب في ذلك أن الأشعة الوحيدة التي تراها عيناك هي فقط تلك التي غادرتها. فالأشعة التي غادرت أنفك عادت إلى أنفك، لكنك لا ترى بأنفك.

تستطيع العواكس المرجعية إزالة التشوُّه لأنها تعيد الضوء عبْر منطقة التشوه نفسها. على سبيل المثال، إذا انحرف شعاع الضوء يسارًا أثناء مروره الأول، فإن الانحراف ينعكس أثناء المرور الثاني ومِن ثَمَّ يصبح الشعاع في النهاية موازيًا لاتجاهه الأولي. ويحدث عكس التشوه حتى إذا كان التشوه نتيجة لهب مُضطرب لأن الضوء يعود إلى اللهب أولًا قبل أن يتسنى للاضطراب وقت للتغير.

قصة قصيرة

(٧١) الهبوط في الظلام خلف خطوط العدو

في أثناء الحرب العالمية الثانية واجه مكتب الخدمات الاستراتيجية البريطاني مهمَّة صعبة تمثلت في إنزال طائرات صغيرة خلف خطوط العدو في الظلام. ولفعل ذلك دون أن يعلم العدو أزالوا مساحة من الأرض لتكون مدرَّج طائرات قصيرًا وأحاطوها بعواكس مرجعية صغيرة مكوَّنة من ثلاث مرايا مُثبتة معًا لتكون ركن مكعَّب. «كان الطيار يرتدي مصباحًا كشافًا في وسط جبهته، وكان الضوء الصادر عنه يكاد يكون غير مرئي من الأرض لكن انعكاسات المرايا كانت كافية لتُحدد له منطقة الهبوط. وعند مغادرة الطائرة كان الطاقم الأرضي يُحدد مكان المرايا باستخدام الكشافات ويَمحون آثار المدرَّج المؤقت» (خطاب، إتش بي كلاي، ١٩٨٦).

(٧٢) مرآة الطريق الواحد

كيف يُمكن للمرآة أن تنقل الضوء في اتجاه واحد فقط؟

الجواب: مرآة الطريق الواحد تُشبه أي مرآة عادية فيما عدا أنها تفتقر إلى الظهارة (مثل لوح كرتوني) وتُسرِّب قدرًا قليلًا من الضوء من جانب لآخر. ويعتمد وهْمُ مرور الضوء في اتجاه واحد فقط على أن الغرفة في جانب المرآة تكون مضيئة على نحو ساطع بينما تكون مُعتِمة على الجانب الآخر. وفي الغرفة الساطعة تكون الانعكاسات من المرآة شديدة السطوع لدرجة أنها تُخفي الضوء الخافت القادم عبْر المرآة من الغُرفة المُعتِمة. وفي الغرفة المُعتمة تكون انعكاسات الغرفة شديدة الخفوت لدرجةٍ تحول دون رؤيتها في مقابل الضوء الساطع القادم عبْر المرآة من الغرفة الساطعة.

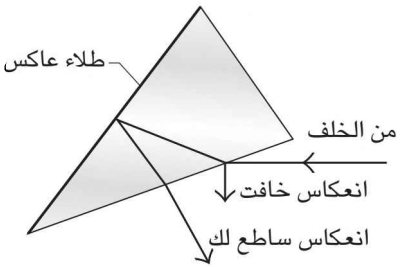
(٧٣) مرآة الرؤية الخلفية

كيف تَحصُل على صور ساطعة من مرآة الرؤية الخلفية للسيارة أثناء النهار وتَحصل فقط على صور خافتة (ومِن ثَمَّ لا تُسبِّب بهر البصر) أثناء الليل؟

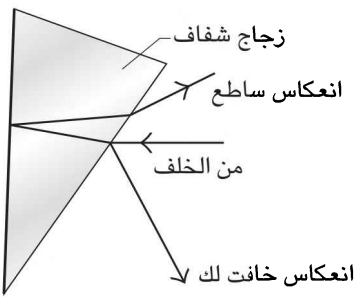
الجواب: مرآة الرؤية الخلفية عبارة عن إسفين زجاجي مَطلي بطِلاء عاكس على الجانب المقابل لك. عند ضبط المرآة للرؤية أثناء النهار، تدخل أشعة الضوء القادمة من خلف السيارة إلى الإسفين وتَنعكِس لك من ذلك الطلاء، فتَمنحك صورة ساطعة للمَشهد خلف السيارة (انظر شكل ٦-٢٦أ). ولإعادة ضبط المرآة للرؤية الليلية فإنك تَطوي قاعدة الإسفين نحو مؤخِّرة السيارة لتَدفع تلك الصور التي يعكسها الطلاء إلى السقف وتسمح للضوء المنعكس من السطح الأمامي للإسفين بالوصول إلى عينَيك (انظر شكل ٦-٢٦ب). وعلى الرغم من أن صور السطح الأمامي خافتة، فإنها ساطعة على نحو يُمكِّن عينَيك المتكيفة مع الظلام من رؤيتها.

(٧٤) مرآة الرؤية الجانبية

الغرض من مرآة الرؤية الجانبية هو السماح لك برؤية السيارة القادمة من خلفك في الحارة المرورية المُجاوِرة. إلا أن وضعيات كثيرة للمرآة المسطَّحة تُخلِّف «بقعة عمياء»، وهي منطقة تكون فيها السيارة القادمة من الخلف شديدة القُرب على نحوٍ يَحول دون



(أ)

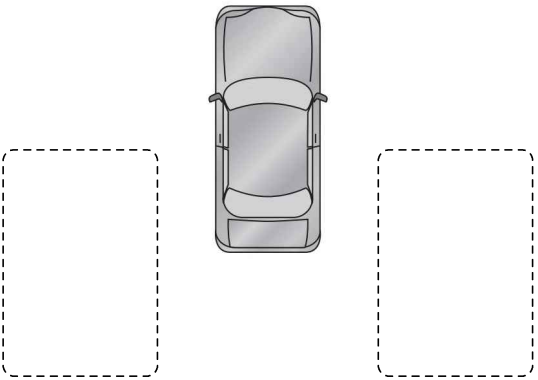


(ب)

شكل ٦-٢٦: بند ٦-٧٣: مرآة رؤية خلفية (أ) للرؤية النهارية باستخدام الانعكاس الساطع من الطلاء العاكس الخلفي و(ب) للرؤية الليلية باستخدام انعكاس السطح الأمامي الخافت.

ظهورها في المرآة (انظر شكل ٦-٢٧). ويكمن الخطر في أنك من المُمكن أن تبدل الحارات المرورية من دون أن تنتبه لتلك السيارة التي تمرُّ بجوارك ببطء. لتقليل البقعة العمياء، هل يجب أن تكون المرآة بالقُرب منك أم بالقرب من مقدمة السيارة؟

الجواب: يجب أن توجد المرآة بالقرب من مقدمة السيارة. ومِن ثَمَّ فإن صورة السيارة المارَّة ستَبقى دائمًا في المرآة إلى أن تُصبح مقدمة السيارة مرئية في رؤيتك المحيطية. أما في حالة وجود المرآة في مكانها الطبيعي بجوار قائد السيارة فمن الممكن أن تختفي السيارة المارة ببطء لثوانٍ عديدة عن عين قائد السيارة.



شكل ٦-٢٧: بند ٦-٧٤: بقعة عمياء، محددة تقريبيًّا، في مرآة رؤية جانبية. عادة ما تختلف البُقَع العمياء على جانبي السيارة.

(٧٥) لوحة «حانة في فولي بيرجير»

سحرت لوحة «حانة في فولي بيرجير» للفنان إدوارد مانيه مُشاهِديها منذ رُسمت في ١٨٨٢. يُوضِّح شكل ٦-٢٨ خطوطها الرئيسة. في المقدمة، تظهر اللوحة عاملةً في الحانة، تَفضح عيناها إرهاقها؛ إذ تقف خلف منضدتها. وفي مرآة كبيرة خلفها، نرى انعكاسات لها، ولزبون، ولزجاجات عدة على المنضدة، وللجمع الموجودين في المكان. ينبع جزء من جاذبية اللوحة مما فعله مانيه فيها من تلاعُب متقن بالواقع، تلاعب يضفي على المشهد شعورًا غريبًا، حتى قبل أن تلاحظ «الخطأ». فهل يمكنك إيجاده؟

الجواب: إن الصور التي تعكسها المرآة أشكالها صحيحة، لكن مواضعها خاطئة. وحينما تنظر إلى اللوحة للوَهلة الأولى، فقد تستشعر ذلك، حتى قبل أن تُدرك السبب. في الحقيقة، تقع الزجاجات التي إلى يسار اللوحة، بالقرب من مؤخرة المنضدة، أما في المرآة فتقع بالقُرب من مقدمتها. كما يجب أن تكون صورة المرأة خلفها، لا منزاحة إلى اليمين. ويتمثَّل الأمر الأكثر إرباكًا في أن المرأة تنظر إليك مباشرة، بينما في المرآة، هناك رجل أمامها مُباشَرة؛ وعليه فلا بد أن هذا الرجل هو أنت. لكن إذا كان الأمر كذلك، فيجب ألَّا تكون صورتك منزاحة إلى اليمين في اللوحة؛ ففي الحقيقة، لا بد أن يَحجب جسم المرأة رؤيتك لصورتك.

شكل ٦-٢٨: بند ٦-٧٥: رسم تخطيطي للوحة «حانة في فولي بيرجير» لإدوارد مانيه.

(٧٦) فن عصر النهضة والإسقاط البصري

يَعتقد بعض الرسامين والمؤرخين المعاصرين أن رسَّامي القرنين الخامس عشر والسادس عشر ربما يكونون قد استخدموا مرآة منحنية لإسقاط الصور على لوحات الرسم. إذا كان الأمر كذلك، فلربما وضَع هؤلاء الرسامون الخطوط الرئيسة وتفاصيل الصور ببساطة على اللوحة، ثم ملئوها بالألوان، فيما يُشبه عملية الرسم بالأرقام. كيف يمكننا التأكد مما إذا كانت مثل هذه التقنية قد استُخدمت؟

الجواب: إنَّ الواقعية التصويرية للوحات بعينها تَنتمي إلى عصر النهضة، مثل لوحة لورنزو لوتو «زوج وزوجة»، تُشير إلى أن مرايا مقعَّرة قد استُخدمت لإسقاط مشاهد على اللوحات. فلربما أقام فنان مرآة كهذه أمام المشهد المراد رسمه، وأقام حامل لوحته بمواجهة المرآة، منزاحًا إلى أحد الجانبَين قليلًا. وبعد ذلك، ضبط المرآة بحيث تسقط صورة المشهد (المعكوسة) الصادِرة عن المرآة، على لوحة الرسم. في المعتاد، يجب على الرسام أن يعمل على وضْع الصور المرسومة في مناظيرها المناسبة، ليُضفي على اللوحة مسحةً من الواقعية المجسَّمة، كما لو كان الرائي يرى العناصر الأصلية، لا مجرد تمثيل مُصمت لها.

ومع ذلك، إذا أراد رسام أن يُسقِط المشهد على اللوحة ويشفَّ الخطوط الرئيسة للأجسام، فسيجري دمج المنظور تلقائيًّا.

يُبين تحليل اللوحات احتواءها في الحقيقة على أخطاء عدة في المنظور، مما يَدعم بشدة الرأي المعارض لفرضية استخدام المرايا (أو أي أدوات بصرية أخرى). على سبيل المثال، فإن أي خطين متوازيَين ممتدَّين من الرسام يجب أن يلتقيا في نقطة واحدة، تُسمى «نقطة التلاشي». يُفترض بالرسام الذي يسعى إلى تحقيق الواقعية في لوحته أن يَضع نقطة كهذه، وأن يرسم بعناية جميع خطوط المنظور بناءً عليها. في اللوحات التي جرى تحليلها، فإن خطوط المنظور في أجزاء مختلفة من اللوحة كانت موجَّهة إلى نقاط تلاشٍ مُختلفة، مما يُبيِّن أنها رُسمت رسمًا حرًّا، بدلًا من شفِّها ببساطة من صورة مُسقطَة.

(٧٧) فن الأنامورفيك

بعض اللوحات والرسومات التي أُنتجَت في القرون من الخامس عشر وحتى الثامن عشر، كان مشوهًا عن عمد، ما جعل عناصرها لا يُمكن فهمها على الفور، ربما للتمويه على موقف سياسي مُعارِض لأحد الملوك. في بعض القِطَع، يجب أن تنظر إلى اللوحة الفنية من إحدى الحافات قبل أن تستطيع إدراك العناصر المرسومة فيها. وفي قِطَع أخرى، يجب أن ترى صورة مُنعكِسة من اللوحة لتفهم العناصر. فمثلًا، قد يتوجَّب عليك أن تنظر إلى الانعكاس الذي يُوفِّره مخروط أو أسطوانة لامعة موضوعة في منتصف اللوحة. لماذا تكون العناصر مُمكنة الفهم بطرق المشاهدة الغريبة هذه وليس بالطريقة العادية؟

الجواب: إذا نظرت إلى لوحة أنامورفيك بالطريقة العادية، فإن عناصرها تصنع صورًا على شبكية عينك تكون أكثر تشوهًا من أن تُفهَم. ومع ذلك، عندما تنظر إلى اللوحة بالطريقة الخاصة التي قصدها الفنان، تكون صور العناصر المُتكوِّنة على الشبكية قريبة بما فيه الكفاية من أشكالها الطبيعية، بحيث يُمكنك أن تفهمها.

على سبيل المثال، لنفترض أن فنانًا رسم وجه قط، بينما يرى عمله من خلال عكسه عن مخروطٍ لامعٍ موضوعٍ في منتصف لوحة الرسم. حين يُزال المخروط، لا يُمكن تمييز الوجه بسبب المنظور المشوه. (العينان متباعدتان كثيرًا؛ الذقن عريض ومُحيط باللوحة؛ والتكوين لا يُشبه القط في شيء بكل تأكيد.) ولكن عندما تعيد المخروط إلى مكانه وتنظر إلى انعكاس اللوحة عن المخروط، يزول التشوُّه وتُميِّز الصورة المتكوِّنة على شبكيتك، باعتبارها وجه قط.

(٧٨) مصابيح الشارع الساطعة والخافتة

عندما يُضاء مصباحا شارع متماثلان (من النوع التقليدي المكشوف، المسبِّب للتلوث الضوئي)، أين تكون نقطتا السطوع العُظمى والصُّغرى على امتداد الرصيف الأوسط؟ إذا أضيء صف مُستقيم من المصابيح المُتماثِلة الواقعة على مسافات متساوية، أين تكون نقطتا السطوع العُظمى والصغرى على امتداد الصف؟ هل هناك ترتيبات أخرى للمصابيح (في الصف) ستزيد السطوع في النقاط الأكثر خفوتًا؟

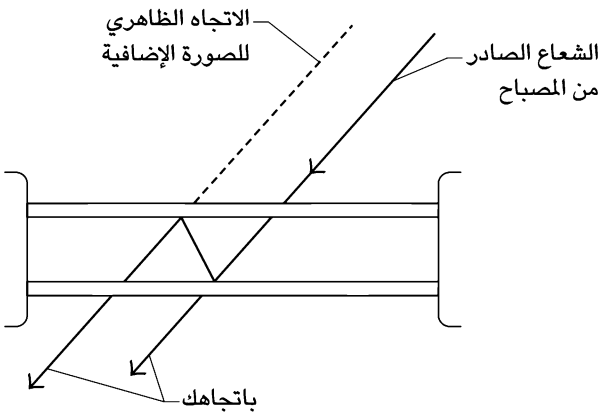
الجواب: في حالة وجود مِصباحين فقط، فإن نقطة الإضاءة الصُّغرى تقع في منتصف المسافة بينهما، وتقع نقاط الإضاءة العُظمى على مسافة من قاعدة المصباح تَعتمد على ارتفاع المصباحين والبُعد بينهما. وفي صف طويل من المصابيح الواقعة على مسافات مُتساوية، فإن نقطة الإضاءة الصُّغرى تقع كذلك في منتصف المسافة بين المصابيح، لكن نقاط الإضاءة العظمى تقع الآن عند قاعدة المصابيح. لتكن «م» هي المسافة بين المصابيح في هذه الحالة. يُمكن أن يزيد السطوع في النقاط الأكثر خفوتًا إذا أعيد ترتيب المصابيح في أزواج تفصل بينها مسافة قدرها «م/٢» بين المصباحين، ومسافة قدرها «٢م» بين مراكز الأزواج. في الحقيقة، قد تتمكَّن من إيجاد ترتيب مشابه يُعطي إضاءة منتظمة تقريبًا على امتداد الصف.

(٧٩) صور متعدِّدة من نوافذ مزدوجة

إذا نظرت في أثناء الليل إلى مصدر للضوء، عبْر نافذة مكونة من لوحين زجاجيَّين، فقد ترى صورًا متعدِّدة للشيء. إذا استخدمت مثل هذه النافذة في برج مراقبة في أحد المطارات، فقد تُشكِّل الصور الإضافية خطرًا، لأنها يمكن أن تُفسَّر بأنها طائرات إضافية. فما الذي يسبب الصور الإضافية، وكيف يعتمد البُعد بينها على الزاوية التي يصل بها الضوء إلى النافذة؟ وهل تَعتمِد المسافات الفاصلة على الأحوال الجوية؟

يُمكنك رؤية صور متعدِّدة مشابهة ليلًا حين تنظر إلى ممر الإقلاع عبْر نافذة الطائرة. وبمجرَّد أن تصير في الهواء، إذا أضأت المصباح الموجود فوق مقعدك وأمسكت بجسم لامع في الضوء، فقد ترى انعكاسات عديدة للجسم على النافذة. ما الذي يُفسر الصور الإضافية؟

الجواب: عندما تنظر إلى مصدر للضوء عبْر نافذة مزدوجة، فإن الصورة الأساسية تنتج عن مرور الضوء مباشَرة عبْر كلا لوحَي الزجاج (شكل ٦-٢٩). أما الصور الثانوية



شكل ٦-٢٩: بند ٦-٧٩: مسار الضوء عبْر نافذة مزدوجة.

الأكثر خفوتًا، فتنتج عن الضوء المُنعكِس بين اللوحَين، أو حتى بين سطحَي لوح الزجاج الواحد. تنتج الصورة الأكثر سطوعًا من بينها عن الضوء المُنعكِس أولًا عن السطح الداخلي للَّوح، ثم عن السطح الخارجي له، قبل أن يصل إليك. وتنطوي الصور الأخرى على انعكاسات أكثر. وتَسهُل أكثر رؤية الصور إذا كانت مُنفصلة تمامًا، وهو ما يحدث عندما يكون الضوء الآتي من المصدر مائلًا على النافذة.

أحيانًا يختلف ضغط الهواء بين اللوحَين عن ضغط الهواء في الخارج؛ مما يُؤدِّي إلى انحناء اللوحَين إلى الداخل أو إلى الخارج. يزيد ذلك الانحناء من تباعُد الصور. وللتغلب على هذه المشكلة في مراقبة حركة الخطوط الجوية، تكون لدى مثل هذه النوافذ وسائل لجعل ضغط الهواء بين اللوحين، والضغط الخارجي، متعادلَين؛ فمثلًا، قد تملك النافذة ثقبًا صغيرًا في كلا اللوحين.

تَنتج الصور الإضافية التي يمكن أن تُرى في نافذة طائرة، عن وجود ثلاثة ألواح زجاجية في النافذة. حين ترى مشهدًا مائلًا عبْر النافذة، فإنك ترى صورًا مُتعدِّدة، ناتجة عن انعكاسات متعدِّدة للضوء. وحينما تكون الطائرة على ارتفاعٍ عالٍ، يتقوَّس اللوح الزجاجي الخارجي باتجاه الخارج، بسبب ضغط الهواء الخارجي المُنخفِض، ويمكن لانحنائه أن يشوه الانعكاسات عنه، بطرق مُثيرة للدهشة.

(٨٠) الكشافات الأقوى في العالم

في ورقة بحثية صدرت عام ١٩٦٥ وأرَّخت لسيطرة التفكير المُتفائل على العلم أحيانًا، وصف آر في جونز عاملَي موانئ بريطانيَّين، ارتأيا أن سطوع الكشاف يُمكن زيادته بقدر كبير. بدءًا بضوء منبعث من قوس كربون، كان من المفترض أن تقوم مرآة بيضاوية بتركيز صورة من القوس. وبعدئذٍ تستخدم مرآة أخرى تلك الصورة، لتركز صورة أخرى، ثم تستخدم مرآة ثالثة تلك الصورة لتركز صورة أخرى كذلك وهكذا، إلى أن تركز المرآة الأخيرة صورتها مرةً أخرى على قوس الكربون، جاعِلةً القوس بذلك أكثر توهُّجًا بكثير مما كان عليه في الأصل. أريد لعَملية التكبير هذه أن تتكرَّر مرات عديدة، إلى أن تحين الحاجة إلى الكشَّاف، فتُزال إحدى المرايا للسَّماح للشعاع بالانطلاق. كان يُفترض بالضوء أن يكون ساطعًا على نحو استثنائي. فما الذي عاب هذه الخطة؟

الجواب: طبقًا لجونز، حين قدم العاملان خطتَيهما للتكبير إلى الجهات البريطانية المسئولة، تلقَّيا ردًّا مفاده أن الخطة لن تنجح؛ لأنها تخالف القانون الثاني للديناميكا الحرارية (وهو المتعلِّق بكمية تُعرف بالإنتروبيا). اعتذر عاملا الميناء سريعًا، قائلَين إنهما لم يُدركا أنهما كانا يخرقان قاعدة أساسية.

لا يُمكننا بالطبع أن نبدأ بكمية معينة من الطاقة، ثم نزيدها بطريقة ما، دون أي مصادر إضافية للطاقة. لذا فإن عكس الضوء مرات عدة يُمكن أن يُركِّزه، لكنه بالتأكيد لن يَرفع طاقته.

(٨١) شعاع أرخميدس المميت

لطالَما تجادَلَ المؤرِّخون حول ما إذا كان أرخميدس قد هزم الأسطول الروماني إبان حصاره لسرقوسة عام ٢١٢ قبل الميلاد، باستخدام «مرآة حارقة». فطبقًا للأسطورة، استخدم أرخميدس المرايا لتركيز ضوء الشمس على جانب سفينة رومانية، محرقًا إياها. وبعدما أُحرق عددٌ كافٍ من السفن وغرق، انسحبَت السفن الباقية. هل مثل هذا العمل البطولي مُمكِن؟

الجواب: إن إحراق الأخشاب مِن على مسافة، باستخدام مجموعة من المرايا أو مرآة واحدة مُنحنية ومُركَّزة، لهو أمر مُمكن، ولكن من المستبعد للغاية أن يكون أرخميدس قد طبَّق هذه التقنية. كانت الأسلحة الأكثر تقليديةً آنذاك ستُؤدي الغرض على نحوٍ أفضل، لأن هناك عدة مشكلات في استخدام المرايا.

تتعلَّق إحدى هذه المشكلات بالتركيز؛ فلتسليط كثافة التركيز الملائمة على الخشب، يجب أن تركز المرآة الضوء على بقعة صغيرة. لن تصنع مرآة مستوية واحدة مثل هذه الكثافة (وهذا في الحقيقة من حُسن الحظ، لأنه لو كان الأمر عكس ذلك، لأمكن أن يؤدي أي استخدام أهوج لمرايا التجميل في ضوء الشمس إلى إشعال الحرائق). فلتركيز الضوء بشدة أكبر، سنحتاج إلى سلسلة من المرايا المستوية المرتبة جيدًا في قطع مكافئ. ومع ذلك، لإضرام النار في سفينة، يجب أن يُضبَط البُعد البؤري بحيث يعادل بُعد السفينة، وهو شرط يتعذَّر تحقيقه أثناء المعركة.

وتتعلق مشكلة أخرى بالزمن الذي يحتاجه الضوء المركز لإشعال الخشب. وحيث إن السفن تكون على الأرجح متحرِّكة (ومُترجرجة) خلال الهجوم، فإن تسليط شعاع مركز من ضوء الشمس على نقطة واحدة من إحدى السفن لوقتٍ كافٍ لإحراقها سيكون غير قابل للتطبيق على الإطلاق. وحيث إن الخشب على جوانب السفن كان رطبًا على الأرجح، فقد كانت المهمة مستحيلة فعليًّا بالنسبة إلى أرخميدس. باختصار، هذه الأسطورة الخاصة بأرخميدس ما هي إلا خرافة شائقة.

في عام ١٩٩٣، وضعت روسيا مرآةً بلاستيكية قُطرها ٢٢ مترًا في مدار لاختبار إمكانية عكس ضوء الشمس على المرتفعات الروسية خلال ساعات الإظلام في شتائهم الطويل. صنَعَت المرآة رقعة خافتة من الضوء يبلغ عرضها عدة كيلومترات، جالت أنحاء أوروبا في أثناء الاختبار. لاحظ أشخاص كُثُر الضوء، على الرغم من الغطاء السحابي في تلك الليلة.

قصة قصيرة

(٨٢) إضرام النار في حكم مباراة

في قصة آرثر سي كلارك القصيرة «حالة ضربة شمس بسيطة»، جرت مباراة كرة قدم بين دولتَين متنافستَين، أمام جمهور من ١٠٠ ألف شخص. كان حوالي نصف المُتفرِّجين من العسكريين الذين أُعْفُوا من الخدمة ومُنِحوا قلائد كبيرة وجميلة، أُحيطت بمعدن لامع يشبه الفضة، تخليدًا لذكرى الحدث.

كان الترقُّب يكتنف المباراة، خاصة أن الفريق صاحب الأرض خسر مباراة العام السابق، لأن الفريق الزائر رَشا حكم المباراة. في واقع الأمر، فقد رشا الفريق المُضيف الحكم أيضًا، لكن من الواضح أنها لم تكن رشوة كافية.

وحيث إنه طبقًا للقواعد، كان للفريق المضيف الحق في اختيار حكام المباراة، فقد اختير الرجل نفسه. كان الجمهور مترقبًا لرؤية مدى نزاهته في تحكيم المباراة هذه المرة. في البداية، بدَت معظم قراراته عادلة تمامًا، غير أنه بعد ذلك، وبمجرد أن سجل الفريق الزائر هدفًا، أبطل الحكم هدفًا من هجمةً مرتدَّة سجَّله أحد لاعبي الفريق المضيف، ومنح الفريق الزائر ركلةً حرة أحرزوها. وفي ظل تراجع الفريق المُضيف بهدفين، اغتمت جموع مشجعيه.

ومع ذلك فقد ارتفعت آمالهم حينما استعاد فريقهم الباسل الهجوم، محرزًا هدفًا نظيفًا للغاية، بحيث لم يستطع حتى الحكم المنحاز نفسه أن يَطعن فيه. بعد ذلك، سرعان ما هب مشجعو الفريق المضيف واقفين، حينما استطاع أحد لاعبيهم أن يخترق بالكرة صفوف عدة مدافعين وهز بها شبكة المرمى من جديد، مُحرِزًا التعادل. ووسط هتافات التشجيع، انطلقت صافرة الحكم، مقررًا عدم قبول الهدف، بزعمه المُثير للذهول، بأن اللاعب قد لمس الكرة بيده.

أوغر الغضب صدور بعض جماهير الفريق المضيف، وهدَّدوا بإشعال الملعب، لكن لم يكن بينهم العسكريُّون المنضبطون. وبعدما عاد كل فريق من الفريقَين إلى جانبه من الملعب، تاركين الحكم وحده في منتصف الملعب، انطلق نفيرٌ صاخِب، وفي حركة توافُقية رفع العسكريون قلائدهم اللامعة، ووجهوها نحو ضوء الشمس الساطع. وبوميض مُبهِر، تحوَّل الحكم إلى كومة مشتعلة، تصاعد منها عمود من الدخان.

في بعض البلدان، تُؤخَذ كرة القدم بجدية أكثر من اللازم.

(٨٣) الأضواء المخيفة في المقابر

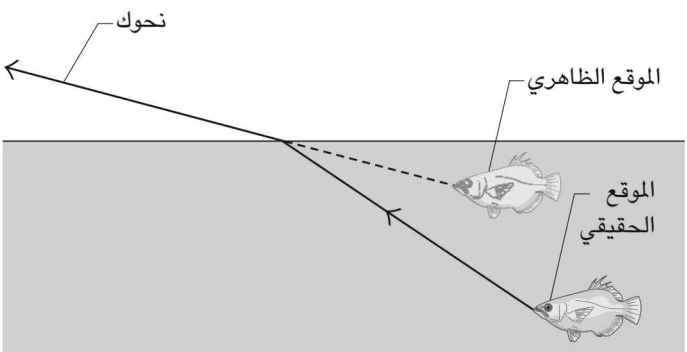
في مقبرة قديمة، تَبعُد حوالي ميل واحد عن سيلفر سيتي؛ البلدة الصغيرة الواقعة في كولورادو، يَجتمع الزوار أحيانًا في الليل لمشاهدة الأضواء الغريبة المتراقصة بين شواهد القبور الرخامية السوداء. يكون المكان مظلمًا لأنَّ البلدة بعيدة، والمنطقة التي على الناحية المقابلة شبه مُقفرة. عادةً ما تكون الأضواء على هيئة نقاط بيضاء، لكنها تبدو أحيانًا أكبر، وتتَّخذ وهجًا أزرق. هل تخرج الأشباح للعبث أم أن هناك تفسيرًا منطقيًّا أكثر لهذه الأضواء؟

الجواب: يمكن لرخام الشواهد الأسود أن يعمل عمل المرآة، عندما تدنو أشعة الضوء من سطح الحجر بزاوية مائلة، غير أن الأشعة تُمتَص حينما تكون الزاوية بينها وبين

السطح أكبر. إذا تجولت في منطقة مقابر مظلمة، ستكون بعض الشواهد موجهة توجيهًا مناسبًا لتعكس الضوء إليك، من البلدة أو من النجوم. قد تأتي الانعكاسات من الواجهة العريضة للشاهد، أو من جوانبه المستقيمة أو المنحنية. وعندما تتحرك أنت، سيبدو لك أن الصور المُنعكِسة تتحرَّك هي الأخرى، أو تأتي وتذهب بطريقة مربكة، مما يجعلها تسلُك ما يُشبه سلوك الكائنات الحية. تتحرَّك الصور أيضًا بفعل تقلُّبات حرارية، يُمكِن أن تؤدي باستمرار إلى تنويع المسارات التي تسلكها أشعة الضوء؛ ولعلك رأيت من قبل حركات مشابهة، تُسمى «الاهتزاز»، تحدث للضوء الذي يعبر فوق النيران أو الطرق الحارَّة.

(٨٤) ما يراه الصياد من السمكة

إذا أطلقت سهمًا على سمكة مغمورة في الماء، فهل عليك أن تسدد السهم مباشرةً إلى السمكة؟ يعرف أي صياد ماهر أن عليك في العموم أن تُسدِّد على مستوى منخفض. لماذا؟ هل يتغيَّر الموقع الظاهري للسمكة إذا أملت رأسك بحيث تقع عيناك على محور رأسي؟ (من المُثبت أن محاولتك إصابة سمكة بإبقاء رأسك أفقيًّا، هي دعوة لإصابة نفسك في قدمك.)



شكل ٦-٣٠: بند ٦-٨٤: موقعا السمكة الظاهري والحقيقي.

الجواب: إن أشعة الضوء الصادرة من السمكة، عندما تعبر سطح الماء إلى الهواء، تَنعكِس (تنحرف) عن المستوى الرأسي (شكل ٦-٣٠). وبمجرد أن تصل الأشعة إلى عينَيك، يُمكنك أن تَستنتج موقعها الأصلي عن طريق المد التخيُّلي العكسي للخطوط، على

امتداد الأشعة، لكن دون السماح بانحرافها. ونتيجة لذلك، تدرك أن السمكة أعلى مما هي عليه في الحقيقة، وهكذا عليك أن تُسدِّد تسديدًا منخفضًا؛ أي تحت المكان الذي ترى فيه السمكة.

يَزداد تعقيد الموقع الظاهري للسمكة بفعل الطريقة التي تُحدِّد بها بُعد الجسم عنك، وبمدى الْتقاء عينَيك لكي تراه. ولأن الشعاع الذي يصل إلى عينك اليُسرى منحرف إلى يسارك، والشعاع الذي يصل إلى عينك اليمنى مُنحرف إلى يمينك، يجب أن تجري عيناك مقاربة أكبر مما تُجريها في حالة عدم حدوث انحراف. وبناءً على المقاربة، تدرك أن السمكة أقرب مما هي عليه. وإذا أملتَ رأسك لتضع عينَيك على محور رأسي، بينما تنظر أيضًا في الماء باتجاه مائل، فستظهر السمكة في الماء أكثر قربًا وارتفاعًا.

(٨٥) ما تراه السمكة من الصياد

ما الذي يُمكن لسمكة أن تراه من العالم الخارجي، حين تنظر إلى أعلى؟ هل تكون صورة العالم مشوَّهة بسبب المسار الذي تسلكه أشعة الضوء عبْر سطح الماء؟ هل تعتمد الصورة على العمق الذي توجد فيه السمكة؟

عند الصيد بالحشرات، إذا رميت الحشرة نحو السمكة، فهل عليك أن تُوجِّهها بدقة، أم هل بمقدور السمكة أن ترى حشرات طافية أبعد؟

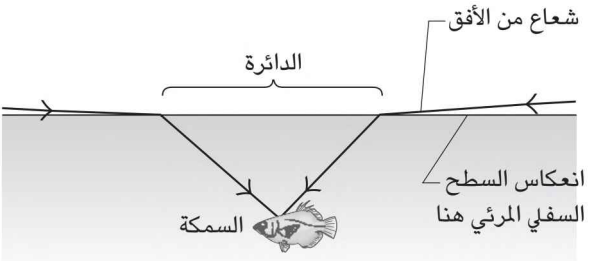
لنَفترض أنك مُستلقٍ على ظهرك في قاع حمام سباحة ضحْل. هل تكون رؤيتك للعالم الخارجي مُشابهة لرؤية السمكة له؟ هل يتغيَّر المشهد الذي تراه إذا ارتديت قناعًا له سطح بلاستيكي مستوٍ ويَحتوي على الهواء؟ إذا كان نظرك لا يحتاج إلى تصحيح، فلماذا يكون نظرك تحت الماء ضعيفًا للغاية عندما لا تَرتدي قناعًا يحتوي على الهواء؟ إذا كنت مصابًا بقِصَر النظر أو طوله، فهل يكون نظرك تحت الماء أفضل؟

عندما ترى سمكة نابلة حشرة في طُعم مُتدلٍّ فوق الماء، فإنها تخرج خطمها من الماء قليلًا، ثم تنفث من فمها نافورة من الماء نحو الحشرة، لكي تُسقطها في الماء إلى حيث يمكن أن تُلتقط وتُلتهم. عندما توجه السمكة نافورتها، تكون عيناها تحت الماء. فهل تستهدف النقطة التي ترى فيها الحشرة؟

الجواب: إن صورة العالم الخارجي التي تراها السمكة مشوَّهة، بسبب انكسار الضوء المار من الهواء خلال سطح الماء ليَصل إلى عينَي السمكة. يحني هذا الانكسار

شعاع الضوء عند السطح، ليكون رأسيًّا أكثر داخل الماء. تكون قيمة الانحناء صفرًا في حالة الشعاع الرأسي في الأصل، وتزيد تدريجيًّا في حالة الشعاع المائل على الرأسي بزاوية أكبر.

يعني الانكسار أن العالم الخارجي يُرى في إطار دائرة على سطح الماء، فوق السمكة مباشرة (شكل ٦-٣١). تقع صورة لأفق العالم الخارجي على محيط الدائرة، بينما تقع صور العناصر الخارجية داخل الدائرة.



شكل ٦-٣١: بند ٦-٨٥: الضوء الخارجي يصل إلى السمكة عبْر دائرة فوقها.

أما خارج الدائرة، فترى السمكة بصورة رئيسة انعكاسًا مرآويًّا لقاع البِركة المائية، في حال كانت المياه ضَحلة، وترى سطحًا مُعتمًا، في حال كانت المياه عكرة أو أكثر عمقًا. إذا أردت للسمكة أن ترى كل ذبابة ترمي بها، فيجب أن تكون الذبابة قريبة من مركز الدائرة. أما إذا كانت قريبة من محيطها، فيكون الجزء الجاف من الذبابة مشوَّهًا بقدر كبير، ومختفيًا على الأرجح وسط ما يحيط به من فوضى صور الأشجار والعناصر الأخرى اللائحة في الأُفُق. وإذا كانت الذبابة خارج الدائرة، تستطيع السمكة رؤية الجزء المغمور منها فقط. وكلما كانت السمكة على عمقٍ أبعد، كانت الدائرة أصغر.

إذا كان نظرك طبيعيًّا، فلن ترى صورة واضحة للعالم الخارجي في مثل هذه الدائرة، عندما تكون مغمورًا تحت الماء. ينتج معظم تركيز عينَيك للضوء، من انكسار الضوء أثناء مروره من الهواء إلى قرنية العين. عندما يُجاور الماء القرنية، يكون هذا الانحراف غير موجود تقريبًا ولذا يغلب أن تبصر تحت الماء إبصارًا ضعيفًا.

يتحسَّن نظرك إذا كنت ترتدي قناعًا؛ لأنَّ الهواء المُجاور للقرنية يعيد انكسار الضوء إلى القرنية؛ ومِن ثَمَّ التركيز. ومع ذلك، لا بد من أن يَنكسِر أيضًا الضوء الآتي من الماء، عبْر سطح القناع البلاستيكي الشفاف، وصولًا إلى الهواء المحتجز في القناع. يلغي هذا الانكسار الإضافي تشكُّل الدائرة العلوية على سطح الماء؛ وحينئذٍ يبدو العالم الخارجي شبيهًا بما يبدو عليه لعينك وهي فوق الماء.

إذا كنت تعاني من قِصَر النظر، تركز عيناك صورة للأجسام البعيدة أمام شبكية العين. وإذا قلَّلت الانكسار في القرنية بغمر عينَيك في الماء، فقد تسقط الصورة على الشبكية، ومِن ثَمَّ تُرى بوضوح.

في بعض الأحيان تَنفُث السمكة النابلة الماء نحو حشرة تقع فوقها مباشرة، وفي هذه الحالة فإن خط الإبصار الخاص بالسمكة لا يتأثر بالانكسار. ومع ذلك، يكون الانكسار مهمًّا في الاتجاهات الأخرى، ولا بد أن تضعه السمكة في الاعتبار إما بالتجربة والخطأ (إلى أن تصيب نافورة الماء الحشرة أخيرًا)، أو بالتعلم من الخبرات السابقة، أو بالترميز الجيني.

(٨٦) قراءة ما بداخل مظروف مغلق

لنَفترِض أنني برهنت على مهارتي في قراءة الأفكار، كما يلي: سأجعلك تكتب كلمة على ورقة، ثم تضع الورقة في مظروف أبيض قياسي، يَحتويها دون الحاجة إلى طيِّها، وتُغلق المظروف. ستَفحص المظروف قبل أن تُناولني إياه. لا تُرى الكلمة من خارج المظروف، والغرفة تفتقر إلى أي ضوء ساطع يمكن أن يَخترق المظروف ليظهر الكلمة على هيئة ظل.

عندما أُمسك بالمظروف، سأجعلك تفكر في الكلمة لكي «أراها» في عقلي. ورغم أنني أنظر إلى المظروف من وقت لآخر، لا أحاول أبدًا أن أرفعه في الضوء. بعد بضع دقائق من التركيز، أخبرك بالكلمة.

الحقيقة بالطبع هي أنه ليس لديَّ أي قوى لقراءة الأفكار. فكيف أستطيع تحديد الكلمة؟ إليك تلميح: هناك فيزياء مشابهة تجعل الأقمشة — لا سيما القطن الأبيض مثلما في القمصان — شبه شفَّافة عندما تكون مُبتلَّة.

الجواب: بعدما تسلمت المظروف، قمتُ سرًّا بدهنه بكمية قليلة من الشحم. لا يخترق الضوء عادةً المظروف، لأنه يُشتَّت بفعل الألياف والمواد المالئة الموجودة في ورق المظروف. يمكننا توضيح كمية التشتُّت حسب «معامل انكسار» المادة، الذي يقيس مدى سرعة

انتقال الضوء في تلك المادة. يَحتوي الورق على جيوب من الهواء ذات معامل منخفض، وألياف ومواد مالئة ذات معامل أعلى؛ يؤدِّي الفرق الكبير بين هذَين المعاملين إلى كمية كبيرة من التشتُّت عند سطوح كل الجيوب الهوائية.

يُمكنني تقليل كمية التشتُّت عن طريق جعل الورقة تمتص الشحم، الذي لديه معامل انكسار متوسِّط. لا يتغير المعامل كثيرًا فيما بين الهواء والشحم، ولا فيما بين الشحم والألياف والمواد المالئة. ولأن الضوء لا يتشتَّت كثيرًا، فإنه يخترق المظروف أكثر، ويُمكنه إظهار علامات الحبر أو الرصاص المشكِّلة للكلمة، والورقة التي تقع عليها. تمتصُّ العلامات الداكنة الضوء إلى حدٍّ كبير، لكن الورق المحيط بها يُشتِّت بعض الضوء النافذ رادًّا إياه إليَّ في النهاية، عبْر المظروف المُشَحَّم. أستطيع تمييز العلامات (ومِن ثَمَّ الكلمة) من خلال تبايُنها الواضح عما حولها.

قصة قصيرة

(٨٧) ابتلاع السيوف ومنظار المريء

اليوم، يُعدُّ منظار المرِّيء عملية روتينية، تُمدُّ فيها أداة معاينة مكوَّنة من ألياف بصرية، في حلق المريض نزولًا إلى معدته، بحيث يَفحص الطبيب المجرى. تكون أداة المعاينة منحنية لكي تسلك المسار المنحني من الفم إلى المريء. يحمل جزء من الأداة ضوءًا في نهايتها، لإضاءة المسار أو المعدة. ويَحمل جزء آخر صورة للداخل المضاء، إلى الأعلى، حيث يوجد جهاز يعرض الصورة على شاشة. يستطيع الطبيب تطويع الجهاز، ليُغيِّر الجزء الداخلي المضاء، وقد يبحث عن علامات لوجود سرطان، أو قُرحة، أو حتى لفافات غير مشروعة من المخدِّرات، التي يُقدِم بعض الناس على تهريبها عن طريق بلعها (التهريب الجسدي).

إننا نفهم منظار المريء الحديث على نحو جيد، لكن بداياته كانت غريبة نوعًا ما. كان «منظارًا داخليًّا» بسيطًا، يتكون من أنبوب مستقيم مُضاء بشمعة، يُستخدم بالفعل لفحص الطرف السفلي للقولون. وكذلك في منظار المريء الأول، استُخدم أنبوب مستقيم، لكنه كان أقصر من أن يصل إلى المعدة. ومع ذلك فإن ذلك الطبيب الرائد توصَّل إلى طريقة لاستخدام أنبوب أطول؛ حيث استعان بمُبتلع سيوف، وهو شخص يستطيع إمالة رأسه إلى الوراء، وإرخاء عضلات معيَّنة بامتداد المريء، وصنع ممر مستقيم إلى حدٍّ كبير، من الحلق إلى المعدة. وحينما أضاء الطبيب الطرف الحر للأنبوب الذي أدلاه، رأى الجزء الداخلي للمَعدة، وبدأ عصر منظار المريء الحديث.

(٨٨) بصريات باب حوض الاستحمام

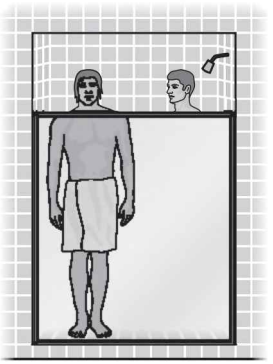
احمل قطعة من شريط بلاستيكي شفاف مباشرة فوق كلمات مطبوعة، ثم حرِّك الشريط باتجاهك. لماذا يكون باستطاعتك في البداية رؤية الكلمات من خلال الشريط، ولكن ليس عندما يبعد الشريط عنها بما يزيد عن نصف سنتيمتر؟ لماذا تَسهُل رؤية جسم المستحم عبْر باب حوض استحمام بلوري (محبَّب) فقط عندما يكون الشخص ملاصقًا للباب مباشرة (شكل ٦-٣٢أ)؟

تَستخدم بعض متاحف الفنون خصائص بصرية مُماثلة في عرضها للوحات الفنية. تُحمى اللوحات بطبقة من الزجاج أو البلاستيك، لكن لو كانت الطبقة عبارة عن لوح عادي، تكون رؤيتُك للوحة مشوبة بالانعكاسات المُختلفة لما في الغُرفة. ولتلافي التشويش، تُجعل الطبقة محبَّبة قليلًا. لماذا يزيل التحبيب انعكاسات الغُرفة، دون تشويه رؤيتك للوحة؟

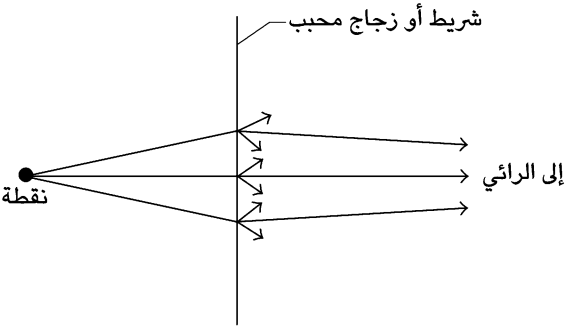
الجواب: عندما تَنظُر إلى نقطة عبْر لوح زجاجي عادي، فإن عينَيك تَعترضان بعض أشعة الضوء المنبعثة من النقطة، ويُمنطقُها مخك، عن طريق مد الأشعة رجوعًا إلى الوراء، لخلق صورة مفهومة للنقطة. تكون هذه الصورة واضحة ومحدَّدة، لأن الأشعة التي تعترضها أنت تأتي من منطقة صغيرة على الزجاج، تنتمي إلى خط رؤيتك للنقطة.

عندما نستعيض عن الزجاج بقطعة من شريط بلاستيكي، فإن كل شعاع يخترق الشريط يتشتَّت بفعل عدم انتظامه إلى رذاذ مخروطي من الأشعة (شكل ٦-٣٢ب). إنك الآن تعترض أشعة نقطة إضافية، من نقاط على الشريط لا تَنتمي إلى خط رؤيتك للنقطة. ومع ذلك فإن دماغك يمد أي أشعة مُعترَضة رجوعًا إلى الوراء، في محاولة لفهم مصدرها. إذا كان الشريط قريبًا من النقطة، فإن انتشار الأشعة يكون قليلًا، بقدر صغر المنطقة من الشريط التي تعترض الأشعة فيها، ويظل باستطاعتك أن ترى صورة للنقطة، واضحة ومحدَّدة المعالم إلى حدٍّ ما. ومع ذلك فعندما تزيد المسافة بين الشريط والنقطة، يزيد الانتشار الزاوي، كما تزيد مساحة الشريط التي تعترض الأشعة منها. عندئذٍ فإن ما تراه هو نقطة مكبَّرة وغير واضحة.

إذا نظرت عبْر الشريط إلى صفحة مطبوعة، فإن قدرتك على قراءة المطبوع عليها تعتمد على نجاحك في تمييز الحروف المطبوعة. عندما يبعد الشريط عن المطبوع أكثر من نصف سنتيمتر، فإن انتشار صور الحروف يُسبِّب تداخلًا كبيرًا لا تستطيع معه تمييز الحروف.



(أ)



(ب)

شكل ٦-٣٢: بند ٦-٨٨: (أ) يُرى المستحم فقط عندما يكون قريبًا من الباب البلوري. (ب) تشتُّت الضوء بفعل عدم الانتظام.

تكون الحالة مشابهة مع المستحم خلف باب حوض استحمام محبَّب، ومع غطاء اللوحة الفنية. في حالة الغطاء، تكون اللوحة قريبة منك بما يكفي لتمييز تفاصيلها، ولكن عناصر الغرفة بعيدة كفاية، بحيث لا تتَّضح تفاصيلها المنعكسة ولا يُمكِن تمييزها. في حالة باب حوض الاستحمام، قد تتساءل عن سبب وضع التحبيب عادةً على السطح الخارجي للباب. إذا تناثَر الماء على التحبيب، فإنه يَملأ فراغات عدم الانتظام، مُعطيًا

سطحًا أكثر استواءً، وبهذه الطريقة يُقلِّل انتشار أشعة الضوء. وعندئذٍ سيكون المُستحم مرئيًّا بوضوح، حتى لو كان بعيدًا عن الباب نسبيًّا. (الخصائص البصرية المُراعية الوقور يُمكنها أن تيسِّر احتشام المستحم المنظور إليه.)

(٨٩) سحر الانكسار

يَلفُّ ساحرٌ جريدةً حول أنبوب اختبار، ويُكسِّره إلى قطع صغيرة باستخدام مطرقة، ثم يُلقي القِطَع في دورق مياه شفاف. وبعد تمتمَة قصير بكلمات سحرية تستحث القطع لتعيد تجميع نفسها لتكوِّن أنبوب الاختبار من جديد، يمدُّ يده إلى الماء، ليَكتشِف أن القطع فعلت مما أمرها به تمامًا، ويخرج أنبوب الاختبار. كيف نجَحَت الخدعة؟

ضع كرةً زجاجية شفافة في كأس زجاجية، وضَعْهُما على مادَّة مطبوعة. عندما تنظر إلى أسفل عبْر الكرة، تكون المادة المطبوعة غير قابلة للقِراءة. كيف عساك تُبرز المادة المطبوعة دون تحريك الكأس الزجاجية؟

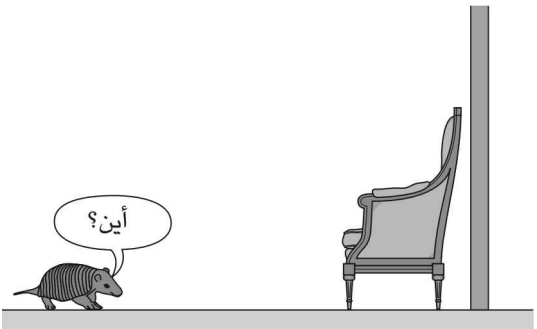
الجواب: لتدبير خدعة أنبوب الاختبار، ضع أولًا أنبوبًا في الماء. يمكنك رؤيته في الماء لأن الضوء الذي يمر عبْر الماء إما أن يَنعكِس وإما أن ينكسر بواسطة أنبوب الاختبار. ويمكنك إخفاء الأنبوب بإذابة سكَّر في الماء. عندما يكون لكلٍّ من محلول الماء والسكر وزجاج أنبوب الاختبار الخواص البصرية نفسها (أي عندما يكون لهم معامل الانكسار نفسه)، فإن الضوء المارَّ عبْر الماء يمكنه المرور عبْر الزجاج من دون تغيُّر ملحوظ في اتجاه الانتقال. ولذا يكون أنبوب الاختبار غير مرئي. وكذلك لا تُرى القطع المكسورة من أنبوب اختبار (ثانٍ) عندما تنثرها في ماء السكر. وعندما تمدُّ يدك لسحب أنبوب الاختبار الأول، ابحث عنه بأصابعك.

تُركِّز الكرة الزجاجية الضوء الصادر من المادة المطبوعة تركيزًا شديدًا، إلى حدٍّ أنك لا تستطيع تمييز الصورة. ولتقليل التركيز، اسكب الماء في الكأس. إنَّ معاملَي انكسار الماء والكرة مُتقاربان، ولذا تتعرض أشعة الضوء لانكسار طفيف عندما تعبر من أحدهما إلى الآخر. يُمكن لعينَيك حينئذٍ أن تركِّزا الضوء الصادر، بما يُمكِّنك من قراءة المادة المطبوعة.

(٩٠) الرجل الخفي والحيوانات الشفافة

كتب إتش جي ويلز رواية عن رجل يُصبح خفيًّا (انظر شكل ٦-٣٣). هل هذا الأمر ممكن من الناحية البصرية؟ هل سيُصبِح الرجل خفيًّا إذا أصبح شفافًا مثل الزجاج. إذا

كان الرجل خفيًّا فهل يستطيع الرؤية؟ لماذا عيناك شفافة وليس جلدك؟ هل يمكن لأي حيوان أن يُصبح شفافًا إلى حد كبير؟



شكل ٦-٣٣: بند ٦-٩٠: الرجل الخفي مسترخيًا على كرسيه المفضل.

الجواب: بطبيعة الحال من المستحيل وجود رجل خفي. فإذا كان شفافًا تمامًا مثل الزجاج، فإن الجزء المُنحني من جسمه سيَعمل مثل العدسة المعقدة فيُشوِّه رؤيتك لما يوجد خلفه أثناء سيره أمامك. بالإضافة إلى ذلك، فسوف يعكس الضوء من سطحه مثلما تفعل المنحوتة الجليدية. ولتقليل التشوه والانعكاس يحتاج الرجل إلى الخواصِّ البصرية للهواء، وهذا يعني ضرورة أن يتكون من الهواء وهذا مطلب مستحيل.

ولكي يرى الرجل فلزامًا أن يسلط الضوء ثم يمتص قدرًا منه. ومن أجل أن تُسلِّط عدسات العين الضوء لا بد أن تكون خواصها مختلفة عن خواص الهواء. ولكي تمتصَّ الشبكية الضوء لا بد أن تكون على الأقل مُعتمة جزئيًّا. وكلا الأمرَين سيكونان واضحَين إذا نظرت إلى عينَيه. أما إذا افترضنا أنه يسلط الضوء من خلال نقاط دقيقة (انظر المعلومات المتعلقة بكاميرات نقاط الدبوس في البند ٦-١٠٢) ثم يمتصُّ جزءًا من الضوء فحسب؛ ففي هذه الحالة قد لا يُكتشَف أمره.

عندما يُرسَل الضوء المرئي إلى الجسم البشري فإنه يتشتَّت من الكولاجين والأغشية والمكونات الأخرى المُختلِفة الموجودة في طريقه عند النقاط التي تتغيَّر فيها الخواص البصرية. ويكون التشتت كبيرًا لأن هذه الاختلافات في الخواص البصرية تحدث على

مسافات «أكبر» من الطول الموجي للضوء. وأي صورة تُرسَل عبْر الجلد تُبعثَر كثيرًا بفعل هذا التشتُّت؛ ولذلك فالإنسان ليس شفافًا في الضوء المرئي. (إلا أنه توجد طرق من خلالها يُمكن «إبطال» هذه البعثرة من خلال التحليل الحاسوبي؛ ومِن ثَمَّ «يُمكن» مرور الصورة عبر النسيج البشري.)

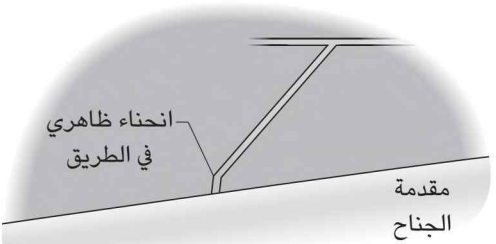
تتَّسم قرنية وعدسة العين البشرية بالشفافية تجاه الضوء المرئي على الرغم من ألياف الكولاجين الموجودة في القرنية والبروتينات المتبلِّرة في العدسة. والسبب في ذلك هو أن الألياف والبروتينات مجمعة بكثافة ولديها ما يطلق عليه «ترتيب قصير المدى». وهذا يعني أن الألياف أو البروتينات في منطقة صغيرة (أقطار ألياف قليلة) لديها جميعًا الاتجاه نفسه. والتجمُّع الكثيف يعني أن التغيرات في الخواص البصرية تحدث في مسافة «أصغر» من الطول الموجي. ونتيجة لذلك فإن الضوء يتشتت في الأساس في الاتجاه الأمامي؛ أي نحو الشبكية؛ ومِن ثَمَّ يستطيع الضوء أن يحمل معلومات عن الصورة عبْر العين إلى الشبكية؛ حيث يَجري التعرُّف على الضوء ويبدأ إدراك الصور.

بعض الحيوانات البحرية تُقلِّل من إمكانية رؤيتها من خلال عكسها للضوء لكي يرى المرء قدرًا أكبر من المحيط بدلًا من رؤية الحيوان. وهذه الانعكاسات قد تُخفي عيون الحيوان كي لا يتعرف عليها المُفترِس، أو قد تُخفي المعدة المُعتِمة بسبب وجود الطعام فيها. في الوقت الحالي ليس مفهومًا تمامًا ظاهرة الشفافية التي تُحقِّقها بعض الحيوانات البحرية لكنَّها من المؤكد راجعة إلى تقليل التنوع في الخواص البصرية للمُكوِّنات البيولوجية من أجل تقليل تشتُّت الضوء. وتحدث التنوعات «الموجودة» في المسافات الأصغر من الطول الموجي للضوء، ولذلك فإن الضوء يتشتَّت دائمًا في الاتجاه الأمامي كما لو كانت التنوعات غير موجودة. وتتَّسم حيوانات قليلة بالشفافية لسبب بسيط؛ ألا وهو قدرتها على التسطح إلى أن تُصبح كمية التشتت داخلها غير ملحوظة تقريبًا.

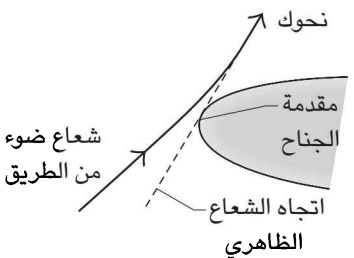
يُخفي حبار هاواي القصير الذيل نفسَه باستخدام بروتينات فريدة كثيرة في الصفائح الدموية. تعمل هذه الصفيحات الدموية كأغشية رقيقة يُمكنها عكس الضوء مثلما تعكس سلسلة من أغشية الصابون المُتوازية الضوء. الأمر الغريب في هذا الحبار هو أن الضوء تنتجه بكتيريا في عضو في الجانب السفلي للحبار. فعندما يُضاء الحبار بضوء القمر على سبيل المثال فإنه يرغب في تجنُّب إلقاء ظلِّه على أرض البحر لأن ذلك الأمر سيَكشف عن وجوده. ولذلك يُغيِّر تدفُّق الأكسجين إلى البكتيريا ليَستحثَّها كي تُصدِر الضوء؛ ومِن ثَمَّ تَعكِس الصفائح الدموية الضوء إلى منطقة الظل، فتُضيء الظل.

(٩١) انحناء الطريق بفعل انكسار الضوء

إذا جلستَ في مقعد بجوار النافذة في طائرة نفَّاثة، سواء فوق الجناح أو بالقُرب من الحافَّة الخلفية للجناح، فراقب منظورك لطريق مستقيم وهو يمرُّ أمام الحافة الأمامية. غالبًا ما يُصبِح الجزء الأقرب من الطريق للجناح معوجًا (انظر شكل ٦-٣٤أ). ومع انزلاق قدر أكبر من الطريق ظاهريًّا أسفل الجناح، يستمر الاعوجاج على طول الطريق. فما سبب هذا الاعوجاج؟



(أ)



(ب)

شكل ٦-٣٤: بند ٦-٩١: (أ) منظورك للطريق. (ب) منظور جانبي لشعاع ضوء يمر أمام مقدمة الجناح.

الجواب: تَسير أشعة الضوء القادم من معظم الطريق المنظور في خطٍّ مستقيم، فترى الشكل الحقيقي للطريق. أما الضوء القادم من الجزء الذي تراه قريبًا نسبيًّا من

الحافة الأمامية للجناح فلا بد أن يمر عبْر الهواء الذي يَختلف كثيرًا في كثافته نظرًا لاختراق الجناح للهواء. ويؤدِّي اختلاف الكثافة إلى انحراف (انحناء) أشعة الضوء لأعلى (انظر شكل ٦-٣٤ب). وعندما تَنظر إلى أشعة الضوء فإنها تبدو في نظرك كما لو كانت نشأت في مستوًى منخفض عن مستواها الحقيقي. والانحناء هو النقطة التي تفصل الأشعة المتأثِّرة بالانحراف عن تلك التي لم تتأثر.

(٩٢) ري النباتات في ضوء الشمس

يقول بعض البستانيِّين إنه يجب عدم ري العُشب أو الشجيرات عندما يكون ضوء الشمس ساطعًا؛ لأن قطرات الماء على الأنصال والأوراق يمكن أن تركز الضوء على نحوٍ يَكفي لحرق تلك الأسطح. فهل هذا الزعم صحيح؟

الجواب: لم يُفِد أي باحث بحدوث ضرر للأوراق في مثل هذا الموقف. في الواقع، قال أحد الباحثين إن وجود الماء يُمكن أن يبرد الورقة فعليًّا. وترجح الحسابات أن التسليط والتسخين الناتج يُصبحان مؤثِّرَين فقط إذا تحبَّبت القطرة على الورقة. في معظم النباتات يَميل الماء إلى الانتشار (يقال إن الماء «يبلل» الأوراق). إلا أن بعض النباتات مثل نبات اللوتس تتميز أوراقها ببِنًى مجهرية خاصة تجعل الماء يتحبَّب في شكل شبه كروي. وعلى الرغم من أن هذه النباتات معرَّضة لخطر زيادة الحرارة في ضوء الشمس المباشر، فإن هذه الأشكال الشبه الكروية تميل إلى التدحرج من على الأوراق.

ونصيحة ري الأرض أثناء الليل بدلًا من الري في ضوء النهار مُفيدة في المناطق القاحِلة؛ فبمجرد زوال الشمس، تزداد فرصة تشرُّب الأرض بالمياه بدلًا من تبخرها.

(٩٣) إشعال النار بالجليد

في قصة «صحراء الجليد» للكاتب جول فيرن يتمرَّد طاقم السفينة على القبطان هاتريس وبعض رفاقه المُخلصين ويتركونهم مُنعزلين قرب المحيط القُطبي في أثناء محاولة الوصول للقطب الشمالي. وعلى الرغم من أن هؤلاء الرجال المهجورين كانوا يَمتلكون الحطب لإشعال النار فإنهم لم يكن بحوزتهم أي مواد مسبِّبة للاشتعال أو أي وسيلة لإشعال الحطب. وعندما وجد الرجال المهجورون أن أمامهم رحلة طويلة سيرًا على الحقل الجليدي للوصول إلى سفينة أخرى، عرفوا أنهم سرعان ما سيتجمَّدون حتى الموت. إلا أن

طبيب السفينة توصَّل إلى خطة من خلالها يُمكن أن يشعل الجليد النار في الحطب. هل يمكنك أن تخمن كيف ذلك؟ وهل سيفلح هذا الأسلوب حقًّا؟

الجواب: وفقًا للقصة فقد صنَع الطبيب عدسة محدَّبة من قطعة جليد شفافة (ليس بها فقاعات الهواء المحبوسة عادةً داخل الجليد أثناء عملية التجمُّد). فقد استخدم البلطة وقطع جزءًا وشكَّله، ثم صقَل الشكل بسكِّينه ودفْء أصابعه. وأثناء حمل العدسة الجليدية في ضوء الشمس الساطع ضبَط ارتفاعها بحيث تكون نقطة تجمع ضوء الشمس المركز (البؤرة) موجَّهةً نحو الحطب. وخلال ثوانٍ اشتعل الحطب.

ربما نشأت فكرة هذه الخطة على يد العالم البريطاني الشهير ويليام سكوريسبي الذي يُشتهَر بريادة استكشاف القطب الشمالي. وقد وصَف ذات مرة كيف يُمكن لعدساته غير المتقنة الصنع التي صنعها من الجليد الشفاف إشعال الحطب وإذابة الرصاص وإشعال غليون البحَّار. ومؤخرًا، أخبَرَني ماثيو ويلار، من قرية ماكبراير في كولومبيا البريطانية، كيف أنه التقط صورًا فوتوغرافية باستخدام كاميرا تَستخدم عدسة جليدية بدلًا من عدستها التقليدية.

وقد تتمكَّن أيضًا من إشعال النار باستخدام عدسة نظارة عادية. فإذا كانت النظارة مصمَّمة لشخص يُعاني من طول النظر، فإنه يمكن توجيه بؤرتها نحو الحطب. أما إذا كانت النظارة مصممة لشخص قصير النظر، فإن العدسة لا تجمع الأشعة. ومِن ثَمَّ، فإن قصة إشعال النار في قصة «أمير الذباب» خاطئة؛ فلقد كان بيجي شخصًا يُعاني من قِصَر النظر بشدة، ومِن ثَمَّ لم يكن رالف ليستطيع إشعال الحطب بنظارة بيجي كما ذكرت القصة.

(٩٤) الألماس

لماذا يلمع الألماس؟ ما سبب ألوانه، ولماذا تكون ألوانه أكثر سطوعًا في الألماس الأكبر حجمًا؟ لماذا تكون الألماسة مُظلِمة إذا نظرت عبْر سطحها السُّفلي إلى مصدر ضوء صغير؟ ولماذا تُقلِّل الأوساخ على سطحها السفلي من السطوع المرئي عبْر سطحها العلوي؟

الجواب: لكي تتلألأ الألماسة بالألوان يجب أن ينفصل الضوء الداخل إلى سَطحها العلوي إلى ألوان ثم يعود عبْر السطح العلوي؛ ومِن ثَمَّ، فعندما يصل الضوء إلى السطح السفلي فإنه يجب أن يَنعكِسَ بالكامل وألا يهرب عبْر ذلك السطح. ولتجنُّب تلك الخسارة، يُصبح السطح السفلي مائلًا بشدة ناحية اتجاه انتقال الضوء، مما يَجعل السطح يَعكِس

كل الضوء. ويُقال إن الضوء يتعرض لـ «انعكاس داخلي كامل». ولذلك تكون الرؤية مُظلمة إذا نظرت لأعلى عبْر السطح السفلي. أما إذا كان السطح السفلي مغطًّى بالزيت أو غيره من الأوساخ، فإن بعض الضوء يُمكن أن يتسرَّب إلى هذه الطبقة المغطَّاة، فيُقلِّل من بريق الألماسة؛ ومِن ثَمَّ إذا أردت الحفاظ على بريق الألماسَّة، فيجب أن تُنظِّف «كلا» السطحين العلوي والسفلي.

يُعد «معامل الانكسار» الخاص بالمادة أحد مَقاييس مدى كفاءة المادة في فصل الألوان عند إضاءتها بالضوء الأبيض. فالألماس الذي يتمتَّع بمعامل انكسار كبير يفصل الألوان على نحو أفضل من الزجاج ذي القيمة المُنخفِضة في معامل الانكسار؛ ومِن ثَمَّ فإن الألماس المزيَّف المصنوع من الزجاج قد يتلألأ إذا كان متعدِّد الأوجُه عند قطعه، لكنه يَفتقِر إلى تلاعُب الألوان الذي تراه من الألماس الحقيقي. ومن الناحية النظرية، فإن الألماسة الكبيرة ملوَّنة أكثر من الألماسة الصغيرة؛ لأن طول المسافة التي يَقطعها الضوء عبْر الألماسة يزيد من فصل الألوان في الضوء.

(٩٥) أحجار الأوبال

ما السبب في ألوان حجر الأوبال الرائعة؟ يجب التفريق بين إنتاج الألوان في هذا الحَجر وبين إنتاج الألوان في الألماس؛ لأن حجم حجر الأوبال لا يتحكَّم في فصل الألوان. بالإضافة إلى ذلك، فإن الألوان مُختلفة. فعند تدوير ألماسة أسفل ضوء أبيض ساطع، سوف ترى تنوعًا في الألوان عبْر الطيف المرئي كاملًا. أما عند تدوير حجر الأوبال في هذا الضوء فسوف ترى نطاقًا ضيقًا من الألوان. فما الذي يتحكَّم في الفرق بين حجر الأوبال الرخيص عديم اللون وحجر الأوبال الأسود النفيس؟

الجواب: الأوبال حجر غير مُتبلوِر لكنه مكوَّن من السيليكا غير المتبلورة مع نسبة صغيرة من الماء. تتخذ السيليكا شكل كرات صغيرة (قطرها حوالي ١٠٠ نانومتر) مرصوصة على نحو شديد التقارب على شكلٍ شبيه بثمار برتقال في وعاء. وتحتوي الفراغات الفاصلة بين الكرات على الهواء، أو بخار الماء، أو مياه سائلة. وترتيب الكرات والفراغات بهذه الطريقة يكون نسقًا تتبايَن فيه الخواص البصرية. فعندما يمر الضوء الأبيض في الأوبال، فإنه يتعرض للحيود (وهو نوع من التشتت) بفعل النسق فتُرسَل الألوان المختلفة مرة أخرى خارجة من حجر الأوبال بزوايا مختلفة. وتعتمد زاوية انحراف أيِّ لون على المسافة المنتظمة للنسق (أقطار الكرات) وزاوية الضوء الداخل. وإذا تحرك

الأوبال أثناء فحصك له، فسترى نقاطًا ذات ألوان مختلفة تُومض وتنطفئ، ويُطلق على هذا العرض «نار» الأوبال.

ولكي تكون الألوان ساطعة ومميزة كما هي الحال في الأوبال الأسود فيَجب أن يتكون كل لون من نطاق ضيق من الأطوال الموجية لا غير. ولتكوين هذه النطاقات الضيقة لا بد أن تكون الكرات شبه مُتساوية في الحجم بحيث يكون الحيود من أي جزء من حجر الأوبال موحَّدًا. أما أفضل العروض ذات الألوان البراقة التي ترى من أي زاوية فتحدث في أحجار الأوبال التي يكون فيها تجمُّع السيليكا مختلفًا في الاتجاه والترتيب من منطقة لأخرى؛ وفي هذه الحال يوصف التجمع بأن به «عيوبًا». يزيد من جمال الأوبال الأسود ذي العيوب وجودُ جزيئات صغيرة (كربون، أو أكسيد الحديد، أو أكسيد التيتانيوم) تمتص الضوء الذي لم يتعرض للحيود، فيُعطي خلفية سوداء للضوء الملوَّن الذي تراه ويجعل الضوء أكثر وضوحًا. في الأوبال الرخيص يكون الاختلاف في أحجام الكرات كبيرًا وتكون الألوان غير ساطعة. ويكون الاختلاف في أحجام الكرات أصغر في أحجار الأوبال البيضاء، لكنه يظل رغم ذلك كبيرًا على نحو يسمح بوجود «بريق أبيض غائم».

(٩٦) تأثير ألكسندرايت

لون معظم الأحجار الكريمة يظل تقريبًا كما هو في ظلِّ ضوء الشمس والإضاءة المتوهجة، لكن بعض الأحجار الكريمة، مثل حجر ألكسندرايت وحجر تنزانيت، يمكن أن يتغيَّر لونهما تغيرًا ملحوظًا من اللون الأخضر المزرقِّ في ضوء الشمس إلى الأحمر المُصفرِّ في الإضاءة المتوهجة. عندما اكتُشفت أول قطعة من حجر ألكسندرايت الكريم في جبال الأورال في روسيا عام ١٨٣١ سُمِّيت ظاهرة تغيُّر الألوان باسم «تأثير ألكسندرايت» تكريمًا للقيصر الروسي ألكسندر الثاني. فما السبب في هذا التغيُّر اللوني؟

الجواب: يَنقل الحجر الكريم الذي يظهر تأثير ألكسندرايت الضوء جيدًا في الجزء الأخضر المزرق والجزء الأحمر من الطيف المرئي، ولا ينقله في الجزء المحصور فيما بينهما. بالإضافة إلى ذلك، يكون نقل الضوء في الجزء الأخضر المزرق أفضل من الجزء الأحمر. وعند مشاهَدة أحد الأحجار الكريمة في ضوء الشمس المكون من الطيف المرئي كله، يغلب انتقال الضوء في الجزء الأخضر المزرق على ما تراه من الحجر الكريم. أما الضوء المتوهِّج فيَصدر عن السلك الساخن في المصباح وعادةً يكون مُعتمًا عند الطرف الأزرق من الطيف. لذلك عند مشاهدة الحجر الكريم في ضوء مصباح متوهِّج، يكون انتقال الضوء الأخضر

المزرق مُعتمًا بدرجة أكبر من انتقال الضوء الأحمر، ومن المفترض بطبيعة الحال أن يكون الحجر أكثر احمرارًا في ضوء الشمس. إلا أن الحجر يكون أكثر احمرارًا ممَّا يتوقَّعه هذا التفسير. ويَبدو أن الاحمرار الزائد نتيجةٌ لجِهاز الرؤية لديك؛ أي إنَّ جزءًا من لون الحجر يكون مصدرُه دماغك.

(٩٧) حجر الزفير النجمي

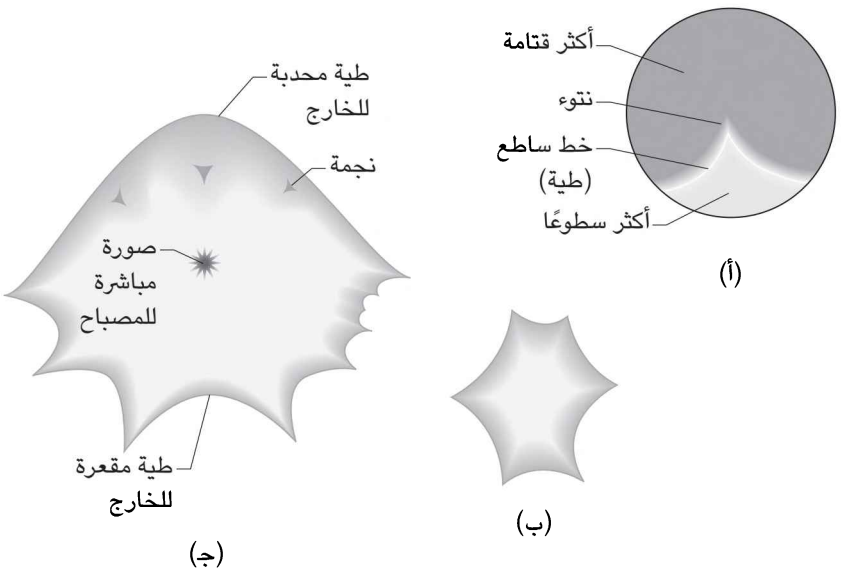
عندما تَنظر إلى حجر الزفير النَّجمي المُضاء بمصدر ضوء صغير لماذا ترى نجمة سداسية تَطفو فوق الحجر؟

الجواب: تتكوَّن النجمة بسبب الضوء المتشتِّت من إبر أكسيد التيتانيوم المتجمِّعة في واحد من اتجاهات ثلاثة مُتشعِّبة عن بعضها بزاوية ١٢٠ درجة. يُكوِّن الضوء المشتَّت من كل مجموعة خطًّا في رُؤيتك. لذلك ترى ثلاثة خطوط متقاطِعة عند مُنتصفها بحيث تُشكل أشعة النجمة السداسية. إذا قُطع الحجر على شكل قبَّة دائرية أو بيضاوية (بدلًا من أن يكون له جوانب عند قطعه) فإن النجمة تكون نسبيًّا فوق القُبة مما يُعطي مظهر الطفو. هذه الصورة «افتراضية» وهذا يعني أنها شيء يَستحضِرُه جهاز الرؤية لديك ليحسَّ بالضوء. فالنجمة المضيئة لن تظهر فوق بطاقة موضوعة على موقعها الظاهري.

(٩٨) أشكال الضوء المكونة من كأس خمر ونافذة وقطرة الماء

تَفقَّد ضوء الشمس الساطع المار عبْر كأس نبيذ أبيض ويسقط على طاولة. ستَجد أن الكأس لا يُضيء الطاولة على نحوٍ موحَّد، لكن يُغطِّيها بواحد أو أكثر من الخطوط الساطعة التي يُطلَق عليها «مُنحنيات». إنَّ انحناء الكأس يعيد توجيه الضوء ليُصدر تلك الخطوط. تَعكس النوافذ أشكالًا مشابهة على الأشياء المحيطة بها. أما أكثر المُنحنيات شيوعًا فهو على الأرجح ذلك الذي يتكون داخل فنجان القهوة الخزفي أو البلاستيكي (وليس المصنوع من الفوم). يتكوَّن المنحنى من خطين مقوَّسين ساطعَين متقاطعَين (انظر شكل ٦-٣٥أ).

يُمكن تكوين مجموعة أكبر من الأنواع المختلفة للمُنحنيات من خلال توجيه شعاع ليزر عبر طبقة من البلاستيك المجعَّد أو المُموَّج مثل ذلك الموجود في الأغطية المحيطة بالمصابيح الفلورسنت في المكاتب. وإذا حركت الطبقة البلاستيكية مع الموسيقى فستُنتِج



شكل ٦-٣٥: بند ٦-٩٨: أشكال ضوئية ناتجة عن (أ) فنجان قهوة في ضوء الشمس. (ب) وقطرة ماء صغيرة قريبة من العين. و(جـ) قطرة ماء أكبر قريبة من العين.

عرض ليزر ضوئيًّا مصغَّرًا. ويُمكنك أيضًا استخدام طبقة بلاستيكية شفافة مسطحة موضوع عليها كمية فوضوية من الغراء الشفاف. بالإضافة إلى ذلك، يُمكن رؤية المنحنيات الضوئية المتحرِّكة في قاع حمامات السباحة عندما يتحرك ضوء الشمس عبْر الدوَّامات الموجودة على سطح المياه.

أما أروع أشكال المُنحنيات الضوئية فيُمكِن رُؤيتها إذا نظرت إلى مصباح الشارع ليلًا عبْر قطرة ماء. مِن المُمكِن أن تكون القَطرة على عدسات نظارتك أو على زجاج النافذة (وفي هذه الحال قرِّب عينك جدًّا من القطرة). إذا كانت القطرة صغيرة وغير مُنتظِمة، فسيكون الشكل الذي تراه مكوَّنًا من خطوط ساطِعة مقعَّرة للخارج ومُتقاطِعة (انظر شكل ٦-٣٥ب). وإذا كانت القطرة أكبر حجمًا وعالقة على نحوٍ مُتدلٍّ، فسيكون أسفل الشكل شبيهًا بالشكل الذي تكوَّن في القَطرة الأصغر حجمًا، لكن أعلى الشكل سيكون

خطًّا ساطعًا محدَّبًا للخارج (انظر شكل ٦-٣٥جـ). أما داخل القطرة فيُوجد نجوم يُمكن أن تجعلها ترقص إذا هززت القطرة برفق. إذا استطعت تدوير القطرة حول خط رؤيتك للمِصباح، فسوف يتقلَّص الجزء السُّفلي أولًا، ثم يدخل للداخل ليكوِّن النجمة.

فما سبب تكوُّن الأشكال التي تراها في هذه الظروف المُختلفة؟ وهل يُمكن انقسام الأشكال إلى وحدات أساسية؟

الجواب: يُمكن تقسيم منحنيات الضوء إلى شكلين أساسيين؛ ألا وهما: «الطيات» (الخطوط المنحنية) و«النتوءات» (تقاطُع طيتَين). الوحدات الأساسية هي أمثلة بصرية للطريقة الرياضية التي يُطلَق عليها اسم «نظرية الكارثة». وهي تظهر لأن السطح (سواء كأس النبيذ أو الماء المُتموِّج … إلخ) يحزم الأشعة من خلال الانكسار أو الانعكاس؛ ومِن ثمَّ يركز الضوء في صورة خطوط ساطعة. وبالتحديد، فإن الضوء يتركز في صورة بنية ثلاثية الأبعاد في الهواء. وعندما تعترض عينك أو سطح مشاهدة هذا الضوء فإنه يتَّخذ شكل شريحة ثنائية الأبعاد في تلك البنية.

لهذه البِنى الثلاثية الأبعاد ثلاثة أنواع، ولكل نوع «نقطة تفرُّد» يكون فيها المُنحنى في الشريحة في أقصى درجات الانضغاط. وإذا أخذت الشريحة لمكان آخر عبْر إحدى هذه البِنى الثلاثة، فعندها تُوصف البنية بأنها «غير مطوية».

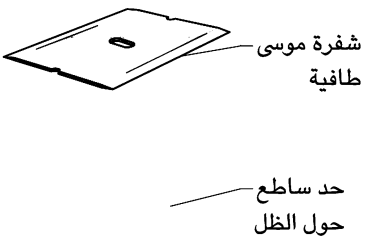
يُمكن لضوء الشمس المُنعكِس على الجدار من نافذة أحد المباني أن يُكوِّن صورة مشابهة للشكل العام للنافذة لكن ذات حافات مُنحنية تُسمَّى طيات. وهذه الطيات إما أن تكون مقعَّرة أو محدَّبة اعتمادًا على إذا ما كانت النوافذ بارِزةً للداخل أم للخارج. فعندما تكون النافذة محدَّبة للخارج، يَخلق الانعكاس شكلًا بيضاويًّا؛ وعندما تكون مقعَّرة للخارج فإنها تكوِّن صليبًا ساطعًا. أما النافذة المكوَّنة من لوحَين زجاجيَّين والمُحتوية على كلا النوعين من المُنحنيات فمن المُمكن أن تُكوِّن كلا الشكلَين.

(٩٩) الظلال ذات الحافات والأشرطة الساطعة

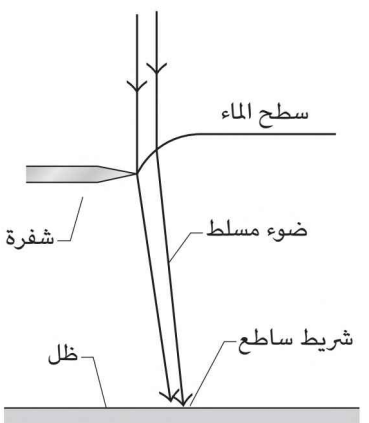
أثناء الاستحمام تَفقَّد ظِلَّ قلم رصاص مضاء بمِصباح عُلوي واحد. (إياك أن تَضع المصباح بطريقةٍ تجعلُه قد يسقط في الماء فتموت صعقًا بالكهرباء!) إذا أمسكت القلم الرصاص فوق الماء أو غمرته فيه بالكامل، فإن ظلَّه في قاع حوض الاستحمام سوف يُشبه القلم الرصاص. أما إذا غمرتَه جزئيًّا في الماء وعلى نحوٍ مائل، فسوف يُكوِّن ظلَّين

على شكل النقانق يفصل بينهما شريطٌ أخضر (انظر شكل ٦-٣٦أ). فما سبب هذا المشهد الذي يُطلق عليه «تأثير ظل النقانق»؟

(أ)



(ب)



(جـ)

شكل ٦-٣٦: بند ٦-٩٩: ظلال (أ) قلم رصاص و(ب) شفرة موسى في مياه ضحلة. (جـ) كيف يُسلط انحناء الماء قرب الشيء أشعة الضوء ليكوِّن شريطًا ساطعًا عند حافة الظل؟

بعد ذلك، أدخل قلم الرصاص عموديًّا في سطح الماء. واضبط العمق عند الطرف السُّفلي لقلم الرصاص. إذا كان الطرف قرب قاع حوض الاستحمام، فسوف يُكوِّن قلم الرصاص ظلًّا صغيرًا. لماذا تظهر نقطة ساطعة بدل الظل إذا حركت الطرف السُّفلي لأعلى نحو سطح الماء؟

اجعل موسى مسطَّحًا مزدوج الحدَّين (وليس من النوع ذي الجانب المعزَّز) طافيًا على الماء من خلال تدلية الشفرة بحرص على الماء. إذا كان العمق الماء مجرد بضعة سنتيمترات فستكون حافات ظل الشفرة عادية. فلماذا يتكوَّن لدى الحافات حدٌّ ساطع إذا كان الماء أعمقَ من ذلك (انظر شكل ٦-٣٦ب)؟ هل تُصبِح الحافات ساطعة إذا رفعت الشفرة بحيث تُصبح نسبيًّا فوق المُستوى الطبيعي للماء؟

لماذا تكوِّن الشَّعرة الطافية مجموعةً من أجزاء الظلال بعضُها حافاته عادية وبعضُها حافاته ساطعة؟

مرِّر إصبعًا أو قلم رصاص في ماء استحمام عمقُه ستة سنتيمترات على الأقل. لماذا يَظهر في قاع حوض الاستِحمام حلقات داكنة ذات حافات ساطعة. لماذا قد ترى ظلالًا مُشابهة على قاعِ حمام سباحة في ضوء الشمس عندما يَسبح فيه شخص أو يَخرج من الماء؟

الجواب: في تأثير ظلِّ النقانق يَنسحب الماء لأعلى قلم الرصاص بفِعل التوتُّر السَّطحي (نتيجةً لانجذاب جزيئات الماء بعضها إلى بعض وإلى القلم). وهذا يجعل سطح الماء مقعَّرًا. وعندما يمر الضوء بجوار قلم الرصاص وعبر سطح الماء المقوَّس، فإنه ينتشر في جزء من الظل وينتج فجوة مضيئة بين الظلال التي خلَقَها الجزء الجاف والجزء المغمور من قلم الرصاص.

ويضغط وزن شفرة الموسى على سطح الماء فيُصبح السطح محدَّبًا. يَميل الضوء المار عبر السطح المقوَّس إلى التركز، لكن إذا كانت المياه ضحلةً على نحوٍ كافٍ فإن القاع يعترض الأشعة قبل تركُّزها ويُصبح للظلِّ حافة عادية. وإذا كان الماء أكثر عمقًا، فإن الأشعة تتركز على طول حافة الظل فتمنحه حدًّا ساطعًا (انظر شكل ٦-٣٦ج). عندما ترفع شفرة الموسى، فإن الماء ينجذب إلى أعلى في شكل مقعَّر يجعل الضوء ينتشر في المنطقة الضحلة دون أي تركز؛ ومِن ثَمَّ تكون حافات الظل عادية.

يُمكن للشَّعرة الطافية أن تنتج ظلال النقانق، وحافات عادية، وحافات ساطعة اعتمادًا على طريقة تقوُّس سطح الماء على طول السطح.

فعندما تُحرِّك شيئًا عبْر الماء فإنك تترك دوامات غائرة تدور على سطح الماء. يكون الجزء الداخلي من الدوَّامة القريب من المركز مقعَّرًا وينشر الضوء فيخلق دائرة مُظلِمة في القاع الذي يكون فيه الضوء ضعيفًا. أما بعيدًا نسبيًّا عن الدوامة فإن السطح يكون محدَّبًا. يُسَلَّط الضوء المار في هذا الجزء على حافة الظل، فيَمنحها حدًّا ساطعًا. وإذا كانت المياه عميقة على نحوٍ كافٍ، فإن الحد يتمدَّد نحو شريط الضوء، وتصبح الحافات الداخلية والخارجية شديدة السطوع.

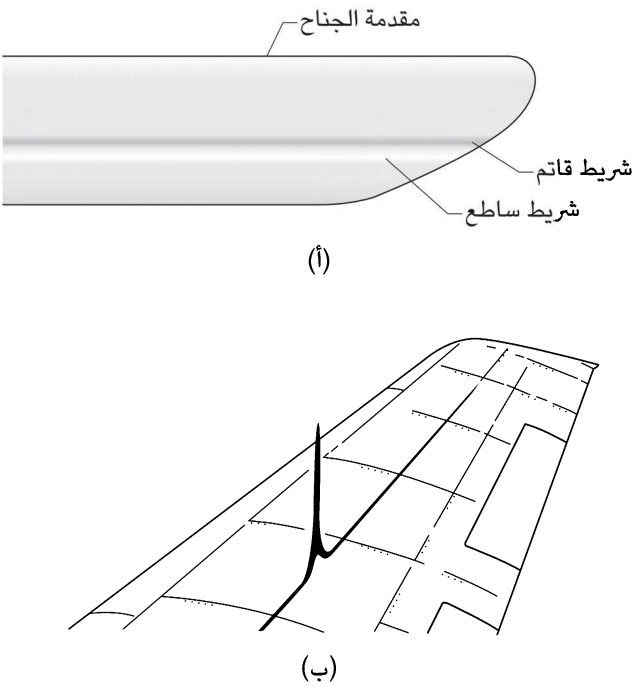
(١٠٠) أشرطة ساطعة وأشرطة قاتمة فوق جناح الطائرة

يصف إيه هيويش في تقرير عام ١٩٨٣ شريطَين أحدهما قاتم والآخر ساطِع وجدهما على امتداد جناح طائرة نفاثة أثناء الطيران (انظر شكل ٦-٣٧أ). كان عرض الشريط القاتم يَتراوح بين سنتيمتر واحد وسنتيمترَين، وكان مُنخفض التباين مع بقية الجناح الذي يُضيئه ضوء الشمس. كانت الشمس مُرتفعة بزاوية ٢٥ درجة تقريبًا فوق الحافة الخلفية للجناح، وكان الشريطان واضحَين لمدة تزيد عن ساعة. ومع هبوط الطائرة، تحوَّل الشريطان إلى الحافة الأمامية للجناح واختفيا في النهاية.

لقد رأيت أشرطة مشابهة ورأيت أيضًا ظاهرة وثيقة الصلة عندما كانت الشمس على الجانب الآخر للطائرة: كان يوجد شريط قاتم يقف مُنتصِبًا في منتصف الجناح تقريبًا، وكان يُشوِّه على نحو واضِح تفاصيل النصف الخارجي للجناح (انظر شكل ٦-٣٧ب). وكنت عندما أحرك رأسي إلى الأمام أو إلى الخلف على طول جسم الطائرة يتحرَّك الشريط أيضًا. وفي بعض الأحيان رأيت شريطَين.

فما سبب تكوُّن هذه الأشرطة؟

الجواب: لنتأمَّل الأمر من منظور الطائرة أثناء تدفُّق الهواء على جناح ثابت. يَخلق التدفُّق على الجناح «جبهة صدمة» تَنخفِض فيها سرعة الهواء القادم فجأة ومِن ثَمَّ تَزداد كثافة الهواء. تقف جبهة الصدمة عمودية على الجناح وتمتدُّ على طوله. (لو كانت جبهة الصدمة مرئيةً لأصبَحَت شبيهةً بحاجز مسامي على طول الجناح.) عندما تَنزلِق أشعة الضوء على جبهة الصدمة، فمن المُمكن أن تَنعكِسَ على نحو ملحوظ بسبب التغيُّر في كثافة الهواء. ووفقًا لما شاهَدَه هيويش فإن أشعة الضوء التي كانت متوجِّهة نحو مكان معيَّن على الجناح أعيد توجيهها بفعل انكسار الضوء إلى مكان آخر أبعد إلى الوراء من الجناح؛



شكل ٦-٣٧: بند ٦-١٠٠: (أ) شريط ساطع وشريط قاتم على طول جناح الطائرة. (ب) شريط قاتم يمتد لأعلى من الجناح.

ولذلك يتكون شريط ساطع هناك ويتكوَّن شريط قاتم في المكان الذي كان سيَسقُط فيه الضوء لولا جبهة الصدمة.

أما الشريط القاتم الإضافي الذي وجدتُه فقد كان ناتجًا أيضًا عن أشعة الضوء المنزلقة على جبهة الصدمة والصادرة عن تفاصيل الجناح المُضاء بضوء الشمس. فعندما مرَّت الأشعة الآتية من تفاصيل الجناح المُجاوِرة عبْر نقطة الصدمة، انحنَت بكميات مختلفة. وانتشار الأشعة الناتج جعل المنطقة الواقعة بين التفاصيل قاتمة نسبيًّا، وكوَّن تجمع هذه النقاط القاتمة الشريط القاتم الذي رأيته.

قصة قصيرة

(١٠١) أمواج صدمية من سيارة ثراست إس إس سي النفاثة

عندما كسَرَت السيارة ثراست إس إس سي المزوَّدة بمُحرِّك نفاث الرقم القياسي للسرعة على الأرض عام ١٩٩٧ أثناء السباق على صحراء الصخرة السوداء في نيفادا، كانت سرعتها «خارقة للصوت» أي (أسرع من سرعة الصوت). لم يَقتصِر الأمر على سماع الجمهور دويًّا مرتفعًا ناتجًا عن اندماج الأمواج الصدمية من أجزاء مختلفة من السيارة، بل التقطت الصور الفوتوغرافية للسيارة علامات الأمواج الصدمية نفسها. كان من المفترض أن نرى في هذه الصور الفوتوغرافية منظرًا غير مشوَّه للتلال الواقعة خلف مسار السيارة، لكن عندما مرت أشعة الضوء القادمة من هذه التلال عبْر الموجة الصدمية في طريقها إلى الكاميرا، تغيَّرت اتجاهات انتقالها نسبيًّا بسبب اختلاف كثافة الهواء داخل الأمواج الصدمية. وأدَّى التغير في الاتجاه إلى تشويه صورة التلال في الخلفية؛ ومِن ثمَّ ظهرت الأمواج الصدمية. وفي إحدى هذه الصور الفوتوغرافية أستطيع أن أرى أربع موجات صدمية ممتدة لأعلى من السيارة.

(١٠٢) كاميرا ثقب الدبوس وكاميرا نقطة الدبوس

تتكون كاميرا ثقب الدبوس من فتحة صغيرة دائرية لا بد من مرور الضوء عبرها للوصول إلى الفيلم. فكيف يُمكِن لهذه الطريقة تكوين الصورة على الفيلم؟ كم يجب أن يَبلغ حجم ثقب الدبوس؟ يمكن لبعض الأسطح العاكسة الصغيرة، مثل شظية زجاج، أن تعمل بالطريقة نفسها لإنتاج الصورة.

يُمكنك عمل نسخة أكبر من كاميرا ثقب الدبوس من خلال السماح للضوء بالمرور من فتحة صغيرة في سلك النافذة إلى غُرفة مُظلمة، وقد ترى على الحائط البعيد صورة مقلوبة للمنظر الموجود خارج النافذة. كانت هذه التقنية أمرًا عجيبًا تمامًا في نظر الناس قديمًا.

نشر باتريك إيه كيب الأستاذ في جامعة نورث كارولينا في بيمبروك نسخة مُثيرة من هذه الظاهرة باستخدام كرة البينج بونج. في هذه التجربة تقوم باختصار بما يلي: (أ) ادهن نصف كرة البينج بونج باللون الأسود. (ب) اثقب حفرة قطرها مليمتران في مركز الجزء المسود. (ج) لف ورقة سوداء من الورق المقوَّى على شكل أسطوانة أصغر

نسبيًّا من الكرة. (د) ضع الكرة في أحد طرفَي الأسطوانة، واجعل نصفها الأسود مواجهًا للخارج. (هـ) الصق أسطوانة الورق المقوَّى وثبِّت الكرة في مكانها بمادة لاصقة دون أن تسدَّ الثقب. (و) انظر في الطرف المفتوح من الأسطوانة ووجه الطرف البعيد نحو مَشهد ساطع الإضاءة. سترى صورة مقلوبة للمشهد على جدار الكرة داخل الأسطوانة.

تتكوَّن كاميرا نقطة الدبوس من نقطة صغيرة مُعتمة موضوعة أمام فيلم (يُمكِن رسم النقطة على رقاقة بلاستيكية شفافة). والفتحة الكبيرة الموجودة أمام النقطة تعمل كفتحة الكاميرا التي تُحدِّد مدى الضوء المار إلى النقطة. فما نوع الصورة المتكوِّنة على الفيلم من هذه الطريقة؟

يمكنك أيضًا إعداد تجربة تَحجُب فيها نقطة الدبوس جزءًا من الضوء الصادر عن أنبوب فلوري يضيء شاشة. فما نوع الصورة المتكوِّنة على الشاشة؟

الجواب: ضع مصدر ضوء صغيرًا أمام كاميرا ثُقب الدبوس. تتعرض الأمواج الضوئية الصادرة من مصدر الضوء إلى الحيود عبْر ثُقب الدبوس؛ ومِن ثَم تَنتشر من ثقب الدبوس وتتعرَّض للتداخل فيدعم بعض الأمواج بعضها بعضًا وتميل موجات أخرى إلى إلغاء بعضها بعضًا. وتكون النتيجة بسيطة؛ حيث يُكوِّن الضوء نقطة صغيرة ساطعة على الفيلم. هذه النقطة هي صورة للمصدر، وتكوِّن مصادر الضوء الصغيرة الأخرى مثل هذه الصور أيضًا. إذا كان ثقب الدبوس كبيرًا جدًّا، فإن الصور تتداخل ربما لدرجة تحول دون تمييزها. ويقل التداخل إذا أصبح ثقب الدبوس أصغر، ولكن في هذه الحالة سوف تَنخفِض أيضًا شدة إضاءة كل صورة. إذن، ما هو أفضل حجم لثقب الدبوس؟

يعتمد الجواب على طريقة انتشار الموجة الضوئية من الجسم أثناء انتقالها إلى الفيلم. عندما تصل الموجة إلى سطح ثقب الدبوس يُقال إنها تنقسم إلى مناطق دائرية تتمركز كلٌّ منها على ثقب الدبوس. يصل الضوء عبْر المنطقة المركزية إلى الفيلم «مُتطاورًا» (أي متزامنًا)؛ ولذلك تميل الموجات إلى تعزيز بعضها بعضًا (أي يحدث لها «تداخل بنَّاء») وتُكوِّن صورة ساطعة.

إذا كان ثقب الدبوس متطابقًا مع المنطقة المركزية بالضبط، فستكون الصورة في أعلى معدلات السطوع. وإذا كان ثقب الدبوس أصغر، فإنه يحجب بعض الضوء المار عبْر المنطقة المركزية، وتكون الصورة أكثر قتامة. وإذا كان ثقب الدبوس أكبر، فإنه يَسمح بوصول جزء من ضوء المنطقة التالية إلى الصورة على الفيلم. ونظرًا لأن أشعة الضوء تسلك مسارات قاتمة أكثر طولًا فإنها تصل «غير متطاورة» مع أشعة المنطقة المركزية (على نحو غير مُتطاور). ونتيجة لذلك، فإن الموجات يلغي بعضها بعضًا (أي تتعرض إلى

«تداخل هدَّام»)؛ مما يجعل الصور قاتمة. والحل الأفضل يتمثل في أن يكون ثقب الدبوس صغيرًا على نحو يكفي لمرور الضوء عبْر المنطقة المركزية فقط. في هذه الحالة ستكون الصورة ساطعة وحادة على نحوٍ كافٍ.

تُلقي النقطة المعتمة في كاميرا نقطة الدبوس نقطة ظلِّية على الشريط لكل مصدر ضوء صَغير على الجسم المواجه للكاميرا. وتكون هذه النقاط الظلِّية مجتمعة «صورة ظلِّية» (أو «صورة سالبة») للجسم.

وإذا وقعت النقطة بين أنبوب فلوري وشاشة، فإن الصورة الظلِّية للأنبوب تظهر على الشاشة. فالنقطة تلقي ظلًّا لكل جزء من أجزاء الأنبوب على الشاشة، وهذه الظلال مجتمعة تكوِّن صورة قاتمة للأنبوب. ولا تكوِّن الصورة مظلمة بالكامل لأن معظم الأنبوب ما زال يُضيء كل جزء فيها.

(١٠٣) الصور الشمسية تحت الشجرة

أثناء كسوف الشمس، ما الذي ينتج صورًا كثيرة صغيرة للشمس في الظل الممدود من الشجرة؟ هل يوجد صور للشمس في ظل الشجرة في أوقاتٍ أخرى؟ لماذا تحت ظل أوراق الأشجار العالية تظهر صور ظلية للأوراق تكون ذات حافتين متداخلتين في بعض الأحيان؟ لماذا لا تظهر تلك الصور الظلية أسفل الأشجار الأقصر طولًا؟

الجواب: تظهر صور الكسوف بسبب الثقوب الصغيرة الموجودة في أوراق الشجر أو بين الأوراق المُتجاوِرة. يعمل كل ثقب عمل كاميرا ثقب الدبوس (انظر البند السابق) حيث يُلقي صورة الشمس على ظل الشجرة على الأرض. تظهر الصور أيضًا حتى في حالة عدم وجود الكسوف، لكن يكون من الصعب تمييزها؛ لأن الوهج العام لضوء الشمس القادم من السماء والمنظر الطبيعي يضيء الظل جزئيًّا. وأثناء الكسوف يقلُّ الوهج بسبب الظلام العام وعندها تزداد القُدرة على إدراك الصور. وفي كلتا الحالتَين تكون رؤية الصور على سطح مُستوٍ أسهل من رؤيتها على أرض غير مستوية أو على أرض عشبية.

أما ظل ورقة الشجرة الذي نراه أسفل ظلِّ أوراق أشجار عالية فيتكوَّن بسبب ورقة توجد على ارتفاع مُنخفِض ينيرها ضوء الشمس المتدفق من ثقب أعلى في هذه الظلة. وإذا أضاء ثُقبان علويان ورقة شجرة موجودة على مستوى ارتفاع أقل، فمن الممكن أن ترى صورتَين ظلِّيتَين مُتداخلتَين، فتكون صورة حافة الورقة موضوعة داخل صورة أخرى لحافة الورق.

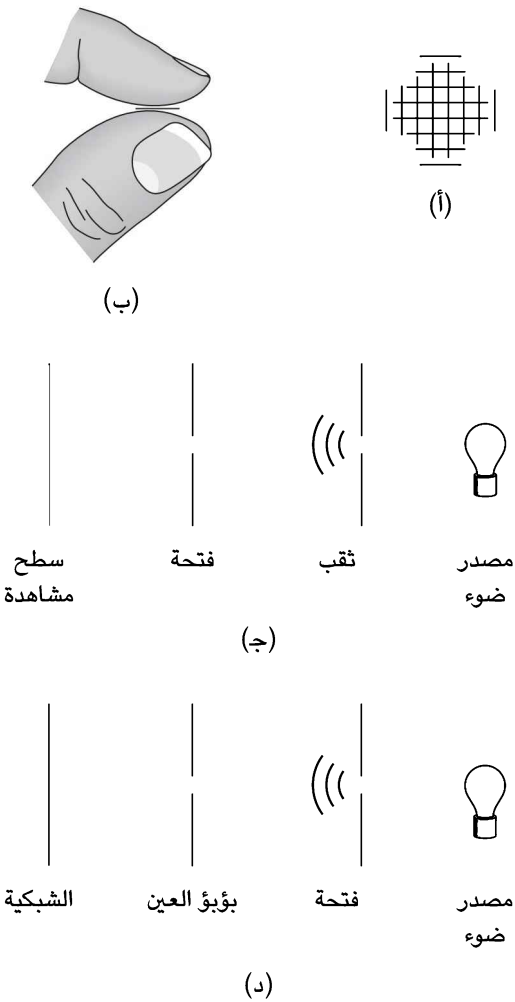
(١٠٤) الأضواء عبْر سلك النافذة والخطوط بين الإصبعين

إذا رأيت ليلًا عبْر سلك النافذة مصباحًا بعيدًا ساطعًا يبعد عنك عدة أمتار على الأقل، فسيُكوِّن الضوء الصادر عن المصباح نسقًا من الخطوط المظلمة والساطعة (انظر شكل ٦-٣٨أ). فما سبب هذا النسق؟ يُمكن أن ترى نسقًا مشابهًا إذا نظرت إلى مصباح ساطع عبْر قماش معظم المظلات الشائعة. وفي بعض الحالات من المُمكن أن ترى ألوانًا. إذا نظرت ما بين الإبهام والسبابة وهما شبه متلامستَين في غرفة ساطعة الإضاءة، فلماذا ترى بينهما عددًا من الخطوط المظلمة (انظر شكل ٦-٣٨ب)؟

الجواب: عادةً ما يَرجع ظهور أنماط الخطوط القاتمة والساطعة إلى حيود الضوء، وهذه الظاهِرة تجعل الضوء يتوهَّج عند مروره عبْر فتحة ضيقة أو أمام شيء ضيق. بالإضافة إلى ذلك، فإن الموجات في الضوء المتوهِّج تكون «متطاورة» (أي متزامنة) عند زوايا معينة وتُعزِّز بعضها البعض (أي يحدث لها تداخل بنَّاء)، فتصدر خطًّا ساطعًا. وعند زوايا أخرى تكون الموجات «غير متطاورة» (أي غير متزامنة) ويميل بعضها إلى إلغاء بعض (أي يحدث لها تداخل هدَّام)، فتصدر خطًّا قاتمًا. وإذا سقط هذا الضوء المتوهج على سطح مشاهدة عديم الملامح فإن الخط الساطع والخط القاتم يُكوِّنان نسقًا.

غير أن هذا النسق لا يظهر إلا إذا كان الضوء المتَّجه صوب الفتحة الضيقة «مترابطًا»، أي لا بد أن تكون الموجات متزامنة (أو شبه ذلك) قبل أن تتعرَّض للحيود. الضوء الصادر عن معظم مصادر الإضاءة التقليدية مثل المصباح الكهربائي، فهو «غير مُترابط»؛ فالموجات تتولد عشوائيًّا بدون أي تناسق. يمكن تكوين الضوء المترابط من خلال تمرير الضوء غير المترابط عبْر ثقب (انظر شكل ٦-٣٨جـ). ونظرًا لصِغَر الثقب، فإن كل الموجات الضوئية المارَّة عبره تكون شبه مُتطابِقة؛ ومِن ثمَّ تكون شبه مُتزامِنة. وعندما يَخترق الضوء فتحة ضيقة كما هي الحال في قماش المظلات أو في سلك النافذة، فإن الفتحة تجعل الضوء يحيد ومِن ثَمَّ يتكون نسق الحيود.

إذا أزلت الثقب بحيث يسقط الضوء غير المترابط الصادر عن مصدر الضوء (المصباح مثلًا) مباشرةً على الفتحة الضيقة، فإن نسق الحيود يختفي. وسوف يستمر الضوء في التوهُّج عند الفتحة الضيقة، لكن يتغير التوهج بين لحظة وأخرى مع مرور موجات الضوء غير المُتناسقة مرورًا عشوائيًّا عبْر الفتحة. وسترى على سطح المشاهدة إضاءة لا ملامح لها.



شكل ٦-٣٨: بند ٦-١٠٤: النسق المرئي عبْر (أ) شبكة، و(ب) بين الإبهام والسبابة. (جـ) الضوء المرسل عبْر ثقب دبوس يضيء فتحة ضيقة فينتج نسق حيود على سطح المشاهدة. (د) الضوء المرسل عبْر الفتحة نفسها يضيء بُؤبؤ العين فينتج نسقَ حيود في الشبكية.

وإذا افترضنا أن العين حلَّت محل سطح المشاهدة وأنك ترى الضوء مباشرةً من الفتحة الضيقة، فسوف تكون الفتحة بمنزلة الثُّقب في الترتيب التقليدي (انظر شكل ٦-٣٨د). ونظرًا لصِغَر الفتحة، فإن الموجات الضوئية المُنتشِرة منها تكون شبه مُتزامنة (مترابطة) عندما تصل بؤبؤ العين. ولذلك تتعرَّض للحيود عند المرور عبْر بؤبؤ العين وتنتج نسق حيود مرئيًّا على الشبكية. وترى هذا النسق عندما تنظر إلى مصباح بعيد عبْر سلك النافذة أو قماش المظلَّة ليلًا أو بين إصبعي الإبهام والسبابة عند وضعهما متقاربتَين.

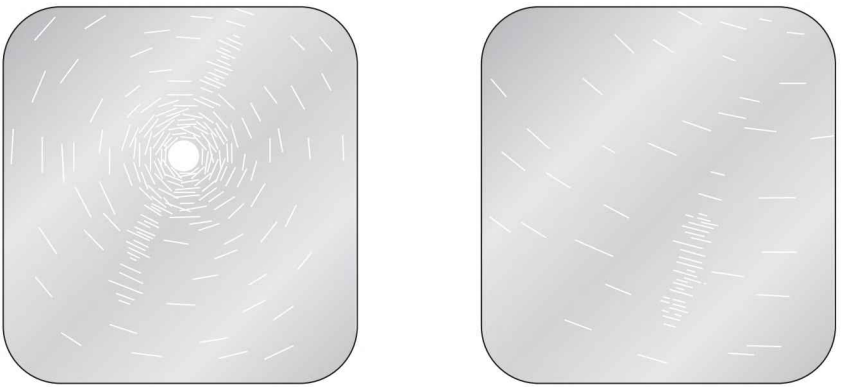
(١٠٥) خدوش ساطعة وشِباك ملونة

عندما تنظر نحو الشمس عبْر نافذة طائرة أو أحد المباني، لماذا يكون لدى النافذة خُدوش ساطعة مرتَّبة في صورة دوائر متَّحدة المركز (انظر شكل ٦-٣٩أ)؟ لماذا تبدو الخدوش أحيانًا مثل خطوط ضوء مُشيرة إلى الشمس؟ لماذا عادةً لا ترى تلك الخدوش عندما لا تنظر نحو الشمس؟

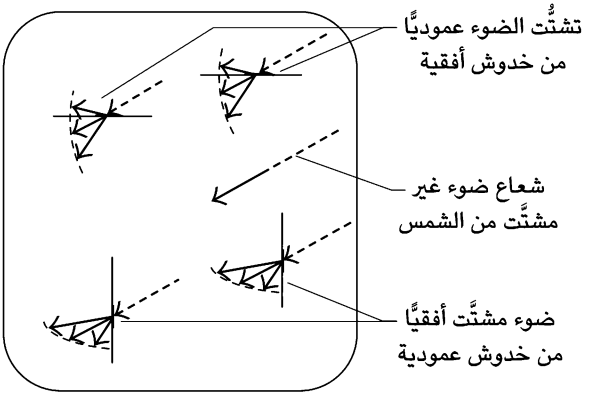
إذا وُجدَت شبكة عنكبوت قريبة من نظرك للشمس فلماذا تبدو ملونة، ولماذا تَختلف الألوان إذا غيرت زاوية رؤية شبكة العنكبوت؟ (قد تبدو الألوان باهتة؛ وستتمكَّن من رؤيتها على نحو أفضل في حالة وجود خلفية قاتمة لشبكة العنكبوت، لكن لا بد أن تكون شبكة العنكبوت في ضوء الشمس المباشر.)

الجواب: إنَّ ترتيب الخدوش في صورة دوائر متحدة المركز ليس إلا وهمًا. فمن المحتمل أن تحتوي النافذة على عدد هائل من الخدوش القصيرة العشوائية الاتجاهات التي يَلمع بعضها فقط أمام ناظرَيك وهذا ما يَخلق الوهم. وعندما يتشتَّت الضوء من الخدش، يكون التشتت مقتصرًا على شكل مروحة مسطحة في سطح عمودي على طول الخدش (انظر شكل ٦-٣٩ب). ولرؤية الخدش يجب أن تكون عيناك في المروحة.

وإذا كان الخدش على اليسار أو اليمين مباشرةً من الشمس، فسوف تكون في مروحة الضوء المشتَّت فقط إذا كان الخدش عموديًّا. وإذا كان الخدش فوق الشمس أو تحتَها، فسوف تكون في مروحة الضوء المشتَّت فقط إذا كان الخدش أفقيًّا. ويُمكِنُنا تعميم هذا المطلب. فمن أجل رؤية الخدش يجب أن يكون مماسيًّا لدائرة حول منظورك للشمس. وهكذا، عندما ترى الكثير من الخدوش القصيرة تتوهَّم أنها موجودة فعليًّا في دوائر



(أ)



(ب)

شكل ٦-٣٩: بند ٦-١٠٥: (أ) نسق خدوش ساطعة متحدة المركز في نافذة متجهة نحو الشمس وبعيدًا نسبيًّا عنها. (ب) تشتُّت الضوء بفعل الخدش. قدوم الضوء من خارج النافذة وتشتته في الغرفة.

محيطة بالشمس. أما إذا كانت هذه الخدوش مجتمعة، فمِن المُمكن أن تبدو وكأنها تُكوِّن خطًّا شعاعيًّا يمتدُّ من الشمس.

يُمكن أن تكون في مروحة الضوء المشتَّت من الخدش فقط عندما يكون الخدش قريبًا من رؤيتك للشمس. وبدون ذلك فلن ترى الضوء المشتَّت، وفي هذه الحالة عادة ما تُصبح الخدوش غير ملحوظة.

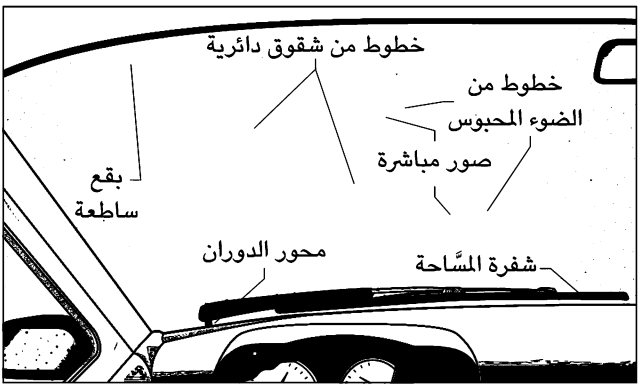
أما حالات نوافذ الطائرات المخدوشة المتطرِّفة فحدثَت عندما حلَّقت الطائرة بالصُّدفة في عمود رماد أحد البراكين المُنفجِرَة. على سبيل المثال، حلَّقت طائرة جامبو نفاثة عبر عمود رماد بركان جبل جالونجونج في إندونيسيا، مما تسبَّب في تعطُّل المحرِّكات الأربعة واحتكاك الرمال بنوافذ مقصورة الطيار. تمكَّن الطيار من إعادة تشغيل ثلاثة من المحركات وتوجَّه إلى الهبوط الاضطراري في جاكرتا في الظلام. إلا أنه لم يستطع الرؤية من خلال النوافذ. واضطرَّ إلى الاعتماد على الطيار المساعد الذي كان يُحدِّق خلال مليمترات قليلة غير مخدوشة في النافذة محاولًا محاذاة الطائرة مع أضواء المدرج.

عندما تُوجد شبكة عنكبوت بالقرب من منظورك للشمس فإن الضوء يتشتَّت (يحيد) من الخيوط الحريرية وأيضًا من الكرات اللزجة التي يتركها العنكبوت على بعض الخيوط للإيقاع بالفريسة. والتشتُّت الصادر عن الخيوط الحريرية يُشبه كثيرًا التشتُّت الصادر عن الخدش الموجود على النافذة؛ فالضوء المشتَّت يتوهج للخارج في المروحة. أما التشتُّت في الكرة اللزجة فهو على هيئة مخروط من الضوء. وفي أي نوع من نوعَي التشتُّت يختلف المدى الزاوي للتشتُّت باختلاف الطول الموجي، وهذا يَعني أن التشتُّت يُمكن أن ينشر ضوء الشمس الأبيض القادم إلى نسق ألوان مميَّزة. ومع تغيير منظورك لشبكة العنكبوت، يُمكنك تغيير الألوان التي تراها. وانتشار الألوان نفسه يُمكن أن يجعل الخدوش الساطعة على النافذة تبدو ملوَّنة.

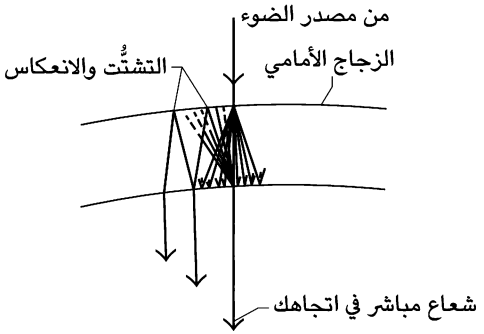
(١٠٦) الخطوط الساطعة على الزجاج الأمامي للسيارة

عند القيادة تحت المطر ليلًا، تُصدر مصابيح الشوارع وغيرها من مصادر الضوء خطوطَ ضوء أمام الزجاج الأمامي للسيارة (انظر شكل ٦-٤٠أ). تكون هذه الخطوط إما مستقيمة وإما منحنية، ومتَّجهة نحو نقطة مشتركة، وتدور حول هذه النقطة أثناء تحرُّك السيارة. يُمكنك أيضًا أن ترى هذا الخط نهارًا إذا نظرت إلى الشمس عبْر الزجاج الأمامي للسيارة.

غالبًا ما يَبدو الخط الصادر عن المصباح أو الشمس عميقًا؛ فيبدو مثل طريق مستقيم يَقود من الزجاج الأمامي للسيارة إلى مصدر الضوء. وعندما يكون الخط مُنحنيًا،



(أ)



(ب)

شكل ٦-٤٠: بند ٦-١٠٦: (أ) الأشكال المرئية على الزجاج الأمامي للسيارة. (ب) الانعكاس الداخلي للضوء داخل الزجاج الأمامي للسيارة.

فإنه يشبه طريقًا يمتد على طول أحد الأودية صعودًا إلى أحد التلال. فما سبب هذا الخط وما الذي يَمنحُه العُمق؟

يُمكن رؤية مجموعة أخرى من الخطوط أو البُقَع الباهتة على زجاج السيارة الأمامي ليلًا. يُمكن أن تكون البقع موزعة عشوائيًّا لكنها تكون منظمة أحيانًا في شكل خط

مستقيم أو مُنحنٍ. وأحد أنواع هذه الخطوط يبدو كما لو كان يمرُّ عبْر مصدر الضوء مثل الخط الموصوف للتو، لكنه ليس متجهًا نحو أي نقطة معينة على زجاج السيارة الأمامية وفي بعض الأحيان يُمكن رؤيته عبْر أنواع أخرى من النوافذ. ومن المُمكن أن ترى هذه الخطوط أيضًا عبْر النظارات.

الجواب: تحفر مسَّاحة الزجاج خطوطًا غائرة دائرية في المادة اللزجة المُلتصقة بزجاج السيارة الأمامي. ويُشتِّت الخط الغائر ضوء المصباح في صورة مروَحة مُسطَّحة عمودية على طول الخط الغائر (انظر البند السابق). وتجمُّع الضوء المشتَّت من عدد كبير من الخطوط الغائرة المُتجاورة يُكوِّن خطًّا مرئيًّا. واعتمادًا على انحناء الزجاج الأمامي يُمكن أن يكون الخط مستقيمًا أو منحنيًا. وفي أيٍّ من الحالتين فإن الطرف السُّفلي من الخط يُشير نحو مركز الدوائر؛ أي إنه يشير إلى نقطة دوران المسَّاحة.

يبدو الخط عميقًا لأن كل عين ترى في واقع الأمر خطًّا مُختلفًا. ويكون الفاصل بين الخطين أصغر ما يكون عند الطرفَين القريبَين من منظورك إلى مصدر الضوء، ويكون أكبر ما يكون بالقُرب من نقطة دوران المسَّاحة. وإذا مزج عقلك الصورتين في صورة واحدة فسوف يرى الأجزاء ذات الفواصل الكبيرة على أنها أقرب من الأجزاء ذات الفواصل الصغيرة. وقد يبدو مظهر العُمْق غريبًا على مصدر إضاءة واسِع، لأنَّ الخط في هذه الحالة سيكون أوسع ما يكون قرب منظورك لمصدر الإضاءة، لكن هذا الجزء من الخط سيَبدو أكثر بُعدًا. والنتيجة هي النقيض تمامًا من المسافة والعرض الظاهرَين اللذَين قد تراهما في مسار حقيقي يَمتدُّ بعيدًا عنك.

والنوع الثاني من الخطوط التي يُمكن أن تراها على الزجاج الأمامي للسيارة وعلى أنواع أخرى كثيرة من الزجاج أو البلاستيك سببه هو انعكاس الضوء داخل الطبقة (انظر شكل ٦-٤٠ب). فالضوء يبدأ في الشعاع المتَّجه مباشرة من مصدر الضوء إلى عينَيك. وعندما يمر الشعاع في الطبقة ينعكس بعضه داخليًّا. ومِن المُمكن أن يَنعكس ذلك الضوء مرات كثيرة داخل الطبقة، وعند كل نقطة انعكاس يتسرَّب بعض الضوء للخارج. وإذا كانت الطبقة منحنية وكان الجانب المقعر مواجهًا لك، فمِن المُمكن أن ترى جزءًا من الضوء المتسرِّب عند النقاط على جانب منظورك المباشر لمصدر الضوء. وما تراه هو خطٌّ ممتد مِن المنظور المباشر. أما إذا حجبتَ بطريقة ما الشعاع المباشر مِن الوصول إلى الزجاج، كأن تمدَّ إصبعك خارج نافذة السيارة وتضعها أمام الزجاج الأمامي، فسوف يَختفي الخط. (بطبيعة الحال يجب أن تفعل ذلك والسيارة متوقِّفة، فإجراء هذه التجربة لا يَستحِق خسارة ذراعِك في حادث مروري.)

أما البُقَع الساطعة فهي بسبب الانعكاسات أو التشتُّت من مناطق المادة اللزجة. وإذا كانت المنطقة مُنحنية، فسوف ترى بعضًا من الضوء ومِن ثَمَّ ترى البقعة.

(١٠٧) انعكاسات أسطوانة الفونوغراف

ضع أسطوانة مصنوعة من الفينيل على طاولة واضبطها بحيث يكون مركزها في المنتصف تقريبًا بينك وبين مصباحٍ مكتبي صغير يشعُّ ضوءُه على الأسطوانة. اجعل الغرفة مظلمة، وأَغمِض إحدى عينَيك وانظر إلى الانعكاسات الموجودة على الأسطوانة. ستجد أنَّ السطح ليس ساطعًا بالتساوي ولا توجد عليه بقعة واحدة ساطعة مثلما سيَحدُث على المرآة. بل ستجد نسقًا من الخطوط الضيقة الساطعة.

وبتعديل مكان الأسطوانة يُمكنك تكوين نسق يُشبه الصليب أو نسق يَحتوي على خطٍّ أو خطَّين من القطوع الزائدة على الأسطوانة. وفي كلتا الحالتين يمر خط واحد على الأقل عبر مركز الأسطوانة. وفي بعض الأحيان سترى بقعة شديدة السطوع على الأسطوانة، وتوجد دائمًا على الخط المار بالمركز. وأحيانًا يُمكن أن ترى بقعًا ساطعة مشابهة على الستائر المعدنية عندما تنظر عبرها على مصباح الشارع ليلًا. هل يُمكنك تفسير هذه المشاهدات؟

الجواب: إنك ترى الضوء فقط من الأماكن التي تَحتوي بها الحُفَر في الأسطوانة على الميل المناسب لعكس الضوء نحو عينَيك. فكل الحفر تعكس الضوء لأعلى حتى ارتفاع عينَيك، لكن وحدها الحفر ذات الميل المناسب هي ما تعكس الضوء رأسيًّا وأفقيًّا بحيث ترى العينُ الضوء. وتوجد هذه الحفر على طول الخطوط الساطعة للنسق الذي تراه. أما البقعة شديدة السطوع فهي انعكاس مرآتي للمصباح.

تُشبه أنماط الانعكاس الموجودة على الأسطوانة خط الضوء الذي تراه على الزجاج الأمامي للسيارة (انظر البند السابق)، وإذا كان مصدر الضوء ساطعًا بما يَكفي، فقد ترى العمق في الأنماط كما هي الحال في خطِّ الضوء على زجاج السيارة الأمامي.

(١٠٨) الألوان على الأشياء ذات الحفر الضيقة

عندما يضيء الضوء الأبيض أحد الأقراص الموسيقية أو أقراص الأفلام أو أنواعًا معينة من الورق المحتوي على أشكال زخرفية تكون الانعكاسات ملوَّنة بشدة. ومن المُمكن أن ترى الألوان أيضًا من أسطوانة فينيل موسيقية إذا أَمَلْتَها في الضوء على نحوٍ صحيح.

على الرغم من أن مِصباح الشارع قد يبدو أنه يشعُّ إما الضوء الأبيض أو الضوء الأصفر، فمن الممكن رؤية وتصوير الألوان العديدة المكوِّنة للإشعاع إذا أضفت إلى عدسة الكاميرا الفوتوغرافية «محزز حيود» (وهو قطعة بلاستيكية ذات حفر أو شقوق ضيقة كثيرة). تبدو الصورة المُباشِرة للمِصباح كما هي مرئية عبْر الكاميرا عادية، إلا أنَّ طيفًا من الألوان المكوِّنة يمتدُّ إلى الخارج على كلا جانبَي هذا المنظور.

وفي كلتا الحالتَين، لماذا يُصبح الضوء المبدئي ملوَّنًا في النهاية؟

الجواب: يتعرَّض الضوء المشتَّت (المحيد) من خلال البِنى ذات الحفر الضيقة إلى كلٍّ من «التداخل البنَّاء» و«التداخل الهدَّام». تأمل البقعة التي تبدو حمراء. عندما يتشتَّت الضوء الأبيض من على تلك البقعة تتَّجه المكونات الحمراء نحو عينَيك وتتعرَّض لتداخُل بنَّاء؛ أي إن الموجات الحمراء تُصبح متطاورة ويُعزِّز بعضها بعضًا. أما المكونات اللونية الأخرى التي تتشتَّت نحوك من البقعة فتتعرض لتداخل هدَّام؛ أي تُصبح الموجات غير متطاورة وتميل إلى إلغاء بعضها بعضًا. ولذلك، فما تراه من البقعة هو ضوء يغلب عليه الأحمر. أما البقع الأخرى ذات الزوايا المُختلفة في منظورك فتُرسل لك ضوءًا يَغلب عليه الألوان الأخرى.

ولكي يُوجد انفصال ملحوظ بين الألوان لا بد أن يكون انفصال الحفر في منظورك (ومن في «منظور» المصباح) صغيرًا وتقريبًا في حجم الطول الموجي للضوء المرئي. إذا لمع الضوء مباشرة على أسطوانة الفينيل ونظرتَ أيضًا إلى أسفل مباشرة، فسوف تكون المسافات الفاصلة بين الحفر على الأسطوانة واسعة جدًّا على نحو يَحول دون تكوُّن الألوان، ولن ترى إلا سواد بلاستيك الأسطوانة المصبوغ. ولفَصلِ الألوان المكوِّنة للضوء الأبيض، يجب أن تضبط شعاع الضوء المبدئي ومنظورك للأسطوانة بحيث يكونان تقريبًا على طول سطح الأسطوانة. وفي هذه الحالة ستكون المسافات بين الحفر على طرفَي الأسطوانة القريب والبعيد قريبةً في منظورك (ومنظور المصباح) على نحو يكفي للفصل بين الألوان.

(١٠٩) الوسائل المتغيرة بصريًّا المانعة للتزييف

من السمات الأمنية في بطاقات الائتمان ورُخَص القيادة وأنواع كثيرة من بطاقات التعريف الأخرى «العرض المتغير» الذي يتغير عند إمالة البطاقة. وغالبًا ما يُطلَق على هذا العرض المتغير «هولوجرام»، وهو نوع من التصوير الفوتوغرافي الذي يمنح عمقًا ومنظورًا للصور.

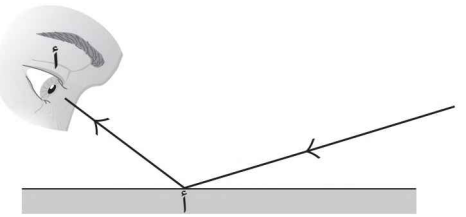
في الواقع، كانت النسخ الأولى من هذه العروض المتغيِّرة على البطاقات الائتمانية من نوع الهولوجرام. إلا أن استخدام عروض الهولوجرام كإجراء أمني لم يكن ناجحًا للغاية لسببَين. أولًا: كانت عروض الهولوجرام مُعتمة ومُظلِمة وصعبة الرؤية في إضاءة المتاجر التقليدية. ثانيًا: الأسوأ من ذلك كان سهولة الحصول على نسخ أخرى منها بالتزييف. أما الآن فالعروض المُتغيِّرة ساطعة وواضحة ومن السهل رؤيتها في إضاءة المتاجر. والأفضل من ذلك أنه من الصعب للغاية تزييفها. فكيف أصبحت العروض المُتغيِّرة ساطعة وغير قابلة للتزييف؟

الجواب: معظم بطاقات الائتمان تَحمِل حاليًّا «رسوميات مُتغيِّرة بصريًّا» تُنتِج صورة من خلال حيود الضوء المنتشر (مثل ضوء المتاجر) عن طريق مناطق دقيقة الملمس يُطلَق عليها محزِّزات الحيود. ترسل محززات الحيود مئات، بل آلاف، الموجات الضوئية. والشخص الذي يُشاهد البطاقة يرى بعضًا من هذه الموجات، ويكون الضوء المتجمِّع صورة افتراضية (خيالية) تُمثِّل جزءًا من شعار البطاقة الائتمانية إن جاز التعبير. على سبيل المثال، في الشكل (٦-٤١أ) تنتج محززات الحيود عند النقطة (أ) صورة معيَّنة عندما يكون المشاهد عند الاتجاه (أ)، وفي الشكل ٦-٤١ب تنتج محززات الحيود عند النقطة (ب) صورة مختلفة عندما يكون المشاهد عند الاتجاه (ب). ويرجع سطوع ووضوح هذه الصور إلى تصميم محززات الحيود على نحو يُتيح مشاهدتها في الضوء المنتشر.

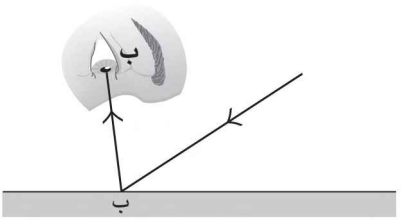
من الصعب جدًّا تصميم الرسوميات المتغيرة بصريًّا لأن المهندسين البصريِّين يحتاجون إلى العمل على نحو معكوس عند تصميم أحد الرسوميات التي مِن بينها الشعار على سبيل المثال؛ إذ يجب على المهندسين تحديد صفات محزز الحيود عبْر الرسوميات المتغيرة بصريًّا من أجل رؤية صورة معينة عند النظر من مجموعة زوايا معينة، وظهور صورة مختلفة عند النظر من مجموعة زوايا مشاهَدة مختلفة. هذا العمل يتطلب برمجة حاسوبية معقدة. وبمجرد تصميم الرسوميات المتغيرة بصريًّا تكون بِنيَتُها بالغة التعقيد على نحو يَجعل تزييفها شديد الصعوبة.

(١١٠) الحلقات الملوَّنة الصادرة عن المرايا التي يُغطِّيها الضباب أو التراب

بعد أخذ حمام ساخن وتَغطية البُخار لمرآة الحمام، أطفئ الأنوار، وواجه المرآة وأشعل عود ثقاب بعيدًا نسبيًّا عن أحد جانبَي رؤيتك المباشرة للمرآة. ستكون صورة اللهب في



(أ)



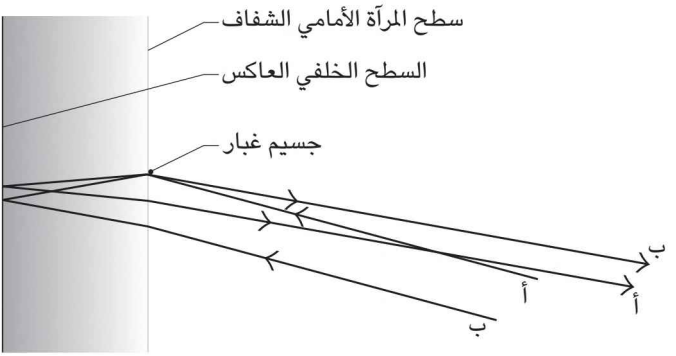
(ب)

شكل ٦-٤١: بند ٦-١٠٩: (أ) يرسل محزِّز الحيود عند النقطة **أ** الضوء إلى المشاهد عند الاتجاه **أ**، فيُكوِّن صورة افتراضية معينة. (ب) يرسل محزز الحيود عند النقطة **ب** الضوء إلى المشاهد عند الاتجاه **ب**، فيُكوِّن صورة افتراضية مختلفة.

المرآة الضبابية محاطة بحلقات ملوَّنة. وسترى أيضًا هذه الحلقات إذا كانت المرآة مغطَّاة بالتراب أو بمسحوق بدلًا من قطرات الماء.

بعد ذلك اجعل المرآة الضبابية أمامك في غرفةٍ مُعتِمة ذات نافذة ساطعة الإضاءة وراء ظهرك. واضبط المسافة بينك وبين المرآة إلى أن ترى حلقات فوق انعكاسك فيها. وعند المسافة المناسبة، أجد أن صورة عينيَّ حلَّ بدل كلٍّ منهما مجموعة من الحلقات الملوَّنة التي تُشبه الرسوم الناتجة عن تناول عقاقير الهلوسة. ومرةً أخرى، من الممكن أن تحل المرآة المتربة محل المرآة الضبابية.

فما سبب تكوُّن هذه الحلقات؟



شكل ٦-٤٢: بند ٦-١١٠: طريقان لتشتُّت الضوء إلى المشاهد من جسيم غبار أمام مرآة.

الجواب: تتضمَّن التجربتان طريقتَين مُختلفتَين لتشتُّت الضوء (حيوده) من خلال الجسيمات (إما قطرات الماء أو ذرات التراب) على المرآة. ويوجد ترتيبان أساسيان:

في أحد الترتيبَين، تتمركز الحلقات على مصدر ضوء صغير محمول على جانب منظورك للمرآة. في هذا الترتيب يُشتِّت كل جُسَيم الضوء إلى المرآة مرة أخرى وفي نسق دائري يكون المركز فيه ساطعًا وتتبدل فيه الحلقات المحيطة بين السطوع والقتامة. ونظرًا لأن زاوية التشتُّت تَعتمِد على الطول الموجي للضوء، فإن الألوان تظهر عند زوايا مُختلفة؛ ومِن ثَمَّ تكون منفصلةً في منظورك. وبالتحديد، فإن اللون الأحمر يظهر عند الحافة الخارجية للحلقة ويَظهر اللون الأزرق عند الحافة الداخلية؛ لأن الضوء الأحمر يتشتَّت عبْر زاوية أكبر نسبيًّا مقارنة باللون الأزرق. وأنت في واقع الأمر لا ترى إلا جزءًا من النسق من كل جسيم، لكن مجموع كل جزء من أجزاء الجسيمات الكثيرة هو في حد ذاته نسق دائري تراه متمركزًا على الصورة المنعكسة لمصدر الضوء.

في الترتيب الثاني تكون الحلقات مُتمركزةً على عينك ومصدر الضوء كبير وخلفك. وفي هذا الترتيب تكون الحلقات ناتجة عن مجموعتَين من الضوء شتتتها لك الجسيمات (انظر الشكل ٦-٤٢). تأمل أحد الجسيمات: (١) إنه يستطيع تَشتيت الضوء (الشعاع «أ» في الشكل) إلى ظهر المرآة؛ حيث يوجد السطح اللامع، ثم يعكس لك الضوء. (٢) يُمكنه أيضًا أن يشتت لك الضوء الذي انعكس لك بالفعل من ظهر المرآة الشعاع «ب».

وتتداخَل هاتان المجموعتان عندما تَصِلان لك. مع بعض الجُسَيمات تصل المجموعتان إلى عينَيك غير مُتطاورتَين وفي تداخل هدَّام؛ أي تُلغي إحداهما الأخرى. أما مع الجسيمات الأخرى، فتصل المجموعتان مُتطاورتين وفي تداخل بنَّاء، فتُعزِّز إحداهما الأخرى. أما النسق المركب فهو حلقات ساطعة وقاتِمة متَّحدة المركز، تكون فيها الحلقات الساطعة ملونة بسبب انفصال الألوان البسيط الذي ينطوي عليه تشتت الضوء.

ويَعتمِد نوع نسق التداخل الذي تراه على اتجاهك واتجاه مصدر الضوء. ويمكن أن يحدث تداخل بين النسقين إذا وضعت مصدر ضوءٍ صغيرٍ مباشرةً بين عينَيك وبين المرآة.

(١١١) لون اللبن في الماء

سلِّط شعاعًا ضيقًا من الضوء الأبيض ليَسطَع عبْر حوض سمك صغير (أو أي وعاء آخر جدرانه شفَّافة ومسطَّحة) مملوء بالماء. أثناء انطفاء الأضواء، ابدأ في إضافة قطرات من اللبن الكامل الدسم (وليس اللبن قليل الدسم). في البداية، سترى قدرًا قليلًا من الشعاع في الماء، لكن سرعان ما سيُصبِح الشعاع مرئيًّا جيدًا. ومع الاستمرار في إضافة القطرات، لاحظ لون الشُّعاع في الماء من الجانب ومِن زاوية شبه مباشرة نحو مصدر الضوء. وفي النهاية ستجد أن الشعاع ضارب إلى الزُّرقة عندما تنظر من الجانب وضارب إلى الحُمْرة عندما تنظر له مباشرةً. فما سبب تكوُّن هذه الألوان؟ لماذا يكون اللبن الذي تَشربه أبيض اللون وليس أحمر أو أزرق؟

الجواب: يَحتوي اللبن على كريات دهون صغيرة تُشتِّت الضوء. يتشتَّت الطرف الأزرق من الطيف بشدة أقوى ناحية الجانب مقارنة بالطرف الأحمر من الطيف. ومِن ثَمَّ فعندما يكون تركيز كريات الدهون كبيرًا على نحو يسمح بإدراك الألوان أولًا، يغلب اللون الأزرق على الضوء المشتَّت للجانب، بينما يغلب اللون الأحمر على الضوء المشتَّت نحو الاتجاه المبدئي للشعاع.

تَعتمد رؤيتك للألوان على التركيز المُنخفِض للكريات. فعندما يكون تركيز الكريات عاليًا كما هي الحال عادةً في اللبن، فإن الضوء يتشتَّت مرات عديدة قبل أن يُغادِر الوعاء. وبعد ذلك، تستقبل في أي اتجاه رؤية قدرًا من الطرف الأحمر للطيف مساويًا لقَدرِ الطرف الأزرق من الطيف، وتكون النتيجة المُجتمعة هي اللون الأبيض.

عند إمالة كوب يَحمل قدرًا قليلًا من اللبن بحيث تكون حافَّة اللبن في قاع الكوب، سوف ترى شريطًا شفافًا ساطعًا على الحافة. يوجد الشريط في المنطقة التي يُكوِّن فيها

اللبن سطحًا مقوسًا لأنه يتسلَّق سطح الزجاج لمسافة قصيرة. يتَّسم الضوء المنعكس من السطح المنحني بالتركيز؛ ومِن ثمَّ يكون أكثر سطوعًا من الضوء المنعكس من بقية سطح اللبن. وهذا الضوء المركز يُخفي التشتُّت بفعل الجُسَيمات الموجودة داخل اللبن، ولذلك لا ترى بياض اللبن في هذا الشريط حول القاع.

(١١٢) لون دخان نار المخيم

عند رؤية الدخان المتصاعد من نار مخيَّم على خلفية قاتمة مثل الأشجار المحيطة يكون لون الدخان أزرق، لكن عند مشاهدته على خلفية فاتحة مثل السماء يكون لونه أصفر أو أحمر أو برتقالي. فما سبب اختلاف الألوان في كل ظرف من ظرفَي المشاهَدة؟

الجواب: جسيمات الدخان في نار المخيم صغيرة للغاية لدرجة أنها تُشتِّت الطرف الأزرق من الطيف أقوى من تشتيتها للطرف الأحمر. ولذلك، فإن الضوء المستمر في الاتجاه الأصلي يضعف في الطرف الأزرق، ويُصبِح أصفر أو أحمر أو برتقاليًّا. وإذا شاهدت الدخان على خلفية داكنة فيجب أن يكون مصدر الضوء خلفك (من المُمكن أن يكون الشمس أو جزءًا ساطعًا من السماء). فيتشتَّت الضوء الأزرق في اتجاهك. وإذا شاهدت الدخان على سماء ساطعة، عندها سيكون هذا الجزء من السماء هو مصدر الضوء. وفي هذه الحالة سترى الضوء الذي ضعف لونه الأزرق بعد مروره عبْر الدخان؛ ومِن ثمَّ يغلب على الضوء الطرف الأحمر من الطيف.

(١١٣) تأثير شراب الأوزو

تُظهِر بعض المشروبات الكحولية المُستخلَصة من اليانسون مثل شراب «الأوزو» في اليونان، وشراب «باستيس» في فرنسا، وشراب «الراكي» في تركيا، وشراب «سامبوكا» في إيطاليا سلوكًا غريبًا؛ فعند إضافة الماء تدريجيًّا إلى الشراب الشفاف تمامًا يتحوَّل الشراب فجأة إلى لون بياض اللبن. فما سبب هذا التغيُّر؟ أي ما الذي يفعله الماء، وما سبب التغير في مظهر الشراب؟ يمكن عكس هذا التأثير عند إضافة المزيد من الكحول.

الجواب: كل شراب من هذه المشروبات عبارة عن محلول يحتوي على توزيع مُتساوٍ لزيت اليانسون وكحول الإيثانول. عند وصول شعاع ضوء (مثل ضوء الشمس) إلى المحلول، فإنه يظهر على الجانب المقابل كشُعاع. وعند إضافة الماء (سائل ثالث) يُمكِن

أن تتغيَّر الأمور؛ لأن زيت اليانسون لا يستطيع الذوبان في الماء. في البداية يكون الشراب شفافًا (فينتقل شعاع الضوء عبره كشُعاع). رغم ذلك، عندما يَبلغ محتوى الماء نسبة معينة في السائل، تُوصَف بأنها «قيمة حرجة»، تشكل جزيئات الزيت تلقائيًّا قطرات عالقة في السائل. ويُقال إن الشراب يتعرَّض إلى «تحول طوري»، فيتحول من محلول سائل–سائل متجانس (موحد)، إلى تشتُّت سائل–قطرات غير متجانس (أو مستحلب). تُشتت القطرات الضوء المرئي، ولذلك عند انبعاث أي شعاع إلى الشراب فإنه يتشتَّت إلى جهات كثيرة، مما يَمنح الشراب مظهره الحليبي. وعند صب المزيد من الكحول إلى الشراب، وخفض محتوى الماء لمستوى أقل من القيمة الحرجة، ينعكس التحول الطوري ويصبح الشراب شفافًا مرة أخرى.

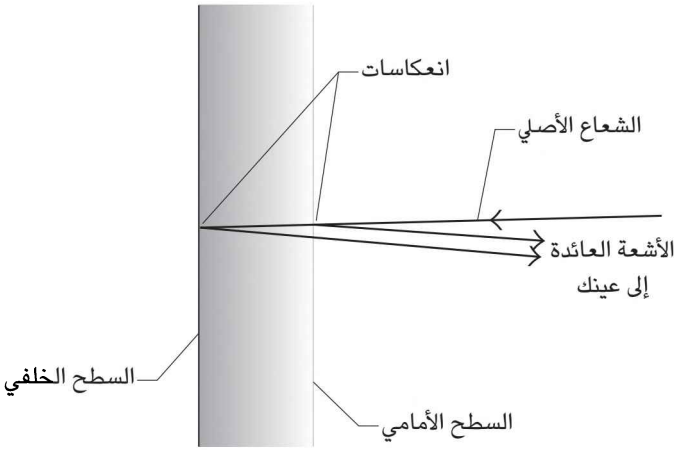
(١١٤) ألوان البقع الزيتية وأغشية الصابون وآنية الطهو المعدنية

لماذا البقع الزيتية الموجودة على الشوارع المبتلَّة تُظهر الألوان؟ ولماذا تغيب هذه الألوان لو كان الشارع غير مُبتل؟ ولماذا يُمكن أن تتكون الألوان حتى في حالة احتجاب الشمس وراء السحب؟

لماذا أغشية وفقاقيع الصابون ملوَّنة؟ ولماذا تختفي الألوان عندما يكون الغشاء شديد الرقة أو السُّمك؟ ولماذا لا ترى ألوانًا مُشابهة من شريحة المجهر أو اللوح الزجاجي؟

افترض أن غشاءً صابونيًّا رقيقًا معلَّقًا رأسيًّا ومضاءً من الأمام من خلال شعاع ضوء أبيض. مع سحب الجاذبية للغشاء، ستبدأ الأشرطة الملوَّنة الأُفقية الموجودة على الغشاء في النزول لأسفل؛ ومِن ثَمَّ سيتحوَّل الجزء العُلوي إلى الأسود (شريطة أن تكون الخلفية وراء الغشاء قاتمة). فكيف يُمكِن أن يُصبح الغشاء أسود رغم الإضاءة الساطعة الواقعة عليها من المقدمة؟ إذا فحصت المنطقة السوداء جيدًا، من المُمكن أن تجد نقاطًا شديدة السواد. فلماذا تظهر هذه المناطق؟ ولماذا الشريط الموجود أسفل المنطقة السوداء أبيض اللون وليس أزرق؟ (اللون الأزرق له أصغر طولٍ مَوجيٍّ مرئي؛ ومِن ثَمَّ يجب أن يتوافق مع الجزء شديد الرقة من الغشاء الواقع أسفل المنطقة السوداء.)

في بعض الأحيان تُوجد مناطق ملوَّنة على آنية الطهو رغم تنظيفها بعناية. فما سبب تكون هذه الألوان؟ وتظهر ألوان مشابهة عند تسرُّب الزيت من سطح معدني مَصقول. فلماذا لا تظهر مثل هذه الألوان عندما يكون السطح غير مصقول؟



شكل ٦-٤٣: بند ٦-١١٤: انعكاس الضوء إلى عينك قادمًا من السطح الأمامي والسطح الخلفي لغشاء رقيق.

الجواب: الطبقة الشفافة ذات السمك المساوي تقريبًا للطول الموجي للضوء المرئي يُمكن أن تُنتج ألوانًا عند إضاءتها بالضوء الأبيض. افترض أن شعاع أحد الألوان ساقط على نحو عمودي على هذا الغشاء (انظر شكل ٦-٤٣). سنجد أن بعضًا من الضوء ينعكس من السطح الأمامي للغشاء بينما ينتقل قدرٌ من الجزء المتبقي عبْر الغشاء وينعكس من السطح الخلفي، ثم ينتقل مرة أخرى عبر سُمك الغشاء ويخرج مرة أخرى. عندما ترى عينك مغادرة هاتين الموجتين للغشاء؛ فإنهما تتعرضان للتداخل. إذا كانت الموجتان مُتطاورتَين (متزامنتَين)، يحدث تداخل بنَّاء (وتُعزِّز كلٌّ منهما الأخرى)، وترى لونًا ساطعًا على الغشاء. أما إذا كانتا غير متطاورتَين تمامًا (غير متزامنتَين)، فسيحدث تداخل هدَّام (وتميل كلٌّ منهما إلى إلغاء الأخرى) وترى ظلامًا على الغشاء.

سُمك الغشاء من العوامل التي تحدد إذا ما كان لون معين سيتمتَّع بالسطوع أم لا؛ ومِن ثَمَّ فعندما تسحب الجاذبية غشاءً رأسيًّا وتجعله أكثر سمكًا عند القاع تبدأ ألوان مختلفة في الظهور عند ارتفاعات مختلفة. وإذا غيَّرتَ منظورك للغشاء فإنك تُغيِّر المسافة التي يقطعها الضوء عبْر الغشاء ليصل إليك. ومِن ثَمَّ، فإنك تُغيِّر الألوان التي تسطع.

والعروض الملونة التي تغير الألوان مع تغير زاوية الرؤية تُوصَف بأنها «قزحية» اللون. (أما القميص الأزرق الذي اكتسب زُرقته من الصبغة فلا يوصف بأنه قزحي اللون.)

يمكن أن ترى ألوانًا قزحية على بقعة الزيت إذا كوَّن الزيت طبقة أفقية رقيقة على الماء. ويُمكن أن تكون الألوان واضحةً حتى عندما تكون الشمس محتجبة، شريطة أن يكون جزء من السماء أكثر سطوعًا من بقية السماء. أما إذا وقَع الزيت على شارعٍ جاف، فإن السُّمك يَختلف عبْر الطبقة بسبب الملمَس الخَشِن للشارع الواقع أسفل طبقة الزيت. تتداخل الألوان المختلفة السُّمك، ويصبح النسق باهتًا وربما عديم اللون.

أما في الجزء العلوي من البالوعة فيصبح غشاء الصابون الرأسي أكثر رقة من الطول الموجي للضوء، وتُلغي كل موجات الضوء الصادرة عنه بعضها بعضًا على نحو شبه كامل، ويُصبِح الجزء العلوي أسود. يُمكن أن يتوقف هذا الترقق لحظيًّا في هذه المرحلة لسببين: (١) طبقات جزيئات الصابون على جانبي الغشاء المُتقابلَين أصبحت الآن متقاربة على نحو يكفي للتنافُر كهربائيًّا. (٢) جزيئات الماء على طول كل سطح أصبحت مرتَّبة على نحو واضح (ترتيبًا يشبه نسبيًّا الترتيب الموجود في البلورة الجليدية) وبدأت في التداخل. ونظرًا لأن التداخل يتطلب طاقة، فإن الترقق يميل إلى التوقُّف عند هذه المرحلة. وعلى الرغم من هذه الأسباب، فإن الطبقة الرقيقة تكون غير مستقرة ومن المحتمل أن تنهار فجأة وتنفجر. إلا أنه إذا احتوى الغشاء على شوائب مشحونة، فقد يتمكَّن من زيادة الترقق دون الانفجار. وهذه المناطق تكون أجزاءً شديدة السواد في المنطقة السوداء الرقيقة.

ويتَّسم الشريط أسفل المنطقة السوداء بالزرقة الباهتة؛ لأن الضوء الأزرق يتعرَّض إلى «تداخل هدَّام جزئي» (فالموجات شبه مُتطاورة؛ ومِن ثَمَّ يُعزِّز بعضها البعض نسبيًّا). إلا أنه من الصعب رؤية اللون الأزرق، وقد تجد أن أول شريط يُمكن تمييزه أسفل المنطقة السوداء هو اللون الأبيض. وفي هذا الجزء يتمتَّع الغشاء بسُمك يسمح لكل ألوان الطيف المرئي بالتعرض لتداخُلٍ بنَّاء جزئي، ويبدو تجمُّعهم باللون الأبيض. وأسفل الشريط الأبيض نجد شريطًا لونه أحمر مُصفرٌّ (برتقالي)، ثم نجد شريطًا لونه أحمر مُزرقٌّ (أرجواني). بعد ذلك فقط نجد شريطًا يكاد يكون لونه أزرق صافيًا.

ومع تسرب الغشاء وازدياد سُمكه عند القاع، تبدأ الأشرطة الملوَّنة في القاع في التداخل. وفي النهاية يكون التداخل كافيًا لإزالة الألوان، ويُصبح ذلك الجزء من الغشاء أبيض.

إلا أن الأشرطة الملوَّنة لن تظهر حتى لو حوَّلنا مصدر الضوء إلى لون صافٍ. والمشكلة هي الانبعاثات العشوائية للموجات الضوئية من أي مصباح عادي. فمِن لحظة إلى أخرى، تَنبعِث أطوال موجية قصيرة (يُطلَق عليها «قطارات مَوجيَّة») من المصباح. وإذا كان الغشاء رقيقًا لدرجة تجعل الأمواج المُنعكِسة من السطح الأمامي والسطح الخلفي جزءًا دائمًا من القطار المَوجِي نفسه، ففي هذه الحالة يُمكن حدوث نوع معين من التداخل ويمكن إنتاج شريط ملون ثابت. أما إذا كان الغشاء أكثر سمكًا، فمن الممكن أن تكون الموجتان المنعكستان من قطارَين مَوجيَّين «مختلفين» ومِن ثَمَّ يُمكن أن يتحوَّل التداخل عشوائيًّا من بنَّاء في لحظة إلى هدَّام في اللحظة التالية. ومِن ثَمَّ لا يُمكِن أن يتكوَّن شريط ثابت اللون؛ ولهذا السبب لا تحدث أنماط التداخل والتقزُّح في الأغشية السميكة وشرائح المِجهر وألواح النوافذ الزجاجية وأكواب الشرب الزجاجية، وما إلى ذلك.

غالبًا ما تظهر الأشرطة الملوَّنة على آنية الطهو المعدنية الجافة بسبب وجود طبقات رقيقة من أكسيد المعدن. بالإضافة إلى ذلك، إذا كان المعدن يَحتوي على طبقة رقيقة من الزيت وكان لامعًا، فمن المُمكِن أن تنتج طبقة الزيت تداخلًا في الألوان. ورغم ذلك، إذا كان السطح خشنًا، فإن الضوء المنعكِس من السطح الخلفي لطبقة الزيت يتشتَّت في اتجاهات عشوائية؛ ومِن ثَمَّ يُدمر عرض الألوان.

(١١٥) الألوان الهيكلية للحشرات والأسماك والطيور ومؤخِّرات القردة

يتَّسم عصفور الكناري باللون الأصفر نظرًا لوجود صباغ في ريشه يمتصُّ كل الألوان المكوِّنة للضوء الأبيض ما عدا اللون الأصفر. ومعظم الألوان التي نجدها في عالمنا اليومي، بما في ذلك ألوان الحيوانات، يعود إلى صبغة مشابهة. إلا أن كثيرًا من الحيوانات لا يعود تلوُّنها إلى الصبغة، إنما إلى سمة بصرية غريبة لتركيبة سطحها الخارجي (مثل الجناح أو القوقعة أو الريش أو الجلد ... إلخ). فما سبب التلون في الأمثلة التالية؟

بعض الفراشات والحشرات لها أجنحة قزحية اللون؛ أي تتغير ألوانها مع تغيير زاوية الرؤية. ومن الأمثلة الجميلة جناح فراشة المورفو. فعلى الرغم من أن الصباغ على الجناح بني اللون (كما يبدو على السطح السفلي للجناح)، فإن السطح العُلوي أزرق متقزِّح ساطع.

تستخدم سمكة الرنجة خصائص بصرية شبيهة (لكنها أكثر تعقيدًا نسبيًّا) لتجعل نفسها بيضاء فضية. ومن مزايا هذا التلوُّن أن المفترس يجد صعوبة بالغة في تمييز سمكة الرنجة في الماء.

تُظهر بعض الخنافس الدوارة الاستوائية انعكاسًا قويًّا لضوء الشمس (الأبيض) عند مُشاهدتها من زاوية معينة، لكن تُظهر ألوانًا قزحية لافتة للانتباه عند مشاهدتها من زوايا أخرى. تُظهر أنواع أخرى عديدة من الخنافس انعكاساتٍ قوية وألوانًا قزحية مشابهة. لعل أكثر الألوان الهيكلية إثارة هي تلك التي تظهرها خنافس سكارابيدا التي يعمل سطحها كنوع من البلورات السائلة ليَعكِس ضوءًا ساطعًا لألوان متعدِّدة. على النقيض من ذلك، تستخدم الخنافس النمرية خصائص بصرية لإخفاء نفسها من خلال الاقتصار على عكس الألوان المُتوافِقة مع التربة المحلية.

تتميز بعض الثدييات بجلد ملوَّن ساطع. على سبيل المثال، يتسم قرد الماندريل الذكر بجلد أزرق على الوجه والعجز والصفن. وعلى الرغم من سطوع هذا اللون فإنه ليس قزحيًا.

يُستخدَم نوع مختلف من الخصائص البصرية لتكوين المناطق الزرقاء والمناطق البيضاء في يرقات الخيام ولتكوين اللون الأزرق في طائر القيق الأزرق.

لون الجناحَين الأماميَّين لخنفساء هرقل إما أصفر أو أسود اعتمادًا على الرطوبة. وإذا تغيَّرت الرطوبة فجأة فلن تحتاج الخنفساء إلا دقائق قليلة لتغيِّر لونها.

الجواب: السبب في أن كثيرًا من المناطق الملوَّنة في الفراشات والعثث قُزَحي اللون هو وجود حراشف شفافة شبيهة بالجليدة تتسبَّب في تداخل الضوء. إن الحراشف الموجودة على السطح العلوي لجناح فراشة المورفو مرتَّبة في بنية شبيهة بالشُّرفة. وعند سقوط الضوء الأبيض على هذه الحَراشف تسفر انعكاسات الضوء الأزرق الصادرة عن الحراشف المُتعاقِبة (مثل الحرشفة العليا والتالية التي أسفل منها) عن تداخل هدَّام، وهذا بسبب سُمك الحراشف وانفصالها رأسيًّا. أما انعكاسات الألوان الأخرى المكوِّنة للضوء الأبيض فتُسفِر عن تداخل هدَّام جزئي أو كامل، ولذلك ترى اللون الأزرق من الجناح. ومع تغيُّر زاوية الرؤية، فإنك تُغيِّر نسبيًّا مسار الضوء الواصل لك؛ وهذا التغيُّر يغير الطول الموجي، أو لون الضوء المتعرِّض للتداخُل البنَّاء. ونظرًا لاعتماد اللون الذي تراه على الجناح على زاوية الرؤية، فإن الجناح قزحي اللون.

لون سمك الرنجة يعود أيضًا إلى التداخل البصري بفعل الحراشف، لكن توجد ثلاثة ترتيبات لتداخل الحراشف، يُسفر كلٌّ منها عن تداخل بنَّاء للضوء المنعكس في جزء مختلف من الطيف المرئي. وعندما ترى هذه الأنواع الثلاثة من الانعكاسات الساطعة، فإنك تراها باللون الأبيض عند اجتماعها. إلا أن هذا البياض يختلف عن اللون الأبيض

العادي نظرًا لوجود تغيُّر بسيط في اللون عند تغيير زاوية رؤيتك للسمك. ويكون من الصعب تحديد مكان سمكة الرنجة في الماء؛ لأن الضوء المنعكس يشبه تقريبًا الضوء المحيط بها تحت الماء.

يُغطي سطح الخنفساء الدوارة الاستوائية حراشف ضيقة مصطفَّة كما لو كانت محزز حيود، وهذه وسيلة بصرية تتكوَّن عادةً من العديد من الشقوق الرفيعة المتوازية التي تنتج نسقًا متداخلًا. إذا نظرت إلى الجزء الساطع المركزي في نسق حيود الخنفساء، فسوف ترى الضوء الأبيض الساطع. وإذا رأيت الأجزاء الساطعة البعيدة عن المركز، فسوف ترى الألوان التي انتشرت بفعل الحيود على نحو يَسمح بتمييزها. وعندما تدور إحدى هذه الخنافس في الماء، تحدث تغيُّرات سريعة في الشدة واللون؛ مما يمكن أن يتسبَّب في ارتباك المفترس.

لا تعود انعكاسات خنفساء سكارابيدا إلى الحراشف، بل إلى ترتيب غريب للويفات دقيقة. فهي مرتبة في طبقات، ومحاذاة كل طبقة تختلف عن الطبقة التالية. وعندما يخترق ضوء الشمس الطبقات، فإن الانعكاسات الصادرة عن الطبقات التي يَفصل بينها مسافات مناسبة تتعرض للتداخل البنَّاء وتخرج من الخنفساء في صورة ضوء ملوَّن ساطع.

من المُمكن أن تبدو الخنافس النمرية بُنِّية أو سوداء في عينك (لتُوافِق التربة الموجودة فيها)، لكنَّها في الحقيقة متعدِّدة الألوان. على سبيل المثال، تحتوي أغطية جناح الخنفساء النمرية المسماة «سيسينديلا أوريجونا» على بُقَع دائرية لونها أخضر مزرق مُحاطة باللون الأحمر. وكلا اللونَين ناتجان عن تداخُل راجع إلى الحراشف الشبيهة بالجليدة الموجودة على الجناح. وعندما ترى الخنفساء على الطبيعة يَدمج جهازك البصري الألوانَ المرئية ويَجعلُك تُدرك اللون البني. ويحدث دمج شبيه للألوان من المناطق الصغيرة جدًّا التي لا يُمكن إدراكها على حدة عندما تُشاهِد الشاشات الملوَّنة واللوحات التنقيطية.

يعود لون الجلد الأزرق في قرود الماندريل وغيرها من الثدييات الأخرى إلى الترتيب الدوري نسبيًّا (أو شبه الدوري) لألياف الكولاجين في الأدمة. وفي أي منطقة مجهرية، تكون هذه الألياف متوازية ولديها عرض ومسافات بينية يُشتِّتان الضوء الأزرق خارج الجلد. أما في الأماكن الأخرى مثل الوجه فتكون ألياف الكولاجين متشعِّبة لدرجة أن الأزرق يُسيطر على الضوء الخارج من الجلد. وفي أماكن أخرى مثل العجز تكون كمية ألياف الكولاجين أقل، لكن تكون هذه الطبقة واقعة على ميلانَين يمتصُّ الضوء المار عبْر

الكولاجين. ونظرًا لوجود الخلفية الداكنة المُتمثِّلة في الميلانَين، يكون الضوء الأزرق الخارج من الجلد لافتًا للنظر. ورغم ذلك، لا يكون هذا اللون قزحيًّا، فالتقزُّح يتطلب ترتيبًا أكثر انتشارًا لمناطق التشتيت.

السبب في المنطقة الزرقاء الموجودة على يرقة الخيام هو تشتُّت الضوء بفعل الشعيرات الشفافة للمادة الشبيهة بالجليدة التي تُغطِّي السطح العلوي لليرقة. ويوجد تحت هذه الشعيرات سطح قاتم. وهذه الشعيرات بالغة الصِّغَر لدرجة أنها تُشتِّت الضوء الأزرق في الأساس ليعود نحوك؛ بينما يظلُّ بقية الضوء في السطح القاتم الذي يمتصُّه. ولذلك ترى الضوء الأزرق بصفة أساسية في هذه المنطقة. وتَختلف المنطقة البيضاء في أن السطح السُّفلي يعكس أو يُشتِّت الضوء نحوك، وأنه ليس داكنًا. وفي هذه الحالة، فإن الضوء الأزرق الموجود في الشعيرات يَضيع في الضوء الأبيض الأكثر سطوعًا الموجود في السطح السفلي.

يعود سبب الزرقة في ريشة طائر القيق إلى التشتُّت التفضيلي للطرف الأزرق من الطيف بفعل الخلايا السنخية الصغيرة في أطراف الريش. أما الألوان في الطيور الأخرى فيكون سببها كلًّا من التشتُّت والتصبُّغ أو طرقًا مختلفة يتعرَّض من خلالها الضوء للتداخُل.

يتكوَّن الجناح الأمامي الجلدي الصلب لخنفساء هرقل من سطح علوي شفاف رقيق يقع على طبقة إسفنجية صفراء. وأسفل الطبقة الإسفنجية توجد مادة سوداء شبيهة بالجليدة. وعندما تَمتلئ الطبقة الإسفنجية بالهواء، يتشتَّت منها الضوء ويخسر معظم الألوان ما عدا الأصفر؛ ومِن ثَمَّ يبدو الجناح أصفر. وعندما تكون الخنفساء في رطوبة شديدة، تَمتلئ الطبقة الإسفنجية بالماء، ويمر مزيد من الضوء عبْر تلك الطبقة ليصلَ إلى مادة الجليدة السوداء فتمتص ذلك الضوء. وفي هذه الحالة يبدو الجناح أسود اللون.

(١١٦) اللؤلؤ

ما سبب الألوان البراقة والقزحية التي نراها في اللؤلؤ وداخل صدفاتها (أم اللؤلؤ)؟

الجواب: نظرًا لأن الألوان قزحية (أي تتغير مع تغيُّر زاوية المشاهدة)، فلا بد أنها راجعة إلى تداخل الموجات الضوئية وليس إلى امتصاص بسيط من قِبل الأصباغ. تتكون اللؤلؤة من «عرق اللؤلؤ» وهو مجموعة مركَّبة مثل الطوب والملاط مؤلفة من كربونات الكالسيوم (الكالسيت أو الأراجونيت) ومادة نسيجية مكوَّنة من جزيئات حيوية

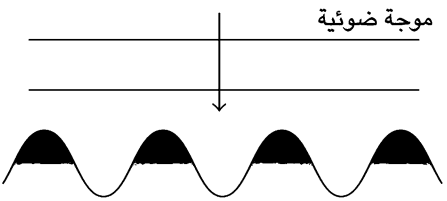
كبيرة. تَفصل فجوات شديدة الضيق تحتوي على المادة النسيجية (الملاط) بين صفائح الأراجونيت المسطحة (الطوب). ويُعزى ما نراه في اللؤلؤة من لمعان وألوان إلى تداخل الموجات الضوئية المشتَّتة من الفجوات وليس من داخل الطوب. وتؤدِّي الفجوة الأكثر اتساعًا إلى تداخل ساطع (تداخُل بنَّاء) للأطوال المَوجية الأكثر طولًا (نحو الطرف الأحمر من الطيف المرئي). ولكي يتَّسم لون أو طول مَوجي معيَّن بـ «النقاء» (أي يُمكن تمييزه بوضوح) في اللؤلؤة، لا بد أن يكون عرض الفجوات مُتماثلًا تقريبًا، ولا بد أن يكون الفاصل بين الفجوات شبه متماثل؛ بحيث تعزز الموجات الضوئية المشتَّتة من الفجوات بعضها بعضًا. وإذا تباين عرض الفجوات وفواصلها، فسوف تكون الألوان «باهتة» أو «شاحبة». تحتوي بعض اللآلئ السوداء على هذا التأثير اللوني، لكن يَبدو أنها تحتوي أيضًا على صباغ مسئول عن خلفيتها القاتمة.

(١١٧) النتوءات في عيون الحشرات والطائرة الشبح

تتكوَّن عين الحشرة من جوانب عديدة يُطلَق عليها «عيينات» يمرُّ من خلالها الضوء إلى مُستقبِل؛ حيث تبدأ عملية المعالجة البصرية؛ وترى الحشرة فُسيفساء للصور التي تنتجها العيينات. تمتلك كثير من الحشرات عيينات ذات أسطح خارجية مصقولة. لماذا تمتلك بعض الحشرات عيينات ذات نتوءات صغيرة مدبَّبة على الأسطح الخارجية؟ تظهر أيضًا الصفات الفيزيائية لتلك النتوءات على الأسطح الماصة للطائرة الشبح وفي طلاء النوافذ ذات الأسطح الزجاجية الثنائية والثلاثية.

الجواب: من مقاييس الخواص البصرية لأي مادة «مُعامل الانكسار»، المرتبط بسرعة الضوء في هذه المادة. فعندما يواجه الضوء حاجزًا يتغيَّر عنده مُعامل الانكسار، ينعكس بعض الضوء من الحاجز وينتقل البعض الآخر خلاله. فعلى سبيل المثال، إذا وصل شعاع ضوء إلى طبقة من الزجاج، فإن قدرًا من الضوء يَنعكِس عند الحاجز الفاصل بين الهواء والزجاج.

يحدث انعكاس مشابه عند السطح الفاصل بين الهواء والعيينات في عين الحشرة لأن معامل الانكسار في العيينات أكبر من معامل انكسار الهواء؛ لذلك عادةً ما ينعكس بعض الضوء الساقط على عين الحشرة ولا يُساهِم في عملية الرؤية. إلا أن العيينات ذات النتوءات يقلُّ فيها الانعكاس؛ ومِن ثَمَّ يدخل العيينات المزيد من الضوء. تكمن ميزة النتوء في بنيتِه المدبَّبة، فهو رفيع عند الطرف الخارجي ويَزداد عرضه كلما اتجهنا نحو



شكل ٦-٤٤: بند ٦-١١٧: تُقلِّل النتوءات في عين الحشرة قدر انعكاس الضوء من العين.

القاعدة (انظر شكل ٦-٤٤). ومِن ثَم، عندما يدخل الضوء إلى العيينات لا يجد حاجزًا واحدًا يتغيَّر عنده معامل الانكسار تغيُّرًا حادًّا، بل يجد معامل انكسار يزداد تدريجيًّا مع تحرك الضوء على النتوء. وهذه الزيادة التدريجية تُقلِّل كمية الضوء المنعكس؛ ومِن ثمَّ يدخل العين المزيد من الضوء.

إن الانعكاسات على النوافذ المتعددة الطبقات الزجاجية يمكن أن تنتج صورًا متعدِّدة لكل ما يوجد خارج النافذة. وإذا كانت النافذة جزءًا من برج مراقبة جويَّة أو مقصورة الطيار فإن هذه الصور الزائدة يُمكن أن تكون مضلِّلة على نحو خطير. وإذا كانت النافذة موجودة في طقس بارد فإن أي انعكاس على النافذة يعني قلة الضوء الواصل لتدفئة الداخل. ولتقليل الانعكاسات لهذه الأسباب يجب تغطية واحد من الألواح الزجاجية أو أكثر بطبقة بلاستيكية تحتوي على نُتوءات.

من الأسباب التي تجعل من الصعب على الرادار اكتِشاف الطائرة الشبح أن سطحها مُغطًّى بنتوءات مصنوعة من مادة تمتصُّ موجات الرادار. لو كان السطح مسطحًا لامتصَّ جزءًا فقط من إشارة الرادار وعَكَسَ الباقي. (سيكون الموقف مشابهًا للضوء الذي يلمع على الزجاج الأسود، فعلى الرغم من امتصاص قدر كبير من الضوء، فإنه يَعكِس لك قدرًا كافيًا من الضوء يسمح بإظهار وجود الزجاج.) يحتوي سطح الطائرة الشبح على نتوءات ذات فواصل أصغر من الطول الموجي لموجات الرادار، وهذه الموجات هي نوع من الموجات الدقيقة. وأثناء مرور موجة الرادار على النتوء تُمتَص تدريجيًّا؛ ومِن ثمَّ يَنعكِس القليل منها إلى كاشف الرادار.

(١١٨) النباتات القزحية

في الظلِّ الشديد في الغابات المطيرة الاستوائية تحصل النباتات على قدر ضئيل من الضوء. وهذا هو سبب التقزُّح الذي يتقلب بين الأزرق والأخضر، والذي يظهر على بعض السرخسيات والنباتات المُزهِرة التي تنمو هناك. يُغطِّي أوراق النباتات الأخرى لمعانٌ مخملي ناتج عن الخلايا البشروية المحدَّبة. فما الفائدة التي تقدمها هذه الصفات لبقاء النباتات في هذه الإضاءة المُنخفِضة؟

الجواب: سبب تقزح السرخسيات بين الأخضر والأزرق هو التداخل البصري للضوء المنعكس من الطبقات المتراكمة المختلفة الصفات البصرية. وعلى وجه التحديد، فإن الطبقات تتقلَّب بين قِيَم مرتفعة وقيم مُنخفِضة لمعامل الانكسار الذي يُعدُّ مقياسًا لسرعة الضوء في المادة. كما أنها تتفاوَت أيضًا في الكثافة. ونتيجة لذلك تُصبح الطبقات كما لو كانت مجموعة من الأغشية الدقيقة. تخرج الموجات المنعكسة في الطرف الأزرق من الطيف المرئي في تطاوُر شديد (متزامنة) ويُعزز بعضها بعضًا؛ ومِن ثمَّ نرى الضوء أخضر مزرقًّا. تستمر الموجات المنقولة عند الطرف الأحمر من الطيف في النَّفاذ إلى الطبقات في تطاوُر شديد ويُعزِّز بعضها بعضًا؛ ومِن ثمَّ ينتقل الضوء الأحمر إلى داخل الورقة (إلى البلاستيدات الخضراء حيث يتم البناء الضوئي). ويبدو أن هذا الترتيب يزيد كمية الضوء الذي تمتصُّه الأوراق مقارنةً بما تمتصُّه دون حدوث التداخل البصري. تحتوي ثمار بعض النباتات أيضًا على تقزُّح أزرق بسبب الطبقات الرقيقة التي تُسبب التداخل البصري.

تتخذ الخلايا البشروية المحدبة في الورقة ذات اللمعان المخملي شكل العدسة لكي تسلط الضوء على البلاستيدات الخضراء الموجودة تحتها. وهذا التسليط يضاعف على أقل تقدير تركيز الضوء على البلاستيدات الخضراء، فيمكن النبات من العيش في الإضاءة المنخفضة. (أما اللمعان الذي يعد تأثيرًا جانبيًّا فهو انعكاس مرآتي للضوء من جوانب الخلايا.) وقد تحتوي ورقة الشجر أيضًا على غشاء قزحي لتقليل كمية الضوء المنعكس من الورقة.

أما تقليلُ انعكاس الضوء في الأنواع الأخرى من أوراق الأشجار فيتم من خلال شكل الخلايا. وعلى الرغم من أن هذه الخلايا لا تركز الضوء على البلاستيدات الخضراء بطريقة جيدة جدًّا، فإن الضوء الزائد الموجود داخل الخلايا يبدو مفيدًا.

(١١٩) الأحبار المتغيِّرة الألوان المانعة للتزييف

تسعى الحكومة في مختلف أنحاء العالم إلى استباق المزورين الذين يُسارعون في استخدام أحدث الوسائل التكنولوجية لتزييف العملات الورقية. ومن الإجراءات الأمنية المستخدمة لردع المزورين الخيوط الأمنية والعلامات المائية الخاصة (التي يُمكن رؤية كلٍّ منهما عند تعريض العملة الورقية للضوء) بالإضافة إلى الطباعة الدقيقة (المكونة من نقاط متناهية الصغر على نحو يَحُول دون إعادة نسخها بالماسح الضوئي). وعلى الأرجح فإن أكثر سمة يصعب على المزورين تقليدها هي اللون المُتغيِّر الناتج عن الأحبار المتغيِّرة الألوان. فعلى سبيل المثال، يحتوي الرقم «٢٠» في الركن الأيمن السفلي من وجه ورقة الدولار الأمريكي فئة العشرين على حبر مُتغيِّر اللون. إذا نظرت إلى الرقم مباشرة، فسيكون أحمر اللون أو أصفر محمرًّا. وإذا أَمَلْتَ الورقة ونظرت إليه من زاوية مائلة، فإن اللون يتغيَّر إلى الأخضر. ويُمكن لماكينة التصوير تقليد اللون من زاوية واحدة فقط، ومِن ثَمَّ لا تستطيع نسخ هذا التغيُّر في الألوان. فكيف تغير الأحبار المتغيِّرة الألوان ألوانها؟

الجواب: تعتمد الأحبار المُتغيِّرة الألوان المستخدمة في أوراق العملات على التداخل الناجم عن رقائق رفيعة شفافة عالقة في الحبر العادي. إن الضوء الذي يَخترق الحبر العادي فوق الرقاقة ينتقل عبْر طبقات رقيقة من الكروم وفلوريد المغنسيوم والألومنيوم. تعمل طبقة الكروم كمرايا ضعيفة، وتعمل طبقة الألومنيوم كمرآة أفضل، وتعمل طبقات المغنسيوم كأغشية صابون. ونتيجة لذلك فإن الضوء المنعكس لأعلى من كل حد فاصل بين الطبقات يرتد عائدًا عبْر الحبر العادي ثم يتعرض للتداخل في عين المشاهد.

يتحدد اللون الذي سيتعرض لتداخل بنَّاء (حيث تُعزز موجات الضوء بعضها البعض) اعتمادًا على سُمك طبقات فلوريد المغنسيوم. في الولايات المتحدة، قيمة سُمك طبقات فلوريد المغنسيوم في العملات المطبوعة بأحبارٍ متغيِّرة الألوان تكون مصمَّمةً بطريقة تُحقِّق تداخُلًا بنَّاءً كاملًا للضوء الأحمر أو الأصفر المحمر عندما ينظر المشاهد لأسفل مباشرة نحو العملة. وعندما يُميل المشاهد العملة ومِن ثَمَّ يُميل الرقائق فإن الضوء الواصل للمُشاهد من الرقائق يتعرض لتداخل بنَّاء بالنسبة إلى الضوء الأخضر. وهذا التحول في الطول الموجي يعود إلى المسار الأطول الذي يَسلُكُه الضوء عبْر الرقائق المائلة. ومِن ثَم، فمن خلال تغيير زاوية المشاهدة يستطيع المشاهد تغيير اللون. تستخدم الدول الأخرى تصاميم أخرى لهذه الرقائق رفيعة الأغشية لتحقيق تغييرات مختلفة في ألوان العملات. وحاليًّا أصبحت الأحبار والدهانات المتغيرة الألوان متاحة للاستخدام التجاري.

(١٢٠) التشبُّع اللوني في بتلات الزهور

يَختلِف لون كثير من الأزهار من بتلة إلى أخرى عندما تكون البتلات في الزهرة، لكن إذا قطفتَ البتلات ووضعْتَها مسطحة جنبًا إلى جنب، فسيكون لونها واحدًا. فما سبب اختلاف اللون في الترتيب الطبيعي؟

الجواب: عندما تكون البتلات مسطحة وجنبًا إلى جنب، فإنك ترى الضوء المنعكس من سطح البتلة مرة واحدة فقط. يميل الانعكاس الذي يُشتِّت الضوء في اتجاهات كثيرة إلى إزالة بعض الألوان من الضوء من خلال امتصاص الجزيئات له في البتلات. فعلى سبيل المثال، تَميل البتلات الحمراء إلى إزالة الطرف الأزرق من الطيف المرئي بحيث ترى اللون الأحمر في الأساس. أما في حالة انعكاس الضوء مرة واحدة، كما هي الحال أثناء وضع البتلات في وضعٍ مستوٍ، فيُزال قدر قليل من الطرف الأزرق من الطيف ويكون الضوء أحمر «غير مشبع» (أحمر باهت).

والوضع مشابه إذا كانت البتلات شبه مستوية (على المستوى نفسه) أثناء وجودها في الزهرة. وعلى سبيل التذكرة، فإنك ترى الضوء المنعكس من البتلة، أو المار عبْر البتلة، مرة واحدة فقط. ويختلف هذا الموقف إذا كانت البتلات مُتجمِّعة على نحو مُتقارِب وبزوايا مختلفة من منظورك. ففي هذه الحالة يكون بعض الضوء الذي تراه قد انعكس أكثر من مرة من البتلات؛ في واقع الأمر تكون البتلات «حواجز ضوء مسرِّبة». ونظرًا إلى ميل الانعكاس إلى إزالة ألوان معينة وترك ألوان أخرى، فإن الألوان المتبقية تُصبح أكثر «تشبعًا» (أنقى). بالإضافة إلى ذلك، فإذا نظرتَ من بتلة إلى بتلة أو إذا نظرت عبْر سطح بتلة واحدة فسترى أن التشبُّع اللوني يختلف من نقطة لأخرى.

(١٢١) اللمعان الأصفر في شجر الحور الرجراج

في الخريف، عندما تتحول أوراق الشجر إلى اللون الأصفر، لماذا تصبح أوراق شجر الحور الرجراج أكثر لمعانًا عند مشاهدتها في الاتجاه العام للشمس مقارنة برؤيتها من الاتجاه المقابل؟

الجواب: عندما تبدأ أوراق شجر الحور الرجراج في الاصفرار فإنها تميل إلى امتصاص الطرف الأزرق من الطيف المرئي تاركةً الطرف الأحمر المصفر بصرف النظر عما إذا كنتَ تُشاهدها في اتجاه الشمس أو في الاتجاه المقابل. وعند مشاهدة الأوراق في

اتجاه الشمس، فإنها تُزيل الطرف الأزرق من الطيف بالتساوي جيدًا، ومِن ثَم يكون الضوء المُنتقِل عبْر الأوراق هو الأصفر الفاقع. وعندما تكون الأوراق في الاتجاه المقابل، فإنها «لا تزيل» الضوء الأزرق بالدرجة عينها. وإذا انعكس الضوء من الوجه العلوي للورقة فسيُمتَص اللون الأزرق جيدًا ومِن ثَمَّ فلن يَنعكِس. أما إذا انعكس الضوء من الوجه السُّفلي، فلن يمتص اللون الأزرق جيدًا ومِن ثَمَّ يظل في الضوء المنعكس. وعندما تكون الأوراق في مواجهة الشمس فإنَّ بعض الأوراق تُوجِّه وجهها العلوي ناحيتك، وبعضها يوجه لك وجهه السفلي. ونظرًا لأنك ترى اللون الأزرق من الوجوه السفلية فإن أوراق الحور الرجراج لا تكون صفراء فاقعة مثلما تراها في اتجاه الشمس.

(١٢٢) ألوان العيون

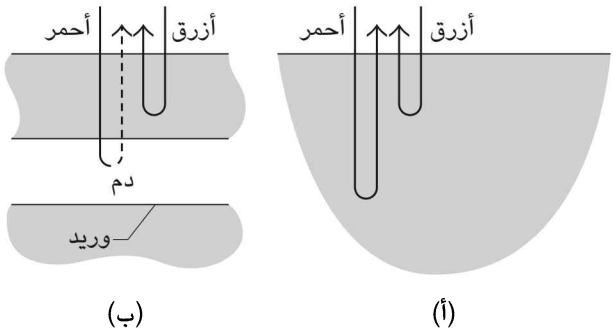
ما المسئول عن تكوين ألوان عيون الإنسان الزرقاء والخضراء والبُنِّية؟ لماذا يكون لون عيون البعض في بداية حياتهم أزرق، ثم يتغير هذا اللون بعد فترة قصيرة إلى اللون البني؟

الجواب: يرجع لون العيون الزرقاء إلى التشتُّت الارتدادي التفضيلي للضوء الأزرق بفعل البروتينات والدهون والجسيمات الأخرى الموجودة في سائل العين بالقزحية. يكون اللون مرئيًّا إذا كانت خلفية السائل عبارة عن طبقة داكنة. أما إذا كانت الخلفية أفتح أو إذا كانت هناك صبغات على سطح القزحية، لا يُصبح الأزرق ملحوظًا، وقد تبدو العيون بُنية اللون. تكون العيون خضراء اللون إذا كانت تُوجد صبغة تختزل اللون الأبيض إلى الأصفر؛ وذلك لأن التشتُّت الارتدادي لمزيج اللونين الأزرق والأصفر يظهر باللون الأخضر. لون العينَين الأزرق قد يتغيَّر مع التقدُّم في العمر إذا كَبُرَت الجُسَيمات الموجودة داخل القزحية بما يَكفي لتشتُّت كل الألوان بشكلٍ مُتساوٍ بدلًا من تشتيت اللون الأزرق تفضيليًّا.

(١٢٣) لماذا يتحوَّل الجسم إلى اللون الأزرق عند البرودة الشديدة؟

لماذا يتحوَّل لون البشرة القوقازية الفاتحة إلى اللون الأزرق عند البرودة؟ لماذا تتسبب حلاقة الشعر القصير لهذا النوع من البشرة في تلونها باللون الأزرق بعد الحلاقة؟ لون الدم أحمر وليس أزرق، فلماذا يظهر هذا اللون؟

الجواب: بعض الجسيمات الموجودة في سطح البشرة القوقازية تشتِّت الضوء الأزرق بصورة أكبر من باقي الألوان. ومع ذلك، تكون الصبغة باهِتة بما يَكفي فلا تحتاج إلى



شكل ٦-٤٥: بند ٦-١٢٣: (أ) تُشتِّت البشرة الضوءين الأزرق والأحمر خارجها. يخترق الضوء الأحمر البشرة بصورة أعمق. (ب) تمتص الأوردة الكثير من الضوء الأحمر، ولا يتشتَّت خارج البشرة سوى الضوء الأحمر الضعيف.

خلفية داكنة لتكون مرئية. إذا فُحصِت بشرة شخص ينمو شعرُ وجهِه بكثافة بعد الحلاقة الدقيقة للشعر القصير، يُمكِن أن يُرى اللون الأزرق نتيجة للخلفية الداكِنة التي تتسبَّب فيها جذور الشعر الموجودة أسفل سطح البشرة. عندما يشعر شخص قوقازي ذو بشرة شاحِبة بالبرودة، يُمكن أن ينخفض تدفق الدم عبر الشُّعيرات الدموية للبشرة بدرجة كافية بحيث تَفقد البشرة لونها الوردي الطبيعي، ويصبح من الممكن تمييز الضوء الأزرق المشتَّت. وبالمثل، يتحوَّل لون بشرة الجثة إلى اللون الأزرق بنفس الطريقة.

تظهر الأوردة باللون الأزرق لأن الضوء الأحمر يَخترق البشرة بعمق أكبر من الضوء الأزرق. لمعرفة سبب أهمية هذا الأمر، لنُلقِ نظرة على الضوء الذي شُتِّتَ من منطقتَين مُتجاورتَين من البشرة، كما هو مبين بشكل ٦-٤٥؛ حيث المنطقة (أ) هي بشرة لا يوجد أسفلها وريد، بينما المنطقة (ب) هي بشرة يوجد أسفلها وريد. في المنطقة (أ) نَعترض كميتَين معينتين من الضوءين الأزرق والأحمر بسبب التشتت. بينما في المنطقة (ب) نعترض نفس الكمية من الضوء الأزرق، الذي لا يتأثر بالوريد الموجود أسفله لأنَّ الضوء الأزرق لا يَخترق البشرة بالعُمق الكافي ليصل إلى الوريد. ومع ذلك، يصل الضوء الأحمر إلى الوريد ويَمتَصُّهُ الدمُ جزئيًّا. ومِن ثَمَّ تتشتَّت كمية أقل من الضوء الأحمر من المنطقة (ب) مقارنة بالمنطقة (أ).

ولأن المنطقتَين متجاورتان فإننا نقارن لا شعوريًّا بين لونَيهما. فعليًّا تكون كميتا الضوء الأزرق في المنطقتَين متساويتَين، وتكون كمية الضوء الأحمر أقل في المنطقة (ب). ولذلك، تظهر المنطقة (ب) وكأن بها ضوءًا أزرق أكثر من المنطقة (أ) بسبب قلة الضوء الأحمر فيها. وهكذا، يَظهر الوريد الموجود أسفل المنطقة (ب) باللون الأزرق؛ أي إن دماغك يُلَوِّنُ الوريد بهذا اللون.

(١٢٤) أشكال بقع الضوء

يمكننا أن نرى على العديد من الأسطُح التي يُضيئها نور الشمس الساطع أشكالًا محبَّبة (أنماطًا على هيئة بقع) من النقاط الساطعة والداكنة، والتي غالبًا ما تكون بألوان زاهية. لنُجرِّب سطحًا أسود مسطح أولًا. بمجرد التعرف على نمط الشكل، سنتمكَّن من رؤية هذا النمط نفسه على الأسطح الأخرى مثل سطح معدني لامع أو حتى أحد الأظافر. عادة ما تكون تلك الأنماط الشكلية أكثر وضوحًا إذا كان مصدر الضوء هو ضوء الليزر.

إذا فحصنا شكل إحدى بقع الضوء التي ينتجها ضوء الليزر ونحن نُحرِّك رأسنا إلى الجانب في تلك الأثناء، قد نجد أن الشكل يتحرَّك في نفس الاتجاه أو في عكسه، أو قد نجده يتحرَّك سريعًا دون اتجاه معيَّن. فما الذي يُحدد نوع الحركة التي نراها؟

في بعض الحالات، يُمكن أن تكون بقعة الضوء متحركة حتى إذا كنتَ أنت ساكنًا. املأ ملعقة جزئيًّا بالحليب (تجنَّب استخدام الحليب الخالي من الدسم) وضعها في ضوء الشمس الساطع. ستجد أنه عند الحافة المسطَّحة من الحليب تتراقَص نقاط لونية مضيئة. إذا أُضيئَت تفاحة حمراء أو ثمرة طماطم حمراء بضوءٍ أحمر من ليزر الهيليوم-النيون يتقلَّب شكل بقعة الضوء التي تظهر على سطح الثمرة، فما السبب وراء تلك الظواهر؟

الجواب: يَنتج شكل بقعة الضوء من تداخل موجات الضوء المنعكسة من السطح. تقترب الموجات من السطح بالتزامن بعضها مع بعض تقريبًا، ولكن قد يتغير الوضع نتيجة لخشونة السطح مجهريًّا. ومِن ثَم، فالموجات الضوئية التي تنعكس نحوك من أحد النقاط المنخفضة على السطح على سبيل المثال، تقطع مسافة أبعد نسبيًّا من الموجات التي تنعكس نحوك من نقطة مُرتفعة مجاوِرة. وهكذا، ووفقًا للظروف، فالموجات التي تصل إلى عينَيك قد تكون متزامنة أو غير متزامنة ويمكنها أن يُعزِّز بعضها بعضًا أو يُلغي بعضها بعضًا. باختصار، يكون بعض المناطق في شكل البقعة الضوئية ساطعًا، وبعضها الآخر معتمًا.

لن ترى مثل هذا الشكل في ضوء المصباح؛ وذلك لأن ضوء المصباح يَصدُر من الذرات عشوائيًّا. ومِن ثَم، فالموجات التي تُضيء سطحًا قد تكون مُتطاوِرة في إحدى اللحظات، وغير مُتطاوِرة في اللحظة التالية. تتغير أشكال بقع الضوء بين كل لحظة وأخرى بسرعة كبيرة جدًّا بحيث لا تلاحظها عيناك؛ وبالتالي فجلُّ ما ستراه هو سطح مضيء خالٍ من أي أشكال ظاهرة. إذا كنت ترغب في رؤية أشكال لبُقَع الضوء، فلا بد أن تستخدم ضوءًا مترابطًا (موجات ذات علاقة متطاورة ثابتة تقريبًا). عمليًّا، هذا يعني أنك لا بد أن تستخدم إما ضوء الشمس (وهو مُترابط جزئيًّا) وإما ضوء الليزر. على الرغم من أن انبعاث الضوء من الشمس عشوائي بلا أدنى شك، إلا أنها بعيدة جدًّا بحيث إنها تعمل كمصدر ثابت للضوء يُمكننا أن نقول إن موجاته الضوئية مترابطة.

إذا كنت تُعاني من قِصَر النظر، فقد تبدو أشكال بُقَع الضوء المنبعثة من الليزر أقرب من سطح المشاهدة؛ إذ لن تكون على علم ببُعدها الحقيقي؛ ومِن ثَمَّ فإن التركيز الطبيعي لعينيك سيجعل شكل بقعة الضوء يبدو أقرب. إذا حركت رأسك في أحد الاتجاهات فسيبدو الشكل وكأنه يتحرَّك في الاتجاه «المعاكس» أمام سطح المشاهَدة. يحدث خداع بصري مُشابه إذا ثَبَّتَّ إصبعك بين عينَيك والمصباح مع الحفاظ عليها ثابتةً. وبما أننا نعلم أن المصابيح لا تتحرَّك بينما تتحرَّك الأصابع، يحدث خداع بصري شديد يجعلك تعتقد أن الإصبع القريبة من عينَيك تتحرَّك في الاتجاه المعاكس لحركة رأسك. أما إذا كنت تعاني من طول النظر، فستبدو أشكال بقع الضوء أبعد عنك من سطح المشاهَدة؛ وذلك لأن عينيك تتكيف بشكل طبيعي على رؤية المسافات البعيدة. إذا حركت رأسك في أحد الاتجاهات، فسيبدو الشكل البعيد وكأنه يتحرَّك في «نفس» الاتجاه.

وإذا كان نظرك طبيعيًّا فستعتمد الحركة الظاهرية لبُقعة الضوء على لون الضوء؛ وذلك لأن كل لون ينكسر بكمية مختلفة عند دخول العين، وبذلك فقد يُفَسَّر كل لون بأنه يصدر من مسافة مختلفة. يقترح بعض الباحثين وجوب استخدام بُقعة ضوء الليزر في فحص العين عندما يكون المريض، كطفل صغير مثلًا، غير قادِر على قراءة الحروف الموجودة على جدول فحص الرؤية المعتاد.

تعود المَظاهر الحركية في الحليب إلى نوعَين من الحركة: (١) البخر الذي يحدث على طول الحافة الرقيقة للحليب يتسبب في حركة دوران في السائل. (٢) حتى دون وجود حركة الدوران، تخضع الجزيئات لـ «الحركة البراونية» التي تَصطدم فيها عشوائيًّا بعضها ببعض وببروتينات الحليب وكريات الدهون. يُغيِّر كلا النوعين من الحركة باستمرار طريقة تشتُّت الضوء من الحليب. لا بد أن تكون طبقة الحليب رقيقة أو سيتشتَّت الضوء عدة

مرات قبل مغادَرة سطح الحليب حيث يُصبح تطاور الموجات مُضطربًا ولا يُمكن رؤية أي مظهر من مظاهر التداخل. في هذه الحالة، يكون لون الحليب أبيض فحسب.

أما «بُقعة الضوء المتحركة» على جانب ثمرة تفاح أو طماطم فيُعتَقَدُ أنها تعود إلى الحركة الطفيفة للجُسَيمات الصبغية (البلاستيدات) الموجودة في القشرة. يتغيَّر بُعدها عنك أثناء تحرُّكها، وهو ما يغير تداخل موجات الضوء التي تتشتت نحوك؛ ومِن ثَمَّ يغير شكل بقعة الضوء الظاهرة.

(١٢٥) ألوان الإضاءة الفلوريسنت

إذا أدرتَ جسمًا، كعملة معدنية مثلًا، تحت إضاءة فلوريسنت، ربما تجد أن الجسم يُظهِر ألوانًا باهتة مثل الأزرق والأصفر. تَنجح التجربة أكثر إذا كان الجسم موضوعًا على خلفية داكنة أثناء إضاءة المصباح الفلوريسنت. يُمكن رؤية الألوان نفسها إذا اهتزَّ حبل من المصابيح الفلوريسنتية: تبهت ألوان الأجزاء الضبابية الناجمة عن حركة حبل المصابيح. ويُمكن رؤية الألوان أيضًا على طبقة رقيقة من المياه الجارية المحيطة بالموضع الذي تَصطدم فيه مياه الصنبور بالحوض. ما سبب ظهور الألوان؟

الجواب: يُثار المصباح الفلوريسنت بفعل موجة (تيار) من الإلكترونات تسري عبْر ذرات البخار الزئبقي داخل الأنبوب. تتصادَم الإلكترونات بالذرات وتثيرها، وسرعان ما تزول الإثارة، لينبعث ضوء أزرق وأخضر وكذلك أشعة فوق بنفسجية. تُمتَص الأشعة فوق البنفسجية بفعل طبقة فسفورية مبطنة للجزء الداخلي من المصباح، الذي «يتوهَّج» لبرهة (بمعنى أن الفسفور يتوهج). وإذا كان الضوء العام المراد هو الضوء الأبيض، يقع الاختيار على الفسفور لينبعث منه ضوء أحمر وأصفر بصفة عامة لتِكملة الضوء المنبعث من ذرات الزئبق؛ ومِن ثَمَّ ترى الضوء الأبيض.

وبالنسبة إلى العين، ينبعث من المصباح ضوء أبيض بلا انقطاع. ورغم ذلك، يتذبذب انبعاث الضوء الأزرق والأخضر من الزئبق عدة مرات في الثانية الواحدة؛ لأنه يتمُّ التحكُّم في التيار، الذي يسري عبْر المصباح، من خلال مصدر كهربائي ذي تيار متردِّد يتفاوت في قوته واتجاهه عدة مرات في الثانية الواحدة. ومن بين موجات الانبعاثات الزئبقية، لا ينبعث من المصباح إلا اللونان الأحمر والأصفر الفسفوري. ومِن ثَم، إذا أُضيء الجسم المتحرِّك بإضاءة فلوريسنت، فإن انعكاساته في اتجاهات مختلفة تتذبذب بين اللون الأبيض واللونين الأحمر والأصفر، وترى الألوان الظاهرة بانتظام. الموقف أشبه بالانعكاسات

الصادرة عن وتر مُهتز أو الصادرة عن موجات صغيرة تتحرَّك على سطح المياه بالقرب من نقطة الاصطدام أسفل الصنبور مباشرة.

(١٢٦) النظارات الشمسية المستقطِبة

كيف تكون النظارات الشمسية المُستقطِبة أكثر فعالية في حجب الوهج المنبعث من الطريق الأسفلتي مقارنةً بالنظارات الشمسية المعتمة وحسب؟ لماذا يُمكن للنظارات الشمسية المُستقطِبة أن تحسن رؤيتك تحت الماء بحيث يمكنك تحديد مكان الأسماك أثناء الصيد مثلًا؟

اخلع النظارات، وأمسك بفلتر أمام إحدى عينَيك وأغلق الأخرى، وانظر في خطٍّ مائل إلى بُحيرة. أَدِر الفلتر حول خط الرؤية. لماذا تَختفي البحيرة عند تحريك الفلتر في بعض الاتجاهات؟

الجواب: الضوء عبارة عن موجة من المجالات الكهربائية والمغناطسية المُهتزَّة. هذه المجالات تكون موجهة دومًا في اتجاه عمودي على اتجاه انتقال الضوء، ولو مثَّلناها بأسهم قصيرة، فإن الرسمة ستبدو أشبه بساق زهرة تَنبثِق على جانبَيها الأشواك. و«استقطاب» الضوء (أو عدم الاستقطاب) يشير إلى اتجاه المجال الكهربائي؛ أي الأسهم القصيرة تُمثِّل المجال الكهربائي. إذا كان الضوء «غير مُستقطَب»، قد تُشير هذه الأسهم إلى أي اتجاه عمودي لاتجاه انتقال الضوء. وإذا كان الضوء «مُستقطَبًا»، تمتدُّ هذه الأسهم على خط واحد، إما في اتجاه واحد على طول الخط أو في الاتجاه المعاكس. وهذا الضوء المُستقطَب مميَّز؛ لأن الضوء المنبعث من جميع مصادر الضوء السائدة تقريبًا، بما فيها الشمس، يكون غير مُستقطَب.

وإحدى الطرق لجعل الضوء غير المُستقطَب مُستقطَبًا هي عبْر انعكاسه من على أنواع أسطح معينة. على سبيل المثال، إذا كانت أشعة الشمس (غير المُستقطَبة) تنعكس من على الرصيف أو المياه، فإنها تَصير «مُستقطَبة أفقيًّا». هذا يعني أن المجالات الكهربائية في الضوء تكون أفقية (الأسهم القصيرة تكون أفقية). إذا اعترضت عيناك سبيل هذا الضوء، فإنهما تَريان بُقعة لامعة على الرصيف أو مياهًا عند نقطة الانعكاس، ويُوصف الضوء بأنه «ساطع». ومثل هذا الضوء يُجهد العين ويقلل وضوح الرؤية أثناء القيام بعدة أنشطة، مثل قيادة السيارات.

يُمكنك أن تُقلِّل سطوع الوهج من خلال ارتداء النظارات الشمسية المُعتادة، التي تَحتوي على أقراص بلاستيكية ملوَّنة، إلا أنها تعتم باقي المشهد، وهو أمر مكروه إذا

كنت تُراقب حركة المرور القادمة في اتجاهك. والنظارات الشمسية المُستقطِبة مُختلفة؛ إذ إنها تحتوي على فلتر مُستقطِب يَحجب (يمتص) الضوء المُستقطَب الأفقي؛ ومِن ثَمَّ فإنها تحجب الوهج المُنعكس من الرصيف أو المياه. ونظرًا لأن النظارات الشمسية المُستقطِبة تكون ملوَّنة قليلًا، فإنها تعتم المشهد بأكمله ولكن ليس بدرجة كبيرة. ومِن ثَمَّ فإنها تُوفِّر رؤية واضحة وساطعة نسبيًّا بدون وهج معتاد. ولعلك تكون قادرًا على رؤية الأسماك تحت الماء، والتي كانت مُتخفية من قبل تحت الوهج الساطع المُنعكِس من المياه.

وإذا أدرت أحد الأسطوانات المُستقطِبة حول خط الرؤية حين تَنظر إلى بحيرة، تَختفي البحيرة حين يحجب الفلتر الضوء المُستقطَب أفقيًّا المُنعكِس منها. وأثناء الطيران بحثًا عن المياه، تستدل بعض الحشرات المائية على وجود المياه من خلال تعقُّب الضوء المُستقطَب أفقيًّا المنعكس من المياه. فمثل هذا الضوء يكون أكثر سطوعًا حين يكون ارتفاع الشمس حوالي ٤٠ درجة فوق خط الأفق، ولعل هذا هو السبب الذي يجعل الحشرات المائية تبحث عن المياه في الصباح الباكر أو في وقت متأخِّر من بعد الظهيرة أكثر فترات الظهيرة.

(١٢٧) استقطاب السماء

لماذا يكون الضوء مُستقطَبًا في غالبية أجزاء السماء الصافية؟ ولماذا يكون غير مُستقطَب في بعض الأجزاء؟

لماذا يكون الضوء الصادر من السحاب غير مُستقطَب عادةً؟ (هذه الحقيقة تساعد في تصوير السحاب: ضع فلترًا مُستقطِبًا على العدسة وأَدِرْها حتى تبرز السحب وتتميز عن السماء الموجودة في الخلفية.) لماذا يكون الضوء المنبعث من السحب مُستقطَبًا إذا كانت السحب موجودة في الشرق بالقرب من غروب الشمس أو في الغرب بالقرب من شروق الشمس؟ إذا نظرت إلى تلك السُّحب أثناء الطيران وأنت ترتدي نظارة شمسية مُستقطِبة، لعلك ترى خطًّا ساطعًا يمر فوق السحب نحو جزء من خط الأفق في الجهة المقابلة من الشمس. وإذا أدرتَ النظارة الشمسية حول خط الرؤية، يختفي الخط. ما سبب ظهور الخط؟

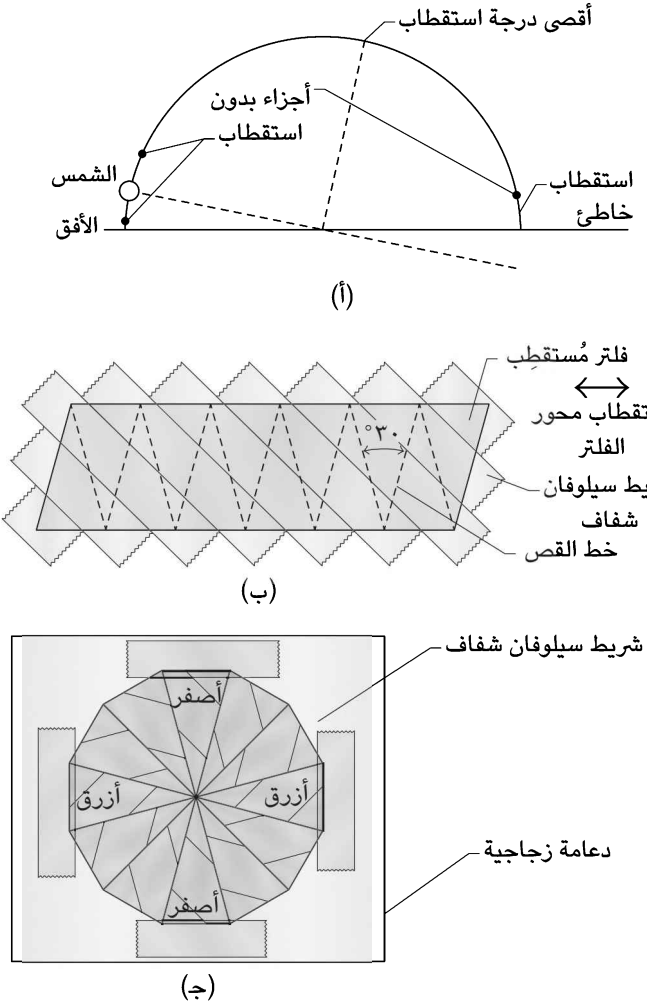
الجواب: على الرغم من أن أشعة الشمس المباشِرة تكون غير مُستقطَبة، فإن الضوء القادم من غالبية أجزاء السماء يكون مُستقطَبًا لأنه يتشتَّت بفعل جزيئات الهواء. وكمثال على ذلك، هب أن الشمس على ارتفاع مُنخفِض ناحية الغرب وأن الضوء مُنتشِر نحوك

عبْر جزيئات الهواء العلوية. يكون المجال الكهربائي للضوء الذي تراه في الاتجاه الجنوبي الشمالي، ونقول إنَّ الضوء مُستقطَب أفقيًّا في الشمال والجنوب. وأغلب الضوء القادم من باقي السماء يكون مُستقطَبًا نحو الشمال والجنوب حين تكون الشمس على ارتفاع مُنخفِض. ورغم ذلك، الانتشار عبْر جزيئات الهواء يجعل أجزاءً من السماء بالقرب من الأفق الشمالي والجنوبي مُستقطبة رأسيًّا.

ومن المفترض أن يكون الضوء القادم من أجزاء السماء الموجودة في الجهة المقابلة من الشمس (خط الأفق الشرقي حين تكون الشمس على ارتفاع مُنخفِض ناحية الغرب) مُستقطَبًا في الاتجاه الجنوبي الشمالي (شكل ٦-٤٦أ). وعلى الرغم من ذلك، فالضوء القادم من تلك الأجزاء يكون مُستقطَبًا رأسيًّا؛ لأنها مضاءة بفعل الضوء القادم من باقي السماء (التي يَنبعث منها ضوءٌ مُستقطَبٌ رأسيًّا) أكثر من كونها مُضاءة بفعل أشعة الشمس المباشرة. ويوجد موضع، فوق الجزء المواجه للشمس نسبيًّا، يختفي فيه الاستقطاب، وهو يُميز التحول من الجزء السفلي المُستقطب رأسيًّا من السماء إلى الجزء المُستقطَب في الاتجاه الجنوبي الشمالي.

فيما يَلي أداة بسيطة تُوضِّح استقطاب ضوء السماء على نحو دقيق. الصق شرائح مُتوازية من شريط سيلوفان شفاف على ورقة مُستقطِبة، مع توجيه الشرائح بزاوية ٤٥ درجة في اتجاه الاستقطاب على الورقة. (إذا كان اتجاه الاستقطاب ليس مبيَّنًا على الورقة، انظر عبر الورقة إلى بحيرة. أَدِرِ الورقة حتى تختفي البحيرة. حينئذٍ يكون اتجاه الاستقطاب رأسيًّا.) أضف طبقة ثانية من الشرائح. ثم قصَّ الورقة إلى ١٢ مثلثًا متساوي الأضلاع ذي زاويا رأسية مقدارها ٣٠ درجة وقواعد موازية لاتجاه الاستقطاب على الورقة (شكل ٦-٤٦ب). بعد ذلك، وعلى قطعة زجاج شفافة، ضع المثلَّثات في دائرة مع مراعاة تُلامس الزوايا الحادة وتوجيه الجوانب المُثبتة للشريط اللاصق نحوك (شكل ٦-٤٦ج). الآن، استعن بقطعة صغيرة بقدر الإمكان من الشريط اللاصق لتلصق قاعدة كل مثلث بالشريحة الزجاجية، ضع قطعة صغيرة جدًّا من الشريط اللاصق على الزوايا الحادة المُتجاوِرة. وعندما تنظر إلى السماء من خلال هذه الأداة، مع وضع المثلثات في الجهة المقابلة من الزجاج، قد يظهر استقطاب ضوء السماء في تلون المثلثات باللون الأزرق أو الأصفر.

وعلى الرغم من أنه ليس من السهل تفسير ظهور هذَين اللونَين، فإن إعداد هذه الأداة سهل. عندما ينفذ ضوء السماء المُستقطَب إلى الأداة، فإنه ينتقل عبْر سُمك معيَّن للشريط اللاصق، الذي يتسبَّب في دوران اتجاه المجال الكهربائي للضوء حول اتجاه



شكل ٦-٤٦: بند ٦-١٢٧: (أ) حالات استقطاب ضوء السماء. أداة مستخدَمة لرصد استقطاب ضوء السماء مصنوعة من (ب) لصق شريط شفاف على ورقة مُستقطِبة، (جـ) ثم وضع المثلثات في شكل دائرة.

انتقال الضوء. تدور الألوان المختلفة بمقادير مختلفة. وعندما ينفذ الضوء من خلال الشريط اللاصق، تتمتَّع بعض الألوان بالاستقطاب الصحيح لتمرَّ عبْر فلتر الاستقطاب الموجود على الزجاج؛ ومِن ثَمَّ ترى الألوان. أما الألوان الأخرى، ذات الاستقطاب الخطأ، فيمتصها الفلتر، وبذا لا تراها.

أشعة الشمس المُنتشرة عبْر السُّحب تكون غير مُستقطَبة بطبيعة الحال؛ لأن الأشعة تَنتشر عبْر طبقات متعدِّدة، وهو ما يمحو أي استقطاب سابق حظيَ به الضوء من قبل. وإذا تفحصت السحاب مقارنة بالسماء أثناء النظر عبْر فلتر مُستقطِب (أو أثناء التصوير)، يُمكنك أن تدير الفلتر حتى تصير السماء معتمة. ونظرًا لأن الدوران لا يغير درجة سطوع السحب، فإن درجة التباين بينها وبين السماء تزداد.

ورغم ذلك، عندما تكون الشمس على ارتفاع منخفض، قد يظهر الاستقطاب الأفقي على السحب الموجودة فوق النقطة المقابلة للشمس مباشرةً بارتفاع من ٣٠ إلى ٤٠ درجة. ينفذ جزء من أشعة الشمس، التي تضيء مباشرة تلك السحب، إلى قطرات المياه وتنعكس من الجزء الخلفي لسطح القطرات، ثم يَنفصِل عن القطرات. يُكوِّن هذا الضوء «قوس السُّحُب»، وهو شبيهٌ بقوس قُزح باستثناء أن قطرات المياه تكون صغيرة جدًّا بدرجة يتعذَّر معها فصل الألوان. ورغم ذلك، هذه العملية تستقطب الضوء كما يَحدث مع قوس قزح.

عندما تدنو الشمس من خطِّ الأفق أو تكون تحته تقريبًا، تُضاء السُّحب القريبة من الجهة المقابلة للأفق بالضوء المُنتشِر من الأفق بصفة أساسية ولا تُضيئها أشعة الشمس المباشرة. وفي الأغلب، يكون ذلك الضوء المنتشر مُستقطَبًا رأسيًّا، وكذلك يكون الضوء القادم إليك من تلك السحب. إذا كنت ترتدي نظارات شمسية مُستقطِبة أثناء النظر إلى تلك السحب من طائرة، تمرر النظارة الضوء المُستقطَب رأسيًّا وتكون تلك السحب مضاءة نسبيًّا، بينما تكون السحب الموجودة على كلا الجانبَين — والتي ترسل إليك ضوءًا غير مُستقطَب — معتمة أكثر؛ ومِن ثَمَّ ترى سحبًا ساطعة تبدو أنها تشق مسارًا يمتدُّ إلى الأفق الموجود في الجهة المقابلة للشمس.

ووفقًا للأساطير، حدَّدت قبائل الفايكنج موقع الشمس عندما تختفي خلف حجر سحري يُعتقد أنه حجر الكورديرايت. فعندما يمرُّ الضوء عبْر هذا الحجر، يتوقَّف لون الحجر على اتجاه استقطاب الضوء. وفي عصر الفايكنج، كان الراصد يَنظر إلى جزء من السماء الصافية من خلال الحجر بينما يُديره في نطاق خطِّ رؤيته. وأثناء الدوران، كان

لون الحجر يتغيَّر بين اللونَين الأصفر الفاتح والأزرق الغامق. وبالتجربة وبعد فحص عدة أجزاء من السماء، يستطيع الراصد أن يُحدِّد موقع الشمس حتى وإن كانت تقع تحت خط الأفق؛ وهو ما كانت الحال عليه كثيرًا عند دوائر العرض المرتفعة التي استكشَفَها الفايكنج.

(١٢٨) انتقال النمل من مكان إلى آخر

يعيش نمل الصحراء الفضِّي في سهول الصحراء الكبرى. وعندما يخرج النمل من عشه بحثًا عن الطعام، فإنه يقطع رحلة بحث عشوائية قد يَصل طولها إلى ٥٠٠ متر، بها مئات المُنعطفات الفجائية. علاوة على ذلك، قد يمتد مسار الرحلة عبْر أرض مستوية لا يوجد بها أي معالم مميزة. ورغم ذلك، عندما يُقرِّر النمل العودة، فإنه يُولي وجهه نحو عشه ويعدو مباشرة في طريق مستقيم. كيف يعرف النمل الطريق بدون أيِّ دلائل إرشادية موجودة في السهول الصحراوية؟

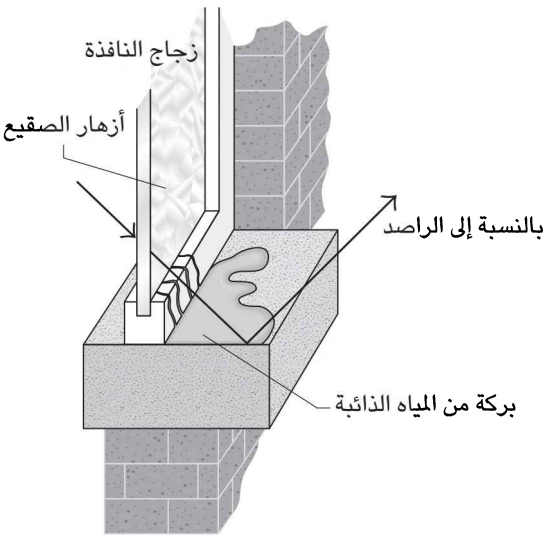
الجواب: عندما يغادر النمل عُشَّه، فإنه يتتبع المسافة المقطوعة (إذ يقوم مقام عداد المسافات) والاتجاهات التي سلكها. يستطيع النمل أن يحدد الاتجاه؛ لأن أعينه حساسة للضوء المُستقطَب؛ ومِن ثَمَّ يستطيع أن يرصد استقطاب الضوء القادم من السماء ويُحدِّد اتجاه جسمه حسب اتجاه أشعة الشمس المُستقطَبة.

والسِّمة المميِّزة فعلًا لمخ النمل هي أنه يُحَدِّث باستمرار المعلومات الخاصة بالمسافات والاتجاهات بحيث يعرف بدقة اتجاه العودة إلى عشه. يتعامل النمل مع كل جزء من رحلته باعتباره متجهًا (ذي طول واتجاه محدَّد)، ويُجري النمل بكفاءة عملية جمع المتجهات. ولعله يستغل المعالم الرئيسية إن وجدت، ولكن في التجارب التي أُزيلت منها المعالم الرئيسية في أثناء رحلة العودة إلى العش، اختار حوالي نصف عدد النمل إجراء عملية جمع المتَّجهات بدلًا من أن يضلَّ الطريق بسبب غياب المعالم الرئيسية للطريق. يُعد جمع المتجهات تحديًا صعبًا بالنسبة إلى العديد من الطلاب؛ إلا أن مخ نمل الصحراء، الذي لا يتعدَّى وزنه ٠٫١ ملِّيجرام، يستطيع أن يُجري هذه العملية الحسابية تلقائيًّا.

(١٢٩) الألوان والبقع والاستقطاب

في الصباح التالي لليلة باردة، ابحث عن طبقة رقيقة من الجليد (أزهار الصقيع) على نافذة مواجهة للشمس. انتظر حتى يَذوب بعض الثلج ليَصنع بِركةَ مياهٍ أو أَضِف أنت

المياه بنفسك (شكل ٦-٤٧). انظر إلى البِركة لكي ترى طبقات الجليد في الانعكاس. لماذا يكون الجليد ملوَّنًا في الانعكاس؟



شكل ٦-٤٧: بند ٦-١٢٩: انعكاس بلورات الجليد عبْر بِركة المياه ينتج عنه ألوان.

يُعتبَر غشاء تغليف الطعام البلاستيكي عديم اللون، ولكن إذا أدخلت طبقة طويلة ومشدودة من غشاء التغليف بين فلترين مُستقطِبَين، فإنها تتلوَّن بألوان متنوعة. وإذا أدرت أحد الفلترين حول مركزه، يتغيَّر اللون. ويمكن الاستعاضة عن غشاء تغليف الطعام بطبقات متعدِّدة من شريط لاصق شفاف. ما سبب هذه الألوان؟

تستند أعمال فنية حديثة إلى الألوان الناتجة عن بلاستيك موضوع في ضوء مُستقطَب. وفي بعض الأعمال، تنشأ ألوان الفسيفساء المختلفة من خلال الاستعانة بطبقات سيلوفان مشدودة ذات سُمك واتجاه مُتباين. وتُضاء الفسيفساء من خلال الضوء القادم من فلتر مُستقطِب مُثبت على واجهة جهاز بروجيكتور مُضيء. يرى الناظر الفسيفساء عبْر فلتر مُستقطِب آخر.

كما يَبتكِر بعض الفنانين أعمالًا فنية ثلاثية الأبعاد باستخدام البلاستيك والفلاتر المُستقطِبة. يُستقطَب الضوء المار عبْر البلاستيك إما من خلال فلتر مُثبت على البلاستيك أو من خلال انتشار الضوء القادم من الجزيئات الموجودة في السماء. وربما ترى أحيانًا استعراضًا مشابهًا للألوان إذا ارتديت نظارة شمسية مُستقطِبة أثناء النظر عبْر نافذة الطائرة أثناء طيرانها.

إذا كنتَ تَرتدي نظارة شمسية مُستقطِبة أثناء قيادة السيارة، لعلك تلاحظ بقعًا كبيرة، عادةً تكون مرتبة في شكل أنماط معينة، على النوافذ الخلفية للسيارات الموجودة أمامك. ما سبب ظهور هذه البقع؟

الجواب: يُقال إنَّ الثلج وغشاء تغليف الطعام المشدود وشريط السوليفان الشفاف والنوافذ الخلفية المضغوطة هي «مواد ذات انكسار مزدوج». عندما يَنتقِل الضوء المُستقطَب عبْر مادة ذات انكسار مزدوج، فإن اتجاه الاستقطاب يدور حول مسار الضوء. ويختلف مدى الدوران باختلاف الألوان؛ حيث يَبزر اللون الأحمر من مادة ذات استقطاب معيَّن، بينما يبرز اللون الأصفر من استقطاب مختلف؛ وهكذا. وإذا قطع فلتر مُستقطِب طريق الضوء البارز، فإنه ينقل اللون ذي الاستقطاب «المناسب» ويحجب الضوء ذي الاستقطاب «غير المناسب». وعلى الرغم من البدء بالضوء الأبيض، فإننا نَنتهي بضوء ملوَّن.

وفي حالة أزهار الصقيع، يكون الضوء المبدئي ضوءَ سماء مُستقطَب والجليد هو المادة ذات الانكسار المزدوج. ورغم ذلك، الضوء المنبعث من الجليد لا ينفذ عبْر فلتر مُستقطِب. وبدلًا من ذلك، ينعكس الضوء من بِركة المياه. ينتقي ذلك الانعكاس الضوء المُستقطَب أفقيًّا فقط، وتصلُك الألوان المنبعثة من الجليد الذي له ذلك الاتجاه من الاستقطاب.

وفي حالة النافذة الخلفية للسيارة، تصير أشعة الشمس مُستقطَبة أفقيًّا عندما تنعكس إما من السطح الخارجي أو الداخلي للنافذة المائلة. وارتداء سائق السيارة الخلفية نظارة شمسية مُستقطِبة يَحجب الضوء المُستقطَب، ومن المفترض أن تبدو النافذة مُعتمة نسبيًّا. ورغم ذلك، ينتقل جزء من الأشعة المنعكسة من السطح الداخلي عبْر أجزاء من الزجاج ذات انكسار مزدوج وعبر تغيرات في الاستقطاب. تلك الأجزاء من الزجاج هي تلك التي تعرضت للضغط أثناء عملية التصنيع لأسباب تتعلق بالسلامة. وتم تبريد الزجاج سريعًا من حالة الانصهار باستخدام نفاثات هوائية بحيث يتعرض الزجاج للضغط. وإذا تحطم الزجاج فيما بعد، يتسبَّب الضغط المعزز داخل الزجاج في تهشُّمه إلى

أجزاء صغيرة غير مؤذية؛ وليس إلى شظايا خطيرة. والأجزاء التي تم تبريدها بالنفاثات الهوائية هي المواضع التي يتغير عندها استقطاب الضوء المنعكس من السطح الداخلي. والنظارة الشمسية المُستقطِبة التي يَرتديها سائق السيارة الخلفية تمرر جزءًا من ذلك الضوء؛ ومِن ثمَّ تكون تلك الأجزاء أكثر سطوعًا عن باقي النافذة الخلفية.

ربما يكون نسق الضغط ظاهرًا على نحو طفيف حتى من دون ارتداء نظارات شمسية مُستقطِبة إذا كان الضوء الذي يُضيء النافذة الخلفية هو ضوء سماء مُستقطَب بالأساس بدلًا من أشعة الشمس المباشرة غير المُستقطَبة. وعندما يمر الضوء المُستقطب عبْر النافذة لينعكس على السطح الداخلي، يمر جزء من الضوء عبْر الأجزاء المضغوطة ويتغيَّر اتجاه استقطابه. وتختلف حدة انعكاسات هذا الضوء والضوء الثابت المُنبعث من باقي السطح الداخلي؛ ومِن ثمَّ يَستطيع سائق السيارة الخلفية أن يرى النسق على النافذة الخلفية. ويُمكن رؤية نسق مُشابه على نافذة الطائرة أيضًا.

(١٣٠) رغوة عديمة اللون ومسحوق ناعم

لماذا تكون رغوة الجعة بيضاء اللون بدلًا من أن تكون صفراء أو داكنة كأغلب سائل الجعة الموجود في الزجاجة؟ لماذا تفقد أغلب المواد الملوَّنة لونها عندما تُطحَن وتتحول إلى مسحوق؟ لماذا يكون الزجاج الصافي شفافًا بينما الزجاج المهشَّم لا يكون كذلك؟ لماذا تكون حبيبة واحدة من الملح شفافة ولكن طبقة حبيبات الملح لا تكون كذلك؟

الجواب: الضوء المار عبْر الجعة الصفراء يفقد جزءًا من الألوان غير الصفراء نتيجة لامتصاص الجزيئات الموجودة في الجعة. وفي حالة الجعة الداكنة، يحدث المزيد من الامتصاص. ورغوة كلا النوعَين من الجعة تكون بيضاء اللون؛ لأن أغلب أشعة الضوء تَنعكس من الفقاعات الكثيرة الموجودة على السطح وتتفادَى الامتصاص الذي يحدث داخل السائل نفسه. (على الرغم من أن الطبقات الرقيقة المُتكوِّنة على هذه الأسطح قد يظهر عليها ألوان متداخلة باهتة عند النظر إليها عن قرب، وهذه الألوان تتداخَل عادة لينتج عنها الضوء الأبيض عند رؤية الجعة من مسافة عادية.)

ويأتي لون أغلب المواد الصلبة من الامتصاص الانتقائي للألوان الأخرى داخل الجزء الأكبر من المادة. وعندما تُطحَن المادة، يَنتشر الضوء العارض المنبعث من الأسطح المُتعدِّدة الناجمة عن عملية الطحن، والقليل من الضوء الذي تراه يخترق حبيبات المسحوق يحدث له امتصاص انتقائي. فإذا أنار ضوء أبيض الحبيبات، يتشتَّت الضوء الأبيض ويصل إليك.

يكون لوح الزجاج شفافًا بسبب ترتيب الجزيئات داخله. فعلى كلا السطحَين، يَنعكِس جزء من الضوء، إلا أنَّ أغلبه ينفذ عبْر الجزء الداخلي من الزجاج. ويُشتِّت كل جزيء موجود على السطح الداخلي الضوء النافذ في جميع الاتجاهات، إلا أن الضوء الذي يُشتت في الاتجاه الأمامي فقط يحدث له تداخل بنَّاء (فالموجات تُعزِّز بعضها بعضًا). في حين أن الضوء المُشتَّت في الاتجاهات الأخرى يحدث له تداخل هدَّام (تنحو المَوجات إلى إلغاء بعضها البعض).

وإذا تهشم الزجاج وتجمعت شظاياه على هيئة كومة، ينعكس الضوء عدة مرات من الأسطح المتعدِّدة للشظايا، وتنتهي الحال بارتداد قدر كبير من الضوء من كومة الشظايا. ينعكس وينكسر شعاع الضوء الذي استطاع النفاذ عبْر الكومة عدة مرات؛ ومِن ثَمَّ إذا اعترضت عينك سبيل هذا الضوء، فإنها تَعجز عن تكوين صورة لمصدر الضوء الأصلي؛ ومِن ثَمَّ لا يكون الزجاج المكسور شفافًا.

ولأسباب مُماثلة، حُبيبة الملح الواحدة تكون شفافة، أما كومة الحُبيبات يكون لها عدة أسطح، ولذا يتعذر أن تكون شفافة.

(١٣١) القماش المخملي الأسود اللامع، والورنيش اللامع

لماذا يكون القماش المخملي الأسود ذا جانب لامع وجانب منطفئ؟ بما أن المواد ذات اللون الأسود تمتصُّ جميع الألوان، كيف يكون القماش المخملي الأسود لامعًا؟ لماذا يكون الورنيش لامعًا؟ لماذا تُصقَل المرايا بطبقة معدنية وليس طبقة ورقية مثلًا؟

الجواب: الجانب اللامع من القماش المخملي الأسود يكون ذا نسق مُنتظِم من التجاعيد المُتوازية. فإذا نظرت إلى القماش مِن على مستوًى عمودي على طول التجاعيد، يَنعكس الضوء من جانبها نحوك. ويكون القماش لامعًا بأقصى درجة عندما تنظر إليه من هذا الاتجاه في مواجهة مصدر الضوء. وعلى الرغم من أن الصبغة الموجودة داخل النسيج تمتصُّ بعض الضوء، ينعكس القدر الكافي من الضوء بفعل النسق الموحَّد للتجاعيد الذي يجعل القماش لامعًا. ويفتقد الجانب المنطفئ إلى هذا النسق الخاص بالتجاعيد. يتشتَّت الضوء الواقع على القماش في عدة اتجاهات بفعل الخيوط، مُزيلًا بذلك احتمالية الانعكاس الساطع في أي اتجاه واحد بعينه.

يُعزى لامعان الورنيش والطلاء إلى انعكاس الضوء الساطع، الشبيه بانعكاس المرآة، على السطح الخارجي. وفي حالة الطلاء اللامع جزئيًّا، ينفذ بعض الضوء إلى طبقة الطلاء

حيث تتشتَّت الأشعة في عدة اتجاهات من الأصباغ التي يحتوي عليها الطلاء. وهذا المزيج من الضوء المُشتَّت والضوء المنعكس من الطبقة الخارجية يُقلِّل الوهج المنبعث من الطلاء.

كلا السطحين الورقي والمُغطى بطبقة معدنية بهما بروزات غير متساوية، إلا أن هذه البروزات تكون صغيرة على الطبقة المعدنية مقارنة بالطول الموجي للضوء. وكنتيجة لذلك، يُكوِّن الضوء المُشتَّت بفعل الطبقة المعدنية صورة في عينك. أما البروزات الموجودة على السطح الورقي فتكون أكبر وتشتِّت أشعَّة الضوء في عدة اتجاهات لدرجة أنها لا تكوِّن صورة في عينك؛ ومِن ثَمَّ المرآة التي تنظر إليها في أثناء تصفيف شعرك تكون مصقولةً بطبقة معدنية لا ورقية.

(١٣٢) الألوان المُنعكسة من الزجاج الأخضر والقماش المَخملي الأخضر

إذا نظرت عبْر طبقة من الزجاج الأخضر إلى السلك الموجود داخل مصباح متوهِّج فسترى، بالطبع، ضوءًا أخضر اللون. ما الذي سيحدث إذا نظرت إلى السلك عبْر ثلاث طبقات أو أكثر من الزجاج الأخضر؟

إذا فردتَ قطعة قماش مخملي أخضر اللون، فسترى أن القماش لونه أخضر. ماذا سترى إذا طويت القماش المخملي إلى ثنايا؟ لماذا تلمع أطراف الثنايا (الجزء الخارجي من الثنايا) على نحوٍ ساطع دون أن يَظهر عليها أيُّ ألوان؟

إذا كان أحدهم يَرتدي ملابس بها أجزاء من القماش المخملي، لماذا تبدو بعض الأطراف خضراء (كالمعتاد) بينما تبدو أطراف أخرى بيضاء اللون؟

الجواب: بالنسبة إلى الكثير من أنواع الزجاج الأخضر (ولكن ليس بالضرورة جميع الأنواع)، اللون الذي تراه أثناء النظر عبْر الزجاج يتوقَّف على سُمك الزجاج. فعبر طبقة واحدة، ترى الضوء الأخضر أولًا، إلا أنَّ قدرًا من الضوء الأحمر ينفذ عبْر الزجاج أيضًا. وحين يَزيد سمك الزجاج من خلال إضافة المزيد من الطبقات، تقلُّ حدة انتقال كلا الضوءَين الأخضر والأحمر؛ إلا أن الضوء الأخضر يقلُّ على نحوٍ أسرع من الأحمر. ومع وجود ثلاث طبقات، قد تجد أن الضوء ضارب إلى البياض، لأنَّ شدة الضوءَين الأخضر والأحمر تكون حينئذٍ متساوية تقريبًا ويُرى المزيج على أنه لون أبيض. ومع وجود المزيد من الطبقات، تهيمن شدة الضوء الأحمر وترى ضوءًا به مسحة ضاربة إلى الحُمرة.

وتتحقَّق نتيجة مشابهة مع القماش المخملي أخضر اللون، الذي يَعكِس في الأصل الضوء الأخضر وكذلك قدرًا معينًا من الضوء الأحمر. عندما يكون القماش مفرودًا،

ينعكس الضوء الذي يصل إليك من القماش المخملي مرةً واحدة وترى اللون الأخضر. ولكن عندما يُطوى القماش المخملي في صورة ثنايا، يَنعكِس الضوء الذي يصل إليك مرتَين أو أكثر داخل هذه الثنايا. ومع كل انعكاس، فإن شدة الضوء الأخضر والأحمر تَقِل؛ إلا أن شدة الضوء الأخضر تقلُّ على نحو أسرع. وإذا انعكس الضوء بالقَدرِ الكافي داخل الثنايا، يَصير اللون ضاربًا إلى الحمرة.

وعندما تَنظُر إلى قطعة قماش مخملي مُسلَّط عليها ضوء أبيض، فأنت تعترض الكثير من الضوء الذي يتشتَّت من الأطراف الخارجية للنسيج المخملي، وذلك الضوء لا يَفقِد الكثير بفعل الامتصاص لأنه يتشتَّت مرةً واحدة فقط؛ ومِن ثمَّ يظلُّ ضوءًا ساطعًا وأبيض اللون. ويصير الضوء، الذي يَخترق القماش المخملي وينبعث منه، أخضر اللون وأغمق عن باقي القماش. وعند الرسم على القماش المخملي أو ثنايا القماش، تُصبَغ الأطراف بخط أبيض ناصع لتصوُّر اللمعان الذي يراه الفنان، مقارنةً باللون الأغمق الذي تراه على باقي القماش المخملي.

(١٣٣) البشرة المتورِّدة والنضارة الواضحة

تستطيع أن تُخمِّن ما إذا كانت بشرة شخص ما، طفل مثلًا، نضرة أم لا من خلال الاستدلال بمؤشِّر بصري، لا سيما حين يَنعكِس مصدر الضوء من خلف هذا الشخص على البشرة ويرتد إليك. وقد تفتقد المحاكاة الحاسوبية للأشخاص إلى هذا المؤشر، وحينئذٍ قد تبدو البشرة جامدة، مما يُوحي أنها مجرد محاكاة وحسب. وتلاحظ نفس نوعية المؤشِّر البصري للنضارة حين تنظر إلى ثمرة خوخ ناضِجة في ضوء قادم من الخلفية، وهو أمر مختلف على نحو جدير بالملاحظة عن ثمرة الدراق مثلًا، ونتيجة لذلك ترى أن ثمرة الخوخ نضرة أكثر. ما هو المؤشِّر البصري؟

الجواب: المؤشِّر الخاص بنضارة البشرة هو كمية الضوء القليلة التي تتشتَّت على الحافة الخارجية لرؤيتك لشخص ما، سواء على الطبقة الخارجية للبشرة أو (الأفضل) الشُّعيرات المنبثقة من البشرة. حتى حين تبدو البشرة ملساء، فلا بد أن بها شعيرات قصيرة ملساء لا تُرى بالعين المجرَّدة حين تنظر إليها مباشَرة. ورغم ذلك، حين يَنعكِس مصدر الضوء القادم من خلف الشخص على البشرة ويرتدُّ إليك، يَنتشِر جزء من الضوء القادم من الحافة الخارجية لرُؤيتك من تلك الشعيرات، مما يعطي بريقًا نضرًا لتلك

الحافة. وأنت ترى هذا البريق باعتباره مؤشرًا على النضارة. والحافة التي لا يَنعكِس عليها بريق تكون أكثر حدَّة ومحدَّدة على نحو أفضل؛ ومِن ثَمَّ تبدو «جامدة».

يُعطي الزغب الدقيق الذي يَبرُز من ثمرة الخوخ وهجًا ناضرًا حول حافة الثمرة تحت الإضاءة المناسبة، مما يجعل الثمرة تبدو نضرة. أما ثمرة الدراق، التي تَفتقِر إلى هذا الزغب، فتبدو جامدة. وانتشار الشعيرات الملساء على بشرة بعض الشابات يُعطيهنَّ مظهرًا نضرًا حتى إنهن يتَّصفْن بأنهن يتمتَّعن بـ «بشرة نضرة كالخوخ».

وفي تأثير ذي صلة، إذا وقف أحدهم أمام مصدر الضوء، الشمس مثلًا، يُمكنك أن ترى وهجًا مثيرًا على الطبقة الخارجية من الشعر الموجود أعلى الرأس.

(١٣٤) حفلات كعك التوينكي وهلام الفازلين

في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، يُقال إنَّ بعض الحفلات الطلابية تُقام على الأضواء السوداء (الأشعة فوق البنفسجية) المنبعثة من مصابيح الإضاءة فوق البنفسجية. يُلطِّخ المشاركون أجسادهم بهُلام نفطي من الفازلين أو بكريمة حشو كعكة التوينكي. ولعلهم يتناولون ماء التونيك، الذي يَحتوي على وهج أزرق غريب. لماذا ينتج وهج عن هذه المواد تحت الأشعة فوق البنفسجية؟

الجواب: تُشعُّ بعض المُكوِّنات التي يحتوي عليها الهلام النفطي وكريمة حشو كعك التوينكي من خلال امتصاص الأشعة فوق البنفسجية وإطلاق ضوء مرئي عند الطرف الأزرق للطيف المرئي. أشك أن المكوِّن عبارة عن هيدروكربون عطري. يُستخدم الفازلين باعتباره مادة مُثبتة لبعض الهيدروكربونات العطرية الأخرى على الأجسام التي يُريد رجال الشرطة تعقُّبها بينما يَتداولها المُجرمون. يُدهَن الجسم عشوائيًّا ببقع من الفازلين، ويُمكن التعرف على المركبات الهيدروكربونية العطرية لاحقًا عندما تُضيء البُقع بالأشعة فوق البنفسجية. يتوهج ماء التونيك باللون الأزرق تحت الإضاءة السوداء لأنه يحتوي على مركب الكينين، الذي يمتص الأشعة فوق البنفسجية ثم يشعُّ الضوء الأزرق.

(١٣٥) لون اللحم

لماذا يكون لون السطح الخارجي للَّحم البقري الطازج أحمر زاهيًا بينما يكون لون الأجزاء الداخلية أحمر مائلًا للأُرجواني؟ لماذا يتحوَّل لون الأجزاء الداخلية للحم المشوي

إلى الأحمر الزاهي عند طهْوه بدرجة قليلة النضج ويتحوَّل لونُه إلى البُني عند طهوه بدرجة شديدة النضج؟ لماذا تُغطَّى لفائف لحم الخنزير المقدَّد والمُدخَّن واللحم البقري المحفوظ جزئيًّا بالكارتون أو تُحفَظ في المخزن بحيث يكون اللحم بعيدًا عن الإضاءة؟ لماذا يظهر على اللحم المقدد أحيانًا طبقة صفراء أو خضراء فلوريسنتية؟ ما سبب ظهور التقزُّح اللوني أحيانًا على اللحم؟

الجواب: يُعزى لون اللحم في أغلبه إلى صبغة الميوجلوبين المسئولة عن نقل الأكسجين من الرئتين، في الحيوانات الحية، إلى اللحم بواسطة الهيموجلوبين الموجود في الدم. عند ذبح الحيوانات، ينقطع إمداد الأكسجين ويتحوَّل الميوجلوبين إلى اللون الأحمر المائل إلى الأرجواني. وبمجرد أن يتم تقطيع اللحم وعرضه في الهواء، يتَّحد الأكسجين الموجود في الهواء مع الميوجلوبين الموجود على السطح المكشوف، مكوِّنًا الأوكسيميوجلوبين ذي اللون الأحمر الزاهي. وتحت السطح قليلًا، حيث يكون الأكسجين موجودًا ولكنه أقل وفرةً، يتفكك الأوكسيميوجلوبين ويتأكسد الحديد الموجود داخله ويتحول إلى حديد ثلاثي التكافؤ (حديديك). يكونُ لون المركَّب الناتج، المسمى متميوجلوبين، أحمر مائلًا إلى البُنِّي. وعند طبقة أعمق من اللحم؛ حيث توجد كمية أقل من الأكسجين، يظلُّ لون الميوجلوبين أحمر مائلًا إلى الأرجواني. ويعرض الجزار اللحم عادةً في لفائف مُثقبة ينفذ من خلالها الهواء لكي يكون لون السطح الخارجي للحم أحمر زاهيًا، وهو ما يُوحي للزبون بأن اللحم طازج.

وعند تسخين اللحم، يتَّحد الميوجلوبين داخل أغلب أجزاء اللحم مع الأكسجين ليُكوِّن الأوكسيميوجلوبين ذا اللون الأحمر الزاهي. (ومِن ثَمَّ، إذا قطَعْتَ قطعةَ لحم مشوية بدرجة قليلة النضج، يكون لون الجزء الداخلي أحمر زاهيًا بسبب هذا التغير.) وفي الوقت نفسه، تتغير خواص الميوجلوبين الموجود في الجزء الخارجي من اللحم، ويبدأ عنصر الحديد في التأكسد، مما يجعل لون الجزء الخارجي بُنيًّا. وإذا استمر التسخين، يمتد هذا التغير في اللون إلى الأجزاء الداخلية.

وفي حالة اللحوم المقدَّدة، مثل لحم الخنزير المقدَّد والمُدخَّن واللحم البقري المحفوظ، يتحَّد أحادي أكسيد النيتروجين مع الميوجلوبين ليُكوِّنا الميوجلوبين أحادي أكسيد النيتروجين المركب، ذي الصبغة الوردية. وإذا وُضع اللحم تحت الإضاءة أثناء تعرضه للأكسجين، يفكك الضوء أحادي أكسيد النيتروجين ليُكوِّن المتميوجلوبين ذا اللون الأحمر المائل للبُنِّي. وأحيانًا يتأكسد جزء آخر من المركب، ليُكوِّن صبغة صفراء أو خضراء

مشعة. ولتفادي هذا التغير البغيض في اللون، تُوضع لفائف اللحم المقدد في المخازن لوقايتها من الضوء. وبدلًا من ذلك، يمكن وضعها في لفائف محكمة الغلق ومفرغة من الهواء للتخلُّص من الأكسجين.

ويُعزى التقزُّح اللوني في اللحم النيِّئ أو المطبوخ إلى حدوث تداخُل في الضوء الذي يُشتَّت بفعل اللُّيَيْفَات العَضَلِيَّة (وهي عبارة عن ألياف عضلية) عند السطح الخارجي للحم أو أسفله مباشرةً. وعندما يقع الضوء على نحوٍ عمودي على اللُّيَيْفات العضلية، يتداخل الضوء المشتَّت عند نقطة ما مع الضوء المُشتَّت عند نقطة أخرى، مع حدوث تداخُل بنَّاءٍ عادةً للضوء الأخضر. ويَحدُث التقزُّح اللوني بالأساس في الجزء الأخضر من الطيف المرئي، بسبب حدوث جفاف للسطح الخارجي. والأمر ليس مرتبطًا بالضرورة بحدوث تلوُّث بكتيري للحم ولا يعني بالضرورة أن اللحم قديم وغير صالح للاستهلاك الآدمي.

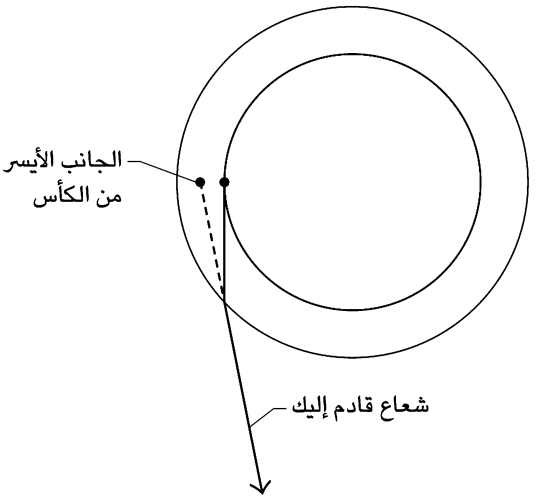
(١٣٦) كأس الجعة الصغير

لماذا تكون كأس الجعة ذات جدار سميك ومُستدقٍّ وقاعدة سميكة؟ ربما يرجع السبب وراء هذا التصميم جزئيًّا إلى إضفاء شعور بـ «الثِّقَل والامتلاء»، ولكن كيف يُمكن لهذا التصميم أن يصنع خدعة بصرية بأن الكأس تحتوي على كمية من الجعة أكبر مما هي عليه بالفعل؟

الجواب: يَصنع الجدار السميك لكأس الجعة خدعة بصرية بسبب أن انكسار الضوء يحدث عند مروره من الجعة عبْر الزجاج ثم إلى الهواء. على سبيل المثال، ينكسر الشعاع القادم من أقصى يسار سائل الجعة نحو مركز رؤيتك للكأس (شكل ٦-٤٨). وعندما ترى الشعاع، فأنت تتخيَّل امتداده في خطٍّ مُستقيم عائدًا إلى الكأس وتَستنتِج أنه يمتد إلى اليسار أكثر مما هو عليه بالفعل؛ ومِن ثمَّ تبدو كمية الجعة في الكأس أكبر مما هي عليه فعلًا. وقد يُغير سُمْك الزجاج وتقوُّسه من العمق الظاهري لكأس الجعة. وفي الحالات القصوى، ربما يكون محتوى الكأس الفعلي نصف كمية المحتوى الظاهري.

(١٣٧) ناصعة البياض

ذات مرة ادَّعت إحدى الإعلانات الشهيرة لمسحوق غسل بأن المُنتَج يجعل الملابس البيضاء «ناصعة البياض». ماذا تعني هذه العبارة؟



شكل ٦-٤٨: بند ٦-١٣٦: منظر علوي لكأس الجعة يُعطي انطباعًا وهميًّا باحتوائها على كمية كبيرة.

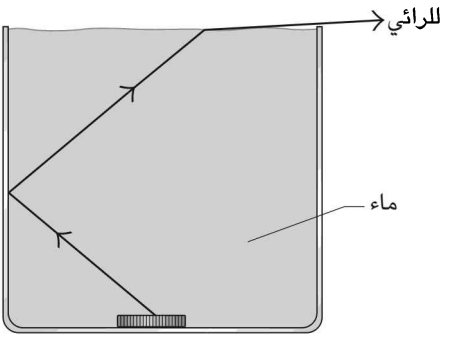
الجواب: يترك مسحوق الغسل مُنصِّعات فلورية في الملابس تُغيِّر قدرًا من الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس إلى أشعة زرقاء، ومِن ثَمَّ تزيد كمية الضوء المرئي المنبعثة من الملابس. تكون الملابس «ناصعة البياض» بمعنى أن الملابس تُشعُّ قدرًا إضافيًّا من الطيف المرئي.

والمُنصِّع ضروري لأنَّ مسحوق الغسل يترك صبغة صفراء على الملابس. تمتصُّ الصبغةُ الضوء الأزرق. ومن دون المنصِّعات، ستصفرُّ الملابس البيضاء بمجرد أن تُغْسَل. وقبل إضافة المنصِّعات إلى مساحيق الغسل، كانت المساحيق تحتوي على صبغة زرقاء بالإضافة إلى الصبغة الصفراء. ووجود كلتا الصبغتَين على الملابس كان يسفر عن إزالة اللون تقريبًا من الملابس البيضاء، إلا أنهما كانتا تتركان لونًا رماديًّا باهتًا غير مُستحَب.

(١٣٨) اختفاء العملة المعدنية

ضع عملة معدنية في برطمان مُمتلئ بالماء، واضبط خطَّ رؤيتك بحيث ترى صورة للعملة المعدنية عبْر السطح العلوي للماء، كما هو مبين في شكل ٦-٤٩. إذا وضعت يدك عند

أقصى طرف البرطمان، فإنَّ الصورة لا تتغيَّر. ورغم ذلك، إذا كانت يدك مُبلَّلة، تختفي الصورة. لماذا يُخفي البلل صورة العملة؟



شكل ٦-٤٩: بند ٦-١٣٨: عملة معدنية تُرى عبْر سطح الماء داخل البرطمان.

الجواب: العملة المعدنية تكون واضحةً في البداية لأنك ترى بعض الضوء القادم منها عبْر الانعكاس على السطح الخارجي عند أقصى طرف البرطمان. إذا وضعت يدك الجافة على منطقة الانعكاس، لا يتغيَّر الانعكاس لسببين؛ أولًا: لأن يدك تلامس الزجاج بعض الشيء. وثانيًا: لأن قدرًا ضئيلًا من الضوء يَنفُذ عبْر جلدك. ورغم ذلك، إذا كانت يَدُك مبتلَّة، تكون درجة تلامس المياه بالزجاج كبيرة. وعلاوة على ذلك، عند موضع التلامس، قد ينفذ قدر كبير من الضوء من الزجاج إلى المياه؛ لأن الخواص البصرية لكلا الوسطَين مُتقاربتان. ومِن ثَمَّ يُفقَد معظم الضوء الذي كان يَنعكِس من قبل عند أقصى طرف للبرطمان عبْر المياه الموجودة على يدك؛ ومِن ثَمَّ تختفي صورة العملة المعدنية.

(١٣٩) النظارات الشمسية والضباب

إذا ارتديت نظارة شمسية مُستقطِبة في أثناء مشاهدة جبل مغطًّى بالضباب خلفه سماء صافية، ربما في إمكانك أن تجعل الجبل يَظهر ويختفي من خلال إمالة رأسك والنظارة

الشمسية. وقد تختفي الكثير من المعالم الموجودة على الجبل وتظهر أيضًا. ما سبب حدوث هذه التغيرات؟

الجواب: عندما تُشاهد جبلًا مُغطًّى بالضباب خلفه سماء صافية، فأنت ترى ثلاثة مصادر للضوء: أولًا: الضوء المشتَّت عبْر جزيئات الهواء الموجودة في السماء الموجودة بالخلفية (هذا الضوء يكون مُستقطَبًا). ثانيًا: الضوء المُشتَّت بفعل جسيمات الضباب الموجودة بينك وبين الجبل (وإذا كان قُطْر الجُسَيمات يتراوح بين ٠٫٥ و٥٫٠ ميكرونات، يكون الضوء مُستقطَبًا جزئيًّا في نفس اتجاه الضوء القادم من السماء الموجودة في الخلفية). ثالثًا: الضوء المُنعكِس من معالم السطح على الجبل (يكون هذا الضوء مُستقطَبًا على نحو ضعيف في عدد كبير مِن الاتجاهات). ويتوقَّف مدى الضوء الذي تراه من هذه المصادر على اتجاه النظارة الشمسية المُستقطِبة.

هب أن جسيمات الضباب تحظى بالقطر المذكور مداه آنفًا. إذا أملتَ رأسك والنظارة الشمسية نحو اليسار أو اليمين حتى تكون السماء الموجودة في الخلفية ساطعةً بأقصى درجة، تنفذ النظارة الشمسية الضوء من جميع المصادر الثلاثة. ورغم ذلك، ينفذ الضوء المُستقطَب المشتت جزئيًّا بفعل جسيمات الضباب عبْر النظارة الشمسية بصورة جزئية فقط. ما تراه هو الحدود الخارجية المعتمة مقارنةً بالسماء الساطعة. تكون درجة التباين كافية بالنسبة إليك لكي ترى الجبل، إلا أن الضوء الخافت المُشتَّت بفعل الضباب لا يزال ساطعًا بالدرجة الكافية ليَحجُب معالم السطح على الجبل.

والآن، إذا أملت رأسك والنظارة الشمسية بزاوية ٩٠ درجة (إما عن يمينك أو يَسارك، أو العكس، في أي اتجاه تشعر فيه بالراحة)، فستَحجُب النظارة الشمسية الضوء كله القادم من السماء الموجودة في الخلفية ومُعظَم الضوء القادم من جسيمات الضباب. ولعلك تستطيع أن تُميِّز معالم السطح التي تكون موجَّهة لتَعكِس الضوء المُستقطَب الذي قد ينفذ عبر النظارة الشمسية.

(١٤٠) سطوع المحيط

افترض أن السماء صافية وأنك تركب قاربًا فوق مياه المُحيط حيث الأمواج معتدلة. أين يكون الماء في أشد درجات سطوعه، تحتك مباشرة بينما تنظر إلى الأسفل إليه أم على امتداد الأفق؟ أين ترى بالأساس انعكاسات ضوء الشمس المباشر أو السماء؟ أين يُمكنك أن تكون قادرًا على رؤية الأجسام المَغمورة بالمياه؟

الجواب: ثمَّة ثلاثة مصادر للضوء يُمكن المقارنة بينها؛ بريق ضوء الشمس المُنعكِس من الماء، وضوء السماء المنعكس من الماء، والضوء الصاعد من أسفل سطح الماء. دائمًا ما يكون المحيط في أكثر درجات سطوعه على امتداد الأفق؛ لأنَّ انعكاس ضوء السماء هناك يكون بزاوية مائلة بحيث لا يضيع الكثير من الضوء في الماء. وبينما تُوجِّه نظرك إلى الداخل، يدخل المزيد من ضوء السماء المنعكس إلى الماء نتيجة للزوايا الأكثر انحدارًا.

المنطقة التالية من حيث السطوع هي الخاصة ببريق ضوء الشمس، والتي تتحدَّد بواسطة ارتفاع الشمس في السماء. تتحرَّك منطقة البريق نحوك من الأفق الشرقي خلال شروق الشمس، وتكون أسفلَكَ أو بالقُرب منك حين تكون الشمس في أعلى نقطة في السماء، وتتحرَّك مُبتعدةً عنك نحو الأفق الغربي خلال غروب الشمس.

وعلى مبعدة منطقة البريق وعلى مسافة أقرب إليك من الماء البعيد، ربما يُهيمِن الضوء الصاعد على الضوء الذي تعترضه من مناطق معينة. وفي تلك المناطق ربما تكون قادرًا على رؤية الأجسام المغمورة بالمياه.

(١٤١) شريط أزرق على أفق البحر

عادةً ما يبدو جزء من البحر أسفل الأفق مباشرة بلون أزرق أو رمادي أكثر قتامةً من بقية البحر أو من جزء السماء الذي يعلو الأفق مباشرة. وفي يوم صافٍ يشبه هذا الجزء من البحر شريطًا أزرق. ويَختفي الشريط الأزرق إذا ما استلقَيتَ على الشاطئ أو ارتفعت عنه ارتفاعًا كبيرًا. فما الذي يُنتِج الشريط الأزرق؟

الجواب: عندما تنظر إلى سطح الماء أسفل الأفق مباشرة، فعادةً ما ترى انعكاسًا للسماء يَعلو الأفق بنحو ٣٠ درجة (انظر الجواب السابق). وعندما تكون السماء صافية، يكون ذلك الجزء من السماء أكثر زرقة من السماء عند الأفق، والتي تكون عادة بيضاء، والتباين بين الأفق الأبيض والانعكاس الأزرق يجعل اللون الأزرق ملحوظًا. وإذا كان الجزء المنعكس من السماء رماديًّا، حينها يكون الشريط رماديًّا، ويتباين بالمِثل مع الأفق الأبيض المُتاخِم. يختفي الشريط الأزرق أو الرمادي حين تستلقي على الشاطئ لأن الأمواج الآتية تحجب رؤية البحر أسفل الأفق مباشرة. كما أنهما يَختفيان إذا ارتفعت عن مستوى الشاطئ، غير أنني لا أعرف السبب يقينًا.

(١٤٢) حلول الظلام بشكل مباغت

لماذا يكون غروب الشمس في المناطق الاستوائية أسرع منه عند دوائر العرض المُرتفعة؟

الجواب: زمن الشفق هو الزمن المُنقضي بين بداية غروب الشمس والوقت الذي يكون فيه مركز صورة الشمس أسفل الأفق بزاوية معيَّنة. (في حالة «الشفق المدني» تكون الشمس أسفل الأفق بـ ٦ درجات، وفي حالة «الشفق البحري» تكون أسفل الأفق بـ ١٢ درجة، وفي حالة «الشفق الفلكي» تكون أسفل الأفق بـ ١٨ درجة.) وتعتمد السرعة التي تتحرَّك بها الشمس بين هاتين النقطتين على الكيفية التي يتقاطع بها مسارها الظاهري عبْر السماء مع الأفق. عند دوائر العرض المنخفضة يكون المسار رأسيًّا أو نحو ذلك؛ ومِن ثمَّ تتحرك الشمس بسرعة بين الموضعَين، وهو ما يؤدي إلى شفق قصير. وعند دوائر العرض المرتفعة يتقاطع مسار الشمس مع الأفق بزاوية صغيرة؛ ومِن ثمَّ تتحرَّك الشمس بين الموضعَين على امتداد مسار منحرف، وهو ما يؤدي إلى شفق طويل.

(١٤٣) خطوط التكثُّف الملونة

عادةً ما تكون خطوط التكثُّف (آثار تكثف الماء التي تخلفها الطائرات) بيضاء. لماذا تكون ملونة أحيانًا؟ وكيف يُمكن للجزء الملون من خط التكثُّف أن يتحرَّك خلف الطائرة مباشرة؟ فعلى أي حال، القطرات التي تتألَّف منها خطوط التكثُّف لا تتحرك بتلك السرعة.

الجواب: بينما تتشكل القطرات ثم تنمو عن طريق امتصاص الماء من الهواء، فإن باستطاعتها المرور بنطاق حجم معين تقوم فيه بفصل الألوان الموجودة في ضوء الشمس نتيجةً للحيود (نوع من التشتت). وبمجرد أن تنمو القطرة لأكبر من حدٍّ معيَّن، تختفي الألوان. وهكذا يمكن أن يوجد موضع معين وراء الطائرة يُميِّز المكان الذي يتسبب فيه نمو القطرات في إحداث خطِّ التكثُّف الملون. تكون القطرات القريبة من الطائرة أصغر من أن تنتج هذا الخط، بينما القطرات الأبعد من هذا الموضع تكون أكبر من أن تنتجه.

(١٤٤) السحب الصدفية

للسحب الصدفية (التي تسمى أيضًا سحب الستراتوسفير القطبية) ألوان جميلة بالغة الرقة. وهي نادرة الوجود ولا تُرى عادةً إلا على ارتفاعات عالية وقبل شروق الشمس وبعد

غروبها بقليل. ويعني توقيت ظهورها هذا أنها لا بد أن تكون على ارتفاعات عالية بحيث تظلُّ مُضاءة بضوء الشمس بينما الأرض من أسفلها مظلمة. إن السحب العادية الأكثر انخفاضًا تظهر الألوان على امتداد حافاتها فقط أو حين تقع أمام الشمس أو القمر، بينما بمقدور السحب الصدفية أن تُظهر ألوانًا عديدة مُبهِرة حتى حين تكون بعيدة عن الشمس بزاوية تصل إلى ٤٠ درجة.

ما الذي يُفسِّر ألوان السُّحُب الصدفية؟ وإذا كانت الألوان راجعة إلى قطرات الماء، فكيف يمكن أن يوجد ماء سائل في البيئة شديدة البرودة (نحو سالب ٨٠ درجة مئوية) عند الارتفاعات التي توجد بها هذه السحب؟

الجواب: تُعزَى ألوان السحب الصدفية إلى تشتُّت ضوء الشمس وانفصال الألوان بواسطة القطرات الصغيرة للماء وثلاثي أكسيد الكبريت داخل السحب. باستطاعة قطرات الماء الصافي الضئيلة الحجم البقاء في حالة سائلة حتى درجة حرارة تبلغ سالب ٤٠ درجة مئوية. لكن عند إدخال ثلاثي أكسيد الكبريت، باستطاعة القطرات البقاء عند درجات حرارة أقل كثيرًا، مثل تلك الموجودة على ارتفاع ١٨ إلى ٢٢ كيلومترًا؛ حيث تتكون السحب الصدفية. إذا جمعت القطرة الموجودة داخل السحابة الصدفية مزيدًا من الماء تدريجيًّا ومِن ثَمَّ نمَت في الحجم، فسيبدأ التجمُّد لا محالة، ولا يعود بوسع القطرة الإسهام في عملية فصل الألوان التي تقوم بها السحابة. يُعتقَد أن هذه القطرات المتجمِّدة تُشكِّل الذيل الأبيض الممتد من السحب الصدفية.

(١٤٥) ضوء الشفق الأرجواني

ما الذي يتسبَّب في ضوء الشفق الأرجواني الذي يظهر على نحو وجيز في سماء الغرب فوق الموضع الذي غربت فيه الشمس بعد الغروب بفترة تتراوَح بين ١٥ و٤٠ دقيقة، بعد أن تكون ألوان الغروب الأخرى قد اختفَت؟ هل الآلية نفسها مسئولة عن الضوء الأرجواني الثاني غير المعتاد، والذي يَظهر بعد مرور ساعتَين على الغروب؟ كيف يُمكن للشَّمس أن تُواصِل إمداد الضوء لسماء الغرب لهذا الوقت الطويل بعد الغروب؟

الجواب: ضوء الشفق الأرجواني هو مزيج من الضوء الأحمر المُشتَّت بواسطة الهواء مُنخفِض الارتفاع والضوء الأزرق المتشتِّت بواسطة الهواء عالي الارتفاع. الجزء الأحمر هو ضوء الشمس الذي يحف انحناء الأرض، ويمرُّ عبر الهواء المُنخفِض الكثيف. وخلال هذا

الطريق يَفقِد الضوء كثيرًا من لونه الأزرق بسبب تشتُّت الهواء. وحين يتشتَّت الضوء في النهاية إليك، يُهيمِن عليه اللون الأحمر. أما الجزء الأزرق فهو ضوء الشمس الذي يسلك طريقًا طويلًا عبْر طبقة الأوزون المُرتفعة، وخلال هذا الطريق يفقد الضوء الكثير من لونه الأحمر نتيجة امتصاص جزيئات الأوزون له. وحين يتشتَّت الضوء إليه في النهاية، يُهيمِن عليه اللون الأزرق. وبهذا، حين تنظر إلى السماء فوق المَوضِع الذي غربت فيه الشمس ستَحصُل على مزيج من اللونين الأحمر والأزرق وتُدركه على أنه لون أرجواني. وفي بعض المواقع يُمكن لهذا الضوء الأرجواني أن يُضيء قمم الجبال بعد غروب الشمس، وهو ما يعرف باسم «الشفق الألبي».

ليس ضوء الشفق الأرجواني الثاني مفهومًا جيدًا. وربما يكون راجعًا إلى الضوء الذي يتشتَّت من طبقة جسيمات عالية لا يزال ضوء الشمس يضيئها بعد الغروب بوقت طويل. تقع مثل هذه الطبقة الرقيقة على ارتفاع ٨٥ كيلومترًا وتتألَّف من حطام المذنَّبات والكُويكِبات الذي تعترضه الأرض.

(١٤٦) تموجُّات في السماء

أفاد عدة مراقبين بوجود تموُّجات داكنة وساطعة تتحرَّك عبْر السحاب. في بعض الحالات بدَت التموُّجات عشوائية، وفي البعض الآخر بدت أشبه بالموجات.

خلال القتال بالقُرب من خط سيجفريد في الحرب العالمية الثانية، شاهدت القوات الأمريكية ظلالًا داكنة تمرُّ فوق سحب الطخرور البيضاء. كانت هذه الظلال على شكل أقواس تقع مراكزها فوق الجانب الألماني.

فما الذي يُسبِّب هذه الظواهر؟

الجواب: ليست التموجات مفهومة جيدًا، ولكن يُعتقَد أنها ترجع إلى موجات الصوت التي تتحرَّك عبْر بلورات الجليد داخل السحب. وبما أن القوات الأمريكية لم تَسمَع صوتًا فمن المؤكَّد أن مصادر الصوت كانت بعيدة، وربما كانت مدفعيةً ثقيلة أو انفجارات ضخمة خلف خطوط العدو. من شأن موجة الصوت أن تعيد توجيه البلورات، وتغير من سطوع الانعكاس الصادر عنها. (وفق نظرية مبكِّرة فربما تتسبب موجات الصوت، بدلًا من ذلك، في تغيير مدى التكثُّف مؤقتًا داخل السحابة، وبذا تغيِّر من سطوع السحابة على امتداد شريط مُتحرِّك.)

(١٤٧) خط عبْر المطر البعيد

حين ترى مطرًا بعيدًا يهطل في ضوء الشمس المباشر، ربما تلاحظ خطًّا أفقيًّا يَفصل بين الهطول الأعلى الأكثر سطوعًا والهطول الأدنى الأقل سطوعًا. ما تفسير هذا الخط؟

الجواب: بصفة عامة، تقلُّ درجة الحرارة مع الارتفاع. ويُميِّز الخط الارتفاع الذي تذوب فيه بلورات الجليد وتصير قطرات مطر. تعكس البلورات ضوء الشمس أكثر مما تَعكِسُه قطرات المطر، وبذا تكون المنطقة فوق الخط أكثر سطوعًا من المنطقة أدناه.

(١٤٨) ليالٍ مضيئة

إذا كنت تعيش في منطقة لا تُلوِّثها في الليل الأضواء الشاردة، فربما تجد أن بعض الليالي مضيئة بشدة، حتى حين لا يكون القمر موجودًا. تبدو هذه الليالي مرتبطة بزخات الشهب، كما لو أن الشهب تجعل السماء أكثر سطوعًا. ومع ذلك فإن الشهب تَحترق لفترة قصيرة لا تفسر الضوء الإضافي. فهل هناك عامل آخر؟

الجواب: عندما يتحرك الشهاب في الغلاف الجوي على ارتفاع يبلغ نحو ٩٠ كيلومترًا، فإنه يُسَخِّن الهواء على امتداد مساره. ينتُج أكسيد النيتروجين في المناطق الساخنة، ثم يتفاعل مع الأكسجين لينتج ثاني أكسيد النيتروجين. تطلق هذه العملية ضوءًا في النطاق الأخضر والأصفر والأحمر من الطيف. والعين المُتكيفة مع الظلام حساسة لمثل هذا الضوء. وبهذا يُمكن لزخة شهب أن تجعل سماء الليل أكثر سطوعًا.

(١٤٩) الضوء البروجي والوهج المعاكس وأضواء الليل الأخرى

في السماء المُظلِمة غير المقمرة، بعيدًا عن أضواء المدينة، ربما يكون بمَقدورك ملاحظة رقعتَين مُثيرتَين للاهتمام من الضوء. «الضوء البروجي» هو مثلَّث لبني يُمكن رؤيته في الغرب بعد غروب الشمس ببضع ساعات أو في الشرق قبل شُروق الشمس. تكون المشاهَدات الليلية في أفضلها قرب الاعتدال الربيعي، وتكون المشاهَدات الصباحية في أفضلها قرب الاعتدال الخريفي. يكون المثلَّث ساطعًا بقدر سطوع مجرَّة درب التبانة، وموجهًا على امتداد المسطح الذي تدور فيه الأرض حول الشمس.

أما «الوهج المعاكس» فهو ضوء خافت يستطيع بعض الناس رؤيته في النقطة المقابلة للشمس في السماء (النقطة المقابلة تمامًا للموضع الذي تشغله الشمس). يكون

الضوء خافتًا لدرجة أنك ستحتاج إلى ظروف خاصة من الظلام كي تُشاهِدَه، بعينَين مُتكيفتَين مع الظلام جيدًا. وحتى حينئذٍ ربما لا يكون بمَقدورك رؤية الضوء إلا باستخدام «الرؤية الجانبية»، التي فيها تحرك عينَيك جيئة وذهابًا عبْر السماء بدلًا من أن تُثبتهما على موضع الوهج المعاكس. في نصف الكرة الشمالي تكون المشاهدة في أفضلها في شهر أكتوبر، لأن خلفية النجوم وقتها تكون مظلمة نسبيًّا.

في بعض الأحيان شُوهدت مناطق كبيرة متحرِّكة في سماء الليل، لكنها غير مرتبطة بالشفق.

ما تفسير هذه الأضواء الليلية؟

الجواب: يَرجع سبب الضوء البروجي والوهج المعاكس إلى تشتيت ضوء الشمس بواسطة الغبار الكوكبي، الآتي على الأرجح من المذنبات. يكون التشتيت في أكثر صوره سطوعًا في الاتجاه الأمامي، وأضعف في الاتجاه الخلفي، وأضعف في حالة الزوايا الأخرى. يقع الغبار المسئول عن الضوء البروجي داخل مدار الأرض. ويُمكنك رؤية الضوء المتشتِّت عنه حين يكون في مجال رؤيتك بعيد الغروب أو قبيل الشروق، ففي كلا هاتَين الحالتَين سترى الضوء المُشتَّت إلى الأمام تقريبًا.

في مُنتصَف الليل قد تكون قادرًا على رؤية ضوء الشمس المُشتَّت عكسيًّا بواسطة الغبار الموجود في مدار الأرض. وهذا هو الوهج المُعاكِس. والأشكال الساطعة المُتحرِّكة يُعتقَد أنها وهج هوائي، قادم على الأرجح من جزيئات الهيدروكسيل الموجودة على ارتفاعات عالية والتي تَستثيرُها «موجات الكثافة» (وهي تذبذبات شبه موجية في الضغط ودرجة الحرارة، يُطلَق عليها غالبًا موجات الجاذبية) التي تتحرَّك عبْر المنطقة.

(١٥٠) انعكاسات أفق البحر

في أثناء وقوفك على شاطئ البحر، انظر إلى الانعكاسات الآتية من البحر أسفل الأفق مباشرة حين يكون البحر كثير الأمواج. إذا كان البحر عديم الأمواج فسيعكس السماء وكأنه مرآة أفقية كبيرة. ولكن نظرًا لأن الأمواج لها أسطح مائلة، فإنها تعكس أجزاءً مُتباينة من السماء. والجزء المُنعكِس من كل موجة يكون مائلًا بزاوية على المستوى الأفقي بمقدار ضعف ميل الموجة.

من الغريب أن الانعكاس الذي تراه أسفل الأفق مباشرة هو في المعتاد خاص بجزء السماء الواقع عند ٣٠ درجة تقريبًا فوق الأفق. وهذه الزاوية تُشير إلى أن الانحدار

المتوسط للموجات مقداره ١٥ درجة. ومع ذلك تكشف القياسات عن أن الموجات ليس لها انحدار كبير بهذه الدرجة. فلماذا إذن يكون الانعكاس عند ٣٠ درجة تقريبًا؟

الجواب: تدبَّر أمواج البحر أسفل الأفق مباشرة. إن الأمواج الصغيرة، ذات الميول الضحلة، تعكس جُزء السماء القريب من الأفق. ورغم أن هذه الأمواج عددها وفير، فإن مساهمتها في الانعكاس الذي تراه صغيرة لأنَّ كلًّا منها لا يمتلك إلا مساحة سطح صغيرة (فهي أشبه بالمرايا الصغيرة). أما الموجات الأكبر حجمًا نوعًا ما ولها ميول متوسطة فتعكس الأجزاء الأعلى من السماء. ورغم أن تلك الموجات الأكبر حجمًا أقل عددًا من الموجات الصغيرة، فإنَّ مساهمتها في الانعكاس الذي تراه أكبر لأن كل موجة منها لها مساحة سطح كبيرة. أما الموجات الأكبر من ذلك فهي قليلة العدد للغاية لدرجة أن مساحتها العاكسة الكبيرة تكون عديمة الأهمية. وتكون النتيجة النهائية هي أن معظم الانعكاس الذي تراه يبدو كما لو أن الماء مُغطًّى بأمواج لها ميل متوسط مقداره ١٥ درجة، وهو ما يُعطي انعكاسًا للسماء مقداره ٣٠ درجة فوق الأفق.

(١٥١) استخدام كرة معدنية صلبة لتركيز الضوء

في عام ١٨١٨، قدم العالم أوجستان جان فرينل نموذجًا للموجات الضوئية في مسابقة نظمتها الأكاديمية الفرنسية. اعترض العالم سيميون دي بواسون، أحد أعضاء لجنة التحكيم، بشدة على هذا النموذج، محاولًا تَسفيهه من خلال إجراء هذه التجربة الفكرية: إذا أضيء جسم مُصمت ذو مقطع عرضي دائري (مثل عملة معدنية أو كرة) باستخدام شعاع من الضوء، افترض نموذج فرينل للموجات الضوئية أنَّ من شأن منطقة ساطعة أن تظهر في مركز الظل الذي يُحدثه الجسم على شاشة بعيدة.

رتب دومينيك إف أراجو، عضو آخر بلجنة التحكيم، لاختبار الفرضية على الرغم من الاستنتاج العبثي. ومِن المُثير للدهشة أنه وجد البقعة المركزية المضيئة. ومن قبيل المفارقة التاريخية، أن المنطقة تُعرف الآن إما باسم بقعة بواسون أو بقعة أراجو، رغم أن كلا الرجلَين كانا لا يَعتقِدان في وجودها.

ومنذ اكتشاف المنطقة، استغلَّت عدة أبحاث الأجسام المُصمَتة، مثل كرة معدنية صغيرة مأخوذة من مَحمل، لتقوم مقام العدسة لتكوين الصور. وإذا تكونت الصورة على فيلم، يمكنك أن تصنع صورة فوتوغرافية كما هي الحال باستخدام كاميرا. لماذا تتكوَّن

بقعة بواسون وكيف يُمكن لشيء مثل كرة صلبة مُصمَتة أن تجبر الضوء على تكوين صورة؟

الجواب: هب أن مصدر الضوء عبارة عن نقطة ساطعة بعيدة، وأن تكوين الصورة يتمُّ من خلال كرة مُصمتة. عندما تصل موجات الضوء إلى الكرة، تَحيد الموجات حول جانبَيها، لتنتشر إلى الخارج بسرعة وصولًا إلى داخل منطقة الظل الخاصة بالكرة. إذا وضعت شاشة خلف الكرة مُباشَرة، يُكوِّن الضوء نمط حيود ضئيلًا لدوائر متحدة المركز ساطعة وقاتمة. يكون مركز النمط هو البقعة الساطعة؛ لأن الموجات المارة إلى جهة واحدة من الكرة تقطع نفس المسافة التي تقطعها إلى المركز المَوجات المارة من الجهة المقابلة، ومن ثَمَّ تصل المَوجات وهي متطاورة ويحدث لها تداخل بنَّاء.

تكون الدائرة المُعتِمة الأولى بسبب التداخل الهدَّام. لاحظ قمة الدائرة. المَوجات التي تمر خلال الجزء السفلي من الكرة لا بد أن تقطع مسافة أطول من الموجات التي تمرُّ خلال الجزء العلوي من الكرة لتصل إلى تلك النقطة. وتصل المسافة الإضافية إلى نصف طول موجي، ومِن ثَمَّ يَحدث للمَوجتَين (واحدة من أسفل وواحدة من أعلى) تداخُل هدَّام حين تَصلان إلى النقطة الموجودة على الشاشة.

يُعزى باقي النمط إلى تداخل بنَّاء أو هدَّام مشابه؛ ففي بعض المواضع، تختلف المسافة التي تقطعها الموجات القادمة من الجهة المقابلة من الكرة بمقدار عدد صحيح من الأطوال الموجية، وهو ما يسفر عن تداخل بنَّاء، يجعل الموجات مُتطاوِرة. وفي مواضع أخرى، يكون مقدار الاختلاف في الطول عبارة عن عدد فردي من نصف الأطوال المَوجية، وهو ما يُسفِر عن تداخل هدَّام؛ حيث إنها تجعل الموجات غير مُتطاورة.

وعندما تُكوِّن الكرة صورةً للجسم، فإن كل جزء لامع من الجسم يقوم مقام مصدر نقطي للضوء ويخلق نقطة ساطعة مُزاحة قليلًا بالقرب من مركز نمط الحيود. وتراكب هذه النقاط الساطعة يكرر تقريبًا شكل الجسم؛ ومِن ثَمَّ ينتج عنه صورة للجسم.

(١٥٢) دورة سريعة في مرآة المقوسة

اثنِ طبقةً لامعة من الورق المُفضَّض اللامع لتكون أسطوانة. أمسك بهذه المرآة المقوَّسة بحيث يكون المحور الطويل للأسطوانة أفقيًّا، ثم انظر عبْر الجزء الداخلي المقوس. اضبط تقوس المرآة والمسافة التي تَفصِلُك عنها بحيث تكون صورتك معكوسة (حينئذٍ تكون خارج بؤرة المرآة). إذا أدرت الأسطوانة بزاوية مِقدارها ٩٠ درجة مئوية بحيث يكون

المحور رأسيًّا، فستنقلب صورتك لتصبح في وضعها الصحيح، بمعنى أنها ستدور بزاوية مقدارها ١٨٠ درجة مئوية. لماذا يكون دوران الصورة ضعف دوران الأسطوانة؟

الجواب: اعتبر الأسطوانة مرآتَين؛ واحدة مستوية وموازية لِمحور الأسطوانة، بينما الأخرى تتقوس حول المرآة، لتصنع تقاطعًا عموديًّا مع المرآة الأولى. الصورة المتكوِّنة على المرآة المستوية تكون غير معكوسة (كما هي الحال مع المرآة المسطحة)، إلا أن أي صورة تتكون على المرآة المقوَّسة تكون معكوسة.

ومع توجيه الأسطوانة في أي اتجاه، ترى الصور بنوعَيها؛ صورة معكوسة حقيقية أمام المرآة (تُكوِّنها المرآة المقوسة) وصورة افتراضية غير معكوسة أكثر تشويشًا خلف المرآة (تُكوِّنها المرآة المستوية). وعند توجيه الأسطوانة نحو اتجاه معين، يُهيمِن أحد النوعَين على رؤيتك. وعند توجيهها نحو الاتجاه آخر، يُهيمِن النوع الآخر. وهكذا، عندما تدير الأسطوانة بين الاتجاهَين، تتبدَّل الصورة التي تراها بين النوعَين، مما يُعطي انطباعًا واهمًا بأن ثمة صورة واحدة تدور بزاوية ١٨٠ درجة.

(١٥٣) لون دخان السجائر

لماذا ينحو لون الدخان المتصاعد مباشرة من سيجارة مشتعلة إلى الزرقة؛ بينما يكون لون الدخان الذي ينفثه المدخِّن أبيض اللون؟

الجواب: جزيئات الدخان المُتصاعد من سيجارة مشتعلة تكون صغيرة بالدرجة الكافية لتشتيت المزيد من الضوء الأزرق القادم إليك من نور الغرفة. وعند استنشاق الدخان، فإن تكثيف المياه في الجزيئات يزيد من حجمها، لدرجة أنه بمجرد أن يتمَّ نفث الدخان تُشتِّت الجزيئات الألوان المختلفة للضوء الواقع عليها على نحو مُتساوٍ، مما يُعطي لونًا مائلًا إلى الأبيض.

(١٥٤) ماذا لو بإمكانك أن ترى في ضوء الأشعة فوق البنفسجية؟

تُعزى مَحدودية رؤيتك للون الأزرق عند أقصى طرف للطيف المرئي — جزئيًّا — إلى تزايد امتصاص القرنية وعدسة عينك للضوء. وإذا خضعت لعملية إزالة المياه البيضاء وقمتَ بزراعة عدسة صناعية، فربما تستطيع أن ترى ضوءًا أكثر قليلًا في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. هبْ أن هذا كل ما تَستطيع أن تراه، هل سيبدو العالم الخارجي مختلفًا؟

الجواب: ستكون المدن مُعتمة حتى لو كانت مصابيح الإنارة مُشتعلة، ذلك لأن الأغطية الزجاجية للمصابيح ونوافذ المَباني تمتصُّ الأشعة فوق البنفسجية؛ ومِن ثَمَّ لن ترى الضوء المُنبعِث من هذه المصادر المُعتادة. ولنفس السبب، ستكون النظَّارة الطبية أشبه بنظارة شمسية سوداء. وستكون الظلال باهتة، ولن ترى بوضوح حتى في ضوء النهار؛ لأنَّ جزيئات الهواء تُشتِّت الأشعة فوق البنفسجية بفعالية أكثر من تشتيتها للضوء المرئي. وهكذا ستبدو الأجسام البعيدة معتمة، وستُطمس أيُّ ظلال جزئيًّا بسبب تشتيت الضوء بفعل الهواء.

(١٥٥) حيود حروف الأبجدية

إذا مرَّ شعاع ليزر عبْر فتحة صغيرة على هيئة حرف أبجدي، هل يُمكنك أن تتوقع نمط الحيود الذي سيترتَّب على ذلك؟ أو إذا عُرض عليك صورة للنمط، هل يمكنك أن تتوقع الحرف الأبجدي المستخدم؟ وإذا كان لديك جهاز أشعة ليزر، لعلك ترغب في ابتكار أحجية الأنماط المختلفة لحيود الضوء، باستخدام حروف الأبجدية. ومن أجل حل هذه الأحجية، قد يعمل أحدهم على فك شفرة الرسالة المكتوبة بهذه الحروف الأبجدية.

الجواب: تستطيع أن تُخمِّن الحرف الأبجدي من خلال معرفة الاتجاه الذي يَحيد فيه الضوء. عندما يحيد الضوء عند حافَّة ما، ينتشر الضوء على نحو عمودي على هذه الحافة. على سبيل المثال، الحرف O يجعل الضوء يَحيد في جميع الاتجاهات لأنَّ حافاته دائرية تقريبًا، أما الحرف Z فيجعل الضوء يحيد لأعلى وأسفل وعلى طول خط مستقيم متعامد على القطعة المستقيمة الوسطى لذلك الحرف.

(١٥٦) لعبة الانعكاسات

أحضِر مرآتَين مُستطيلتَين صغيرتَين، وثبِّت عليهما شريطًا لاصقًا من الخلف بحيث يُمكن تثبيتهما على محور مشترك، ثم ضعهما فوق رسمة بقلم الرصاص. قد تبتكر الصورة الأصلية وانعكاسها تصميمًا مثيرًا.

هب أن الرسمة تتكوَّن من خط مستقيم أو خطَّين مستقيمين يمتدَّان من مرآة إلى أخرى بحيث يتلامَس الخطَّان وصورتاهما. وإذا عدلت وضعية المرآتَين وزواياهما، تستطيع أن تبتكر أشكالًا هندسية مُنتظمة.

ومن خلال إبقاء الزاوية أقل من ١٨٠ درجة، اكتشف أقل عدد مُمكن للخطوط المستقيمة اللازمة لابتكار شكل مربَّع ومُثمَّن ونجمة سداسية الأضلاع. ما رأيك في ابتكار نجمة داخل نجمة أخرى، مع محاذاة أطراف النجمتَين بعضها مع بعض أو عدم محاذاتها على الإطلاق؟ ما أقل عدد مُمكن للخطوط المستقيمة اللازمة لصنْع مربَّع بداخله مربع صغير عند كل زاوية؟

الفصل السابع

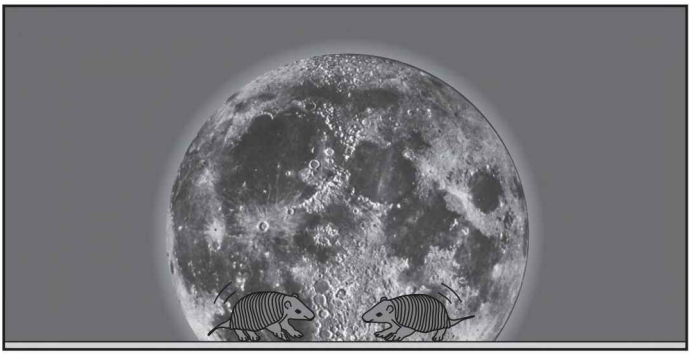
الرؤية

(١) تضخم القمر

أبرز خدعة بصرية في مناظرِ الطبيعة هو التضخُّم البارز للقمر حين يقترب من الأفق. هل يكون التضخُّم بسبب انكسار (انحناء) شعاع الضوء بفعل الغلاف الجوي، أم بسبب تغيُّر المسافة الفاصلة عن القمر أم بسبب خطأ في الإدراك من جانبك؟

الجواب: يبدو حجم القمر حين يقترب من الأفق أكبر بنسبة ٥٠٪ تقريبًا مما لو كان في كبد السماء بسبب خطأ في الإدراك. في الواقع، يحتل القمر دومًا زاوية تُقدر بـ ٠٫٥ درجة من مجال رؤيتك بصرف النظر عن علوِّه أم انخفاضه في السماء. وإذا كان انكسار الضوء بفعل الغلاف الجو ملحوظًا، فإنه يَنحو إلى تقليل العرض الرأسي للقمر، ولا ينحو إلى تضخيمه. أيضًا لا تتغيَّر المسافة الفاصلة بين الأرض والقمر بصورة ملحوظة في أثناء الساعات القليلة التي يستغرقها القمر في الشروق والغروب.

وعلى الأرجح يُعزى الإدراك الخاطئ الذي يقود إلى التضخُّم الظاهري للقمر إلى عدة أسباب متزامنة. ويبدو السبب الأساسي أنك تربط بين انخفاض القمر في كبد السماء والتضاريس الموجودة أمامك، وبناءً على التضاريس، يبدو القمر أكبر حجمًا. ويُمكنك أن تتغلب على هذا التأثير بكل سهولة: استَدِرْ وانحنِ وانظر إلى القمر بين ساقَيك؛ سيبدو حينها القمر بحجمه الطبيعي، على الأرجح لأنَّ التضاريس — الموجودة في الجزء العلوي من رؤيتك — لم تعد مستخدمة للاستدلال على القياسات. وتَشتمِل الأسباب المُحتمَلة الأخرى على إمالة العينَين لرؤية القمر وفي الوقت نفسه تعذُّر حدوث التقارب اللازم للعينَين عند مطالعة جسم بعيد للغاية.



شكل ٧-١: بند ٧-١.

(٢) شكل السماء

هل تبدو السماء على هيئة نصف كرة؟ معظم الناس يرونها كما لو أنها صحْن مقلوب مع دنوٍّ الجزء الموجود فوق رأسك مباشرة أكثر من الأجزاء المُتاخِمة للأفق. جرب الملاحظات التالية. عندما يظهر الهلال في سماء النهار، تخيله مقسومًا إلى جزأين مُتماثلَين يفصل بينهما خط محدد. ونظرًا لأن الهلال يكون نتيجة أشعة الشمس، لا بد أن يكون الخط مشيرًا ناحية الشمس. ورغم ذلك، فهذا لا يحدث لأن إدراكك لشكل السماء يشوه الخط بينما تتبُّعه ذهنيًّا عبْر السماء. تكون أشعة الكشافات مستقيمة، ولكن عند رؤيتها من الجنب تبدو منحنية بسبب شكل السماء الواضح. لماذا لا تبدو السماء على هيئة نصف كرة؟

الجواب: شكل السماء له عدة أسباب على الأرجح؛ وإليك بعضًا منها: نظرًا لأنك ترى أفقًا شاسعًا، فأنت على الأرجح تعزو مساحة شاسعة إلى السماء الموجودة مباشرة فوق الأفق. ونظرًا لأنك لا ترى شيئًا فوقك مُباشَرة، فأنت على الأرجح تعزو مسافة أقصر إلى السماء الموجودة فوقَك مباشِرة، وهذا لأن عينَيك في حالة استرخاء طبيعية.

وقد يكون عَزو الأشكال إلى السماء قويًّا للغاية لدرجة أن ضوء الكشاف يبدو أنه يَنكسِر على امتداد انحناء السماء والخط المرسوم ذهنيًّا من القمر لا يتصل بالشمس. وكلا المشهدَين مثال على الخدع البصرية.

(٣) فصل الرأس عن الجسد باستخدام النقطة العمياء

لكل عين «نقطة عمياء» لا يُرى فيها شيء. وتقع هذه النقطة في مجال رؤيتك بعيدًا عن مركز الإبصار، ونحو الصدغ، بحوالي ١٥ درجة. وباستطاعتك تحديدها من خلال النظر باستخدام عين واحدة بينما تحرِّك جسمًا صغيرًا (كمَمحاة قلم رصاص على بُعد ذراعٍ منك) عبْر مجال رؤيتك. ثبِّت نظرك، وعندما يمر الجسم عبْر النقطة العمياء، سيَختفي تمامًا.

عندما أُجبر عالم النفس الشهير كارل إس لاشلي على تحمُّل ضيف مزعج على العشاء، أخذ يسلِّي نفسه بوضع النقطة العمياء فوق رأس هذا الشخص؛ فاصلًا رأسه عن جسده بدقة. وتُحكى قصة قديمة (غير حقيقية فيما يبدو) كيف كان ملك إنجلترا تشارلز الثاني يتخيَّل قطع رءوس ضيوفه بهذه الطريقة؛ ومِن سخرية القدر أن والده قُطع رأسه في الحقيقة.

كم تبلغ مساحة هذه النقطة ولماذا تُوصَف بأنها عمياء؟ ولماذا لا تُلاحظ النقطة العمياء عادةً؟

الجواب: تُغطَّى شبكية العين بـ «خلايا عصوية ومخروطية مستقبلة للضوء» باستِثناء المنطقة التي تتفرَّع منها المسارات العصبية عن الشبكية في طريقِها إلى المخ. ونظرًا لأن هذه المنطقة ينقصها الخلايا المستقبلة للضوء، فإنها تصير عمياء. وعدم ملاحظة النقطة العمياء يرجع إلى عدة أسباب؛ فعادةً ما تكون العينان مفتوحتَين، مما يُتيح لعين واحدة أن ترى الأجسام الواقعة في النقطة العمياء الخاصة بالعين الأخرى. كما أنك تركز على مركز الرؤية الذي يقع في «النقرة المركزية» (وهي عبارة عن تجويف صغير في الشبكيَّة يوجد فيه أكبر عدد من حزم الخلايا المخروطية)، لا على النقطة العمياء. بالإضافة إلى ذلك، تُوضع بعض التفاصيل في النقطة العمياء من خلال الحركات الدقيقة والطبيعية للعينين (حركة العين الرمشية) والتي تدور فيها العين بمقدار درجة تقريبًا. كما تَنحرِف العين ببطء وتُعاني من رعشة؛ ومِن ثَمَّ الصورة التي تقع أولًا عند النقطة العمياء سرعان ما تتحوَّل إلى نقطة أخرى على الشبكية بسبب هذه الحركات. وحتى مع غياب هذه الحركات، تمتلئ النقطة العمياء عادةً لأن المخ يستطيع أن يربط بين المشاهد الواقعة على جانبي النقطة العمياء بعضها ببعض ثم يَبتكِر صورة مستبعدًا النقطة العمياء؛ وذلك للربط بين تلك المشاهد.

(٤) الشبكات الرمادية في الصباح والبُقَع المندفعة في ضوء النهار

إذا حملقت في غرفة مضاءَة بأشعة الشمس فور فتح عينيك في الصباح، ستُغطِّي شبكة رمادية اللون مجال رؤيتك. سرعان ما تتلاشى الشبكة ولكن يُمكن استحضارها وقتما تشاء باستخدام كشاف ضوء رفيع أو ثقب ضوئي صغير (لا تؤذِ عينَيك بالضوء الساطع). حرِّكِ الكشاف الصغير في نطاق مجال رؤيتك داخل غرفة مظلمة، ومن المفترض أن تظهر أجزاء من الشبكة. ما الشبكة، ولماذا تتلاشى سريعًا جدًّا؟

وثمة ملاحظة وثيقة الصلة يُمكن أخذها في الاعتبار بخصوص ضوء النهار الساطع. عند التحديق في السماء الزرقاء الصافية، أجد أن مجال رؤيتي يَمتلئ بالكثير من النقاط الطافية (التي سنَتناولها في البند التالي) والبقع المتحرِّكة. تكون البقع ساطعة ذات أذيال مُعتمة. يُمكنني أن أربط بينها وبين نبضي؛ حيث إنها تتحرك سريعًا أثناء انقباض النبض وتتحرَّك على نحو أبطأ أثناء انبساطه. يعزز الضوء الأزرق رؤيتها، وهي تُرى في كل مكان باستثناء طول خط الرؤية مباشرةً (ذلك الخط الذي تتقاطَع فيها شبكية العين عند النقرة المركزية.) ما هذه البقع؟ ولماذا يكون الضوء الأزرق هو الأفضل لرؤيتها؟ ولماذا تغيب عن النَّقرة المركزية؟

الجواب: تتكوَّن الشبكة بفعل الظلال الموجودة في الأوعية الدموية للشبكية؛ حيث إنها تعوق الضوء عن الوصول إلى الخلايا المستقبلة للضوء الموجودة على عمق أكبر في شبكية العين. والبقع عبارة عن خلايا الدم البيضاء التي تتحرَّك عبْر الأوعية الدموية. والضوء الأزرق هو الأفضل لحدوث التباين لأن خلايا الدم الحمراء تمتصُّ الضوء عند طول موجي يبلغ حوالي ٤١٥ نانومتر (الأزرق)، بينما خلايا الدم البيضاء لا تفعل الشيء نفسه؛ ومِن ثَمَّ تتَّضح حركة خلايا الدم البيضاء أكثر مع الخلفية الزرقاء. ولا تمر الشبكة ولا البقع عبْر النقرة المركزية؛ لأن هذه المنطقة تَفتقِر إلى الأوعية الدموية.

ونظرًا لأن أي نمط ثابت في شبكية العين يَفقد تباينه الملحوظ في غضون ثوانٍ، تختفي الشبكة سريعًا. وإذا مرَّ ضوء صغير على مرأى منك؛ فالظلال التي تصنعها الأوعية الدموية تتنوَّع بالدرجة الكافية لإبقاء الشبكة واضحة.

وربما يُعزى إبقاء الشبكة واضحة داخل شبكية العين باستخدام ثقب مضاء إلى الملاحظات المحيرة لكوكب الزهرة التي سجَّلها عالم الفلك بيرسيفال لويل. كان لويل يلاحظ باستمرار «شعاع عجلة» على سطح كوكب الزهرة (هذا قبل أن يعرف أحد — بوقت طويل — أنه لا يُمكن رؤية السطح لأن السحب تحجبُه باستمرار.) علاوة على ذلك،

كان الشعاع يظهر في المكان نفسه وهو ما أوحى بأن كوكب الزهرة يصدر الوجه نفسه إلى الأرض، وهو أمر غريب جدًّا بالتأكيد. وشعاع العجلة الذي رآه لويل كان راجعًا إلى الشبكة المتكونة في شبكية عينه على الأرجح؛ حيث إنه كان يرى كوكب الزهرة باستخدام جزء صغير فقط من النظارة العاكسة للأشعة الموجودة في التليسكوب ذي القُدرة العالية على التكبير. كان الموقف شبيهًا بالنظر من خلال ثُقب صغير، كان بإمكانه أن يرى كوكب الزهرة؛ إلا أن الشبكة الموجودة داخل شبكية العين كانت مطبوعة على صورة الكوكب.

(٥) عوائم العين ومراكز أُخرى في عينك

عندما أنظر إلى خلفية ساطعة بلا شكل واضح، كالسماء الصافية مثلًا، يَمتلئ مجال رؤيتي بنقاط صغيرة طافية وبقع متحرِّكة. شرحنا البقع المتحركة في البند السابق. النقاط الصغيرة الطافية تتكون من دوائر متحدة المركز؛ إلا أنني أرى أيضًا أشكالًا مستطيلة أكبر. يعوق شكل كبير في عيني اليمنى قدرتي على القراءة بتلك العين.

يُمكنك رؤية «العوائم»، كما يُطلَق عليها، بوضوح أكثر إذا كانت العين مضاءة بمصدر صغير للضوء. على سبيل المثال، أستعين عادةً بثُقب مضيء عبْر ورق مقوًّى غير مُنْفِذ للضوء. ورغم ذلك فإنَّ أي مصدر صغير للضوء الساطع، مثل مشبك ورقي عاكس للضوء، يُمكن أن يؤدي الغرض. (وأنا حريص للغاية على عدم تقريب أي جسم من العين.)

عندما أستخدم الثُّقب، أرى عدة صور أخرى مثيرة للاهتمام. ثمة بقع ساطعة تبدو أنها تفتقر إلى الدوائر المتحدة المركز التي تشتهر بها العوائم أكثر. أحيانًا أرى بقعًا داكنة ونمطًا ثابتًا من الخطوط الداكنة المُمتدة من مركز مجال رؤيتي. وبعد أن أطرف بعيني مباشرةً، أرى بقعًا ساطعة ونمطًا لخطوط أفقية ساطعة وداكنة. وأحيانًا أرى رقعًا ساطعة ثابتة أو رقعًا مجعَّدةً طافيةً. وما إن أفتح عيني في الصباح، ربما أرى بقعة أو أكثر من بقعة داكنة أكثر أو ساطعة أكثر (وهو أمر أكثر ندرة) عن باقي المشهد.

ما سبب هذه الأشكال المتنوعة؟

الجواب: ربما ترجع العوائم المُعتادة إلى وجود تعرجات في «الجسم الزجاجي» للعين (وهو عبارة عن مادة شفافة تملأ أغلب مساحة مقلة العين). أنت لا تستطيع أن ترى تعرج الجسم الزجاجي نفسه أو حتى ظلاله على شبكية العين. وبدلًا من ذلك، ترى حيودًا يصنعه التعرُّج داخل شبكية العين. والحيود هو عبارة عن نوع من تداخل الموجات

الضوئية يحدث عندما تمر هذه الموجات عبْر فتحة صغيرة أو تمر بجانب عائق بسيط. في هذه الحالة، عندما يمر ضوء صادر من ثقب خلال التعرج الموجود في الجسم الزجاجي، يحيد الضوء وتتداخل الأنماط الموجية في شبكية العين. والنمط عبارة عن حزم ضوئية ساطعة متَّحدة المركز (حيث تعزز الموجات الضوئية بعضها بعضًا) وحزم ضوئية غامقة (حيث تنحو إلى محوِ بعضها بعضًا).

وإذا كان التعرج دائري الشكل تقريبًا، يكون النمط عبارة عن بقعة مركزية ساطعة، والتعرُّج المستطيل ينتج عنه نمط مستطيل. والعوائم التي تراها بطبيعة الحال تكون عبارة عن نمط حيود ضبابي. وإذا نظرت من خلال ثُقب، ترى النمط بوضوح أكبر ويُمكنك أن تفرق بين الحزم الضوئية الفردية الساطعة والداكنة. وتنجرف العوائم عبْر خط الرؤية لأن الجسم الزجاجي ليس صلبًا ويُمكنه تغيير موضعه. وربما تُعزى بعض العوائم إلى أن أجزاء من الجسم الزجاجي تتكسَّر وتطفو فوق طبقة مائعة واقعة أمام «النقرة المركزية»، الشكل الشبيه بالتجويف الذي يَنحدِر عنده خط الرؤية الخاص بك. وقد تُعزى أيضًا إلى خلايا الدم التي تتسرَّب إلى داخل الطبقة المائعة، ولكن في تلك الحالة من المرجح أن يتلوَّن مجال الرؤية باللون الأحمر. كل شخص يرى العوائم، ووجود هذه العوائم لا يشير بالضرورة إلى وجود مشاكل صحية. ومع تقدُّمك في العمر، سترى على الأرجح المزيد من العوائم.

وتُعزى البقع الساطعة ونمط الخطوط الساطعة والداكنة التي تَعقُب غمضة العين إلى الطبقة المائعة (سائل الدموع) المتبقية في القرنية. والتعرُّجات الموجود في تلك الطبقة قد تركز شعاع الضوء قليلًا لينتج عنها المناطق الأكثر سطوعًا. والخطوط المُنتشِرة من مركز الرؤية ربما تتكوَّن من أشكال شعاعية لعدسة العين. وربما تُعزى البقع الغامقة إلى المناطق الصغيرة المُعتمة. ولا يوجد تفسير مفهوم للبقع الداكنة والساطعة التي يراها البعض فور الاستيقاظ من النوم في الصباح.

(٦) هالات أعمدة الإنارة في الشوارع ووهج الشموع وأشكال النجوم

في المساء، يرى الكثيرون حلقات (هالات) تُحيط بمصادر الضوء الساطع عند النظر إليها مباشرةً (ورؤيتها من خلال نافِذة مُغطَّاة ببخار التكثيف تسفر عن مجموعة مختلفة من الهالات). وتُقدَّر أقطار الحلقات الأربعة الأولى (كما تُقاس بعدد الدرجات القوسية الذي تشغله في مجال رؤيتك) بـ ٢٫٥ و٤٫٥ و٥٫٥ و٦٫٠ و٩٫٠ درجات تقريبًا. وتكون الحلقات

أكبر حجمًا في الضوء الأحمر مقارنةً بالضوء الأزرق؛ ومِن ثَمَّ إذا كان المصدر ينبعث منه ضوء أبيض، فربما تتلوَّن الحلقات باللون الأحمر من الخارج وباللون الأزرق من الداخل. ما سبب ظهور الحلقات؟

وتُظهر بعض رسومات الفنان فنسنت فان جوخ هالات حول مصادر الضوء، مثل الشمس الموجودة في لوحة «الكرم الأحمر» والنجوم في لوحة «ليلة النجوم». كان فان جوخ يَرسم الهالات ليفرض أسلوبه الخاص؛ لأنها تُعطي انطباعًا بالتألُّق على القماش. ورغم ذلك، يُقال إنه كان يرى هذه الهالات حول مصادر الضوء؛ لأن حاسة البصر لديه تغيَّرت بسبب استخدامه لعلاجات مقوية لعضلة القلب وصلت إلى جرعات سامة.

لماذا يُحاط لهيب الشمعة بوهج خافِت عندما يُرى اللهيب في غرفة مظلمة بعض الشيء؟ تتراقَص النجوم بسبب التغيُّرات في المناخ، ولكن ما سبب الشكل المعتاد للنجوم ذات النتوءات أو الخيوط الشعاعية؟

الجواب: الحلقات الموجودة حول الأضواء الساطعة، التي يُطلق عليها «هالات داخل العين»، ناتجة عن حيود الضوء أثناء مروره عبْر أشكال صغيرة (مناطق غير منتظمة) داخل العين في طريقها إلى الشبكية. والحيود عبارة عن شكلٍ من تشتُّت الضوء تنتشر فيه الموجات الضوئية حول عائق ما لتنتج نمطًا من الحزم الضوئية الساطعة والداكنة يتَّحد مركزها مع مركز بقعة ضوء ساطع. والمناطق الساطعة هي المناطق التي تعزز فيها الموجات الضوئية بعضها بعضًا؛ بينما المناطق الداكنة تنحو إلى محو بعضها بعضًا. لا تُرى البقعة المركزية للضوء الساطع؛ لأنها تتوافَق مع الرؤية المباشرة لمصدر الضوء (الأكثر سطوعًا)، ولكن يُمكنك رؤية أولى الحلقات الساطعة. ويتوقَّف حجمها الزاوي على حجم الشكل الذي يجعل الضوء يحيد والمسافة الفاصلة بين الشكل والشبكية؛ فالأشكال الأصغر حجمًا ينتج عنها حلقات أكبر حجمًا، وكذلك المسافة الأكبر ينتج عنها حلقات أكبر.

وعند رؤية عدة حلقات، تتسبَّب الأشكال المختلفة في حيود الضوء بأحجام ومسافات مختلفة تفصلها عن شبكية العين. لا أحد يعرف قطعًا ما الأشكال المسئولة عن حيود الضوء. ومن بين المسبِّبات المُحتملة خلايا النسيج الأمامي للقرنية (ظهارة القرنية التي يبلغ حجمها ما بين ١٠ و٤٠ مايكرومترًا)، وخلايا الطبقة البطانية للقرنية، وخدوش القرنية وألياف العدسة.

وحيود الضوء داخل العين مسئول أيضًا عن الوهج الخافت الذي يُحيط بلهيب الشمعة وعن النقاط التي تراها في صور النجوم ذات النتوءات المُعتادة أو أي مصدر

ضوئي صغير وساطع على مسافة بعيدة منك. ونتوءات النجوم تكون بسبب تعريجات خطوط الدرز (روابط ألياف العدسة) الموجودة على السطح الأمامي لعدسة العين.

(٧) الوَبْصَة (ظهور أشكال وامضة تحت تأثير المخدرات)

أحيانًا يرى السجناء المحبوسون في زنزانات مظلمة أشكالًا من الضوء الساطع، تُسمَّى «الوَبْصَة»، والتي ربما تكون ملوَّنة بالكامل أو ذات بقع ملونة. يرى أيضًا سائقو الشاحنات مثل هذه الأشكال بعد التحديق في الطرق المغطَّاة بالثلوج لفترات طويلة. والحق أنه في كل مرة تغيب فيها المحفزات الضوئية، تظهر هذه الأشكال.

قد يُسفر الصداع النصفي وبعض عقاقير الهلوَسَة (مثل عقار إل إس دي) عن ظهور أشكال ومضية مَهيبة؛ والشيء نفسه يتكرَّر مع حركة الرأس الشديدة السرعة التي يعاني منها الطيارون ورواد الفضاء. ويُمكن أيضًا استدعاء هذه الأشكال حسب الرغبة من خلال الضغط برفق على عينك المغلقة. تظهر أشكال مختلفة عند تحريك الإصبع فوق الجفن، وزيادة الضغط ينتج عنها أنماط معقَّدة أكثر. (لا تضغط لدرجة أن تؤذي عينَيك، ولا تضغط على عينَيك مطلقًا إذا كنت ترتدي عدسات لاصقة.) وتظهر تصميمات هندسية إذا ضغطت على كلتا العينَين في الوقت نفسه.

تظهر هذه الأشكال أيضًا عندما ينظر الجمهور إلى ضوء ساطع مثل جهاز الستروبوسكوب في حفلات الروك أو نوادي الرقص. وعندما أرى ضوءًا وامضًا يسطع بمعدل يتراوح بين ١٠ و٣٠ مرة في الدقيقة، تظهر مصفوفات هندسية ملوَّنة (لأغراض السلامة، أغلق عيني أثناء مواجهة جهاز الستروبوسكوب؛ فالضوء ساطع بالدرجة الكافية لينفذ خلال جفني عيني المُغمضتَين). أحيانًا أرى مصفوفة مربعات لوحة الشطرنج، وأحيانًا أرى مثلثات وأشكالًا سُداسية. وبالنسبة إلى الومضات البطيئة، تكون الوَبْصَة عبارة عن دوَّامات، وهي تَختفي مع الومضات السريعة. تتطلَّب الأنماط الهندسية المعقَّدة إضاءة كلتا العينَين، ومن خلال إضاءة عين واحدة فقط، أرى أنماطًا بسيطة من الخطوط والدوامات.

ويمكن أن تَنتج الوبصات أيضًا حين يمرُّ تيار كهربائي خفيف عبْر رأس الشخص. (مستحيل أن أفعل شيئًا خطيرًا كهذا، وينبغي لك أنت أيضًا ألا تفعل ذلك.) كانت حفلات الإضاءة الوامضة رائجة للغاية في القرن الثامن عشر (حتى إن بنجامين فرانكلين شارك فيها ذات مرة)، وكان الحاضرون الذين يشبكون أيديهم في دائرة يتلقون صدمة كهربائية

من خلال مولد كهروستاتيكي ذي جهدٍ عالٍ وتيار منخفض. وفي كل مرة كان التيار الكهربائي يمرُّ عبر جمهور الحضور، كانوا يرون أشكالًا وامضة.

بل الأغرب من ذلك (والأكثر سخفًا) هي التجارب التي أجراها عالم وظائف الأعضاء يوهانس بيركينجي في عام ١٨١٩. وضع قطبًا كهربائيًّا على جبهته وقطبًا آخر على فمه، ثم أخذ يفصل أحدهما على نحو متكرِّر بحيث تسري نبضات من التيار الكهربائي عبْر رأسه. ولَّدت النبضات أشكالًا وامضة ثابتة.

ما سبب ظهور الأشكال الوامضة (الوَبْصَات)؟

الجواب: عندما تضغط على عينك المُغلَقة، يضغط الجسم الزجاجي الذي يملأ العين على الشبكية، مما يحثُّ الخلايا المستقبلة للضوء أو المسارات العصبية على إرسال إشارات إلى المخ كما كان ليحدث لو كانت العين مضاءة؛ ومِن ثَمَّ أرى ضوءًا حتى من دون أن يدخل الضوء إلى العين.

تنشأ الأشكال الوامضة (الوَبْصَة) أيضًا إذا نظرت إلى ضوء وامض. وتتطلب الأنماط الهندسية الأكثر تعقيدًا إثارة كلتا العينَين، مما يوحي بأنها تأويلات يفرضها العقل على الإشارات القادمة من العينين. وتظهر الأشكال الهندسية لأنَّ الإشارات العصبية تنشط مستشعرات الخطوط والأشكال الموجودة في المخ، وتنشأ الألوان عند تنشيط مُستشعِرات الألوان. (ومِن ثَمَّ، لا يُعزى إدراك الألوان مباشرة إلى استشعار اللون من خلال الخلايا المخروطية المستقبِلة للضوء الموجودة في شبكية العين.) وربما من قبيل الصدفة أن تتوافَق الأضواء الوامضة مع شفرة المخ للألوان. وإذا كان الأمر كذلك، ربما يسفر اللون الأبيض الوامض عن تمييز مصفوفات ملونة بألوان ساطعة. والأرجح أن الألوان تنشأ من تداخل متبادَل بين المسارات العصبية في شبكية العين وتلك المسارات المؤدية إلى المخ.

ويمكن أن تنشأ الوبصات المتولِّدة من تيار كهربائي عند استثارة المخ مباشرة. ومن خلال تلك الوبصات، قد يستردُّ بعض المكفوفين البصر. ترسل كاميرا فيديو مصغَّرة مثبتة على إطار (كتلك المستخدمة للنظارات) إشارات إلى معالج بيانات دقيق، يولد وبصات من خلال إرسال إشارات ذات تيار كهربائي مُنخفِض مباشرةً إلى المخ. على سبيل المثال، عندما ترصد كاميرا الفيديو جسمًا على يسار مجال رؤية الشخص، يُستثار المخ بحيث يرى الشخص الوبصة الموجودة يسار مجال الرؤية؛ ومِن ثَمَّ تُمَثَّل الأجواء المحيطة للشخص على صورة أشكال وامضة (وبصات) وبدرجة ما يستطيع الشخص أن «يرى».

ويبدو أن الوبصات التي تظهر تحت تأثير المخدِّرات رُسمَت في الفن الحجري الموجود في المنحدرات الصخرية وداخل الكهوف. وربما تكون الوبصات جزءًا من التجربة البصرية

لشخص (ربما كاهن) في حالة تنويم مغناطيسي، وربما تكون رموزًا دالة على السحر الكامن الذي كان الناس يؤمنون أنه يحكم العالم.

(٨) الهمهمة تصنع جهاز ستروبوسكوب

من خلال الهمهمة بالتردُّد المناسب، تَستطيع أن تُوقف دوران مروحة دفع الطائرة أو ريشة مروحة، على غرار جهاز الستروبوسكوب. وإذا همهمتَ بتردُّد أقل بعض الشيء، فإن النمط يدور ببطء في الاتجاه الذي يدور فيه الجسم. وإذا همهمتَ بتردُّد أعلى قليلًا فإن النمط يدور في الاتجاه المعاكس.

ويُمكن توليد توقُّف مشابه إذا همهمت أثناء مشاهَدة التليفزيون على بعد مسافة كبيرة بالدرجة الكافية. فالهمهمة تولِّد خطوطًا على الشاشة تكون ثابتة بالنسبة إلى تردُّد واحد، ولكنها تتحرَّك إلى أعلى أو أسفل بالنسبة إلى التردُّدات الأخرى.

ومن أجل دراسة كيف تُغيِّر الهمهمة رؤيتي، أعددتُ شكلًا ورقيًّا موضوعًا على طاولة دوارة. كان الشكل عبارة عن أجزاء بيضاء وسوداء، كلٌّ منها تقدر مساحته بدرجة، ممتدَّة من النقطة المركزية إلى الخارج. سمحت لأشعة الشمس أن تُضيء الشكل أثناء دورانه بمعدل ٣٣⅓ دورة في الدقيقة الواحدة. (ويوفر المصباح المتوهِّج ضوءًا وامضًا.) ونظرًا لأنني لم أَستطِع الإمساك بمفكرة، أسندت ذقني على مكبر صوت صغير يهتزُّ بمقدار ١٠٠ مرة في الثانية (كان يعمل من خلال مذبذب صوتي). توقف الشكل الدوار على الطاولة الدوارة في نمط معتم ومشوش. في هذا المثال وفي أمثلة أخرى، لماذا يوقف الاهتزاز (الصادر من مكبِّر الصوت أو الهمهمة) الحركة الدوارة؟

الجواب: الهمهمة أو الخرخرة أو هزُّ رأسي مع مكبِّر صوت صغير يسفر عن اهتزاز عمودي لعينيَّ. إذا كان الاهتزاز يتمتع بالتردد المناسب، فإن الشكل الذي يمرُّ عبْر مجال رؤيتي يظل في نفس الموقع بشبكية العين على مدار غالبية دورة اهتزاز العين.

هب أنني حدَّقتُ في جزء من الشكل الموجود على الطاولة الدوارة في أثناء نزول هذا الجزء عبْر مجال رؤيتي. عندما تنزل عيني أثناء دورة الاهتزاز، يُواصل الشكل إضاءة نفس الجزء من شبكية عيني؛ ومِن ثَمَّ يبدو ثابتًا. وعندما تبدأ عيني في التحرُّك إلى أعلى، يتحرك الشكل المُضيء في القرنية ولكن لفترة قصيرة فقط، ويقع الشكل الأبيض والأسود الأصلي سريعًا في نفس الأماكن الموجودة في الشبكية كما حدث من قبل. إن جهازي

البصري يعمل على موازنة سطوع الضوء أثناء دورة الاهتزاز. وتُرى الأماكن التي تستقبل الصورة الساطعة في أثناء أغلب دورة الاهتزاز بوصفها ساطعة. وفي المقابل، تكون الأماكن المُستقبلة للصورة المظلمة في أثناء أغلب دورة الاهتزاز مُظلمة؛ ومِن ثَمَّ، يظهر الشكل الأبيض والأسود ثابتًا.

وتنشأ الصورة التليفزيونية من خلال حركات دائرية أفقية، خط تلو الآخر، من أعلى الشاشة إلى أسفلها. وخفوتُ كلِّ خط تخفيه سرعة الحركة الدائرية وثبات رؤيتي. وعندما أهمهم بالتردُّد المناسب، فإن اهتزاز عيني يوقف الحركة الدائرية. وخلال أغلب دورة الاهتزاز، ثمة خط أفقي يمر عبْر شبكية عيني وهو عبارة عن صورة للخط الموجود على الشاشة حيث تَخفت الصورة القديمة وتكون صورة جديدة على وشك الظهور. وبهذا أرى باستمرار خطًّا داكنًا على شاشة التليفزيون.

(٩) ثَبِّت عينك على كرة البيسبول

زعم لاعب البيسبول المُحترِف تيد ويليامز أنه كان بإمكانه أن يرى الكرة المضروبة وهي تصطدم بمضربه. ولقد زعَم عدةُ لاعبين آخرين أن بإمكانهم أن يروا غُرَز الخيط الخاص بالكرة ودورانها أثناء مرورها من أمامهم. هل يستطيع لاعب أن يلحظ هذه الأمور حقًّا؟ هل يتابع اللاعب الكرة ببصره من لحظة انطلاقها من يد الرامي حتى تجتاز القاعدة الأولى أو تصطدم بالمضرب؟

هل يجب أن يستخدم اللاعب كلتا عينَيه لممارسة لعبة البيسبول؟ كلا فيما يبدو. إذن، كيف يُحدِّد اللاعبون، الذين يستخدمون عينًا واحدة، مسافة الكرة ومسارها؟ وعلى نحو مُماثل، كيف يستطيع شخص يرى بعين واحدة فقط أن يُحدِّد العمق في مجال الرؤية أثناء قيادة السيارة أو الطائرة؟ على سبيل المثال، يتطلب الهبوط بالطائرة بالتأكيد إدراك عنصر العمق، رغم ذلك فإن حاسة البصر لدى الطيار الشهير وايلي بوست كانت مُقتصِرة على عين واحدة.

الجواب: هب أن لاعب بيسبول محترفًا يضرب الكرة بالمضرب مستخدمًا يده اليمنى عند القاعدة الأولى. إذا أراد اللاعب تتبُّع مسار الكرة المُلقاة نحو القاعدة، فلا بد أن يدير خط الرؤية ناحية يمين الرامي. وأغلب اللاعبين الماهرين يستطيعون القيام بذلك حتى تكون الكرة على بُعد ٥٫٥ أقدام من القاعدة؛ إلا أن الدوران اللازم بعد ذلك يكون سريعًا

للغاية. ورغم ذلك، «يستطيع» اللاعب أن يرى الكرة تصطدم بالمضرب إذا كان اللاعب مصيبًا في توقُّعه لموضع تصادم الكرة بالمضرب، بحيث يَقفِز خط الرؤية إلى تلك النقطة. كان تيد ويليامز يستعين على الأرجح بهذه القفزة البصرية، التي يُطلَق عليها «حركة العين الرمشية»، لكي يرى الكرة تصطدم بمضربه.

وثمة عامل آخر قد يشارك في المتابعة البصرية للكرة؛ إذ يبدو أن باستطاعة الجهاز البصري أن يدرك عمق الحركة لجسم ما حتى إن كان عاجزًا عن إدراك موقع هذا الجسم. ولهذه القُدرة عامل واضح في البقاء؛ إذ يُمكنك أن تحدد ما إذا كان ثمة جسم يتجه نحوك حتى إن عجزت عن تحديد موقعه بالضبط في اللحظة الراهنة. ويُمكِن إدراك عنصر العمق في حركة الجسم باستِخدام عين واحدة. ومِن ثَمَّ يستطيع الأشخاص الذين يَستخدِمون عينًا واحدة فقط أن يُمارسوا الرياضات ويقودوا الطائرات. فعند استخدام كلتا العينين، قد يُقارن المخ الحركة النسبية التي تراها كل عين على حدة. على سبيل المثال، إذا كانت عينك اليمنى ترى جسمًا يتحرك نحو اليسار وعينك اليسرى تراه يتحرك نحو اليمين، فإن الجسم يتَّجه مباشرة ناحيتَك.

(١٠) الأسلوب الانطباعي في الرسم

في الأسلوب الانطباعي للرسم والتصوير، تُرسَم الأجسام وخلفياتها على هيئة أشكال عامة بدلًا من رسم تفاصيلها. على سبيل المثال، اشتهر كلود مونيه برسوماته الانطباعية للمَشاهد الخارجية. ومع تقدُّمه في السن، احتفظ بالأسلوب الانطباعي في الرسم، إلا أن أعماله غلب عليها «الألوان النارية» أكثر، مثل الأحمر والأصفر، وافتقرت إلى الألوان الموجودة على الجهة المقابلة من الطيف المرئي. على الرغم من أن الانطباعية تُعتبر أسلوبًا فنيًّا جذابًا، هل يُمكن أن يعود الأسلوب الانطباعي في الرسم إلى أسباب فيزيائية أو فسيولوجية؟ ما سبب تغيُّر الألوان في أعمال مونيه؟

الجواب: كان الكثير من فنَّاني الحقبة الانطباعية يُعانون من مشاكل بصرية. بعضهم كان مصابًا بقصر النظر؛ ومِن ثَمَّ كانوا يرون الأجسام التي يرسمونها مشوشة وضبابية؛ وهو أمر مُناسِب تمامًا للأسلوب الانطباعي الخاص بالصور المشوشة والضبابية. وكان فنان واحد على الأقل يضع اللوحة القماشية على بعد ذراع بحيث تكون اللوحة خارج بؤرة التركيز. بينما عانى فنَّانون آخرون، مثل مونيه، من المياه البيضاء على العين (إعتام عدسة العين) التي تَحُول دون الرؤية لمسافة أبعد من بضعة أمتار. وكان مونيه

يعاني على الأرجح من «الإعتام النووي»، الذي يمتص الطرف الأزرق من الطيف المرئي ويترك الطرفين الأصفر والأحمر، وهذا يفسر هيمنة هذين اللونين على أعماله الأخيرة. وبعد إجراء عملية لإزالة المياه البيضاء في أواخر حياته، استشاط غضبًا من أعماله السابقة التي غلَب عليها اللونان الأصفر والأحمر، وهدَّد بالتخلُّص منها أو الرسم عليها مرة أخرى.

(١١) اللوحات التنقيطية

لا تُرسَم اللوحات التنقيطية، مثل لوحة الفنان جورج سورا بعنوان «بعد ظهيرة يوم الأحد على جزيرة لاجراند جات»، بضربات الفرشاة المعهودة، وإنما يُستخدم فيها عدد ضخم من النقط الملوَّنة الصغيرة. يُمكنك أن ترى النقط إذا وقفت على مقربة من اللوحة بمسافة كافية؛ ولكن حين تَبتعِد عنها، تمتزج هذا النقط ولا يمكنك تمييزها. وعلاوة على ذلك، فإن اللون الذي تراه في أي موضع بالصورة يُمكن أن يتغيَّر أثناء تحركك مُبتعدًا عنها، ولهذا السبب تحتوي الرسومات التنقيطية على نقط. ما سبب هذا التغيُّر في اللون؟

الجواب: عندما يمرُّ الضوء خلال العضلات الدائرية للقزحية فإنه يحيد؛ بمعنى أنه ينتشر ويُكوِّن نمطًا متداخلًا. وإذا رأيت مصدرًا للضوء على شكل نقطة، يُكوِّن حيود الضوء صورة دائرية لذلك المصدر عند شبكية عينك. وإذا رأيت مصدرَين مُتجاورَين للضوء، فكلٌّ منهما ينحو إلى تكوين صورة دائرية خاصة به، ولكن إذا كانا قريبَين جدًّا، تتداخل الصورتان ولا يمكنك أن تميز إلا صورة واحدة مدمجة فقط؛ ومِن ثَمَّ فإن تداخل هاتين الصورتين يحدُّ من قدرتك على فصل مصدري الضوء كنقطتين منفصلتين.

والنقطتان المُتجاورتان في لوحة للرسومات التنقيطية تقوم مقام مصدرَي الضوء. هب أن النقط ملوَّنة بألوان مختلفة. فإذا وقفت أمام اللوحة مباشرة، تكون النقط مُتباعِدة بالقدر الكافي في مجال رؤيتك لتُكوِّن صورًا منفصلة عند شبكية عينك؛ ومِن ثمَّ ترى اللون الحقيقي للنقط. لكن حين تبتعد عن اللوحة، تُكوِّن النقط صورًا متداخلة، ثم لا يعود بإمكانك أن تميزها. واللون الذي ينتبه إليه مخك ربما لا يكون لون النقط أو حتى مزيجًا من ألوان النقط، بل ربما يكون لونًا يختلقه المخ. على سبيل المثال، هب أن نقطة أرجوانية اللون (أزرق وأحمر) تجاور نقطة صفراء، يُرى مزيج اللونَين على أنه لون وردي. وهكذا، يستغلُّ راسم اللوحات التنقيطية جهازك البصري لابتكار ألوان اللوحة الفنية.

وعادةً ما تكون اللوحات الزيتية أغمق مِن اللوحات التنقيطية؛ لأنَّ ألوانها تَعتمد على خليط من الطلاءات المَمزوجة بطبقة زيتية. لا بد أن يَنفذ الضوء من خلال الطبقة،

وينعكس ثم ينفذ مجددًا من خلال الطبقة كي يصل إليك. عندما تحتوي الطبقة على المزيد من الصبغة الملوَّنة، يكون الضوء المنبثق من اللوحة معتمًا أكثر. ونظرًا لأن اللوحات التنقيطية تقوم بمزج الألوان داخل مخك، لا على اللوحة القماشية، فإنها لا تُعتِّم الضوء كثيرًا.

والكثير من الأسطح الملوَّنة، مثل الفسيفساء والأقمشة المنسوجة والمطبوعات الملونة وشاشات المراصد الملونة، تكون عبارة عن مصفوفات من نقط ذات ألوان مختلفة. ووفق نظرية اللون التقليدية، من المفترض أن تُولِّد الألوان الثلاثة الأساسية (الأحمر والأزرق والأخضر) كل الألوان المُمكنة. ومِن ثَمَّ، تحتوي الشاشة الملوَّنة على مصفوفة نقط ملوَّنة بهذه الألوان الثلاثة. وأي لون مرغوب فيه يتولَّد من خلال التحكم في كيفية إضاءة كل نقطة من هذه النقط بضوء ساطع.

(١٢) أنماط متموجة

عندما تُغطِّي شبكة دقيقة الأبعاد نمطًا ذا تصميم مُشابه، تستطيع أن ترى نمطًا ذا أبعاد أكبر يُسمى «النمط المتموِّج». أرى أنماطًا مُتموِّجة عندما تتراكَب طبقة من الحرير فوق طبقة أخرى، أو حين يقع سياج خشبي خلفَ سياج آخر مُوازٍ له. كما أنني أراها أيضًا في مصفوفات الثقوب الدائرية. فعندما تقع مصفوفة مُثقَّبة أمام مصفوفة أخرى على بُعد عدة سنتيمترات، أرى نمطًا متموِّجًا دائريًّا داخل المزيج الناتج. ما سبب ظهور الأنماط المتموجة؟

الجواب: تظهر الأنماط المُتموِّجة للعيان بسبب النسق المتكرِّر للأنماط المتراكبة. على سبيل المثال، تأمَّل سياجَين مُتوازيَين يبعد أحدهما عن الآخر قليلًا ومِن ورائهما خلفية مضاءة. في مواضِعَ معيَّنة، تصطفُّ فراغات في السياج في مجال رؤيتك، وهكذا ترى مناطق ساطعة. وفي مواضعَ أخرى، تصطفُّ أجزاء السياج وراء بعضها؛ ومِن ثَمَّ ترى مناطق داكنة. وعندما لا يكون الاصطِفاف متطابقًا على خطٍّ واحد، ترى مناطق ضيقة من الإضاءة. وتراكب هذه المناطق الساطِعة والداكنة يُمثِّل النمط المتموِّج الذي تتمُّ رؤيته على السياج، وهو نمط مُتكرِّر في تباين السطوع يحدث على طول السياج. ولو تحرَّك أحد السياجين لمسافة أقل من عمود، لتغيُّر النمط المتموِّج على نحو ملحوظ، كما لو أنه يُضخم الحركة الفعلية للسياج.

وأفضل تفسير وراء الجاذبية الكبيرة للأنماط المُتموِّجة هو أن جهازك البصري حسَّاس بصفة خاصة لتقاطعات الخطوط ويبحث عنها. وبسبب هذه الحساسية، فإن الإزاحة الصغيرة للمَصفوفة، التي ينتج عنها نمط متموج، تكون واضحة.

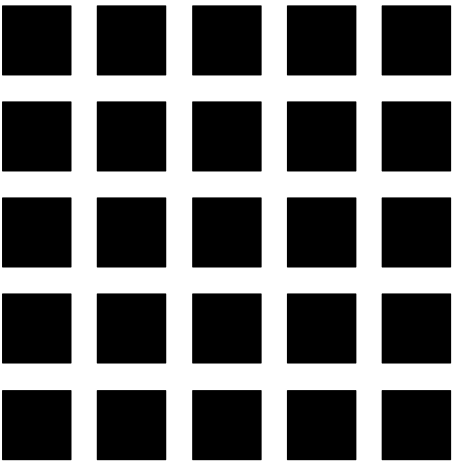
(١٣) الفنون البصرية

عندما تُشاهد نموذجًا لـ «الفنون البصرية» (ابتُكر مصطلح الفن البصري عام ١٩٦٤)، يخلق النسق الثابت للخطوط أو المكعَّبات أو النقط خدعًا بصرية مُتحرِّكة، كما لو أن أجزاءً من العمل الفني تتراقص أو تدور أو تُومض وتَخفت. وربما يخلق النسق ألوانًا خادعة يبدو أنها تنساب من جزء لآخر. ما سبب هذه الخدع البصرية؟

الجواب: لا يَستطيع أحد أن يفسر خدع الفنون البصرية تفسيرًا وافيًا؛ إذ إنها لا تزال قيد الاستكشاف والتصنيف والمقارنة. من وجهة نظر الفنانين، ربما تقود الاكتشافات الجديدة إلى أعمال فنية مُبتكَرة. ومن وجهة نظر اختصاصيي علم وظائف الأعضاء، فإنها ربما تقود إلى أفكار تبصيرية بخصوص كيفية عمل الجهاز البصري والمخ.

يستطيع الجهاز البصري أن يَحتفظ بصورة ما لفترة قصيرة كما لو أنها «صورة تَلَوية». تقوم العين بوثبات صغيرة تُسمى «حركة العين الرمشية»، فيها يتغيَّر المنظر قليلًا. عندما تفحص عملًا من الفنون البصرية ذا تصميم هندسي، قد تتراكَب الصور التلوية من الحركات الرمشية المُتتابعة في مخيلتك. ورغم ذلك، ونظرًا لأن الصور التلوية مختلفة قليلًا، يبدو التصميم وكأنه قد تحرك من صورة تلوية إلى الصورة التالية عليها. تكاد الخدعة تكون غير ملحوظة وربما لا تُدركها أنت؛ فأنت تعرف ببساطة أن الفنون البصرية تَختلف عن غيرها من الصور الثابتة للخطوط.

تخلق بعض المصفوفات الهندسية خدعًا بصرية من النقط الساطعة أو الداكنة التي لا وجود لأي منها فعليًّا. على سبيل المثال، تستطيع الشبكة الموجودة في شكل ٧-٢ أن تَخلق خدعة بصرية بوجود نقط داكنة مؤقَّتة في التقاطُعات الخاصة بالمسارات البيضاء، ويُقال إنَّ النقط الداكنة «مستحثة». والخداع البصري غير مفهوم فهمًا كاملًا، ولكن ربما يُعزى إلى تداخُل الخلايا المستقبلة للضوء الموجودة في منطقة ما بالعين مع الخلايا المستقبلة للضوء في المناطق المُجاوِرة، كما هو موضح فيما يلي في بند لاحق خاص بتدريجات ماخ اللونية. وفي بعض المصفوفات الملوَّنة، قد تظهر خطوط أو بقع اللون المستحثة (يُقال إنها «انتشار اللون الشبيه بالنيون»)، مما يشير إلى تداخل الرسائل الخاصة بالألوان التي ترسلها العين إلى المخ.

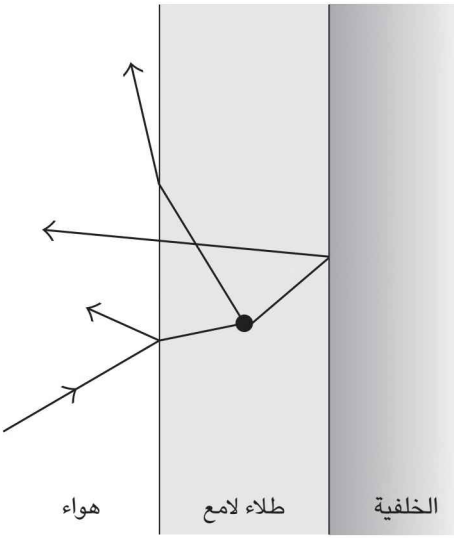


شكل ٧-٢: بند ٧-١٣: شبكة ذات نقط داكنة مؤقتة تظهر في التقاطعات.

(١٤) عنصر العمق في اللوحات الزيتية

أسهمت المدرسة الفلمنكية للرسم بالقرن الخامس عشر كثيرًا في الخدع البصرية الخاصة بعنصر العمق في الرسوم الزيتية، وذلك من خلال وضع طبقة رقيقة من الطلاء الشفاف (طلاء لامع) على خلفية بيضاء. لماذا تبدو أجزاء من اللوحة وكأنها أمام أجزاء أخرى، ولماذا تبدو الألوان وكأنها تَنبثِق من داخل اللوحة، وليس من السطح؟

الجواب: ينعكس جزء من الضوء الذي تعترضه إحدى هذه اللوحات من الطبقة الأمامية للطلاء اللامع، أما باقي الضوء فيَنتقِل عبْر الطبقة (شكل ٧-٣). تُشتِّت أصباغ التلوين العالقة في الطبقة اللامعة الضوء إلى الخارج ونحو الخلفية. وأي ضوء، سواء أكان مباشرًا أم منتشرًا، يصل إلى الخلفية ينعكس من طبقة الخلفية البيضاء (غير المُنفذة للضوء). وبينما ينتقل الضوء عبْر الطبقة اللامعة مرة أخرى، يُمكنه أن ينتشر مرةً أخرى بسبب أصباغ التلوين. وعندما تعترض الضوء الصادر من اللوحة، ترى جزءًا منه ينعكس من السطح الخارجي للطبقة اللامعة. ورغم ذلك، تبدو نقاط اللون وكأنها تنبثق من وراء السطح الخارجي للطبقة اللامعة، لا سيما حين تنظر إلى اللوحة بكلتا عينيك بحيث إن التقاءهما على نقطة ملونة يتيح لك إضافة عمق للنقطة.



شكل ٧-٣: بند ٧-١٤: لوحة زيتية ذات طبقة طلاء لامِعة، يتشتَّت الضوء من الأمام والخلف؛ ومِن أصباغ التلوين الموجودة داخل تلك الطبقة.

يستطيع الرسَّام أن يتحكَّم في درجة تشبُّع اللون (أو درجة السطوع) من خلال وضع أكثر من طبقة واحدة للطلاء اللامع من نفس صبغة التلوين. وتَزيد كل طبقة إضافية من حدَّة اللون الذي تَراه مِن أصباغ التلوين؛ لأنَّها تزيد من انتشار الضوء. على سبيل المثال، إذا نشَر أحد أصباغ التلوين طولًا موجيًّا معينًا للون الأزرق أكثر من الأطوال المَوجيَّة الأخرى، فإن الطبقات الإضافية التي تَحتوي على هذه الصبغة تُبرز المزيد من اللون الأزرق في اللوحة.

عادةً ما تُوضَع طبقة من الورنيش على اللوحة لحِمايتها. وهذا النوع من طبقات الحماية لا يُسهِم في الإحساس بالعُمق في اللوحة. بل على العكس، عادةً ما يَنتقِص امتصاصَه الجزئي للضوء من اللوحة من خلال تعتيم الألوان، بل ربما إخفاء ألوان خفيفة معيَّنة.

(١٥) القراءة في الظلام

أكثر صورة تلَوية مُدهشة رأيتُها هي تلك الصورة الناتجة عن وميضٍ ساطِع في غرفة مُظلِمة. فتحتُ مجلةً أمامي ثم أطفأتُ الأنوار. وبعد أن اعتادت عيناي الظلام (من ١٠ إلى ١٥ دقيقة تقريبًا)، أمسكت بفلاش الكاميرا إلى جوار رأسي وأنرتُ مجال رُؤيتي بومضة ضوء واحدة. كان الوميض ساطعًا للغاية بالنسبة إليَّ، لدرجة أنه أعاقني عن تمييز المجلة.

وإذا ثَبَّتُّ ناظِري أثناء تلاشي الوهج، تَظهر صورة تفصيلية للمجلة، كما لو أنَّ المجلة مُنارة بضوء ساطِع ثابِت. ما أراه يُطلَق عليه «صورة تلوية موجبة» لأنَّ المَناطق الساطعة في المجلة تَظهر بيضاء اللون والمناطق الداكِنة تبدو سوداء اللون. ويَسهل تمييز الصور والرسومات ونسق الفقرات، على الرغم من أنه لا يُمكِن رؤية أيٍّ منها على ضوء الوميض. بل يُمكنني أن أقرأ كلمات أيضًا. وبعد مرور ١٥ ثانية تقريبًا، تَتلاشى الصورة التلوية المُوجَبة وتتحوَّل إلى «صورة تلوية سالبة» تتبدَّل فيها المناطق البيضاء والسوداء.

وإذا ومَض الضوء مرتَين، أرى صورتَين تلويتَين موجبتَين مُتراكبتَين. وإذا ألقيتُ عملة معدنية أثناء سُطوع الوميض مرتَين، أرى صورتَين للعملة المعدنية أثناء سقوطها، كما لو أنَّني أرى صورة ستروبوسكوبية. وأحيانًا قد تكون الصورة التلوية الموجَبة غريبة. فإذا ومض الضوء وأنا أضع يدي أمامي ثم أضعها على ظهري، أرى صورةً ليَدي في وضعها الأول، ورغم ذلك أشعر بها على ظهري. وإذا ومَضَ الضوء أثناء وقوفي والنظر إلى أرضية الغُرفة ثم جلستُ في وضعية القُرفُصاء، أرى الأرضية كما لو أنَّها بعيدة، ورغم ذلك أُدرك أنها أكثر قربًا حتمًا، مُستدلًّا على ذلك من اتجاه جسدي.

رأيتُ أيضًا صورة تلوية موجبة في عرض باليه. أثناء فترة الاستراحة، أبقَيتُ عينيَّ مُغلقتَين. وحين بدأ النصف الثاني من العرض، فتحتُ عيني لفترة وجيزة لأرى طُوفانًا من الضوء يَنساب على خشبة المسرح. وبمجرَّد أن أغلقتهما مرةً أخرى، رأيتُ صورة تلوية للراقِصين على خشبة المسرَح.

يُمكنني أن أرى صورًا تلوية مُشابهة عندما أستَيقِظ من النوم في غُرفة جيدة الإضاءة. بينما أرقد وعيناي مُغلَقَتان، لا يُمكنني أن أرى شيئًا سوى ضوء أحمر يتسرَّب من خلال جفنَيَّ. أُثبِّتُ يدي أمام وجهي ثم أفتح عيني لفترة وجيزة. وحين أُغلقُ عينيَّ مرة أخرى، أرى صورة تلوية نابضة بالحياة تكون في البداية صورة سالبة، ثم تتحوَّل إلى صورة موجبة. وإذا فتحتُ عينيَّ لبضع دقائق لكي تَعتادا على الضوء الموجود في الغرفة، لا يكون في وسعي أن أُكرِّر التجربة.

وتظهر هذه الصور التلوية المُوجَبة المختلفة بشرط أن أثبت ناظِري، إلا أنها سرعان ما تَختفي إذا ما حركتُ عينيَّ نسبةً إلى رأسي. ما السبب وراء هذه الصور؟ وما الذي يتسبَّب في ظهور صور تلوية سالبة؟

الجواب: سبب ظهور الصور التلوية المُوجَبة غير مفهوم. فالوميض الضوئي الوجيز يُشبع الخلايا العصوية المُستقبِلة للضَّوء لبُرهة؛ وبذلك يتعذَّر تمييز التفاصيل الخاصَّة بالمجلة. ورغم ذلك، تفرز صورة المجلة مادةً أو تُحدِث تأثيرًا عبْر المسارات العصبية البصرية يستمرُّ لوقت أطول من زمن التشبُّع. ومع تلاشي التشبُّع، يُمكِن تمييز الصورة. وترجع الصورة التلوية السالبة على الأرجح إلى الإجهاد الذي يُصيب الجهاز البصري. وتلك الأجزاء المُحفَّزة بقوة بسبب المناطِق الساطعة تُصاب بالإجهاد، تاركةً بهذا صورًا أغمق من الأجزاء المُحفِّزة على نحو ضعيف بسبب المناطِق الداكنة.

(١٦) تعقُّب الطيف الضوئي

ثمة صورة تلوية أخرى — ربما تكون ذات صِلة بالصورة التلوية الموجبة التي تناولناها في البند السابق — نجدها في حركة نُقطة صغيرة من الضوء داخل غرفة مُظلِمة. فبعد أن تَعتاد عيناك على الظلام لبضع لحظات، حرك مصدر ضوء خارجيًّا أمام عينيك المفتوحتَين. يتبع ذلك ظهور طيف ضوئي، متأخِّر قليلًا. وعقب ظهور الطيف الضوئي، يبقى أثر خافت للضوء.

وإذا كان المُثير الضوئي ذا لون أحمر، لا يظهر الطيف ولا أثره. وإذا كان المثير الضوئي ذا لون أصفر أو أحمر مُصفَرٍّ، ربما يكون لون الطيف (وربما أثره كذلك) أزرق باهتًا. ورغم ذلك، إذا اعتادت عيناك الظلام تمامًا (يستلزم الاعتياد فترة زمنية تتراوَح من ١٠ دقائق إلى ١٥ دقيقة)، يكون لون الطيف وأثره رماديًّا دومًا. لماذا يظهر الطيف وأثره، وما تفسير اللون؟ ولماذا لا يظهر الطيف وأثره عند استخدام مُثير ضوئي ذي لون أحمر قاتم؟

الجواب: ربما يُعَد الطيف الضوئي وأثره صورةً تلويةً تولدها الخلايا العصوية المستقبلة للضوء بمجرد أن تُنار بمصدر ضوئي. وتحتاج الخلايا العصوية، أو مساراتها العصبية أو المخ، وقتًا قصيرًا لتوليد إدراك حسي ثانٍ للضوء؛ ومِن ثَمَّ فإنَّ إدراكك للطيف الضوئي يتأخَّر (ولو كان الطيف الضوئي بسبب ثبات الرؤية، لن يحدث هذا التأخير).

والأثر عبارة عن مزيج للصور التلوية بينما تتلاشى تدريجيًّا. والضوء الأحمر القاتم لا يَستثير الصورة التلوية؛ لأنه لا يستطيع تنشيط الخلايا العصوية.

ويتعذَّر فهم مصدر اللون الخاص بالطَّيف الضوئي ونادرًا ما يُشار إليه. وأنا أعتقد أنه يَنشأ من الخلايا العصوية المُتعارِضة مع الرسالة الخاصة باللون التي تُرسلها الخلايا المخروطية الواقعة على طول المسار المضاء بشبكية العَين. وعلى الرغم من أنه لا يُعتقد أن الخلايا العصوية قادرة على إرسال معلومات خاصة بالألوان إلى المخ، فإنها تبدو قادرةً على تثبيط هذه المعلومات القادمة من الخلايا المخروطية. وعندما يُثير الضوء الأصفر أو الأحمر المصفر شبكية العين، تفرض الخلايا العصوية إدراك اللون الأزرق، وهو اللون المكمِّل للون الأصفر. وهذا التثبيط يَختفي بمجرد أن تعتاد العين الظلام تمامًا. حينئذٍ، يظهر الطيف الضوئي رمادي اللون.

(١٧) العيون العاكسة للضوء

أشعَّة صغيرة تَنساب من كشافك اليدوي عبْر الظلام الدامس. وفجأة تظهر عينان لامعتان على ضوء الكشَّاف، إلا أن خوفَك يَتلاشى حين تسمع مواءً رقيقًا صادرًا عن قطة.

لماذا تبدو عينا القطة لامعتَين حين تواجه أشعة كشافك اليدوي مباشرةً، ولكن لا يَحدث الشيء نفسه حين تنظر بعيدًا عن ذلك الاتجاه؟ لماذا قد تنتهي الحال بشخصٍ ما يُصَوَّر فوتوغرافيًّا بظهور عينَيه حمراء في الصورة؟

للمحار المَروحي عينان تتكوَّنان من عدسة وشبكية سميكة ومرآةٌ مقعَّرة (خلف الشبكية). العدسة ضعيفة جدًّا لدرجة أنه من الصَّعب أن تَكسِر (تَثني) شعاع الضوء؛ ومِن ثَمَّ لا يُمكِن أن تكون مسئولة عن تكوين أيِّ صورة. علاوة على ذلك، للمحار المروحي عينان ذات عدستَين تقعان على الجهة المقابلة للشبكية، مما لا يَفسح المجال أمام الشعاع المُنكسِر ليتَقاطَع مع شعاع آخر ويُكوِّن الصورة، على عكس عيون البشر. إذن، كيف تتكوَّن الصورة في عينَي المحار المروَحي؟ المرآة سطح عاكس مُمتاز. كيف يُمكِن لجهاز بيولوجي أن يَحظى بسطح عاكس يضاهي المرايا المعدنية العصرية (أو حتى يتفوَّق عليها)؟

الجواب: خلف الخلايا المستقبلة للضوء في شبكية عيني القطة توجد طبقة تعكس جزءًا من الضوء عبْر هذه الخلايا لكي يُتاح لها فرصة ثانية لامتصاص الضوء. وهذه الكفاءة المتزايدة قد تكون مفيدة لها أثناء التجوال ليلًا. وعندما توجِّه كشافًا يدويًّا إلى

عينَي القطة وهي تنظر ناحيتك، ترى جزءًا من الضوء يَنعكِس من مؤخِّرة شبكية عينَي القطة.

وبالنسبة إلى البشر، الطبقة الموجودة خلف الخلايا المُستقبِلة للضوء لا تكون عاكسةً مثل عينَي القطة ولا تتسبَّب في لمعان العينَين بشكل خاصٍّ عند إضاءتِهما بكشَّاف يَدوي في الليل. ورغم ذلك، قد تُلاحظ ضوءًا منعكسًا في الصور إذا نظر المرء مباشرة إلى الكاميرا ذات الفلاش الوامِض.

تنشأ المعلومات الخاصة بالصورة في عينَيك من انكسار الضوء بواسطة القرنية وعدسة العَين. وفي عين المحار المروحي، تأتي المعلومات من انعكاس الضوء بواسطة المرآة المقعَّرة المَوجودة وراء شبكية العين. تنفذ الأشعة إلى عين المحار المروحي وتمرُّ خلال العدسة والشبكية، وتنعكس من المرآة، ثم تتركَّز (بسبب الانعكاس) لتكوِّن صورة أثناء وجودها داخل الشبكية.

المرآة ليسَت عبارة عن طبقة واحدة لمادَّة عاكِسة مثل مرآة حمَّامك؛ وإنما تتكوَّن من طبقات تبادُلية للسيتوبلازم (الذي يحظى بمعامل انكسار مُنخفِض) وبلورات الجوانين (الذي يَحظى بمعامل انكسار مُرتفِع) (ومعامل الانكسار هو مقياس لسرعة نفاذ الضوء عبْر مادة. وينتقل الضوء ببطء عبْر المواد ذات المعامل المرتفع). يصل سُمك كل طبقة إلى ربع الطول الموجي للضوء. ونظرًا لهذا السُّمك والقِيَم المتغيرة لمعامل الانكسار، تتوافَق موجات الضوء المنعكسة بعضها مع بعض، مما ينتج عنه انعكاس لامع أكثرَ مما يُمكن الحصول عليه من خلال طبقة عاكسة واحدة.

(١٨) الرؤية تحت الماء بالنسبة إلى البشر والبطاريق والتماسيح

لماذا نَفقِد قدرتنا على تركيز شعاع الضوء عندما نكون تحت الماء؟ لماذا يرى الشخص المصاب بقِصَر النظر أفضل من غيره تحت الماء؟ لماذا يستطيع أي شخص أن يستعيد الرؤية عند ارتداء قناع الغطس؟ لماذا يستطيع بعض الناس، مثل سكان بورما والساحل الغربي لتايلاند، أن يَرَوا جيدًا تحت الماء بدون استخدام أقنعة؟

البطريق يعيش في الهواء ولكنه يصطاد طعامه تحت الماء. فكيف يُمكنه أن يرى في الماء والهواء؟

الجواب: في الهواء، يَحدث أغلب تركيز شُعاع الضوء من خلال العين عند القرنية؛ أما باقي التركيز فيَحدُث من خلال عدسة العين التي يُمكن التحكُّم فيها باستخدام

العضلات. وعندما تغمرك المياه تمامًا، تفقد كل التركيز الذي تقوم به قرنية العين لأنَّ الخواص الضوئية لمادة العَين تكاد تتطابَق مع الخواصِّ الضوئية للمياه الموجودة خارج العين؛ ومِن ثَمَّ لا يَنحني شعاع الضوء عند نفاذه إلى العين. وهذا لا يُتيح تركيز شعاع الضوء إلا من خلال العدسة، ولكن معظمنا لا يُمكنه تغيير شكل العدسة بالدرجة الكافية لتكوين الصور الواضحة عند شبكية العين. ورغم ذلك، فإن سكان بورما والساحل الغربي لتايلاند درَّبوا أنفسهم على الرؤية تحت الماء؛ حيث إنهم يُضيِّقون بُؤبؤ العين ليُقلِّلوا من انتشار شعاع الضوء النافذ إلى العين. كما أنهم يُجبِرون عدسة العين على أن تكون مُنحنية بأقصى قدر مُمكِن. وهذان الإجراءان ينتجان صورًا شبكية تكون واضحة إلى حدٍّ معقول. (يُقال إن أي شخص يستطيع أن يتعلم هذا الإجراء.)

والشخص المُصاب بقِصَر النظر يتمتَّع بقدر كبير للغاية من التركيز الذي تقوم به قرنية عينه وعدستها، التي تنحو إلى تكوين صور أمام الشبكية. فعندما يصل شعاع الضوء من جسم بعيد إلى الشبكية، يسفر عن انتشار شعاع الضوء صورًا مشوشة. وعندما يكون الشخص المصاب بقِصَر النظر تحت الماء، فإن عدم تركيز الشعاع باستخدام القرنية يُغيِّر مكان الصورة المركزة إلى الخلف نحو الشبكية، ربما فوق الشبكية؛ ومِن ثَمَّ يَستطيع الشخص المُصاب بقِصَر النظر أن يرى بوضوح أكثر من الشخص المُصاب بطول نظر أو صاحب الرُّؤية الطبيعية.

إذا كان الغطَّاس يَرتدي قناعًا، يقع الهواء بجوار القرنية؛ ومِن ثَمَّ يكون انحناء شعاع الضوء عند سطح القرنية طبيعيًّا.

وقرنية البطريق تكاد تكون مسطحةً. لذا، حين يتحوَّل البطريق بين الرؤية في الماء وفي الهواء، من الصعب أن يتأثَّر تركيز شعاع الضوء الذي تقوم به قرنية العين. يتكيف البطريق على الرؤية في الماء لأنه يَجد فيه طعامه؛ ومِن ثَمَّ تكون عدسة عينِه مُنحنية للغاية لتركز شعاع الضوء عند شبكية العين. وعندما يكون في الهواء، يستطيع أن يُقلِّل من انحناء العدسة؛ إلا أن العدسة على الأرجح تركز شعاع الضوء كثيرًا من أجل تكوين صور واضحة عند الشبكية. وهكذا، يُصاب البطريق بقصر بالغ في النظر أثناء وجوده في الهواء على الأرجح. ورغم ذلك، يستطيع البطريق أن يحدَّ من تشويش الصور من خلال تضييق بؤبؤ العين إلى ثقب مربع صغير. ومثل هذا الثُّقب الصغير يحصر المدى الزاوي للشعاع القادم من جسم ما، مما يجعل صورة الجسم عند الشبكية أوضح.

يستطيع التمساح أن يَرى جيدًا في الهواء، لكن ليس تحت الماء. وكما هي الحال مع البشر، لا يستطيع التمساح أن يُغيِّر شكل عدسة العين بالدرجة الكافية لتعويض فقْد

تركيز شعاع الضوء الذي تقوم به القرنية. ومع ذلك، فإنه مُطارد محترف تحت الماء؛ لأنه يستعين بوسائل أخرى لتحديد مكان الفريسة.

(١٩) السمكة ذات العيون الأربعة والرؤية تحت الماء

ثمَّة سمكة غريبة، تُدعى «سمكة أنابليس»، تسبح وعيونها ممدودة جزئيًّا فوق سطح الماء لكي يُمكنها أن ترى فوق الماء وتحته في آنٍ واحد. كيف يُمكِن لعيونها أن تُركِّز شعاع الضوء في كلٍّ من الماء والهواء؟

الجواب: عدسة عين هذا النوع من الأسماك تكون على شكل بيضة لتُعوِّض انكسار الضوء الضئيل نسبيًّا الناتج عن وصول الضوء من المشهد الموجود تحت الماء. يَنكسِر الضوء القادم من فوق سطح المياه بمجرَّد أن ينفذ إلى العين ويَزداد انكساره من خلال عدسة العين؛ ومِن ثمَّ يكون شعاع الضوء مركزًا حين يصل إلى الشبكية في الجزء السفلي من العين.

أما الضوء القادم مِن تحت الماء فيَنكسِر على نحو ضعيف بمجرَّد أن ينفذ إلى العين. ورغم ذلك، فإن الانحناء الشديدة لعدسة العين يُوفِّر درجة كافية من الانثناء تتركز بها الصورة الخاصة بالمشهد الموجود تحت الماء عند شبكية مُنفصِلة في الجزء العلوي من العين. والمسافة الطويلة نسبيًّا بين العدسة والشبكية العلوية تُساعِد أيضًا في تركيز شعاع الضوء.

(٢٠) تأثير قطة شيشاير

ضع مرآةً لتعكس مشهدًا في عين واحدة، بينما ترى العين الأخرى مشهدًا آخرَ مباشرةً. ربما يكون بإمكانك أن تدمج المشهدَين معًا، أو تُشاهِد المشهدَين بالتناوب (فيما يُعرَف بـ «تنافس العينين»)، أو تُشاهد مشهدًا واحدًا فقط لأغلب الوقت. ولكن إذا اعترضت أيًّا من المشهدَين بيدك بدون أن تتابع الحركة بعينَيك، سيَختفي المشهد الثاني (الآخر) إما جزئيًّا أو كليًّا. وعندما يكون الاختفاء جزئيًّا، يتطابق الجزء المحذوف في المشهد الثاني مع المنطقة التي تتحرك عبرها اليد. فإذا كان المشهد الثاني عبارة عن وجه شخص، ربما يكون بإمكانك أن تحذف جزءًا من وجه الشخص، تاركًا فقط الفم المُنفرِج باتساع، والذي يشبه فم قطة شيشاير من قصة لويس كارول «أليس في بلاد العجائب». ما سبب هذا الحذف والاختفاء؟

الجواب: كآلية للحفاظ على البقاء على الأرجح، يركز الجهاز البصري على أيِّ حركة تَراها؛ أي العينين، ويَغرس في الوعي المشهد المُتعلِّق بتلك الحركة. وعادةً ما ترصد كلتا العينَين الحركة ويَبدو المشهد المُدمج طبيعيًّا. ولكن عندما تعكس المرآة مشهدًا مختلفًا للغاية في إحدى العينَين (حالة غير طبيعية)، يعوق التركيز على المشهد ذي الحركة إدراك المشهد الآخر برمته أو جزء منه. ولو كانت عيناك على الجهتَين المقابلتَين من رأسك (كما هي الحال مع بعض أنواع السمك)، لكان هذا الخداع البصري معتادًا أكثر.

(٢١) التأثير البصري للأنف

أغلق عينك اليُسرى، وحدِّق أمامك مباشرةً بعينك اليُمنى، مُدَّ ذراعك اليسرى ناحية اليسار مع رفع إصبع واحدة من يدك، ثم أدِر ذراعَكَ حتى تكاد إصبعك تظهر في المشهد. بعد ذلك، أدر عينك اليمنى ناحية الإصبع. ستَختفي الإصبع على الأرجح. إنها تظهر واضحةً حين تنظر مباشرةً إلى الأمام، لا حين تحاول أن تنظر ناحيتها. ما الذي يجعل الإصبع تختفي؟

الجواب: لكي ترى شيئًا، لا بد أن يمر الضوء الصادر منه عبْر فتحة عينك. فإذا حدقت أمامك مباشرةً وأدخلت إصبعك إلى المشهد كما ذُكر، يمرُّ الضوء الصادر من الإصبع سريعًا مرورًا بأنفك قبل أن ينفذ إلى فتحة عينك. وعندما توجه عينك نحو إصبعك، فأنت تحرك الفتحة نحو «ظل» الأنف. ومِن ثَمَّ يعترض الأنفُ الضوءَ الصادر من الإصبع ولا ينفذ الضوء إلى فتحة العين، وهو تأثير معروف باسم «التأثير البصري للأنف». ورغم ذلك، لا يظهر هذا التأثير إذا كان أنفك أفطس.

دائمًا ما يحجب الأنف والجبين والوجنتان جزءًا من المشهد الذي تراه العين. ورغم ذلك، يركز مخُّك على المعلومات المتاحة في المكان المحيط بنظرتِك المباشرة ويتجاهَل الأجزاء المفقودة الموجودة على الجانبين.

(٢٢) السحب الطائرة وشخصيات بلو مينيز الخيالية

وصف ثورن شيبلي، الأستاذ بكلية طب جامعة ميامي، ذات مرة خداعًا بصريًّا غير مألوف. فبينما كان على متن طائرة على ارتفاع شاهق، رأى طبقتَين من السحاب. إحدى الطبقتَين، التي بدت على مسافة أبعدَ من الأخرى، كانت تتحرَّك بسُرعة نحو الخلف. وبدت

حركة الأخرى وثيقة الارتباط بحركة الطائرة، بحيث تتعقَّبها تمامًا على طول الطريق. وفي وقت لاحق أثناء الرحلة الجوية، استَطاع شيبلي أن يرى سطح المحيط من أسفله على بُعدٍ ساحق. وعلى الفور تبادَلَت طبَقَتا السحاب المسافات، ورأى الطبقة البَعيدة ثابتة. ما التفسير الصحيح للمسافة والحركة نسبةً إلى الطائرة؟

وفي فيلم بعنوان «الغواصة الصفراء» (والمُستَوحى من أغنية لفريق بيتلز بنفس العنوان)، مرت شخصية بلو ميني الخيالية بتحوُّلٍ ملحوظ. فعندما يكون على بُعد، يكون ضخمًا ومتوحِّشًا. وحين يكون عن قُربٍ يبدو أصغر حجمًا وأقل رعبًا. لماذا يُعدُّ هذا التحوُّل غريبًا؟

الجواب: إحدى طبقتَي السحاب كانت بعيدة بما يَكفي؛ بحيث إنها بدَت وكأنها لا تتحرَّك من منظور شيبلي. تحرَّكت الطبقة الأقرب عبْر مجال رؤيته لأن حركة الطائرة تجاوزَتْها. ونظرًا لأن المشهد كان شبه خالٍ من الإشارات الأخرى الدالة على الحركة والمسافة، فُسِّرَ عدم تحرُّك الطبقة الأولى على أنه دليل على أنها كانت تُلازم الطائرة في طيرانها؛ ومِن ثَمَّ كانت قريبة حتمًا. (وهذا النوع من الإدراك يُطلق عليه «الالتقاط البصري».) أما الطبقة الثانية فقد اعتُبر أنه لا يُوجد أي ارتباط بينها وبين الطائرة؛ وأنها مِن ثَمَّ كانت بعيدة. ولم تظهر الدلائل الوافية على العُمق والحركة لتصحيح هذه الخدعة البصرية إلا حين رأى شيبلي سطح المحيط.

وشخصية بلو ميني تبدو غريبة لأنه لا بد أن يشغل زاوية صغيرة من رؤيتك عندما يكون على بعد، ويَشغل زاوية أكبر عندما يقترب منك. ويقول شيبلي إنه كلما كانت الأجسام أقرب، من المرجح أكثر أن تزداد خطورتها مقارنةً بالأجسام البعيدة، على عكس الصورة التي خرجت عليها شخصية بلو ميني تمامًا.

(٢٣) خدعة البندول البصرية (خدعة بولفريش)

ضع بندولًا متأرجِحًا بحيث تراه في مجال رؤيتك، وفي الوقت نفسه غطِّ إحدى عينَيك بفلتر معتم (ولكنه غير أكمد). ستؤدِّي عدسة واحدة من نظارة شمسية الغرض. وعلى الرغم من أن البندول يتأرجَح في مُستوًى رأسي، فأنت تراه يتأرجَح في شكل إهليلجي. ويزداد العمق الظاهري لحركة البندول إذا رأيت أيضًا مرجعًا رأسيًّا (مثل عصا أو حبل معلَّق) أو إذا استخدمت فلترًا معتمًا أكثر. ومع وضع الفلتر فوق العين اليسرى، يبدو البندول

وكأنه يدور في اتجاه عقارب الساعة (من منظور فوقي). وتَنعكِس حركة البندول عند تغطية العين اليمنى بالفلتر.

وتكون الحركة محيِّرة قليلًا إذا وضعتَ بندولَين يتأرجَح أحدهما بالقُرب من الآخر. فكلٌّ منهما يدور حول الآخر، الأمر الذي قد يستلزم أن يلفَّ الحبلان أحدهما حول الآخر. ونظرًا لأنهما لا يتشابكان، فإن حركتهما تكون غريبة.

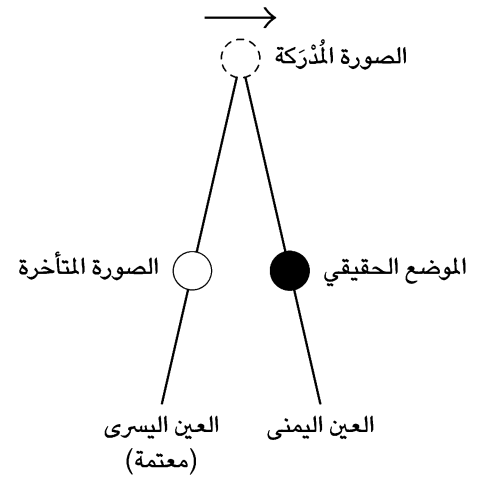
وإذا قُدْت السيارة أثناء وضع فلتر مُعتم على عين واحدة، تتغير السرعة التي يتحرك بها جسم ما يجتاز سيارتك في المشهد. فالأجسام الموجودة على أحد جانبي السيارة تمر ببطء شديد؛ بينما تمر الأجسام الموجودة على الجانب الآخر بسرعة بالغة. كما أن الفلتر يُغيِّر المسافات الواضحة للأجسام.

كيف يغير الفلتر المعتم من إدراكنا الطبيعي لعنصرَي العمق والسرعة؟

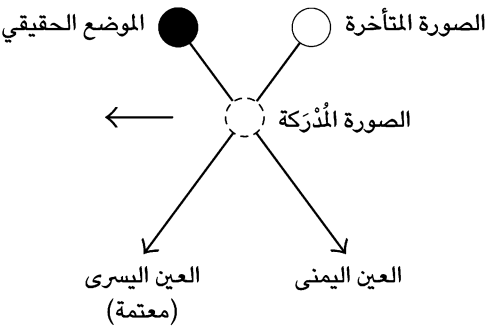
الجواب: كمية الضوء المُتناقِصة في العين المغطَّاة بالفلتر المعتم تؤخِّر الإشارة التي ترسلها العين إلى المخ. (وهذا التأخُّر يُطلق عليه «الكمون البصري».) ومِن ثَمَّ ترى العين المكشوفة الموضع الحقيقي للبندول بينما ترى العين المغطَّاة موقعًا سابقًا. يدمج مخك المشهدين، وترى البندول إما أقرب أو أبعد مما هو عليه فعلًا. وعلى الرغم من أن حركة البندول تكون في خط مستقيم، فإن مخك يفرض عنصر العمق على الحركة، مما يجعل البندول يبدو وكأنه يتأرجح في شكل إهليلجي.

على سبيل المثال، هب أن عينك اليسرى مغطاة بالفلتر والبندول يتحرك ناحية اليمين (شكل ٧-٤أ). تقع الصورة المتأخِّرة للبندول إلى يسار الموضع الحقيقي. وبعد أن يَدمج مخُّكَ الصورتين، ترى البندول في موقع أبعد مما هو عليه في الحقيقة. وبعد أن يتحرك البندول ناحية اليسار، تكون الصورة المتأخِّرة يمين المَوضع الحقيقي (شكل ٧-٤ب). في هذه المرة، ترى البندول في موقع أقرب مما هو عليه في الحقيقة.

وتنطوي الصور المشوَّهة للسيارة المتحركة أيضًا على كُمونٍ بصري. هب أن الفلتر يُغطي عينك اليسرى وأنت تنظر إلى جسم ما على الجانب الأيمن من السيارة. فالاختلاف بين الموضع الحقيقي للجسم (كما تراه العين اليمنى) والموضع الذي كان فيه الجسم قبل وقت قصير (كما تراه العين اليسرى) يُجبرك على رؤية الجسم في موقع أبعد — بالنسبة إلى السيارة — مما هو عليه في الحقيقة. ونظرًا لأن الوقت الذي يستغرقه الجسم ليمرَّ خلال مجال رؤيتك يتغير، تستنتج أن الجسم الذي يبدو بعيدًا يتحرك بسرعة حتمًا. وعلى الجانب الآخر من السيارة، يجبرك الكُمون البصري على رؤية الجسم على مسافة أقرب مما هو عليه في الحقيقة. ويبدو الجسم وكأنه يمر ببطء شديد.



(أ)



(ب)

شكل ٧-٤: البندان ٧-٢٣ و٧-٣٠: خدعة بولفريش الخاصة بتأرجُح البندول (أ) ناحية اليمين و(ب) ناحية اليسار.

أخبَرَني جيري ليرنر عن صورة جديدة لهذا النوع من الخداع البصري. استَبدِل جسمًا يدور على نحو أفقي بالبندول. يُمكنك أن تُرتِّب وضع الفلتر والدوران بحيث يكون

الدوران الظاهر في عكس اتجاه الدوران الحقيقي وبضَعف المُعدَّل. سيبدو الجسم وكأنه يَتمدَّد ويَنكمِش على نحو غامض.

وإنَّ تأخُّر الإشارة البصرية الصادرة عن ارتداء نظارة شمسية داكنة (أو وجود زجاج أمامي معتم للسيارة) قد يزيد المسافة اللازمة لإيقاف السيارة. هب أن النظارة الشمسية داكنة بالقدر الكافي لتأخير الإشارة البصرية لمدة ٠٫١ ثانية تقريبًا (حالة قصوى). فعند سرعة ٥٥ ميلًا في الساعة (حوالي ٩٠ كيلومترًا في الساعة)، يزيد التأخُّر مسافة التوقف حوالي ٢٫٥ متر.

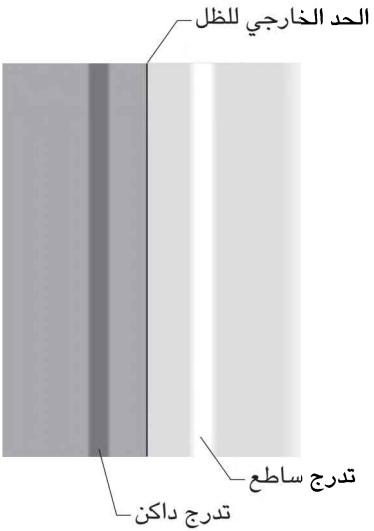
(٢٤) متتالية تأخر ضوء مصابيح الشوارع

عندما تُضاء مصابيح الشوارع في آنٍ واحد عند الغروب، ربما تبدو المصابيح الأقرب لك وكأنها تُضاء في وقتٍ أبكر، مما يُعطي انطباعًا خادعًا بأن الإضاءة تَسري في المصابيح على طول الشارع مُبتعِدة عنك. وربما تبدو مجموعة المصابيح المتقاربة الموجودة عند تقاطعات الطرق وكأنها تُضاء في وقت أبكر قليلًا من المصابيح المتباعِدة. ما السبب وراء هذه الخدعة البصرية؟ لا يمكن أن تعتمد الخدعة البصرية على السرعة التي يَسري بها التيار من مصباح إلى آخر لأن تلك السرعة كبيرة للغاية. بالإضافة إلى ذلك، تَنطلق المتتالية الضوئية بعيدًا عنك أينما كان موقعك.

الجواب: ربما تعود خدعة متتالية مصابيح الشوارع إلى الكمون البصري الذي ناقشناه في البند السابق؛ حيث تكون المصابيح القريبة ساطعة أكثر من المصابيح البعيدة؛ ومِن ثمَّ يستجيب الجهاز البصري لها على نحو أسرع. وتنتج الخدعة البصرية للمصابيح التي تُنار بالترتيب المُتتالي عن الاستجابة المتأخرة تدريجيًّا للضوء الخافت أكثر، المنبعث من المصابيح الأبعد. ربما يكون هذا التفسير غير مكتمل. وقد يتوقَّف زمن الاستجابة أيضًا على الموضع الذي تقع عنده صورة مصباح الإضاءة عند شبكية العين.

(٢٥) تدريجات ماخ اللونية

هب أن مصدرًا واحدًا قويًّا للضوء (مثل الشمس) يُضيء جسمًا ما ليكوِّن ظلًّا. سأتوقع أن يكون للظل حد خارجي يَتلاشى عبره سطوع الضوء تدريجيًّا حتى يصل إلى الإعتام الكامل. ورغم ذلك، في الكثير من الحالات، أجد تدريجين متوازيَين للحد الخارجي. يقع



شكل ٧-٥: بند ٧-٢٥: تدريجات ماخ اللونية عبْر الحد الخارجي للظل.

التدرُّج الغامق داخل الظلِّ والتدرُّج الفاتح خارجه (شكل ٧-٥). وإذا التقطتُّ صورة للظل وفحصتُ الحد الخارجي في الصورة، فسأظلُّ أرى التدريجات اللونية، التي يُطلَق عليها «تدريجات ماخ اللونية»، وسُميت بهذا الاسم على اسم العالم إرنست ماخ، وهو عالم النفس والفيزياء النمساوي الذي كان أول مَن درَّس هذه التدريجات.

تظهر تدريجات ماخ اللونية غالبًا عند الحدود الخارجية للظل، لكن عادةً ما يتمُّ تجاهلها. ورغم ذلك، حرص بول سينياك — رسَّام يَنتمي إلى المدرسة الانطباعية الحديثة وُلد في القرن التاسع عشر — على دمج التدريجات اللونية في لوحة له بعنوان «الغداء الشهي». تستطيع أن ترى التدريجات على جانبَي ظلِّك في ضوء الشمس. إذا كان الظل قريبًا منك (ربما يكون على الحائط)، يكون الظل محدَّدًا بشدة بالغة وتتكون تدريجات ماخ اللونية. وتكون التدريجات ظاهرة أكثر إذا كان ظلك يقع على الرصيف، ولا سيما حين تتحرَّك.

ما السبب وراء التدريجات اللونية؟ هل تنشأ من بعض الحِيَل الضوئية عند الحدود الخارجية للجسم الذي يُلقي بظلاله، أم أنها تتكون في الجهاز البصري للمرء؟

الجواب: ينتج الجهاز البصري تدريجات ماخ اللونية، ولا يُمكن رصدها بأجهزة قياس شدة الإضاءة عند الحد الخارجي للظل. ويُكوِّن الجهاز البصري التدريجات اللونية حين يُدرك صورة فوتوغرافية للظل بنفس سرعة تكوينه إياها عند إدراك الظل نفسه. وفي الوقت الحالي، لا يوجد أحد لديه تفسير كامل لسبب ظهور التدريجات اللَّونية؛ إلا أنني سأُقدِّم هنا تفسيرًا جزئيًّا فقط.

تُعزى التدريجات اللونية إلى تداخُل متبادل (يُطلق عليه «التثبيط الجانبي») بين مجموعات الخلايا المستقبلة للضوء في العين ومساراتها العصبية وأجزاء من المخ. والمجموعة التي تنشط بالإضاءة تُضعف قوة الإشارات المُرسلة إلى المخ عبْر المجموعات المُجاوِرة.

تتدبَّر المجموعات التي تقع خلاياها المستقبلة للضوء على مقربة معقولة من حدود الظل داخل شبكية العين. تثبط المجموعات البعيدة عن الظل بعضها بعضًا؛ ومِن ثَمَّ تُرسل إشارة مُتوسِّطة يُدركها الوعي على أنها منطقة مضاءة. والمجموعات الموجودة داخل الظل بالضبط تنشط على نحو ضعيف، ويُثبط بعضها بعضًا على نحو ضعيف وحسب، وترسل إشارة ضعيفة يدركها الوعي على أنها منطقة مُعتمة.

تنشأ التدريجات المُثيرة للفضول من المجموعات المتوسِّطة التي تمتدُّ عبْر الحد الخارجي للظل. تأمل مجموعة تُجاورها مجموعات مضاءة إضاءة قوية على جانب وعلى الجانب الآخر مجموعات مضاءة إضاءة ضعيفة. فالمجموعة المجاورة الأولى تثبط المجموعة — التي نتأمَّلها — أما المجموعة الثانية فتفعل ذلك على نحو ضعيف وحسب. ونظرًا لأن هذه المجموعة تعاني من تثبيط بدرجة متوسطة فقط، فإنها ترسل إشارات إلى المخ أكثر مما تفعله المجموعة البعيدة عن الظل. ومثل هذه المجموعات القريبة من الحد الخارجي للظل تُكوِّن التدريج اللوني الساطع.

بعد ذلك، تأمل مجموعة تجاورها مجموعات واقعة في الظل على جانب واحد، وعلى الجانب الآخر مجموعات مُضاءة إضاءة ضعيفة عند الحد الخارجي للظل. تُسفر المجموعة عن ظلامٍ؛ لأنها تُواجه تثبيطًا أقل من المجموعة الموجودة داخل الظل بالضبط. ومثل هذه المجموعات تُكوِّن التدريج اللوني الداكن.

وتبرز تدريجات ماخ اللونية حين يَشغل الحد الخارجي للظل (منطقة الانتقال من المجموعات المضاءة إضاءة جيدة إلى المجموعات المُعتمة) زاوية مقدارها درجتان تقريبًا من المشهد الذي تراه. ولا تظهر التدريجات عندما يكون الحد الخارجي محددًا بدقة أكبر.

(٢٦) عالمٌ مقلوبٌ رأسًا على عقب

نظرًا لأن العين تقوم مقام العدسة المحدبة، فإنها تُكوِّن صورة حقيقية للعالم مقلوبة في شبكية العين. (على سبيل المثال، تظهر الأرض في الجزء العلوي من شبكية العين، بينما تظهر السماء في الجزء السفلي). إذن، كيف نرى العالم في الاتجاه الصحيح؟ لو ارتديت نظارات خاصة (منشورًا زجاجيًّا) تعكس صورة العالم، فهل سترى العالم مقلوبًا رأسًا على عقب؟

الجواب: في الرؤية الطبيعية، يُفسِّر المخ صورة العالم المقلوبة في الاتجاه الصحيح من واقع الخبرة السابقة. على سبيل المثال، عندما تفرد يدك لأعلى أمام وجهك، تكون صورة يدك — المتكوِّنة في الشبكية — ممدودة إلى أسفل. ورغم ذلك، يدرك المخ الصورة من خلال تفسير مد اليد على أنها حركة متجهة إلى أعلى. وإذا ارتديت نظارات خاصة تقلب الصورة، يستغرق المخ عدة ساعات، وربما أيام، لضبط تفسيراته. وحتى ذلك الحين، سيبدو العالم مقلوبًا رأسًا على عَقِب، ولكن بعد الضبط سيرى المخ العالم مرة أخرى في اتجاهه الصحيح. وعندما تَخلع النظارات سيحتاج المخ إلى إجراءِ ضبط آخر قبل أن يبدو العالم في وضعه الصحيح مرة أخرى.

(٢٧) الظلال المعكوسة، وتأثير الفقاعة

اصنع ثقبًا في قطعة ورق غير شفافة، وأمسك بالورقة على بُعدِ بضعة سنتيمترات من عينك، وأغمض عينك الأخرى، ثم أمسك مسمارًا دقيقًا بين الثقب وعينك المفتوحة. حرك المسمار حتى تظهر صورة ظلية للمسمار داخل دائرة الضوء الصادر من الثقب. لماذا تكون الصورة معكوسة بالنسبة إلى اتجاه المسمار؟ لماذا تتكون الصورة فيما يبدو خلف الورقة؟

انظر بعينٍ واحدة إلى ضوء بعيد عبْر الثغرة التي تصنعها بإصبع الإبهام وإصبع أخرى، بحيث تكون الإصبع أبعد بعض الشيء عن إصبع الإبهام. تتكون فيما يبدو «فقاعة» على إصبعك على امتداد الجزء الموجود داخل الثغرة. وكلما ضاقت الثغرة، برَزَتِ الفقاعة أكثر إلى أن تملأ الثغرة بالكامل. ما سبب «تأثير الفقاعة»؟

لاحظ القبطان جيمس كوك تأثير الفقاعة عام ١٧٦٩ أثناء مرور كوكب الزهرة أمام الشمس؛ فبينما كان كوكب الزهرة يتحرَّك عبْر مجال رؤية كوك للشمس، كوَّن كوكب الزهرة نقطةً سوداء، ورغم ذلك، عندما اقترب من حافة الشمس، ظهر حاجز أسود بين النقطة والحافة، كما لو أن النقطة تحوَّلت إلى فقاعة.

الجواب: تقوم العين مقام العدسة المحدبة، وتُنتج صورة مقلوبة عند الشبكية. هب أن رأس المسمار بالقرب من مركز رؤيتك ويمتد إلى أسفل. تكون الصورة مقلوبة رأسًا على عقب وتمتد عبْر النصف العلوي من شبكية العين. ومن واقع الخبرة، يقلب مخك الصورة لكي ترى المسمار في الاتجاه الصحيح.

كما أن المسمار يُكوِّن ظلًّا داخل شبكية عينك لأنه يَحجب جزءًا من الضوء الصادر من الثقب. ونظرًا لأن المسمار موجود في النصف السفلي من المشهد، يقع الظل عبْر النصف السفلي من شبكية العين. ورغم ذلك، ونظرًا لأن المخَّ يقلب الصور المتكوِّنة عند شبكية العين، ترى الظل في النصف العلوي من المشهد. ومِن ثَمَّ ترى المسمار في اتجاهه الصحيح، ولكن يكون ظله مقلوبًا رأسًا على عقب.

أما بالنسبة إلى تأثير الفقاعة، فبينما تُقلِّل الفجوة التي تراها بين إصبع الإبهام والإصبع الأخرى، تحجب إصبع الإبهام جزءًا من الضوء الذي يمرُّ عبْر الإصبع. وينتج عن تقليل الإضاءة منطقة مُعتمة عند شبكية العين إلى جوار صورة الإصبع التي تمتد فيما يبدو إلى الفجوة كما لو أنها فقاعة. وكلما كانت الفجوة ضيقة، حجبت المزيد من الضوء، ويبدو الامتداد أكبر حجمًا.

(٢٨) انعكاس عجيب لكرة تتدلى من شجرة الكريسماس

تستطيع كرة لامعة تتدلَّى من شجرة الكريسماس أن تَعكِس لك غرفة بأكملها تقريبًا. هب أنك وضعت مصدرًا صغيرًا للضوء (مثل ثقب مضيء) أمام الكرة ثم نظرت إلى انعكاس الكرة من بُعد ١٠ سنتيمترات. إذا كان نور الغرفة مضاءً، فسيكون انعكاس المصدر عبارة عن نقطة من الضوء. وإذا كان نور الغرفة مغلقًا، يمتدُّ الانعكاس تدريجيًّا في خطٍّ مستقيم. ويَنكمِش سريعًا مرةً أخرى إذا أضأت نور الغرفة. ما سبب حدوث هذا التشوُّه حين تكون الغرفة مُظلمة؟

الجواب: ينعكس شعاع الضوء من مصدر الضوء في عدة اتجاهات من السطح الكروي للكرة. إذا كانت عيناك قريبتين بالدرجة الكافية، فإنها تعترضان سبيلَ قدرٍ كبير

من الشعاع المتشعِّب وتركزانه عند الشبكية. ما تراه هي صورة للمصدر تبدو واقعة خلف سطح الكرة القريب. فعندما تكون الغرفة ذات إضاءة جيدة، يضيق بؤبؤ العين بالدرجة الكافية لإنفاذ نطاقٍ محدود من الشعاع المنعكس. وحينئذٍ تكون صورة مصدر الضوء عبارة عن نقطة صغيرة. وعندما تكون الغرفة مُظلمة، يتسع بؤبؤ العين، ويسمح بنفاذ نطاقٍ أكبر من الشعاع المنعكس إلى داخل العين، وترى صورة ممتدة للمصدر.

(٢٩) أشكال النقاط العشوائية الدوارة

انثر حبرًا أو طلاءً على قطعة ورق ثم انسخها نسخة فوتوغرافية على ورقة شفافة. ضع الورقة الشفافة على النسخة الأصلية لكي تتطابق النقاط مع النقاط المُتماثلة. ضع إصبعك على نقطة في الورقة الشفافة بينما تدير باقي الورقة حول إصبعك. بالنسبة إلى الدوائر الواسعة البعيدة عن المحور تَبقى النقاط عشوائية، أما بالنسبة إلى الدوائر الضيقة القريبة منه، فيبدو أن نقاطًا كثيرة تقع على دوائر غير مرئية.

ومع مزيد من التدوير، يتَّجه ترتيب النقاط هذا إلى الداخل نحو إصبعك إلى أن يختفي. ويمكن تكوين تصميمات أخرى بتحويرات مختلفة للورقة الشفافة وتحريكها على نحو مختلف. وإذا أنتجت ورقة شفافة بماكينة التصوير أصغر من النسخة الأصلية نوعًا ما، ثم وضعت الورقة الشفافة فوق النسخة الأصلية، تظهر أشكال حلزونية وغيرها من الأشكال الأخرى. ما هو سبب ظهور هذه الأشكال بهذه الترتيبات المتنوعة التي سُمِّيت «أشكال جلاس» على اسم العالم ليون جلاس من جامعة مكجيل الذي اكتشف هذه الأشكال عام ١٩٦٩؟ ويختفي هذا الترتيب إذا كان الشكل الثاني صورة سلبية للشكل الأول وذا خلفية رمادية ظلية متدرجة. هل هذه النتيجة تُشير إلى أن رؤية دوران الأشكال تتوقف على درجة التباين بين النقاط والخلفية الموجودة في كل شكلٍ من الأشكال؟

الجواب: الحركة الدائرية الموجودة في أشكال النقاط العشوائية غير مفهومة بالتفصيل؛ فالجهاز البصري يفحص الشكل بالكامل ليربط بين أزواج النقاط التي كانت مصطفَّة فيما سبق. وإذا نظرت إلى جزء صغير وحسب، تعجز عن ربط النقاط ببعضها ولا ترى أي شكل. وقد يرجع الربط بين أجزاء المشهد بأكمله إلى ترتيب الجهاز البصري لها في مجموعات مصمَّمة لتمييز الخطوط والحدود.

هب أن الكثير من هذه المجموعات يستثيرها زوج من النقاط التي كانت مُصطفَّة فيما سبق. حينئذٍ، يقارن المخ بين المجموعات ويُدرك أن لكل نقطة زوجًا من النقاط

المترابطة في دائرة غير مرئية، ويستوعب المخ الحركة الدائرية. وعندما يدور شكل بعيدًا عن الشكل الآخر، تحث النقاط التي كانت مصطفة فيما سبق ظهور مجموعات مختلفة وتعجز أنت عن إدراك الحركة الدائرية.

بالإضافة إلى الحاجة إلى تدوير الأشكال في دوائر صغيرة، قد يتطلَّب المخُّ أن تحظى النقط بنفس درجة التباين مع الخلفية. ومِن ثَمَّ فعندما يكون أحد الأشكال صورة سلبية لشكل آخر وذا خلفية ظلية رمادية اللون، لا يتمُّ تمييز أي نمط، حتى عندما توجد حركة دائرية صغيرة للنقاط.

(٣٠) أشكال التشويش على شاشة التلفزيون

اضبط التلفزيون على قناة لا تنقل أيَّ إشارة بحيث تَمتلئ الشاشة بالموجات العشوائية المتداخِلة التي يُطلَق عليها التشويش. إذا وضعت دائرة حول الشاشة، يبدو أن التشويش ينساب على طول حدود الدائرة. وإذا وضعت شبكة ذات خطوط قطرية على الشاشة، تبدو النقاط وكأنها تتحرك عموديًّا على الخطوط؛ ومِن ثَمَّ تظهر وكأنها تتحرَّك في دوامة. وتُجبر شبكة من الدوائر متَّحدة المركز النقاط على التدفُّق بسرعة إلى الخارج من مركز الشبكة. لماذا تظهر مثل هذه الأشكال من تشويش شاشة التلفزيون؟

عندما تنظر إلى الشاشة المشوشة بعين واحدة مغطَّاة بفلتر مُعتم (ولكن غير أكمد)، يتجزأ التشويش إلى شكل مذهل. (ستؤدي عدسة نظارة شمسية الغرض.) تظهر النقاط البيضاء الموجودة على الشاشة على مستويين؛ أحدهما أمام الشاشة والآخر وراءها. تتحرك النقاط الموجودة على أحد المستويَين بانتظام ناحية اليسار؛ في حين تتحرك النقاط الموجودة على المستوى الآخر بانتظام ناحية اليمين. ما السبب وراء ظهور هذا الشكل الواضح واتجاه حركة النقاط وتغيُّر العمق؟

الجواب: الحركة الواضحة للنقاط، المُحفَّزة بوجود شكل معين أو شبكة على الشاشة، هي بالتأكيد خدعة بصرية؛ لأن النقاط تظهر وتختفي على نحو عشوائي. ورغم ذلك، يُصرُّ الجهاز البصري على رؤية سلسلة نقاط على امتداد اتجاه واحد باعتبارها حركة لنقطة واحدة فقط. ولا أحد يعلم تحديدًا السبب وراء وجود اتجاه مفضل للحركة التي تراها العين. ورغم ذلك، من الواضح أن الاتجاه المفضل يُحفَّز باتجاه حدود الشبكة أو الشكل الموجود على الشاشة.

عندما تُغطَّى عين واحدة بفلتر معتم (ولكن غير أكمد)، تتأخر الإشارة البصرية القادمة من تلك العين. وفي حين أن العين المكشوفة ترى في التوِّ نقطة على الشاشة، فإن العين المغطَّاة ترى نقطة على الشاشة في وقت لاحق. وكما هي الحال مع خدعة بولفريش (التي ناقشناها في البند ٧-٢٣)، يحاول المخ أن يتعرَّف هاتَين الصورتين باعتبارهما نقطة واحدة. ولكي يقوم بذلك، تُرى النقطة على أنها أمام الشاشة أو خلفها (انظر شكل ٧-٤). ومِن ثَمَّ، تنشأ الخدعة البصرية الخاصة بعمق النقاط من تأخُّر الإشارة البصرية القادمة من العين المغطاة.

هب أنك ترى في اللحظة التالية زوجًا من النقاط يمين الزوج الأول مباشرة. مرةً أخرى يدمج المخ الصورتين ليرى نقطة واحدة. ويستطيع المخ أيضًا أن يفسر النقطة الجديدة باعتبارها نقطة سابقة أُزيحت في تلك اللحظة ناحية اليمين. والمزيد من الدمج والتفسيرات يُعطي انطباعًا خادعًا بأن النقطة تتحرك إلى اليمين على الشاشة. وتبدو النقاط الأخرى وكأنها تتحرَّك ناحية اليسار.

ولعلَّ تفسيري يجانبه الصواب؛ فربما يهتم المخ أولًا بالبحث عن حركة ظاهرة ثم يهتم بإضافة عمق لها. والنتيجة النهائية واحدة: يتسبَّب المخ في خدعة النقاط المتحركة في اتجاهين متعاكسين وعلى مستويين مختلفين وبعمقين مختلفين.

(٣١) ابتسامة الموناليزا

واحدة من أكثر الابتسامات سحرًا في العالم هي ابتسامة لوحة الموناليزا لليوناردو دا فينشي. ما الذي يجعل تلك الابتسامة فاتنة للغاية؟

الجواب: ربما تبدو رؤيتك ثابتة على نحو معقول؛ إلا أنها تتغيَّر باستمرار بسبب «الموجات العشوائية المتداخلة» الخفية؛ أي تذبذُب الإشارات ومعالجة الإشارات من شبكية العين على طول الطريق وصولًا إلى المستوى الواعي للمخ. عند استثارة الخلايا المستقبلة للضوء والخلايا العصبية فإنها تُطلق إشاراتها أو تفشل في ذلك، وتتذبذب درجة امتصاص الضوء في الخلايا المستقبلة للضوء، ويُساء تفسير الخطوط والأشكال أو تتذبذب بين تفسيرات مُتباينة. وهذه التذبذبات وغيرها من التنويعات تُغيِّر من زوايا ابتسامة الموناليزا على نحو مُبهَم، مما يتسبب في رفع أو إنزال زوايا الفم على نحو عشوائي ويُغيِّر الحالة المزاجية البادية على وجه الموناليزا. أنت لا تدرك هذه التغييرات، ولكن تأسرك الابتسامة الغامضة على أيِّ حال.

(٣٢) الصور المتكرِّرة العائمة على شاشة التلفزيون

أثناء مشاهدة التلفزيون في غرفة مُظلمة إلى حدٍّ ما، انظر بسرعة من مسافة متر تقريبًا إلى يسار الشاشة إلى يمين الشاشة بمسافة متر. في أثناء الحركة الدائرية السريعة ناحية يمين شاشة التلفزيون، سترى نسخةً واحدةً أو أكثر مُطابقة وساطِعة ومُفصلة للصورة المعروضة على شاشة التلفزيون. تكون كل نسخة مائلة نحو اليمين.

ما الذي يُكوِّن هذه النسخ المطابقة؟ في أي اتجاه ستميل الصور إذا حركت نظرتك حركة دائرية سريعة في الاتجاه المعاكس؟ لماذا يؤدِّي ازدياد المسافة بينك وبين الشاشة إلى زيادة انحراف النسخ المتطابقة والمسافة الفاصلة بينها؟ هل الحركة الرأسية تُسفِر عن صور مُتكرِّرة؟ هل يمكن تكوين الصور عندما تُحرِّك نظرتك سريعًا أثناء مشاهدة فيلم على شاشة التلفزيون؟

الجواب: تُكوِّن الخطوط الأفقية الصورة المعروضة على شاشة التلفزيون بسرعة بالغة، بدايةً من أعلى الشاشة ونزولًا إلى أسفل، خطًّا تلو الآخر. هب أن نظرك يتحرَّك نحو اليمين أمام الشاشة بينما تُكوِّن الأشعة الخط العلوي. يبقى الخط مرئيًّا لمدة قصيرة بسبب ثبات الرؤية. ونظرًا لأن نظرك يتحرك نحو اليمين، تنتقل الصورة الثابتة للخط العلوي ناحية اليمين حين يتكون الخط الثاني على الشاشة. في الواقع، بينما يتكون خط جديد على الشاشة، لا يزال بإمكانك أن ترى الخط السابق؛ إلا أن الخطوط تنتقل ناحية اليمين بسبب حركة نظرك. تكون الحركة أكبر ما يكون بالنسبة إلى الخط العلوي وأقل ما يكون بالنسبة إلى الخط السفلي. وتراكب الخطوط هو ما يضيف عنصر الانحراف إلى النسخة المطابقة لما هو معروض على شاشة التلفزيون.

وينتج عن تحريك نظرك نحو الأسفل نسخة مطابقة مضغوطة، بينما تسفر الحركة نحو الأعلى عن نسخة مطابقة ممطوطة رأسيًّا. ونظرًا لأن الأفلام تُعرَض على شاشة التلفزيون على هيئة سلسلة من الصور السينمائية المتتابعة، فإنها لا تظهر نسخًا متطابقة متكررة.

(٣٣) القراءة عبْر ثقب صغير

هل يُمكنك أن تقرأ بإجهاد أقل للعين إذا ما قرأت عبْر ثقب أمام عينيك؟ تُباع نظارات القراءة ذات الثقب الصغيرة على أمل تخفيف الشد العضلي للعينين لأنه يتمُّ تقليص

الحاجة إلى التكيُّف (التركيز) التي تفرضها هذه العضلات بطبيعة الحال أو التخلُّص منها. وتتمثل الحجة هنا في أنك حين تنظر عبْر ثقب صغير، فأنت تزيد من «عمق البؤرة» (المدى الذي تكون فيه الأجسام تحت بؤرة التركيز) ولا تحتاج إلى تكييف العينين. هل هذه الحجة سليمة؟

الأبراص، التي تعيش في المناطق الصحراوية، لا تقرأ عبْر الثقوب الصغيرة، إلا أنها تَستخدمها لترى خلال الأنوار الساطعة؛ فأثناء الليل، ينفتح غشاءان فوق فتحة العين ليُكوِّنا شقًا طوليًّا يستطيع البرص أن يرى من خلاله. وأثناء النهار، يُغلق الغشاءان الشق؛ ولكن تبقى أربع فتحات على حواف الغشاءين. كيف يستعين البرص بالأربع فتحات ليرى الضحية؟ أليست فتحة واحدة ستؤدي الغرض على نحو أفضل؟

الجواب: الحجة الخاصة بالقراءة عبْر ثقب صغير ليست حجة سليمة. فالتكيف مقرون بتقارب العينين؛ أي توجيههما إلى زاوية يلتقي فيها خطا الرؤية عند نفس الجسم. عندما تقرأ هذه الصفحة على بعد ٢٥ سنتيمترًا مثلًا، يجب أن تتقارب عيناك عند زاوية معينة لكي تتمكنا من دمج الصورتين الآتيتين من العينين ذهنيًّا وتكوين صورة واحدة. والتقارب يجبر العين تلقائيًّا على التكيف؛ حتى وإن كنت تنظر عبْر ثقوب صغيرة. ومِن ثَمَّ، فالثقوب الصغيرة لا تخفف إجهاد العينين.

تقلل الفتحات المتعددة في العين المغلقة للبرص عمق البؤرة. حينئذٍ يستطيع البرص أن يؤقلم عينه بحيث تكوِّن الفتحات الأربع صورة واضحة واحدة لجسم الضحية بينما تكوِّن أربع صورًا متداخلة نوعًا ما لأي جسم آخر. يولي البرص الانتباه إلى الصورة الواضحة، لا إلى الصور الضبابية الأخرى.

(٣٤) لونا إصبعك

بينما تجلس في غرفة معتمة وتنظر بعين واحدة فقط، مد ذراعك وافرد إصبعًا واحدةً أمام نافذة بعيدة ساطعة. ركِّز على النافذة (أو حتى على ما هو أبعد من ذلك)، لا على إصبعك. يحفُّ بجانبَي إصبعك ضوء ملوَّن باهت؛ أحمر على جانب وأزرق على الجانب الآخر. ما سبب ظهور اللونين؟

الجواب: أولًا تأمل شعاع ضوء أبيض يمر ناحية يسار إصبعك مباشرة. يوصف الضوء باللون الأبيض لأنه يتكون من كميات متساوية تقريبًا من الألوان الواقعة في نطاق الطيف المرئي. وبمجرد أن يخترق الضوء العين ثم ينفذ إليها، تنتشر الألوان في نهاية الأمر

عبْر مساحة صغيرة من شبكية العين، بحيث يكون اللون الأزرق على جانب واحد واللون الأحمر على جانب آخر، وتَنتشِر الألوان الفرعية (الوسيطة) بين اللونين الأحمر والأزرق. وبوجه عام، لا يمكنك أن ترى هذه الألوان بسبب تداخلها عند شبكية العين. وعلى الرغم من ذلك، عند وضع الإصبع أمام نافذة مضاءة بضوء ساطع، تُلقي الإصبع بظل قاتم على شبكية العين، مما يحد من تداخل الألوان المجاورة لهذا الظل؛ وبذلك يُمكنك أن ترى اللون على طول ذلك الظل. واستنادًا إلى الزاوية التي يَنفُذ بها الضوء إلى العين، يظهر اللون الأحمر على أحد جانبَي الظل بينما يظهر اللون الأزرق على الجانب الآخر.

(٣٥) رؤية النجوم أثناء النهار عبْر أسطوانة

منذ أن طرح أرسطو الفكرة لأول مرة، والناس يؤمنون أن بإمكانهم أن يروا النجوم أثناء النهار إذا ما نظروا خلال أسطوانة طويلة كمدخنة طويلة مثلًا. تقلل الأسطوانة كثيرًا من وهج السماء، تاركةً رقعة صغيرة فقط عند الفوهة. يتيح الضوء المتناقص للناظر التكيُّف جزئيًّا على الظلام. ورغم ذلك، هل هذه التدابير كافية لإتاحة رؤية النجوم في تلك الرقعة من السماء؟

الجواب: لا يمكن رؤية النجوم عبْر أسطوانة طويلة بالطريقة الموصوفة آنفًا؛ لأن رقعة السماء المحيطة بالنجوم تكون على نفس قدر السطوع الذي تكون عليه السماء بدون استخدام الأسطوانة. وعلى الرغم من أن النظر عبْر الأسطوانة يقلِّل الوهج الإجمالي النافذ إلى العين، فإنه لا يُغيِّر حقيقة الافتقار إلى درجة التباين بين النجوم وما يُحيط بها. بل ربما تقلل الأسطوانة من وضوح رؤية النجوم؛ فإذا نظرت إلى منطقة صغيرة مُضيئة يحيط بها الظلام، لا بد أن تكون المنطقة المضيئة أكثر سطوعًا من درجة معينة لو أردنا رؤيتها. وتقل هذه الدرجة إذا كانت المنطقة المحيطة ساطعةً بعض الشيء.

(٣٦) حركة عين مراقب النجوم

لماذا تكون فرصتُكَ أفضل لرؤية النجوم المُعتمة المجاورة للنجوم الساطعة إذا حركت عينيك ناحية جانب واحد من النجوم؟ وعندما تكون في مكانٍ مظلم جزئيًّا، لماذا يُمكنك أن ترى مصدرًا للضوء الخافت على نحو أفضل إذا تحاشيت النظر إليه مباشرةً؟ استغَل أرسطو هذا الأسلوب ليُبرهن على أن المُذنَّبات ليست كواكب يفصل بين ظهورها فترات

زمنية طويلة؛ لأنه عندما تتحرَّك العينان ناحية جانب واحد من المُذنَّب، يُمكنك أن ترى الذيل.

الجواب: في الإضاءة الخافتة، عندما تنظر إلى نجمةٍ في ليلةٍ مُظلِمة مثلًا، يتبلَّد الإحساس في الخلايا المخروطية المستقبلة للضوء ولا يُمكن تمييز الضوء إلا من خلال الخلايا العصوية. وإذا نظرتَ مباشرةً إلى النجمة، تقع صورتها عند النقرة المركزية، التي تحتوي على الخلايا المخروطية فقط؛ ومِن ثَمَّ لا يُمكنك أن تراها. وإذا حركت نطاق رؤيتك المباشرة عبْر النجمة، تقع الصورة عند أجزاءٍ أخرى من شبكية العين حيث توجد الخلايا العصوية؛ وحينئذٍ تستطيع رؤية النجمة.

(٣٧) درجة وضوح الأجسام من الفضاء الخارجي

ما أصغر جسم يستطيع أن يراه رواد الفضاء على سطح الكرة الأرضية من الفضاء الخارجي دون الاستعانة بأيِّ أجهزة؟ هل يُمكنهم رؤية المدن الكبيرة أو المباني الضخمة مثل الأهرامات؟ كانت الرحلات الأولى لكوكب المريخ مخيِّبة للآمال بالنسبة إلى البعض؛ لأن الصور لم تُبدِ أيَّ مظاهر دالة على وجود حياة ذكية. ما مظاهر الحياة على كوكب الأرض التي تظهر في الصور الفوتوغرافية للكوكب لو أن درجة الوضوح مقتصرة على مسافة كيلومتر واحد تقريبًا؟

الجواب: ليس بإمكان رائد الفضاء أن يرى أي مَظاهر للحياة الذكية على كوكب الأرض عندما يرى سطح الكوكب مِن الفضاء بالعين المجرَّدة أثناء النهار. يُحدِّد حيود الضوء (انتشاره) أثناء مروره عبْر بؤبؤ العين نطاق وضوح رؤية المرء. ومن الفضاء الخارجي (على بعد ٨٠٠ كيلومتر فوق سطح الأرض، مثلًا) يكون الحيود كافيًا لتشويش تفاصيل كافة مظاهر العمران الإنساني تقريبًا. والمباني التي يصل عرضها إلى كيلومتر تقريبًا تكون عند الحد الأدنى للوضوح. ورغم ذلك، عندما يرى رائد الفضاء كوكب الأرض أثناء الليل، تَبرُز الشواهد الدالة على وجود حياة لأنه يُمكن رؤية الأضواء المنبعثة من المدن الكبرى.

(٣٨) النحل ونمل الصحراء والضوء المُستقطَب

يُقال إن شعاع الضوء القادم إليك مباشرةً من الشمس يكون «غير مُستقطَب»؛ لأن مجالاته الكهربائية تتذبذب في كل اتجاه مُتعامد على شعاع الضوء. ورغم ذلك، يُقال إن

شعاع الضوء الذي يصل إليك بعد الانتشار عبْر جزيئات الهواء يكون «مُستقطَبًا» لأن مجالاته الكهربائية تتذبذب على طول محور وحيد مُتعامد على الشعاع. لعلك لا تلاحظ الفارق، إلا أن بعض الحيوانات، مثل النحل ونمل الصحراء، تتبين طريقها برصد شكل الضوء المُستقطَب الذي تراه في السماء. على سبيل المثال، عندما تخرج نملة الصحراء بحثًا عن طعام، فإنها تلاحظ الزوايا بين اتجاه جسدها واتجاه استقطاب ضوء السماء. وحين ترغب في العودة إلى عشِّها مرةً أخرى، تحسب اتجاه العش من خلال جمع كافة المعلومات الخاصة بالزوايا بكل كفاءة. وهذه العملية الحسابية مُدهِشة؛ لأنها قد تشتمل على عدة مئات من الزوايا.

كيف تكتشف هذه الحشرات استقطاب الضوء؟

الجواب: يُقال إن عيون النحل ونمل الصحراء مركبة؛ لأنها تتكوَّن من ألف خلية أو أكثر من الخلايا المُستقبِلة للضوء التي تُسمى «الأوماتيديا». وفي كل خلية من هذه الخلايا، ينفذ الضوء عبْر عدسة أمامية ومخروط يتكون من مادة بلورية شفافة ثم إلى داخل بِنية مستطيلة تُسمى «رابدوم» (شعيرة حسية). وتلك البِنية مقسَّمة إلى تسعة أجزاء فرعية مرتَّبة حول المحور الرئيسي على امتداد طولها. وتترابط هذه الأجزاء معًا من خلال تداخل المناطق التي تحتوي على الصبغة الحساسة للضوء (الرودوبسين). وتؤدِّي خلايا الأوماتيديا وظيفتها من خلال إرسال الضوء على طول خط الوسط لكي يتسنى للصبغة أن تمتصها وترسل إشارة إلى مخ الحشرة.

وأحد الأجزاء الموجودة في خلايا الأوماتيديا يستطيع تمييز استقطاب الضوء. وداخل بعض خلايا الأوماتيديا، يكون التواء هذا الجزء في اتجاه عقارب الساعة حول المحور الرئيسي، بينما يكون الالتواء في باقي الأجزاء الأخرى عكس اتجاه عقارب الساعة. وتتبيَّن الحشرة اتجاه استقطاب الضوء وقوَّته من خلال توظيف ثلاث إشارات؛ اثنتان منها تأتيان من الأجزاء الحساسة للاستقطاب، واحدة من كل اتجاه من اتجاهي الالتواء. وتأتي الإشارة الثالثة من مجسَّات الأشعة فوق البنفسجية الموجودة في خلايا الأوماتيديا التي تُظهر سطوع الأشعة فوق البنفسجية. وبناءً على هذه الإشارات الثلاث الآتية من مجموعة خلايا الأوماتيديا الموجودة في جزء من العين، تستطيع الحشرة أن ترصد استقطاب السماء.

في الوقت الحالي، لا أحد يعرف كيف يُوظِّف مخ الحشرة هذه المعلومات. ورغم ذلك، فإننا نعرف قطعًا أن النحل ينقل المعلومات فيما بينه من خلال «الرقصة الاهتزازية»، وهي عبارة عن مسار تحليق دائري خاص يُرمَز فيه إلى المعلومات.

ويُمكن استغلال القدرة على تمييز الضوء المُستقطَب بطرق أخرى بخلاف معرفة الطرق. على سبيل المثال، بعض الحشرات المائية تتتبَّع الأجسام تحت المياه من خلال استقطاب الضوء المنعكس من المياه. ويرتدي الناس نظارات شمسية مُستقطِبة لأن العدسات تمتص الضوء المُستقطَب أفقيًّا؛ ومِن ثمَّ تقصي الوهج بعيدًا عن المياه. والأهم بالنسبة إلى سائقي السيارات، يُستقطَب الضوء المنعكس من سطح الأسفلت أفقيًّا ومِن ثَمَّ تُقصيه النظارات الشمسية المُستقطِبة. وأحيانًا تخطئ حشرة ذبابة مايو في إدراك الضوء المُستقطَب المنعكس من الأسفلت على أنه مياه. وحينئذٍ تندفع نحو الأسفلت وتضع بيضها الذي سرعان ما يَهلك في هذا الموضع.

(٣٩) فرشاة هايدينجر

في مقدور معظم الناس أن يُميِّزوا استقطاب الضوء بالعين المجردة. انظر إلى خلفية ساطعة ليس بها أشكال مميزة عبْر فلتر مُستقطِب. (عدسة نظارة شمسية مُستقطِبة ستؤدِّي الغرض هنا.) على طول خط الرؤية الخاص بك، ولمدة بضع ثوانٍ، من المفترض أن ترى شكلًا باهتًا صغيرًا أصفر اللون على هيئة ساعة رملية، محاطًا بمناطق زرقاء اللون (شكل ٧-٦). يُسمى الشكل «فرشاة هايدينجر» على اسم العالم فيلهلم كارل فون هايدينجر الذي اكتشف الشكل عام ١٨٤٤.

وللحفاظ على وضوح رؤية فرشاة هايدينجر، قم بتدوير الفلتر حول خط رؤيتك بحيث يتغير اتجاه استقطاب الضوء النافذ إلى عينك. يدور شكل الساعة الرملية أيضًا (بحيث يُبقي المحور القصير للجزء الأصفر موازيًا لاتجاه استقطاب الضوء). يتعزز الشكل إذا كانت الإضاءة تميل إلى اللون الأزرق أكثر من أي لون آخر، والسماء الزرقاء تؤدِّي الغرض على نحو جيد.

لا يستطيع جميع الأشخاص أن يروا فرشاة هايدينجر، ويبدو أن شكلها يعتم مع التقدم في العمر؛ فحين كنتُ أصغر سنًّا كان بإمكاني أن أراها بدون استخدام فلتر؛ وذلك من خلال النظر إلى ضوء السماء، الذي يكون مُستقطَبًا. أي جزء من العين يتسبَّب في ظهور هذا الشكل وما سبب حساسية العين تجاه استقطاب الضوء؟

الجواب: يُعزى ظهور فرشاة هايدينجر عادةً إلى «بُقعة الشبكية»، وهي عبارة عن منطقة متداخلة مع النقرة المركزية. في البداية، كان يُعتقَد أن الحساسية تجاه استقطاب الضوء تُعزى إلى توزيع جزيئات الصبغة المسئولة عن اللون الأصفر في تلك المنطقة.

شكل ٧-٦: بند ٧-٣٩: الشكل الذي تراه في الضوء المُستقطَب.

تمتصُّ هذه الجزيئات الضوء الأزرق ذي درجة الاستقطاب المحدَّدة. وكان يُعتقد أن الجزيئات موجهة على طول خطوط قُطْرية ذات مركز مشترك. وتشير أحدث النماذج إلى أن الجزيئات يجب ألا تكون موجهة في حد ذاتها. وبدلًا من ذلك، قد تجتمع في مناطق يتسبَّب توجُّهها معًا في الامتصاص الانتقائي لأحد اتجاهات استقطاب الضوء الأزرق.

ومن أجل فهم أيٍّ من هذَين النموذجَين، أتخيَّل أن الأصباغ التي تُغطي بقعة الشبكية تقع على طول خطين مُتقاطعَين، أحدهما أفقي والآخر رأسي. فإذا نفذ ضوء أزرق مُستقطَب رأسيًّا إلى عينَيك، يُمرر الخط الرأسي الضوء إلى الخلايا المخروطية الكامنة، إلا أن الخط الأفقي يمتص الضوء، مانعًا إياه من الوصول إلى هذه الخلايا. وعوضًا عن ذلك، إذا نفذ الضوء المُستقطَب أفقيًّا إلى عينَيك، يمرر الخط الأفقي الضوء ولا يمرره الخط الرأسي.

هب أن الضوء المُستقطَب رأسيًّا ينفذ إلى العين، وأن لون الضوء أبيض تقريبًا إلا أنه يحتوي على قدر من اللون الأزرق أكبر من أيِّ لون آخر. حينئذٍ تُستثار الخلايا المخروطية الموجودة خلف الخط الرأسي وأنت ترى الضوء الأزرق على طول الخط الرأسي. ورغم

ذلك، يمتص الخط الأفقي الضوء الأزرق، وتَستقبل الخلايا المخروطية الموجودة خلف ذلك الخط باقي الألوان الموجود في الضوء النافذ إلى العين. ويُرى اللون الأصفر نتيجة لإقصاء اللون الأزرق من الضوء الأبيض أو الأقرب إلى الأبيض. ومِن ثَمَّ أنت ترى خطًّا أفقيًّا من اللون الأصفر يظهر على هيئة الساعة الرملية من الفرشاة. وترى الخط الرأسي أزرق اللون على هيئة المنطقتَين الزرقاوين على جانبي الساعة الرملية.

وإذا كان هذا التفسير كاملًا، فلن ترى المنطقتَين الزرقاوين عندما ترى الفرشاة في السماء أو في أي نطاق واسع من الضوء الأزرق الطاغي؛ لأنه لا يُمكن تمييز المناطق الزرقاء عن الخلفية. ومِن أجل استكمال التفسير، يجب أن نفترض أن المخ يرى اللون الأزرق «الإضافي» في هذه المناطق. ومن المفترض أن هذا «التلوين الذاتي» يُستثار باللون الأصفر الخاص بالساعة الرملية المُجاورة لهذه المناطق.

(٤٠) لون الظلال

في عام ١٨١٠، وصف يوهان فولفجانج فون جوته، أحد المستكشفين الرواد لمفهوم رؤية الألوان، التجربة التالية: «ضع شمعة قصيرة مضاءة في فترة الغروب على ورقة بيضاء، ثم ضع قلم رصاص في وضع قائم بينها وبين ضوء النهار المتضائل بحيث يبرز ظله الذي تلقي به الشمعة، ولكن لا يتلاشى أمام ضوء النهار الضعيف: سيظهر الظل بأروع لون أزرق على الإطلاق.»

يُمكنك أن تُجري هذه التجربة بطريقة مماثلة. في غرفة مظلمة، قم بتشغيل شاشة متصلة بجهازي عرض بيانات (بروجيكتور). أمام شعاع أحد الجهازين، ضع فلترًا ملوَّنًا؛ قطعة ورق سيلوفان حمراء مثلًا. ضع يدك أمامها بحيث تُلقي بظل صغير على الشاشة. وخارج حدود الظل تكون الشاشة ذات لون وردي لأنها مضاءة بضوء أحمر قادم من الجهاز الأول وضوء أبيض قادم من الجهاز الثاني. داخل الظل، من المفترض أن تكون الشاشة بيضاء اللون لأنَّ يدَكَ تحجب الضوء الأحمر القادم من الجهاز الأول ولا يُضيء الشاشة سوى الجهاز الثاني. ورغم ذلك، داخل الظل تكون الشاشة ملوَّنة بلون أخضر مزرق. لماذا تكون منطقة الظل ملونة؟

الجواب: سأشرح تجربة البروجيكتور محل النقاش هنا ولكني سأترك تجربة جوتة لتستكشفها بنفسك. الصور المتكوِّنة على الشاشة والظل الذي تصنعه يدك يثيران ثلاثة أنواع من الخلايا المخروطية المُستقبلة للضوء الموجودة في شبكية العين. فصورة الشاشة

ذات اللون الوردي تُحفِّز الخلايا المخروطية الحمراء بقوة وتحفز الخلايا المخروطية الخضراء والزرقاء على نحو أقل.

من المفترض أن تكون صورة الظل بيضاء اللون لأنَّ جهاز البروجيكتور الثاني، الذي لا يغطيه فلتر، يضيء منطقة الظل؛ ومِن ثَمَّ من المفترض أن تثير هذه الصورة جميع الخلايا المخروطية. ورغم ذلك فإن الخلايا المخروطية الحمراء المُحَفَّزة بفعل الشاشة الوردية تثبط الإشارة القادمة من الخلايا المخروطية المُحَفَّزة داخل صورة الظل. ويفسر الجهاز البصري هذا التثبيط على أنه إشارة باللون الأخضر المزرق، اللون المُكمِّل للون الأحمر. ولا تزال كيفية حدوث التثبيط وسبب رؤية اللون المكمل لغزين غامضين.

(٤١) عنصر السلامة في النظارات الشمسية

تُقلِّل النظارات الشمسية حدة وضوح الضوء والأشعة فوق البنفسجية النافذة إلى العين عن طريق امتصاص الضوء؛ إلا أن التعتيم يتسبب أيضًا في اتساع بؤبؤ العين. هل من الممكن أن ينفذ «المزيد» من الأشعة فوق البنفسجية إلى العين بسبب اتساع بؤبؤ العين ومِن ثَمَّ ينبغي عدم ارتداء النظارات الشمسية؟

لماذا كان السكان الأصليون في المنطقة المعروفة حاليًّا بكندا وألاسكا يُغطُّون أعينهم عادةً بقطعة من العظام أو الخشب مزودة بشقوق ضيقة لإتاحة الرؤية؟ لماذا يضع الرياضيون (لا سيما لاعبو كرة القدم الأمريكية) طلاءً أسود اللون أو شحمًا فوق وجناتهم عند اللعب في أشعة الشمس الساطعة؟

الجواب: تُقلِّل النظارات الشمسية صافي الأشعة فوق البنفسجية النافذة إلى العين رغم اتساع بؤبؤ العين. والنتيجة تستند إلى دراسة أُجريت على ٤٠٠ نوع من النظارات الشمسية، وحتى أرخص الأنواع تقلِّل صافي الأشعة فوق البنفسجية النافذة إلى العين.

سعى السكان الأصليون في كندا وألاسكا إلى تقليل الضوء الساطع الذي يواجهونه في الحقول المغطاة بالثلوج والجليد والمُضاءَة بنور ساطع. والشقوق التي ينظرون من خلالها لم تُقلِّل وضوح الضوء والأشعة فوق البنفسجية بدرجة كبيرة وحسب، بل الأشعة تحت الحمراء أيضًا، التي تتسبَّب في إرهاق العينين. ويُقلِّل الطلاء الأسود أو الشحم الذي يضعه اللاعبون على وجناتهم من انعكاس الضوء على وجناتهم إلى داخل أعينهم، وهو ما قد يُعيق رؤية اللاعب. والوهج المنعكس على الوجنات أمر مزعج بشدة عندما تتصبَّب

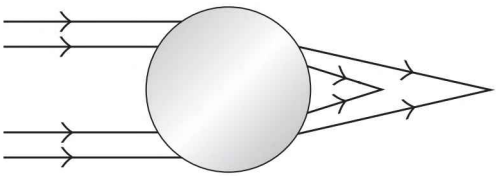
الوجنة بالعرق، وعندما تُقام المباراة تحت أشعة الشمس الحارقة أثناء النهار أو تحت الأضواء الساطعة في المساء.

(٤٢) عدسة عين السمكة

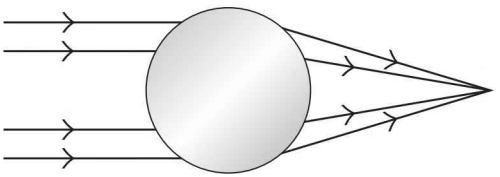
نحن البشر نرى لأنَّ العين تَثني (أو تَكسِر) شعاع الضوء بحيث يُكوِّن صورة واضحة عند شبكية العين. ويحدث نحو ثلثي هذا الانثناء عند السطح المنحني للقرنية؛ وباقي الانثناء يحدث عند مرور الشعاع عبْر عدسة العين الموجودة خلف القرنية تقريبًا. أما السمك فمختلف عنا؛ لأن عينَيه مغمورتان أسفل الماء، الذي يتمتَّع بنفس الخصائص البصرية للعين، والعدسة وحدها تستطيع أن تثني شعاع الضوء. علاوةً على ذلك، نظرًا لأن العدسة يجب أن تَثني شعاع الضوء بزاوية حادة لتركز هذا الشعاع خلفها مباشرةً، تنحو العدسة لأن تكون كروية. إلا أنه يحدث «زيغ كروي» للعدسة الكروية؛ لأن الشعاع يمر عبْر الفتحة الخارجية بزاوية كبيرة عند سطح العدسة، لدرجة أنه ينثني بدرجة كبيرة. ينفذ شعاع الضوء المار على امتداد المحور الرئيسي للعدسة بزوايا أصغر؛ ومِن ثمَّ ينثني بدرجة أقل بكثير. والنتيجة هي أن الشعاع يتركز في نطاق واسع خلف العدسة؛ ومِن ثمَّ لا ينتج صورة واضحة (شكل ٧-٧أ). في الواقع، العدسة الكروية في عين السمكة لا بد أن تجعل السمكة عمياء تمامًا؟ إذن، كيف ترى السمكة؟

الجواب: تتوقف درجة انثناء شعاع الضوء النافذ إلى داخل عدسة العين والخارج منها على تغيُّر معامل الانكسار في مادة الوسط. فإذا مر الشعاع خلال مزيج من الماء والبروتين في جزء كبير من العين إلى عدسة ذات معامل انكسار كبير، ينحو الشعاع إلى الانثناء كثيرًا. وإذا كانت العدسة ذات معامل انكسار أصغر، فإن الشعاع ينثني على نحو أقل. والعدسة الموجودة في عين السمكة ليس لها قيمة واحدة لمعامل الانكسار؛ وإنما تحظى بمُعامل انكسار كبير على طول المحور الرئيسي ومعامل انكسار أصغر نحو الحد الخارجي. والنتيجة هي أن التركيز على طول المحور الرئيسي والتركيز عند الحد الخارجي ينتجان صورة عند الموضع نفسه خلف العدسة (شكل ٧-٧ب).

وبهذه الطريقة تستطيع السمكة أن ترى. ويُعزى تفاوت معامل الانكسار، الذي يُطلَق عليه «معامل الانكسار المتدرِّج»، إلى تفاوت مزيج الماء والبروتين في العين. ويُمكنك أن تكتشف تفاوت المزيج من خلال فحص عين سمكة طازجة أو مَطهوَّة؛ حيث يكون النسيج أكثر صلابة بالقرب من المحور الرئيسي.



(أ)



(ب)

شكل ٧-٧: بند ٧-٤٢: تركيز شعاع الضوء عبْر عدسة كروية الشكل (أ) ذات معامل انكسار موحَّد و(ب) ذات معامل انكسار متدرج.

تتمتع عدسة العين البشرية بمعامل انكسار مُتدرِّج أيضًا (يتفاوت من القيم الأكبر إلى القيم الأصغر نحو الحد الخارجي). ورغم ذلك، ونظرًا لأننا نعيش في الهواء وليس الماء، تصحح العين البشرية الزيغ الكروي بالأساس عند سطح القرنية، والقرنية ليست كروية ولكنها تتَّخذ هذا الشكل لمعادلة الزيغ الكروي.

ويستعين سرطان حدوة الحصان بمعامل الانكسار المتدرج، ولكن بطريقة معقَّدة أكثر؛ إذ يَمتلك عينين مركبتَين تتكون كل عين منهما من عدة عدسات شفافة، لكل عدسة سطح أملس مستوٍ. ينفذ الضوء عبْر العدسة ليصل إلى الجهاز البصري في نهاية القناة. من المفترض أن يُقلِّل الافتقار إلى سطح مُنحَنٍ من إمكانية تكوين صورة، إلا أن وراء كل عدسة تتكون صورة. على طول خط وسط القناة (الممتدة من الأمام إلى الخلف)، تكون قيمة معامل الانكسار عالية، وبالقرب من جدران القناة تنخفض قيمة معامل الانكسار. ومِن ثَمَّ ينثني شعاعُ الضوء المارُّ بالقرب من مركز العدسة أكثر من الشعاع المار بالقرب من الجدران. والانثناء غير المُتساوي يجبر شعاع الضوء أن يتقاطع بعضه مع بعض ليُكوِّن صورة خلف القناة.

(٤٣) عنصر العمق في اللافتات ذات اللونين الأحمر والأزرق

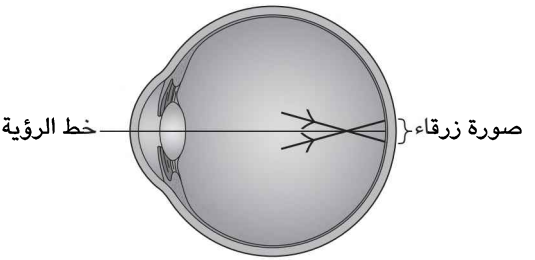
تحت الإضاءة الساطعة، تظهر الأجزاء الحمراء في اللافتة ذات اللونين الأحمر والأزرق أمام الأجزاء الزرقاء المُجاورة. وتحت الإضاءة الخافتة، يَحدث العكس. ما تفسير الخدعة البصرية المرتبطة بعنصر العمق وسبب حدوث العكس تحت الإضاءة الخافتة؟

الجواب: أولًا: تخيَّل أنك ترى ثلاثة أجسام أمامك على بُعد مسافات مختلفة. إذا ركزت على الجسم الأوسط، تُكَوِّن كل عين صورة واضحة له عند نقطة تقاطع خط الرؤية وشبكية العين. يُكوِّن الجسم البعيد صورة ضبابية عند شبكية العين أقرب إلى الأنف بعض الشيء من الصورة الشديدة التركيز. ويُكوِّن الجسم القريب صورة ضبابية عند شبكية العين أقرب إلى الصدغ بعض الشيء من الصورة الشديدة التركيز. يقارن المخ أماكن هاتَين الصورتين ويَعزو المسافات الصحيحة إلى الأجسام التي تُكوِّن هذه الصور.

وتُفسِّر مقارنة مشابهة بين الصورتَين الخدعة البصرية لعنصر العمق في اللافتات ذات اللونين الأحمر والأزرق. هب أنك رأيت تحت الإضاءة الساطعة نقطتين متجاورتَين؛ واحدة حمراء اللون والأخرى زرقاء. ينفذ شعاع الضوء المنبعث من النقطتين إلى داخل العينَين ويَنكسر (ينثني) ليُكوِّن صورتَين عند شبكية العين. ورغم ذلك، ينثني الشعاع الأزرق على نحو أكثر من الشعاع الأحمر؛ ومِن ثَمَّ لا يُمكن أن تكون النقطتان في بؤرة تركيز شديدة في آنٍ واحد. هب أنك تنظر مباشرةً إلى النقطة الحمراء وتركز عليها. هكذا، تتكون صورة لها في كلتا العينَين عند نقطة تقاطع خط الرؤية وشبكية العين. وتُكوِّن النقطة الزرقاء صورة ضبابية أكبر عند شبكية العين (شكل ٧-٨).

وعنصر العمق الذي يُضاف إلى هاتَين الصورتين يتوقَّف على الموقع الذي تتكوَّن عنده الصورة في شبكية العين نسبةً إلى خطِّ الرؤية. عادةً لا يمرُّ خط الرؤية عبْر مركز بؤبؤ العين. وتحت الإضاءة الساطعة، يكون خطُّ الرؤية عند مركز بؤبؤ العين من الجانب المُجاوِر للأنف. وبهذه الطريقة يُزاح مركز الصورة الضبابية للنقطة الزرقاء قليلًا نحو الأنف بعيدًا عن خطِّ الرؤية. ومن واقع إدراك المخ لعنصر العمق، فإنه يرى هذه الصورة باعتبارها صورة لجِسم (النقطة الزرقاء) أبعد من الجسم الذي يُكوِّن صورة واضحة عند خط الرؤية (النقطة الحمراء). ومِن ثَمَّ ترى النقطة الزرقاء أبعد من النقطة الحمراء.

وفي الإضاءة الخافتة، يتَّسع بؤبؤ العين وينتقل خط الرؤية إلى مركز بؤبؤ العين في الجانب المُجاور إلى الصدغ. وهذه الإضاءة تزيح الصورة الضبابية الخاصة بالنقطة



شكل ٧-٨: بند ٧-٤٣: عندما تركز العين على النقطة الحمراء بشدة، فإنها تركز النقطة الزرقاء أمام الشبكية.

الزرقاء عبْر شبكية العين إلى أن يقع مركزها بالقرب من الصدغ بعيدًا عن خط الرؤية. ويفسر مخك هذا الموضع الجديد على أن النقطة الزرقاء أقرب من النقطة الحمراء.

ويُمكنك أن ترى العمق في الخرائط ذات الرموز اللونية الحمراء والزرقاء إذا كنت تنظر إلى الخريطة بعدسة محدَّبة كبيرة، كعدسة مكبِّرة كبيرة. هنا يحدث الفصل بين اللونَين داخل العدسة المحدبة؛ لأن الضوء الأزرق ينكسر على نحو أكبر من الضوء الأحمر.

(٤٤) قوسا بيركينجي الزرقاوان

في الهواء الطلق في ليلة ظلماء، لاحظ عالم الوظائف يوهانس بيركينجي أن جمرة صغيرة أظهرت قوسين زرقاوين في مجال رؤيته. وعلى الرغم من أنهما تلاشيا سريعًا، فإنه لم يستطع أن يحدثهما مرةً أخرى من خلال هزِّ الجمرة.

ولكي ترى القوسين، اتبع هذا الإجراء: أغلق نور الغرفة لمدة دقيقتين. ثم افتح عينًا واحدة فقط، وأشعل ضوءًا أحمر صغيرًا. أفضل مصدر للضوء هو مُستطيل صغير لا يشغل زاوية مساحتها أكبر من ٠,٢٥ درجة من مجال رؤيتك. وبهذه العين المفتوحة، من المفترض أن ترى قوسًا أو ثقبًا باهتًا أزرق اللون لمدة ثانية تقريبًا. يتوقف شكل القوس على المكان الذي ينبعث منه الضوء الأحمر في مجال رؤيتك. ولكي تُظهِر القوس مرة أخرى، أضئ نور الغرفة لمدة دقيقتين تقريبًا ثم كرِّر العملية مرة أخرى.

يُمكنك أيضًا رؤية قوسين باهتين مباشرةً بعد إغلاق الضوء المُحفِّز. وفي كلتا الحالتَين، إذا أتحت لعينك الاعتياد تمامًا على الظلام، يكون لون القوسَين رماديًّا (عديم لون).

لماذا يظهر القوس أو الثُّقب، ولماذا يتوقف شكل المنطقة الزرقاء على موضع الضوء المُحفِّز في مجال رؤيتك؟ كيف يُمكن لضوء مُحفِّز صغير أن يصنع قوسًا يمتد عبْر منطقة شاسعة إلى حد ما من مجال رؤيتك؟ لماذا يكون القوسان ذوَا لون أزرق عندما تعتاد العين الضوء جزئيًّا ولكن يصبح لونهما رماديًّا حين تعتاد الظلام تمامًا؟

الجواب: عندما تتكون صورة الضوء الأحمر داخل شبكية العين، ينشِّط الضوء الخلايا المخروطية المسئولة عن التعرف على هذا الضوء. تقع المسارات العصبية المنبثقة من تلك الخلايا المخروطية بجوار المسارات المرتبطة بالخلايا العصوية الموجودة في مكان آخر من شبكية العين. ومِن الواضح أن إثارة المسارات العصبية للخلايا المخروطية يُحفِّز مسارات الخلايا العصوية، ويُوهم المخ بأن يظن أن الخلايا العصوية مضاءةً أيضًا. ونظرًا لأن هذه الخلايا العصوية منتشرة في قوس عند شبكية العين، يرى المخُّ قوسًا مضاءً.

يكون لون القوسَين أزرق إذا كانت بعض الخلايا المخروطية لا تزال ترسل إشارات باللون الأصفر إلى المخ بسبب التعرض المسبق لنور الغرفة. ويتطور إدراك للون الأزرق على النحو التالي: الضوء الأحمر المُحفِّز ينشط الخلايا المخروطية؛ حيث تَتكوَّن صورة للضوء عند شبكية العين. والمسارات العصبية المتصلة بهذه الخلايا المخروطية؛ تنشط المسارات العصبية المتصلة بالخلايا العصوية الموجودة في شكل القوس الملحوظ. وهذه المسارات العصبية العصوية تُثبِّط الإشارة الخاصة باللون الأصفر التي ترسلها الخلايا المخروطية على طول ذلك القوس.

ويُقال إن اللونين الأصفر والأزرق هما «لونان متقابلان» لأنه عند تثبيط رسالة اللون الأصفر، يرى المخ اللون الأزرق؛ ومِن ثَمَّ عندما تثبط المسارات العصبية للخلايا العصوية رسالة اللون الأصفر الآتية من الخلايا المخروطية الموجودة في القوس، يرى المخ القوس باللون الأزرق. وفيما بعد عندما تصير الخلايا المخروطية خاملة (بمعنى أنها تعتاد الظلام)، لا تجد الخلايا العصوية أيَّ رسائل لتُثبِّطها؛ ومِن ثمَّ يكون القوس ذا لون رمادي.

(٤٥) بُقْعَةُ ماكسويل

انظر إلى ورقة بيضاء عبْر فلتر أصفر اللون. ثم استبدل سريعًا فلترًا أزرق بالفلتر الأصفر. ربما ترى للحظة بقعة ماكسويل، وهي عبارة عن بقعة صغيرة داكنة أو صفراء اللون تظهر عند خط الرؤية الخاص بك. يُمكنك أن تستخدم فلترين ملوَّنين آخرين بشرط

أن يُمرِّر الفلتر الثاني الضوء الأزرق بقدر أكبر من الفلتر الأول. ما سبب ظهور بقعة ماكسويل؟

الجواب: يَرجع أحد تفسيرات بُقعة ماكسويل إلى أن الخلايا العصوية المُستقبلة للضوء تعوق المعلومات الخاصة بالألوان التي تُرسلها الخلايا المخروطية إلى المخ. عندما ترى الورقة البيضاء لأول مرة عبْر الفلتر الأصفر فإن الضوء الأصفر، الذي ينفذ إلى داخل العين، يُنَشِّط الخلايا المخروطية وباقي الجهاز البصري المسئول عن التعرُّف على اللون الأصفر.

وبعد استخدام الفلتر الأزرق مباشرةً، تظل تلك الخلايا المخروطية نشطة. ومع نفاذ الضوء الأزرق إلى داخل العين، ترسل الخلايا المخروطية الأخرى إشارات خاصة باللون الأزرق إلى المخ. ورغم ذلك، تستجيب الخلايا العصوية للون الأزرق أيضًا (أكثر من استجابتها إلى اللون الأصفر). ورغم أنها لا تستطيع إرسال إشارات خاصة بالألوان إلى المخ (إذ إنها لا ترسل إلا الإشارات الخاصة بدرجة السطوع فقط)، فإن نشاطها قد يُثبِّط الإشارة الخاصة باللون الأصفر الآتية من الخلايا المخروطية التي ما زالت نَشِطة بسبب التعرض السابق للضوء الأصفر.

ويُقال إن اللونين الأصفر والأزرق هما «لونان متقابلان»؛ لأنه عند تثبيط الرسالة الخاصة باللون الأصفر، يرى المخ اللون الأزرق. ومِن ثَمَّ عندما تُثبِّط المسارات العصبية للخلايا العصوية رسالة اللون الأصفر الآتية من الخلايا المخروطية، يرى المخ اللون الأزرق. ونظرًا لأنه يستقبل إشارة باللون الأزرق من الخلايا المخروطية الأخرى المُنشَّطة بالضوء الأزرق النافذ إلى العينَين الآن، يبدو الضوء الأزرق أكثر سطوعًا مما هو عليه في الحقيقة.

ونظرًا لعدم وجود خلايا عصوية في النقرة المركزية (حيث يتقاطَع خط الرؤية مع شبكية العين)، لا يتمُّ تمييز اللون الأزرق الساطع في تلك المنطقة. وبالمقارنة مع باقي أجزاء شبكية العين، تبدو النقرة المركزية صفراء اللون بسبب تقابُل اللونين الأزرق والأصفر في دائرة تمييز الألوان. وهذا التلون للنقرة المركزية هو ما يُسمَّى ببقعة ماكسويل.

(٤٦) المثيرات البصرية الناجمة عن الإشعاع

أثناء الوجود في الفضاء السحيق، أفاد رواد الفضاء — الذين اعتادت أعينهم الظلام — برؤية ومضات ضوئية على هيئة نقاط أو نجوم أو نجوم مزدوَجة أو ومضات ضوئية قد تملأ جزءًا كبيرًا من مجال الرؤية. تظهر الأشكال بسبب الأشعة الكونية النافذة إلى

عيون رواد الفضاء (والأشعة الكونية عبارة عن جسيمات، ذات سرعة عالية عادةً، تنشأ في الفضاء الخارجي).

شوهدت أشكال مشابهة في معامل الأبحاث عندما وجهت جسيمات سريعة مباشرة إلى عين الشخص الخاضع للتجربة. كيف تصنع الجسيمات هذه الأشكال؟ هل تصطدم مباشرة بالخلايا المستقبلة للضوء الموجودة في شبكية العين، مجبرةً إياها على بعث الإشارات إلى المخ، أم هل تخلق ضوءًا داخل العين تعترضه الخلايا المستقبلة للضوء؟ هل يستطيع مُتسلِّقو الجبال أو ركاب الطائرات رؤية هذه الأشكال على ارتفاعات شاهقة؟

الجواب: ربما تنشأ الأشكال التي يراها رواد الفضاء من الضوء الناتج عن الجسيمات ذات سرعة فائقة عندما تمرُّ عبْر الجسم الزجاجي (وهو عبارة عن مادة شفافة تملأ مُقلة العين) وشبكية العين. وسرعة الجسيمات تفوق سرعة الضوء الفعلية داخل العين. (تقلُّ سرعة الضوء بسبب تفاعلها مع الجزيئات الموجودة في الجسم الزجاجي.) وقد تتكون «موجة صادمة» للضوء (يُطلق عليها «إشعاع شيرينكوف») في الجسم الزجاجي وتستشعرها الخلايا المستقبلة للضوء الموجودة في شبكية العين.

لوحظت هذه الأشكال الضوئية في تجارب أُجريت على الميوونات ذات السرعة العالية (وهي جسيمات شبيهة بالإلكترونات) التي وُجِّهَت إلى عين الشخص الخاضع للتجربة. تستطيع الجسيمات (حتى البطيء منها) أن تُكوِّن أشكالًا بصرية عندما تصطدم مباشرة بالخلايا المستقبلة للضوء في شبكية العين. وتنشأ نوعية أخرى من الأشكال من الأشعة السينية (أشعة إكس)؛ إذ يرى المراقب فيضًا ضوئيًّا موحدًا بدلًا من النبضات الضوئية المتفرِّقة التي وصفها رواد الفضاء. ولم يُصرِّح أحد برؤية أيٍّ من هذه الأشكال أثناء ركوب الطائرة، حتى على ارتفاعات شاهقة ودوائر عرض مرتفعة للمسارات الجوية القطبية التي تتضمَّن التعرض للإشعاع لدرجة تتطلب وجود أجهزة مُستشعرة للإشعاع.

(٤٧) الضوء الأحمر في لوحات التحكم

في المساء، لماذا تُضيء لوحة التحكم الموجودة في مقصورة قيادة السفينة بضوء أحمر قانٍ؛ وهو أقصى درجات اللون الأحمر الموجودة في الطيف المرئي؟

الجواب: على الرغم من أن الخلايا المخروطية المستقبلة للضوء لا تؤدِّي وظيفتها على نحو جيد في الضوء الخافت، فإن الخلايا العصوية تستطيع أن تتعرف على هذا الضوء. ورغم ذلك، لكي ترى في ضوء خافت، عليك أن تُتيح للخلايا العصوية الاعتياد على

الأجواء المعتمة؛ بمعنى أن تُغلق الأنوار لمدة عشر دقائق على الأقل. حينئذٍ، ستكون الخلايا أكثر حساسية لمصدر الضوء الخافت. ونظرًا لأن الخلايا العصوية لا تنشط بفعل أقصى درجات الضوء الأحمر الموجودة في الطيف المرئي، فإن لوحات التحكم تُضيء عمومًا بمثل هذا الضوء في المساء؛ فعندما تنظر إلى لوحة التحكم، تُضيء الخلايا المخروطية، إلا أن الخلايا العصوية تُعتم ومِن ثَمَّ تكون متأهِّبة عندما تتولى المراقبة في ليلة مظلمة.

(٤٨) قدرة سوبرمان على الرؤية بالأشعة السينية

وفقًا للحكايات، يستطيع سوبرمان أن يرى عبْر جدار مُصمت من خلال إصدار الأشعة السينية من عينَيه. دعنا نتجاهل السؤال المعقَّد بكل وضوح والمتعلِّق بكيفية انبعاث الأشعة السينية من العينين. وبدلًا من ذلك، دعنا نركز على سؤال أسهل: هل يُمكن تمييز شيء ما على الجانب الآخر من الجدار باستخدام الأشعة السينية؟

الجواب: إذا كان سوبرمان يريد أن يعترض سبيل أشعة مرتدَّة من جانب شخصية شريرة مثلًا تقف عند الجانب الآخر من حائط، فسيتعيَّن على الشرير أن يَعكِس الأشعة. ولكن هذا يعني أنه يجب أن يعكس الجدار الأشعة أيضًا. قد تقول إن أيَّ مادة قد تنقل الأشعة أو تعكسها جزئيًّا. ومِن ثَمَّ، قد يَخترق جزء من الأشعة الجدار؛ وجزء بسيط من الأشعة يَنعكِس من الشرير، وفي النهاية قد يصل قدر ضئيل من الأشعة المُتبقية إلى سوبرمان بعد أن تنفذ عبْر الجدار. والمشكلة هي أن الأشعة المُتبقية قد تكون ضئيلة للغاية لدرجة أنه قد يُخفيها وهج الأشعة المنعكسة من الجدار وجميع الأجسام الواقعة خلف الشرير. وحتى إذا كان بإمكان سوبرمان أن يعالج الأشعة في ذهنه ويكوِّن صورة للشرير، فلا يزال أمامنا المشكلة التالية: كيف تمتصُّ عينا سوبرمان الأشعة إذا كانت ستنعكس وتنتقل بسرعة بالغة؟ (أعرف أنه ينبغي قراءة قصص المغامرات المصورة، لا تحليلها ودراستها.)

(٤٩) خدعة الألعاب النارية

عند إطلاق وهج الألعاب النارية إلى أعلى مباشرةً في ليلة هادئة مظلمة، من المفترض أن ينتشر الحطام المشتعل الناجم عن الانفجار بشكل أفقي ومنتظم. لماذا إذن يبدو الحطام متجهًا نحوك عمومًا؟

الجواب: هذه الخدعة البصرية لم تُفسَّر بالتفصيل. ورغم ذلك، لعلك تُخمِّن أن التجربة الواقعية تهيِّئ الأجواء للخدعة البصرية، فحين تنظر فعليًّا إلى كل جسم (ثلاثي الأبعاد)، ترى تفاصيل الجانب القريب، ونادرًا ما ترى تفاصيل الجانب البعيد. ومِن ثَمَّ في الليلة المظلمة ومع غياب أيِّ دلائل على العمق (مثل وجود سُحُب في الخلفية)، فإن الظهور الممتدَّ للحطام المشتعل سيُفسَّر على أنه تفاصيل خاصة بالجانب القريب لجسم مُتمدِّد غير مرئي.

(٥٠) النظر إلى السقف

استلقِ على ظهرك في منتصف غرفة ذات سقف معلَّق وإطار للباب. إذا نظرت إلى السقف في اتجاه قدمَيك، يبدو السقف المعلق وإطار الباب في وضعهما الطبيعي. ولكن إذا قمت بإمالة رأسك إلى الوراء بحيث تَنظر إلى الجانب المُقابل من السقف، فسيَنتابك إحساس غريب بأنك تنظر إلى أسفل نحو السقف، كما لو أن بإمكانك أن تَسير عليه. سيبدو مصباح السقف في تلك الغرفة وكأنه ينبثق إلى أعلى نحوك، وسيبدو إطار الباب كعائق يتعيَّن عليك تخطيه. ما سبب هذه الخدعة البصرية؟ هل تراها إذا كنت تنظر إلى السقف أثناء وقوفك على رأسك؟

الجواب: البحث المنشور عن هذه الخدعة البصرية يُشير إلى أنك حين تستلقي على ظهرك، ينعكس لديك الاتجاهان، الأعلى والأسفل؛ لأنك تفتقد الدلائل الطبيعية من الجاذبية بخصوص الاتجاه إلى أعلى والاتجاه إلى أسفل. وبطبيعة الحال، المنطقة المقلوبة إلى أسفل تكون في النصف السُّفلي من مجال رؤيتك والمنطقة الموجودة في الأعلى تكون في النصف العلوي من مجال رؤيتك. وإذا عكست في مخيلتك الجزء العلوي مكان السُّفلي عندما تستلقي على ظهرك، يكون السقف نحو قدمَيك في الجزء السفلي من مجال رؤيتك ويبدو كما لو أنه متجه إلى «أعلى»، والجانب المعاكس من السقف يكون في النصف العلوي من المجال ويبدو أنه متجه إلى «أسفل». وهذه الخدعة البصرية لا تظهر إذا وقفت على رأسك؛ لأنه يكون لديك حينئذٍ دلائل قوية من الجاذبية بخصوص ما هو متَّجه لأعلى ولأسفل.

هنـــداوي