# روعة الكيمياء

## العلم المذهل للأشياء المألوفة

كاثي كوب ومونتي إل فيترولف

# روعة الكيمياء

## العلم المذهل للأشياء المألوفة

**تأليف**
**كاثي كوب ومونتي إل فيترولف**

ترجمة
فايقة جرجس حنا

مراجعة
محمد صبري أحمد عبد المطلب
محمد محمود محمد أبو علي

هنـــداوي

# روعة الكيمياء

# The Joy of Chemistry

كاثي كوب
ومونتي إل فيترولف

Cathy Cobb
and Monty L. Fetterolf

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

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، 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: إيهاب سالم

الترقيم الدولي: ٧ ٠٠١٨ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٠٥.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٠٩.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر بروميثيوس، إحدى مطبوعات مجموعة ذا روان أند ليتلفيلد بابلشينج جروب، إنك.

Translated from the English Language edition of The Joy of Chemistry: The Amazing Science of Familiar Things, by Cathy Cobb and Monty Fetterolf, originally published by Prometheus, an imprint of The Rowman & Littlefield Publishing Group, Inc., Lanham, MD, USA. Copyright © 2005 by the authors. Translated into and published in the Arabic language by arrangement with Rowman & Littlefield Publishing Group, Inc. All Rights Reserved.

# المحتويات


| | |
|---|---|
| شكر وتقدير | ٩ |
| لماذا هذا الكتاب؟ | ١٣ |
| تصدير | ١٥ |
| كلمات قليلة وضرورية بشأن الأمان والسلامة | ١٧ |
| قائمة المشتريات والمحاليل | ٢١ |
| نظرة على وحدات القياس | ٢٩ |
| تَجرِبة تمهيدية: صاروخ الزجاجة والأوبليك | ٣٣ |
| مقدمة | ٣٩ |
| **الباب الأول** | ٤٥ |
| مقدمة | ٤٧ |
| تجربة ١: الساحرة والماء | ٤٩ |
| ١- الإلكترونات والذرات، أو الفيلة والبراغيث | ٥١ |
| تجربة ٢: النحاس واللصوص | ٥٩ |
| ٢- تحدث دوريًّا | ٦٣ |
| تجربة ٣: كيمياء منضبطة | ٨٥ |
| ٣- الأسباب، والتفاعلات، والأكسدة والاختزال | ٨٧ |
| تجربة ٤: دليل الكرنب الأحمر | ٩٥ |
| ٤- المواد القاعدية | ٩٩ |
| تجربة ٥: النقطة الزرقاء والحبر الأسود | ١٠٩ |

٥- شركاء الكيمياء: من يقوم بماذا لمصلحة من؟ ١١١
تجربة ٦: الرابطة. الرابطة الكيميائية ١٢٣
٦- الرابط الذي يربط الكيماويات التي تترابط ١٢٧
تجربة ٧: كيمياء الأحجار الكريمة ١٣٩
٧- الالتزام بالمبادئ ١٤٣
تجربة ٨: طبقة فوق طبقة ١٥١
٨- التزلق والانزلاق من منظور القوى البينجزيئية ١٥٥
تجربة ٩: التركيز على اللون – الكوكتيل المالح ١٦٧
٩- التركيز على كونهما وحدهما معًا ١٦٩
تجربة ١٠: سحق زجاجة المياه الغازية ١٧٧
١٠- إنه غاز ١٧٩
تجربة ١١: إنه في الهواء ١٨٧
١١- عندما تُوضَع الغازات في الأجواء ١٩١
تجربة ١٢: كيف تنمو حديقتك؟ ٢٠٣
١٢- كيمياء البلورات النقية ٢٠٥
تجربة ١٣: الكمادات الساخنة والباردة ٢٢١
١٣- عندما تُسخَّن المواد ٢٢٣
تجربة ١٤: الثلج المعزول ٢٣٥
١٤- طور جديد تمامًا ٢٣٧
تجربة ١٥: عندما تتكافأ جميع الأشياء ٢٥٥
١٥- الاتزان الكيميائي: الكيمياء الثنائية الاتجاهات ٢٥٩
تجربة ١٦: موانع التجمد وموانع الغليان ٢٧١
١٦- الخصائص الترابطية: القوة في الأعداد ٢٧٧
تجربة ١٧: لمزيد من الإثارة ٢٨٥
١٧- الحركية الكيميائية: انفجار حقيقي ٢٨٩
تجربة ١٨: كيمياء الضوء الأسود، وكيمياء المشابك ٢٩٩
١٨- الإلكترونات والفوتونات: أنِر الضوء ٣٠٣

**الباب الثاني** ٣١٣
مقدمة ٣١٥
تجربة الكيمياء العضوية: من أسبرين إلى حامض ٣١٩
١- عضوية ليس إلا ٣٢٥
تجربة الكيمياء غير العضوية: أنتروبيا، وأمونيا، وأميبا ٣٣٧
٢- صخور الكيمياء ٣٣٩
تجربة الكيمياء الحيوية: دهون، وانتفاخ البطن، وحساء البقوليات ٣٥١
٣- الكيان الكيميائي في مقابلة مع كيمياء الجسم ٣٥٣
تجربة الكيمياء التحليلية: الدليل في بصمات الأصابع ٣٦٥
٤- الكيميائي محللًا ٣٦٩
تجربة للمستقبل: كيمياء خزانة الأدوية ٣٨٣
٥- هاري، وهوجوارتس، ودستور الأدوية العامة؛ غموض في الماضي وسحر في المستقبل ٣٨٥
خاتمة ٣٩٣
الملحق ٣٩٥
حقوق الصور ٤١١
ملاحظات ٤١٣

# شكر وتقدير

إننا في غاية الامتنانِ لزميلنا دكتور جاك جي جولد سميث؛ لمراجعته الشاملة واقتراحاته الرائعة. نشكرك بشدة يا جاك لجُودك علينا بوقتك، ولمساعدتك إيانا كثيرًا. نُوجِّه شكرنا أيضًا لفرانشيسكا باتارو لقراءتها الجمل الطويلة، وإسدائها النصائحَ لنا برفق حول كيفية اختصارها، ومساعدتها لأولادنا بينما كان آباؤهم منهمكين في العمل. ونتقدم بخالص الشكر إلى دكتور كوب وزوجته لتحلِّيهما بالصبر على قراءة عدد كبير من الأوراق، ولتقديمهما — كما اعتدنا منهما — الملاحظاتِ والاقتراحات التي اتسمت بالمعرفة المستبصِرة. ونشكر جودي ديلي على تعليقاتها الممتازة والمتبصرة، كما نشكر ليندا ريجن التي منحَتنا كالمعتاد إرشاداتها التي لولاها ما كان هذا الكتاب ليرى النور.

نشكر هيثر أمرمولر، وكريس كرامر وكل فريق الإنتاج بدار نشر بروميثيوس، ونقول لهم إن مساعدتهم الكريمة والودودة ونصائحهم قد صنعَت الفارق بحق.

ونود أن نتقدم بشكر خاص إلى أولادنا ماثيو، وبنجامين، ودانيل فيتيرولف لاستعدادهم أن يعيشوا في منزل يمتلئ أحيانًا بالروائح المنبعثة من التجارِب، وآباء مضطرِبين ومهتاجين كثيرًا، وأكوام من الأوراق في مكان من المفترض أنه غرفة معيشة، ونقول لهم إنهم قد ساعدوا في إجراء التجارِب وتقديم الأفكار والرسومات، والتدخل لحل المعضلات إلى جانب صبرهم الواضح، ونحن نحبكم من أجل كل هذا ومن أجل أشياء أخرى كثيرة.

ونود أن نُوجه الشكر لأصدقائنا وزملائنا في مدرسة أيكن الإعدادية، وجامعة ساوث كارولينا أيكن؛ لتعضيدهم وتشجيعهم، ونُعبر عن خالص امتناننا للورا باكون من مدرسة كيندي ميدل سكول؛ لتعريفها إيانا بالأوبليك، ونشكر أيضًا العاملين في متجر ترو فاليو هاردوير الموجود في مدينة أيكن الذين وإن لم تَتسنَّ لهم معرفة كيفية تقديم المساعدة في

إنجاز كتاب في الكيمياء، فإننا لم نكن لنستطيع إنجازه لولا العددُ الوفير من السلع المتوفرة لديهم، إلى جانب استعدادهم الكريم لتلبية مطالبنا الغريبة كافَّة.

نود أن نشكر طلابنا الذين كانوا متفتحين لمناقشة الكثير من المسائل، ونشكر جوان مورتون وليندا ميوز؛ لكونهما أفضل الشركاء والأصدقاء.

ونحن نُهْدي هذا العمل — مع خالص حبنا — إلى نيدا جو فيتيرولف، نموذج القوة والمرح والشجاعة.

هاك الأعمى المتسول يرقص، والأعرج مُنشدًا،
السكِّير بطل، والمجنون على عرش الملك جالسًا،
الكيميائي المتضور جوعًا في آرائه الذهبية،
وهو يُبارك بشدة الشاعرَ وربَّة قصائده الشعرية.

ألكسندر بوب في
«مقالة عن الإنسان»، ١٧٣٤

رؤية كوكبٍ عبر تليسكوب تَعدِل في قيمتها كلَّ هذا المقرر في عِلم الفلَك؛ والصدمة التي تُحدِثها شرارة كهربائية في كوعك تفوق في قيمتها كل النظريات؛ وشمُّك رائحةَ أكسيد النيتروز ورؤيتك نيران البركان الصناعي أفضل من كل مجلدات الكيمياء.

رالف والدو إيمرسون في
«مقالات: السلسلة الثانية»، ١٨٤٤

# لماذا هذا الكتاب؟

نجد كتب الكيمياء عادةً في واحدة من فئتَين؛ إما كتب دراسية، وإما كتب للأطفال، وهي تستهدف في جوهرها القارئَ العادي، وثَمة أعمالٌ رائعة تصدَّت لهذا العيب، ومن أهم هذه الأعمال كتاب «وصلات الكيمياء: الأسس الكيميائية للظواهر اليومية» تأليف كيري كيه كاروكستيس وجيرالد آر فان هيكه، وكتاب «الجنِّي الذي في الزجاجة» لجو سكواركز.[1] ومع ذلك فقد رأينا أن نُدلِيَ بدلوِنا في هذا المقام مؤمنين بأننا سوف نُقدِّم منهجًا به بعض الاختلاف الطفيف عمَّا سبقه من مناهج. ولقد حاولنا أن نكتب الكيمياء بطريقة مبسَّطة؛ فهذا الكتاب هو كتاب كيمياء موجَّه لمن يُريد دراسة الكيمياء نظريًّا؛ كي يقرأه بإمعان وهو جالسٌ في منزله مستريحًا، ويضم بين دفَّتَيه أيضًا تَجارِبَ عملية مباشرة يُمكن تنفيذها في المطبخ أو في المَرْأب. وما دعانا إلى كتابة هذا الكتاب هو أنه من نوعية الكتب نفسِها التي أحببناها عندما استهللنا دراستنا للكيمياء، وقد كتَب كيميائيون هذا الكتاب، لكنه لم يُكتَب للكيميائيين خاصة؛ فقد كُتِب للطلاب الذين اعتدنا أن نَكُونَهم، وللدارس الموجود داخل كلٍّ منا، ونتمنى أن يتمتع القارئ بالصفحات التالية تمامًا كما تمتعنا نحن بكتابتها.

# تصدير

إنني في مستهل خطواتي لدراسة الكيمياء وهي دراسة غاية في التفرد، لم أرَ في حياتي شيئًا مثلها من قبل قطُّ، والمواد المستخدَمة فيها هي الجُزَيئات والذرات، وسوف أُناقشها بصورة أكثرَ تحديدًا الشهرَ القادم.

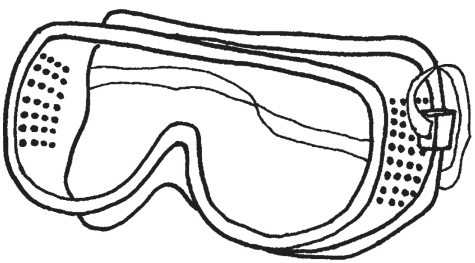
الكاتبة جين ويبستر في رواية
«صاحب الظل الطويل»، ١٩١٢

قد يصعب عند تناول الوضع الحاليِّ للمجتمع الغربي أن نُصدِّق أن الجنس والطهي كانا يومًا ما من المواضيع التي يجري تناولها بحذر بالغ، لكن عندما كتبَت إيرما رومبور كتابها «روعة الطهي» عام ١٩٣١، وكذا أليكس كومفورت كتابه «روعة الجنس» عام ١٩٧٢، فإنهما بذلك كانا يتناولان شواغلَ مجتمعية غاية في الواقعية. ويوضح كتاب إيرما ما يدور في المطبخ، أما كتاب كومفورت فهو يُزيل الالتباسَ بشأنِ ما يحدثُ في المَخادع، وبالمِثل ينظر البعض للكيمياء على أنها أمرٌ مزعج؛ ومن ثَم ربما يكون قد حان الوقت الآن لاكتشافِ روعة الكيمياء.

سوف نكتشف عبر هذه الصفحات السحرَ المتأصِّل في الكيمياء؛ من الافتتان بسقوط أوراق الأشجار والألعاب النارية، إلى أداء كاشف الدُّخان وأداء أجهزة الحاسوب، وكذا أساسيات الهضم والاحتراق. ولسوف نُوضح هذه المبادئَ عن طريق التجارِب العِلمية بأنفُسنا باستخدام مواد في متناول الأيدي، ولا يتطلَّب الأمر ضرورة توافر المختبرات والآلات الحاسبة؛ للتمتع بجمال الكيمياء، فالمفاهيم يمكن شرحها في ضوء خبرات الحياة اليومية وباستخدام المواد التي في متناول يدَيك.

وغالبًا ما يُطلَق على الكيمياء العلمُ المركزي؛ لأنها تقَع في لب فَهمنا للعالم المادي والحيوي وفي مركز مخاوفنا العامة في كل المجالات، بدءًا من الطِّب ومرورًا بالسياسة ووصولًا إلى الاقتصاد؛ ومن ثَم ينبغي أن ترنَّ أصداءُ مبادئ الكيمياء في مفاهيمنا وخبراتنا. ومن المُمكن أن تكون الكيمياءُ علمًا غاية في الأُلفة يُناجي حَدْسَنا وعقولنا وحسَّنا بالمتعة أيضًا، إذا كنا مستعدين أن نترك أنفسَنا له بلا قيود، وغرضُنا هنا هو أن نتناول ملذَّات الكيمياء ونكشف القليل عن السيارات والكون، وحتى عن الجرائم.

# كلمات قليلة وضرورية بشأن الأمان والسلامة



فيما كنتُ أقرأ كتابًا عن الكيمياء استوقفتني عبارة: «تأثيرات حامض النيتريك على النُّحاس» ... لقد رأيت زجاجة على الطاولة مكتوبًا عليها حامض النيتريك ... كنت أرغب في أن أُضحِّي بأحد السِّنتات النُّحاسية القليلة التي كانت في جَعْبتي حينذاك ...

تكوَّنت بعض الرَّغاوَى والدخان الأزرق المُخضَر فوق السنت والطاولة، وقد تلوَّن الهواء القريب مني وقتها باللون الأحمر الداكن، ثم تصاعدَت سحابة ملونة كبيرة. ثم التقطتُ عُملتي متعلمًا حقيقةً أخرى؛ هي أن حامض النيتريك لا يُؤثر

فحسب على النحاس، ولكن على أصابعي أيضًا، ثم مسحت أصابعي في سراويلي مكتشفًا حقيقةً أخرى هي أن حامض النيتريك يُؤثر أيضًا على سراويلي.

عالم الكيمياء الأمريكي إيرا رامسن في كتابه
«سنواتي المائة الأولى»، ١٩٧٠

لقد تأصلَت الأسبقية للكتب التي تتحدث عن الكيمياء المنزلية تمام التأصل، ولكن يجب علينا بادئَ بدءٍ مناقشةُ الأمان والسلامة.[1] صحيح أننا جميعًا هنا بالِغون وعاقلون ومسئولون، وكذلك كانت الشخصية البطولية صاحبة الاقتباس السابق أيضًا؛ ومن ثَم قد لا تضر بعض الكلمات القليلة والضرورية حول السلامة. يُقدِّم كتاب روعة الطهي نصيحة عن حفظ الأطعمة، ويُقدم روعة الجنس تحذيرًا من الأمراض، إذن ما الذي يَمنع أن يكون للكيمياء تحذيراتُها أيضًا؟ فالطهو والكيمياء والجنس يتشاركون بعض المخاطر للأشياء التي لا تحظى بالوقاية والإعداد، لنستعرض الأساسيات:

إذا لم يكن لديك نظارة من نظارات الأمان الواقية، اذهب إلى متجر بيع النظارات الآن واشترِ واحدة وارتدِها وأنت تُؤدي التجارِب الموجودة في هذا الكتاب.

اقرأ تحذيرات الأمان المتضمنة في التجارِب، واتبعها بحذافيرها.

قاوم الإلحاح الذي يحضُّك على أن تكون مبدعًا؛ فقد يُسبِّب الخلطُ العشوائي للكيماويات المنزلية بعضَ الخمائر ذات الروائح الكريهة جدًّا، فلا تخلط أبدًا النشادر مع مواد التبييض!

ابتعد تمامَ الابتعادِ عن المصادر التي يُمكِن أن تُسبب الاشتعال، وقد تتعجَّب عندما تعلم أن الهواتف الخلوية وغيرَها من الأجهزة الكهربائية من هذه المصادر.

صُبَّ المخلفات في المرحاض، وليس في حوض المطبخ أو حوض الحمام.

استخدم الحدَّ الأدنى من المقادير؛ فالفرق بين الضجة المدوية والفرقعة البسيطة هو فرقٌ في المقدار.

اعرِف المكان الذي يوجد به أقربُ صنبور ومِطْفأة حريق وهاتف، وهي أشياء ينبغي أن تكون مُلمًّا بها على أية حال، فالأغراض المنزلية المستخدمة المعتادة لها كمٌّ من المخاطر يدعو إلى الوعي بهذه التحذيرات.

احفظ كل شيء بعيدًا عن متناول الأطفال؛ فهذه الكيمياء موضوعةٌ من أجل البالغين، وأيضًا بعيدًا عن الحيوانات الأليفة بمنزلك.

سوف نُوجِّهك لاستخدام بعض أدوات المطبخ في الكثير من التجارِب، لكن هذا لا يعني أن الكيماويات غيرُ سامة. استخدم أدواتٍ بلاستيكيةً وأطباقًا ورقية بقدر الإمكان (سوف يُقال لك متى تُستخدَم الأدوات الزجاجية فقط)، وتخلَّصْ من الأدوات الورقية والبلاستيكية بعد الاستخدام. حتى الأطباق الورقية الرخيصة الثمن يمكن استخدامها في أكثرَ من تجرِبة إذا كانت تُغطيها طبقة بلاستيكية رقيقة. وإذا كان عليك أن تستخدم أدواتِ مطبخ زجاجيةً أو خزفية، اغسلها جيدًا بمَعزِل عن باقي أدوات المطبخ الأخرى، قبل أن تعزم على أن تستخدمها مرةً أخرى لأغراض الطعام، أو يُحبَّذ أن تحتفظ بمجموعةٍ منفصلةٍ مخصصة للتجارِب الكيميائية. وغالبًا سوف تقوم بمعظم التجارِب في القَبْو أو المطبخ أو الحمام، لكن عليك أن تحفظ المواد الكيميائية بمَنأًى عن فرش الأسنان وأدوات الطعام، أو الأوعية التي تتصل بالطعام أو فرش الأسنان، يُمكنك أن تُغطي أوعيتك بأوراق الجرائد لمزيد من الحماية.

وتختلف أفران الميكروويف عن الأفران العادية؛ لذا عليك أن تتعامل مع أوقات الميكروويف المُعْطاة لك في التجرِبة بالتقريب. حاول أن تعرف جيدًا الميكروويف الخاص بك، واستخدم القفاز لإزالة الأشياء الساخنة. ويُمكن أيضًا للميكروويف أن يُسخن الأشياء على نحو غير منتظم؛ لذلك كن مُدركًا أن المحلول الذي يجري تسخينه قد يكون عند درجة الغليان دون أن ترى فقاقيع؛ لذا عندما تكون غير متأكد، انتظر دقيقة بعد فتح الباب واستخدم القفاز، وكالمعتاد كن واثقًا من عدم إدخال أي معادن في الميكروويف مثل الملاعق مع المواد المفترض دخولها فيه. هذه كيمياء وليست طبخًا، لكن هذا لا يُغير طبيعة الميكروويف. وأي شرارة ناتجة قد تكون مثيرة، ولكنها خطيرة، ويُمكن أن تُدمر الميكروويف بسهولة.

وقد اختِيرَت الإجراءات الكيميائية المقدمة هنا بعناية لتمنحك أكبر قدر من المتعة، وتُجنبك أية مخاطر، لكن من فضلك لا تفترض أن هذا واقعُ كل التفاعلات أو كل التجارِب الكيميائية. مرة أخرى أود أن أُؤكد على أنه من الأفضل ترك التجريب للكيميائيين المحترفين، والتجارب الأكثر تعقيدًا لهؤلاء المتدربين على التجارِب الكيميائية.

ولا تستخدم أيًّا من المواد الكيميائية التي نحن بصددها في عمل لبخة أو لبوس، أو في أي شيء آخر اعتاد الناس أن يفعلوه في الماضي أو في الحاضر. ولا تأكل أيًّا من المواد الكيميائية المستخدَمة في هذه التجارِب أو تشربها أو تستحمَّ بها أو تضعها على عينَيك تحت أي ظرف من الظروف. ولا تُعرضها للهب أو لأي شرر (إلا إذا كان هذا جزءًا من التجرِبة).

احمِ ملابسك أو ارتدِ ملابس قديمة. احمِ يدَيك عن طريق ارتداء قفازَيْن من المطاط عند الإمساك بالمواد الكيميائية وارتداء القفازات التي تُستعمَل في الحدائق عند الإمساك بالصوف الفولاذي. عامِلْ جميع الكيماويات المذكورة في هذا الكتاب كما تُعامل مبيِّضات الغسيل والبنزين والمبيدات الحشرية والأشياء الأخرى التي تعرف أنها خطيرة.

بعبارة أخرى، اتبع نفس التحذيرات المذكورة في أية مجموعة كيمياء موضوعة خِصِّيصَى للأطفال. يجب عليك أن تَشتريَ مثل هذه المجموعة الكيميائية، وقد تقول إنها من أجل أولادك، أو يُمكنك شراؤها عبر البريد الإلكتروني. وتحوي العُبُوَّة الكيميائية نظاراتِ الأمانِ الواقيةَ التي تحتاجها، والقليلَ من المواد الكيميائية، مع شرح للقليل من التجارِب. وهي لا تخوض في شرح عميق، وهو ما نُقدمه نحن هنا، ولكنها قد تكون مسلية وقد تُوفِّر عليك بعض الرحلات إلى متجرِ بيع الأدوات.

# قائمة المشتريات والمحاليل

**قائمة المشتريات**

تُدرَج هنا قائمة بالمكونات التي سوف تُستخدَم في التجارِب، ويُمكن شراء معظمها من متجر بيع الأدوات أو من السوبر ماركت، أو إذا لم تجدها في بلدك فيُمكنك شراؤها عبر الإنترنت:

- شريط لاصق.
- حجر الشبة (يتوافر بقسم التوابل في السوبر ماركت).

- رقائق الألنيوم.
- سلك الألنيوم (يتوافر في متجر بيع الأدوات المعدنية).
- النشادر (يتوافر في قسم الأدوات المنزلية أو المنظفات).
- أقراص مُسكِّنة لآلام المعدة، ومجموعة من الفوارات.
- محلول مُخفِّض لقلوية ماء حوض السمك يحوي حامض الكبريتيك، وقد يحوي الماء أيضًا باعتبارهما مُكونَيه الأساسيَّين (على الأقل ثلاث زجاجات سعة كلٍّ منها سبعة وثلاثون مليلترًا).
- عبوة اختبار قلوية ماء حوض السمك (ويُذكَر الماء العذب في قائمة المشتريات باسم بروموثيمول الأزرق).
- أسبرين.
- بيكربونات الصودا (وليس بيكينج بودر).
- بالونات.
- قضيب مغناطيسي (صغير).
- حقنة شرجية.
- مصباح ضوء أسود (ضوء غير مرئي) ومثبَّت.
- مادة تبييض (في قسم الأدوات المنزلية).
- شموع.
- زيت الكانولا.
- طباشير.
- حامض الستريك (ويُباع كملح حامض في محل تذوُّق الأطعمة أو يُمكن شراؤه عبر الإنترنت).
- كربونات الصودا النقية (غالبًا ما تفي صودا الليمون بالغرض).
- مشابك غسيل (من البلاستيك أو الخشب).
- علَّاقة ملابس (من المعدن أو البلاستيك).
- مغسلة غاز نُحاسيَّة وهي شبكة من النُّحاس (ويمكن أن تتوافر في متجر الأدوات المعدنية أو السوبر ماركت).
- سلك نُحاسي يبلغ طوله قدَمَين على الأقل (٦٠سم)، ويُفضَّل أن يكون غير معزول، ولكن يمكن استخدام المعزول أيضًا.

- فلين مطاط أو طبيعي، يُستخدم كسدادة زجاجة صودا بلاستيكية سَعَتها عشرون أوقية (٥٩٠مل).
- دقيق ذرة.
- ضرب من الجبن الأبيض (يُشترى حسب الحاجة).
- زبدة الطِّرْطير (تتوافر عادةً في قسم المخبوزات أو مع التوابل في السوبر ماركت).
- بطارية خلايا دي D وحامل بطارية (ولا يُشترَط وجود الحامل).
- قطارة ذات انتفاخ انضغاطي.
- مزيل لطلاء الأظافر (نوع يحوي مادة الأسيتون).
- قفَّازات مرنة (النوع المستخدم لحماية الأيدي أثناء غسل الأواني أو عند استخدام المنظفات المنزلية؛ مقبول لكنه لا يتناسب مع الأيدي؛ فعادة لا يأخذ شكل اليد؛ لذا يُفضَّل القفازات الطبية، وهي تتوافر في الصيدليات).
- ألوان طعام (يُفضَّل القطرات السائلة وليس الجل القابل للعصر).
- مساميرُ مطلية بالخارصين (تتوافر في متجر الأدوات).
- القفازات التي تُستخدَم في الحديقة (المصنوعة من الأقمشة السميكة أو الجلد).
- وسيلة هضم مقللة للغازات (النوع الذي يُتناوَل قبل الوجبات لتقليل غازات الأمعاء).
- جلسرين (ويُسمَّى أيضًا جليسرول من الصيدلية).
- فوق أكسيد الهيدروجين.
- أعواد ثقاب.
- ليمون.
- زهرة سائلة.
- اللي وهو محلول يُستخدَم في صناعة الصابون (عادة ما يُباع كمنظف مُجفف لكن لا تشترِ النوع الذي يحوي فِلزَّ الألنيوم).
- شريط لاصق عريض، وقلم تمييز ثابت.
- ملعقتان معدنيتان (يمكن الاستغناء عنهما بعد الاستعمال).
- لبن كامل الدسم (غير مقشود أو بنسبة ٢٪، والشراء حسب الحاجة).
- زيت معدني.
- موتزريلا (أصلية ومقلدة، والشراء حسب الحاجة).

- مشبك ورق معدني.
- أطباق ورقية مطلية.
- ورق حمام.
- المزيد من ورق الحمام.
- أكياس بلاستيكية (ذات أطراف لاصقة، أحجام كبيرة وصغيرة).
- أكواب بلاستيكية (شفافة ويمكن الاستغناء عنها بعد الاستعمال).
- قمع بلاستيكي.
- زجاجات صودا بلاستيكية (شفافة وسَعتها عشرون أوقيَّة سائلة (٥٩٠ مليلترًا)، أحضر على الأقل عشر زجاجات).
- زجاجات صودا بلاستيكية (سعتها ٦٧,٦ أونسًا (٢ لتر)).
- ملاعق بلاستيكية.
- رقائق لف بلاستيكية.
- كرنب أحمر (يمكن تقطيعه وتجميده إلى الدرجة المراد الوصول إليها).
- كحول الأيزوبروبيل.
- نظارة أمان (ويُمكن شراؤها من مركز علمي أو تعليمي، أو من متجر الخردوات).
- ملح صخري ويُسمَّى أيضًا نترات الصوديوم (يمكن شراؤه من السوبر ماركت أو من محل متخصص).
- برطمانات بلاستيكية بأغطيتها (ويمكن أن يُغني عنها زجاجات المياه التي سعتها نصف باينت (يُعادل نصف لتر تقريبًا)).
- أوعية بلاستيكية شفافة صغيرة لاستخدامها كأنابيب اختبار أو استخدام أنابيب اختبار فعلية (يمكن شراؤها من مركز علمي أو تعليمي).
- أكواب عصير صغيرة (ثلاثة أو أربعة).
- قطعة إسفنج (طبيعية أو صناعية).
- مسامير صلب.
- صوف فولاذي (درجة ناعمة).
- ماصات.
- غراء ممتاز (النوع الذي يحوي سيانواكريلات).
- عبوة اختبار قلوية ماء حمام السباحة (وينبغي أن تقول في قائمة المكونات «فينول أحمر»).

- ملح طعام.
- سكر.
- أكواب شرب طويلة (ثلاثة أو أربعة).
- أكياس شاي داكن.
- ترمومتر يتدرج حتى ٢٢٠ فِهْرنهايت على الأقل (١٠٥ درجات سيليزية) (يُمكن استخدام ترمومترات اللحوم).
- نسبة ضئيلة من صبغة اليود.
- خل.
- فولتميتر (قادر على قياس جهد التيار المستمر في المجال من ١ إلى ٣ فولت).
- لبن كامل الدسم.
- أعواد ثقاب خشبية.

**المحاليل**

(١) كبريتات النحاس.

«تحذير: يتصاعد بعض الدخان أثناء إعداد هذا المحلول؛ لذا يُمكِنك أن تعمل في مكان مفتوح كما لو كنت تُعِد مادة مذيبة أو ورنيشًا أو مادة مُخفِّفة للدهان، والدخان الذي يتصاعد هو لمركبات النيتروجين والأوكسجين مثل تلك الموجودة في الضباب الدخاني.»

(أ) ارتدِ نظارة الأمان الواقية. إذا كان لديك شبكة سلك نُحاسيَّة من تلك التي تُستخدَم في تنظيف الأوعية المنزلية، فاستخدمها بدلًا من سلك النحاس، أما إذا لم يكن لديك، فأزِلِ الطبقة العازلة من على عشر بوصات (٣٠سم) من سلك النُّحاس إذا كان معزولًا (أما إذا كان غيرَ معزول فاستعمِله كما هو)، ولُفَّه بحيث يكون مسطحًا في قاع الكوب البلاستيك الذي يُمكن أن يسَع على الأقل كوبَين (سَعة كلٍّ منهما ٥٠٠ مليلتر) من السائل. إذا كنت ستقطع السلك النُّحاسي لكي تُزيل العزل منه، فإن الأمر سيكون مناسبًا فالسلك يُمكن أن يكون في شكل قطع صغيرة بحيث يكون مجموع أطوالها يقترب من العشر بوصات (٣٠سم). إذا استخدمتَ شبكة سلك نُحاسية من تلك التي تُستخدَم في تنظيف الأوعية المنزلية، فضَع شبكة السلك في قاع الكوب الذي يُمكن أن يكون مصنوعًا من البلاستيك الشفاف أو من الزجاج الشفاف، ولكن مهما كانت المادة التي صُنِع منها الكوب فإنه لا يجب أن يُعاد استخدامه للشرب.

(ب) أضف نحو أربعِ ملاعق شاي بلاستيكية (ما يقرب من ٨ جرامات) من بِلَّورات المِلح الصخري (نترات الصوديوم)، ثم قلِّبه ليذوب. غطِّ الكوب بغِطاء بلاستيك غير مُحكَم وضعه جانبًا. ينبغي أن يكون المحلولُ جاهزًا في خلال ما يَقرُب من اثنتَي عشْرةَ ساعة. سيكون التفاعل بطيئًا، ومع ذلك يُمكنك أن تَلْحظ حدوثه في انسياب الفقاقيع الصغيرة المتدفقة من سطح النُّحاس. إذا سارت الأمور على ما يُرام، يكون لون المحلول شديدَ الزرقة، ويترسَّب النُّحاس وبِلَّورات من نترات الصوديوم في قاع الكوب.

(ج) صُبَّ السائل الأزرق عبر القمع البلاستيكي في زجاجة بلاستيكية لها غِطاء، وراعِ ألَّا تصبَّ معها المترسِّبَ من البِلَّورات والنُّحاس. اترك المترسب من البِلَّورات والنُّحاس في الكوب. قد تكون في حاجةٍ إلى استخدام القفاز؛ لأن المحلول لا يَزال حامضيًّا وأنت تُريد أن تتجنب وصوله إلى يدك، وإذا جاء على يدك، فاغسلها جيدًا بالماء.

(د) غطِّ الزجاجة وضَع عليها بطاقة لتكتب التاريخ واسمك وعبارة «كبريتات النحاس في حامض الكبريتيك»، ثم أضف هذا التحذير على الزجاجة: «احذر: مادة مسبِّبة للتآكل!» احفظ المحلولَ في درجة حرارة الغرفة في مكان آمن، بعيدًا عن متناول الأطفال والحيوانات الأليفة.

(هـ) لا تتخلَّص من أي نُحاس أو بِلَّورات غير ذائبة في قاع الكوب، ومن ثم عندما تحتاج إلى مزيد من محلول النحاس، يُمكنك ببساطةٍ أن تُعيد ملء الكأس بالمكونات من جديد.

(و) غطِّ الكأس بغلاف بلاستيكي، وضَع عليه بطاقةَ تسمية ثم غلِّفْها، وضعها في مكانٍ آمن، بعيدًا عن متناول الأطفال والحيوانات الألفية.

(٢) خلات الحديد.

(أ) ارتدِ نظارة الأمان الواقية. صبَّ كوبَين من الخل في كوب شفاف (يمكن أن يكون كوبًا بلاستيكيًّا لكن ليس بالضرورة). ارتدِ القفازات المستخدمة في أعمال الحدائق (لا بد من ارتدائها). انزع نحو بوصة مكعبة من الصوف الفولاذي الناعم، (وهو ما يُعادل تقريبًا ٢٠ مليلترًا)، ضع الصوف في الخل ثم غطِّ الكوب بغطاء بلاستيكي. اكتب على الكوب خلات الحديد، واسمك، وتاريخ اليوم. يكون المحلول قيد الاستخدام في اليوم التالي. احفظ المحلول والصوف بداخله؛ لأنه سوف يُستخدَم في تجرِبتَين.

(ب) احفظه في درجة حرارة الغرفة في مكان آمن، بعيدًا عن متناول الأطفال والحيوانات الأليفة.

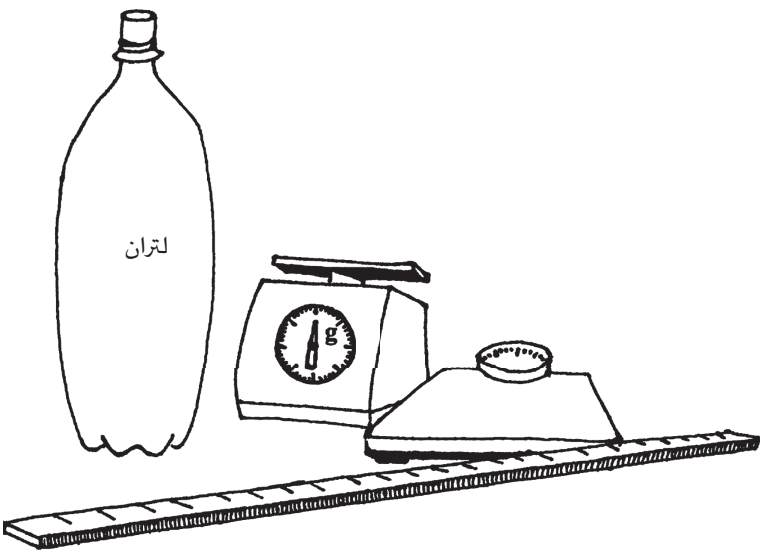
(٣) دليل الكرنب الأحمر.

(أ) ابشُرْ ما يقرب من نصف كوب من الكرنب الأحمر (١٢٠ مليلترًا)، ثم ضعه في علبة السندوتشات مع نصف كوب من الماء (١٢٠ مليلترًا). سخنهما في الميكروويف لما يقرب من ٣٠ ثانية. ينبغي أن تكون العلبة ومحتوياتها ساخنة للغاية، لكن ليست إلى درجة الغليان أو بالقرب منها. بعد التسخين ينبغي أن يأخذ الماء اللون الأرجواني الخفيف بسبب الكرنب، ومع العصر اليدوي الخفيف يمكن أن تزداد حُمرته.

(ب) تشتد الرائحة المنبعثة من المحلول الناتج وتستمر في التأجج. ولتجنُّبِ الروائح الكريهة الزائدة يُمكِن عمل القليل منه عند الحاجة فقط، أو تجميده إذا كان هناك مُتسَعٌ من الوقت، أو يُمكن عمله من البرقوق الأحمر الداكن إن وُجِد.

لكن الكيمياء يمكن أن تكون عملًا ذا رائحة كريهة!

# نظرة على وحدات القياس




يُفضَّل في القياس العلمي استخدامُ الوحدات المترية (الجرام والسنتيمتر والمليلتر)، المقابِلة للوحدات التقليدية (الأوقية والبوصة والكوب) المستخدَمةِ في الولايات المتحدة. ومع الجهود المحمومة التي تجري في الولايات المتحدة للاتجاه نحو استخدام الوحدات المترية في المعاملات اليومية فإن معظم الناس في الولايات المتحدة لا يزالون يستخدمون الوحدات التقليدية في الأغراض العامة. وسوف نستخدم على طول رحلتنا في هذا الكتاب الوحدات التقليدية

يعقبها المقابل لها من الوحدات المترية بالتقريب بين قوسَين. ولا شك أن الوحدات المترية مألوفة للكثيرين، إلا أنها في الوقت عينِه مجهولة للكثيرين أيضًا؛ لذا سنُقدِّم هنا مجموعة من المقارنات: خذ بعين الاعتبار أن السنتيمتر يعادل تقريبًا عرض مشبك أوراق صغير، والبنس يزن نحو جرامَين، والمتر أطول قليلًا من الياردة، والمليلتر (مقارب تمامًا) ربع ملعقة شاي. وضع أيضًا في اعتبارك أن الأوقية تُستخدم لقياس الكتلة، في حين تُستخدَم الأوقية السائلة لقياس الحجم، مما يُذكِّرنا بتعقيد وحدات القياس الأمريكية، من ثَم إذا كانت الوحدات المترية لا تزال غير مألوفة لديك، فلا تقلق؛ فأي شخص تَمكَّن من وحدات القياس الأمريكية بصعوبتها لن يكون لديه أيةُ مشكلة مع الوحدات المترية.

لذلك نُقدِّم فيما يلي بعض التحويلات المهمة التقريبية لوحدات القياس التقليدية الأمريكية والقياس المتري، وسنُقدِّم أيضًا في غضون التجارب وحدات القياس المترية التقريبية المقابلة لتلك الأمريكية.

- البوصة = ٢,٥سم.
- الكوارت = ٠,٩ لتر.
- الملعقة الكبيرة = ١٥ مليلترًا.
- الكوب = ٢٣٦,٧ مليلترًا.
- الرِّطل = ٠,٥ كيلوجرام.
- الأوقية = ٢٨,٤ جرامًا.
- الملعقة الصغيرة = ٥ مليلترات.
- الأوقية السائلة = ٢٩,٥ مليلترًا.

وسنتجنَّب الاختصاراتِ من أجل الإيضاح.

- كوب (ك).
- متر (م).
- رطل (رط).
- جرام (جم).
- مليلتر (مل).
- ملعقة الطعام (ملعقة ط).
- لتر (ل).

- أوقية (أق).
- ملعقة الشاي (ملعقة ش).

وعادة ما يستخدم العلماء مقياس درجة الحرارة المئوية، لكننا سنُورِد درجة الحرارة بكلا المِقياسَين؛ المئوي والفهرنهايتي التقليدي المستخدم في الولايات المتحدة، وسنُورد مقارنة لبعض مقاييس درجات الحرارة الشائعة:

| | درجة حرارة الغرفة | درجة غليان الماء | درجة تجمُّد الماء | درجة حرارة الجسم العادي |
|---|---|---|---|---|
| مقياس فهرنهايت | ٦٨° | ٢١٢° | ٣٢° | ٩٨٫٦° |
| مقياس سيليزيوس | ٢٠° | ١٠٠° | ٠° | ٣٧° |

# تَجرِبة تمهيدية:
# صاروخ الزجاجة والأوبليك

كانت وَجْنتهم تميل إلى الحُمرة كما لو كانوا تعرَّضوا للَهبِ موقدٍ شديد، وكانت أصواتهم تُدوِّي بنبرات مرتفعة، وكانت كلماتهم تتطاير مثل سدادة الشمبانيا المندفعة بحامض الكربونيك.

جول فيرن في كتابه «حول القمر»، ١٨٧٠

لنبدأ بفرقعة صاروخ الزجاجة:

ارتدِ نظارتك. اقطع من ورق الحمام قطعة عرضها نحو أربع بوصات وطولها من سبع إلى ثماني بوصات. خذ ملء ملعقة مستديرة من بيكربونات الصودا (ما يُعادل ملعقتَي شاي أو ١٠ ملليلترات) ثم انثرها بطول الورقة من المنتصف، واترك نحو بوصة أو اثنتَين من طرَف الورقة خاليتَين من الصودا. لفَّ بالطول كما لو كنت تلفُّ سيجارة. تأكد أن الصودا لا تلمس أطراف الورقة، وينبغي أن تكون اللفافة رفيعة بالقدر الذي يسمح بدخولها حتى آخر زجاجة الصودا البلاستيكية، وبعد أن تلفها مباشرة اثنِ أطرافها حتى لا ينفلتَ المسحوق من داخلها. وعندما تنتهي ينبغي أن يبدو شكل الورقة كسيجارةٍ أطرافها مثنية.

انزع البطاقة الخارجية لزجاجة صودا بلاستيكية سعتها عشرون أوقية سائلة (٥٩٠ مليلترًا) واغسلها من الخارج وأزل أي ماء زائد. أحضر سدادة محكمة تُناسب فتحة الزجاجة، وتأكد من أنها تسد الزجاجة دون الحاجة إلى ضغطها بقوة داخل الزجاجة. لمزيد من التأكد ضع بالونًا حول السدادة (من الأفضل أن تضع السدادة بداخل البالون). من ثَم يكون لديك سدادة مغطاة بطبقة من المطاط، وفوهة الزجاجة قد سُدَّت بإحكام شديد.

صب نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) من الخل ونصف كوب من الماء (١٢٠ مليلترًا) في زجاجة ثم رجها جيدًا لتخلطها معًا. يمكنك استخدام زجاجة صودا سعتها لتران إذا ضاعفت كمية الماء والخل. أضف دليل الكرنب الأحمر؛ لذا سيكون المحلول الناتج لونه وردي فاتح. لا تُضِف أكثر من ملعقة كبيرة.

اذهب إلى مكان يُفضَّل أن يكون مفتوحًا؛ بحيث لا تحدث مشكلة إذا اندفعت السدادة بقوة هائلة. ضع زجاجة الصودا التي تحوي الخل في المكان الذي اخترته، واسكب منها في الأنبوبة التي تحوي لفة بيكربونات الصودا المثنية ثم أغلق الزجاجة بسرعة وبإحكام. اجعل الزجاجة منتصبة فتندفع السدادة لأعلى في وضع عمودي في الهواء، وبعيدًا عن الأطفال والحيوانات والجيران، ثم ابتعد أنت. لا بد أن يتأخر ذلك لبضع ثوانٍ إلى أن يخترق محلول الخل الورقة، حينها سيكون هناك رَغاوى كثيرة وفرقعة كبيرة حيث ستندفع السدادة خارجًا. وعندئذٍ سيتغير لون المحلول في الزجاجة من الوردي إلى الأزرق أو البنفسجي (على حسب كمية بيكربونات الصودا المستخدَمة). وإذا بدا لك أن التفاعل أخذ في الخمول

بعد دقيقة بدلًا من دفع السدادة لأعلى، يمكنك عندئذٍ أن ترج الزجاجة أو أن تضغط على السدادة من أسفل لتُزحزحها قليلًا، فربما تكون قد انحشرت عند الفتحة، وقد يتطلب الأمر منك عدة محاولات لتُجرِيَه بطريقة صحيحة، لكن الأمر يستحق ذلك العناء.

والتفاعل الذي يدفع السدادة هو:

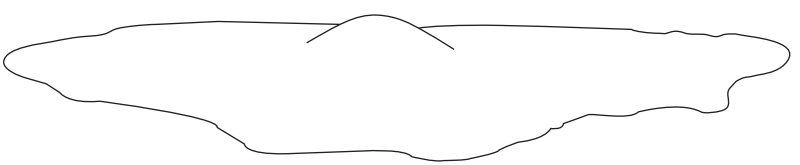
بيكربونات الصودا + خل ⟵ ثاني أكسيد الكربون + ماء

ولأن ثاني أكسيد الكربون غاز، فهو يميل إلى أن يشغل حيزًا أكبر من المحلول. ويمتلك الغاز المتمدد القوة الكافية لدفع السدادة من فوهة الزجاجة.

ويُعد تصاعد الغاز مؤشرًا جيدًا لحدوث تفاعل كيميائي، وكذا تغيُّر اللون الذي يُعتبر أيضًا مؤشرًا على حدوث التفاعل الكيميائي، إلا أنه في هذه الحالة، حدث التفاعل الكيميائي بدون دليل الكرنب الأحمر وبدون حدوث تغيير في اللون. وقد أُضيفَ دليل الكرنب الأحمر ليُوضِّح أن التفاعل هو تفاعل حامضي قاعدي، وهو أمر سوف نُناقشه فيما بعد.

ويُعتبر الملح الأساسي في أي تفاعل كيميائي هو أنك تبدأ التفاعل باستخدام مادة واحدة أو عدة موادَّ (سائل لاذع وردي اللون ومادة صُلبة مِلحية في حالتنا هذه) وتنتهي بنوع آخر من المواد (سائل مائي بنفسجي اللون وغاز). وثَم دلائلُ أخرى على حدوث التفاعل الكيميائي مثل تغيُّر درجة الحرارة، وانبعاث ضوء أو تَكوُّن مادة صُلبة تترسب من المحلول، وفي التجارِب التالية سوف نُشاهد كل هذا وأكثر، ولكن كي نفهم الطريقة التي تسير بها الأمور نحتاج إلى معرفة بعض الأسس التي تتعلَّق بالتركيب الأساسي للمادة، وهذا ما سنبدأ به.

لكن لنشرح هذا بعد تجرِبة واحدة أخرى، وهي تجربة «الضجيج من الأوبليك»:



ضع كوبًا (٢٤٠ مليلترًا) من دقيق الذرة النشوي في وعاء صغير وأضف ثلث كوب ماء (٨٠ مليلترًا). قلِّب باستخدام ملعقة معدنية (فالملعقة البلاستيكية قد تنكسر). سريعًا ما يُصبِح الخليط كثيفًا وصعب التقليب، لكن استمر في التقليب. تتوقف كمية دقيق الذرة

والماء المطلوبة بالضبط على نوع دقيق الذرة؛ لذا قد تحتاج إلى إضافة القليل من الماء أو من الذرة أيضًا، فأنت تحتاج أن تصل إلى عجينة لها تماسك الأسمنت المبلل، أو عجينة خبز الذرة أو أجفَّ قليلًا. ويُساعد التقليب السريع للخليط في عملية الخلط، وعندما تنتهي تكون قد حصلت على ما يُسميه مدرسو العلوم بالأوبليك، نسبة إلى كتاب دكتور سيوس «بارثولومو والأوبليك».[1]

حاول أن تضرب الأوبليك بقوة بالملعقة، ثم حاول أن تلتقطه بيدَيك. ستجد أنه يبدو صُلبًا عندما تلتقطه وتضغط عليه، ولكن إذا وضعته في كفك فسيبدو ذائبًا مثل الطين، ويُمكن أن ينصهر من بين أصابعك. وهذا هو قوام الأوبليك، فهو ليس صلبًا تمامًا أو سائلًا تمامًا؛ لأن دقيق الذرة يحبس الماء، مثل الإسفنج، لكن تركيب النشا أقلُّ صلابة؛ لذا يُمكنه أن يتدفق مع الماء المخلوط معه.

حاول أن تُكوِّر بيدَيك قطعة صغيرة من الأوبليك وتقذفها على الأرض. ينبغي أن ترتدَّ قليلًا ثم تضرب الأرض مُحدِثة ضجيجًا وبقعة مثل الطين. حاول أن تقطع الأوبليك بسكِّينة، فستجد أنه مثل الجبن شيئًا ما؛ إذ يميل إلى الصلابة عنه إلى السيولة. حاول أن تشد الأوبليك بسرعة ثم ببطء. عندما ينفصل الأوبليك بسرعة فإنه يكون أشبهَ بالقوام الصلب، وعندما يُشَد ببطءٍ يكون أشبه بالقوام السائل.

ومع أن خواصَّ الأوبليك تبدو مختلفة عن خواصِّ دقيق الذرة النشوي والماء الذي يتكون منهما، فإن تكوين مركب الأوبليك لا يُعتبَر تفاعلًا كيميائيًّا، فهو مجرد تغيير فيزيائي، فقد احتجز دقيق الذرة الماء، ويُمكن لك إزالة الماء منه بواسطة عملية بسيطة وهي أن تدَعَه يجف (وقد يستغرق هذا بضع ساعات). لقد تغيرَت الخواصُّ الفيزيائية لكلٍّ من دقيق الذرة والماء، لكن الخواص الكيميائية لا تزال كما هي دون تغيير.

ويُشبِه تغيير الخواص الفيزيائية تغييرَ المظهر الخارجي للإنسان، فتستطيع أن تحلق شعرك أو تُغير ملابسك لكنك في الأساس الشخص عينُه الذي كان موجودًا من البداية. ويمكن لك أن تُبطِل هذا التغيير بأن تدع شعرك ينمو مرة أخرى أو ترتديَ ملابسك السابقة مرة ثانية. وبالمثل يحدث التغيير الفيزيائي لمادة مثل الماء عن طريق غليها أو تجميدها أو تقسيمها إلى أكواب منفصلة. في حين أن التغيير الكيميائي هو تغيير جوهري؛ فالمادة تتحول إلى مادة أخرى، ويُفضي التغيير الكيميائي إلى مادة جديدة لها خواصُّ فيزيائية وكيميائية جديدة. تُمثِّل تَجرِبة صاروخ الزجاجة عملية تغيير كيميائي؛ لأن الخل

وبيكربونات الصودا قد تحوَّلا إلى موادَّ جديدة وهي ثاني أكسيد الكربون والماء، ولن تُعيد أي درجة من التجفيف بيكربونات الصودا.

ولأن معظم التغيرات الكيميائية يُصاحبها أيضًا تغيرات فيزيائية؛ سوف نناقش كِلتَيهما، لكن تركيزنا سينصبُّ على التغيرات الكيميائية، فكوننا كيميائيين يجعلنا بالطبع نُحب حدوث ضجيج، ولكن ما من شيء يُضاهي حدوث الفرقعة!

# مقدمة

# إنها تبدأ بفرقعة ... وضجيج

إنها الكيمياء يا أخي، الكيمياء! ما من شيء يُمكن أن نفعله حيالها، عليك أن تُفسح الطريق للكيمياء.

الروائي الروسي فيودور دوستويفسكي
«الإخوة كارمازوف»، ١٨٨٠

عليَّ أن أذهب إلى المختبر وأُمعِن النظر في بعض المواد من أحماض وأملاح وقلويات. لقد أحدث حامض الهيدروكلوريك ثقبًا كبيرًا بحجم الطبق في معطف المختبر من الأمام. إذا نجحت هذه النظرية فسأكون قادرًا على معالجة هذا الثقب بالنشادر القوي، أليس كذلك؟

جين ويبستر في رواية
«صاحب الظل الطويل»، ١٩١٢

بدأنا بهذَين الاقتباسَين لأنهما يعرضان مُلاحظتَين في غاية الأهمية؛ أولهما أنه إذا حكمنا على الأمور بعدد مراجع الكيمياء في الأدب الغربي في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، يتضح أن الثقافة الكيميائية كانت شائعة؛ فقد أظهر الكثيرون من المؤلفين الأوائل في الفترة من آرثر كونان دويل، وحتى إميلي ديكنسون؛ معرفةً وثيقة بمبادئ الكيمياء، وافترضوا وجود هذه المعرفة لدى قرائهم أيضًا. وللأسف، يتضاءل تَكرار مثل هذه التلميحات للكيمياء في الأدب المعاصر، الذي ربما يُعزَى إلى نقص الثقافة الكيميائية؛ سواءٌ من جانب المؤلفين أو من جانب القراء، ونحن نرى أن هذا الوضع يمكن تحسينه عن طريق إتاحة المزيد من الكيمياء حتى يتسنَّى للجميع الوصولُ إلى المعلومات الكيميائية، وهو الهدف من وراء هذا الكتاب.

ويوضح هذان الاقتباسان أيضًا انجذاب بعض الناس — في الماضي والحاضر — دون غيرهم إلى الكيمياء. لماذا هذا الاختلاف؟ أثَمة تنوُّع في خلايا المخ؟ أثمة جين كيميائي غير مكتشَفٍ بعد؟ ربما، لكن في الغالب لا وجود لمثل هذه الأمور، ولعلنا نجد تعليلًا أوضح في السِّيَر الذاتية المختصرة الآتية للفائزين بجائزة نوبل في الكيمياء التي شُغِفوا بها أشدَّ الشغف:

لينوس بولينج (١٩٠١–١٩٩٤) هو ابن لصيدلي من ولاية أوريجون الأمريكية وقد شارك أحد أصدقائه في استعمال مجموعة أدوات كيميائية عندما كان في الرابعة عشرة من عمره.[1]

ماريو مولينا (١٩٤٣–...) الذي تملَّكه القلق بشأن كيمياء الغلاف الجوي وقد حمله عمله لأن يجوب الكرة الأرضية، وقد ساعدَته عمته على أن يُقيم معملًا في الحمام في بيت طفولته في مكسيكوسيتي.[2]

دوروسي هودجكين (١٩١٠–١٩٩٤) كيميائية بريطانية لأب عالم آثار وأم عالمة نبات. قامت بإنماء البلَّورات وهي في العاشرة، مستخدمة مجموعة أدوات الاختبار الكيميائي للتربة.[3]

واستخدم العالم الأمريكي روبرت كارل (١٩٣٣–...) المولود في ولاية تكساس وهو صغير، المواد الكيميائية في العبوة الكيميائية التي أهداها إياه والداه في الكريسماس، وبعد أن استنفدها نجح في العثور على صيدلي متعاطف معه ليُعيد إمداده بالمواد نفسها، وقد أعاد والداه النظر في جدوى هذه الهدية حينما لاحظوا أنه يقوم بتغيير الغطاء المصنوع من الخزف الصيني الذي يُزين موقد والدته مع كل مخزون جديد من المواد الكيميائية.[4]

وليس هناك جينات مشتركة بين هؤلاء، لكن ربما يكون هناك بعض الخصال الأخرى المشتركة بينهم. وقد يبدو للمرء أن هؤلاء الكيميائيين (كالكثيرين غيرهم) قد اتخذوا الكيمياء وسيلة للتسلية في المقام الأول. أيعني هذا أنه لكي تقدِّر الكيمياء حقَّ قدرها وأنت بالغ، كان يجب عليك أن تختار والِدَين يُهدِيانك مجموعة كيمياء وأنت صغير؟ لا. لم يَفُت الأوان بعد لتتمتع بروعة الكيمياء. لقد اتسم كل من ذكَرناهم من الحاصلين على جائزة نوبل في الكيمياء وهم صغار بفضول عظيم، وإذا التقطت هذا الكتاب ستتمتع أنت أيضًا بهذا الفضول، وأملنا هو أن تُشبِع هذا الفضول. ونحن نفخر أن نُقدِّم لك في هذا الكتاب مجموعة كيميائية متكاملة واقعية للكبار مع التجارِب، لكن الفارق الكبير بين منهجنا ومنهج معظم الكتابات الكيميائية الأخرى هو أن النتائج مشروحة والتجارِب متكاملة من أجل توضيح وتفسير علم الكيمياء. وسنُقدِّم وصفًا للنتائج المتوقعة مع كل تجرِبة، بالإضافة إلى شرح المبادئ الموضحة؛ ومن ثَم يتسنَّى للقارئ أن يختار أن يتمتع بالكتاب دون أن يُجري كلَّ الإجراءات المعطاة أو أيها في التجارب، لكنه قد يصعب مقاومة إغراء المشاركة في المرح حيث تُسمع أصوات الفرقعة والأصوات المدوية الأخرى.

وقد يُفهَم ضمنيًّا أيضًا من السير الذاتية المختصرة السابقة أن الكيميائي الناجح ينبغي أن يكون لديه، وهو طفل، مرشد أو رفيق يُناقش معه فنون الكيمياء. أيعني هذا أنه ينبغي أن يكون لديك مجموعة حوار لتُقدِّر مبادئ الكيمياء؟ ليست بالضرورة؛ فقد قدَّمنا ضربًا من الصحبة الافتراضية في قسمٍ «على سبيل المثال» يُقدم مقالات لمواضيع وثيقة الصلة للنظرية الكيميائية التي تُناقَش، وقد ألحقنا هذا الجزء لنُساعد القارئ على القيام بعمليات ربط بديهية مع مفاهيم الكيمياء، وأن يمحو الفكرة القائلة بأن الكيمياء غيرُ موجودة بدرجةٍ ما في خبرات الحياة اليومية.

خُذ على سبيل المثال، خبراتنا البسيطة مع قيادة السيارات؛ ما علاقة الكيمياء بالسيارات؟ كما هو جلي، ثَم الكثير بين الكيمياء والسيارات.

## مثال تقديمي: الكيمياء والسيارات

سنُقدم طوال هذا الكتاب الكيمياء في مواقف متنوِّعة من أساليب الطهي وحتى طرق الكشف عن الجرائم، وسيصحبنا أول مثال في قسم الأمثلة، على سبيل المثال، في جولة سريعة حول موضوعات عدة سيجري تناولها في هذه الصفحات وتوضيحها باستخدام صورة للتكنولوجيا الحديثة، وهذه الصورة هي السيارة!

يتكون كتاب «روعة الكيمياء» من جزأَين: يعرض أولهما المبادئ الأساسية للكيمياء، في حين يدرس ثانيهما بعض المجالات المتخصصة في الكيمياء التي تُطبَّق فيها هذه المبادئ. ويُقدم الفصل الأول والثاني من الجزء الأول التركيبَ الذري، بصحبة أفضل صديق للكيميائي وهو الجدول الدوري. ويُحدد التركيبُ الذري كما يعكسه الجدول الدوري تركيبَ المركبات الكيميائية، مثل تلك التي تشترك في تكوين هيكل وطاقة مُحرِّك الاحتراق الداخلي الذي يعتمد على البنزين. ويتماثل نوع التفاعل المسئول عن تشغيل هذا المحرك مع نوع التفاعل الذي يوفر المعدن الذي يدخل في تركيبه تفاعلات الأكسدة والاختزال — التي سوف نتناولها في الفصل الثالث. وسنشرح الارتباط بين الكيمياء وعوادم السيارات

في الفصل الرابع الذي يُمعِن النظر في كيمياء الأحماض والقواعد. وسنختبر الكيمياء التي تسدُّ مُبرد (راديياتير) السيارة في الفصل الخامس لدى شرح تفاعلات الإزاحة. أما خواصُّ العديد من المواد التي تتكون منها السيارة فما هي إلا نتيجةٌ للروابط الكيميائية التي سوف نُناقشها في الفصل السادس. ويدور الفصل السابع حول التحكم في التفاعلات الكيميائية المختلفة التي تحدث داخل السيارة، والتي تَحكمها مبادئُ التفاعلات الكيميائية، وكذلك التنبؤ بنتائج هذه التفاعلات. وفي الفصل الثامن سنشرح خواصَّ شحوم التزييت المستخدمة في السيارات في ضوء القوى البينَجزيئية. ويدور الفصل التاسع حول تركيز المخاليط التي تُعنى بأنظمة مثل المخنقة والمبرد وحتى البطارية. أما في الفصلَين العاشر والحادي عشر فنتناول التفاعل الاحتراقي الذي يُحول الجازولين إلى غاز، وخواص الغاز التي تدفع المكبس حيث نِصفُ مرحلة الحالة الغازية للمادة والتفاعلات الخاصة بهذه المرحلة.

ويتناول الفصل الثاني عشرَ وصف الحالة الصلبة للمادة وكيمياء السطح، ويدخل في نطاقه الصابون والمركبات الخافضة للتوتر السطحي والمستخدمة في عمليات غسيل وتشميع السيارات. ويغوص الفصل الثالث عشر، الذي يدور حول موضوع الديناميكا الحرارية، في المبرِّدات التي تُديرها السيارات. ويتركز موضوع الفصل الرابعَ عشر حول كل المعادن؛ إذ يبحث في التغييرات المرحلية للمواد النقية وللمخاليط. وبعد قراءة الفصل الخامس عشر حيث يُناقَش التوازن الكيميائي، سيكون القارئ أكثرَ قدرةً على استيعاب سبب تحول كل الجازولين إلى غاز. ويُمكن تطبيق الخواص المترابطة للمحاليل الموضحة في الفصل السادس عشر على إذابة الجليد المتراكم على الطرق، واستخدام موانع التجمد في مبردات السيارات. ويرتبط علم الحركة الكيميائي بطقطقة المحرك والمحولات التحفيزية، وهذا ما سنتناوله في الفصل السابع عشر. وتُلقي مناقشة الكيمياء الضوئية والكيمياء الكهربية الضوءَ في الفصل الثامنَ عشر على طلاء السيارات، ثم الطِّلاء بالكروم في المرحلة الأخيرة من الطلاء.

وسوف نُلقي نظرة في الجزء الثاني من الكتاب على المجالات المتخصصة في الكيمياء، وسوف نرى أيضًا أن هذا المجال وثيق الصلة بالحياة اليومية، وبالقيادة اليومية للسيارات. ويتحدث الفصل الأول من الجزء الثاني عن الكيمياء العضويَّة التي عن طريقها يجري تحويل المزيج الغني بالبترول إلى بلاستيك وبوليمرات؛ بحيث يُمكن أن تُستخدَم في التجهيزات الداخلية للسيارات، إلى جانب صناعة العدد والخراطيم والإطارات. وتُواجه

الكيمياء العضوية اليوم تحديًا من نوع جديد، يتمثَّل في تطوير المواد المتماثلة من موادَّ خام جديدة؛ سواءٌ كانت هذه المواد كُتلًا حيوية، أو موادَّ أُعيدَ معالجتها؛ مما يُعَد تحديًا مثيرًا وشيقًا لعلماء الكيمياء المبدعين. وكما سنرى في الفصل الثاني من الجزء الثاني فإن علماء الكيمياء غيرِ العضوية لديهم عدد كبير من المواد في الجدول الدوري ليختاروا من بينها، وهم في ذلك يُواجهون تحدياتٍ عظيمةً. وسيُفضي أخذ أعمالهم بعين الاعتبار بنا إلى مناقشةٍ عن الفوائد التي يُمكن أن نجنيَها من خلايا الوقود في المستقبل، وكيفية عمل منظفات مبرد السيارة في الوقت الحالي.

وتتناول اهتمامات علماء الكيمياء الحيوية، كما هو مُسطَّر في الفصل الثالث من الجزء الثاني، أكثر العناصر خطورةً فيما يتصل بالسيارة وهو من يجلس أمام عجلة القيادة مباشرة ونعني به الإنسان، لكن المخاوف تنتابهم أيضًا بشأن مصادر المواد البديلة التي تُجنى من المحيط الحيوي والتحكم فيها. وندرس في الفصل الرابع من الجزء الثاني جهود الكيميائيين التحليليين، ونجد أن هذه النفوس الجسورة قد استمدَّت بعض الملامح من كل الأنظمة السابقِ وصفُها، وهذه هي وظيفة الكيميائيين التحليليين؛ أن تشهد بثبات وجودة الكثير من المواد بما فيها المواد المستخدمة في السيارات، وفي بعض المراحل تشهد بثبات وجودة الحياة البشرية، كما سنرى عندما ندرس إسهامات هذا المجال في كشف الجرائم تمامًا كإسهاماته في مجال السيارات. أما في الفصل الخامس فسنُحدِّق في كرتنا السحرية لنرى مستقبل الكيمياء، لنرى عالمًا مليئًا بالمصادر والمواد الجديدة، وبلا أدنى شك ستقود هذه الموادُّ الجديدة إلى اختراعات جديرة بالاعتبار، وبالطبع إلى سيارات جديدة!

أمستعدون؟ لنُزِح الستار ونرَ ...

# الباب الأول

# مقدمة

# النظريات والثمانيات الموسيقية والمقاييس

تُوصَف الكيمياء، شأنها في ذلك شأن الموسيقى والأدب، في ضوء عناصرها، وتحظى الكيمياء بنظرية تقوم على مبادئ أساسية. ومثل الموسيقى والأدب، ثَمة الكثيرُ من الكيمياء مما يُمكن النظر إليه باعتباره فنًّا أيضًا، ويُشبه النظرُ في الطبيعة النظرَ في المِرآة، ونحن نُفسر ما نراه في ضوء خبراتنا ومن منظورنا الخاص، وتُمثل مبادئ الكيمياء محاولة لرسم نظام معتمِد على الطبيعة، ويُمكن أن يُوسَم هذا النظام ببعض الغموض، وأن يكون قادرًا على ضم الشواذ للقاعدة. ولقد تغيرت عبر السنين الذخيرة الأساسية من النماذج والطرق الفيزيائية التي تسمح لنا أن نصف سلوك مجموعة كبيرة من المواد ذات المدى الكبير من الخواص ونفهمه ونتوقعه؛ لذا سوف نبدأ بأساسيات هذه النظرية، فعلى سبيل المثال، جميعنا يعرف أن الكيميائيين يستخدمون المقاييس، لكن أتعلم أنهم يُفكرون في الثمانيات الموسيقية أيضًا؟ سوف نعلم السبب، في الجزء الأول من هذا الكتاب.

# تجربة ١: الساحرة والماء

لقد كان يُجري بعض الحسابات بلا توقف طيلة أيام، لكنها كانت جميعها بلا جدوى ... وقد خلص أخيرًا إلى أن الطريق الوحيد لإثبات ذاته هو أن يخوض اللهب ... وأن يُراقب خطواته ليكتشف فضائلها وزلاتها ... ولكي يحصل على إجابة للسؤال الذي يُحيره ينبغي أن يكون لديه اللهب والخطر والدِّماء، حتى إنه ككيميائي يتطلب الأمر منه هذا وذاك وتلك.

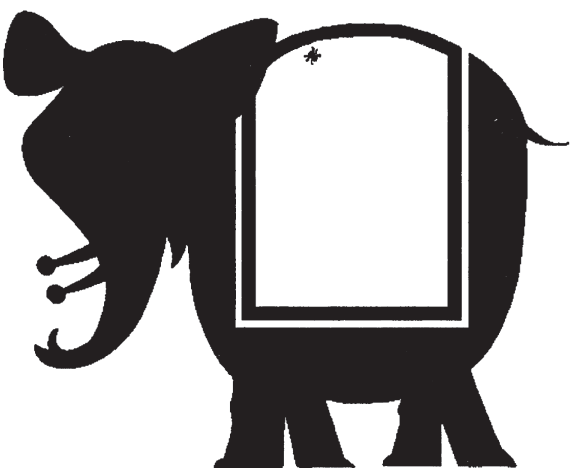
ستيفن كرين في كتابه
«شارة الشجاعة الحمراء»، ١٨٩٥

خذ ملعقة بلاستيكية وحُكَّها في شعرك أو في سترة صوفية إلى أن تكتسب الملعقة شحنة كهربية إستاتيكية، ويُمكن الاستدلال على ذلك بجذب الملعقة إلى الشعر أو الخيوط التي على السترة، ثم افتح الصنبور قليلًا حتى يكون هناك سيل رفيع من الماء، وقرِّب الملعقة منه تجد أن سيل الماء ينحرف، ماذا حدث إذن؟ لقد حدث انتقالٌ للإلكترونات؛ لأن الاحتكاك يُسبِّب انتقال الإلكترونات من مادة إلى أخرى، إذا كان للمادة قدرةٌ أكبر على جذب الإلكترونات. معظم المواد البلاستيكية لديها قدرة قوية على جذب الإلكترونات أكبر من قدرة الشعر والملابس؛ لذلك يكون اتجاه الانتقال غالبًا من شعرك أو من السُّترة الصوفية إلى الملعقة حيث يُسمَح للملعقة أن تكتسب شحنة سالبة.[1] وقد تكون الشحنة موجبة إذا كان الانتقال في الاتجاه الآخر، لكن سيكون له التأثير عينُه على سيل الماء؛ فالماء يتكون من ذراتٍ من الهيدروجين والأوكسجين اللَّذَين يحتويان على إلكترونات سالبة في السُّحُب الإلكترونية المحيطةِ بالنواة المشحونة بشحنة موجبة. ولأسبابٍ سوف نكتشفها بعد قليل نجد أن السحابة الإلكترونية المحيطة بالنواة تتصف بتوزيع غيرِ منتظم للإلكترونات، فأحد طرَفَي جُزَيء الماء يكون أكثرَ سالبيةً من الطرف الآخر، ولما كانت الشحنات المختلفة تتجاذب والمتشابهةُ تتنافر؛ فإنه عند الاقتراب من المجال الإلكتروني السالب للملعقة البلاستيكية تنحرف أطرافُ جزيء الماء السالبةُ بعيدًا عن الملعقة، أما الأطراف الموجبة فتنحرف نحو الملعقة وهو ما يجذب الماءَ والملعقة معًا.

ولكي تستوعب فكرة الإلكترونات الساحرة؛ استمر في القراءة.

الفصل الأول

# الإلكترونات والذرات، أو الفيلة والبراغيث



إنَّ عِلمنا لهو علمٌ حسِّي ...

رالف والدو إيمرسون، ١٨٣٠

لا يُلمح إيمرسون في الاستشهاد السابق إلى أن العلم مُتعلق بالحسِّ الجسدي، وإنما يعني أننا نبني نظريتنا العِلمية على مُدْخَلاتِ حواسِّنا الخمس؛ اللمس والتذوُّق والسمع والإبصار والشم، لكن عندما يتعلق الأمر بالنظريات التي تدور حول الذَّرة، تُخفِق حواسُّنا؛ فنحن لا يُمكننا أن نرى ذرة واحدة، أو نتذوقها أو نشعر بها أو نسمعها أو نشَمَّها، وإذا قام أحدهم

بضربنا على رأسنا بذرَّة واحدة من التنجستين (وهي ذرة غاية في الضخامة بالنسبة إلى باقي الذرات)، فإننا لن نشعر مطلقًا.

وما يجعلنا غيرَ مُدرِكين لوجود ذرة واحدة هو أن الذرة الواحدة غايةٌ في الصغر؛ فقد تصطفُّ نحوُ عشرة ملايين ذرةٍ مفردة لتصل إلى طول حبة الأرز، والأجزاء التي تتكون منها الذرَّة في منتهى الصِّغر. وتتكوَّن النواة أو مركز الذرَّة من البروتونات والنيترونات، ويُساوي نصف قُطر البروتون تقريبًا فيمتومتر الذي يُعادل واحدًا على كدريليون من المتر، أو لتبسيطها يُساوي نصفُ قطر البروتون واحدًا على مليون من واحد على مليار من المتر، يا له من حجم شديد الصغر! وتبلغ كتلة كلٍّ من البروتون والنيترون نحوَ واحدٍ على سبتليون من الجرام (واحد على تريليون من واحد على تريليون من الجرام)، وهذا حجمٌ شديد الصغر بأية معايير. وتقلُّ كتلة الإلكترون نحو ألفَيْ مرة عن كتلة البروتون والنيترون؛ فحجم الإلكترون بالنسبة إلى حجم البروتون كالبرغوث بالنسبة إلى الفيل، وبالطبع البروتون هو الفيل، وعندما تحسب كتلة الفيل، احذر من أن تُضيف كتلة البراغيث الموجودة على جسم الفيل، وكذلك الحال عندما نحسب كتلة الذرَّة، لا نُضيف إليها كتلة الإلكترونات.

والسؤال الذي يطرح نفسه هو إذا كانت جسيمات الذرة غايةً في الصغر لدرجة أننا لا يُمكننا أن نستخدم حواسنا لنكتشفها، كيف لنا أن نعرف بوجودها؟ الجواب هو بالاستدلال والاستنتاج؛ فلقد تعلمَت البشرية منذ وقت طويل أن مُدخَلات الحواس يمكن خرقها، وما أكثر ما خُدِعَ البصر والشمُّ واللمس! ومن ثَم فلِكَي تُكْتَشَف طبيعة أجزاء العالم التي لا يُمكِن شمُّها أو لمسُها أو رؤيتها؛ تعلَّمَ الناس أن ينظروا إلى التأثيرات غيرِ المباشرة، ويَستنتجوا الأسباب التي تقف وراءها. لقد اغتنم العالِمُ المبجَّل إيرنست راذرفرد المفهومَ جيدًا في النصيحة التي أسداها لجيمس تشادويك حينما كان تشادويك يبحث عن دليل على وجود النيترون، فقد سأله راذرفورد قائلًا:

> كيف يُمكنك العثور على الرجل الخفي في زحمة مرور ميدان بيكاديلي الشهير في لندن؟ ... ثم أجابه قائلًا: «من طريق ردِّ فعل هؤلاء الذين نحَّاهم جانبًا.»[1]

وبالمثل أعلن جيه جيه طومسون، بعد أن وصل إلى بعض الاستنتاجات من الأعمال التي أجراها بنفسه وأعمالِ الآخَرين، عن وجود الإلكترونات عام ١٨٩٧. وعُيِّن للإلكترون شحنةٌ سالبة بإجماع الآراء، واستطاع طومسون تحديدَ كمية الشحنات في الكتلة المُعْطاة من الإلكترونات من انحرافِ شعاع الإلكترونات في مجالٍ مِغناطيسي.[2]

ويُسبِّب هذا التفاعلُ الذي يحدث بين الإلكترونات والمجال المغناطيسي تشويشَ صورة التليفزيون في حالة وجود مغناطيس، إذ ينحرف شعاع الإلكترونات الموجودُ في أنبوبة أشعة الكاثود، التي تُسبِّب حدوث التفسفُر (الوميض الفسفوري) على الشاشة، في وجود مجال مغناطيسي قريبًا منها، وبالطبع لا ينبغي للفرد أن يُقرِّب مغناطيسًا من شاشة التليفزيون، إلا إذا كان يستطيع الاستغناءَ عنه، فهذا التفاعلُ يُمكِنه أن يُسبب تلفًا دائمًا لمُكوِّنات الجهاز، أما إذا كان لدى الفرد جهازٌ يمكن الاستغناء عنه، فإنه سوف يستمتع أيما استمتاع بمشاهدة تأثيرات مثيرة.

لكن طومسون لم يُحدِّد الطبيعة الذرية للمادة بطريقة لا تُدحَض، فقد صمدت حتى عام ١٩٠٩ حينما قدَّم جين برين الدليل القاطع بشأن الذرات، عندما قاس حركة جزيئات لقاح بالِغة الصغر عالقة في الماء، ويُمكن شرحُ ملاحظته المفصَّلة لهذه الحركة البراونية (سُمِّيت الحركة البراونية نسبةً إلى عالم النبات روبرت براون) إذ افترض أن الذرَّاتِ المتحركةَ تدفعها ذهابًا وإيابًا، وقد أقنعت ملاحظاتُه المجتمع العلمي بصلاحية النموذج الذري، وبلا شك، استخدم النموذج بنجاحٍ قبل برين، ولكن من الجيد وجود مثل هذا الإثبات الرائع.[3]

وفي عام ١٩١٠م، أدرك راذرفورد أنه لا بد أن الذرات مُكوَّنة من نواة مركزية كثيفة مُحاطة بفراغ فسيح، وقد أطلق بعضَ الجزيئات في حجم الذَّرة على صفيحة رقيقة جدًّا من الذهب، ووجد أن معظم الذرات اخترقت رقائق الذهب، لكن عددًا قليلًا ارتدَّ إلى الوراء، وقد علَّق راذرفورد على ذلك في عبارات طريفة كعادته، قائلًا: «لقد كان الأمر ... كما لو أطلَقتَ قذيفة قُطرها خمس عشرة بوصة على منديل ورقي، ثم ارتدَّت من هذا المنديل واصطدمَت بك.»[4]

ورجَّح راذرفورد أن هذه النَّواة التي تقع في مركز الذرة مُكوَّنة من جزيئات محتشدة بكثافة وذات شحنات موجبة. ثم استكمل بعدها مباشرةً هنري موسلي — قُبيل مصرعِه المبكِّر في جاليبولي في غضون الحرب العالمية الأولى — تَجارِبَ الاستدلال على هذه الجزيئات، التي هي البروتونات.[5] أما الجزيئات الأخرى في النواة وهي النيترونات فقد وُجِدَت صعوبات أكثر قليلًا لإثباتِ وجودها بسبب انعدام شحنتها، لكن جيمس شادويك عمل بنصيحة راذرفورد، وأثبت أخيرًا وجودها عام ١٩٣٢، فقد قاس شادويك ارتداد إشعاعات معينة من النيتروجين والهليوم ووجد أنها تتوافق مع الجسيمات المتعادلة التي لها تقريبًا كتلةُ البروتون نفسُها.[6]

وقد استغرق الأمرُ وقتًا استمر حتى ثلاثينيَّات القرنِ الماضي لاكتشاف كلٍّ أجزاء الذرَّة وهو ما يُبيِّن كيف كان الأمر عسيرًا، وحتى ظهور كل الأجزاء لا يزال لم يحلَّ اللغز بعد، فثمَّة سماتٌ أخرى للذرَّة — فضلًا عن حجمها — تُثير الحيرة، وإحدى هذه السمات كثافةُ النواة، وتُساوي كثافة المادة كتلة الحجم المُعطَى، فعلى سبيل المثال، يكون لمكيالٍ من الريش ولآخرَ من الحَصاة الحجمُ نفسُه، ولكن الكتل تختلف حتمًا. فمِكيال الحصاة أثقلُ من مكيال الريش؛ ومِن ثَم كثافته أكبر، وقد ذكرنا أن راذرفورد وجد أن الذرةَ محتشِدة بكثافة، لكننا لم نُصرِّح بمقدار هذه الكثافة، لقد اتضح أن النواة، مع أبعادها المتناهية الصغر، تحتوي على مليون تريليون جرام في السنتيمتر المكعب الواحد، وبمقارنة هذا بكثافةِ الرَّصاص على سبيل المثال — التي تقترب من أحدَ عشر جرامًا في السنتيمتر المكعب — نجد أن الفرق يَكمُن في أن النواة تتكون من جزيئات محتشدة قريبة بعضُها من بعض، في حين أن الذرة تكاد تكونُ فارغة. ويُمكِن تطبيقُ هذه المقارنة على الأرض والشمس، فإذا كانت نواةُ ذرَّة الرَّصاص هي الأرض، تُعادل المسافةُ إلى أقرب إلكترون تقريبًا المسافةَ التي بين الأرض والشمس، فسيكون الأمر كما لو وضَعت قطعًا صُلبة من الرخام، وحينما تضَع ذرَّاتِ الرصاص في وعاء، فإنك في الحقيقة تكون كمن يَصنع فقاعات من الفضاء الفارغ.

والسؤال الذي قد يطرأ على الذهن على الفور هو: إذا كانت المادة تتكوَّن من فقاعات دقيقة، فلماذا إذن لا نسقط في بِرَك من الوحل؟ توجد إجابة غيرُ مُرضِية وهي أن الإلكترونات تبقى حيثما تكون؛ لأنها توجد في مَدارات حول النواة، لكن قد يعترض أحدُهم قائلًا: «إذا كان للإلكترونات شحنةٌ سالبة وللبروتونات شحنة موجبة، لماذا لا تتجاذب هذه الشحنات المختلفة ولماذا لا تَصطدم الإلكتروناتُ بالبروتونات؟»

وكما هو واضح، هذا السؤال ليس سؤالًا تافهًا وإنما هو سؤالٌ يستحق الاهتمام.

في أوائل القرن العشرين، أسهَم العالِمُ الشهير نيلز بور في الإجابة عن هذا السؤال عن طريق توضيح أن الإلكترون ما دام يتحرك يُمكن له أن يظل بعيدًا عن البروتون. ونستطيع أن نُجري تشبيهًا آخر بالأرض والشمس؛ تربط الجاذبيةُ هذَين الجسمَين معًا، إلا أن الأرض عن طريق التحرك في مدار خاص بها، يُمكِنها أن تستمرَّ في الانحدار نحو الشمس، لكنها لا تسقط فيها على الإطلاق. وبالمثل يُمكن تطبيق الصورة نفسِها على الإلكترون، فيُمكن أن نعتبر أن الإلكترون يدور حول النواة ومن ثَم ينجذب نحوها وليس فيها.

ومما لا شك فيه، أن القارئ لاحظَ في الفِقرة السابقة بعضَ العبارات التقييدية، مثل «ساعد نيلز بور في الإجابة» ولم نقل: أجاب نيلز بور، و«يُمكن أن نعتبرَ أن الإلكترون يدور»

وليس «يدور الإلكترون ...»، وهذا المبدأ ضروري للغاية لأن التشابُه ليس سوى مجردِ تشابه، وهذا التشابُه يعمل فقط عند المستوى الأولي النظري، ويتراجع التشابهُ سريعًا عندما يتطلب الأمر أيَّ قدر من الدقة، ولن يكون لدينا أيُّ تشبيه غايةٍ في الدقة؛ لأن علم الفيزياء عند المستوى الذرِّي يختلف تمامًا عن علم الفيزياء الذي نُلاقيه في عالمنا اليومي الهائل.

وهكذا، ومع هذا الرأي السابق فسوف نعرض بِنْية الذرَّة تمامًا كما هي مفهومة في الوقت الحالي، ولنُلاحظ أولًا الملامحَ الرئيسية التي تشيع معرفتها: تتكون النواة التي هي مركزُ الذَّرة من جسيمات مشحونة بشحنة موجبة تُسمَّى البروتونات وجسيمات منعدمة الشحنة متعادلة تُسمَّى النيترونات، أما الإلكترونات، كما هو معروفٌ للكافة، فهي جسيمات ذات شحنة سالبة تدور في مدارات حول النواة.

ويُستخدَم مصطلح «المدار» هنا مجازيًّا وليس حرفيًّا، ومع أن الصورة العامة هي لإظهار الإلكترونات وهي تدور حول النواة مثل القمر الصناعي، فإن الفراغ الذي تَشغله الإلكتروناتُ لا يُمكِن وصفه بدقة، وأفضل ما نستطيع أن نُقدِّمه هو أن نصف منطقة غائمة، ونعتبر أن الإلكترون موجودٌ فيها، وللتأكيد على هذا الاختلاف، سنُطلِق على الفراغ الذي تشغله الإلكترونات حول النواة «مداري» Orbital وليس مَدارَ Orbit. وهذه المداريات قد تكون كرويةَ الشكل، مثل تلك الأثقال المستخدَمة في لعبة رفع الأثقال، أو تأخذ شكل تراكيبَ معقدةٍ من حلقات وفصوص، لكني أودُّ أن أُؤكد مرةً أخرى على أنه لا شيء في خبراتنا العامة بالفعل يُشابِهها تمامًا؛ ومن ثَم لا تُعَد التشبيهات كاملة.

وتَسوء المشكلةُ عندما يتعلَّق النقاش بأكثرَ من إلكترون، وهو ما يَحدث مع كلِّ عنصر يلي الهيدروجين، والإلكترونات هي جُسيمات لها شحنة، والجسيمات التي لها شحنة تَميل إلى أن ينجذب بعضُها إلى بعض إذا كان لها شحنات مختلفة، ويتنافر بعضها عن بعض إذا كان لها الشحنة نفسُها، وخيرُ مثال على هذا هو المجال المغناطيسي؛ فالأقطاب المختلفة للمغناطيس تتجاذب، والمتشابهة تتنافر. ويُصبِح الموقف أكثرَ غموضًا مع الذرة حيث لا تُوجَد تفاعلات شبه مِغناطيسية بين إلكترون وإلكترون، أو بين إلكترون وبروتون، لكنْ هناك كمٌّ هائل من الشحنات السالبة والموجبة التي يتفاعل بعضُها مع بعض. وقد شبَّه الفيزيائيُّ إنريكو فيرمي الحاصلُ على جائزة نوبل الموقفَ في إحدى المرات بقواربَ تتمايل في الميناء، فنحن نعلم بالبديهة أن حركة أحد القوارب تُؤثِّر على باقي القوارب الأخرى والعكس، لكن بطرقٍ غايةٍ في التداخل والتعقيد، لدرجة أنه لا يُمكن التنبؤ بالحركة الأخيرة لأي قارب من القوارب في أي وقت.

ويُطلِق مَن يدرسون مثل هذه الأمور (علماء ميكانيكا الكَمِّ النظريون) على هذه المسألة اسم «مشكلة الجسيمات الثلاثة»، فحينما يكون لديك جُسيمان في وضع متحرك وينجذب أحدُهما نحو الآخر، يُمكنك أن تصف الموقف في معادلة، لكن حينما يكون لديك ثلاثةُ جسيمات بينها انجذاب وتنافر، وجميعُها في وضع متحرك يحدث الكثير جدًّا من الأشياء في معادلة واحدةٍ دقيقة، وتكمن المشكلةُ في أنه مع وجود إحدى السحب الإلكترونية واستطاعتنا الإشارة إليها وقياسها، فإننا لا نستطيع أن نتنبَّأ سلفًا بالمكان الذي سوف تستقرُّ فيه أو بالشكلِ الذي ستأخذه؛ فثَمة عواملُ كثيرة ومتغيرات عديدة، بعضها غير معروف أو لا يمكن التعرف عليه، فالمشكلة تكمن في لبِّ منهاج الاحتمالية المتعلق بالتركيب الذري.

ولكن من حسن حظِّك أنك غيرُ مُضطر إلى أن تعرف موقعَ كل سحابة كي تتنبَّأ بحالة الطقس.[7] وبالاستناد على منهاج الاحتمالية، تستطيع نظرية ميكانيكا الكم أن تُفسِّر بدقةٍ الكثيرَ من خواص الذرات والجزيئات وطرق تفاعلها، بل تتنبَّأ بها. وقد أصبح بوُسع العلماء أيضًا فَهمُ وحشٍ صغير والتعاملُ معه، وهو الأيون. والأيون هو ذرة أو جزيء فقدَ بعض الإلكترونات أو اكتسب مزيدًا منها، مثلما حدث مع الملعقة البلاستيكية في تجربة الساحرة والماء عندما اكتسبَت بعضَ الإلكترونات. ويعني وجودُ القليل جدًّا أو الكثير جدًّا من الإلكترونات أن الشحنة الموجبة للبروتون غيرُ متوازنة، وأن الأيون له شحنة موجبة صافية أو سالبة صافية، وفي حالة الملعقة البلاستيكية، نجد أن الإلكترونات قد انتقلَت بالاحتكاك إلى الملعقة، واكتسبَت الملعقةُ شحنة سالبة صافية، وثمة أشياء أخرى مشحونة تقدر على أن تُؤدي خدعًا أخرى رائعة، مثل آلة التصوير المعجزة.

## على سبيل المثال: البروتونات والنُّسَخ الفوتوغرافية

أعرف أن البعض سيراها مغالاة أن نصِفَ آلة التصوير بالمعجزة، أما الذين تعاملوا مع آلة نَسْخ الرسائل (الميموغراف)، فيكون مصطلح معجزة غيرَ مُعبِّر على الإطلاق. وتنتمي آلات التصوير إلى عصر المعلومات تمامًا مثل الحاسوب والهواتف الخلوية التي تعمل عن طريق الأقمار الصناعية، فمع التقدم في وسائل الرفاهية، والبرمجة الخاصة بآلات تصوير العصر الحديث، وأيضًا المزايا التي تُتيح للمرء نَسْخ وترتيب النسخ المصورة وتكديسَها، وتجليدَ الورق بسلك وتدبيسه بالدبابيس المعدنية وتخريمه؛ فإن التكنولوجيا التي تكمن

وراء ذلك لهي غاية في الدقة. والمبدأ الرئيسي الذي تقوم عليه عملية التصوير هو التجاذب الإستاتيكي للشحنات.

وتُعتبَر أجزاء ماكينة التصوير مألوفةً لكلِّ مَن استخدم هذه الآلة بأي قدر؛ لأن كلَّ من استخدم هذه الماكينة تعرَّض يومًا ما لمشكلة انحشار الأوراق، وتعيَّن عليه أن يَفتح الماكينة من أجل إزالة الورق المحشور، وإذا كنت بطريقة ما لم تتعرَّض لهذه الخبرة، فاذهَب ببساطة إلى إحدى الماكينات، وافتحها لتتعايش مع أجزاءِ عملها الداخلية: نجد داخل آلة التصوير أسطوانة تُسمَّى الدرام تلفُّ حول محور ثابت، ومصدرًا ضوئيًّا متحركًا، وحبيبات دقيقة من بودرة سوداء هي حبر مجفَّف، ومصدر تسخين، ونظامًا محكمًا للبكرات.

أول خطوة في عملية النسخ هي اكتساب الأسطوانة لشحنة إلكتروستاتيكية متساوية وموزَّعة، وتَزيد الطريقة المستخدَمة في ذلك في براعتها قليلًا عن الطريقة التي تكتسب بها الملعقة شحنتها الكهربية الإستاتيكية في تجرِبة الساحرة والماء، لكن الفارق في الروعة بين الطريقتَين هو فارق طفيف، فعن طريق هذه الشحنات الإستاتيكية، تستطيع الأسطوانة أن تجذب مسحوق الحبر، تمامًا مثلما جذبت الملعقة الماء في تَجرِبة الساحرة والماء، لكن إذا كانت هذه هي آخرَ خطوة، عندئذٍ ستكونُ الورقة الناتجة ورقة سوداء تمامًا، وهو ما لا

نَرْغب فيه بالطبع، ولإتمام عمليَّة التصوير يمرُّ ضوء ساطع جدًّا وقويٌّ تحت الورقة لكي تُصوَّر.

ويُستخدَم الضوء لأنه يتفاعل مع المادة بطريقة مستمرَّة كما سنرى، ففيلم الكاميرا يتفاعل مع الضوء ليُكَوِّن الصورة، وتُسجل أجهزة الاستشعار الرقمية مستوياتِ الضوء في الكاميرا الرقمية، ويكتشف المجسُّ الضوئي وجودَ شخص في شعاع الضوء، فيسمح للباب بأن ينفتح، ويُمتصُّ الضوء عندما يَصطدِم بجزء مُظلِم من الورقة، لكن عندما يَصطدم بجزء أبيض من الورقة ينعكس الضوء على الأسطوانة، والمادة المبطَّنة للأسطوانة مادة موصلة للضوء بمعنى أن الضوء سيجعل المادة الداخلية تطرد إلكترونًا، وكلما طُرِدَ إلكترون من داخل الأسطوانة تعادل مع الشحنة الإستاتيكية الموجودة على سطح الأسطوانة في هذه البقعة فحَسْب، ويتزامن دَوران الأسطوانة مع حركة الضَّوء تحت الورقة؛ ومن ثَم تنتقل الصورة المسطحة إلى السطح المنحني للأسطوانة.

وتقذف الأسطوانة المعرَّضة للضوء بالحبر بعد ذلك، فينجذب إلى أجزاء الأسطوانة التي لا تَزال مشحونة، عندئذٍ تُمرَّر قطعة من الورق ذات شحنة إستاتيكية فوق سطح الأسطوانة، فتجذب الحبر بعيدًا عن الأسطوانة، وتُسخَّن الورقة لِيثبت الحبر عليها، فنحصل على صورة من الورقة.

وإذا كان المبدأ وراء فكرة آلة تصوير الورق — وهو انجذاب المواد إلى الشحنات الإستاتيكية — مبدأً أساسيًّا ومفهومًا جيدًا، فلماذا إذن استغرَق كل هذا الوقت لإنتاج آلة تصوير مستندات عملية؟ الإجابة هي الإجابة نفسُها التي تُصاحب مثل تلك النوعية من المخترعات، والتي تتمثَّل في أن المفهوم الأساسي موجود منذ وقت طويل قبل وجود المواد اللازمة لتنفيذ الفكرة. فعلم المواد هو فرع من فروع المعرفة قائمٌ بذاته، ويَرجع ذلك إلى الوجود الفعلي إلى عدد لا نهائي من الخواص المتنوعة للعناصر وللمواد المشتقة من هذه العناصر. فعلى سبيل المثال، فكِّر في التنوُّع الذي يُظهره سلوك عُنصرَي الألمنيوم والنُّحاس (كلاهما يستخدم في الأسلاك الكهربائية)، ومسامير الصلب والمسامير المطليَّة بالخارصين (كِلاهما يُطرَق من على الرأس). وسنعرض في الفصل التالي الاختلافات على الجدول، ونقصد بالطبع الجدولَ الدوريَّ للعناصر.

# تجربة ٢: النحاس واللصوص

أنت القادر على كل شيء، أنت وإزموندو. أنا لا أعني إزموندو وحده ولا أعنيك أنت وحدك. إنما أعنيكما معًا ... مثل بعض المخاليط الكيميائية.

هنري جيمس في كتابه «لوحة امرأة»، ١٨٨٠

كن حذرًا في هذه التجرِبة؛ فالمحلول الذي سوف تُحضره محلولٌ كاوٍ، ويُمكن أن يُلحق ضررًا بالملابس والأسطح والعين والبشَرة، وإذا سقط بعضٌ من المحلول فيجب عليك أن تغسل المنطقة التي سقط فيها السائل على الفور بمياهٍ كثيرة، أما إذا دخَلَت قطرات من المحلول في عينَيك فاغسل عينَيك جيدًا بمياه غزيرة، وحاول الحصول على الرعاية الطبية. في هذه التجرِبة يتحتَّم عليك أن تُوفِّر الحماية المناسبة لعينَيك.

ارتدِ نظارة الأمان الواقية، وقفَّازات الحماية. في الجزء الأول من التجرِبة، خذ كوبَين بلاستيكيَّين واملَأْهما بالماء حتى ارتفاعِ بوصة واحدة (٢٫٥سم). اقطع بوصة (٢٫٥سم) من سلك ألمنيوم وبوصةً من سلك نُحاس، وأزِل السلك العازل من عليهما إن وُجد. ضع سلك الألمنيوم في أحد الكوبَين وسلكَ النُّحاس في الثاني. أضف نصف ملعقة شاي (٢ مليلتر) من اللي (محلول قلوي لصنع الصابون) — المذكور في قائمة المشتريات والمحاليل، التي نُصِح فيها بشراء بِلَّورات التنظيف الجافة التي لا تحوي فلزَّ الألمنيوم — ثم قلِّب الكوب برفق حتى يمتزج، تظهر بعض الفقاعات الصغيرة الناتجة عن انحلال اللي.

بعد مضيِّ مدة زمنية قصيرة تتراوح من خمسَ عشرة إلى عشرين ثانية، ينبغي أن يظهَر سيلٌ من الفقاقيع الصغيرة جدًّا من سلك الألمنيوم، وليس من سلك النحاس.

ومن الواضح أن أسلاك النحاس والألمنيوم متشابهة؛ فكلاهما يُستخدَم في الأسلاك الكهربية، لكننا نرى الألمنيوم يذوب في هذا المحلول القلوي، ولا يذوب النحاس. والفقاعات التي لاحظتَ تصاعُدها في عملية انحلال الألمنيوم هي الهيدروجين، مما يُفسِّر لماذا نُضيف رقائقَ الألمنيوم الدقيقة إلى بعض مواد التنظيف الجاف التي يكون اللي هو المادة الأساسية فيها، إذ تُوَفِّر رقائق الألمنيوم المحفزاتِ التي تُساعد على إزالة الانسدادات.

استمرَّ في ارتداء النظارة في الجزء الثاني من هذه التجرِبة. خذ محلول كبريتات النُّحاس المعدِّ كما هو مشار إليه في «قائمة المشتريات والمحاليل»، وصُبَّ نحو ربع بوصة (٠٫٥سم) أو أقلَّ في كوب بلاستيكي. ضع مسمارًا من الصلب وآخرَ مطليًّا بالخارصين، وراعِ ألَّا يتلامسَ أحدهما مع الآخر. تعلو المسمارَين طبقةٌ نُحاسية من محلول النحاس، لكن التفاعل يحدث أسرعَ مع مسمار الصلب، بل يبدو شكلُ الطبقة النحاسية التي عليه مماثلًا للنحاس أكثر من تلك التي على المسمار المطلي بالخارصين. وغالبًا ما تكون مسامير الصلب من الحديد، أما المسامير المطلية بالخارصين فهي مساميرُ من الصلب مطليةٌ بطبقة

من الخارصين المقاوم للأكسدة، وكلتا المادتَين تُؤدي الوظيفة الفيزيائية للأسطح المقاومة للأكسدة، لكن تركيبهما الكيميائي، كما هو محدد بموقع الحديد والخارصين في الجدول الدوري، يعتمد على اختلاف السلوك الكيميائي كما هو مبيَّن هنا.

الفصل الثاني

# تحدث دوريًّا

لا يستطيع ذلك الجيش أن يتعافى في أي مكان؛ فمنذ معركة بورودينو وخراب موسكو وهو يحمل في نفسه ما يُشبِه عناصر الانحلال الكيميائي.

ليو تولستوي في كتابه
«الحرب والسلام»، ١٨٦٤

عند التقاط صورة للعائلة عندما يلتئم شملها، قد يطلب المصور أن يقف أفراد الأسر المباشرة بعضهم مع بعض أو يُرتِّبهم حسَب أطوالهم أو أعمارهم، وربما يطلب المصور

المبالغ في الاهتمام بالتفاصيل أن يقف أولئك المقيمون في الساحل الغربي في جانب، وأولئك المقيمون في الساحل الشرقي في الجانب الآخر، ويجعل أولئك القاطنين في الشمال يقفون قليلًا إلى الخلف، والقاطنين في الجنوب إلى الأمام. قد تأخذ مثل هذه الترتيبات بعضًا من الوقت والجهد، لكنها ستضمن أن الأجيال القادمة سوف يتبيَّنون قدرًا لا بأس به من المعلومات عن فرد معين بإيجاد موقعه أو موقعها في الصورة. وهكذا، يشبه الجدول الدوري الصورة الملتقطة لاجتماع العائلة؛ فبمجرَّد فَهْم مبدأ الترتيب، يمكن الحصول على معلومات معينة عن عنصر معين بمجرد معرفة موقعه في الجدول.

هذا المصور الحاذق الذي رتَّب عناصر الجدول الدوري هو ديمتري مندليف؛ وُلِد مندليف في روسيا عام ١٨٣٤. أدرك مندليف الحاجة إلى أهمية الترتيب حسَب العمر في اجتماع العائلة؛ إذ كان الأصغرَ بين أربعةَ عشر طفلًا، وأدركَ أيضًا الترتيب حسب الإقامة، حينما رأَت أمه موهبته فاستخدمت مواردها المحدودة لتُرسِله إلى موسكو ليتلقَّى تعليمه هناك. وبدأ مندليف بعد ضمان الحصول على وظيفةٍ في التدريس، حاذيًا حَذْو مُدرِّسي العصور كافَّة، في البحث عن طريقة ليُنظِّم أدواته، وكان موضوعه هو السُّلوكَ الكيميائي للعناصر، وقد نمَت الأداةُ التدريسية التي تبنَّاها لتصل إلى الجدول الدوري.[1]

ولكي يتمكَّن من تنظيم العناصر كتب مندليف كلَّ سلوك العناصر التي يُلاحظها في بطاقات، ثم صنف هذه البطاقات إلى مجموعات؛ تبعًا للسلوك المتشابه، وبعدئذٍ أضاف مندليف مستوًى آخرَ من التصنيف، وأخذ يُصنِّف العناصر تبعًا للكتلة المميزة للعناصر.

غالبًا ما يُسْتَخدم مصطلح الكتلة والوزن بمعنًى واحد، لكنَّ ثمَّة فرقًا خفيًّا ومهمًّا في الوقت ذاته؛ فوزنُ الشيء هو قياسُ مقدار القوة التي تجذبه بها الجاذبيةُ الأرضية نحو الأرض، ولأن جاذبية القمر أقلُّ من جاذبية الأرض، نجد أن الأشياء تَزِن أقلَّ على سطح القمر. وتُقاس الكتلة وفقًا لميزانٍ يرتبط ببعض المعايير، وبالنظر إلى «تمثال العدالة العمياء» الذي يرمز إلى سيادة القانون، نجده امرأةً معصوبة العينَين تحمل مثل هذا الميزان. ولقياس كتلة المادة، نضع المادة في إحدى كِفَّتَي الميزان ونضع معيارًا لكتلة معروفة في الكفَّة الأخرى إلى أن تتساوى الكفَّتان، ولأن الجاذبية تُؤثِّر على المعايير بنفس الطريقة التي تُؤثر بها على الشيء المراد قياسُه؛ ومن ثَم تكون الكتلة المقيسة على الأرض مُساويةً تمامًا لتلك المقيسة على سطح القمر.

وكان يُعرَف في وقت مندليف أن العناصر يتَّحد بعضُها مع بعض بنِسَب محدَّدة مثلما تتَّحد المكونات في أثناء الطهي، فمثلما قد تتطلَّب طريقة صنع الكعك بيضة وكوب

لبن، فإن طريقة صُنع مِلح الطعام تتطلَّب جزءًا من الصوديوم وجزءًا من الكلور. وكانت كتلة الجزء الواحد من الصوديوم تُؤخَذ باعتبارها الكتلةَ المميزة للصوديوم، وهي الكتلة المميزة لكلِّ عنصرٍ استخدمه مندليف في المرحلة الثانية من الترتيب.

وقد رتَّب باحثون آخَرون العناصرَ في مجموعاتٍ طبقًا لكُتَلها المميزة، لكن كانت لمندليف جَسارةٌ في الاحتفاظ بمجموعاتٍ لها نفسُ السلوك الكيميائيِّ بعضها مع بعض، حتى وإن كان نتيجة ذلك تَرْك بعض الفراغات في الجدول، وما لبثت البصيرةُ النافذة لمندليف أن كشفَت عن نفسها عندما وجَد آخرون العناصرَ المفقودة ووجَدوا أنها تتناسبُ وفراغاتِ جدول مندليف.

وبعد مُضيِّ عدة عقود — بعدما كشَف باحثون آخرون عن لُغز تركيب الذَّرة — وجدوا أن اتجاهات تركيب الذرة تتبع ترتيب الجدول الدوري، مُعلِنين بذلك الارتباطَ بين التركيب الذري والسلوكِ الكيميائي. ويبدو أن المفهوم قد أصبح واضحًا بعد الإدراك المتأخِّر له؛ فسلوكُ كلِّ الأشياء، من السمكة إلى وَميض الضوء، تُحدِّده الطريقة التي وُضِعَت بها هذه الأشياءُ معًا، لكن التركيب الأساسي للذرات — الإلكترونات والبروتونات والنيترونات — لم يكن معروفًا حينما رتَّب مندليف جدوله.

يَظهر الجدول الدوري الحديث الذي جرى توسيعه بدرجة كبيرة منذ وقت مندليف في شكل ٢-١. وقد تكون رموز بعض العناصر مألوفةً لديك مثل رمز H الذي يُشير إلى الهيدروجين، وO الذي يُشير إلى الأوكسجين، وقد لا يكون البعض الآخر مألوفًا. وتُشتَق رموز بعض العناصر مثل التنجستين (W) والصوديوم (Na) من أسماء بديلة لهذه العناصر، فرمز التنجستين (W) مأخوذ عن الاسم الألماني Wofram ورمز الصوديوم (Na) مأخوذ عن الاسم اللاتيني Ntrium. وتُشير الأرقام التي تُوجَد فوق العناصر إلى العدد الذري (وهو مفهومٌ سنَشرحه فيما بعد) ويُلحَق بهذا الكتاب قوائمُ العناصر بأسمائها ورموزها وأعدادها الذرية.

ويُوضِّح شكل ٢-٢ الجدول الدوري المبسَّط بإيجاز وبدون الأعداد الذرية.

يضمُّ شكل ٢-٢ للجدول الدوري كلَّ العناصر نفسِها الموجودة في الشكل ٢-١، لكنه يتطلب من المستخدِم أن يتذكَّر أن العناصر من السيريوم (Ce) إلى الليوتيتيوم (Lu) والثوريوم (Th) واللورنسيوم (Lr) هي بالفعل تتبع اللانثانم (La) والأكتينيوم (Ac) على التوالي، وتُرَى هذه العناصر في الجدول الدوري التقليدي على أنها صفوفٌ منفصلة لملاءمة طباعة الحروف.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1<br>H | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2<br>He |
| 3<br>Li | 4<br>Be | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5<br>B | 6<br>C | 7<br>N | 8<br>O | 9<br>F | 10<br>Ne |
| 11<br>Na | 12<br>Mg | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P | 16<br>S | 17<br>Cl | 18<br>Ar |
| 19<br>K | 20<br>Ca | 21<br>Sc | | | | | | | | | | | | | | 22<br>Ti | 23<br>V | 24<br>Cr | 25<br>Mn | 26<br>Fe | 27<br>Co | 28<br>Ni | 29<br>Cu | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y | | | | | | | | | | | | | | 40<br>Zr | 41<br>Nb | 42<br>Mo | 43<br>Tc | 44<br>Ru | 45<br>Rh | 46<br>Pd | 47<br>Ag | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I | 54<br>Xe |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu | 64<br>Gd | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er | 69<br>Tm | 70<br>Yb | 71<br>Lu | 72<br>Hf | 73<br>Ta | 74<br>W | 75<br>Re | 76<br>Os | 77<br>Ir | 78<br>Pt | 79<br>Au | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi | 84<br>Po | 85<br>At | 86<br>Rn |
| 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U | 93<br>Np | 94<br>Pu | 95<br>Am | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | | | | | | | | |

شكل ٢-١: الجدول الدوري الحديث.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٢-٢: الجدول الدوري البسيط.

وأيًّا كان الشكل الذي تختار أن تستعين به، فالسِّمة اللافتة للنظر في الجدول الدوري هي نظامُ ترتيبه؛ ففي عالَمٍ مثل عالمنا هذا حيث السحُب المتغيرةُ الأشكال، والأشجارُ التي تنمو أفرعها على نحوٍ عشوائي، والخلايا التي لا يوجد اثنتان منها مُتشابهَتَين، أو تتماثل فيه كُتلتان جليديَّتان، قد يبدو ترتيبُ الجدول الدوري الحاذق أمرًا خارقًا للطبيعة مثل الطقوس الدينية الشديدةِ الصرامة. إلا أن هذا النظام البُدائي الذي يُمكنه أن يُحيل الأمور المعقَّدة إلى أمور فوضوية (أرجأنا النقاش في مثل هذا الأمر إلى الفصل الذي يتحدث عن الديناميكا الحرارية)، يُشكِّل القواعد الأساسية لعالمنا المتغير.

ويَكْمن أول الأنماط وأكثرُها دقةً في عدد البروتونات في نواة كلِّ عنصر؛ فعلى سبيل المثال يحتوي الهيدروجين، أول عنصر مُدْرَج في الجدول الدوري، على بروتون في نَواته، والهليوم، ثاني عنصر (عند القراءة من اليسار إلى اليمين)، على بروتونَين في نواته. ويأتي الليثيوم بعد الهليوم بالاتجاه إلى أسفل في الصف الثاني — ومرةً أخرى بداية من جهة اليسار إلى اليمين — وهو يحتوي على ثلاثة بروتونات في نواته، ويَليه البريليوم الذي

يحتوي على أربعة بروتونات، ثم بالانتقال إلى الجانب الآخر من الصف نفسِه متخطِّين الفجوة، نجد البورون ذا الخمسة بروتونات في نواته، وبالمضيِّ قُدمًا على المنوال نفسِه، نجد أن للكربون ستَّةَ بروتونات وللنيتروجين سبعة وللأوكسجين ثمانية، وهكذا. ويُطلَق على عدد البروتونات في النواة العددُ الذري، وهو الرَّقم المعطَى مع كل عنصرٍ في الجدول في شكل ٢-١. ويبدأ التعقيد يَظهر في الجدول بمجرَّد أن يكون للعنصرِ كتلةٌ يُعتَدُّ بها. وتجمع الأعداد الذرية العناصر إلى أرقام دقيقة ومرتَّبة وصحيحة، لكن بإلقاءِ نظرةٍ على الملحَق آخِرَ الكتاب، نجد أن الكتل الذَّرية للعناصر أرقامُها غير دقيقة وغير مُرتَّبة وغيرُ صحيحة. وتنشأ هذه الطبيعة الشاذة للكُتَل الذرية من جرَّاء حقيقة أن الذرَّة تُبنى من بروتونات ونيترونات، وتُوجَد طريقة أساسية تَصِف طريقةَ تركيب هذه العناصر، لكن ثمَّة اختلافات في هذه الطريقة أيضًا.

وعليك أن تبدأ من مكانٍ ما، وعندما تعلَّق الأمر بالكتلة بدأ العلماء بالبروتون، وقد عرَّف العلماء البروتون بأنه كُتلة وحدة واحدة للكتلة الذرِّية أو: و ك ذ ويُفترَض أن كتلة النيترون وحدةٌ واحدة للكتلة الذرية أيضًا؛ وذلك للاقتراب الشديد بين البروتون والنيترون في الكتلة، ودائمًا يكون عدد البروتونات في ذرَّة العنصر هو عددَها الذري نفسَه ومُساويًا له؛ فإذا كان للذرة سبعةَ عشَر بروتونًا، فإنَّ عددها الذري يكون ١٧، وهو عنصر الكلور. وإذا كانت الذَّرة هي ذرةَ كلور، فهي تحوي إذن ١٧ بروتونًا، ولكن يُمكن أن تتنوَّع كتلة الذرة المعطاة لعنصر ما؛ وذلك لأن عدد البروتونات وعدد النيترونات يحددان كتلة الذرة، ومن الممكن أن يتغير عدد النيترونات؛ فعلى سبيل المثال، تحوي كلُّ ذرة كلور ١٧ بروتونًا، لكن بعض الذرات تحوي ١٨ نيترونًا، والبعض الآخر يحوي ٢٠ نيترونًا، فيكون مُجمل كتلة ذرة الكلور التي تحوي ١٨ نيترونًا هو ١٧ و ك ذ بالإضافة إلى ١٨ و ك ذ أي ٣٥ و ك ذ بالإضافة إلى ٢٠ و ك ذ أي ٣٧ و ك ذ وعندما تكون لذراتِ عنصر ما كتلٌ مختلفة، يُطلَق عليها اسم «النظائر». وتكون الكتلة الذرية للعنصر المعطى هو متوسط كتلة نظائره.

ويُمكن تشبيهُ عدد البروتونات في الذرة بنوعٍ من الخصائص التي تُميز الإنسان بكونه ذكرًا، فإذا كان لأحدهم هذه الخصائصُ يكون ذكرًا، كذلك إذا كان لذرَّةٍ عددٌ معين من البروتونات، فإن ذلك العدد هو الذي يُحدد هُويةَ ذلك العنصر، لكن الذكور المختلفة لها كتلٌ مختلفة، لكننا نستطيع بسهولة ويُسر أن نُوجِد متوسطَ كتلة مجموعة من الرجال بواسطة جمعِ كلِّ كُتلِهم الفردية معًا، ثم نَقسم الإجمالي على عدد الرجال في

هذه المجموعة، وبالمثل، يمكن اتباعُ نفس الإجراء مع عناصر الجدول الدوري. وكما نرى في الملحَق، كتلة الكلور المعطاة هي ٣٥٫٤٥ و ك ذ التي لا تُمثِّل حتى كتلة أي نظير، وهي تُمثِّل متوسطًا أعلى من الكتلة المعتادة للنظائر، غير أن عدد البروتونات هو الذي يُحدِّد نوع العنصر، وعليه، مع أن النظائر قد يكون لها أعدادٌ مختلفة من النيترونات وكتلٌ مختلفة، فإن العدد الذري هو الذي يُخبِرنا بعدد البروتونات، وعدد البروتونات هو الذي يُحدِّد نوع العنصر، والعدد الذي تلحظ زيادته وأنت تطَّلِع على الجدول الدوري هو العدد الذري وهو عدد البروتونات نفسُه.

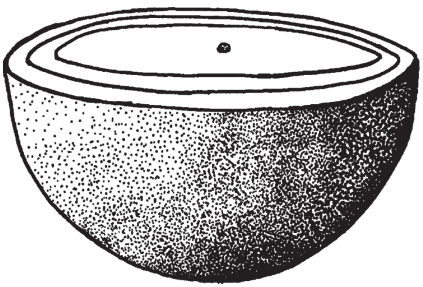
لكن إذا كان لا يُوجَد مبدأٌ يقوم عليه التصنيفُ غير عدد البروتونات في النَّواة، لماذا إذن ذلك الشكل المثير للفضول في الجدول الدوري؟ يُعزَى ذلك إلى أن ترتيب الجدول يهتمُّ بما هو أكثرُ من عدد البروتونات.

وتُصنَّف الكائنات الحية في علم الأحياء إلى ممالكَ وشُعَب وطوائفَ ورُتَب وعائلاتٍ وأجناس وأنواع، وتُصنَّف العناصر في الكيمياء أيضًا — وإن كان إلى عددِ فئاتٍ أقلَّ — وما يَعْنينا هنا هو تصنيف العناصر إلى ما يُطلَق عليه «أنواع» مختلفة، وعدد البروتونات هو ما يُحدد نوع العنصر؛ ومن ثَم يُمكن النظر إلى العدد الذري على أنه «النوع»، فإذا كانت الذرة تحتوي على بروتونَيْن فهذا يعني أنها لعنصرِ الهليوم، وإذا كانت الذرة هي ذرَّة هليوم إذن هي تحوي بروتونَين. فهذا أمرٌ ثابت لا يتغير، غير أن عدد الإلكترونات في ذرة العنصر يُمكن أن يتبايَن ويُمكن اعتبارُ أيِّ تبايُن «نوعًا»، ويكون عددُ البروتونات هو عددَ الإلكترونات نفسَه في الأنواع المتعادلة من الذرات.

ويحمل البروتون وَحدةً واحدة من الشحنات الموجبة؛ لذا لكي تُصبح الذرة متعادلة، ويجب أن يُعادل هذه الشحنةَ الموجبة إلكترونٌ له شحنة سالبة؛ لذلك، يُخبرنا الجدول الدوري أيضًا بعدد الإلكترونات الموجودة في ذرة العنصر؛ فعلى سبيل المثال، يحتوي الهيدروجين على بروتون؛ لذا تحتوي ذرة الهيدروجين المتعادلة على إلكترون أيضًا، وتوجد في نواة الكربون ستةُ بروتونات؛ لذا تُوجَد في ذرته المتعادلة كهربيًّا ستةُ إلكترونات.

وكما أَشَرْنا من قبل، تَشغل الإلكترونات مداريات وسنضيف إلى ذلك الآن أن هذه المداريات تترتَّب حول النواة في طبقات رقيقة، وتكون الطبقاتُ مُتداخِلة كما هو موضَّح في شكل ٢-٣، وكل طبقة لديها القدرة على أن تسَع المزيد من الإلكترونات، وتوجد مُتواليةٌ حسابية لتحديد عدد الإلكترونات الذي يُمكن أن تحمله كلُّ طبقة؛ فالطبقة الأولى تحمل إلكترونَين، والثانية تحمل ثمانية إلكترونات، والثالثة ثمانية عشر إلكترونًا، أما الطبقة

الرابعة فتحمل اثنَين وثلاثين إلكترونًا؛ ومن ثَم، تزداد القدرة الاستيعابية للطبقة على حمل الإلكترونات بنمطٍ منتظِم كالآتي: مربع رقم الطبقة مضروبًا في اثنَين، فالطبقة الأولى، طبقة رقم ١، تحمل ١ مربعًا مضروبًا في ٢، أي إلكترونَين. والطبقة الثانية، طبقة رقم ٢، تحمل تربيعَ رقم ٢ مضروبًا في ٢ أي ثمانية إلكترونات، وهكذا.

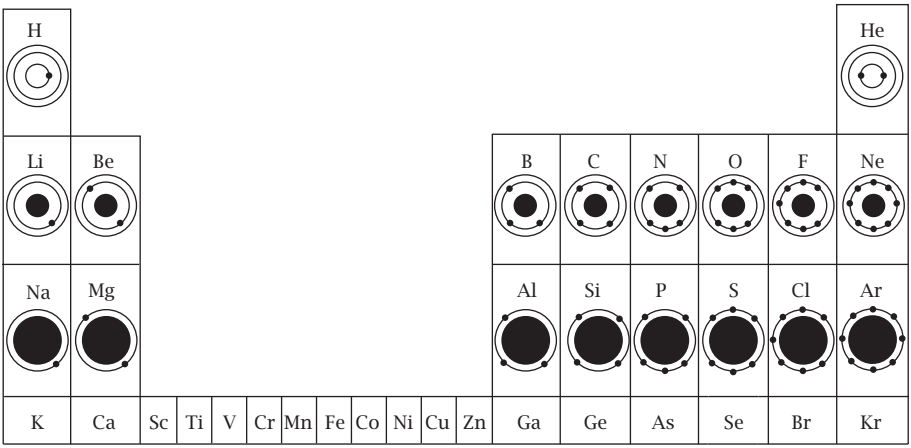


شكل ٢-٣: تمثيل تصويري للطبقات حول الذرة. (غير مرسومة وفق مقياس رسم!)

وقد قدَّمنا هنا الطبقاتِ الرقيقةَ بوصفها طبقاتٍ دقيقةً في أجسام كروية متداخلة، وتُشبِه هذه الطبقاتُ الرقيقة المتداخلةُ تلك الكعكةَ المتعددةَ الطبقات التي تكون كلُّ طبقة فيها ذاتَ نكهةٍ مختلفة، لكن في حقيقة الأمر تتكون الطبقات الرقيقة من شرائحَ داخلية وإن كان علينا أن نعرض شكلًا لإحداها في نموذجنا، فسينتهي بنا الأمرُ إلى شكل أشبهَ بشكلِ البصلة المفتوحة حيث يبرز شكل الشرائح المستديرة بداخلها، فالبصل تتَشابك طبقاته وتُصبح ممزوجةً بعضُها ببعض، وهذا عينُ ما يحدث أيضًا مع الشرائح الداخلية للذرات، لكن هذه طبقة بصل، ولسنا في حاجةٍ إليها الآن! ومن الناحية النظرية، تأخذ الطبقاتُ الشكلَ الكروي بمجرَّد امتلائها بالإلكترونات؛ لذا سنعتبرها هنا كرويةَ الشكل.[2]

ويُطلَق على صفوف الجدول الدوري دورات (وعليه سُمِّي بالجدول الدوري)، ويتحدَّد موقع العنصر الذي يَشغله في الدورة بناءً على عدد الإلكترونات في طبقته الخارجية الأكثر بعدًا عن النواة، وكل مرة يَزيد فيها العدد الذري بمِقْدار واحد، يَزيد معه عددُ البروتونات في النواة بمقدار واحد، ويتطلب العنصر الجديد إلكترونًا آخر لذرته المتعادلة، وتُرتِّب الإلكتروناتُ نفسَها في الطبقات التي تُحيط بالنواة، وكل مرةٍ تمتلئ فيها الطبقة ينتهي

الصف. وتُعرَض الطبقة الممتلئة في الجدول الدوري باعتبارها صفًّا ممتلئًا كما هو موضح في شكل ٢-٤.




شكل ٢-٤: كل مرة يزيد فيها العددُ الذري بمقدار واحد، يَزيد معه عدد البروتونات في النواة بمقدار واحد، ويتطلَّب العنصر الجديد إلكترونًا آخرَ لذرَّته المتعادلةِ، وتُرتب الإلكترونات نفسها في الطبقات التي تُحيط بالنواة، وكل مرة تمتلئ فيها الطبقة ينتهي الصف؛ فكلٌّ من الهليوم والنيون والأرجون يُكمل صفًّا، وكلٌّ منها يصنع طبقة ممتلئة.

ومن ثَم تُحدد الطبقاتُ شكل الجدول الدوري، لكن ليس هذا كل شيء فلا يزال هنالك المزيدُ لِنَسرده؛ فهناك أثرٌ آخر ذو مغزًى من وجود الطبقات، ألَا وهو أن الانشغال أو الانشغال الجزئيَّ للطبقات هو الذي يُحدِّد السلوك الكيميائي أو «النشاط الكيميائي» للعناصر المتنوِّعة. والأعمدة الرأسية في الجدول الدوري هي لمجموعةٍ من العناصر التي لها حالاتٌ متشابهة من حيث انشغالُ طبقاتها الخارجية، فهي أعضاءٌ في نفس العائلة، ولكن العائلات التي تتشارك الكيمياء، وليست تلك التي تتشارك الأسلاف!

فعلى سبيل المثال، يكون لكلٍّ من الهليوم والنيون والأرجون طبقاتٌ ممتلئة، وتُعرَف هذه العناصر التي تُوجَد في صف عمودي بالغازات النبيلة؛ لأن لها طبيعةً رصينة وهامدةً وخاملة، ويُجسِّد الهليوم فَقْرها إلى النشاط الكيميائي، وهو عنصرٌ غاية في الخمول، حتى

إننا نَستخدم بالونات الهليوم في تزيين الحفلات، ومن ناحية أخرى، يتَّسِم الهيدروجين بشدةِ نشاطه؛ لذا قد تجلب بالونات الهيدروجين في الحفلات تسليةً تُصاحبها أصواتٌ مدوية أكثر من تلك التي نكترث لها.

وتتشابه تفاعلاتُ النيتروجين والفسفور؛ لأن لهما العددَ نفسَه من الإلكترونات في طبقتَيهما الخارجيَّتَين (خمسة إلكترونات). وتُشبه تفاعلات الأوكسجين تفاعلات الكبريت لتشاركهما في نفس عدد انشغالِ طبقاتهما الخارجيتَين (ستة إلكترونات). ويُسمَّى هذا الانشغال للطبقة الخارجية للذرة «تكافُؤَ الذرة». فتكافؤ الكربون هو ٤ (بسبب وجود أربعة إلكترونات في طبقته الخارجية)، وهو يتَشابه في بعض الخواصِّ الكيميائية مع السليكون الذي يكون تكافؤه ٤ أيضًا. وتُستخدَم عناصر السليكون والجرمانيوم والقصدير والرَّصاص التي لها التكافؤ نفسُه وهو ٤، ولكن بنسبةٍ مختلفة في تكوين أشباه الموصلات، وفي تكوين موادَّ مثيرةٍ وهامة، وسنتعرَّض لذلك فيما بعدُ عند مناقشة الروابط الكيميائية.

ويتفاعل الأوكسجين مع الهيدروجين بنسبة واحد إلى اثنين، وكذلك الكبريت والسيلنيوم والتيلوريوم، ويَضْطلعُ النشاط الكيميائي — الذي هو قدرة العناصر على الترابط كيميائيًّا في مركَّبات — بمُهمة تحويل عناصر الكون إلى موادِّ الأرض التي هي في النهاية موادُّ الحياة. ومع أنه علينا أن نُقلِع عن الإسهاب في مناقشتنا حولَ جزيئات الحياة المعقَّدة حتى تتوافرَ أُسُس أكثرُ متانةً، فإن لدينا بالفعل معلوماتٍ كافيةً لمناقشة اثنتَين من أهم المواد الكيميائية في الحياة، وهما يُعَدان بلا أدنى شك من المواد الأساسية في الحياة التي تتكون منهما الموادُّ الأخرى، وهما الملح والماء؛ فالحياة الأولى تكوَّنَت في المحيطات المالحة كما هو موضح في المحاليل الملحية في خلايانا، وكما هو دائمًا جليٌّ في الطبيعة الملحية لأجسامنا.

فعادةً في العالم المتحدِّث بالإنجليزية، عندما نُفكِّر في المِلح يتوارد على أذهاننا مِلح الطعام؛ كلوريد الصوديوم NaCl، وإذا أردنا أن نَعرف أهمَّ ثاني مركب كيميائي بعد الماء $H_2O$، فبالطبع سيكون كلوريد الصوديوم، مركَّب ملح الطعام، ويتشارك كلوريد الصوديوم وكلوريد البوتاسيوم في خصائصَ كثيرة لدرجة أن كلوريد البوتاسيوم يُستخدَم كبديل لِملح الطعام؛ إذ تتشابهُ الصيغة الكيميائية لكلا المركَّبَين أيضًا؛ فكلوريد الصوديوم يتكون من جزءٍ من الصوديوم وجزءٍ من الكلور، وكلوريد البوتاسيوم يتكون من جزء من البوتاسيوم وجزء من الكلور، لكن لا تتوحَّد نسبةٌ واحد إلى واحد هذه مع الأملاحِ

كافَّة؛ فعلى سبيل المثال يتكون كلوريد الكالسيوم من جزء كلور وجزء كالسيوم. لماذا إذن يسلك الصوديوم طريقًا والكالسيوم طريقًا آخر؟ يتعرض الجدول الدوري لهذه القضية أيضًا:

أولًا: ينقسم الجدول الدوري إلى قسمَين رئيسيَّين وهما الفِلزَّات واللافِلزات، وتقع الفلزات يسارَ خط السلم المتعرِّج الذي يبدأ من اليمين بين عُنصرَي البورون (B) والألمنيوم (Al)، وينتهي بين عُنصرَي البولونيوم (Po) والأستاتين (At) (ما عدا الهيدروجين الذي يعتبر من اللافلزات). وتُعتبَر عناصر النحاس (Cu) والنِّيكل (Ni)، والزِّنْك (Zn) عناصرَ مألوفة ومثالًا جيدًا للفلزات؛ فهي تتمتَّع بالحالة الصُّلبة في درجة حرارة الغرفة، وتخضع للتشكيل والقولبة، كما أنها مُوصِّلات جيدة للحرارة والكهرباء، أما اللافلزات فيَصْعب قليلًا أن نضعها في مجموعة ذاتِ خصائصَ عامة، إلا أن خصائص الأوكسجين والكربون مألوفةٌ بالقدر الذي يسمح لنا بأن نُثبت أن هذه العناصر غيرُ فلزية؛ استنادًا إلى سلوكها في التفاعلات الكيميائية.

ولا تتَّضح معالمُ الخط الفاصل بين الفلزات واللافلزات؛ ومن ثَم تُسمَّى العناصر التي تقع على مقربة من خط السُّلم المتعرِّج أشباهَ الفلزات، أي إنها لا تتطابق تمامًا مع تعريفٍ من التعريفَين. ويجد الألمنيوم (Al) نفسَه في هذا الوضع، ومع ذلك فنحن نميل عامة إلى اعتبار الألمنيوم فلزًّا، وهو فلزٌّ غريب؛ لأنه خفيف للغاية (لذا يُستخدَم في قوالب المحرِّكات في عربات السباق)، بالإضافة إلى أنه يبدو مُحببًا ورماديًّا أكثرَ مما يبدو ناعمًا ولامعًا، وتكون رقائقُ الألمنيوم طيِّعةً ولامعةً لكنها تتغيَّر كُلية عند تعرُّضها للهبِ الفحم وهو نفس ما يحدث لعُلب وصفائح الألمنيوم، وهكذا يَسلك الألمنيوم سلوكَ الفلزات واللافلزات معًا، فيكون بذلك شِبهَ فلز.

والملحُ مركَّب يتكوَّن من فلزٍّ ولا فلز؛ ومن ثَم يتفاعل الصوديوم وهو عنصرٌ فلزي مع الكلور، وهو عنصر لا فلزي؛ ليُكَوِّنا كلوريد الصوديوم المعروف لدينا بملح الطعام. وتتركَّب الوصفة الثابتة لكلوريد الصوديوم من ذرة صوديوم وذرة كلور، والأساس في هذه النِّسب الدقيقة هو الطبقات أيضًا وهو ما سنخوض في شرحه الآن.

وتتحدَّد كتلة الذرة وفقًا لعدد البروتونات والنيترونات في نواتها، كما ذكَرنا من قبل، ولا تُضيف الإلكترونات، كما ذكرنا أيضًا، فعليًّا شيئًا إلى الكتلة، كما لا تُضيف البراغيث شيئًا في الواقع إلى كتلة الفيل، لكنها تُؤثر على سلوك الفيل مع أنها صغيرة الحجم؛ لأنها براغيث، كذلك الإلكترونات تُحدد السلوك الكيميائي للعنصر مع أنها صغيرة، فعندما

تكتسب الذرَّة إلكترونًا أو تفقد آخر، فإنها تُصبِح في حالةٍ من عدم اتزان الشحنة وتصبح «أيونًا»، فيُعَد هذا الأَيُون نوعًا جديدًا لهذا العنصر؛ فذرَّة العنصر التي تحتوي على عددٍ من الإلكترونات أكثرَ من عدد البروتونات هي نوع مشحون بشحنة سالبة أي أيون سالب، وتُعتبَر ذرَّة العنصر التي بها عددُ إلكترونات أقلُّ من البروتونات نوعًا مشحونًا بشحنة موجبة، أي أيون موجب، والأيون هو نوعٌ تفاعلي كما لو كان في حالةِ بحث عن شيء في الشحنة المضادة ليتَّحد معه.

وقد يبدو للوهلة الأولى أن أية كمية من الشحنات يمكن أن تُكتسَب أو تُفقَد وأن أي أيون يمكن أن يتكون، لكنه قد اتضح أن كلَّ عنصر يُفضل أن يتعامل مع كمية معيَّنة من الشحنات يمكن التنبُّؤ بها، أو يُمكِنك القول إنه نوعٌ من مستوى التأيُّن الذي يمنح العنصر الراحة عند التعامل معه، وهو المستوى الذي يُمكِن التنبُّؤ به عن طريق الجدول الدوري.

وتمتلئ الطبقة الأولى (الصف الأول) بإلكترونَين، وتحتاج الطبقة الثانية إلى ثمانية إلكترونات، وتسَع الطبقة الثالثة ثمانية عشر إلكترونًا، وهكذا. ولقد ذكَرنا من قبلُ أن الغازات النبيلة غيرُ متفاعلة/غير نشطة، ومع ذلك، فقد اتضح أن طبقاتها ممتلئةٌ أيضًا، ويُعتبَر أول مبادئ «نظرية طبقات الذرة» — النظرية القائلة إن السلوك الكيميائي يعتمد على عدد الإلكترونات في الطبقات — وأكثرُها جوهريةً هو المبدأ القائل إن الذرة تَميل إلى أن تكتمل طبقاتها امتلاءً، وثمَّة حافز مُلِح للتفاعلات الكيميائية هو أن الذرة تَميل إلى أن تمتلئ بالحمل الإلكتروني أو تُفرِّغه بأيٍّ من الوسائل المتاحة إلى أن تصل إلى هذه الحالة السعيدة؛ ومن ثَم تميل ذرَّة الكلور ذات السبعة إلكترونات في طبقتها الخارجية إلى أن تكتسب إلكترونًا؛ ومن ثَم يُصبح لديها ثمانيةُ إلكترونات، وتمتلئ طبقتها الخارجية. ويفقد الصوديوم إلكترونَه الخارجي ومن ثَم يكون له طبقة ممتلئة بثمانية إلكترونات. في حقيقة الأمر، غالبًا يقع الاختيار على الرقم ثمانية للترتيب المستقرِّ للإلكترونات، ونحن نُشير إلى ترتيب الطبقة الخارجية المكتملة والمستقرَّة تلك بالثمانيات؛ ومن ثَم يكون للموسيقيِّين ثمانيتُهم وللكيميائيين أيضًا ثمانيتُهم، لكن المفهوم يَشوبه بعضُ الغموض لدى الكيميائيِّين؛ إذ تتكون الطبقة الخارجية المكتملة للهيدروجين على سبيل المثال من إلكترونَين؛ ومن ثَم تكون ثمانيته ثنائية، فهو فعليًّا ثنائيٌّ (لحن ثنائي)، وليس ثمانيًّا!

ويُمنَح الصوديوم، إذا فقَد إلكترونًا، شحنةً موجبة صافية تُرَى كعلامة «+»، تُكتَب أعلى الرمز هكذا $Na^+$، وبالطبع يُمكن للصوديوم أيضًا أن يكتسب سبعة إلكترونات كي

يملأ ثمانيتَه، لكن الذرة تميل إلى الأسهل؛ ففقدُ إلكترون أسهلُ من اكتساب سبعة أخرى. ويُعطي اكتساب إلكترون للكلور شحنة سالبة صافية تُرَى كعلامة «−» مكتوبة فوق العنصر $Cl^-$، وتعني الشحنات المتساوية والمتضادَّة لأيونَيِ الصوديوم والكلور أن كلًّا منهما سيسعى نحو الآخر، ويتحد كلٌّ منهما بالآخر بنسبة واحد إلى واحد مكوِّنَين NaCl.

| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٢-٥: إذا فقد الصوديوم Na إلكترونًا ستمتلئ طبقته الخارجية، وإذا اكتسب الكلور إلكترونًا ستمتلئ طبقته الخارجية. وعليه، بنقصان إلكترون يُصبح الصوديوم $Na^+$، وبزيادة إلكترون يُصبح الكلور $Cl^-$. ويجتمع $Na^+$، و$Cl^-$ معًا ليكونا NaCl.

وهذا نفس ما يحدث مع كلوريد البوتاسيوم. ويقع البوتاسيوم (رمزه K مأخوذ من الكلمة اللاتينية Kaluim) أسفلَ الصوديوم مباشرة في الجدول الدوري، ويتسنَّى للبوتاسيوم بلوغُ حالة السعادة الناتجة عن وجود ثمانية إلكترونات في طبقته الخارجية بواسطة فَقْد إلكترون، تاركًا بروتونًا زائدًا طليقًا وشحنة موجبة، وتتناسب هذه الشحنة الموجبة مع الشحنة السالبة لأيون الكلور، التي تكون في أسعدِ حالاتها، وينتج عن ذلك كلوريد البوتاسيوم KCl، وهو مركَّب يُمكن أن يحلَّ محل ملح الطعام. وبالاستعانة

بالجدول الدوري نجد أن الكالسيوم يصل إلى حالة الامتلاء عندما يفقد إلكترونَين، ويكتسب شحنتَين موجبتَين $Ca^{2+}$، ومن ثم، من الممكن أن نتوقَّع ارتباطَه بأيونَين من الكلور $2Cl^{-}$؛ ليكون ملح كلوريد الكالسيوم $CaCl^{2}$.

$$Ca^{2+} + 2CI^{-} \longrightarrow CaCI^{2}$$

هذه هي المعادلة على طبق من فِضة أو على طبقة ذرِّية إذا رغبت.

ويُمكن أن تمتدَّ الفكرة لتشمل موادَّ مكوَّنة من اللافلزات أيضًا، فعلى سبيل المثال، يُمكن شرح مركَّب $H_2O$ (الماء) في ضوء الطبقات الذَّرية، وثمَّة خيط رفيع فاصل فيما يخص الاختلاف بين الرابطة الكيميائية في كلوريد الصوديوم والرابطة في الماء، وهي ما سوف نتناولها لاحقًا عندما نخوض أكثرَ في الروابط الكيميائية، لكن لا يزال إعادة ترتيب الإلكترونات لملءِ الطبقات هو أولويتَنا الأساسية.

وعدد إلكترونات التكافؤ (إلكترونات الطبقة الخارجية) التي يجلبها الهيدروجين للخليط هي إلكترون يُستدَل عليه من موقعه كأول عنصر في الجدول الدوري، والهيدروجين في حاجة ماسة إلى طبقة ممتلئة مثل التي يتمتع بها الهليوم؛ مما يعني أنه في حاجةٍ إلى إلكترون آخر. وبالمثال يكون عدد إلكترونات التكافؤ التي يجلبها الأوكسجين للتفاعل هي ستة إلكترونات يستدل عليها من موقعه كسادس عنصر في الجدول، (في الدورة الثانية عند القراءة من اليسار إلى اليمين عبر الجدول الدوري)، إلا أن الأوكسجين غيرُ مُشبع أيضًا، ويصل الأوكسجين إلى السعادة الحقيقية (حالة الاستقرار) عندما يكتمل امتلاء طبقته الخارجية كما في حالة النيون، لكن الأوكسجين يحتاج إلى أن يكتسب إلكترونَين لكي تمتلئ طبقته الخارجية، يحصل كلٌّ من الهيدروجين والأوكسجين على احتياجاتهما المتبادَلة عن طريق مشاركة الإلكترونات، لكن الأمر يستلزم وجود ذرتَي هيدروجين في هذا الخليط الخاص؛ لسدِّ حاجة ذرة أوكسجين واحدة، وعندما تُشارك كلٌّ من ذرتَي الهيدروجين بإلكترونَيها الوحيدَين مع ذرة الأوكسجين، ينتهي الحال بثمانية إلكترونات تكافؤ للأوكسجين. وفي هذا التبادل، تستطيع كل ذرة هيدروجين أن تستفيد بإلكترون من الأوكسجين، وتملأ طبقتها الخاصة وتأخذ نصيبها! والناتج عن هذا الخليط هو الماء $H_2O$.

ونحن بلا ريب نحتاج إلى الماء للحياة، وأيضًا الهواء، لكننا لا نحتاج إلى كل مكوِّنات الهواء؛ فأغلب الهواء يتكون من غاز النيتروجين الذي يوجد في شكل جزيء ثنائي الذرَّة $N_2$،

| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٢-٦: يمكن تحديد عدد إلكترونات التكافؤ (عدد الإلكترونات في الطبقة الخارجية) للهيدروجين والأوكسجين من طريق موقعهما في الجدول الدوري؛ فالعدد الذري للهيدروجين هو واحد، فيكون لديه بروتون وإلكترون تكافؤ، ويكون إجمالي إلكترونات الأوكسجين هو ثمانية إلكترونات، لكنَّ اثنَين فقط منها يوجدان في الطبقة الممتلئة، أما الستة إلكترونات الخارجية ففي طبقة التكافؤ.

ويختلط بالنيتروجين كمية كبيرة من غاز الأوكسجين الذي يتكوَّن من جزيء ثنائي الذرة ($O_2$). ويُمكِن تفسيرُ طبيعة النيتروجين كجزء ثنائيِّ الذرة بالرغبة نفسِها في الوصول إلى طبقات ممتلئة؛ إذ تحوي ذرة النيتروجين خمسة إلكترونات في طبقاتها الخارجية، وفي حالة وجود ذرتَي نيتروجين، تُشارك كلُّ ذرة شريكتها الأخرى من النيتروجين بثلاثة إلكترونات — إذ تُفيد كلٌّ منهما الأخرى بالحصول على ثمانية إلكترونات لملء طبقاتهما.

ويُعزَى غِنى الهواء الشديد بالنيتروجين أكثرَ من الأوكسجين إلى سبب كيميائي، ألا وهو قلة النشاط الكيميائي للنيتروجين، مما يجعله يُشارك في أنواعٍ محدودة من التفاعلات الكيميائية أقلَّ من الأوكسجين، فضلًا عن أن غاز النيتروجين مستقرٌّ في الجو مما يُعرِّضه لأشعة الشمس وهو ما لا يحدث مع الأوكسجين، ولكن لا يعني القول إن غاز النيتروجين

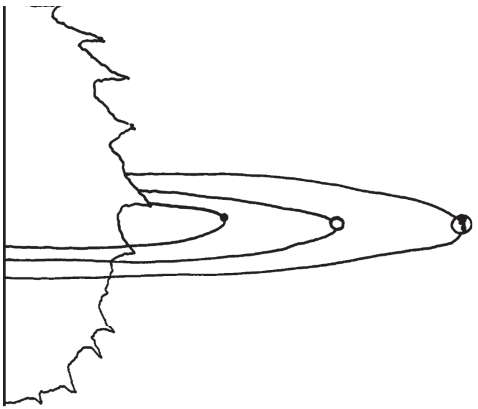
أقل نشاطًا من غاز الأوكسجين أن النيتروجين غير نشط، ففي حقيقة الأمر النيتروجين نشط جدًّا، ويستدل على ذلك من عدد المواد والمخاليط التي تحوي النيتروجين كمُكوِّن أساسي لها.

فعلى سبيل المثال، النيتروجين مكون أساسي في البارود، علاوة على أنه يُعتبر مكونًا أساسيًّا في الأحماض الأمينية الضرورية للحياة كما نعلم. وتُعطي مركبات النيتروجين اللونَ البُني المحمَرَّ للدُّخان، ويوجد حامض النيتريك في الأمطار الحامضية، ويُستخدَم سائل النيتروجين في إزالة البثور، ونفس النيتريتات التي تُستخدم لحفظ الطعام تُسبب السرطان للفئران، وتقوم مركبات النيتروجين بمسئولية إيجاد تُربة خِصبة غنية بالنيتروجين، وأيضًا بمسئولية نمو البكتيريا التي توجد عند حدوث مرض طفح الحفاض عند الأطفال، وتدخل بعض مكونات النيتروجين في المنظفات القوية، في حين يُعتبر البعض الآخر مصدرَ روائح تُضاهي في كراهيتها روائح السمك السيئة.

والغاز المضحك الذي يُستخدَم مُخدِّرًا لقلع الأسنان بلا ألم هو أحد أكاسيد النيتروجين، في حين أن مادة الـ «تي إن تي» وهو اختصار لثلاثي نترات التولوين هي مادة غيرُ بنَّاءة. وعلى الصعيد الفسيولوجي، شكَّلَت مركبات النيتروجين النشطة — مثل الكافيين والنيكوتين والمورفين والكوديين والكينين (مادة شبه قلوية شديدة المرارة تُعالج بها الملاريا) — تاريخ البشرية. ويُشارك النيتروجين في الكيمياء التي تُهدِّد الحياة بالمتفجرات المخصَّبة بالنيتروجين، وأيضًا في الكيمياء التي تحمي الحياة عن طريق الوسائد الهوائية الممتلئة بالنيتروجين؛ فالنيتروجين مادة تُسبب دمارًا شاملًا ونفعًا تامًّا في الوقت نفسِه، كيف يكون هذا؟!

ولفهم براعة النيتروجين نحتاج إلى أن نُلقي نظرة أخرى على الجدول الدوري، وبالنظر على موقع النيتروجين نجد أن هناك طريقتَين يُمكن بهما الحصولُ على طبقة ممتلئة: إما باكتساب ثلاثة إلكترونات والوصولِ إلى طبقة مكتملة العدد، كما ذكرنا من قبل، وإما بفقد خمسة إلكترونات والوصول إلى طبقة مكتملة العدد أيضًا. وكما يتضح، ثمة بعض المواقف الوسطية مثل فقد ثلاثة إلكترونات فقط، فهذا مقبولٌ للنيتروجين أيضًا؛ ومن ثَم يُمثِّل النيتروجين شخصيات عديدة، ويُمكنه أن يخضع للعديد من التحولات. وسنُواصل التعلم عن تعدد براعة النيتروجين وما تبقى من الجدول الدوري في الصفحات القادمة.

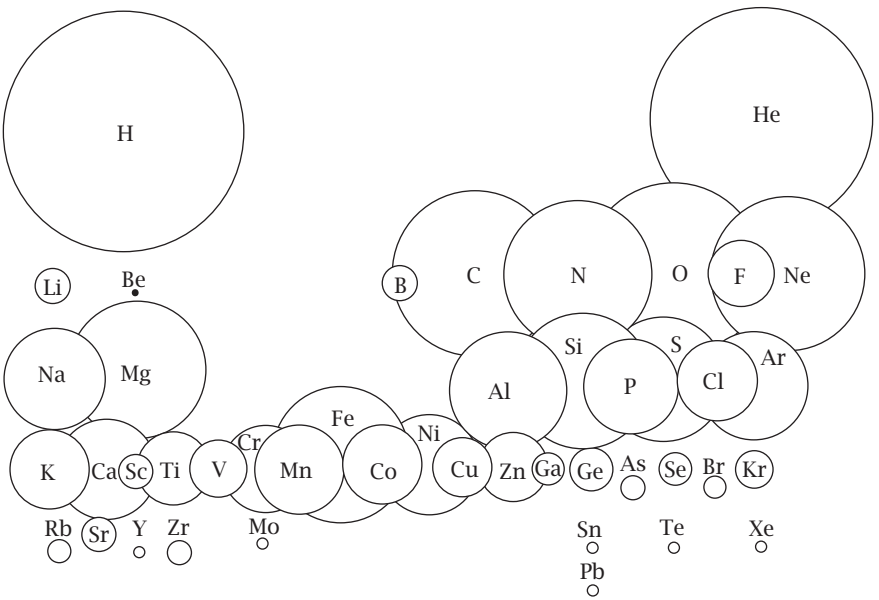
**على سبيل المثال: عناصر التنوع**



الآن وبعد أن اطلعنا على الجدول الدوري، لنقم بجولة قصيرة. يُعَد الكثير من عناصر الجدول الدوري مثل الحديد (Fe) (الرمز مأخوذ عن الكلمة اللاتينية Ferrum) والنيتروجين (N)، والفوسفور (P) والأوكسجين (O) والكربون (C)، عناصرَ مألوفة، في حين لا تكون بعض العناصر الأخرى مألوفة مثل التكنيشيوم (Tc) واللانثانم (La). فنحن نَأْلف الهيدروجين والأوكسجين؛ لوجودهما في الهواء الذي نستنشقه والأرض التي نمشي عليها، لكن مهما استنشقنا من الهواء أو حفرنا الأرض، لن نتوقع أبدًا أن نستنشق ذرة من اللورنسيوم (Lr) أو نكتشف جرامًا من السيبورجيوم (Sg)، وليست هذه العناصر غيرَ مألوفة لصعوبةِ نطقها أو استهجاء حروفها فحسبُ (مع أنه يُمكن إثارة الجدل حول هذا أيضًا)، بل هي غير مألوفة أيضًا في عِلمَي الكونيات والفيزياء، ويرتبط السبب في ذلك بما يُعرَف بنظرية الانفجار العظيم.

وطبقًا لنظرية الانفجار العظيم، نشأ عالمنا نتيجة انفجار هائل لا يُمكن تصوره (لذا سُمِّي بالانفجار العظيم)، ثم تكثفت أنقاض هذا الانفجار العظيم في البداية إلى العناصر الأخف وهي الهيدروجين والهليوم؛ لأنها تكون بسيطة نسبيًّا؛ إذ يتألف الهيدروجين من بروتون وإلكترون، ويتألف الهليوم من بروتونَين ونيترونَين وإلكترونَين. وعندما يتجمَّع عددٌ كافٍ من الذرات معًا وتبدأ الكتلة في الانضغاط تحت ثِقَل جاذبيتها، حتى تبدأ فعليًّا هذه الأنْوِية في الاندماج لتُكوِّن أنوية الذرات الأثقل، وأثقل نواة تكوَّنَت في

الكواكب الأولى في غضون عملية الاندماج، أي اندماج الأنْوية معًا، هي نواة الحديد. ولكي تَحويَ الشمس عناصرها كان لا بد أن تبدأ في عمليةِ اندماجها مع بعض الأنوية الأثقل الموجودة بالفعل، مما يحتمل أن الشمس من نجوم الجيل الثالث، أي إنها تكونَت نتيجةً لتجمع الغبار الناجم عن انفجارات نجمَين سابقَين، ومع ذلك — وحتى عند النظر إلى الوفرة النسبية للعناصر الموجودة في الشمس كما هو مبين في شكل ٢-٧ — فإنه يتبيَّن أن العناصر الخفيفة مثل الهيدروجين والهليوم لا تزال تتصدر العناصر الباقية من حيث احتلالُهما للحجم الأكبر من الشمس.




شكل ٢-٧: انتشار العناصر الموجودة في الشمس. عُدلت بِناءً على تصريح من ستيفن أي. داتش لمقال «الجدول الدوري للعناصر المنتشرة» الصادر عن مجلة «جورنال أوف كيميكال إديوكشن» ٧٦ (١٩٩٩): صفحة ٣٥٦–٣٥٨.

انتشار العناصر في شكل ٢-٧ موضَّح بمقياس لوغاريتماتي: تمثل التغييرات في أنصاف أقطار الدوائر التغيرات في الحجم أو أس الرقم عشرة مثل مقياس الديسبل، فتَزيد شدة الصوت الذي يُسجِّل مقياس ٢٠ ديسبل عشَرة أضعاف الصوت الذي يُسجل

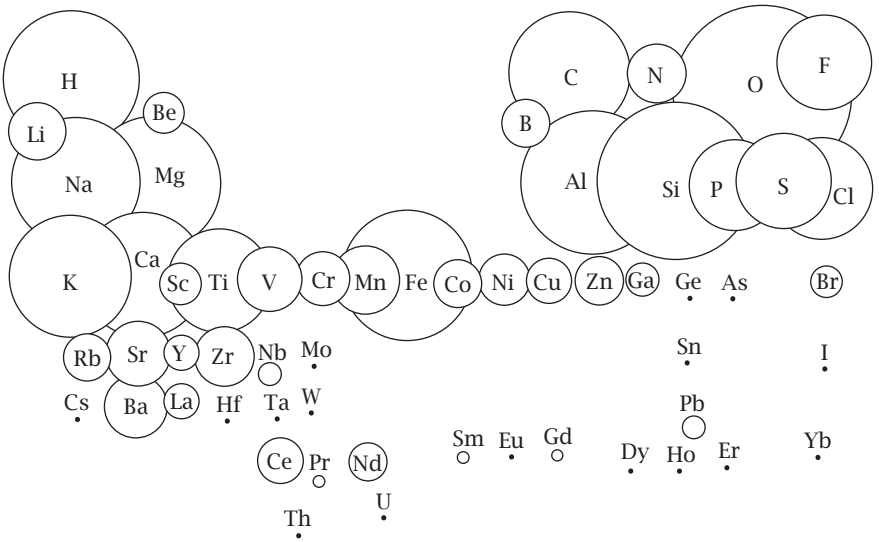
١٠ ديسبل، وشدة الصوت الذي يُسجل ٣٠ تكون مائة ضعف الصوت الذي يُسجل ١٠ ديسبل، وفي هذا الجدول الدوري يُمثل نصف قطر الدائرة المحيطة بالعنصر مضاعفات الرقم ١٠.

نحن نستخدم المقياس اللوغاريتمي لقياس وفرة العناصر؛ لوجود فرق شاسع بينها، فتُشبه محاولة مقارنة مدى انتشار العناصر، في غياب هذا المقياس، محاولة رسم جودزيلا (وحش عملاق) إلى جانب فأر في نفس الإطار (وقد يكون هذا سببَ عدم وجود فيلم يُمكن أن يحمل عنوان: «جودزيلا يتحدى الفأر الخارق»). فناطحة السحاب في الفيلم يُمكن أن تظهر بجانب جودزيلا وليس الفأر. ولن نَشْغل أنفسنا بدقة الأرقام هنا، نحن نريد فقط أن نشعر بالانتشار النسبي للعناصر، وهذا يُمكن تمثيله جيدًا بواسطة الدوائر.

ثمة قفزة بعد الهيدروجين والهليوم إلى الكربون، ويُعزى ذلك إلى أن الأنوية المركزية تكون غيرَ ثابتة على نحوٍ لا يسمح لها أن تتكوَّن في غضون عملية الاندماج النووي، وتحوي ذرة الهليوم بروتونَين في نواتها، والكربون لديه ستة بروتونات في نواته؛ لذا يمكن أن تتكوَّن ذرة كربون من اندماج ثلاث ذرات هليوم، وهي عملية تتطلب حرارة وكثافة شديدتَين لنجوم ضخمة. يعقب هذا تفضيلٌ مميز للنواة التي بها عددٌ زوجي من البروتونات في نواتها، فالأوكسجين به ثمانية بروتونات في نواته والنيون به عشرة بروتونات والماغنسيوم به اثنا عشرَ بروتونًا ... وهكذا. ويمكن شرح هذا التفضيل في ضوء نظريات الفيزياء الذرية، لكنه ليس موضوعنا الآن. وقد لاحظنا أن العناصر الضرورية للحياة مثل الهيدروجين والكربون والنيتروجين والأوكسجين والصوديوم والماغنسيوم والفوسفور والكالسيوم والحديد، وهلم جرًّا، توجد جميعها في الشمس أيضًا.

وفي بعض الأحيان تتكثَّف بقايا الانفجار العظيم وانفجارات النجوم إلى كوكب بدلًا من نجم آخر، وهو ما يُرجَّح حدوثه مع كوكب الأرض. ويمكن أن نستدل من انتشار العناصر الموجودة في قشرة أرضنا الموضحة في شكل٢-٨ أن عناصر الأرض هي بالتقريب عناصرُ الشمسِ نفسُها، ولكن مستنزفة في أكثر العناصر تطايرًا مثل الهليوم والهيدروجين.

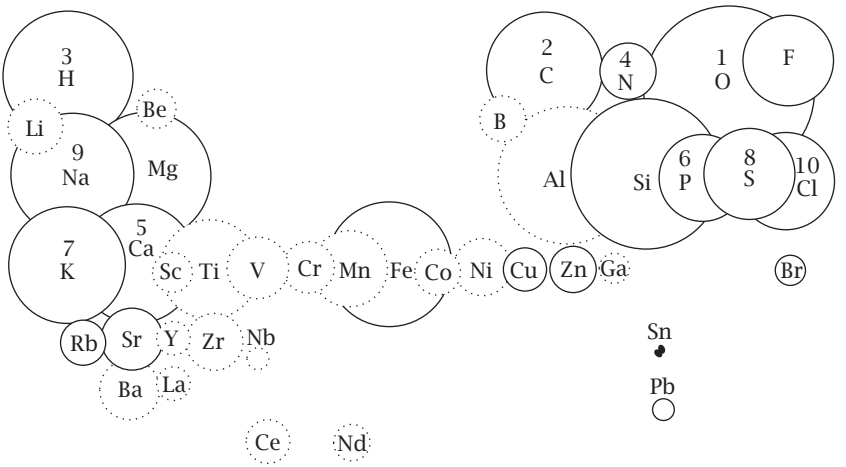
ويُوضِّح الثراء النسبي لعناصر الألمنيوم والسليكون مقارنة بالحديد والنيكل حدوثَ تغير في الاتجاه لمصلحة العناصر الأخف؛ لأننا ننظر إلى قشرة الأرض فيتضح لنا أن العناصر الثقيلة، نتيجةً للتغيرات المناخية الشديدة على مر العصور، قد اتجهت نحو باطن الأرض، أما العناصر الأخف فقد ارتفعت إلى القمة.




شكل ٢-٨: انتشار العناصر في قشرة الأرض. وقد عُدِّلت بِناءً على تصريح من ستيفين أي. داتش، «الجدول الدوري للعناصر المنتشرة» الصادر عن مجلة «جورنال أوف كيميكال إديوكشن» ٧٦ (١٩٩٩): ٣٥٦–٣٥٨.

وفي شكل ٢-٩ نُقارن الأربعين عنصرًا التي تتبوَّأ القمة في القشرة الأرضية بعناصر القمة العشَرة في جسم الإنسان،[3] مؤكِّدين مرةً أخرى لمعظم الناس أنه — وقد يكون هذا مُحبِطًا لعلماء النظريات الخاصة بالحياة خارج الأرض — يُمكن أن يكون انتشارُ العناصر في جسم الإنسان مُشابهًا لانتشار العناصر الموجودة على الأرض على نحوٍ لافتٍ للنظر، مما يَزيد التأكيد بشأن أصولنا التطورية. وفي ترتيب تنازلي للكميات، يتألَّف جسم الإنسان من أوكسجين وكربون وهيدروجين ونيتروجين وكالسيوم وفسفور وبوتاسيوم وكبريت وصوديوم وكلور، وتوجد عناصرُ أخرى لكن بكميات أقلَّ من ٠,١٪.

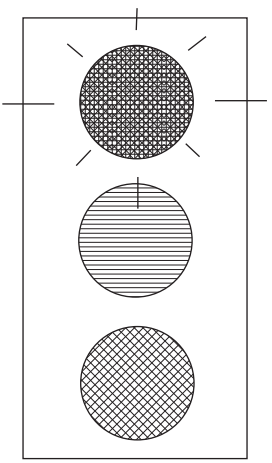
إلا أن هناك بعضَ الاستثناءات المثيرة؛ فالسليكون الذي يوجد في كلِّ حبةٍ من الرمال التي يطَؤها كلُّ مخلوقٍ يوميًّا ويستحوذ عليها كلُّ جذرٍ من جذور النباتات، لا وجود له بين عناصر القمة العشَرة في جسم الإنسان. ولا ينعدم الألمنيوم — الذي يبرز في القشرة




شكل ٢-٩: مقارنة بين عناصر القمة الأربعين الموجودة في القشرة الأرضية وعناصر القمة العشرة في جسم الإنسان، وتُرقَّم العناصر الموجودة في الجسم لبيان انتشارها، ويكون الأوكسجين المرقم برقم «١» أكثرَها وفرة، ثم يليه الكربون المرقم برقم «٢»، إلخ.

الأرضية — من عناصر القمة العشَرة بجسم الإنسان فحسب، بل أيضًا تُجرَى الأبحاث عنه لارتباطِه بتلف الأعصاب.[4] ولا يبلغ اليود أيَّ مرتبة في قائمة عناصر القمة الأربعين للقشرة الأرضية، ومع ذلك فغيابه من جسم الإنسان يتسبَّب في الإصابة بتضخُّم الغدة الدرقية. ويُمكن أن نخلص من هذه المقارنة إلى أنه ليس الوجود الفيزيائي للعنصر هو الذي يُحدِّد أهميته فحسب، بل نشاطه الكيميائي أيضًا؛ لذا اسمحوا لنا أن ننتقل إلى هذا العالم.

# تجربة ٣: كيمياء منضبطة



تلتهم النيران الأرضية الأشياء أيضًا بدرجة سريعة إلى حدٍّ ما، تتوقف على مدى قابلية الشيء نفسِه الذي تُداهمه النيران للاحتراق؛ ومن ثَم نجحَت العبقرية البشرية في اختراع مستحضَرات كيميائية لكبحِ نشاط النيران أو تثبيطه.

جيمس جويس،
«صورة للرسام في شبابه»، ١٩١٥

ارتدِ نظارة الأمان الواقية. اغرف ملعقتَي طعام (٣٠ مليلترًا) من محلول خلات الحديد (محلول الخل مضاف إليه الصوف الفولاذي المُنحل المُدرَج في «قائمة المشتريات والمحاليل»)

في طبق بلاستيكي رقيق. أضف ملعقة شاي (٥ مليلترات) من النشادر. ينبغي أن يتحوَّل لون المحلول الناتجُ من اللون البرتقالي المائلِ للبني إلى الأخضر الداكن. الآن صُبَّ مِلعقة شاي (٥ مليلترات) من فوق أكسيد الهيدروجين. يتلوَّن المحلول الناتجُ بلونٍ أحمرَ قانٍ مثل لون الجلطة الدموية الشديدة الحُمرة.

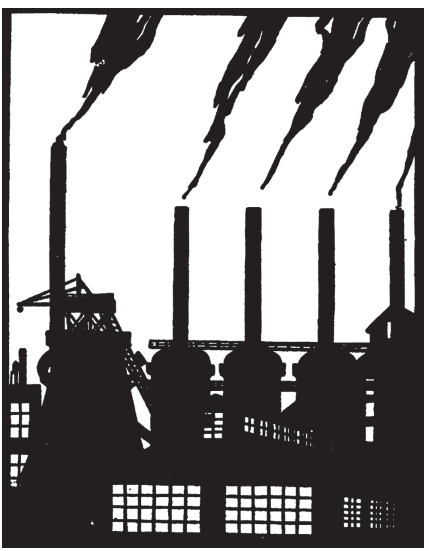
ماذا حدث إذن؟ يستوعب الحديد — شأنُه في ذلك شأنُ النيتروجين — أعدادًا مختلفةً من الإلكترونات التي ترتبط بنواته. تُعبِّر حالة تأكسُد عنصرٍ ما في البيئة المتاحة — سواءٌ كان العنصرُ وحده أو أيونًا أو متَّحدًا في مركَّب — عن حمل العنصر من الإلكترونات في هذه البيئة. يتغيَّر الحديد في التجرِبة الحاليَّة بين حالتَين مختلفتَين للأكسدة وهي: أيون الحديديك ($Fe^{3+}$ أو أيون ذو ثلاث شحنات موجبة بمعنى أنه يَفقد ثلاثةَ إلكترونات)، وأيون الحديدوز ($Fe^{2+}$ أو أيون ذو شحنتَين موجبتَين بمعنى أنه يفقد إلكترونَين). ويُعتبَر فوق الأكسيد هو العاملَ الذي سبَّب حدوث التغيير في الحديد.

حديدوز + فوق أكسيد الهيدروجين ⟵ حديديك + ماء + أوكسجين

تغير الحديد من أيون الحديدوز إلى أيون الحديديك؛ لأن فوق الأكسيد يجذب الإلكترونات بعيدًا عن الحديد. ويستخدم فوق أكسيد الهيدروجين الإلكترونات الزائدة ليتحول إلى ماء وغاز الأوكسجين الذي يخرج في شكل فقاقيع من المحلول أثناء التفاعل. ويأخذ المركب الذي يتكوَّن من الحديدوز والنشادر اللون الأخضر. وعندما يُغير فوق الأكسيد أيون الحديدوز إلى حديديك، يقوم النشادر الذي لا يزال في المحلول ولم يتغير بعد، بتكوين مركب أحمرَ مع الحديديك. ويُطلَق على تفاعلات مثل هذه عندما تكتسب العناصر إلكترونات أو تفقد بعضًا منها «تفاعلات الاختزال» (إذا اكتسبت إلكترونات) و«تفاعلات الأكسدة» (إذا فقدت إلكترونات). ولأن هذه النوعية من التفاعلات يجب أن تحدث في الوقت نفسِه؛ تُسمَّى النتيجة المشتركة بتفاعلات الأكسدة والاختزال، وهي فئة من التفاعلات ذاتُ أهمية في الماضي وفي الحاضر.

الفصل الثالث

# الأسباب، والتفاعلات، والأكسدة والاختزال



لقد كسَروا أولًا المادة الخام إلى قطع صغيرة ونظَّفوها بأيديهم ... ثم رُتِّب الفحم والمادة الخام في كومات صغيرة وفي طبقات متتالية ... وبهذه الطريقة ... يتحول الفحم إلى حامض الكربونيك، ثم إلى أكسيد الكربون، فالغرض من استخدامه هو اختزال أكسيد الحديد، أو بكلمات أخرى التخلص من الأوكسجين.

جول فيرن في كتابه
«الجزيرة الغامضة»، ١٨٧٠

من دون شك، ثَمة خطأ قويٌّ حدث بدرجة قوية وفعالة، مما جعل أجنَّة الحقيقة تنقطع أنفاسها؛ فالتنقيب عن الذهب أصبح في الوقت نفسه قضيةَ مواد، وها هو جسد الكيمياء يستعد كي تعود إليه روحه من جديد، فقد وُلد لافوازيه.

جورج إليوت في رواية «ميدل مارش»، ١٨٧١

يُغازل الإلكترون، تمامًا مثل العاشق المتقلب، أية نواة يجدها أكثرَ جاذبية، بل قد يطير إليها بسرعة فائقة. وقد شاهدنا في التجربة الأخيرة، «الكيمياء المنضبطة»، الإلكترونات وهي تترك الحديد مختالة بنفسها لتنضم إلى فوق أكسيد الهيدروجين. وصحيحٌ أن الإلكترونات كانت راضيةً بأن تظل مع الحديد ما دام لا يوجد ما هو أفضلُ منه على مقربة منها، لكنها فضلَت الذهاب بعيدًا في حال وجود فوق أكسيد الهيدروجين، وبكلمات أخرى تتوقف درجة ارتباط الحبيب بمحبوبته، أي الإلكترون بالنواة على البيئة المحيطة؛ فأيون الحديدوز هو حديدٌ فقد إلكترونَين، وأيون الحديديك هو حديد فقد ثلاثة إلكترونات. وقد تحول مركب أمونيا الحديدوز الأخضر إلى أمونيا الحديديك الأحمر؛ لأن فوق أكسيد الهيدروجين يتصرَّف مثل إسفنجة تمتصُّ الإلكترونات.

وعندما يفقد العنصر إلكترونات، يُقال إنه تأكسَد، وفي حالة التفاعل موضعِ نقاشنا، يكون للقبِ تأثيرٌ ذو مغزًى، فالأوكسجين يُركز جهوده على الحديد ليأخذ إلكتروناته، لكن اسم «الأكسدة» يُعتبَر تسمية خاطئة في تفاعلات أخرى، فلا يُشترَط وجود الأوكسجين لحدوث عملية الأكسدة، فعلى سبيل المثال: ارتدِ نظارتك الواقية، وخذ مشبك الأوراق المعدني (وليس البلاستيكي)، فُكَّ ثَنْية المشبك، وضع طرفَه المفكوك في محلول كبريتات النحاس، يكتسب المشبك طبقة نحاسية لامعة في غضون خمس دقائق. في هذه الحالة الخاصة تكتسب أيونات النحاس في المحلول الإلكترونات المفقودة من معدن المشبك، وتتحول إلى معدن النحاس، وهو تبادل للإلكترونات يحدث دون حاجة إلى الأوكسجين.

وعندما يكتسب عنصرٌ إلكترونًا يُقال إنه اخْتُزِلَ. ويصف أول اقتباس عن جول فيرن في بداية هذا الفصل مثلَ هذه العملية: استخلاص الحديد من خام الحديد. ويُعَد انصهار المعادن من أُولى التفاعلات الكيميائية المنظمة التي يُمكن التحكمُ فيها (ربما بعد الطبخ وصناعة الفخار والرسم والتخمُّر)، وعملية انصهار المعادن هي العملية التي أُطْلِقَ من أجلها مصطلح الاختزال على عملية اكتساب الإلكترونات؛ وذلك لأن المعدن المنصهر عن المادة الخام يزن أقلَّ من وزنه قبل الاستخدام، بمعنى أن وزنه قد اخْتُزِلَ.

وتُوجَد معظم الفلزات الموجودة في الطبيعة في حالة امتزاج مع لافلز أو الأوكسجين أو الكبريت أو الكلور، وهذه المعادن مركبات في حالتها الخام وليست معادنَ نقية، ويُفصَل الفلز عن اللافلز أثناء عملية الانصهار عن طريق تسخين المعدن مع مادة تتمتع بقدرة على جذب اللافلز أكبر من قدرته على جذب الفلز، وفي حالة العملية التي وصَفها جول فيرن يكون اللافلز هو الأوكسجين والمادة الثانية التي لها قدرة عالية على جذب الأوكسجين هي الكربون، الذي يدخل في تشكيل الفحم النباتي، وغالبًا تكون الأوكسيدات مثل ثاني أكسيد الكربون في الحالة الغازية التي تتصاعد تاركةً وراءها الفلز النقي، وبفَهْم التركيب الذريِّ نُدرِك أن الفلز اكتسبَ إلكترونات أثناء عملية الاختزال من خام إلى فلز؛ ومن ثَم أصبح الاختزال هو الاسمَ الذي يُطلَق على عملية اكتساب الإلكترونات. ويُدعى اختبار الفحم «أكسدة» لأنَّ الكربون يختلط مع لافلز لينقله بعيدًا، وفي معظم الأوقات يكون هذا اللافلز هو الأوكسجين. ويَفقد الكربون إلكتروناتٍ على المستوى الذري؛ لذا أصبح فقْدُ الإلكترونات معروفًا «بالأكسدة». وأصبحت الخصائص المميزة لتفاعلات الاختزال والأكسدة هي أن العنصر المُختَزَل هو الذي يكتسب إلكتروناتٍ والعنصر المؤكسَد هو الذي يفقد إلكترونات، وهذا اصطلاح يُمكِن تضمينه بإيجازٍ في العبارة الآتية: «الأكسدة هي فقدُ إلكترونات، والاختزال هو اكتساب إلكترونات.» وحينما يكون هناك أكسدة لا بد أن يُصاحبها اختزال، بمعنى أنه يجب أن يُوجَد زوجًا التفاعل معًا، فلا يُمكِن أن تُفقَد إلكترونات دون أن تذهب هذه الإلكترونات إلى مكانٍ ما.

وتُعَد محاليل كبريتات النُّحاس وخلات الحديد المعدة طبقًا للوصفات المذكورة في «قائمة المشتريات والمحاليل» أمثلةً على تفاعلات الأكسدة والاختزال؛ إذ يفقد فلزُّ النحاس في محلول كبريتات النحاس إلكترونَين ليُصبح أيون $Cu^{2+}$؛ ومن ثَم فهو متأكسد. والدخان الذي يتكون من مركبات النيتروجين والأوكسجين الموجود في نترات الصوديوم يُختزَل إلى مركبات النيتروجين والأوكسجين المتطايرة، وفي محلول خلات الحديد، يتأكسد الحديد الموجود في الصوف الفولاذي إلى أيون $Fe^{2+}$ (تذكر أن رمز الحديد (Fe) مأخوذ عن الكلمة اللاتينية Ferrum). والإلكترونات التي يفقدها الحديد يكتسبها الهيدروجين في الخل ليُشكِّل فقاعات غاز الهيدروجين التي قد تكون لاحظتها في محلول خلات الحديد.

ويُمكن إجراءُ إثباتٍ مُقنِع لحقيقة أن معظم الفلزات التي تُوجَد في الطبيعة تُوجَد في شكلِ مَخاليط (مع لا فلزات) عن طريق جولة على شاطئ أو في منطقة صخرية؛ حيث يجد المرءُ الرمالَ والصخور بكافة الأشكال والألوان، لكن إذا كان المرء محظوظًا بما يكفي

فإنه يجد قطعًا من الفلزات النقيَّة. هذا ليس معناه أنه لا توجد فلزَّات نقية. فمِن الممكِن العثورُ على كتل ذهبية نقية كما حدَث في فترة التهافت على ولاية كاليفورنيا التي حدثَت بعد اكتشاف الذهب فيها، ولكن مثل هذه الاكتشافات يَندُر حدوثها وهو الأمر الذي يُعطي للذهب قيمتَه المادية الثمينة. وقد كانت الرغبة في تحويل أكثر الفلزات شيوعًا إلى ذهبٍ هي أحدَ أهداف الخيمياء (وهي ممارسة قديمة غير نظامية للكيمياء بزَغَت في الإسكندرية بمصر، ثم في أوروبا في العصور الوسطى). وقد اعتقد الخيميائيون أنه إن كان بمقدورهم اكتشافُ وصفة كيميائية صحيحة، فسوف يتمكَّنون من تحويل الفلزات الأخرى إلى ذهب؛ استنادًا إلى التحويل الغنيِّ بالألوان مثل الذي شاهدناه في تجرِبتنا «الكيمياء المنضبطة». وقد أشار جورج إليوت إلى «التنقيب» في الاقتباس ببداية هذا الفصل من كتاب «ميدل مارش»، وأشار إلى أن الخيميائيِّين قد فشلوا في العثور على طريقة لصُنع الذهب، ولكنَّ جهودهم قادت إلى الكثير من الاكتشافات الجوهرية، مثل اكتشاف الأوكسجين باعتباره عنصرًا نقيًّا، وقد قام بهذا الاكتشاف العديدُ من العلماء في الوقت ذاتِه تقريبًا، وكان من بينهم أنطوان لافوازيه، الكيميائيُّ الفرنسي الذي أشار إليه جورج إليوت على أنه روح الكيمياء. وفي حين وُلد لافوازيه ليكون روح الكيمياء، فإنه أُعدِم على المقصلة في الثورة الفرنسية! قد تكون هناك متعة للكيمياء لكن لا يمكن أن تنطبق هذه الكلمات دائمًا على السياسة!

وكما تُوضح جولتنا السريعة منذ كيمياء ما قبل التاريخ إلى الثورة الفرنسية، فقد لعبت تفاعلات الأكسدة والاختزال المتزاوجة دورًا مستمرًّا في تاريخ البشرية، وفي دراستنا عن كيمياء ما قبل التاريخ، التي استغرقت جملة واحدة (وهي الجملة السابقة) لم نذكر تفاعل الأكسدة والاختزال الخاص بإشعال النيران ذا الأهمية القصوى، ولكننا سنُضمِّنه الآن؛ لأنه قد اتضح أن الاحتراق هو أكثر تفاعلات الأكسدة والاختزال شهرةً، وفي الوقت نفسِه أكثرها تمتعًا بسمعة سيئة!

## على سبيل المثال: رجال الإطفاء وكيمياء الاحتراق

الاحتراق، بكافة أشكاله، تفاعل خلَّاب، بدءًا من لهب الشمعة الخفيف، ومرورًا بالراحة التي تبعثها المدفأة ووصولًا إلى الترحيب الحار لنار المخيم، لكن يعتبر الاحتراق في هذه الحالات تحت السيطرة، أما في الحالات التي يخرج الاحتراقُ من تحت السيطرة يتحوَّل ذلك الافتتانُ إلى رعبٍ تام، ولحسنِ الحظ، يُوجَد أناسٌ يُواجِهون ذلك الرعبَ باستمرارٍ لحمايةِ

آخَرين من المخاطر، ويُمكِن لأية دراسةٍ مُوجزة لكيمياءِ الاحتراق أن تُوضِّح مدى صعوبة التحدِّي الذي يُواجِهونه. ويُعَد تفاعلُ الاحتراق البُدائي هو تفاعُلَ أكسدةٍ واختزال مباشِر، وعادةً يكون المركَّب المكوَّن في المقام الأول من الهيدروجين والكربون، أي الهيدروكربون، هو الوقود، وعندما يمتزج الهيدروكربون بالأوكسجين يتفاعلان معًا ليُنتِجا ثانيَ أكسيد الكربون ($CO_2$) والماء وحرارة.

هيدروكربون + أوكسجين ⟵ ثاني أكسيد الكربون + ماء + حرارة

وفي هذا التفاعل يتأكسَد الكربون (يكتسب الكربون أوكسجين هذه المرة حرفيًّا)، ويكتسب غازُ الأوكسجين ما يكفي من إلكترونات لجذب الهيدروجين وتكوينِ الماء؛ ومن ثَم فهو يُختزَل.

الجازولين هو أحدُ الهيدروكربونات، والتفاعلات التي تَحدث في أسطوانات السيارات هي تفاعلات احتراق، يمتزج فيها الهيدروكربون والأوكسجين معًا كما في المعادلة السابقة؛ لذلك يتكون عادم السيارة، الذي هو ناتج التفاعل، في الأساس من ثاني أكسيد الكربون والماء. والسكر والنشا من الهيدروكربونات أيضًا، ولما كان الأوكسجين هو الغازَ الذي

نتنفَّسه، وعليه تكون الحرارة الناتجةُ عن عملية الهضم تفاعُلَ احتراق بالمثل. وهذا الهضم هو نوعٌ من الاحتراق يُمكِن برهنتُه بإطفاء شمعة؛ فاندفاع الهواء الذي به قليلٌ من الأوكسجين والغنيُّ بثاني أكسيد الكربون يُطفِئ اللهب ويمنع عنه الأوكسجين. والخشب والورق والعُشب الجاف هيدروكربونات في الأساس؛ فهي تقوم بدور الوقود الممتاز، وتُسَعِّر نيرانًا مدمِّرة. ويُسبِّب استهلاك النار للأوكسجين، وتكوُّنُ ثاني أكسيد الكربون الاختناقَ لرجل الإطفاء الذي تُعَد مَخاطره جسيمة تمامًا مثل مخاطر الجرح الحراري.

ويُمكن توضيح ضرورة الأوكسجين للاحتراق عن طريق تنكيس كوبٍ شفاف غير بلاستيكي على شمعة، وبعد أن يُستنفَد كل الأوكسجين الموجود في الكوب تنطفئ الشمعة. وقد يصعب قليلًا إثباتُ أن ثانيَ أكسيد الكربون هو ناتجُ الاحتراق، لكنه ليس مستحيلًا: ارتدِ نظارة الأمان الواقية والقفازات. خذ كوبَين متشابهَين غير بلاستيكيَّين (مصنوعَين من الزجاج الخالص). ضع في أحدهما أربع ملاعق شاي (٢٠ مليلترًا) ماء. أضف نقطتَين من دليل قلوية ماء حوض السمك المطلوب شراؤه في «قائمة المشتريات والمحاليل». ضع كلا الكوبَين على فرخ ورق أبيض لتوضيح الرؤية، ينبغي أن تُلاحظ أن الكوب الذي يحوي الماء قد تلوَّن بلون أزرق مخضرٍّ باهت.

أشعل الشمعة تَحصل على لهب قويٍّ مستمر. نكِّس الكوب الفارغ فوق الشمعة. اترك اللهب مشتعلًا لفترة. انزع الكوب عن الشمعة ثم صُبَّ فيه على الفور محلولَ دليل القلوية من الكوب الآخر، سُدَّ فوهة الكوب بسرعة بكفِّ يدك، ثم رُجَّ المحلول قليلًا حتى يمتزجَ بالغازات المتصاعدة من لهب الشمعة. ضع الكوب مرة أخرى على الورقة البيضاء، ولاحِظ تغييرَ اللون؛ يُغير ثاني أكسيد الكربون الموجودُ في الغازات المتصاعدة من لهب الشمعة دليل الماء من الأزرق المخضر إلى الأصفر.

كيف لنا أن نَعرف أن ثانيَ أكسيد الكربون هو الذي أحدث هذا التغيير؟ خذ كأسًا نظيفًا وجهز محلولًا آخر مكوَّنًا من: أربع ملاعق ماء صغيرة (٢٠ مليلترًا) مع نقطتَين من دليل قلوية حوض السمك، وانفخ بالونًا ثم اضغط على فوهته لتُبقيَه مغلقًا، ثم ضع فوهته في طرَف ماصَّة، ثم ضع الطرف الآخر للماصة في محلول دليل القلوية. عندما تُخفِّف من ضغطتك على فوهة البالون يصنع ثاني أكسيد الكربون المنطلق مباشرة من رئتَيك، عند نفخ البالون، فقاعاتٍ في المحلول، وتُشاهد الدليل يتحول مرة أخرى من الأزرق المخضر إلى الأصفر.

ويُمكِن إثبات وجود الماء الناتج من الاحتراق باستخدام مكعَّب ثلج وكوب غير بلاستيكي أو طبق فنجان غير بلاستيكي. نكِّس الكوب على لهب شمعة لمدة دقيقة مع

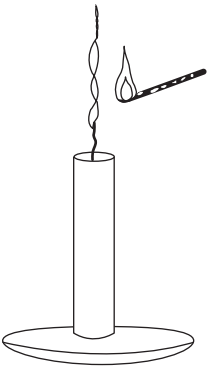
مكعَّب الثلج بحيث يُوضَع في وضعٍ متوازنٍ فوق الكوب من الخارج. تتكثَّف الرطوبة الخارجة من اللهب في جوانب الكوب. ضع مكعبَ الثلج بالتبادل على الطبق، ثم عرِّض الطبق للَّهب دون أن يلمس اللهب. تتكثَّف الرطوبة في قاع الطبق.

يُمكِن أحيانًا ملاحظةُ الرطوبة على ملعقة معدنية معرَّضة للهب، ولا يكون الماء وحدَه هو المادةَ التي نَلْحظها على الملعقة؛ إذ يتكون السُّخام أيضًا. ولا تكون عملية الاحتراق دائمًا تفاعلًا نظيفًا وبسيطًا كما هو موضَّح سابقًا، لكنها خليطٌ معقَّد للعديد من التفاعلات التي ينتج عنها بعضُ الهيدروكربونات أو السُّخام، وينشأ أكثرُ آثار الاحتراق إثارةً عن عدم اكتمال الاحتراق وأكثر التفاعلات تعقيدًا.

فعلى سبيل المثال، يُمكِن أن تنتشر النيران ككائن حي يتحرَّك في موجات؛ فجزء من عملية الانتشار يُعزَى إلى تساقط أو تطاير الحُطام المشتعل، لكن لأن اللهب هو غازات محترقة، فيُمكن لهذه الغازات والنيران أن ترحل أينما ترحل الريح، ولكي ترى أن اللهب يحوي غازاتٍ محترقة؛ جرِّب التجربة الآتية: حاول أن تعثر على منطقةٍ خالية من النسمات، وأخلِ المنطقة من أية مادة قابلة للاشتعال (بما في ذلك الشعر المتساقط والملابس). ارتدِ نظارةَ الأمان الواقيةَ. أشعل شمعة بعود ثقاب خشبي. أبقِ العود جانبًا وهو لا يزال مشتعلًا. أطفئ الشمعة، ثُم على الفور أحضِرْ عود الثقاب المشتعلَ بالقرب من الفتيلة المطفأة دون أن تجعل عود الثقاب يلمس الفتيلة كما هو موضح في شكل ٣-١. يقفز اللهب من عود الثقاب إلى الشمعة إذ ينتقل اللهب بسرعة إلى الفتيلة عن طريق غازات الاحتراق. ربما يتعين عليك أن تُحاول عددَ مرات قبل أن تُجرِيَها على نحوٍ صحيح، لكن حتمًا ستنجح.

ولا تنتشر النيران عن طريق القفز عبرَ الهواء أو الانتقالِ عن طريق الحُطام المتطايِر فحَسْب؛ فالتبايُن في ضغطِ الهواء يرتبط أيضًا بالنيران؛ لأنها تستهلك الأوكسجين وتُنتِج حرارة، ويُسبب استهلاكُ الأوكسجين خَواءً جزئيًّا في مصدر اللهب المملوء بالهواء القادم من الجوانب. ويُسبب التيار الهوائي الساخن فوق اللهب حدوثَ تيار هوائي صاعد. وتتحد جميع القوى معًا لخلق قدر لا بأس به من تيارات حمل حراري وتباينٍ في الضغط. وكما أن تباين الضغط الجوي في الغلاف الجوي يُفضي إلى حدوث الأعاصير، كذلك يُفضي تباينُ الضغط حول النيران إلى حدوث ما يُعرَف «بالانفجار»، وهو دوامة نارية تتنقل بسرعة تُعادل تقريبًا سرعةَ الرياح.

وقد ذكر نورمان مكلين في بحثه الرائع «شباب ونيران» أن هذه الظاهرة الطبيعية لا يُمكن فَهمُها فَهمًا جيدًا نظرًا إلى قلة الملاحظات المباشرة المتاحة؛ إذ ينبغي أن يكون



شكل ٣-١: قرِّب عود ثقاب مشتعلًا من فتيلة شمعة مطفَأةٍ توًّا، فتجد أن اللهب يقفز عبر الغازات المحترقة ويُشعِل الفتيلة المطفأة مرة أخرى.

الملاحِظ هو أحدَ الناجين من هذه النيران والشخص الذي ينجو من النيران لا ينتظر في الجوار ليُلاحظ ماذا يحدث.[1] ومع ذلك فطبقًا للتفاصيل التي أوردها مكلين نجد أن شخصًا واحدًا من رجال الإطفاء المُستخدِمي المظلات هو مَن تَمكَّن من النجاة من إحدى هذه الدوامات النارية، لقد احترقت الأجزاء العارية منه في أول الانفجار ثم طُمِر وجهه في رماد الجثث المحترقة حتى انقضى الانفجار، وهو حدثٌ استغرق خمس دقائق حسب ساعته، وأردف أن دوامة النيران سحبته عدة مرات عن الأرض، لكنه كان قادرًا أن يحفظ أدنى حد من التنفس بسبب الأوكسجين الذي كان قريبًا من الأرض. لقد كان هذا الأوكسجين ضروريًّا للاحتراق الذي يُحدِث داخل جسمه تفاعلات الأكسدة والاختزال التي كان ينبغي أن تستمر؛ إذ كان من المقدَّر له أن يعود ليتلوَ قصته.

ومع أن تفاعلات الأكسدة والاختزال منتشرةٌ للغاية، فإنها بالطبع لا تُمثِّل كل جوانب الكيمياء؛ فثمة نوعٌ آخر شائعٌ جدًّا وغاية في الأهمية من التفاعلات موجود في التفاعلات الحمضية-القاعدية التي تَحدث في الهواء وفي البشَرة والمعدة والبالوعة، وحتى في حمامات السباحة وأحواض الأسماك؛ فدليل قلوية حوض السمك الذي استخدمناه في الكشف عن ثاني أكسيد الكربون هو دليلٌ للأحماض والقواعد؛ فهو يعمل على الكشف عن ثاني أكسيد الكربون لأن ثانيَ أكسيد الكربون المذاب في الماء يجعل الماء مَشوبًا قليلًا ببعض الخواص الحامضية. أيبدو الأمر مثيرًا؟ واصل القراءة.

# تجربة ٤: دليل الكرنب الأحمر

تُشبِه التراجيديا الحامض اللاذع؛ فهي تُبدِّد كل شيء ما عدا الحقَّ النفيس.

الأديب البريطاني ديفيد هربرت لورانس
في «خطابات ديفيد هربرت لورانس»، ١٩٢٠

لقد كان معروفًا منذ أوائل القرن السابع عشر على الأقل، وربما قبل ذلك بكثير، أن بعض النباتات والأزهار التي تتمتَّع بألوان كثيفة مثل الكرنب الأحمر، تحوي صِبْغة تتخذ ألوانًا متعددة في البيئات الكيميائية المختلفة، وتُسمَّى مثلُ هذه الصبغة بالدليل؛ لأن لونها يدل على بيئتها، ويُستخدَم دليل الكرنب الأحمر للاستدلال على ما إذا كان المحلول حامضيًّا أو قاعديًّا، وباختصارٍ المحاليل الحامضية هي محاليلُ لاذعةٌ مثل عصير الليمون والخل، والمحاليل القاعدية هي محاليلُ كاوية ومُرَّة مثل الصابون السائل والنشادر المنزلي.

ولكي نرى كيف يعمل هذا؛ ارتدِ نظارتك الواقية ثم أَضِفْ نحو ملعقة كبيرة (١٥ مليلترًا) من دليل الكرنب الأحمر (مُعَد كما هو مذكور في قائمة المشتريات والمحاليل) إلى كوب (٢٤٠ مليلترًا) ماء، ولاحِظ اللون، ينبغي أن يكون أرجوانيًّا باهتًا. الآن قُم بإعداد محلول مُشبَع من بيكربونات الصودا المذابة في الماء، والمحلول المشبع محلول لا يقبل المزيد من المادة الصُّلبة لكي تذوبَ فيه، وبيكربونات الصودا غير قابلة للذوبان التامِّ في الماء؛ من ثَم لا يتطلَّب الأمر أكثر من مِلعقتَين كبيرتَين (٣٠ مليلترًا) من بيكربونات الصودا لكوب الماء الواحد (٢٤٠ مليلترًا). ويُصبح المحلول مشبعًا عندما تبدأ بيكربونات الصودا في الترسُّب في قاع الكوب ولا يذوب المزيدُ منها. أضف دليل الكرنب الأحمر إلى هذا الخليط، وسيتحول إلى اللون الأزرق. تذوب بيكربونات الصودا إلى أيونَين في الماء، وهما أيون الصوديوم وأيون كربونات الهيدروجين، المعروف بالبيكربونات. ويكون أيون الصوديوم متعادلًا وأيون البيكربونات قاعديًّا. يتحول دليل الكرنب الأحمر إلى اللون الأزرق في محلول بيكربونات الصودا؛ ومن ثَم يُشير اللون الأزرق إلى أن المحلول قاعدي عند استخدام دليل الكرنب الأحمر. دليل الفينول الأحمر المستخدم لاختبار قلوية مياه حمام السباحة الماء برتقالي محمر، الخل أصفر، النشادر بنفسجي محمر، بيكربونات الصودا وردي، دليل البروموثيمول الأزرق المستخدم في اختبار قلوية ماء حوض السمك الماء أزرق مخضر، الخل أصفر باهت، النشادر أزرق باهت، بيكربونات الصودا أزرق، دليل الكرنب الأحمر الماء بنفسجي، الخل وردي فاقع، النشادر أخضر، بيكربونات الصودا أزرق مخضر.

أضف بعضًا من دليل الكرنب الأحمر إلى عيِّنة من الخل، وطبعًا يُعرَف الخل بأنه حامضي، يُغير الخل لونَ دليل الكرنب الأحمر إلى اللون الوردي اللامع؛ ومن ثَم يُشير اللون الوردي إلى أن المحلولَ حامضي عند استخدام دليل الكرنب الأحمر.

وباستخدام كوب (٢٤٠ مليلترًا) من عيِّنات من محاليل بيكربونات الصودا المشبعة والخل والنشادر والماء؛ يُمكِنك أن تُنشِئ تلك المحاليل، ولاحِظ الألوان التي تنتج عندما تُضيف دليل الكرنب الأحمر ودليل حمام السباحة ودليل حوض السمك.

| دليل الفينول الأحمر المستخدم لاختبار قلوية مياه حمام السباحة | |
|---|---|
| الماء | برتقالي محمر |
| الخل | أصفر |

| | |
|---|---|
| النشادر | بنفسجي محمر |
| بيكربونات الصودا | وردي |

| دليل البروموثيمول الأزرق المستخدم في اختبار قلوية ماء حوض السمك | |
|---|---|
| الماء | أزرق مخضر |
| الخل | أصفر باهت |
| النشادر | أزرق باهت |
| بيكربونات الصودا | أزرق |

| دليل الكرنب الأحمر | |
|---|---|
| الماء | بنفسجي |
| الخل | وردي فاقع |
| النشادر | أخضر |
| بيكربونات الصودا | أزرق مخضر |

والآن خُذ بعضًا من بيكربونات الصودا الصافية المطلوبِ شراؤها في قائمة المشتريات والمحاليل، ثم أضِف دليل الكرنب الأحمر. ينبغي أن تَلْحظ محلولًا لونه وردي باهت. تُعتبر بيكربونات الصودا حامضيةً قليلًا؛ لأن ثانيَ أكسيد الكربون يذوب في الماء ليُكوِّن حامضَ الكربونيك. الآن خُذ محلول بيكربونات الصودا ودليلَ الكرنب الأحمر ثم صبَّ ببطءٍ وحذرٍ السائلَ الأزرق الذي يعلو بيكربونات الصودا غيرِ المذابة (عملية تُعرَف «بالتصفية» لدى خبراء الكيمياء والخمورِ على حدٍّ سواء) على محلول بيكربونات الصودا ودليل الكرنب الأحمر. في نهاية المطاف ينبغي أن يتلوَّنَ السائلُ بلون قريبٍ جدًّا من لونِ الدليل في الماء الصافي، لماذا؟ لأن الحامض يُعادل القاعدةَ والعكس صحيح، وما هو المحلول المتعادل؟ الماء هو المحلول المتعادل، وماذا كان يُستخدَم قديمًا لعلاج حموضة المعدة؟ إنها بيكربونات الصودا.

هنيئًا مريئًا!

الفصل الرابع

# المواد القاعدية

اطلب من آسيا كوبًا من الكريمة اللاذعة؛ فستكون كعكتُك خفيفة وبدون الكثير من الصودا، وهو ما لا أُحبِّذه.» كان هذا هو الطلبَ الأول. لقد اندفع ديمي إلى الطابق السفلي، ثم عاد بالكريمة بوجه عابث؛ لأنه تذوَّقها وهو في الطريق ووجدَها لاذعة جدًّا، حتى إنه توقع أن الكعكة ستكون غيرَ صالحة للأكل. اقتبسَت السيدة جو هذه الواقعة لتُلقي محاضرة قصيرة وهي على السُّلم عن الخواص الكيميائية للصودا، ولم تُنصِت إليها ديزي، لكن ديمي أصغى إليها وفَهِمها كما يتضح من ردِّه الذي كان مختصرًا لكنه شامل؛ إذ قال: «نعم، أنا

أفهم؛ فالصودا تُحوِّل الأشياء اللاذعة إلى أشياءَ مذاقُها حلو، وإذا أخفقت في عملها فستكون خفيفة، فلنُشاهِدك وأنت تقومين بإعدادها يا ديزي.

الروائية لويزا ماي ألكوت في كتابها
«رجال صغار»، ١٨٧١

يُعَد تفاعل ديمي اللاذعُ — الحلو في الاقتباس السابق تفاعل حامضي — قاعديًّا؛ فبيكربونات الصودا قاعدية (كما وجدنا في تَجرِبة دليل الكرنب الأحمر)، والكريمة اللاذعة هي خليط حامضي؛ فالكريمة اللاذعة تكون لاذعة بسبب النواتج الحامضية الناجمة عن فعل البكتيريا. وقد شاهدنا في تجرِبة صاروخ الزجاجة محلولًا حامضيًّا آخرَ وهو الخل الذي يلتقي ببيكربونات الصودا، ويُؤدِّي إلى تفاعل انفجاري، وما جعل كعكة ديزي خفيفة هو ذلك النوع من التفاعل نفسِه، لكن بمستوًى أبسط:

الحامض + بيكربونات الصودا ⟵ حامض الكربونيك ⟵ ثاني أكسيد الكربون (غاز) + ماء

يتفاعل الحامض مع بيكربونات الصودا، وينتج حامض الكربونيك الذي يتحول سريعًا إلى ثاني أكسيد الكربون وماء. وثاني أكسيد الكربون هو الغاز الذي تسبب في دفع السدادة في تجربة صاروخ الزجاجة، وهو الذي أحدث الفقاقيع في كعكتنا الصغيرة الرقيقة. والسبب الذي جعلنا نُنبهك لشراء بيكربونات الصودا في «قائمة المشتريات والمحاليل» بدلًا من البكينج بودر هو أن البيكينج بودر يَحوي مركبًا حامضيًّا مثل كريمة الطرطير. وتعمل كريمة الطرطير كعاملٍ للتخمير بمعنى أنها عندما تذوب في الماء مع بيكربونات الصودا فإنهما يتفاعلان ويُكوِّنان فقاقيع.

ولا تُنتج كل التفاعلات الحامضية القاعدية مثل هذه النواتج المتطايرة، ويُعَد الخل حامضًا يدل على ذلك تغير لونه إلى اللون الوردي عند إضافة دليل الكرنب الأحمر. أما النشادر فهو قاعدي بسبب تغير لونه إلى اللون الأزرق عند إضافة دليل الكرنب الأحمر، لكن عند إضافة الخل والنشادر معًا بدون إضافة الدليل، لا تظهر أمارات التفاعل الكيميائي المعتادةُ، فلا يكون هناك أدخنةٌ جديدة ولا رَغاوى ولا انبعاثٌ للحرارة أو للضوء، ولا تغيير في اللون ولا تكوين مواد صلبة، ولولا الرائحةُ النفاذة للخل والرائحة النفاذة للنشادر، لَبدا الأمر كأنه مجرد إضافة سائلَين مائيَّين شفافَين معًا، لكن إذا أُضيفَت

ملعقة صغيرة (٥ مليلترات) من دليل الكرنب الأحمر إلى كوب (٢٤٠ مليلترًا) يحوي واحدًا منهما فقط قبل إضافتهما معًا، تكون النتيجة تغيُّر لون المحلول، ويُستخدَم الدليل ليُبين حدوث التفاعل الكيميائي عندما لا توجد علامات أخرى واضحة.

ما هي الأحماض وما هي القواعد إذن؟ الخل فعليًّا هو محلولٌ مُخفَّف لحامض الخليك في الماء، ما يقرب من ٥٪ محلول، لكنه يستطيع أن يُبرِز بدقةٍ الخواصَّ المميزة للحامض؛ فهو لاذع ويُحول دليل الكرنب الأحمر إلى اللون الأحمر أو الوردي، ويتفاعل مع القاعدة ليُكوِّن الماء. ويُبرز محلول بيكربونات الصوديوم بشدة العديدَ من الخواص المميزة للقاعدة؛ فهو مُر المذاق، ويُحول دليل الكرنب الأحمر إلى اللون الأزرق، ويتفاعل مع الحامض ليُكوِّن الماء. وتُعتبَر آخر خاصية مذكورة لكلٍّ منهما فيما يخص تفاعلهما معًا هي بالفعل الخاصية المحددة لكلٍّ منهما؛ لأن التفاعلات الحامضية القاعدية تحدث في الوقت نفسِه، شأنها في ذلك شأن تفاعلات الأكسدة والاختزال؛ فمادةٌ واحدة تتفاعل كحامض، ومادة واحدة تتفاعل كقاعدة، والحامض يُعادل القاعدةَ، والقاعدةُ تُعادل الحامض.

وقد أدرك الناسُ فكرة التعادل — إبطال خواصِّ إحدى المواد بخواص مادة أخرى — منذ أن وصَف أقدم دساتير الصيدلة قشر البيض المُحمص المسحوق كدواء مُريح لمشكلات المعدة. وقشرة البيضة هي في الأصل كربونات الكالسيوم، وهي نفس المادة التي تُكوِّن الطباشير، وهذه المادة لكونها قاعدية يُمكِنها أن تُلغِيَ تأثير الحموضة الزائدة في المعدة، وتنشأ هذه الحموضة طبيعيًّا في المعدة كي تُساعِد على هضم الطعام. وتُسمَّى المواد القاعدية أيضًا بالمواد القلوية، ويُعزى جزءٌ من هذه التسمية إلى التقاليد القديمة؛ فكلمة Alkali هي كلمة عربية الأصل «القلوي»، مثل غيرها من الكلمات العربية الأصل أيضًا مثل الخيمياء alchemy، والكحول alcohol، والجبر algebra، والقبة alcove، والخوارزمي algorithm، ويُعزى جزءٌ آخرُ إلى تجنب الارتباك، فعندما ندعو شيئًا «مادة أساسية» سيتبادر إلى أذهاننا أن المقصد أنه «مادة جوهرية» وليس شيئًا يتفاعل مع الحامض.

ويُمكن أن نجد كثيرًا من أمثلة التفاعلات الحامضية القلوية في الطهي، مثل تفاعل كريمة الصودا اللاذعة المذكور في «رجال صغار»، علاوة على أنه من النتائج المؤسِفة للأمطار الحامضية (التي سوف نُناقش تركيبها فيما بعد) أن الحامضَ في المطر يتفاعل مع الكربونات الموجودة في الحجر الجيري والرخام، وهو الأمر الذي يُسبِّب تآكل التماثيل التي تمكَّنَت من النجاة بدون صدأ أو تحلُّل لآلاف السنين قبل مجيء عصر الصناعة.

(وقبل أن نُلقِيَ باللوم التام على عصر الصناعة ينبغي أن نتذكر أيضًا أن بكتيريا الطاعون الأسود، والجدري، والزهري قد تمكنَت من أن تنجوَ لعدة سنوات قبل أن تتمكن التكنولوجيا الحديثة من أن تُطيح بها.) وتبرز قدرة الأمطار الحامضية على إذابة الرخام خاصية أخرى مشتركة بين الأحماض والقلويات، ألا وهي أنها موادُّ مُسبِّبة للتآكل.

ويتناولُ اقتباس قصة «صاحب الظل الطويل» لجين ويبستر الذي ذكَرناه في المقدمة خاصيةَ التآكل، ونُكرره هنا نظرًا إلى ملاءمته للسياق.

> عليَّ أن أذهب إلى المختبر وأُمعِن النظر في بعض المواد من أحماض وأملاح وقلويات، لقد أحدث حامض الهيدروكلوريك ثقبًا كبيرًا بحجم الطبق في معطف المختبر من الأمام. إذا نجحت هذه النظرية فسأكون قادرًا على معالجة هذا الثقب بالنشادر القوي، أليس كذلك؟
>
> جين ويبستر في رواية
> «صاحب الظل الطويل»، ١٩١٢

والطريف في الأمر أن القاعدة تُعادل الحامض؛ لذا يفترض طلاب الكيمياء أن استعمال القاعدة سيُبطِل تأثير الحامض ويُعيد المادة المتلاشية من المعطف، ومن المثير أن تَلْحظ أن قراء أوائل القرن العشرين كان يُفترَض أنهم يفهمون المزحة دون الحاجة إلى شرحها، وأن طلاب الكيمياء في سنتهم الأولى في أوائل القرن العشرين كانوا يُشجعون على استخدام مواد كيميائية نشطة بدرجة كافية تجعلها تُؤدِّي إلى تآكُل المعطف، لكن مفهوم الحامضية أصبح مألوفًا تمامًا في القرن الحادي والعشرين، فنحن نتحدث عن اللسان اللاذع والنقد اللاذع. وتُمثِّل المحاليلُ الحامضية جزءًا من مطابخنا، فالخل هو محلول حامض الخلِّيك، والليمون هو محلول حامض السِّتريك، كما تحوي بيكربونات الصودا حامض الكربونيك. وتُعتبر المواد والمحاليل القاعدية أيضًا جزءًا من خبرتنا العامة؛ فالنشادر محلول قاعدي، ويُستخدَم اللي في إزالة الانسدادات من المصارف الصحية، وكثيرًا ما نستخدم المصطلحات الأقدم كالقلوي للإشارة إلى المواد القلوية مثل «البطاريات القلوية»، أو ضبط قلوية مياه حمامات السباحة. ومرض القلاء وهو حالة خطيرة تَزيد فيها نسبة القلوية في الدم؛ بسبب نقص ثاني أكسيد الكربون، يُمكن أن تُسبِّبه زيادة التهوية الرئوية.

وفي حقيقة الأمر لا يُمكن للجسم البشري ككلٍّ أن يُؤدِّيَ وظائفه بشكل جيد إلا ضمن نطاقٍ محدود جدًّا للقلوية والحامضية، لكن قبل أن تتخلص من الصلصة الساخنة،

حرصًا على صحتك، عليك أن تطمئنَّ أن الجسم البشري قد ابتكر طريقةً لحفظ الدم عند مستوى القلوية الضروري المناسب للوظائف حتى إذا اسْتُخْدِمَ الخل في صلصة السلطة أو حتى إذا استنفدت المياه الغازية. فالدم سائلٌ مُنظِّم للقلوية، وهو محلول ذو نِسَب في غاية الدقة مكوَّن من أحماض ضعيفة وقواعدَ ضعيفة؛ ومن ثَم لن تُسبِّب إضافةُ النسب الضئيلة من الحامض أو القاعدة حدوثَ تغيير ملحوظ في درجة القلوية، وقد تكون أكياس الملاكمة تشبيهًا جيدًا للسوائل المنظمة؛ فقد يترنَّح الخَصم غيرُ المتزن إثر لكمةٍ واحدة في مكان مؤثِّر، في حين أن كيس الملاكمة المتزنَ يُمكِنه أن يمتص لكمات عديدة ويرجع إلى وضعه مرة أخرى لاستقبال المزيد. وكذلك يكون الحال مع المحلول المنظِّم الذي يُمكِنه أن يمتصَّ صدماتِ هجوم المزيد من الأحماض والقواعد، ثم يرتد مرةً أخرى إلى وضعه الأصلي تقريبًا، ويُمكن شرحُ هذا الموقف بسائل منظم آخر وهو اللبن.

خذ وعاءَين شفافَين صغيرَين مما هو مطلوبٌ في «قائمة المشتريات والمحاليل»، ثم أضف إلى كل منهما نصفَ كوب (١٢٠ مليلترًا) من اللبن الكامل الدسم، ويجب استخدام لبن كامل الدسم؛ لأن البقر لا يهتمُّ كثيرًا بشأن السعرات الحرارية، ويُوفِّر المحاليل المنظمة التي تُكوِّن اللبن الكامل الدسم وغير المقشود. خُذ وعاءَين شفافَين صغيرَين آخَرَين، ثم أضف إلى كلٍّ منهما نصفَ كوب (١٢٠ مليلترًا) ماء. أضف إلى كلٍّ من الأوعية الأربعة عيناتٍ من دليل الفينول الأحمر من عُبُوَّةِ اختبار قلوية ماء حمامات السباحة المطلوبة في «قائمة المشتريات والمحاليل»، ولا يصلح دليل الكرنب الأحمر لهذه التجربة؛ لأنك ستُضطَر أن تُضيف كمياتٍ كبيرةً منه حتى يُصبح اللون واضحًا، ويُؤدي المزيد من السائل إلى تخفيف اللبن؛ ومن ثم يحدث خلل في فاعلية السائل المنظم، أما عن دليل قلوية حمام السباحة، فإن إضافة المزيد منه تُؤدي إلى إكساب اللبن والماء لونًا أصفر باهتًا.

والآن أضِف قطرةً من محلول بيكربونات الصودا السائل الذي يعلو المادةَ الصُّلبة غير المذابة إلى إحدى عينات الماء وإحدى عينات اللبن، وإذا كانت القطَّارة المستخدمة للعين مُتاحة فذلك أيسرُ لك، وإلا يُمكنك أن تضع ماصَّة في المحلول وتُغطيَ طرف الماصة بإصبعك حتى يُمكِنك أن تجذب قطرة، ثم قَلِّب المحاليل. ينبغي أن يتحوَّل لون المحلول الذي يحوي الماء المضاف إليه بيكربونات الصودا إلى اللون الوردي الفاقع، في حين يظل لون المحلول الذي يحوي اللبنَ المضاف إليه بيكربونات الصودا كما هو؛ أصفرَ باهتًا دون أن يتغير.

وأفضل طريقة للمقارنة هي وضع الوعاءَين على فرخ ورق أبيضَ، والنظرُ مباشرة إلى الوعاء من أسفل، فثَمة اختلاف جليٌّ في لون المحلول الذي يحوي الماء والدليل قبل وبعد

إضافة بيكربونات الصودا، في حين لا يتغيَّر لون المحلول الذي يحتوي على اللبن والدليل قبل وبعد إضافة بيكربونات الصودا؛ فاللبن نَظَّم تأثير بيكربونات الصوديوم أو عادَلَه.

وثاني أكسيد الكربون هو الذي يقوم بعملية التنظيم هذه في الدم، وتُعَد بيكربونات الصودا أحدَ محاليل حامض الكربونيك المتكون عندما يصبح الماء مُشبعًا بثاني أكسيد الكربون، ولقد شاهدنا في تجربة الكرنب الأحمر أن بيكربونات الصودا هي حامضية بمعدل ضئيل. ويتشبَّع دم الإنسان بثاني أكسيد الكربون؛ فهو الناتج النهائي لعملية الهضم، ويُكَوِّن ثاني أكسيد الكربون حامض الكربونيك في الدم. وبيكربونات الصوديوم أو صودا الخبيز قاعدية كما رأينا في تجربة الكرنب الأحمر. والبيكربونات المكونة عن طريق إزالة ذرة هيدروجين واحدة من حمض الكربونيك تنتجها الكُلْيتان لتعمل كمادةٍ قاعدية في الدم، ويستخدم ثاني أكسيد الكربون ليُكوِّن المواد الحامضية والقلوية في الدم، وعندما تزداد نسبة الحموضة في الدم ترتفع نسبة البيكربونات لتُعادل الزائدَ من الحامض. وعندما تزداد نسبة القلوية في الدم، يُعادل حامض الكربونيك الزيادة من القلوية، ولكن كما يتضح من إضافة محلول بيكربونات الصودا مباشرة إلى المحلول المكوَّن من اللبن والدليل، فإن لدى السوائل المنظمةِ قدرةً محدودةً لامتصاص الحامض أو القاعدة؛ فاللبنُ سيأخذ سريعًا ظلًّا ورديًّا من ذاته. وإذا كانت أطرافُ التوازن في الدم بعيدةً جدًّا بطريقة ما، فإنه من الممكن حدوثُ القلاء أو الحموضة، وهما حالتان طبِّيتان في غاية الخطورة.

ولا يُعتَبر الدم هو النظامَ الوحيد في الجسم الذي يستلزم وجود بيئة حمضية قلوية ثابتة بدرجة معقولة، فمادة الأسبرين المنظِّمة لسيولة الدم هي أسبرين عُدِّل كي لا يُصبِح شديدَ الحامضية فيُهيج المعدة. ويُخلَط الكثير من الشامبوهات والصابون على نحوٍ خاص، بحيث لا تختلف حموضتها كثيرًا عن حموضة البشرة أو الشعر. وإذا كان هناك اختلاف في خاصية الحموضة فإنها ستُسبب تفاعلًا حامضيًّا-قاعديًّا عند استخدامها، وقد يُسبِّب التفاعل الحامضي-القاعدي تلفًا للخلايا الحساسة للجلد أو العين، وهذا هو ما يجعلك تَحرص على استخدام القفاز ونظارةٍ واقية للعين عند إجراء هذه التجارِب.

وقد يُعلَن عن المنتجات المتوازنة حمضيًّا أو قاعديًّا تحت اسم «متعادلة pH»، وpH يُقصَد به الأُسُّ الهيدروجيني. ويُمكنك أن تستدل عليه بالعودة مرة أخرى إلى عدة اختبار قلوية حمام السباحة. فدليل الفينول الأحمر يُشار إليه باسم مؤشر الأُسِّ الهيدروجيني (pH) أيضًا، فيدل pH على مقياس مدى حامضية المحلول أو قاعديته، فهي مقياس صفة الحامضية في المحلول.

ولأن ثمة الكثيرَ من أزواج المواد التي تقوم إحداهما بتحسين الأخرى أو إبطال مفعولها، فثمة الكثير من المواد التي يُمكِن تصنيفُها على أنها أحماض وقواعد، لكن سيَنصبُّ تركيزنا على أكثر المجموعات شيوعًا وهي المواد التي تُنتِج أَيُونات الهيدرونيوم والهيدروكسيد المتعددة الذرات، وهما أساس الحامضية والقاعدية في الماء، وكلمة متعدِّدة تعني أنها تحوي أكثرَ من واحد؛ فالأيونات المتعددةُ الذراتِ هي أيونات تتألف من أكثرَ من ذرة، وينشأ أيون الهيدرونيوم من اتحاد أيون هيدروجين من الحامض مع الماء، ويكون للأيون الناتج المتعدِدِ الذرات شحنةٌ موجبة: $H_3O_+$، ويتكوَّن أيون الهيدروكسيد عندما تنتزع المادة القلوية ذرة هيدروجين من الماء، ويكون للأيون الناتجِ شحنةٌ سالبة $OH^-$. ويقيس الأس الهيدروجيني (pH) عددَ أيونات الهيدرونيوم الموجودة في عينة من المحلول؛ فالمحاليل الحامضية تحوي عددًا أكبر من أيونات الهيدرونيوم والمحاليل القلوية تحوي عددًا أقل. لاحظ أنه إذا كان من الممكن أن يتحد أيون هيدروكسيد مع أيون هيدرونيوم، فإن أيونَ الهيدروجينِ الزائدَ الموجودَ في أيون الهيدرونيوم يُمكن أن يتحد مع أيون الهيدروكسيد؛ ومن ثم يمكن أن تُلغِيَ الشحنة الموجبة الشحنة السالبة، ويكون الناتج جُزيئَين من الماء، فالحامض والقاعدة يُعادل أحدهما الآخر.

$$H_3O^+ + OH^- \longrightarrow H_2O + H_2O$$

أو برموز أكثر اختصارًا:

$$H_3O^+ + OH^- \longrightarrow 2H_2O$$

يتدرَّج مقياس pH من ٠ إلى ١٤، فعندما تُساوي pH ٧ تكون متعادلة، ولا يُعتبر مقياس pH مقياسًا طوليًّا مثل المسطرة أو الترمومتر، لكنه نوع من أنواع المقياس اللوغاريتمي مثل مقياس ديسبل، فهو يُماثِل موقف جودزيلا مقابل الفأر الخارق الذي تعرَّضنا له من قبل عند عرض الانتشار النسبي للعناصر. وحتى نتمكن من أن نَقيس المحاليل الحامضية والقاعدية في نفس الرسم البياني، علينا أن نَنتقيَ مقياسًا غير خطي. ووفقًا للأُسِّ الهيدروجيني (pH) يُعتبَر المحلول الذي يُسجِّل ٣ تزيد قلويته ١٠ أضعاف المحلول الذي يُسجِّل ٢، والمحلول الذي يُسجل ٤ تزيد قلويته ١٠٠ مرة عن المحلول الذي يُسجل ٢. ولنقولها بشكل أكثر بساطة، كلما ازداد الأس الهيدروجيني (pH) زادت قلوية المحلول وقلت حامضيته.

لكن لماذا يوجد دليل الأس الهيدروجيني (pH) ضمن عدة اختبار ماء حمام السباحة؟ لماذا يجدر بنا أن نعرف مدى حامضيةِ ماء حمام السباحة أو قلويتِه؟ دعونا نَخُضْ أكثرَ في هذا الموضوع.

## على سبيل المثال: الأس الهيدروجيني (pH) لماء حمام السباحة

تُعتبَر كيمياء حمام السباحة معقَّدة إلى حدٍّ ما، وسوف نخوض في تفاصيلَ أكثر ونحن نتناول هذا الموضوع، لكن قبل أن نغوص أكثرَ في هذا الموضوع، حريٌّ بنا أن ندرس أولًا مؤشر الأس الهيدروجيني، سندرس هنا الأسَّ الهيدروجيني (pH) لماء حمام السباحة، وكيفية تأثيره على كيمياء حمام السباحة.

وتُعزى أحدُ أسباب أهمية ضبط الأس الهيدروجيني (pH) لماء حمام السباحة في المحلول إلى أن الناس بالطبع لا يرغبون في أن يَسبحوا في محاليلَ حامضيةٍ مثلِ الخل، أو قلويةٍ مثلِ النشادر، وسبب آخر هو أن حمامات السباحة ستكون بِرَكًا كبيرة راكدة بدون كلِّ هذه المِضخَّات والمرشحات، فبدون هذه الأشياء ستكون معقلًا للطحالب والبكتيريا والبعوض. ولمكافحة هذا التكاثر الطبيعي غالبًا يُضاف الكلور إلى الماء في شكل هيبوكلوريت الصوديوم، وهو نفس المادة المستخدمة التي تُمثِّل المكوِّن النشط في مواد التبييض المنزلية، ويُعتبَر هيبوكلوريت الصوديوم قلويًّا ضعيفًا والكربونات كذلك. إلا أن

حل مشكلة التكاثر الطبيعي لا يكون سهلًا مثل إلقاء القليل من مواد التبييض، فيجب أن تظل نسبة الكلور مرتفعة حتى تمنع نموَّ البكتريا من دون أن تهيج عين الفرد الذي يَسبح في الحمام وأنفه، ويجب أن تظل نسبة الكلور ثابتة إلى حد ما أثناء التعرُّض لأشعة الشمس، ولاختلاف درجات الحرارة وأسطح المعادن والبلاستيك والسيراميك.

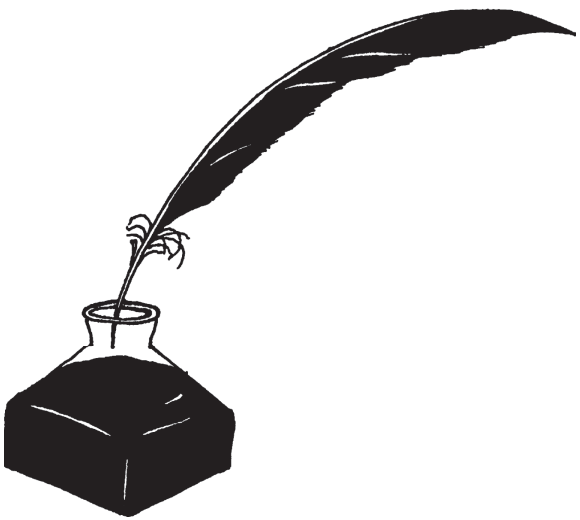
ويُستخلَص أفضل تأثير لمكافحة البكتيريا من المادة المستخدمة في مواد التبييض عندما يكون ماء حمام السباحة حامضيًّا، لكن ليس جيدًا أن يسبح الفرد في ماء حامضي، كما أن المحلول الحامضي يُمكن أن يعمل على تآكُل التجهيزات المعدِنية المصنوع منها مواسير المياه والمرشحات والمضخَّات، وبالمثل يمكن أن يكون محلول مياه حمام السباحة المحتوية على نسبة زائدة من القلوية مادةً مسببة للتآكل أيضًا؛ ومن ثَم ينبغي تحقيق التوازن، فأيُّ فردٍ امتلك حمام سباحة أو كان لديه تجرِبةٌ مع صيانة حمام السباحة يَعي أهمية القيام بهذا العمل يوميًّا في أثناء الأوقات التي يتَزايد فيها استخدامُ حمام السباحة، بل حتى إنه ينبغي أن يكون هذا العمل كل ساعة إذا لم تُتَّخَذ الخطوات لتنظيم محلول حمام السباحة. يحدث الإجراء المنظم في حمامات السباحة عن طريق وجود الكميات الكافية من كلٍّ من مادة التبييض والحامض، ويُشار إلى «الكميات الكافية» في كُتيبات صيانة حمامات السباحة بـ «إجمالي القلوية»، وهي الكميات التي يجب قياسها وتنظيمها جنبًا إلى جنب مع الأسِّ الهيدروجيني (pH)، ومع نسبة الكلور في الحمام، ويمكن تعديل نسبة القلوية في الحمام بإضافة المادة القلوية الموصوفة في الكتيب، لكن إذا أُضيف الكثير جدًّا من المادة القلوية، تبزغ مشكلة أخرى؛ ألا وهي القشرة.

والقشرة هي طبقة صُلبة صخرية، يُمكن أن تتكون داخل الأنابيب والأوعية التي تُستخدَم مع الماء العَسِر، وقبل توافر عوامل تحويل الماء العسر إلى ماء يسر، كانت القشرة شيئًا معتادًا ومألوفًا. تتكون القشرة غيرُ القابلة للذوبان من أيونات الكالسيوم عند توافر أيون الكربونات. وتُبرِز هذه الحقيقةُ مرة أخرى تعددَ استعمالات الكربونات. ولقد رأينا أن ثانيَ أكسيد الكربون يُكوِّن الكربونات؛ ومِن ثَم حامضَ الكربونيك في الماء، واستخدمنا بيكربونات الصوديوم (بيكربونات الصودا) كمادةٍ قلوية، وأخيرًا أشرنا إلى أن البيكربونات يُمكِنها أن تكون موادَّ صلبة غير قابلة للذوبان إلى حد ما، وهذه المواهب المتعددة لأيون البيكربونات تجعل بيكربونات الصودا مفيدةً في أوجُه أخرى عديدة بخلاف الطهي؛ فبيكربونات الصودا يُمكن أن تكون مزيلًا جيدًا للروائح؛ لأنه في إمكانها أن تتفاعل مع كلٍّ من المركبات الحامضية والقاعدية ذات الرائحة الكريهة، وتكون مركبات غير متطايرة، عديمة الرائحة. ثمة الكثير من الكيمياء في صندوق صغير!

ويوجد بعض الكالسيوم والمعادن الأخرى في أي مياه تتخلل الأرض؛ لذا إذا تُرِكَت مياه حمام السباحة بنسَبٍ كبيرة من المادة القلوية، فإنها ستكون عكرة أكثر فأكثر، وفي أفضل حالاتها ستحوي جزيئاتٍ عالقةً من الأملاح غير القابلة للذوبان، أما في أسوأ الأحوال فستُكوِّن المزيد من القشرة. ويُسمَّى ظهور المادة الصلبة في المحلول السائل «بالترسيب» تمامًا مثلما تُسمَّى الأمطار بالترسيب أو الهطول؛ بسبب ميل المواد الصلبة إلى أن تبزغ من المحلول، تمامًا كما تبزغ الأمطار من السماء.

وسنرى في الفصل القادم بعض المحاليل الأخرى التي تتكون من الموادِّ الصلبة، بالإضافة إلى بعض الأسباب والتعليلات والاستخدامات المفيدة لتفاعلات الترسيب القشرية هذه.

# تجربة ٥: النقطة الزرقاء والحبر الأسود



لقد أمعن دكتور أركي النظر فيها، كما لو كانت كأسًا مليئةً بالتفاعلات الكيميائية.

الروائية ويلا كاثر في روايتها
«أغنية القُبَّرة»، ١٩١٥

## النقطة الزرقاء

ارتدِ نظارة الأمان الواقية، ثم أضف ملعقة كبيرة (١٥ مليلترًا) من بيكربونات الصودا إلى نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) ماء، اترك المادة غيرَ المذابة لتستقرَّ في قاع الكوب (يستغرق هذا الأمر نحو دقيقة واحدة). اسكب بحذرٍ السائلَ الشفاف في كوب آخر تاركًا المادة الصلبة. اسكب ملعقة كبيرة (١٥ مليلترًا) من محلول كبريتات النُّحاس المذكور في «قائمة المشتريات والمحاليل» إلى محلول بيكربونات الصودا المصفَّى، يتكوَّن في الحال رقائقُ زرقاء جميلة تترسَّب في المحلول، وينبغي أن ترى بعض الفقاعات، ويتلوَّن السائل العالق فوق النقطة الزرقاء المترسبة باللون الأزرق الفاتح. وتنتج الفقاعات عن تفاعل الحامض الزائد في محلول النحاس مع أيون البيكربونات.

ويرجع حدوث تفاعل النقطة الزرقاء إلى أن الماء المُصفَّى من بيكربونات الصودا يحوي صوديوم وبيكربونات مذابَين؛ فكَميةٌ صغيرة من البيكربونات تفقد أيون هيدروجين، وتُعطيه إلى الماء، وتصبح أيون كربونات، ويحتوي محلول النحاس على أيونات نحاس وأيونات كبريتات. وما إن يلتقي أيونُ النحاس أيونَ الكربونات حتى يحدث الحب من أول نظرة، ويتحد هذان الأيونان ويتشبَّثان معًا بشدة، في حقيقة الأمر يتشبث أحدهما بالآخر، فيكونان مادة صلبة وينعزلان عن المحلول؛ فهما يترسبان.

## الحبر الأسود

ارتدِ نظارة الأمان الواقية، أضف ملعقة صغيرة (٥ مليلترات) من فوق أكسيد الهيدروجين إلى ربع كوب (٦٠ مليلترًا) من محلول خلات الحديد (انظر قائمة المشتريات والمحاليل). ينبغي أن يتغير لون المحلول إلى بُني محمر مبهج؛ نظرًا إلى تحوُّل أيون الحديدوز إلى أيون حديديك. أضف برفق نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) من الشاي البني البارد المختمر. ينبغي أن تحصل على راسب أسود طري يترسب في نهاية المطاف في القاع. اسْتُخْدِمَت هذه المادة فيما مضى كحبر أسود، وقد استُخدِم هذا التفاعل الترسيبي لإنتاجه.

الفصل الخامس

# شركاء الكيمياء:
# من يقوم بماذا لمصلحة من؟

ما أعنفَ أثرَ هذا الفعل الشنيع عليه! لقد اندفع عبر غياهب عقله وبدَّدها، لقد سلط الضوء على أحد جوانبه وألقى بالغمام على الآخر، لقد تفاعل مع روحه ... مثلما تُؤثِّر كواشفُ كيميائية معينة على أحد المخاليط العكرة عن طريق ترسيب أحد العناصر، وإنتاج محلول رائقٍ من العنصر الآخر.

فيكتور هوجو، «البؤساء»، ١٨٦٠

لا يعني المحلول «الرائق» للكيميائي ذلك المحلولَ الذي لا لون له، لكنه يعني المحلول الذي لا يحوي موادَّ صُلبة عالقة به، فتفاعُل الترسيب هو التفاعل الذي يختلط فيه محلولان شفافان مكوِّنَين مادةً صلبة في المحلول. تُرى لماذا يُقرِّر محلولان شفافان أن يُكوِّنا مادة صلبة؟ تأمل معي الموقف الاجتماعي التشبيهي الآن: أتى إلى حفل اثنان من المدعوِّين معًا؛ لأنه من الملائم أن يستقل الأشخاص السيارة نفسَها ما دام الطريق واحدًا، إلا أنهما ينفصلان في أثناء السهرة، ويتواصل كلٌّ منهما مع أناس آخرين، وإذا وجد كل واحد منهما، في الغرفة التي تعج بالناس، شخصًا ما وأقام معه صلة وثيقة خاصة، فقد يترك الحفل مع ذلك الشخص وقد يرتبطان معًا بكل توفيق. كذلك الحال في الكأس التي تعج بالأيونات، إذا وجد أيون أيونًا آخر وكوَّن معه رابطة قوية سيَنتج عن ذلك مادةٌ صلبة، وعندما يرتبط أيونان ليُكوِّنا مادة صلبة، هذه المادة الصلبة تُسمَّى «ملحًا».

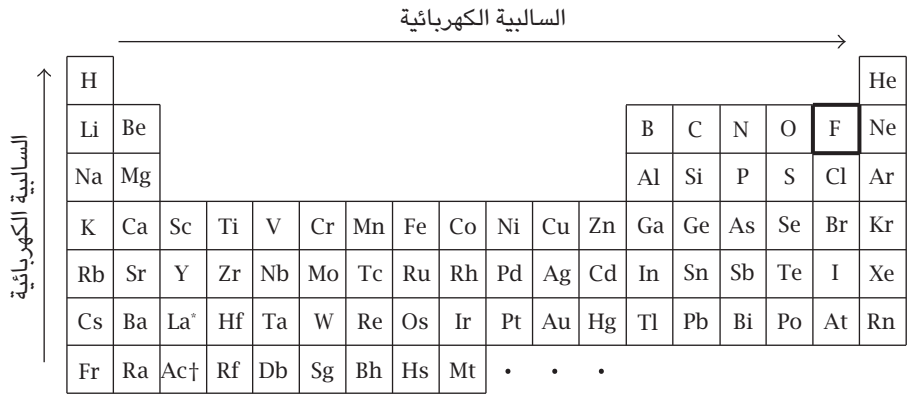
وللأسف قد يتطوَّر هذا التشبيه الاجتماعي! حتى الأنواع الكيميائية المترابطة يُمكن إغواؤها لتُغيِّر شريكها إلى حين: ارتدِ نظارتك الواقية مرة أخرى دقيقة، وأذِبْ ملعقة صغيرة (٥ ملیلترات) من حجر الشبَّة في نصف كوب (١٢٠ ملیلترًا) ماء ثم أضف أقل من ربع ملعقة صغيرة (١ ملیلتر) من النشادر وقلِّب. تُشاهد راسبًا أبيض غليظ القوام. أضف أربع قطرات من المحلول المخفض لقلوية ماء حوض الأسماك ثم قلِّب جيدًا. استمرَّ في إضافة قطرات المحلول إلى أن يذوب الراسب الأبيض ويُصبح محلولًا رائقًا مرة أخرى. يُعتبَر النشادر مادة قاعدية والمحلول المخفَّض للقلوية حامضًا (تذكر أنه كلما انخفض الأسُّ الهيدروجيني (pH) زادت حامضية المحلول). وسواءٌ تكوَّن محلولٌ أم لا فإن هذا يتوقف على محيط الملح.

ويمكن أن يتطور التشبيه الاجتماعي مرة أخرى. يُعتبَر الذوبان عكس الترسيب، وفي حالة الغياب التام للماء تُعتبَر كل وحدات الملح صُلبة، إلا أن الماء من الممكن أن يكون مدمرًا للأسرة؛ فيُمكن لجزيئات الماء أن تندس بين الأيونات. وملح الطعام، كلوريد الصوديوم، صلب بشكل كافٍ في عبوته قبل استخدامه في الطعام، لكن عندما يكون مبللًا تَشقُّ جزيئات الماء طريقها بين أيونات الكلوريد وأيونات الصوديوم وتفصلهما عن بعضهما البعض. لماذا إذن لا يندس الماء بنفسه بين أيونات الكربونات وأيونات النحاس في كربونات النحاس غير المذابة في التجربة السابقة؟ الأمر يقتصر على مجرد اعتبارها صفقة: بمعنى أنه إذا كان الانفصال أكثر كلفة من الفوائد المحتملة، فيظل الاتحاد قائمًا، إذا لم يكن كذلك، فلنرَ ماذا سيحدث.

لفهم العوامل المتضمَّنة في تحليل الكلفة والفائدة في ذوبان الملح، نحتاج أن نسترجع مرة أخرى فكرة قدمناها من قبل: لقد ذكرنا أن الذرات تميل إلى أن تكتسب أو تفقد إلكترونات، وإذا قامت بهذا الصنيع، اقتربت من الحالة المثلى لطبقات مشبعة، كما ذكرنا أيضًا أنه عندما تقوم اللافلزات بعملية الاتحاد، فإنها تميل إلى أن تُشارك بالإلكترونات على غير المعتاد لتُشبع حاجاتها. وكما يتضح، فإن بعض العناصر لديها القدرة على جذب الإلكترونات بطريقة أقوى من غيرها، ويُطلَق على القدرة على جذب الإلكترونات «السالبية الكهربائية» وتعتمد السالبية الكهربائية على موقع العناصر في الجدول الدوري.

ومن بين جميع العناصر في الجدول الدوري، يُعتبَر عنصر الفلور أكثرَ العناصر سالبية كهربائية كما هو موضح في شكل ٥-١ مما يُرجِّح أن الفلور هو العنصر الذي يأخذ نصيب الأسد من الإلكترونات من بين بقية العناصر. وتتكالب في مركبات الفلور الإلكترونات حول الفلور أكثر من أي عنصر آخر. وفي الجدول الدوري كلما كان العنصر أكثر قربًا من الفلور زادت سالبيته الكهربائية؛ لأن السالبية الكهربائية هي قياس مدى جاذبية العناصر للإلكترونات عندما تكون في اتحاد مع عنصر آخر، ولا ينطبق هذا مع العناصر النبيلة بدءًا من الهليوم He وصولًا إلى الرادون Rn؛ فهذه العائلة لا تُكوِّن مركبات تحت الظروف العادية.

أليس هذا أمرًا جيدًا؟ فالجدول الدوري لا يُخبرنا عن عدد البروتونات في النواة وعدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة للعنصر، وبعض الشيء عن تفاعلية/نشاط العنصر من خلال العائلة التي ينتمي إليها فحسب، بل يُمكن أن يعمل الجدول الدوري أيضًا كوسيلة للتنبُّؤ بالسالبية الكهربائية النسبية، ويُمكننا الحصول على تفسير لهذه المطابقة عن طريق فهم التركيب الذري: فلا تحوز العناصر الواقعة كلما اتجهنا نحو قمة الجدول الكثير من الأغلفة التامَّة الامتلاء، فيُمكِن للإلكترون الجديد الشعورُ بالمزيد من الانجذاب نحو الأنوية الموجَبة الشحنة دون وجود إلكترونات أخرى تعوق طريقه. يستمتع الفلور بحاله كأكثرِ العناصر سالبيةً كهربائية في الجدول الدوري ومرجع ذلك سببان على الأقل؛ الأول: أن الفلور ليس لديه سوى طبقةٍ واحدة مملوءة بالإلكترونات، وثانيًا: أنه العنصر الوحيد — دون كل عناصر الصف الثاني التي ليس بها غِلاف مملوء — الذي يتمتع بأكبر شحنة نووية؛ فهو يَحوي تسعة بروتونات. والعنصر الوحيد في الصف الثاني الذي له شحنة نووية أكبر هو النيون وهو يحوي كلَّ الإلكترونات التي يحتاجها. ماذا عن الهيدروجين إذن؟ لا يمتلك الهيدروجين طبقة مشبعة، وبإضافة إلكترون واحد للهيدروجين سيُصبح

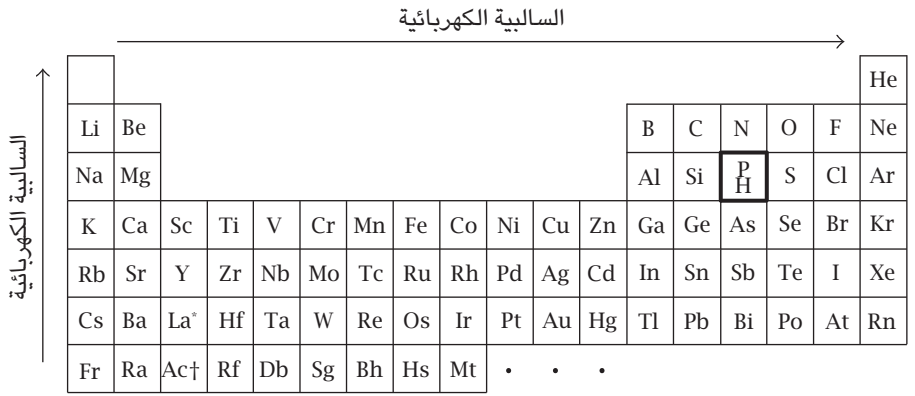



| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

شكل ٥-١: الجدول الدوري موضحًا اتجاهات السالبية الكهربائية، فتميل الإلكترونات إلى أن تُصبح أكثر سالبية كهربائية كلما اتجهنا نحو اليمين وإلى قمة الجدول. ويُعتبَر الفلور أكثرَ العناصر سالبيةً كهربائية. ولا تدخل العناصر النبيلة ضمن نطاق السالبية الكهربائية؛ لأنها لا تدخل عادة في تفاعلات كيميائية.

معرضًا تمامًا للأنوية المشحونة بشحنات موجبة. لماذا لا يتمتع الهيدروجين بسالبية إلكترونية عالية؟ لأن الأمر يتوقف على الحجم حتى في المستوى الذرِّي.

وعادة تميل الذرات إلى أن تزداد حجمًا أكبر وأنت تتحرك إلى أسفل في الجدول الدوري؛ لأن العناصر لديها الكثير من الإلكترونات، وهذه الإلكترونات تملأ الأغلفة، ولا يتمتع الهيدروجين بالقدر نفسِه من السالبية الكهربائية مثل الفلور؛ لأنه لم يكتسب أي غلاف مملوء مثل الفلور، إلى جانب أنه غاية في الصغر على أن يُوفِّر بارتياح شحنةً سالبة كبيرة. ويُشبِه الفرقُ بين أيون الفلور الذي يحمل شحنة سالبة وأيون الهيدروجين الذي يحمل شحنة سالبة؛ الفرقَ بين فرد يحمل حقيبة بها عشرون رطلًا من طعام الكلب، أو يحمل قنبلة وزنها عشرون رطلًا؛ فطعام الكلب يَسهل حمله لأن الوزن موزَّع على منطقة أكبر، أما القنبلة فيَصعب حملها لأن الوزن مركَّز في نقطة واحدة. بالمثل عندما تحمل ذرة الهيدروجين شحنة سالبة، تتجمع كل هذه الشحنة في حجم غاية في الصغر، وعندما تتداخل العناصر المتشابكة كافةً، يتمتع الهيدروجين بسالبية كهربائية مُشابهة لتلك التي للفسفور، كما هو موضح في شكل ٥-٢.



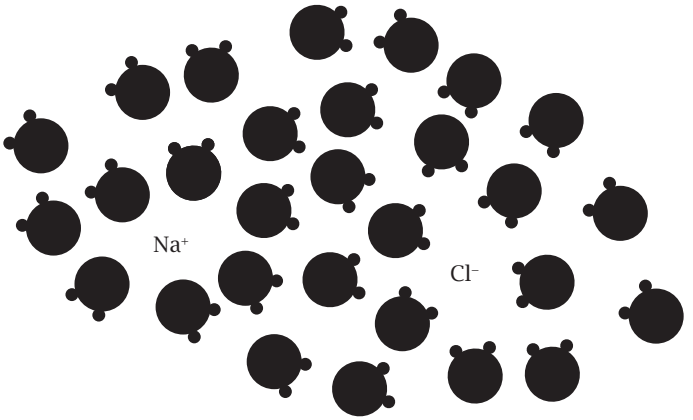

شكل ٥-٢: للهيدروجين سالبية كهربائية مشابهة لتلك التي للفسفور.

إذن ما هي نتيجة كل هذه الانجذابات ومقايضات الإلكترونات بين العناصر في المركَّب؟ النتيجة هي شيء يُطلَق عليه «الاستقطاب الجزيئي».

ويُعتبَر مفهوم الاستقطاب مفهومًا شائعًا؛ فالبطاريات لها أقطاب موجبة وأخرى سالبة، وللمغناطيس قطب شمالي وقطب جنوبي، وعندما تُفضِّل الإلكترونات أن تقترن بأحد أطراف الجزيء حيث تُوجَد العناصر ذات السالبية الإلكترونية الأكبر، يكون للجزيء قطبٌ موجب وقطب سالب؛ ومِن ثَم فهو له قطبية. ويُطلَق على الجزيء الذي له قطب موجب آخر وقطب سالب آخر «ثنائي الأقطاب»؛ لأن له «قُطبَين».

تتصرَّف الجزيئات القُطبية إلى حدٍّ ما مثلَما يتصرف القضيب المغناطيسي؛ فالطَّرَف الموجب لجزيءٍ أُحادي الأقطاب يتَّحد مع الطرَف السالب لجزيء آخر، مثلما ينجذب القطب الشمالي لقضيب مغناطيسي مع القطب الجنوبي لقضيبٍ آخر. فالماء ($H_2O$) الذي يأخذ شكل حرف V، وبه يكون الأوكسجين في المنتصف وذرَّتا الهيدروجين عند طرَفَي حرف V، هو جُزَيء قُطبي. ويُعتبَر الأوكسجين أكثرَ سالبيةً كهربائية من الهيدروجين، فتنجذب الإلكتروناتُ نحو طرف الأوكسجين وبعيدًا عن الهيدروجين، وتنجذب أطرافُ الأوكسجين في عدة جزيئات ماء إلى أيون مشحون بشحنة موجبة، مُكوِّنة قفصًا حوله، وحامية إياه بمَعزِل عن شريكه المشحون بشحنة سالبة. بالمثل تصطفُّ أطراف الهيدروجين المشحونةُ

بشحنة موجبة في عدة جزيئات ماء مع الأيون المشحون بشحنات سالبة، مكوِّنة حوله قفصًا مماثلًا. وهذا الوضع مُبيَّن في شكل ٥-٣.




شكل ٥-٣: جزيئات الماء التي تعزل أيون الصوديوم وأيون الكلور عن طريق تكوين أقفاص المذيب حول الأيونات.

تَميل جزيئات الماء إلى أن تَبنيَ أقفاصًا حول الأيونات؛ لأن هذا يُمثل موقفًا أكثر استرخاء لها. ومثلما تتطلب بعض الطاقة لتعزل قوى المغناطيس التي ينجذب بعضها إلى بعض، فإننا نحتاج إلى الطاقة لنَفصل الجزيئات التي ينجذب بعضها إلى بعض أو إلى أيون واحد. وإتاحة الفرصة لجزيئات الماء أن تُكوِّن أقفاصًا حول الأيونات، يسمح لها بالاسترخاء وإطلاق طاقة.

إلا أن هناك حاجةً إلى الطاقة لتفتيت الملح أيضًا؛ ومن ثم تحدث المقايضة. فإذا كانت تكلفةُ تفتيت الملح أكبرَ من الفوائد المحقَّقة من خلال السماح لجزيئات الماء بالاسترخاء في أقفاص، عندئذٍ يترسَّب الملح في المحلول أو لا يَذوب أصلًا. وإذا كانت تكلفة تفتيت الملح أقلَّ من الفوائد المحقَّقة عن طريق السماح لجزيئات الماء بالاسترخاء في شكلِ أقفاص، فإن الملح يبقى في المحلول أو يَذوب.

وبزيارة أخرى للجدول الدوري يُمكِننا أن نخلص إلى أن الفلزَّات التي تقع في العمود الأول (الليثيوم Li، والصوديوم Na، والبوتاسيوم K ... وهكذا) تميل إلى أن تُكوِّن أيوناتٍ

مشحونةً بشحنةٍ موجبة واحدة؛ لأن فقد إلكترون واحد سيمنحها غِلافًا خارجيًّا مملوءًا تمامًا. وغالبًا ما تكون الأملاح المشتقة من تلك الأيونات الموجبة قابلةً للذوبان؛ حيث إن جذب شحنة واحدة موجبة يُعتبَر أمرًا ضعيفًا نسبيًّا. قارِن قضيب المغناطيس المقترح في «قائمة المشتريات والمحاليل» بالقضيب المغناطيسي الذي يُوجَد في الثلاجات. تمتلك الأيونات الموجبة المتكوِّنة من عناصر العمود الأول جاذبيةً ضعيفة نسبيًّا للأيونات السالبة التي تُشبِه القضيب المغناطيسي في الثلاجة أكثرَ من القضيب المغناطيسي العادي.

من ناحيةٍ أخرى، تميل عناصرُ العمود الثاني إلى فقد إلكترونَين عندما تُكوِّن أيونات؛ ومن ثَم تكون لديها شحنة موجبة ثنائية. ويكون لهذه الأيونات قدرةٌ أكبرُ على جذب الأيونات المشحونة بشحنة سالبة، وهي تميل إلى أن تُكوِّن مركباتٍ تَزيد قابليتُها لعدم الذوبان عن نظيراتها في العمود الأول، لكن فيما وراء هذه الملاحظات الأساسية نجد أن العوامل المحدِّدة لقابلية الأملاح لتكوين روابط دائمة، تكون معقدة تمامًا مثل الأقران من البشر؛ إذ يلعب الحجم والشكل والمرونة دورًا أيضًا. وحتى عندما تعنون هذه الاعتبارات لِملح ما على أنه قابلٌ أو غير قابل للذوبان، نجد أن المقدار الفعلي الذي يذوب أو لا يذوب يتوقف على طبيعة المُذيب، وعلى مقدار الملح في المحلول، ودرجة حرارة المحلول والأسِّ الهيدروجيني (pH) للمحلول.

وثَمة تجرِبة مقنعة على مدى أهمية طبيعة المحلول، وهي أن تُحاول أن تُذيب ملء ملعقة صغيرة (٥ ملیلترات) من ملح الطعام في كوب (٢٤٠ ملیلترًا) ماء، وحاول أن تُذيب الكميةَ نفسَها من الملح في كوب من الزيت النباتي أو الزيت المعدِني؛ يذوب مِلح الطعام في الماء بسهولة، لكنه يترسَّب في الزيت كما هو دون أن يذوب. حاول أن تُقلِّب ملح الطعام في كلٍّ منهما قبل الحكم النهائي فالتقليبُ يُساعد الأملاح على الذوبان؛ لأن عملية الذوبان تبدأ من سطح المادة الصلبة ويُساعد التقليب على تعريض المزيد من الأسطح للمحلول، لكن مهما بذَلت في عملية التقليب فلن تستطيع أن تُجبر كلَّ ملح الطعام على الذوبان في محلول الزيت.

ويُمكِن إثبات مدى توقف الذوبان على الكمية باستخدام بيكربونات الصودا والماء. فإذا أُضيفَ مقدار ضئيل من بيكربونات الصودا إلى كوب زجاجي كبير (ليس من البلاستيك) شفَّاف يسَع نحوَ كوبَين صغيرَين من الماء، ينبغي أن يذوب هذا المقدار الضئيل. في حقيقة الأمر، ينبغي أن يذوب ما يقرب من عشَرة أو خمسةَ عشر مقدارًا ضئيلًا كاملًا من بيكربونات الصودا، لكن عند نقطة محدَّدة تبدأ المقادير المضافة في جعل

المحلول غائمًا، وفي نهاية الأمر تترسَّب المقادير المضافة في القاع حتى مع التقليب. ولإثبات تأثير درجة الحرارة على عملية الذوبان نضَع المحلول في الميكروويف لمدَّة ثلاثين ثانية، ما يكفي فقط لجعل المحلول يصل إلى درجة حرارة حِساء ساخن لكن يُمكِن تناوله. ينبغي أن يكون المحلول الدافئ الناتج صافيًا مرة أخرى، وينبغي أن تذوب كل بيكربونات الصودا الموجودة في قاع الزجاجة مع التقليب.

ومن الممكن مشاهدةُ أثر المواد الأخرى على المحلول عن طريق الطباشير، قارن الطباشير الذي هو كربونات الكالسيوم مع بيكربونات الصودا، التي هي المركَّب المكوَّن من الصوديوم والهيدروجين والكربونات. فعندما نُضيف ملعقة صغيرة (٥ ملليلترات) من بيكربونات الصودا إلى كوب (٢٤٠ ملليلترًا) من الماء الدافئ فإنها تذوب، وبوضع نفس الكمية من مسحوق الطباشير فإنها ستغوص إلى العمق مثل الصخرة، في حين أن الطباشير يذوب عندما يُوضَع في الخل؛ ذلك لأن الخل حامض والطباشير يتفاعل مع الحامض، وعند تعريف الطباشير نجد أنه قاعدة، لكنه القاعدة التي لا تذوب في المحاليل المتعادلة مثل المياه غير المرشَّحة. وفي الخل أي في الحامض تتعادل قاعدة الكربونات، ويذهب الكالسيوم إلى المحلول.

لذلك يبدو مع كل هذه التغيرات — طبيعة الملح، وطبيعة المحلول، وكمية الملح، ودرجة حرارة المحلول — أن كلًّا من عمليتَي الترسيب والذوبان معقَّدتان إلى حد ما؛ فهما لا يحدثان على الفور. ومع ذلك فسنخوض في هذه المفاهيم مرة أخرى في مواقف مختلفة عبر مسيرتنا؛ لأن الترسيب والذوبان يدخلان في الكثير من التفاعلات الكيميائية. فعلى سبيل المثال يتكون الصدف عندما ينبعث الكالسيوم من مخلوق بحري، فيختلط مع الكربونات الموجودة في الماء مُكونًا كربونات الكالسيوم. وتُعلِّل الأصداف المتراكمة على مر العصور في قاع المحيط تكوين الطباشير أو الحجر الجيري الذي يجد طريقه إلى سبُّوراتنا وأرصفة شوارعنا.

وتُعتبَر عملية الترسيب نافعةً في عملية معالجة النفايات الخطرة، فإذا كان من الممكن ترسيبُ المعادن الضارَّة في المحاليل، فمن المُمكن فصلُها من المحاليل باعتبارها موادَّ صلبةً تَشغل حيزًا من الفراغ أقلَّ من الفضلات السائلة؛ ومن ثَم يسهل نقلُها وتخزينها. وثمة نوعٌ آخرُ من الترسيب لكنه مزعج، وهو تفاعلات الترسيب التي تحدث في مكان غير متوقع وهو جسم الإنسان؛ فالنقرس يحدث بسبب ترسيبات حامض البوليك المتجمعة في المفاصل. وحصوات المرارة والكُلى ما هي إلا رواسب، إلا أن هذه الرواسبَ المرَضية ليست

بالأمر الطبيعي. فجسم الإنسان خليطٌ قِوامُه سائل إلى حد ما؛ حيث إن جوهر الحياة هو القدرة على التغيُّر استجابة للبيئة المحيطة؛ ومن ثَم يجب أن تكون معظم مواد الجسم قادرةً على الحركة وجاهزة لذلك، ويُمكن اكتمالُ هذه القدرة على الحركة عن طريق الماء، نظرًا إلى قدرة الماء العالية جدًّا على حفظ المواد في المحلول. يستطيع جسم الإنسان أن يتحمل فترة طويلة بدون غذاء أكثرَ من تحمله لغياب الماء، وبدون الماء يُصبح كلٌّ من الجسم والمخ في حالةِ كسل وتَراخٍ. وتتأثر الكثير من الحالات وكذلك الأمزجة بشكل فعلي إذا لم يُعدَّل أمر الماء بزيادة المقدار اليومي من الماء. في كثير من الأحيان عندما يتعلق الأمر بالصحة يكون الماءُ هو الحل.

ويُعتبَر زبد الصابون نوعًا آخر من الترسيب الشائع. ويطفو زبد الصابون عادةً على الماء بدلًا من أن يترسب؛ ومن ثَم لا يُنظَر إليه عادة على أنه راسب، لكن هذه مسألة دلالات لفظية. يتكون زبد الصابون في البانيو عندما يختلط الصابون بالماء العسر، وهو الماء الذي يحوي أيونات كالسيوم وماغنسيوم. يُطلَق على الماء الذي يحوي أيونات كالسيوم وماغنسيوم «عسر»؛ لأن هذه الأيونات تميل إلى أن تكون رواسب (التي هي صخور صغيرة) غير قابلة للذوبان في الماء.

### على سبيل المثال: الماء العسر والماء اليسر

الشيء الجيد عن الماء هو أن الكثير جدًّا من الأشياء تذوب فيه، والشيء السيئ عن الماء هو أن الكثير جدًّا من الأشياء تذوب فيه. ويُعتبَر الماء النقي موصِّلًا ضعيفًا للكهرباء، ولا يعني هذا أن تقف في بانيو مليءٍ بالماء لتُغيِّر مصباحًا؛ لأنه من الصعب جدًّا الحصول على ماء نقي؛ فالماء الذي يحتوي على أملاح مذابة فيه هو موصل جيد للكهرباء. وقدرة الماء على إذابة المواد تُفسِّر حقيقة أن كل المياه الجوفية تحتوي على أيونات ذائبة بما فيها أملاح الكالسيوم والماغنسيوم.

وكما أن وضع قطعة طباشير في الماء يُؤكِّد أن ملح الكالسيوم غيرُ قابل للذوبان تمامًا — وتكوين أملاح الكالسيوم في غلاية الشاي يكون أمرًا مزعجًا والزبد محبطًا — فإن تكوين الرواسب القشرية داخل أنابيب المياه وفي حمامات السباحة يُعجِّل من حدوث مشكلات خطيرة. وفي وقتٍ ما كانت تُضاف أيونات الفوسفات المشحونة بشحنة سالبة إلى المنظِّفات؛ ومن ثَم يُكوِّن الكالسيوم بشكل تفضيلي الأملاح مع الفوسفات، بدلًا من تكوين الزبد، مما يُحرِّر المنظفات؛ ومن ثَم يتسنى لها أداء وظيفتها، لكن الفوسفات مخصِّبات

غاية في الكفاءة. ومن ثم تُسبِّب تدفقات النُّفايات من الغسالات حدوثَ انسداد في أنابيب الصرف؛ لهذا يستدعي الأمر الحدَّ من استخدام الفوسفات، لكن في هذه الأيام، لا يُعتبَر تكوُّن زبد الصابون مشكلة خطيرة بسبب انتشار المذيبات المائية؛ فمُذيبات الماء تقوم بإزالة الكالسيوم والأيونات الأخرى المكوِّنة للرواسب من الماء قُبَيل جريانها في أنابيب الماء في المنازل.

وتُعتبَر المبادئ المطبَّقة في مُذيبات المياه هي المبادئ نفسَها الموجودةَ في تفاعلات الترسيب، حيث يتدفق الماء عبر مادة كثيفة مشبعة بأيونات الصوديوم تُشبِه شبكة عملاقة من الأملاح، وتُعتبَر أملاح الصوديوم قابلة للذوبان، في حين لا يكون الكالسيوم في نظيراتها من نفس الأملاح قابلًا للذوبان؛ ومن ثَم يحل الكالسيوم محل الصوديوم ويُحتجَز على المادة الصلبة أو يُحبَس بداخلها. ويمكن استخدام الماء المشبع حاليًّا بالصوديوم بدلًا من الكالسيوم بدون أي قلق من أنه قد يُرسب الصابون أو يُكون رواسب قشرية جافة. في دورة إعادة الإنتاج لمذيبات المياه تُغسَل المادة الصلبة بالماء المشبع بالمزيد من ملح

الصوديوم حيث يحل الصوديوم في نهاية الأمر محل الكالسيوم في المادة الصلبة، ويكون العامل المستخدم في تحويل الماء من عسر إلى يسر جاهزًا للبدء في أداء وظيفته مرة أخرى.

لكن لا يتحتَّم على المادة أن تكون مِلحًا كي تذوبَ في الماء؛ فالسكَّر يذوب في الماء أيضًا، وبلا جدال لا يُعتبَر ملحًا، مما يُثير التساؤل: ما الذي يجعل السكر مختلفًا تمامًا عن الملح؟ فكلٌّ منهما مُركَّبات بِلَّورية بيضاء تذوب في الماء ويصعب التمييز بينَهما إلا بتذوُّقهما، لكنه يُمكنك أن تحيا لفترة قصيرة على ماء به سكر، ولا يُمكنك أن تعيش على ماء به ملح، ما الفارق؟ يكمن الأمر كلُّه في الرابطة؛ الرابطة الكيميائية!

# تجربة ٦: الرابطة. الرابطة الكيميائية

لا أحد غير الكيميائيِّ
يُمكنه أن يُخبرنا عن ناتج
المواد السائلة أو الصلبة المركَّبة،
لكنه لا يستطيع ذلك دائمًا.
ومَن في إمكانه أن يُخبرنا،
عن كيفية تفاعل رجل مع امرأة،

أو أي أطفال سيُنجبان؟
كان هناك رجل يُدعى بنيامين بانتير وزوجته،
لقد كان كلٌّ منهما جيدًا على حدة،
لكنهما أشرار عندما يجتمعان معًا،
هو الأوكسجين وهي الهيدروجين،
وأبناؤهما نيران مُدمرة.

الشاعرة إميلي ديكنسون
في «القصائد الكاملة»، ١٩٢٤

إنني أخشى ... الفعل الكيميائي الذي سيترسَّب في نفسي من جرَّاء التبجيل الزائف لرمز ما.

جيمس جويس،
«صورة للرسام في شبابه»، ١٩١٥

خذ زجاجة من البلاستيك الشفاف من تلك المطلوب شراؤها في «قائمة المشترَيات والمحاليل». ارتدِ نظارة الأمان الواقية، وصُبَّ نحو بوصتَين (٥سم) من الزيت المعدني. أضف نحو بوصتَين (٥سم) من محلول كبريتات النحاس. ضع الغطاء على الزجاج ثم رُجَّها. ينفصل المحلول إلى طبقتَين حيث يظل لون طبقة محلول النحاس أزرقَ لامعًا، ويظل لون طبقة الزيت المعدني شفافًا كما هو. أضف ربع ملعقة صغيرة (١ مليلتر) من صبغة اليود. ضع الغطاء ورجَّها.

عندما تتوقف عن الرج ينبغي أن تنفصل الطبقتان مرة أخرى، لكن تظهر طبقة الزيت المعدني باللون البنفسَجي هذه المرة. تحوي صبغة اليود كلًّا من $I^-$، و$I_2$ لكن في معظم الأحيان خليط منهما معًا، ويكون لونه بُنيًّا. وتُؤكسَد أيونات النحاس في كبريتات النحاس $I^-$ إلى الشكل الجزيئي $I_2$، الذي يُدمر المركب. ويكون لون الجزيء $I_2$ بَنفسَجيًّا ويقبل الذَّوبان في الزيوت مثل الزيت المعدِني.[1]

أضِف الآن ملعقة صغيرة (٥ مليلترات) من النشادر المنزلي، ثم ضَع الغطاء ورج. عندما تنفصل الطبقات هذه المرة ينبغي أن تتلوَّن طبقة النُّحاس بالأزرق الداكن المائل إلى الأرجواني، إذ يُكوِّن النُّحاس الآن شراكات قوية مع النشادر، ولم يعد ذلك الأمر متاحًا

الآن مع اليود. يرجع بعض اليود ليكون مرة أخرى $I^-$، ويُعاد تشكيل المركب ويُصبح لون الزيت شفافًا مرة أخرى، قد تحتاج إلى أن تُضيف العديد من نِسَب النشادر، لكن في نهاية الأمر يُصبِح لون الزيت المعدِني شفافًا مرة أخرى.

يذوب جزيء $I_2$ في الزيت المعدِني، في حين لا يذوب أيون $I^-$. يذوب أيون $I^-$ في الماء ولا يذوب في الزيت المعدني، وينجذب الماء وهو جزيء قطبي إلى أيون $I^-$، فيبني قفصًا حوله، ثم يسحب أيون $I^-$ إلى محلول الماء (يُعرَف بالمحلول المائي). ولا يكون للجزيء $I_2$؛ لأن الزيت المعدني جزيء غير قطبي، وليس لديه أي ميل لبناء أقفاص. ولقد ذكرنا من قبل أن الأملاح تتكون عندما تنجذب الأيونات الموجبة إلى الأيونات السالبة، وأن هذه المواد تُكوِّن رابطة، والآن نحتاج إلى أن نُضيف أن هذا النوع من الروابط هو بالتحديد رابطة أيونية. ويُعتبَر هذا التصميم الخاص ضروريًّا لأنه ليست كل المواد أملاحًا، وليست كل الروابط الكيميائية روابطَ أيونية؛ فالترابط الذي يحدث في الموادِّ غيرِ الملحية مثل $I_2$ يُسمَّى «الترابط التساهمي». ويستحق الفرق بين أنواع الترابط والمواد الناتجة عن ذلك الترابط أن نُخصِّص له فصلًا مثل الفصل التالي.

الفصل السادس

# الرابط الذي يربط الكيماويات التي تترابط

إن العلاقات الحميمة في مكان مثل لندن لهي أسطورة شخصية؛ فهي عميقة عمق الصلة الكيميائية. يمر آلاف من الناس وينعزل أحدهم عن هذه الجموع الغفيرة ليُلصِق نفسَه بآخر، وهكذا رويدًا رويدًا تتكوَّن الجماعة.

المؤرِّخ الأمريكي هنري آدمز في
«تعاليم هنري آدمز»، ١٩١٨

نحن نُقابل القطبية أو الفعل ورد الفعل في كل جزء من الطبيعة، نُقابلها في الظلام والضوء، في الحرارة والبرودة، في المد والجزر، في الذكورة والأنوثة،

في شهيق وزفير النباتات والحيوانات، في انقباض وانبساط القلب، وفي موجات السوائل والأصوات، وفي الطَّرد المركزي والجذب المركزي، وفي الكهرباء، والجلفانية، وفي الأُلفة الكيميائية.

رالف والدو إيمرسون في «مقالات»، ١٨٤٠

لقد كان المثال الذي استخدمناه لهذه التجرِبة، الذي استهللنا به هذه المناقشةَ هو كأس من شراب المارتيني مع زيتونتين، لكن على عكس خلة الأسنان التي تربط الزيتونتين معًا، فإن الرابطة ليست كيانًا ماديًّا. وينبغي أن نُدرِك أن الرابطة قوة بنفس إدراكنا أن المغناطيسية والجاذبية هما قوة. ومنشأ القوة في الرابطة الكيميائية هو منشأ كهربائي، ولكنها تلك القوة التي يَشوبها تعقيدات التجاذب والتنافر، ويُوجَد فيها الكثير من الإلكترونات والبروتونات والشحنات التي تتحرك بأنماطٍ معقَّدة. تُشبه محاولة تصنيف المواد طبقًا لنوع الرابطة، محاولة طبيب التجميل تصنيف الناس طبقًا لدرجة لون البشرة. بالطبع فإن هناك أناسًا ذَوي بشَرة سوداء وآخرين ذوي بشرة بيضاء، لكن هناك الكثير جدًّا من التنويعات ضمن نطاق بشرة الإنسان. وعلى نفس المنوال يُمكننا القول إنه ثمة ثلاثة تصنيفات أساسية للرابطة الكيميائية؛ الأيونية، والتساهمية، والفلزية، لكن هذه جميعها مجرد متغيرات داخل موضوع واحد وهو أن الأنوية ترتبط معًا عندما يكون هناك انجذابٌ متبادَل، وأن أساس هذا الانجذاب المتبادل كهربي. ولدى كل رابطة القليل من خصائص الروابط الأخرى — التساهمية والأيونية والفلزية — لكن بدرجات أكبر أو أقل، ولا يُعتبَر هذا الغموض مفيدًا بصورة مباشرة، إلا أننا سوف نستمرُّ في هذه الدراسة كما لو كان من الممكن أن نضع كل جزيء بشكل قاطع في فئة أو أخرى، ثم نستخدم التصنيف كي ننسب خواصَّ للمواد المختلفة.

أولًا: نحن نملك أداة رائعة للتنبُّؤ بالضبط من أن أي نوع أيون لعنصر ما يميل غالبًا إلى الدخول في التفاعل، وهاك أقرَب صديق للكيميائي، الجدول الدوري، الذي نعرضه هنا مرة أخرى للتيسير.

وكما أشرنا من قبل، يُمكِن تقسيم الجدول الدوري إلى ثلاثة أجزاء رئيسية؛ الفلزات واللافلزات وأشباه الفلزات. تقع الفلزات عن يسار السُّلم المتعرج الذي يبدأ بين البورون B والألمنيوم Al وينتهي بين البولينيوم Po والأستاتين At. تقع اللافلزات عن يمين السلم. وأشباه الفلزات هي تلك العناصر التي تقع مباشرة فوق وأسفل. ولكن مرة أخرى يُوجَد

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٦-١: الجدول الدوري للعناصر.

نطاق من الخواص وليس هناك تمييزٌ قاطع. ولا تأبهُ الطبيعة لأي مسمًّى ننتقيه، سواءٌ لنُلقِّب به الفلزات أو اللافلزات، إلا أن بعض العناصر مثل النحاس Cu (يقع بعد ثلاثة عناصر عن يسار السلَّم) يقع مباشرة في زُمرة الفلزات. وتلك العناصر تحظى بسلوك يُشبِه بوضوح سلوك الفلزات (فالنُّحاس الصُّلب مادة لامعة قابلة للثَّني وموصِّل جيد للكهرباء). وتتصرف العناصر الأخرى في زمرة اللافلزات بوضوح مثل اللافلزات؛ فغازا النيتروجين والأوكسجين هما مُوصِّلان ضعيفان جدًّا للكهرباء، لدرجة أن تدفُّق التيار الكهربائي يُمكِن أن يتوقَّف بعزل الأسلاك في الهواء، وعليه يُعتبَر مبدأ تقسيم الجدول الدوري إلى فلزات ولافلزات مبدأً تقسيمٍ نافعًا.

وتميل عادةً اللافلزات التي تقع عن يمين السلم إلى أن تُكوِّن أيوناتٍ سالبةً عندما تُكوِّن أيونات. أما الفلزات التي تقع عن يسار السلم فتميل عادة إلى تكوين أيونات موجبة عند تكوين الأيونات. والشحنات المختلفة تتجاذب؛ فعندما تكون هناك أيونات ذات شحنات مختلفة على مَقرُبة من بعضها البعض، فإنه ينجذب بعضها إلى بعض. وإذا

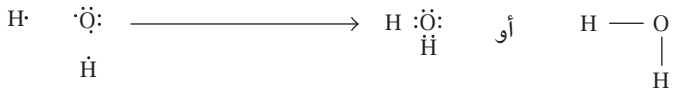
تكونَت رابطةٌ بِناءً على هذا الانجذاب بين الأيونات، تُوصَف الرابطة بأنها أيونية. فعلى سبيل المثال تُعتبَر الرابطة بين الصوديوم والكلور في ملح الطعام، كلوريد الصوديوم، خيرَ مثال على ما يُعتبَر رابطة أيونية؛ تنشأ الرابطة الأيونية عن الانجذاب بين الأيونات الموجبة والسالبة، كما هو مُتضمَّن في الاسم، وفي الرابطة الأيونية يمكن التنبؤ بما سيحدث بشكل دقيق وقابل للتعليل، لدرجة أن الفرد غالبًا ما يرغب في أن تكون جميع الروابط روابطَ أيونية سهلة، لكن في ذلك الحين لن يكون لدينا تلك التشكيلةُ الفعلية التي لا حصر لها من المواد والتي تكون ضرورية لعالمنا؛ فدائمًا ما يكون التنوع عاملًا شيقًا لكن معقدًا.

وكما أشرنا من قبل، تتكوَّن الأيونات لأن الذرات تميل إلى أن تكتسب أو تفقد إلكترونات إلى أن تحصل على غلاف مشبع التكافؤ. ولأسباب في الماضي سُمِّيَت الأغلفة التامة الامتلاء ثُمانيات، مع حقيقة أنه ليست كل الأغلفة الممتلئة تَحوي ثمانية إلكترونات. ونحن نتحدث عن أيونات تتكوَّن عندما تكتسب الذرة إلكتروناتٍ أو تفقدها لتُشبع ثمانيتها، لكن ثمَّة بعض الطرق التي يُمكن أن تملأ الذرة بها ثُمانياتها دون أن تتخلى عن إلكترونات أو تَسرقها، فمن الممكن أن تكتمل الثمانيات عن طريق مشاركة الإلكترونات أيضًا.

تُؤدِّي مشاركة الإلكترون إلى نوع من الروابط عادةً ما يحدث بين فلزَّين (أي عُنصرَين يقع كلٌّ منهما في اليمين الأقصى من الجدول الدوري. ويُطلَق على هذا النوع من الروابط «الروابط التساهمية». وكما شاهدنا، إلكترونات التكافؤ هي تلك الإلكترونات التي تقع في الطبقة الخارجية من الذرة، فعلى سبيل المثال، كل ما يحويه الكربون، الذي يقع في الدورة الرابعة من الصف الثاني، هو ستة إلكترونات (لكونه سادسَ عنصر مدرَجٍ في الجدول الدوري))، لكن أربعة فقط من هذه الإلكترونات هي إلكترونات تكافؤ، أي إلكترونات الغلاف الخارجي. وتعني تَساهمية أنه تشارك الإلكترونات على نحوٍ تعاوني وتتصرف الإلكترونات كأنها إلكترونات تكافؤ العنصرَين في الرابطة.

ويُعتبَر المنطق النظري لمشاركة الإلكترونات هو أن كِلا العنصرَين في الرابطة التساهمية يملك تقريبًا نفس مقدار الجاذبية للإلكترونات. وما من طريقة لتحديد أي العنصرَين سيأخذ الإلكترونات وأيهما سيتخلى عنها؛ نظرًا إلى أن العنصرَين يقعان في الجانب نفسِه من الجدول الدوري، ويتشابهان في السالبية الكهربية. ويقع الأوكسجين في الجانب الأيمن من الجدول الدوري، وكما ذكرنا من قبلُ يحوي الهيدروجين سالبية كهربية مشابهة لعناصر الجانب الأيمن من الجدول؛ من ثَم تكون الرابطة بين الأوكسجين

والهيدروجين في الماء رابطة تساهمية. وعندما تنتهي إلكترونات تكافؤ كل من الأوكسجين والهيدروجين من تنظيم نفسها حول الأنوية، يصبح لكل عنصر ثمانيةٌ مكتملة. (تذكر أن ثمانية الهيدروجين مشبعة بإلكترونَين). تمتلئ ثمانية كل ذرة هيدروجين بإلكترونَين، أما ثمانية الأوكسجين فتمتلئ بثمانية إلكترونات؛ أربعة منها مُشاركة مع أنوية الهيدروجين.




شكل ٦-٢: الروابط التساهمية المتكونة بين الهيدروجين والأوكسجين عندما يملآن أغلفتهما بالإلكترونات المتشاركة.

إلا أن ثمة تناقضًا جوهريًّا؛ فقد ذكرنا أن الشحنات المختلفةَ تتجاذب والمتشابهة تتنافر، وأن للإلكترونات كافةً شحنةً سالبة. إذا كان هذا صحيحًا، فلماذا لا تنفجر إذن مجموعات إلكترونات التكافؤ في وبائل متطايرة من الإلكترونات بدلًا من الاستقرار في روابط كيميائية قوية؟

هذا سؤال جيد جدًّا، ونحن مسرورون أنك سألته، وقد اتضح أن هذا السؤال لطالما حير علماء الكيمياء النظريين أيضًا، وقد أطلَقوا على التجاذب المُلاحَظ بين العناصر «الصلة الكيميائية» لإعطائه اسمًا فقط، لكنهم لم يفهموا طبيعة هذا التجاذب، لكن بفهم التركيب الذري وُجِدَ مبررٌ لمثل هذا التجاذب؛ فيمكن النظر إلى طبيعة التجاذب على أنها إلكترونات سالبة تعمل وسيطًا بين الأنوية المشحونة بشحنات موجبة.

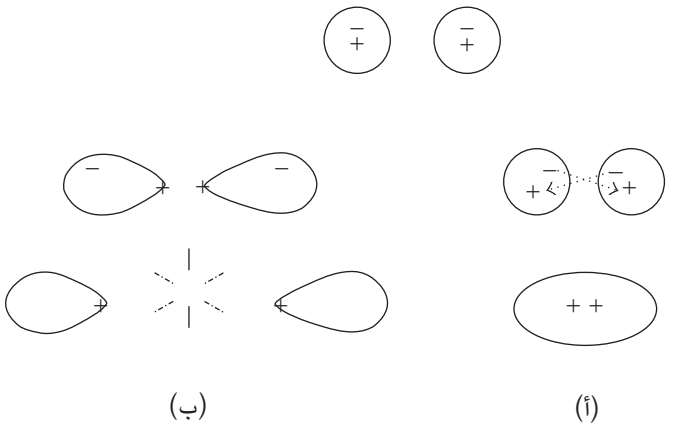
وبالرغم أن الصورة الكاملة أكثر تعقيدًا بكثير، فيُمكننا أن نجد تشبيهًا منطقيًّا في المغناطيس؛ إذا قرَّبنا مِغناطيسَين معًا بحيث يتقارب قُطباهما المتشابهان، فإنهما سيَتنافران. يُشبِه هذا الموقف إحضار نواتَين عاريتَين مشحونتَين بشحنات موجبة معًا، حيث نجد أنهما لا يرتبطان بسبب التنافر بينهما، لكن بالرجوع إلى المغناطيس نجد أنه إذا وُضع قضيب مغناطيسي ثالث بين المغناطيسَين اللذَين أحضرناهما أولًا بحيث يكون القطب الجنوبي موضوعًا إلى جانب القطبَين الشماليَّين، عندئذٍ يجذب المغناطيس الواقع في الوسط بينهما المغناطيسَين الآخَرَين ويبقى الثلاثة معًا. وفي الرابطة تقوم الإلكترونات السالبة الموجودة بين الأنوية المشحونة بشحنات موجبة بجذب الأنوية الموجبة وتتصرَّف كأنها غِراء تُلصِق الأنوية معًا.

إلا أن التشبيهات لا تُعتبَر كاملة البتة؛ فالإلكترونات لا تَشغَل فراغاتٍ محددةً بين الأنوية مثل قضيب المغناطيس الثالث، لكنها تنتشر في سحب ضبابية تسمى «المدارات الجزيئية» التي تأخذ أشكالًا غالبًا تكون متنوعة في تكويناتها كالتكوينات السماوية التي قارنَّاها بها من قبل. وعندما يكون لأحد هذه المدارات الإلكترونية كثافةٌ إلكترونية كبيرة بين نواتَين، يتصرف التكوين كأنه مدار يربط بين النواتَين، وإذا أفضت إحدى سحب الإلكترونات هذه إلى كثافة إلكترونية كبيرة خارج النواة، تعمل الإلكترونات على تقليل الترابط بدلًا من توطيده. في هذه الحالة تُدعى سحابة الإلكترون التي هي مدار الإلكترون «مدار غير رابط». ويُصوَّر هذان الموقفان في شكل ٦-٣. ونرى في الجانب الأيسر من الصفحة في شكل ٦-٣(أ) أن ذرتَين اجتمعتَا معًا؛ لذلك توجد بعض الكثافة الإلكترونية بين النواتَين، حيث إن الإلكترونات انجذبت إلى النواتَين المتجاورتَين، وتكوَّنت الرابطة. ونرى عن يمين الصفحة في شكل ٦-٣(ب)، أن ذرتَين قد اجتمعتا معًا حيث يوجد نقص في الكثافة الإلكترونية بينهما؛ لأن النواتَين المشحونتَين بشحنات موجبة والمكشوفتَين إحداهما للأخرى، تتنافر إحداهما مع الأخرى، ولا تتكون رابطة.

وعادة ما تكون طاقة المدارات غير الرابطة أكبر كثيرًا من طاقة مدارات الترابط، لكن إذا اصطدمت الكمية المضبوطة من الطاقة بمدارات الترابط، ربما في شكل طاقة ضوئية، تُثار الإلكترونات من أحد المدارات إلى آخر. وإذا أُثيرَت الإلكترونات فانتقلت من أحد مدارات الترابط إلى أحد المدارات غير الرابطة، فقد تنكسر الرابطة. وتُخزن الكثير من المواد مثل بعض الجِعَة (البيرة) في زجاجات بنية اللون حتى تمنع الضوء من أن يُفتِّت المادة التي بالداخل بنفس هذه الآلية.

وكما ذكرنا من قبل، لا تكون الرابطة دائمًا أيونية أو تساهمية على نحو خالص، فأفضل نماذج الروابط الأيونية تتضمن بعض المشاركات الإلكترونية، والروابط التساهمية لا تُشارك الإلكترونات بالتساوي تمامًا. وتعني الاختلافات في السالبية الكهربية بين الأنوية المترابطة أن الإلكترونات ستنجذب إلى إحدى الأنوية أكثر من الأخرى، لكن يُمكن اعتبار الرابطة تساهمية بشكل خالص إذا كانت بين نواتَين متطابقتَين، كما في غاز الهيدروجين $H_2$، أو الأوكسجين $O_2$. وثمة مثال قاطع على المساواة في مشاركة الإلكترونات في الرابطة الفلزية؛ ففي الفلزات تكون جميع الذرات متطابقة وتُشارك الإلكترونات بسهولة، حتى إنه يُمكن الاعتقاد أن الفلز جزيء واحد كبير.

ويُمكن أن يُوجَد في المواد الصلبة إلكترونات في نظام الترابط بين أزواج الأنوية تُسمَّى «حُزمة التكافؤ»، كما يُوجد أيضًا مدارات عملاقة تمتد حول كل النواة تُسمَّى




شكل ٦-٣: عندما تجتمع ذرتان قد يجدان نفسَيهما (أ) مع سحابة إلكترونية بين النواتَين، (ب) خارج مركز النواتين.. ثمة انجذاب في الحالة الأولى (أ) بين سحابة إلكترونية لأحد الذرات ونواة الأخرى وقد تتكون الرابطة. أما في الحالة الثانية (ب) نجد أن النواتَين المشحونتَين بشحنات موجبة مكشوفتان إحداهما للأخرى، وتتنافر إحداهما مع الأخرى، ولا تتكون الرابطة.

«حُزمة التوصيل»، ويُمكن تخيُّل حُزمة التوصيل على أنها مدار إلكتروني هائل، وفي حُزمة التكافؤ تظل الإلكترونات مرتبطة بنواتها. أما في حُزمة التوصيل فتحظى الإلكترونات بحرية التحرك من نواة إلى أخرى، والتنقُّل من أحد طرَفَي الفلز إلى الطرف الآخر. ويُمكننا تشبيه الأمر بشبكة بنكية. يُوجَد على المستوى المحلي بنوك داخل المدينة يعمل بها صيارفة محليون يعيشون ويعملون في المكان نفسِه، وهؤلاء الصيارفة هم إلكترونات حُزمة التكافؤ، وظيفتهم الحفاظ على أسس البنك معًا. أما المديرون الأعلى فهم إلكترونات حزمة التوصيل، ووظيفتهم تجعلهم يتنقلون من بنك إلى آخر عبر كل الشبكة.

والمواد التي لديها وفرة من الإلكترونات في حزمة التوصيل تُسمَّى بشكل منطقي جدًّا «الموصِّلات»، والطاقة التي تُزوِّدها البطاريات تجعل هذه الإلكترونات تنتقل فيما يُعرَف عامة «بالتيار الكهربي». بعض المواد الصلبة الأخرى لا تملك إلكترونات في حزمة

التوصيل ولا توصل الكهرباء، وتُسمَّى بالمواد العازلة، والمواد التي تتوسط الموصلات والعوازل تُسمَّى «أشباه الموصِّلات»، وهو اسم له صدًى رنان باعتباره مادة ثورية.

**على سبيل المثال: أشباه الموصلات**

لقد غيَّر ابتكار الترانزستور الذي يقوم على أشباه الموصلات العالمَ بأثره. ما أشباهُ الموصلات إذن؟ كما يتضمن الاسم، موادُّ لها خواصُّ كهربية تتوسط تلك التي للموصلات والعوازل، وأشباهُ الموصلات هي المواد التي تُوصل التيار أحيانًا.

وعادةً يكون في أشباه الموصلات القليلُ جدًّا من الإلكترونات في رابطة التوصيل لنقل التيار، إلا أن الفجوة في الطاقة بين حُزمة التوصيل وحزمة التكافؤ صغيرة بما يكفي حتى إن الإلكترونات تستطيع، بالقليل من الإثارة، أن تعبر الفجوة، وتجعل المادة موصلة، وتكون هذه الإثارة في شكل الجُهد الكهربي المستخدَم أو الحرارة أو الضوء. وتُعتبَر بعض المواد الصلبة أشباهَ موصلات طبيعية. إلا أنه من الممكن جعلُ البعض الآخر قادرًا على عبور الفجوة عن طريق عملية تُسمَّى «الحقن» مع أن الأمر ليس له أية علاقة بالرِّياضيين أو المنشطات.

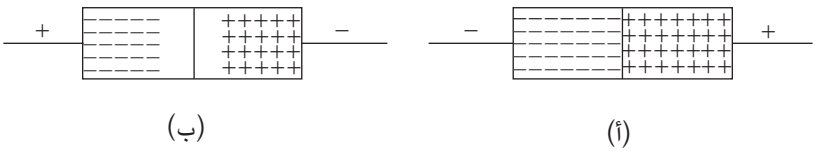
عادةً ما يكون السليكون أول مادة تأتي بأذهاننا عندما نتحدث عن أشباه الموصلات، لكن في حقيقة الأمر لا يُعتبَر السليكون مادةً شبهَ موصِّلة بالطبيعة، فالسليكون الصلب يجب أن يُحقَن ليُصبح مادة شبه موصلة، والحقن هو عملية إضافة كمية قليلة جدًّا من

الشوائب للمادة الصلبة مثل السليكون. وهناك اثنان من الشوائب المفضلة للسليكون في الجدول الدوري. فهما لديهما تقريبًا نفس الحجم والسالبية الكهربية؛ ومن ثَم يسهل أن يتناسبا مع السليكون في الحالة الصلبة، فهما يُغيِّران خصائص التوصيل للسليكون حيث إن لديهما إلكترونًا مزيدًا وإلكترونًا منقوصًا على التوالي عن السليكون.

وكما يُمكن أن نرى من خلال الجدول الدوري، لدى السليكون أربعةُ إلكترونات تكافؤ متاحة لكي تدخل في عملية الترابط. وعليه ترتبط بأربع ذرات سليكون أخريات عندما تتحول إلى الحالة الصُّلبة، مانحةً لكلٍّ منها عددًا مشتركًا بثمانية إلكترونات، وغلافًا ممتلئًا تمامًا، لكن إذا كانت ذرةُ فوسفور تنسل إلى الخليط، عندئذٍ يكون هناك إلكترون زائد وهو ما لا يكون مناسبًا تمامًا، وهذا الإلكترون الزائد يسهل جدًّا ترقيته ليصل إلى حُزمة التوصيل؛ ومن ثَم يسمح للمادة أن تكون موصلة بسهولة أكبر عند توصيلها بالبطارية. وإذا زجَّت ذرة ألمنيوم، ذات ثلاثة إلكترونات تكافؤ، بنفسها إلى داخل السليكون الصلب، عندئذٍ يكون هناك ثقبٌ حيث يوجد عادة إلكترون تكافؤ. يسمح هذا الثقب الزائد أيضًا بتدفق التيار بسهولة أكبر؛ ذلك لأن الإلكترونات المدفوعة تجد الآن مكانًا للذهاب إليه، ويُطلَق على السليكون المحقون بمادة تُمِده بالمزيد من الإلكترونات «شبه موصل من النوع n»؛ لأن الإلكترون يُسهِم بشحنة سالبة. أما السليكون المحقون بمادة ذات عدد أقل من الإلكترونات فيُطلَق عليه «شبه موصل من النوع p»؛ لأنه يُسهم بشحنة موجبة.

وعندما ترتبط قطعة من مادة من النوع n مع قطعة من النوع p، يتكون ترتيب يُسمَّى الصمَّام الثنائي، وهو وحدة تسمح للتيار بالتدفُّق في اتجاه واحد فقط، حيث لا يسمح جزءٌ من شبه موصل من النوع p ملتحقًا بجزء من شبه موصل من النوع n بتدفق التيار إلا عندما تكون الإلكترونات متجِهة إلى الجانب السالب عبر الجانب الموجب ثم إلى الخارج. وتتصرف البطارية التي يكون الجانب السالب منها مُلحقًا بجانب النوع n من الصمام الثنائي وكأنها نهرٌ يُعطي المياهَ التي تندفع عبر سد. أما الجانب الموجب من البطارية فيُمثل الخزان الذي تنصبُّ فيه المياه. وعلى العكس إذا وُصِّل الجانب السالب من البطارية بالنوع p من المادة، ووُصِّل الجانب الموجب من البطارية بالنوع n من المادة، عندئذٍ يحدث للإلكترونات صراعٌ مثل شد الحبل، ينتهي بهُدنة ولا يتدفق أي تيار.

ويُصبح هذا السلوك مفيدًا عند إضافة القليل من مادة ثالثة من أشباه الموصلات، فيكون هناك شطيرة pnp أو npn. ولا يستطيع التيار أن يتدفق في أيٍّ من الاتجاهَين في




شكل ٦-٤: ينشأ الصمام الثنائي من ارتباط شبه موصل من النوع n بشبه موصل من النوع p. عندما يُوصَّل مصدر للإلكترونات كما هو موضح في الشكل (أ)، يتدفق التيار عبر الصمام الثنائي، وعندما يُوصَّل مصدر للإلكترونات كما هو موضح في الشكل (ب)، يحدث صراع مثل شد الحبل ولا يتدفق أي تيار.

حالة المزيج pnp أو المزيج npn، إلا إذا قام مصدر آخرُ بحقن أو دفع الإلكترونات من الطبقة المتوسطة في الشطيرة مكونًا موادَّ من النوع ppp أو النوع nnn التي يُمكِنها أن تُوصِّل الكهرباء.

يستدعي الموقف تشبيهًا: تُشبه المادةُ التي من نوع pnp أو npn نهرًا به سد، عند تغيير n في pnp بسحب إلكترون يُشبه فتح السد والسماح للماء بالتدفق. ينطبق نفس الشيء على المادة npn إذا حُقِنَ إلكترون إلى المادة p، لكن كيف يُمكننا أن نحقن أو نسحب إلكترونًا؟ عن طريق البطارية؛ فالبطارية المتصلة بمنتصف المادة يُمكنها أن ترفع أو تخفض سد الإلكترونات.

إذن ما هو الهدف الذي يُمكن الوصولُ إليه من وراءِ هذا؟ يستطيع الآن تيارٌ صغير أن يتحكم في تيار كبير، وأن يُطفئه ويُشغله بالقليل من الإلكترونات المتدفقة، ولكي تَعِيَ أهمية الموقف، هيا نُلقِي نظرة على الماضي لبرهة. كان الأوروبيون في أوائل العصور الوسطى مُعوِزين على الصعيد التكنولوجي، ومعتمدين على العمالة اليدوية، وكانوا إذا احتاجوا إلى دقيق مطحون، قاموا بربط العديد من عبيد الأرض في طاحونة، ثم جعلوهم يبدءُون الدفع، إلا أن الطاعون الأسود قضى على طبقات العمال، ووجد الناس الباقون أنفسَهم أكثر إبداعًا عند استخدام العتلة والتروس والماكينات البسيطة الأخرى. واكتشفوا أن عاملًا واحدًا برافعة ونظام من التروس يستطيع أن يرفع السد مما يسمح للمياه بالتدفق عبر ساقية، وهذه الساقية تُدير الطاحونة وتقوم بالعمل الذي يقوم به الكثير من العبيد.

وقد حدث التغيير في العصور الوسطى في أوروبا تدريجيًّا بصورة أكثرَ من التغيير الذي شهدناه نحن، ويرجع ذلك إلى أشباه الموصلات، إلا أن الأثر الاجتماعي مُشابِه؛ فبدلًا من عامل يعمل على عتلة تُشغل السد، لدينا الآن بطارية بداخل لوحة تشغيل تُشغل التيار وتفصله. وتُسمَّى مفاتيح أشباه الموصلات «ترانزستور» التي تُستخدَم للتشغيل والفصل، أو النظام الثنائي الذي يُشكل أساس الحاسوب.

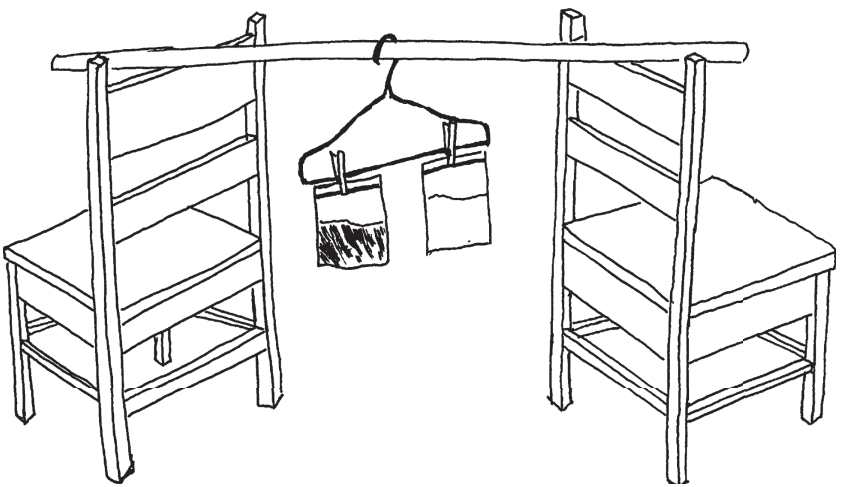
كيف يتسنَّى للمحوِّلات أن تُستخدَم للقيام بكافة الوظائف المعقدة في الحواسيب؟ أولًا عن طريق العد أو الإحصاء. يُمكن للحواسيب أن تُحصي باستخدام الأصفار ورقم ١ الذي يُقابل التشغيل والفصل، ومع أننا اعتدنا العد باستخدام النظام العشري، ربما لأننا خُلِقنا بعشَرة أصابع، فإن الأنظمة الأخرى للعد مُمكنة. فالساعات تُحسَب بمجموعات ستينيَّة (٦٠ ثانية تكون دقيقة، و٦٠ دقيقة تكون ساعة) ويوضع البيض في مجموعات عددُ كلٍّ منها اثنتا عشْرةَ بيضة، أي بالدستة. وتحسب الحواسيب بمجموعات ثنائية وتستخدم الصفر ورقم ١ (تشغيل وفصل) للأرقام العشرية. وتستخدم الحواسيب أيضًا «و، لا، أو» وهي عين الكلمات المستخدمة للربط بين الكلمات الرئيسية في البحث على الإنترنت (نظام يُسمَّى قواعد المنطق البوليني) وأيضًا منطق السبب والنتيجة. فعلى سبيل المثال إذا كان المفتاح مُشغلًا على الحرف أ، وكان الحرف و على الطابعة تُنتج الطابعة في هذه الحالة الحرف أ.

لكن إذا كانت المفاتيح هي كلَّ ما يحتاج إليه الحاسوب، لماذا إذن لا يُمكنك أن تعمل بدون محولات؟ الإجابة هي أن هذا ممكن وقد كان بالفعل، فلا تُعتبَر المفاتيح شيئًا جديدًا ولا حتى المفاتيح الكهربية. لقد كانت الصمامات المفرغة تُستخدَم في القديم لمفاتيح التشغيل والفصل (صفر و١) بدلًا من الترانزستور، ومع المزايا الأخرى التي تتمتع بها صمامات التشغيل ومع استخدامها في الكثير من التطبيقات، فإن المشكلة في استخدامها هي أن لها حجمًا كبيرًا، وتُولِّد الكثير من الحرارة، وعليه كانت تتطلب الحواسيب القديمة الكثير من الفراغ والتبريد، وكان الأمر يحتاج إلى عدد هائل من المفاتيح لأي مهمة متوسطة التعقيد، لكن بوجود المحولات يُمكن وضع عدد كبير من المفاتيح في منطقة صغيرة جدًّا دون توليد كمٍّ هائل من الحرارة.

وبمجرد استنباط المبادئ الرئيسية لأشباه الموصلات، وجَّه العلماء جهودهم نحو ابتكار أنواع مختلفة من أشباه الموصلات، وفي هذه الأيام ثمة أشباه موصلات تستشعر الحرارة أو الألوان الضوئية المختلفة؛ فثمة أجهزة تقوم على المنطق الذي تقوم عليه أشباه

الموصلات التي تقوم بكل شيء؛ ابتداءً من ضبط المصباح إلى قيادة المركبات الفضائية. ولتكوين العديد من المواد يتطلَّب الأمر فهمًا كاملًا لمبادئ الروابط الكيميائية والمبادئ الرئيسية للتفاعلات الكيميائية، حيث إن اثنَين من هذه المفاهيم الأساسية — حفظ الكتلة وقانون النسب الثابتة — سيُناقَش فيما يلي.

# تجربة ٧: كيمياء الأحجار الكريمة



لقد قالت: «لكن القوانين الكيميائية موجودة» فلكونها امرأة، كانت بحاجة إلى إيمان.

أناتول فرانس في روايته
«جزيرة البطريق»، ١٩٠٠

أحضِرْ كيسَين من البلاستيك ذاتيِّي الإغلاق في حجم الشطيرة، وكيسَين من البلاستيك ذاتِيِّي الإغلاق في حجم الجالون، ثم ارتدِ نظارتك الواقية. أحضر علَّاقة ملابس (شماعة)، ثم علِّقها بحيث تعمل كالميزان، ربما يكون أفضل وضع لتعليق العلَّاقة هو استخدام عصا مكنسة مُثبتة على كرسيَّين. ضع بداخل كل كيس كبير بالتساوي مِلءَ ملعقة شاي بلاستيكية (٥ مليلترات) من زبد الطرطير مع نصف كوب من فوق أكسيد الهيدروجين (٦٠ مليلترًا). اخلط هذه المكونات جيدًا بفرك كل كيس من الخارج بأصابعك. لا تغلق الأكياس الآن.

صبَّ داخل كل كيس صغير من الأكياس التي بحجم الشطيرة ملعقةً صغيرة (٥ مليلترات) من محلول كبريتات النحاس (مجهَّز كما هو موصوف في قائمة المشتريات والمحاليل). أحكِم غلق هذَين الكيسَين تمامًا وضع واحدًا داخل كل كيس من الكيسَين الكبيرَين. الآن أحكم غلق الكيسَين الكبيرَين وعلقهما بمشابك غسيل على علَّاقة الملابس، واحدًا عند كل طرف. عدِّل وضْعَ الكيسَين على علَّاقة الملابس بتحريك مشابك الغسيل جيئة وذهابًا حتى يحدث توازن بين كلٍّ من الكيسَين، وتستوي علَّاقة الملابس. يعمل هذا الميزان اليدوي جيدًا إذا كانت علَّاقة الملابس معلقة حول شيء مستدير؛ من ثَم يمكن لكُلَّاب العلَّاقة أن يتحرك جيئة وذهابًا بطريقة غير مقيدة. بمجرد أن يتوازن الكيسان ثبت مشبكَي الغسيل في مكانَيهما بشريط لاصق. تحقَّقْ مرة أخرى من أن الكيسَين لا يزالان متوازنَين.

نأتي الآن إلى الجزء الذي يتطلب الحذر. افتح أحد الكيسَين الصغيرَين اللذَين داخل الكيسَين الكبيرَين من الخارج دون أن تفتح الكيس الكبير. صب محلول كبريتات النحاس من الكيس الصغير على خليط زبدة الطرطير وفوق أكسيد الهيدروجين الذي بداخل الكيس الكبير. يبدأ التفاعل ببطء، لكن يحدث فوران في خلال عشر ثوانٍ. أخيرًا تفسح طرطرات النحاس ذات اللون الأزرق السماوي المثير المجال للخليط الآخَر الجيري من مركب الطرطرات مع أكسيد النحاس البرتقالي اللون. يُولِّد التفاعل حرارة كافية حتى إنه يمكنك ملاحظة تكثف داخل الكيس الكبير وتشعر بالدفء من الخارج. وتُذكرنا الألوان المبهرة الناتجة عن التفاعل بألوان الأحجار الكريمة لسبب جيد جدًّا؛ ألا وهو أن ألوان الأحجار الكريمة، مثل اللازَوَرْد والفيروز، تنشأ من أملاح النحاس، ويبدو العديد من أملاح النحاس بمقادير ضئيلة في شكل خطوط وعروق ملونة في الأحجار اللامعة.

ويُعتبَر كلٌّ من خروج الحرارة والفقاعات وتغير اللون من مؤشرات حدوث التفاعل. ولم تَعُد المادة الآن التي في كيس التفاعل هي نفس المادة الأصلية، لكن إذا كنت حذرًا أثناء

فتح الكيس الداخلي، ينبغي أن تظل علَّاقة الملابس متوازنة. ويُعتبَر فعل الاتزان هذا مثالًا على «حفظ الكتلة» وهي فكرة أن الكتلة لا تنشأ ولا تتلاشى بفعل الوسائل الكيميائية؛ فكتلة المتفاعلات، أي المواد التي في الكيس الذي تُرِك كما هو ولم يحدث فيه تفاعل، لا تزال هي كتلةَ النواتج نفسَها، أي الموادَّ الزرقاء والخضراء في الكيس التي سُمِح لها بالتفاعل فيه. ولا يُهِم كيف تتغير الأشياء، لكن يكفي أن بعض الأشياء تظل كما هي.

والجزء الثاني من هذه التجربة قد تم بالفعل. تذكر أن الفينول الأحمر الذي هو الأسُّ الهيدروجيني (pH) لمياه حمام السباحة قد تغير لونه إلى اللون الأصفر عند إضافته إلى الماء، وإلى اللون البنفسجي المحمر لدى إضافته إلى محلول بيكربونات الصودا. وتذكر أيضًا أن محلول الخل والحديد قد تحول إلى اللون الأحمر عند إضافة فوق أكسيد الهيدروجين. وتُشير هذه الملحوظة إلى أن ثمة فرقًا بين الماء وفوق أكسيد الهيدروجين ومحلول النشادر ومحلول الخل. ما هذا الفرق؟ الصيغة الكيميائية للماء ($H_2O$)، أي ذرَّتا هيدروجين وذرة أوكسجين. وصيغة فوق أكسيد الهيدروجين ($H_2O_2$)، أي ذرَّتا هيدروجين وذرَّتا أوكسجين. والعنصر النشط في القواعد مثل محلول البيكربونات هو أيون الهيدروكسيد ($OH^-$) الذي يتكون من ذرة هيدروجين وذرة أوكسجين. والعنصر النشط في الأحماض مثل الخل هو أيون الهيدرونيوم ($H_3O^+$)، ويتكون من ذرة واحدة أوكسجين وثلاث ذرات هيدروجين.

وعليه يكون لديك: $H_2O$، $H_2O_2$، $OH^-$، $H_3O^+$، حيث لا يُوجَد الكثير من الاختلاف في كتابتها! لكن شتان الفرق بينها من الناحية الكيميائية، مما يُوضح لنا المبدأ الذي يُطلَق عليه قانون النسب الثابتة وهو يدور حول أنه ليست العناصر وحدها هي التي تُحدد طبيعة المركب، بل النسب أيضًا، وعواقب حفظ الكتلة وقانون النسب الثابتة هي الموضوعات التي سنتناولها في الفصل التالي.

الفصل السابع

# الالتزام بالمبادئ

يُشبه اجتماع فردَين الاتصال الكيميائي لمادتَين: إذا حدث أي تفاعل بينهما، فإن كِلَيهما يتحول.

كارل جوستاف يونج، ١٩٢٠

بعض الناس طهاة ماهرون بطبيعتهم، ويُضيفون القليل من هذا واليسير من ذاك، أما البقية منا فلا يملكون إلا الوصفات. نحن نُفضل الاتجاهات الواضحة التي تُوضح بتعابيرَ لا لبس فيها المكوناتِ المطلوبة، والمقاديرَ المطلوبة، وخطوات عمل المنتج المطلوب وعدد الوجبات المطلوب عملها. وفي حين تنتشر بعض الأفكار الدارجة عن أن الكيميائيين

ينسجمون مع المجموعة التي تقوم بإضافة القليل من هذا واليسير من ذاك — وأنه يمكن إدخال قدر كبير من الإبداع والفنون على البحث الكيميائي — إلا أن الكيميائيين ينسجمون مع المجموعة الأخرى التي تتبع $2H_2 + O_2 \longrightarrow {}^{spark}2H_2O$ هي وصفة كيميائية.

وسوف نستهلُّ مناقشتنا عن الوصفات هذه عن طريق فحص اثنَين من المبادئ الرئيسية تُبنى عليهما الوصفات؛ وهما حفظ الكتلة وقانون النِّسب الثابتة. يُعرِّفنا قانون النسب الثابتة بقائمة المكونات، ويُخبرنا قانون حفظ الكتلة عن حجم الكعكة التي سوف نخبزها.

يُخبرنا قانون النسب أن مكوناتنا لها صيغة كيميائية محددة، فعلى سبيل المثال $H_2O$ هي الصيغة الكيميائية للماء. وتحوي الصيغة الكيميائية في جوهرها قائمة بالعناصر التي تُكون المادة وعدد ذرات كل عنصر مطلوب. ثمة بعض المرونة، لكن في ترتيب العناصر فقط، تمامًا مثل المرونة الموجودة في ترتيب العناصر في الجدول الدوري. ويمكن جمع كم معلومات من طريق الصيغة أكبر من جمعها من مجرد العدد ونوع المكونات.

فعلى سبيل المثال الصيغة الكيميائية لملح الطعام $NaCl$ تظهر دائمًا في نفس الترتيب؛ فالصوديوم يُكتَب أولًا ثم الكلور من بعده، ويُبنى هذا الترتيب استنادًا إلى اتفاق بين الكيميائيِّين وهو أنه ينبغي أن يُذكَر الأيون الموجب لمركب أيوني أولًا، ويُعزَى ذلك إلى ميل الأيونات الفلزية إلى تكوين أيونات موجبة؛ ومن ثَم يُذكَر اسم الفلزات أولًا بشكلٍ عام يعقبها اللافلز، كما أصبح الأمر أيضًا ممارسة قياسية حيث نضع العنصر الذي يقع في مركز المجموعة المرتبطة معًا برابطة تساهمية في مقدمة المجموعة؛ ومن ثَم تكون صيغة النشادر — التي لديها ثلاث ذرات هيدروجين مرتبطة عن طريق رابطة تساهمية بذرة نيتروجين مركزية — هي $NH_3$. ويملك ثاني أكسيد الكربون الذي تكون صيغته الكيميائية $CO_2$، ذرة كربون مركزية وذرتي أوكسجين على كلا جانبَيها؛ ومن ثم فمجرد إلقاء نظرة على الصيغة الكيميائية للعنصر يُمكِّننا من معرفة أن هناك نواتَيْ أوكسجين بسبب وجود الرقم ٢ على الأوكسجين.

علاوة على أنه يُعتبَر ترتيب العناصر في المركب الكيميائي أمرًا ذا أهمية، وعليه يختلف المركب $CH_3CH_2OH$ عن المركب $CH_3OCH_3$. تحوي كلتا المادتَين نواتَي كربون، وستَّ نوى هيدروجين، ونواة واحدة أوكسجين، إلا أن المادة الأولى هي الكحول الإيثيلي وأحيانًا يُطلَق عليها «كحول الحبوب»، والمادة الأخرى هي ثنائي ميثيل الإيثير، وهما مادتان خصائصهما الكيميائية مختلفة بلا ريب، ويُطلَق على المركبات التي لها نفس عدد ونوع العناصر لكنها مرتبة في ترتيب مختلف «الأيسوميرات».

ثمة ثلاثة مركبات أيسوميرية شهيرة؛ وهي الحامض الفلمينيك وحامض السيانيك والحامض الأيزوسيانيك. ويُستخدَم الحامض الفلمينيك (HONC)، في عمل المتفجرات واسمه مُشتق من الفعل fulminate الذي يعني «يثور لفظيًّا». وصيغة الحامض السياني: HOCN ويُستخدَم في عمل السيانات السامة. وصيغة الحامض الأيزوسياني: HCNO وهو أقل شيوعًا حيث إنه عادة ما يؤدِّي مهمته كمادة أساسية لعمل الكثير من المركبات العضوية، ولا ينفجر فيك أو يُسبب لك التسمم مباشرة!

ويذكر قانون النسب الثابتة ببساطة أن الصيغة الكيميائية لأي مركب واحد تكون ثابتة ولا تتغير، وأن أي تغيير في الصيغة الكيميائية يُفضي إلى مادة جديدة ذات خواصَّ جديدة (تمامًا مثلما يُؤدي تبديل المكونات في الزبد إلى الفرق بين كعكة الطبقات والكعكة المحلاة). وعندما يكون هناك تفاعلٌ يُؤدي إلى تغيير الصيغة، تُعطَى الوصف عن طريق معادلة كيميائية. وبالاتفاق معًا قرر الكيميائيون وضع المواد الأصلية، التي هي المتفاعلات، عن اليسار يعقبها سهم، ثم المواد التي انتهينا إليها أي النواتج عن اليمين؛ فعلى سبيل المثال:

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

التي تعني أن الكربون بالإضافة إلى الأوكسجين سوف يُكونان ثانيَ أكسيد الكربون.

إلا أن ثمة اختلافًا بين وصفات كتاب الطهو والتفاعلات الكيميائية؛ فليست كلُّ التفاعلات الكيميائية تنتهي إلى الاكتمال. ففي الكثير من التفاعلات الكيميائية، تظل كمية معينة من موادِّ التفاعل كما هي على طبيعتها الأصلية دون أن تشترك في التفاعل الكيميائي، مثل البودنج (حلوى تعد من دقيق أو أرز ولبن وبيض وفاكهة وسكر) غير المكتمل التسوية، فالبودنج الذي لم يُطبَخ تمامًا يكون بعضه بودنج وبعضه سائلًا. تُشبِه معظم التفاعلات الكيميائية البودنج غير المكتمل التسوية، فبعض نِسَب المواد المتفاعلة تتحول إلى نواتجَ والبعض الآخر لا يتحول. ويظل بقاء الكتلة كما هو بالنسبة إلى تفاعلات البودنج غير المكتملة، إلا أننا سنفترض مبدئيًّا أن كل التفاعلات تكتمل، أو بكلمات أخرى سنفترض أن كل المتفاعلات تتحول إلى نواتج وأن البودنج طُبِخ تمامًا، كل هذا من أجل التوضيح. عندما يكتمل التفاعل الكيميائي، يمكن التنبُّؤ التام بكمية النواتج عن طريق بقاء الكتلة: فإذا تضمَّنَت الوصفة الكيميائية رِطلَين من المتفاعلات فستكون كتلة النواتج رطلَين أيضًا.

قد يبدو مبدأ بقاء الكتلة أمرًا بديهيًّا. إذا حدث التفاعل الكيميائي، مثل ذلك التفاعل الذي في التجرِبة السابقة، فنحن نشعر بديهيًّا أن الكتلة قبل التفاعل ينبغي أن تظل كما

هي دون تغيير بعد التفاعل. إلا أن الدليل على ذلك لا يتَّسم بالوضوح دائمًا. إذا قام أحد الطهاة المعاصرين بوزن كل مكونات عمل الفطيرة المحلاة قبل طهيها ثم قام بوزن الفطيرة بعد الطهي مباشرة، فإنه لن يندهش إذا ما وجد أن الكتلة أقل، فيُمكن مشاهدة الفقاعات أثناء طهي الفطير كعلامة على تصاعد الغاز من الناتج، وعلى أن الكعكة أصبحَت بعد طهيها ذاتَ قوام أكثر جفافًا، دليلًا على فقدان الماء، ولو كان هذا الطاهي قد وُلِد في وقتٍ ما قُبيل هذا الإدراك الواضح لتركيب الهواء وبخار الماء، لما استطاع هذا الطاهي أن يعرف سوى أن الفطيرة فقدت جزءًا من وزنها ولما خلص بالضرورة إلى أن الكتلة بقيت. وأحد الطهاة الذين لم يُخدَعوا في هذا الأمر هو الكيميائي لافوازيه.

لقد التقينا بلافوازيه من قبل في خضم مناقشتنا عن الأكسدة والاختزال، وسنُضيف الآن أن لافوازيه كان أيضًا ذا أثر في ترسيخ صلاحية مبدأ بقاء الكتلة، وقد استخدم التفاعل:

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

لكن على غرار نمط برجوازي لا غش فيه، استخدم لافوازيه الماس من مصدره الكيميائي وهو الكربون، واستخدم أشعة الشمس المُجَمعَة عبر عدسة ضخمة، وقام بإجراء التجرِبة في وعاء محكم الغلق، وبيَّن بواسطة اندفاع الهواء بعد التفاعل أن جزءًا من الهواء استُهلِك. إلا أنه قام بوزن الوعاء قبل كسره وفتحه، وأثبت أنه يزن بعد تفاعل احتراق الماس تمامًا مثل قبل التفاعل، أي إن الكتلة بقيت.

لكن ثمة بعض التحسينات الهامة التي كان يجب إدخالها قبل ترجمة عمل لافوازيه إلى تفاعلات كيميائية حديثة، ومن أبرزها وصف جون دالتون للذرات. ومع أن هذه الفكرة تحوم في الأجواء على الأقل منذ عصر الفلاسفة اليونانيين القدامى، أخذ دالتون الحظوة في طرح فكرة اختلاف ذرات العناصر المختلفة، وإحدى الخصائص التي تجعلها مختلفة هي الكتلة، فكل عنصر لديه ذراتٌ ذاتُ خصائصِ كتلة مختلفة. وقد أنارت هذه الفكرة الطريق لتحديد الكتلة — الكتلة الذرية — لكلٍّ من العناصر. وفي التفاعل السابق بين الماس والأوكسجين، تتضمَّن الصيغة الكيميائية تَكوُّن جزيء ثاني أكسيد الكربون عند اتحاد ذرَّتَي أوكسجين مع ذرة كربون. وتُؤكِّد لنا ذرات دالتون أيضًا بقاء الكتلة؛ حيث إنه يوجد ذرة كربون وذرتان أوكسجين عن اليسار، وكذلك ذرة كربون وذرتان أوكسجين عن اليمين، أي نفس عدد الذرات، بنفس الكتلة، مع اختلاف الترتيب فحسب. وإذا كان عدد الذرات ونوعها هما نفسهما في اليمين كما في اليسار، يُقال إن التفاعل متوازن.

ويُمكِن مضاهاة التفاعل ببائع الزهور؛ إذا قام بائع الزهور بوضع الزهرية على الميزان وإلى جانبها باقةٌ من الزهور، فإننا لن نتوقع أن تتغير قراءة الميزان بعد أن يلتقط بائع الأزهار كل الزهور ويُنسقها بداخل الزهرية. تُشبه التفاعلات الكيميائية التنسيق الجديد للزهور — ليست الزهور جديدة، ولكن التنسيق هو الذي يكون جديدًا — ومن ثَم تَكون الكتلة هي نفسها قبل وبعد تنسيق التفاعلات الكيميائية.

وتَنقل لنا التفاعلات الكيميائية المتوازنة معلوماتٍ جوهريةً بشأن كمية المتفاعلات التي سنحتاج إليها للحصول على كمية معينة من النواتج، أو بطريقة أخرى كمية النواتج الناجمة عن كمية معينة من المتفاعلات، ويُعتبَر هذا النوع من المعلومات مهمًّا عند التعامل مع تفاعلات تحدث في كئوس موضوعة على مائدة، لكن عند التعامل مع حمولات صهاريجَ من المواد الكيميائية في مُفاعِلات في حجم الصوامع، يكون هذا النوع من المعلومات في غاية الحساسية والخطورة، ومن حسن حظ الصناعات الكيميائية وجود كيميائيين مكرَّسين لدراسة أفضل الطرق للتعامل مع كافة أنواع المواقف الكيميائية الدقيقة والمتطلبة الحذر والبراعة من كميات الحرارة الهائلة إلى كميات المواد الهائلة إلى الحامض والقاعدة وتفاعلات الحالة الغازية؛ فهم مهندسون كيميائيون بارعون.

**على سبيل المثال: الهندسة الكيميائية، هذا كل شيء**

عندما يُفكِّر الناس في الصناعات الكيميائية، قد يأتي على أذهانهم صناعةُ المبيدات الحشرية أو الأدوية أو المذيبات أو مواد التشحيم أو عمليات معقَّدة نسبيًّا، ويندهش الكثير من الناس عندما يعلمون أن معظم صناعة الكيمياء ترتكز حول صناعة أربع موادَّ كيميائية بسيطة نسبيًّا، وهي: حامض الكبريتيك وحامض الفوسفوريك وهيدروكسيد الصوديوم وصديقنا القديم كلوريد الصوديوم.

ويُمثِّل حامض الكبريتيك هذا ومشتقاتُه الحجم الأكبر من الكيماويات المُنتِجة في العالم. ويأخذ حامض الكبريتيك قوام الشراب في شكله المركَّز (والمعروف بالأوليم oleum) وكان معروفًا في وقت ما بزيت الزاج؛ بسبب هذا المظهر. وحامض الكبريتيك مُسبِّب شديد للتآكل ويُهاجم البلاستيك والخشب والجلد والأغشية المخاطية ومعظم الفلزات في حالته المركزة، لكن يُمكِن تخزينه في زجاجات مصنوعة من الزجاج. ويُعتبَر حامض الكبريتيك المخفَّف جدًّا (كمية صغيرة من الحامض مخلوطة بكمية كبيرة من الماء) هو المادة الفعالة في المحلول المُخفَّف لقلوية مياه حوض السمك المقترح في «قائمة المشتريات والمحاليل». ويُعتبَر حامض الكبريتيك في شكل أكثر تركيزًا؛ هو محلول الحامض المستخدَم في بطاريات السيارات الحامضية الرَّصاصية، وتُصمَّم بطاريات السيارات هذه الأيام بطريقة محكمة الغلق بحيث لا يكون لدى المُستخدِم العادي للسيارة سببٌ لفحص البطارية أو تزويدها بالسائل. ويتسنَّى للسائق أن يستمتع بسرعة مُحرِّك عالية، دون الالتقاء بحامض الكبريتيك الذي في البطارية، لكن بالنسبة إلى الذين حدث ولامسوا حامضَ البطارية، فإن هذه التجربة لا يُمكِن أن ينسَوها؛ فهيجان البشَرة يكون مباشرًا وتأثيره على الملابس قويًّا ويتعذر إصلاحه.

لكن استخدام حامض الكبريتيك في بطاريات السيارات لا يُعلِّل إنتاجه بهذه الكميات المهولة، وأكبر استخدام فريد لحامض الكبريتيك هو في المخصِّبات؛ لا سيما في الخليط الذي يحوي حامض الكبريتيك وصخر الفوسفات والذي يُسمَّى بالسوبرفوسفات؛ لأن الفوسفات معدِن أساسي تحتاج إليه النباتات، ولأنه مكوِّن أساسي في العظام، فإن مسحوق العظام كان يشيع استخدامه في وقت ما كمُخصِّب، يُمكن في هذه الأيام استخدام الفوسفات الصخري المُعالَج بحامض الكبريتيك ليُصبِح أكثر قابلية للذوبان أيضًا.

ويُستخدَم هيدروكسيد الصوديوم أو اللي، NaOH، في إنتاج الصابون والأنسجة والمنتجات البترولية والصبغات والمنظفات والورق، وينتج هيدروكسيد الصوديوم عن طريق تشغيل تيار كهربائي عبر خليط من الماء وNaCl (ملح الطعام). وتُعتبَر المعادلة المتزنة الآتية مباشرة:

$$2H_2O + 2NaCI \longrightarrow 2NaOH + CI_2 + H_2$$

ويُشير الرقم الموجود أمام صيغة الماء وأيضًا أمام صيغة ملح الطعام إلى عدد وحدات كل منهما التي تدخل في التفاعل؛ فجُزيئا ماءٍ يتفاعلان مع وحدتَين من كلوريد الصوديوم

ليكونا وحدة واحدة من هيدروكسيد الصوديوم وجزيء واحد من غاز الكلور $Cl_2$، وجزيء واحد من غاز الهيدروجين $H_2$. وبكلمات أخرى إذا كان علينا أن نكتب كل مُتفاعِل على حدة تكون المعادلة على الصورة الآتية:

$$H_2O + H_2O + NaCI \longrightarrow NaOH + NaOH + CI_2 + H_2$$

وعدد ذرات الهيدروجين قبل التفاعل هو ذرتان في كل جزيء ماء، أي أربع ذرات هيدروجين. وإجمالي ذرات الهيدروجين بعد التفاعل ذرتان من غاز $H_2$، الهيدروجين، بالإضافة إلى واحدة من كل جزيء هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، أو أربع ذرَّات. وعليه يكون لدينا نفس الكمية من الهيدروجين قبل وبعد التفاعل، لكنها تتواجد في مركبات مختلفة. الهيدروجين متزن، وعدد ذرات الأوكسجين قبل التفاعل ذرة واحدة من كل جزيء ماء، أي ذرتَا أوكسجين، ويكون عدد ذرات الأوكسجين بعد التفاعل ذرةً من كل جزيء هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، أو ذرتَي أوكسجين. الأوكسجين متزن، وعدد ذرات الصوديوم بعد التفاعل ذرة في كل جزيء هيدروكسيد صوديوم، وعليه الصوديوم متزن، وإجمالي الكلور هو ذرة في كل جزيء كلوريد صوديوم قبل التفاعل واثنان في الكلور ($Cl_2$) بعد التفاعل.

إلا أن المشكلة في هذه الطريقة الخاصة لإنتاج هيدروكسيد الصوديوم بالنسبة إلى الهندسة الكيميائية لا تتمثَّل في توازن التفاعل، وإنما في التعامل مع النواتج الثانوية؛ فكِلا النواتج الثانوية لهذا التفاعل، الكلور ($Cl_2$) والهيدروجين ($H_2$)، هي غازات تحت الظروف العادية، والغازات تشغل حيزًا من الفراغ، رطل لكل رطل، أكبر من نظرائها في الحالة الصلبة. ويُعتبَر إنتاج نواتج ثانوية في حالة غازية هو الأساس في تجرِبة صاروخ الزجاجة، حيث تتفاعل بيكربونات الصودا مع الخل مكونة غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يتمدَّد ليشغل حيزًا كبيرًا جدًّا من الفراغ أكبر من حجم ذلك المفاعل مُجبرًا السدادة على الاندفاع بقوة. ويُقابل إنتاج كل طن من هيدروكسيد الصوديوم انبعاث نحو طن وثلاثة أرباع الطن من الغاز، أي إن إنتاج كل قدم مربعة من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، يُقابله إنتاج ما يقرب من ألفَي قدم مربعة من الغاز، ويُشبه هذا التفاوت في الحجم تضخُّم جهاز تليفزيون حجمه سبع عشرة بوصة ليَملأ حجرتَين من البيت. فهذا مقدار كبير جدًّا من الحجم وقد يُمكنه أن يُسبب انفجارًا كبيرًا. وعليه يُمثل احتواء الغاز والتهوية والانبعاث تحديًا كبيرًا للعاملين في إنتاج المواد الكيماوية.

لكن مثلما يُؤدي الاستخفاف بمثل هذه المشكلات إلى تداعي مهنة المهندسين الكيميائيين، وتُؤدي المغالاة في هذا الأمر إلى نفقات غير ضرورية أيضًا، يجب أن يكون المهندس الكيميائي أيضًا على دراية بأن عملية التقدير تقوم على افتراض أن كل جزيء من الغاز يشغل حيزًا من الفراغ كما لو كان الشيء الوحيد الموجود في العالم. في واقع الأمر، ثمة انجذابات وتنافرات بين الجزيئات. ويُؤدي الانجذاب بين الجزيئات إلى تكثف الغازات إلى سوائل. ويزيد التنافر بين الجزيئات من صعوبة ضغطها حيث يتضاءل الحجم أكثر وأكثر، ويجب أن يأخذ المهندسون الكيميائيون هذا الانجذاب والتنافر اللذَين يُطلَق عليهما معًا «القوى البينجزيئية»، بعين الاعتبار، فتُعتبَر أيضًا هذه القوى البينجزيئية الأساس لخصائص عديدة مثيرة نلحظها للمواد، وهو ما سنتعرض له الآن.

# تجربة ٨: طبقة فوق طبقة

واليوم إذا ما التقت برجل، هب أنه بطَلنا، ستتصارع معه كيمياؤها لكنها ستمتزج معه، كأنها بورجيا وكأنه نيرون، كأن الأمر خدعة شيطانية صغيرة.

إيدجر لي ماسترز في كتابه
«مختارات من سبون ريفر»، ١٩٢٠

بعد ارتداء نظارتك الواقية، خذ كوبًا شفافًا صغيرًا وصُبَّ فيه نحو بوصة كاملة (٢,٥سم) جلسرين (المقترح في «قائمة المشتريات والمحاليل»). خذ بعض الماء المصبوغ بألوان طعام

وصُبَّ على الجلسرين وبنفس ارتفاع الجلسرين. ينبغي أن تلحظ طبقتَين مُتمايِزتَين في الكوب.

أضف عليهما طبقة من زيت الكانولا تلحظ ثلاث طبقات مختلفة. قلِّب الخليط. يختلط الماء الملون بالجلسرين، ويظل زيت الكانولا مستقرًّا في طبقة منفصلة عند التوقف عن التقليب، وقد يأخذ الأمر بضع دقائق حتى تنفصل الطبقات.

أضف طبقة من الصابون السائل إلى المحلول، ثم شاهده وهو يترسَّب بين طبقة خليط الجلسرين والماء وطبقة زيت الكانولا. الآن عندما تختلط الطبقات (قلب برفق كي لا تُحدِث فقاعات) يجعل الصابون زيت الكانولا يمتزج بالجلسرين. وينتج عن ذلك خليطٌ متجانس، وقد ينفصل الخليط مرة أخرى في نهاية الأمر، ولكن هذا قد يستغرق وقتًا أطول مما لو كان المنظف غير موجود.

انفصل المحلول في أول الأمر بسبب التفاوت في قوى الجذب البينجزيئية، وهي نوع من أنواع القوى البينجزيئية، وتحدث هذه الانجذابات بين الجزيئات على عكس القوى البينجزيئية — الروابط الكيميائية — التي تربط الأنوية داخل الجزيء.

وهذا الاختلاف مثل اختلاف كتاب مجلد إزاء الأوراق الملصقة معًا، فالغرض من جلدة الكتاب أن تظل ثابتة، ولا يتيسَّر فصل الغِراء الذي يُمسك الأوراق معًا بسهولة، وعند عزل جلدة الكتاب، يكون لديك رزمة من الورق ولم يعد لديك كتاب. في حين تُشبه الأوراق المُلصقة قوى الجذب البينجزيئية، ويُعنى بالأوراق الملصقة أنها ملصقة بشكل مؤقَّت من فوق السطح، ويُمكن بسهولة فكُّها ونقلها. إذا قمت بلصق مجموعة من الأوراق اللزجة في كتاب ثم أزلتها مرة أخرى، فإنك لا تزال تملك كتابًا سليمًا وأوراقًا لزجة، الأوراق اللزجة تلتصق بسبب قوى الجذب البينجزيئية.

وقد تعرضنا بالفعل لتأثيرات القوى البينجزيئية في مناقشتنا حول الترسيب والذوبان، وهنا يكون لقوى الجذب البينجزيئية بين جزيئات الماء الأثرُ في تكوين قفص الأيونات الذي يسمح لبعض الأملاح بالذوبان في المحاليل المائية. تشترك جزيئات الجلسرين في بعض التشابهات مع الماء، إلا أن جزيئات الجلسرين على حدةٍ لا تزال ينجذب بعضها لبعض بقوة ولا تقبل الماء بين طبقاتها إلا في وجود إثارة قوية، وحدثت الإثارة في هذه التجرِبة في صورة التقليب، لكن ما من قوة للتقليب استطاعت أن تُذيب زيت الكانولا في الجلسرين حتى أُضيف الصابون.

يلعب الصابون دور الدبلوماسي الأعظم في القوى البينجزيئية؛ ينسجم الصابون مع الانجذابات لكلٍّ من الماء والزيت ويختبرها جيدًا، وهذا هو الأساس الذي تقوم عليه كفاءته

كعنصر منظف، يتحد الصابون بالشحم والزيت والقاذورات، ثم يتحد بالماء مما يسمح للقاذورات أن تذهب بعيدًا بالماء.

لكن تزيد أهمية الدور الذي تلعبه جزيئات أشباهِ الصابون، وهي الجزيئات التي تنجذب إلى كلٍّ من المواد شبه المائية والمواد شبه الزيتية، عن مجرد تنظيف البشَرة؛ فهي المكون الرئيسي لجدران الخلايا الحية في جلد الإنسان. فقد يبدو أن القوى البينجزيئية ليست ذات أهمية نسبيًّا في بادئ الأمر عند مقارنتها بالروابط الكيميائية، لكن في حين تحدد الروابط الكيميائية تركيب جزيء واحد، فإن قوى التجاذب البينجزيئية هي التي تُحدد كيفية تصرف هذا الجزيء تجاه الجزيئات الأخرى؛ فكل الحياة تدور حول تصرف الجزيئات كما لاحظنا في خصائص المواد الجزيئية والمخاليط.

الفصل الثامن

# التزلق والانزلاق من منظور القوى البينجزيئية

في بادئ الأمر وجد نفسه يُحدِّق في اللوحة حين اجتاحه شعور بالاهتمام العلمي. مثل هذا التغير الذي كان ينبغي أن يحدث كان أمرًا لا يُصدَّق من وجهة نظره. على أن هذا التغيير كان حقيقة لا خيالًا. ترى هل هناك ألفة وثيقة بين الذرات الكيميائية التي شكلت نفسها على هيئة صورة ولون على هذه اللوحة وبين الروح الساكنة داخله؟

أوسكار وايلد في روايته
«صورة دوريان جراي»، ١٨٩٠

تلعب القوى البينجزيئية دورًا هامًّا في الكيمياء؛ فالقوى البينجزيئية هي قوة الانجذاب والتنافر التي تحدث بين الذرات والجزيئات وتختلف عن الروابط الكيميائية. ويُسبِّب كسر الرابطة الكيميائية نشوء مادة جديدة تتفاعل على نحوٍ مختلف مع المواد الكيميائية الأخرى، في حين لا يُغير كسر قوى الجذب البينجزيئية الصيغة الكيميائية أو النشاط الكيميائي، إلا أن القوى البينجزيئية تُحدد مدى سرعة حدوث التفاعل، أو إذا كان من الممكن حدوثه في أي وقت، وتُحدد القوى البينجزيئية أيضًا طبيعة المادة؛ سواءٌ كانت مادة سائلة أو صُلبة أو غازية في درجة حرارة معينة – وهو ما يُعَد أمرًا هامًّا للراغبين منا في الشرب أو الأكل أو التنفس!

وكان العلماء في أواخر القرن التاسعَ عشر وأوائل القرن العشرين لا يزالون يُجاهدون للوصول إلى فهم القوى البينجزيئية؛ لذا فمما لا شك فيه أن أوسكار وايلد لم تكن لديه صورة واضحة عن القوى البينجزيئية في عقله عندما كتب عن «الألفة الوثيقة» بين الذرات الكيميائية في روايته «صورة دوريان جراي»، إلا أن وصفه للذرات الكيميائية بأنها «وثيقة الألفة» كان مناسبًا. وتتسم القوى البينجزيئية بالتعقيد وتتكون من انجذابات وتنافرات. وتتمثل قوى الجذب في تلك القوى التي بين جزيئات الماء والتي تسمح للماء بأن يتكثَّف عندما يصل إلى درجة كافية من البرودة، وقوى التنافر البينجزيئية لجزيئات الماء هي ما تجعل الماء يبدو مثل الكتل الصلبة عندما يتصادم بعضها مع بعض بقوة (هل سبق لك أن صُدِمت بعنف بموجة عارمة في البحر؟) إذا لم يكن هناك انجذابات بينجزيئية، لتبخَّرت أجسادنا إلى غازات، وإذا لم يكن هناك تنافرات بينجزيئية، لهوينا في الوحل.

سوف نبدأ بقوى التنافر بين الجزيئات؛ فقد شاهدنا في تجربة «الساحرة والماء» التي قدمناها من قبل، سيلًا رفيعًا من الماء ينجذب إلى الملعقة البلاستيكية ذات الشحنة الإلكتروستاتيكية المكتسبة. بالمثل، إذا نُزعت قطعة من شريط لاصق بسرعة من بكرة الشريط، فإنها ستجذب إليها أيضًا سيلًا رفيعًا من الماء. لكن إذا نُزعت قطعتان من البكرة وتدلَّيَتا من بين الأصابع، فإن هاتَين القطعتَين ستُحاولان التنافر بعيدًا إحداهما عن الأخرى، حيث إنهما اكتسبتا الشحنة نفسَها عند إزالتهما من بكرة الشريط، وتنافرتا لأن الشحنات المتشابهة تتنافر. وعندما تنجذب ذرتان أو جزيئان بعضهما لبعض، فإنهما يقتربان بعضهما من بعض جدًّا، لكن ليس أكثرَ من حدٍّ معين. فالإلكترونات لديها بعضُ الاضطرابات فيما يخص الاقتراب، فعندما تقترب ذرتان أو جزيئان مختلفان أحدهما من الآخر بشدة، فإن التنافر بين سحب الإلكترونات سيَفصلهما.

وتُعتبَر قوى الجذب بين الجزيئات أيضًا ذات طبيعة كهربائية، لكن الموقف هنا يُمكن أن يكون أكثر صعوبة؛ لأنه من الممكن أن تعتمد قوى الجذب بين الجزيئات أكثر على شكل الجزيء، وهو الشكل الذي يخضع باستمرار إلى تغيُّرات طفيفة، وتكون الجزيئات في وضع حركة مستمرة؛ تهتز وتدور وتتطاير في كل الاتجاهات. علاوة على أن الجزيئات لا تتحرك بنفس السرعة، لكنها تتحرك في مدًى معين من السرعات، فليست جميعها تدور أو تهتز بنفس التردد، بل في مدًى معين من الترددات.

وتجعل هذه المتغيرات حساب مقدار حجم قوى التجاذب بين الجزيئات في أي موقف مستحيلًا ظاهريًّا، لكن بالرغم من فرديتها، فإنها تلتصق بعضها ببعض. ويُعتبَر فَهم هذا الالتصاق أمرًا في غاية الضرورة فيما يتعلق بفهم تصرُّف المواد. وكبداية لحل هذا الالتصاق الصعب سنعرف ثلاث طرق تنجذب بها الجزيئات بعضها إلى بعض: وهي انجذاب أيون موجب إلى أيون سالب، وانجذاب جزيء ثنائيِّ الاستقطاب إلى جزيء ثنائي الاستقطاب، ثم الفكرة الجديدة التي سنُناقشها وهي قوى التشتيت.

يُعتبَر انجذاب أيون موجب إلى أيون سالب تفاعلًا مباشرًا وقويًّا، وهو في حقيقة الأمر تفاعلٌ قوي جدًّا حتى إنه يميل إلى الهيمنة عند وجود الأيونات الموجبة والسالبة. وكما أشرنا في مناقشتنا عن الترسب، عندما تجد الأيونات المتضادة بعضها بعضًا، فإنها تُكوِّن رابطة أيونية وتخرج من المحلول، لكن الانجذابات الأيونية لا تسود دائمًا؛ فجزيئات الماء تعزل الأيونات بتكوين الأقفاص حول الأيونات، وتحدث أقفاص الماء هذه نتيجة لانجذابات الجزيئات ثنائية الاستقطاب بعضها إلى بعض، ولانجذابات الجزيئات ثنائية الاستقطاب إلى الأيون المفرد أيضًا.

ولكي نفهمَ الجزيئاتِ ثنائيةَ الاستقطاب على نحو أفضل، تذكَّر أننا شرحنا من قبل أن الإلكترونات تميل إلى أن تربط نفسَها بالكيان ذي السالبية الكهربية الأعلى عند الارتباط، وعليه يُسَبِّب هذا توزيعًا غيرَ متساوٍ للإلكترونات، ويكون أحدُ طرَفَيِ الرابطة ذا شحنة سالبة أكبر، أو ذا شحنة موجبة أكبر من الطرف الآخر، وعندما يكون الموقف هكذا، نقول إن الرابطة ثنائية الاستقطاب، وعندما تكون الروابط ثنائية الاستقطاب مضادةً بعضها لبعض بشكل مباشر، فإنها تتعادل بعضها مع بعض أو يُلغِي بعضُها أثرَ بعض، ومع أن الروابط قد تكون ثنائيةَ الاستقطاب فإنه لا يوجد جزيء ثنائي الاستقطاب بشكل خاص، وهذا حال ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$)؛ ففي ثاني أكسيد الكربون تتَّجه كثافة الإلكترونات نحو الأوكسجين الأكثر سالبية، لكن يبقى الكربون في وسط ذرَّتَي الأوكسجين ($OCO$)، وعليه يكون الصراع متعادلًا.

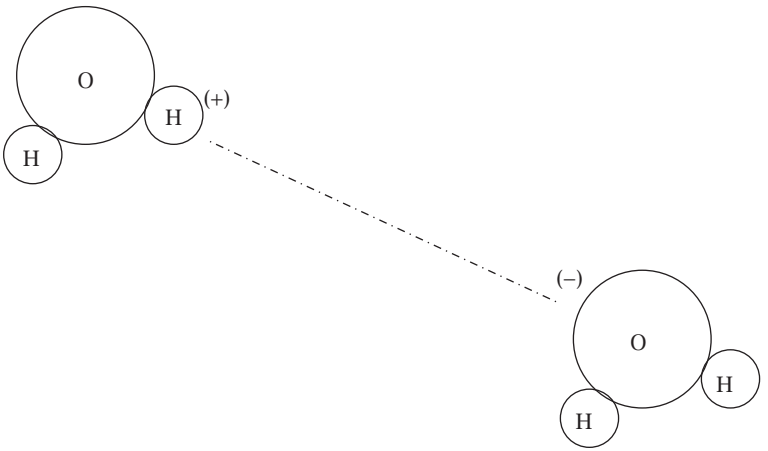
لكن يختلف وضع الماء؛ فكما أوردنا من قبل، تأخذ جزيئات الماء ($H_2O$) شكل حرف V بحيث يكون الأوكسجين في منتصف الحرف والهيدروجين عند طرَفَيه، فيُعتبَر الماء جزيئًا ثنائيَّ الاستقطاب، فالأوكسجين أكثر سالبيةً كهربية من الهيدروجين؛ ومن ثَم تنجذب الإلكترونات نحو طرَف ذرَّة الأوكسجين وبعيدًا عن طرف الهيدروجين، حينئذٍ يُقال إن للماء عزمًا ثنائيَّ القطب صافيًا، بمعنى أنه عندما تتعادل كل القوى معًا فإن أحد الطرفَين يكون أكثرَ سالبية من الآخر.

وكما رأينا، تتفاعل الجزيئات القطبية بعضُها مع بعض مثلما يتفاعل القضيبُ المغناطيسي، ويُطلَق على التفاعل مصطلَح تفاعل «ثنائي الاستقطاب». وفي التفاعل ثنائي الاستقطاب يصطفُّ الطرَف الموجب لأحد الجزيئات القطبية مع الطرف السالب لجزيء آخر مثلما ينجذب القطب الشمالي لمغناطيس إلى القطب الجنوبي لمغناطيسٍ آخر، لكنَّ هذه القضبان المغناطيسية تدور وتهتزُّ وتتطاير في جميع الاتجاهات.

وقد كنا شَغوفين من قبلُ لمعرفة الكيفية التي يُساعد بها هذا التفاعل على بِناء الأقفاص حول الأيونات لحفظها في المحلول، لكنه يُعتبَر مهمًّا حتى في غياب الأيونات أيضًا. وتَعمل التفاعلات ثنائية الاستقطاب على حفظ جزيئات الماء معًا في الحالة المكثَّفة. ويُعتبَر الماء ماهرًا بصورة خاصة في أدائه كمُذيب وكمُكثف، ويرجع ذلك إلى أن جزيئات الماء صغيرة وقادرة حتى على اجتياز نوع آخر من الانجذاب، وهو انجذاب ثنائي الاستقطاب ويُسمَّى «الرابطة الهيدروجينية».

ولا تُعتبَر الرابطة الهيدروجينية رابطة كيميائية بالدرجة التي يسمح معها بحدوث تغيير في الصيغة الجزيئية؛ لذا يُعتبَر مصطلح «الرابطة الهيدروجينية» تسمية خاطئة، إلا أن الرابطة الهيدروجينية تُعتبَر رابطة قوية للغاية. وتحدث الرابطة الهيدروجينية عندما يرتبط جزيء هيدروجين كيميائيًّا بعنصر ذي سالبية كهربية عالية مثل الأوكسجين أو الفلور أو النيتروجين، وعندما ينجذب — في انجذاب بينجزيئي — إلى عنصر ذي سالبية كهربية في جزيء آخر، ويُوضح هذا الموقف في شكل ٨-١. وتُعتبَر الرابطة الهيدروجينية عاملًا في غاية الأهمية أيضًا في سلوك الماء؛ لأن الماء يحظى بفرصتَين لتكوين الروابط الهيدروجينية، فلديه ذرتا هيدروجين ترتبطان كيميائيًّا بذرة أوكسجين في الجزيء.

ويعتبر الماء بارعًا جدًّا في تكوين الأقفاص وفي إذابة الأيونات، ويُعزى ذلك إلى مقدرته على تكوين الروابط الهيدروجينية، وبسبب هذه القدرة الفائقة للماء كمُذيب؛ يُعتبَر الماء هو العاملَ الأساسي للكثير من التفاعلات الكيميائية الرئيسية بما فيها تلك التفاعلات




شكل ٨-١: يُسمَّى الانجذاب بين طرف ذرة الهيدروجين التي تحمل شحنة موجبة ضئيلة لأحد جزيئات الماء وبين طرف ذرة الأوكسجين التي تحمل شحنة سالبة ضئيلة لجزيء آخر «الرابطة الهيدروجينية». وتُعتبَر الرابطة الهيدروجينية انجذابًا بين جزيئَين وليس رابطة كيميائية. ويجب أن يكون الهيدروجين مرتبطًا كيميائيًّا بعنصر ذي سالبية كهربية عالية مثل الأوكسجين أو النيتروجين أو الفلور؛ كي نحصل على الرابطة الهيدروجينية.

المسئولة عن الحياة، فالكثير من المحاليل التي نتعامل معها بصفة يومية هي إما ماء وإما محاليل مائية.

ومن السوائل الأخرى الشائعة سائلُ الزيت، سواءٌ كان في شكل زيت الطهي أو في شكل البنزين أو غيرهما من المنتجات البترولية، وهذه المواد لا تُعتبَر ماء بشكل جذري فحسب، بل إنها أيضًا لا تمتزج مع الماء جيدًا. وتُعرَف الزيوت والمنتجات البترولية بمصطلح «الهيدروكربونات»؛ لأنها تتألَّف في المقام الأول من هيدروجين منتظم في سلاسل مع الكربون، وتختلف قوى الجذب البينجزيئية الخاصة بهما عن تلك التي للماء.

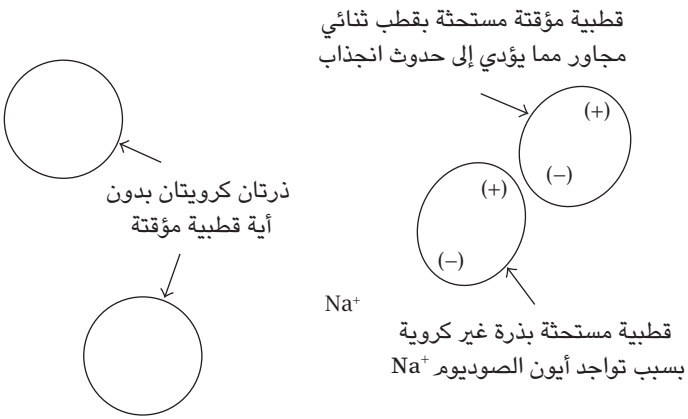
وقد يُعتقَد للوهلة الأولى أن الروابط التي بين الهيدروكربونات هي روابطُ قطبية أيضًا. الهيدروجين والكربون ليسا قريبَين للغاية أحدهما من الآخر في الجدول الدوري، وعليه ثَمة فرق كبير جدًّا بينهما في السالبية الكهربية، لكن كما ستتذكَّر، لا يتبع الهيدروجين الاتجاهات العامة — فهو صغير للغاية عن أن يحمل الكثير من الشحنات السالبة — ومن

ثَم يُعتبَر الهيدروجين بالفعل قريبًا جدًّا من الكربون في السالبية الكهربية. بالإضافة إلى أنه يمكن أن تتوزَّع ذرات الهيدروجين بالتساوي حول ذرة الكربون في الهيدروكربونات؛ لذا تميل القطبية الضئيلة التي تتمتع بها رابطة الكربون والهيدروجين إلى أن تتعادل، لكن الهيدروكربونات تُكوِّن بشكل بديهي سوائل، وحتى المواد الصلبة منها تُسمَّى موادَّ شمعية؛ ومِن ثَم ينبغي أن يكون هناك شكلٌ من أشكال الانجذابات البينجزيئية.

ويمكن فَهم تكثُّف الهيدروكربونات على نحوٍ أفضل عند إدراك أن الهيدروكربونات الكبرى هي التي تتكثف عادةً بسهولة أكثر. فيكون الميثان المكون من ذرة كربون واحدة وأربع ذرات هيدروجين غازًا (غاز المستنقعات على وجه الدقة) في درجة الحرارة والضغط العاديَّين. أما الأوكتان المكون من ثماني ذرات كربون في سلسلة وثماني عشرة ذرة هيدروجين فيكون سائلًا في الظروف العادية، وتميل الهيدروكربونات الأطول إلى أن تكون سوائلَ في درجة حرارة وضغط الغرفة، حيث تنجدل السلاسل الطويلة بعضها حول بعض. ونتيجة هذا التشابك تكون السلاسل قريبةً بعضُها من بعض، ويؤدي هذا القرب إلى زيادة تأثير قوى التجاذب الضعيفة للروابط القطبية على عملية الالتصاق أيضًا.

ومن ناحية أخرى، لا يشوب غازَ النيتروجين $N_2$ أيُّ اختلافات في السالبية الكهربية حيث ترتبط ذرتان متطابقتان معًا؛ ومن ثَم لا تُعتبَر الرابطة قطبية بطبيعتها، وما من فرصة للتشابك لأنه لا تُوجَد سلاسلُ من النيتروجين؛ لأنه مجرد أزواج ثنائية الذرة، إلا أنه يُوجَد نيتروجين سائل وهو شائع بما يكفي حيث يُستخدَم في إزالة الثألول. ما الذي يربط جزيئات النيتروجين معًا في النيتروجين السائل؟ إنه انجذاب يُسمَّى «قوى التشتيت» أو «الانجذاب القطبي المستحث» أو «قوى لندن» نسبة إلى العالم فريتس لندن الذي وصفها.

ومهما يكن الاسم المطلَق عليه، فإن أصل هذا الانجذاب هو السحابة الإلكترونية الرقيقة التي تحيط بجزيء النيتروجين؛ لأن الإلكترونات يُمكن أن تُعتبَر متنقلة في السحابة الإلكترونية، ويُمكن وصفها بأنها محتشدة في أية لحظة عند طرف واحد من الجزيء أو عند الطرف الآخر. ويُطلق على هذا التوزيع المؤقت غير المتساوي للإلكترونات توزيع «القطبية المؤقتة»، إلا أنه يتصرَّف بالطريقة نفسِها التي تتصرف بها القطبية الدائمة؛ فهو ينجذب إلى أقطاب ثنائية أخرى، سواءٌ كان بصورة دائمة أو غير دائمة. وقد تكون إعادة التوزيع لحظية، أما إذا كان هناك أيون أو جزيء دائمُ القطبية قريبًا، فإن هذه الأنواع قد تُستحَثُّ على التصرف بقطبية لحظية أيضًا. هذا الموقف مُبيَّن في شكل ٨-٢.




شكل ٨-٢: يستثير أيون الصوديوم القطبية الثنائية المؤقتة في ذرة كروية الشكل بها سحابة إلكترونية. يدفع القطب الثنائي المستحث للذرة الأولى ذرةً أخرى لأن تحصل على قطبية ثنائية لحظية، وهذه الانجذابات القطبية الثنائية المؤقتة كافيةٌ لأن تجعل الغازات النبيلة المتماثلة تتكثف عند درجات الحرارة المنخفضة.

ومثلما تسبَّبت الملعقة البلاستيكية المشحونة مؤقتًا في تجربة «الساحرة والماء» في جعل الماء ينجذب نحوها، فإن القطبية الثنائية المستحَثة في أحد الأنواع تستحث القطبية الثنائية في نوع آخر، ولا تُعتبَر قوى التشتيت مؤثِّرة عبر رقعة ما بالقدر نفسه من الانجذابات القطبية الثنائية، إلا أنها كافية لتعليل وجود سائل الهليوم، وكذلك سائل النيتروجين وسائل الأوكسجين.

لكن لا يتكثف الهليوم تقريبًا بنفس سهولة تكثف الماء؛ لأن الهليوم لديه نوعٌ واحد من الانجذاب. أما الماء فلديه تراكمات من الانجذابات البينجزيئية. ويوجد في الماء المالح تباديل التفاعلات كافة؛ فثمة انجذابات قطبية، وانجذابات نتيجة قوى التشتيت، وانجذابات أيون مع أيون وانجذابات قطبية مع قوى تشتيت، وأيون مع قوى تشتيت؛ ومن ثَم يتسم الموقف كما لاحظنا بغاية التعقيد، أضف إلى هذا التعقيد حقيقة أن تأثير الانجذابات تقل مع المسافة التي تتغير دائمًا بسبب الأوضاع المتعددة لحركة الجزيء، ويُصبح الموقف ميئوسًا منه جدًّا.

من حسن الحظ أنه ليس علينا أن نُحلِّل بشدة كل تفاعل على حدةٍ كي نفهم الأثر النهائي — الأثر الذي يُوضِّح نفسه في العديد من الظواهر المعروفة مثل الاحتكاك والتماسك والالتصاق والفعل الشعري (متعلق بالخاصية الشعرية) والذوبان وفعل الصابون.

قد تكون قوى الاحتكاك أكثرَ القوى، التي يجب أن نتعامل معها بصفة يومية، تعقيدًا وسحرًا، تنشأ قوى الاحتكاك من مصدرَين — هما العوائق المادية للحركة والقوى البينجزيئية — لهذا السبب لا يُمكن إبطالُها تمامًا، وتتمثل العوائق المادية للحركة في الحواف البالِغةِ الصغر والمناطق الخشنة التي يُمكنك أن تجدها دائمًا إذا أمعنت النظر جيدًا. عند القيام بمحاولةٍ لجر إحدى المواد على مادة أخرى، فإن المناطق الخشنة لأحد الجوانب تُمسِك بالجوانب الخشنة لأحد جوانب المادة الأخرى، وتُسبب الاحتكاك أو مقاومة الحركة. بإزالة المناطق الخشنة يُمكن التغلبُ على هذا الأمر لكن إلى حدٍّ معين فقط، وعندما تُصبح المادة ملساءَ جدًّا تزداد إمكانية حدوث انجذابات بينجزيئية.

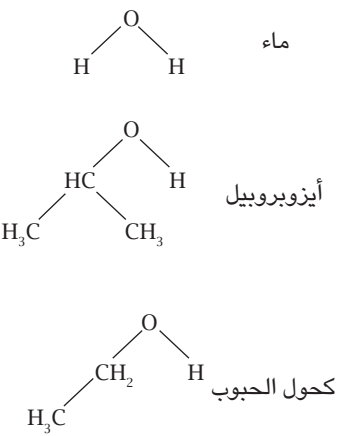
يُساعد الشحم أحيانًا على تقليل الاحتكاك؛ لأن الشحم يُكوِّن طبقة تعمل على عزل المواد المتحركة، ويُسبِّب الاحتكاك داخل الشحم، عندما يشد في اتجاهٍ واحد أو في الاتجاه المعاكس، في نهاية الأمر، تحلل الشحم، ولهذا السبب يجب تغيير الشحم الذي يُوجَد في الماكينات بصفة دورية، وكذلك الزيوت ومواد التشحيم في السيارات.

ويُمثِّل التماسك ميل الجزيئات المتشابهة لأن يلتصق بعضها ببعض، فعلى سبيل المثال، يُفضل الزيت أن يظل مع الزيت، والماء مع الماء، لهذا السبب يُمكِنهما الانعزال عند السماح لهما بالوجود بدون تأثير عليهما، وينتج التوتر السطحي، الذي يتَّضح في ارتفاع الماء الذي يأخذ الشكل المنحنيَ على قمة الكوب أو الملعقة، عن قوى التماسك. ويُظهر الماء قدرًا لا بأس به من التماسك بسبب نزوعه الشديد إلى تكوين روابط هيدروجينية؛ ومن ثَم قدر لا بأس به من التوتر السطحي. ويُعَد التوتر السطحي للبرك قويًّا بقدرٍ كافٍ يسمح بإيواء عالم من المخلوقات تمشي على الماء.

أما الالتصاق، كما نرى في الشريط اللاصق، فهو ميل الموادِّ المختلفة إلى الالتصاق معًا، ويُعَد الالتصاق أحدَ العوامل الرئيسة المضطَلِعة بمسئولية موجات السطح في المسطَّحات المائية. ومع أن الفيزياء تنمُّ عن عملية مُقايَضة غاية في التعقيد، تتضمن العديد من القوى؛ فإن الموجات تبدأ عن طريق التصاق الماء بالرياح التي تهب فوق المياه. وفكرة صب الزيت على المياه المضطربة، التي تُستخدَم غالبًا كمجاز عن التأثير المهدِّئ، تُبنَى

على أسس فيزيائية، وكانت تُستخدَم بالفعل عن طريق مركبات صيد الحيتان في الماضي، وقد نجحت نجاحًا محدودًا. يعوق الزيت التصاق الماء بالرياح؛ ومن ثَم يُمكنه أن يُسكِّن بعض الأمواج التي تُسببها الرياح، وبالطبع لا تتأثر بذلك الموجاتُ الكبيرة التي قد تكوَّنَت بالفعل وتحركَت بقوتها الدافعة؛ لذا لا تستغرق الكثير من الوقت في البحث عن زجاجة زيت السلطة عندما يأتي الإعصار، كل ما عليك فعله هو أن تلوذ بالفرار.

ثمة قدر كبير من الالتصاق بين الجزيئات التي تتشابه في تركيبها، مثل الماء والأيزوبروبيل، والماء وكحول الحبوب، التي يُوضِّح تركيبَها شكل ٨-٣.




شكل ٨-٣: مقارنة بين تركيب الأيزوبروبيل وكحول الحبوب والماء.

والقابلية المتبادلة للذوبان هي ما تجعل الماء والكحول لا ينفصلان عادةً في طبقات في كأس الكوكتيل. وقد يأخذ بعض الشراب مثل عصير الرُّمان وقتًا أطولَ حتى يمتزج بسبب قوى الانجذاب البينجزيئية داخل الشراب ذاتِه، لكن إذا ترَكناه وقتًا كافيًا، فإنه يتوزع في نهاية الأمر في طبقات رائعة في كل المشروب، لكن كل ما يُهِمنا عادةً هو الشرب وليس الانتظار؛ لذا لا نلحظ ذلك الأثر.

ويُعتبَر الالتصاقُ هو أساسَ الفعل الشعري أو ميل السوائل إلى أن تسلك الاتجاه المعاكس للجاذبية. يكون لجزيئات المادة المتجهة لأعلى جاذبية أكبر نحو السطح فتتحرك

إليه لأعلى، ويظل باقي السائل منجذبًا لأسفل بفعل الجاذبية. تعمل أوراق الحمام بِناء على فكرة الفعل الشعري؛ لهذا تصلح أوراق الحمام في امتصاص بعض السوائل عن غيرها. حاول أن تصبَّ كمية من الماء وأخرى من الجلسرين أو زيت الطهي على سطح ما ثم اغمس في كلٍّ منهما طرفَ ورقة من ورق الحمام. تتشرب قطعة الورق الماء أسرع من الزيت. ينجذب الماء بشكل أكبر إلى جزيئات ورق الحمام. تنجذب جزيئات الزيت بشكل أكبر بعضها إلى بعض.

ويُعتبَر الالتصاق أيضًا هو أساس القول المأثور «الأشباه تُذيب الأشباه» بمعنى السوائل شبه الزيتية تُذيب السوائل شبه الزيتية والسوائل شبه المائية تُذيب السوائل شبه المائية. ويُوضح القولُ «الأشباه تُذيب الأشباه» السببَ في أن إضافة فرخ تجفيف مانع لتكوُّن الشحنات الساكنة إلى الماء عندما يُنقَع إناء متسخ بمخلَّفات زيوت الطعام تُساعد على إزالة المادة الزيتية. هذه الأفراخ تُضيف طبقة رفيعة جدًّا من الزيت إلى الملابس التي يجري تجفيفها مما يمنع الاحتكاك من انتزاع إلكترونات؛ ومن ثَم توليد شحنة كهربية. ويمتزج هذا الزيتُ غير القطبي نفسُه مع الشحم المجفف غير القطبي ويعمل على إزالته عن الوعاء. وعلى المنوال نفسِه، يُساعد زيت الطعام على إزالة الضمادة من على الجلد دون الحاجة إلى تقشير الجلد. ويختلط الزيت مع المواد شبه الزيتية التي توجد في الغراء. ويشرح القولُ المأثور «الأشباه تُذيب الأشباه» فعلَ الصابون أيضًا.

يتكون الصابون من سلسلة طويلة من الهيدروكربون مُلحِقًا أحدَ طرَفَيها بمجموعة تحوي الأوكسجين، والطرف الملحق به المجموعة التي تحوي الأوكسجين قابل للذوبان في الماء؛ وذلك لأن هذا الطرف قطبي وقادر على تكوين الروابط الهيدروجينية. أما الهيدروكربونات الأخرى مثل الشحم على سبيل المثال فهي قابلة للذوبان في الأطراف الهيدروكربونية للصابون، وتُحمَل إلى محلول الماء من الطرف القابل للذوبان في الماء. ويُعتبَر هذا النوع نفسُه من الجزيئات، الذي يكون أحد طرفَيه قابلًا للذوبان في الماء والطرف الآخر قابلًا للذوبان في الشحم، حيويًّا لتركيب الخلايا والأنواع الأخرى من الكيمياء المانحة للحياة. فعلى سبيل المثال يحتاج الجسم إلى موادَّ عديدة غير قطبية حتى تُنقَل عن طريق الدم المعتمِد على الماء، وتُساعد الجزيئات التي تُؤيِّد كلا العالَمَيْن — العالم القطبي والعالم غير القطبي — في عملية النقل هذه. هل لا تزال غير مُتأثر بأهمية القوى البينجزيئية؟ إذن، ضع في اعتبارك الأمر الآتي: لولا القوى البينجزيئية، لما كان هناك سيفون!

**على سبيل المثال: فيزياء السيفون**

بلا ريب تُعتبَر صناديق الطرد أحدَ أهم التطورات الحضارية، فهي لا تُزيل المناظر البشعة والتربة الخصبة بالبكتيريا التي يُحتمَل أن تُمثِّل خطورة فحسب، بل إنها تُزيلها أيضًا بطريقة حضارية؛ حيث تُزيل الفضلات بسرعة وبكفاءة والروائح المرتبطة بالفضلات المختزنة أيضًا، إنها تُبعِدها عنا بمهارة عالية باستخدام هذا الحائط المائي. يدفع صندوق الطرد الفضلات إلى أعلى وأسفل في شلال يأخذ شكل حرف U مقلوبًا، ثم يسد المدخل بالماء ومن ثَم لا تجد الغازاتُ طريقها مرة أخرى إلى الغرفة، ولا شيء من هذا كان ممكنًا لولا القُوى البينجزيئية.

يبدأ فعل تدفق الماء في الحمام عندما يمتلئ الوعاء من الخزان حتى يصل مستوى الماء إلى حاجز قمة حرف U المقلوب ثم يبدأ في التساقط من الجانب الآخر. ما إن يبدأ الماء في التدفق من على جانب الحاجز، فإنه يسحب الماء المتبقيَ معه، مثلما تسحب السلسلة الوصلات المربوطة بها إلى أسفل، وصولًا إلى مستوًى أقلَّ انخفاضًا. تكون قوى الجذب البينجزيئية مع الماء السلسلة التي تسحب جزيئات الماء جزيئًا بعد الآخر، ويجب أن يبدأ هذا الفعل الطردي سريعًا؛ ومن ثَم يتسنى للماء أن يتدفق على الحاجز ويقوم بعمل سدادة متحركة.

ويدفع الفرق في الضغط بين الوعاء الممتلئ والأنبوبة الفارغة الماء من على القمة، لكن الجذب بين جزيئات الماء هو الذي يحفظ التدفق متحركًا باستمرار عبر الفعل الطردي لتفريغ الوعاء. ويمكن تأكيد تلك الانجذابات البينجزيئية المتضمَّنة في صندوق الطرد بتجرِبة صغيرة: هل يُمكنك أن تتخيل سيفونًا يعمل بالرمل بدلًا من الماء؟ قد تكون هذه الرمال المستخدمة هي حلمَ القطة الصغيرة لتنام عليها، لكنها لن تُفلح مع السيفون! فعمله يعتمد على جزيء يسحب وراءه جزيئًا آخر، عندما تأتي على قمة شيء منحدر.

يعمل الماء جيدًا على إزالة الفضلات أيضًا؛ نظرًا إلى أن العديد من المواد تذوب في الماء، لكن كما نعلم جميعًا أن ثَمة فرقًا بين ماء الحمام وماء الكولونيا. تعتمد خصائصُ المحلول على المذيب والمذاب وكمِّ المذاب الذي تحويه، وسنتَّجه الآن لمناقشة هذه المعالم المهمة.

# تجربة ٩: التركيز على اللون – الكوكتيل المالح

لقد اعتبر نابليون، مثلَ كيميائي، أن كل أوروبا هي مادة لتجارِبه، لكن في الوقت المعين تفاعلت هذه المادة ضده.

فريدريك باستيا في كتابه «القانون»، ١٨٧٠

ارتدِ نظارة الأمان الواقية. صبَّ نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) في كوبَين من البلاستيك الشفاف، أضف ملعقة صغيرة بلاستيكية (٥ مليلترات) من محلول كبريتات النحاس (المعدَّة كما هو مذكور في «قائمة المشتريات والمحاليل») إلى أحد الكوبَين ثم أضف ملعقتَين صغيرتَين (١٠ مليلترات) من محلول كبريتات النحاس أيضًا إلى الكوب الآخر. قلِّب الكوبَين، ثم قارن الفرق بينهما في كثافة اللون بالنظر إلى أسفل من فوق قمة الكوب وهما موضوعان على ورقة بيضاء. نجد أن المحلول الذي يحوي ملعقة واحدة من محلول كبريتات النحاس (المحلول الأقل تركيزًا) يُظهِر درجات ألوان مختلفة أفتحَ من تلك الألوان التي تظهر في الكوب الذي يحوي ملعقتَين من محلول كبريتات النحاس. نستنتج من هذا أن اللون خاصية تتأثر بالتركيز.

تتأثر القابلية للذوبان أيضًا بالتركيز كما وجدنا في مناقشتنا لعملية الترسيب، حيث وجدنا أن مقدارًا ضئيلًا من بيكربونات الصودا يذوب في المحلول بسهولة، لكن ليس أكثر من هذا المقدار يُمكنه أن يذوب. الآن جرِّب الآتيَ: أعدَّ محلول بيكربونات الصودا مشبعًا بإضافة أربع ملاعق كبيرة (٦٠ مليلترًا) من بيكربونات الصودا إلى كوبَين (٤٨٠ مليلترًا) ماء. قلب المحلول ثم اتركه يستقر أربع دقائق على الأقل. صب برفق المحلول الذي يعلو بيكربونات الصودا غير المذابة في كوب نظيف، تأكد من أنك لم تنقل بيكربونات صودا صلبة مع المحلول. خذ كوبًا مماثلًا ونظيفًا واملأه بالماء حتى يصل إلى نفس ارتفاع الكوب الذي يحوي محلول بيكربونات الصودا المذابة في الماء. وحيث إنك تملك الآن كوبَين بهما نفس الكمية من السائل، أضف إلى كلٍّ منهما ربع ملعقة صغيرة (١ مليلتر) ملح طعام وقلِّب. أضف نفس الكمية من ملح الطعام مرة أخرى وأنت تُقلِّب لكن بكمية صغيرة (١/٨ ملعقة صغيرة: نصف مليلتر) إلى كل كوب حتى يُصبِح أحد المحلولَين غائمًا. وسيكون المحلول الغائم هو المحلولَ الذي يحوي بيكربونات الصودا، فهو يُصبح غائمًا حيث إن ملح الطعام يُزاحم بيكربونات الصودا في المحلول. أما المحلول الآخر الذي يحوي الماء والملح المضاف فقط، فينبغي أن يكون رائقًا تمامًا. وهذه التقنية التي تُسمَّى «فصل المذاب باستخدام الملح» تُستخدَم في الصناعة لنقل المواد من وإلى المحلول، وكانت تُستخدَم هذه التقنية أيضًا في الماضي في إعداد الصابون الصلب، فقد كان الصابون يَخرج عَنْوة من المحلول بإضافة كميات كبيرة من الملح. ويُمكن توضيح هذا الفعل عن طريق إضافة طبقة سُمكها من ثمن إلى ربع بوصة من الصابون السائل في كوب، ثم نثر ملح الطعام عليه، فتترسب في دقائق معدودة مادة صلبة لزجة هلامية.

الفصل التاسع

# التركيز على كونهما وحدهما معًا

لم أرَ عليه أي أثرٍ للرعب الذي انتابني أنا نفسي آنذاك ... لكن كان يبدو على وجهه أمارات الهدوء ورباطة الجأش المتلهفة التي للكيميائي الذي يرى البلورات تتساقط من محلوله المشبع.

السير آرثر كونان دويل،
«وادي الخوف»، ١٩١٥

الكيمياء هي التغير — فالمعدن يتحول إلى فلز ومخيض اللبن إلى خبز والحامض إلى ملح — والشيء الرائع في هذا التغير هو أن هذه الكيمياء تحدث في المحاليل: في البرك

والخلايا والمحيطات والصلصة وحتى في الصهارة والمخاليط. وتُعتبَر المحاليل مخاليطَ متماثلة، مثل الخليط المتماثل المكوَّن من الملح والماء الذي نُسميه المحلول الملحي. تُساعد المحاليل على إحداث التفاعلات الكيميائية؛ لأنها تمنح الجزيئات الفرصة لكي تتقابل معًا وتُوفر الحركة للتفاعل كي يحدث. والأقراص التي تُوضَع في الماء كي تُقدَّم شرابًا فوارًا تستطيع عمل الفوران؛ لأنها تحتوي على حامض الستريك وبيكربونات الصودا، لكن مع أن هذه الأقراص تحتوي على حامض الستريك وبيكربونات الصودا قبل إلقائها في الماء، فإن الأقراص الجافة لا تُحدِث فورانًا. وهي لن تفور حتى تُوضَع مكوناتها في محلول. يحظى كلٌّ من الحامض والقاعدة بحرية الحركة في المحلول؛ ومن ثَم يُمكنه أن يدخل في التفاعل. تُقدم المحاليل ما يحتاج إليه التفاعل الكيميائي؛ الحركة، والفرصة.

ولطالما أدرك القائمون على الصناعات التجارية والفكرية الناجحة الحاجة إلى الحركة والفرصة للحصول على تفاعل فعال بين المتخصصين، ففي المؤتمرات يكون هناك تركيز أعلى من الأشخاص ذوي الأذهان المتشابهة، لكن كما يعلم كل منظم ناجح للمؤتمرات فإن التفاعل الحقيقي بين الناس لا يحدث عندما يجلس كل فرد في مقعده منصتًا إلى ما يُقدِّمه الآخرون، لكنه يحدث عند تذوق الخمور والجبن، عندما تكون لديهم حرية الحركة والسعي بعضهم نحو بعض. والمحلول هو المقابل الكيميائي للمؤتمر؛ فهو يُمثِّل تركيز المتفاعلات مع منحها حريةَ الحركة التي تحتاج إليها للامتزاج. ويَعي الكيميائيُّ مثله مثل منظِّم المؤتمر أهميةَ التحكم في التركيز والتنسيق فيما بين المتفاعلات عند تصميم التفاعلات.

ومع أن المحاليل المائية كما يعرفها الكيميائيون، هي تقريبًا أكثر المحاليل شيوعًا، فثمَّة أنواع محاليل عديدة أخرى. فثمة محاليلُ صُلبة مثل السبائك المعدنية، مع أنه ليست كل السبائك مكوَّنةً من أمزجة متجانسة تمامًا. فتتكون سبيكة البرونز من النحاس والقصدير، وسبيكة النحاس الأصفر من النحاس والخارصين وسبيكة الصلب من الحديد والكربون.

وثمة محاليلُ في الحالة الغازية أيضًا، فالهواء الذي نتنفَّسه هو محلول مكون من غازات عديدة. يتوافر النيتروجين بأكبر نسبة فهو يبلغ نحو ٧٠٪، لكن يُوجَد الأوكسجين مختلطًا به أيضًا، وكذا الأرجون وثاني أكسيد الكربون والماء عادة. تتأرجح نسبة الماء في الهواء من لا شيء إلى ١٠٠٪ رطوبة، في حين تظل نسبة النيتروجين والأوكسجين والأرجون ثابتةً إلى حد كبير. وقد يُعتبَر وجود الأرجون في محلول الغازات التي نتنفَّسها للوهلة الأولى أمرًا مفاجئًا، لكن عند استرجاع مناقشتنا حول الجدول الدوري نجد أن العناصر الأخف

هي تلك العناصر التي نتجت في الكون للوهلة الأولى في عصيدة الكون التي نشأ منها كوكبنا. وقد احتُجِزت العناصر المتفاعلة في مركبات، وتطايرت العناصر غير المتفاعلة. معظم الهليوم والنيون كانا خفيفَين على نحو كافٍ لدرجةٍ سمحت بفرارهما من الغلاف الجوي للأرض مما أدى إلى ترك الأرجون ليُمثل العناصر النبيلة. تشتمل بعض المحاليل الغازية الأخرى على بيكربونات الصودا، وهو محلولٌ لغاز (هو غاز ثاني أكسيد الكربون) في الماء، وماء البِرَك هو محلول يحوي الأوكسجين وهو الذي تتنفسه الأسماك.

ويعتمد الجسم على قابلية ذوبان الغازات في الدم، التي بدورها تعتمد على ضغط هذا الغاز وليس غيره، حتى يتسنَّى له القيام بعمليات الأيض؛ ومن ثَم تعتمد قابلية الأوكسجين للذوبان في الدم على ضغط الأوكسجين في الهواء المُستنشَق، وتعتمد قابلية الأوكسجين على الذوبان في الخلايا على ضغط الأوكسجين داخل الخلايا. ولأن عملية الأيْض تحدث داخل الخلايا، فإن الأوكسجين يُستهلَك وثاني أكسيد الكربون يُنتَج. وعندما يصل الدم الغني بالأوكسجين إلى الخلية يعبر الأوكسجين من الدم — حيث الضغطُ المرتفع نسبيًّا — إلى الخلية، حيث الضغطُ المنخفض نسبيًّا. ويعبر ثاني أكسيد الكربون من الخلية حيث يرتفع ضغطه، إلى الدم حيث ينخفض ضغطه.

ولأن النيتروجين دائمًا ما يُوجَد أيضًا في الهواء الذي نستنشقه، فثمَّة بعض الكميات من النيتروجين الذائب دائمًا في دمائنا. يحتاج الغواصون الذين يغوصون في أغوار المحيطات في أنابيبَ من الهواء المضغوط إلى تزويدهم بهواء التنفس لأن ضغط المحيط يضغط على الرئتَين. ويجب أن يكون الضغط داخل أنبوبة الأوكسجين أكبرَ من الضغط الخارجي إذا كان عليه أن يدخل إلى الرئتَين. وإذا مُلِئَت الأنابيب بالهواء الجوي العادي، فإن الدمَ المعاد تخزينه داخل الرئتَين سيكون عُرضة لنيتروجين ذي ضغط أعلى، وسيكون ثَمة الكثيرُ من النيتروجين الذائب في الدم. ولا يُسبب النيتروجين الزائد في الدم بالضرورة مشكلة ما لم يخرج الغواص بسرعة من الماء. أما إذا خرج الغواص من الماء بسرعة، فإن النيتروجين الزائد الذائب في الدم يبدأ في الخروج من المحلول ويُمكِنه أن يُكوِّن الفقاعات قبل أن يحظى الجسم بالفرصة لطرده. وتُسبب هذه الحالة ألَمًا شديدًا جدًّا حتى إن المصابين به يتوقفون عن الحركة تمامًا من شدة الألم؛ لذا يُعرف هذا المرض بشلل الغواص.

ويُعتبَر الإجراء الوقائي المُستخدَم غالبًا هو استبدال النيتروجين بالهليوم في خليط هواء التنفس. لا يقبل الهليوم الذوبان في الدم بنفس قدر النيتروجين؛ وعليه لا يُسبِّب نفس المشكلة. وفي ملاحظة مختلفة تمام الاختلاف، نجد أن الصوت الأشبهَ بصوت البطة

«دونالد داك» الذي يُضيفه الهيليوم على الصوت الآدمي يكون نتيجة لتكثف الهليوم بدلًا من الهواء الذي يمر عبر الحنجرة. ولا ينتج أي تسمم عن الهليوم كما يُعتقَد أحيانًا، لكن الذي يمثل الخطر هو استنشاق هليوم نقي، فالفرد الذي يستنشق الهليوم النقي لا يستنشق أوكسجينًا؛ ومن ثَم يفقد الوعي بسبب نقص الأوكسجين.

تتكوَّن المحاليل من شقَّين: المذيب والمذاب. والمذيب هو المكوِّن الذي يُوجَد بكثرة، ويُمثل المذابُ المكونَ الذي يكون أقل. تُعَد المادة الأساسية في المحلول الملحي هي الماء الذي يُمثل المذيب والملح هو المذاب، ويُمكن فهم أهمية التركيز كخاصية للمحاليل بالنظر في المحلول الملحي. يُمكن استخدام محلول ملحي مركَّز لغسل الفم، لكن عند شطف العين، لا يُستخدَم إلا المحلول المخفف، وأنت لا تُريد أن تخلط بين الأمرَين.

ثَمة بعض المقاييس الشائعة الخاصة بالتركيز التي وجدَت طريقها في الاستخدام اليومي. ومقياس تركيز الإيثانول في المحاليل في المشروبات الكحولية يُسمَّى «درجة الكحول»، ويُعبَّر عن درجة الكحولة برقم يُعادل ضعفَين من نسبة الإيثانول الموجود في المحلول، حجمًا إلى حجم. فعلى سبيل المثال، درجة الكحول التي تُساوي ٧٦ في الويسكي هي نسبة ٣٨ كحول. ويُقال إن هذا المصطلح نشأ عن حقيقة أن الخليط الذي يحوي نسبة ٥٠٪ إيثانول (درجة كحول ١٠٠) وماء سوف يحترق، ما يُثبت أنه كحول جيد. وتتمتَّع المحاليل التي تحوي الماء والكحول بالخاصية المميزة وهي أن أحجامها لا تُضاف في كل النسب. فعلى سبيل المثال، لا تُكوِّن الكميات المتساوية من الإيزوبروبيل والماء المختلطَين معًا محلولًا ضعف الكمية الأصلية؛ نتيجة لقوى التجاذب البينجزيئية تلك التي ناقشناها في الفصل السابق. يحوي الكحول مجموعة هيدروكسيد OH كجزء من جزيء الكحول نفسه، وتنجذب مجموعة الهيدروكسيد هذه إلى الماء $H_2O$. ويُتوقَّع أن المجموعة المختلطة من الرجال والنساء العزاب تشغَل حيزًا أقلَّ مقارنة بتلك المجموعة المنفصلة؛ وذلك بسبب تفاعلات الانجذاب في كلتا الحالتَين.

الرطوبة من الوسائل الأخرى الشائعة لقياس التركيز. والرطوبة هي مقياس مقدار الماء الموجود في الهواء، أما الرطوبة النسبية فهي مقياس كمية الماء الموجود حاليًّا في الهواء مقارنة بالكمية العظمى من الماء التي يقدر أن يستوعبها الهواء في درجة الحرارة نفسِها وتحت الضغط نفسِه. عندما يتعلق الأمر بمحاليل المواد الصلبة في الماء مثل محلول الملح أو محلول السكر، يُقدَّر التركيز بالجرام لكل مليلتر، كما هو الحال مع معظم الأدوية الشائعة. ومع ذلك عندما يتعلق الأمر بالتفاعلات الكيميائية، فمن المنطقي أكثرَ أن يُقدَّر

الأمر بالجزيئات بدلًا من الجرامات لكل مليلتر. وحتى تعرف السبب، انظر معي إلى الجملتَين الآتيتَين: أيهما أكثر فائدة عند حساب متطلبات الكلية مثلًا من أعضاء هيئة التدريس إذا كان يجب أن تبقى النسبة بين الطلاب والأساتذة عند عشرين إلى واحد؟ هل سنقول:

هناك ١١٧٥٦ كيلوجرامًا من الطلاب في الفرقة الأولى الجديدة.

أم سنقول:

١٩٠ طالبًا في الفرقة الأولى الجديدة؟

عادة يصف الكيميائيون تركيز المحاليل عن طريق قياس عدد الجزيئات لكل حجم معين بدلًا من عدد الجرامات لكل حجم معين؛ ذلك لأن التفاعلات تحدث عندما يتفاعل جزيءٌ واحد مع جزيء واحد وليس عندما يتفاعل جرام مع جرام. تكمن الصعوبة في أن الجزيئات غايةٌ في الصغر، ويحتاج الأمر إلى عدد كبير جدًّا منها لتكوين كمية قابلة للقياس. فعلى سبيل المثال، يحتاج الأمر نحو تريليون تريليون من جزيئات الماء في الحالة السائلة لملء وعاء سعته ٢٤٠ مليلترًا (كوب واحد). وعليه، من السهل جدًّا التحدث عن مجموعات من الجزيئات بدلًا من التحدث عن الجزيئات المفردة. والاسم الذي اتفق العلماء على إطلاقه على مجموعات الجزيئات هو المول، ويُشبه المول الدستة، مع الفارق.

تدل الدستة على عدد من الأشياء، مثل اثنتَي عشْرة بيضة على سبيل المثال. يُشير الإجمالي إلى عدد الأشياء، فمثلًا نقول ١٤٤ شيئًا. كذلك يُشير المول إلى عدد من الأشياء؛ يُعادل المول ٦,٠٢٣ مائة مليار تريليون من الأشياء، وهو غالبًا رقم ضخم يصعب تخيله.

فعلى سبيل المثال، إذا كان هناك جزيئات كبيرة كبر الرخام، عندئذٍ يُغطي المول مساحة أرض الولايات المتحدة إلى عمق أربعة أمتار (ما يقرب من ارتفاع الطابق الأول من منزل). وتُعتبَر الخلايا التي تُوجَد في جسم الإنسان غايةً في الصغر على أن نراها بدون ميكروسكوب، وغاية في الصغر جدًّا حتى إن ما يقرب من مائة تريليون من الخلايا تحتشد في جسم إنسان واحد. لكن إن تجمع مول من الخلايا، فسوف تحتاج إلى ستة مليارات فرد، أي تعداد الكرة الأرضية بأكملها عام ١٩٩٥، إنه لعدد كبير جدًّا!

ومن الضروري جدًّا أن نستخدم هذه الوسيلة الكبيرة عندما يتعلق الأمر بالجزيئات؛ لأن الجزيئات غاية في الصغر. يُعادل مول البيض ٦,٠٢٣ مائة مليار تريليون بيضة، وهو ما يكفي لصنع عجة بيض ضخمة جدًّا، لكنه بالفعل كمية غاية في الصغر من

الجزيئات. يُوازي مول من السكروز الكميةَ نفسَها تقريبًا من حصة من مشروب المياه الغازية المكربنة. ويُعادل مول من المادة الصلبة ما يملأ قبضة اليد، ويُقارب مول من الغاز ستَّة جالونات (٢٢ لترًا) تحت الظروف العادية من درجة الحرارة والضغط (أكثر قليلًا من ملء دلو وأقل قليلًا من البوشل؛ مكيال للحبوب يُعادل نحو ٣٢ جالونًا). وفي الملحق، تُفسَّر الكتلة المفترضة لكل عنصر على أنها وحدات الكتلة الذرية لكل ذرة (و ك ذ لكل ذرة) أو جرامات لكل مول. وهذا ليس مجرد مسألة مصادفة، فقد اختِيرَت وحدة الكتلة الذرية بحيث ترتبط وحدة الكتلة الذرية لكل جسيم مع الجرامات لكل مول.

وقد ذكرنا من قبل أن مقياس الحامضية الشائع هو الأس الهيدروجيني (pH) وهو وسيلة لقياس تركيز أيونات الهيدرونيوم ($H_3O^+$، العامل الحامضي) في المحلول. والآن يُمكننا أن نكون أكثر تحديدًا؛ فالمحلول الذي يحوي عُشْر المول (٠٫١) من أيونات الهيدرونيوم لكل لتر يكون الـ pH له ١. والمحلول الذي يحوي واحدًا من مائة مول (٠٫٠١) من أيونات الهيدرونيوم لكل لتر يكون pH له ٢. وكل مرة يقلُّ تركيز أيونات الهيدرونيوم بمضاعفات العدد عشَرة، يزداد pH بوحدة واحدة.

ثمة وسيلة قياس أخرى ترتبط بالتركيز؛ هي الكثافة، والكثافة مقياسُ إجماليٍّ كتلة المادة في وحدة الأحجام. وفيما يتعلق بالمحاليل التي تكون فيها التفاعلات الكيميائية مستمرة، فيُمكن أن يُعتبَر قياس الكثافة طريقة لقياس سير التفاعل. ويجب أن تُحفَظ الكتلة في أثناء التفاعل، إلا أن الحجم الذي تشغله الكتلة من الممكن أن يتغير كثيرًا بسبب إعادة ترتيب الجزيئات والقوى البينجزيئية، وتتضح مثل هذه التغييرات الحادثة في الكثافة في قوام الماء، وفي الجسم البشري، وفي قوام أشياء أخرى مثل قوام الخمر.

### على سبيل المثال: ما القوام، ما النكهة، ما الكيمياء؟

تتدخل الكيمياء في صنع الخمر على مستويات عديدة، على سبيل المثال، يعتمد صناع الخمور ومتذوقوها على تركيز الخواص في عمل ووصف ما يُطلَق عليه المنتج اللذيذ أو حتى الجريء والمُغري.

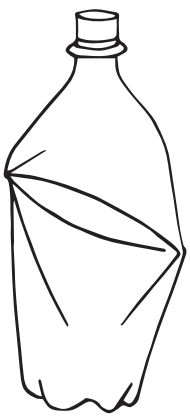
يستخدم محترفو تذوُّق الخمور عددًا من المصطلحات المشوقة؛ مثل: فليني (فيه طعم الفلين أو رائحته)، مزبَّد (محتوٍ على زبدة)، علكي، طازَج، فاكهي (به طعم الفاكهة)، معسل، مختمر، ممتلئ القوام، مركَّب، لاذع، خفيف، منعش، بطعم المكسرات، متمتع، مليء بالنكهة؛ لوصف خواص الخمور التي تتضمن النكهة، والشذى، والرائحة، وكونها

ذات رائحة نفاذة زامة للأنسجة، واللمسات الأخيرة، والقوام، وهذه الخاصية الأخيرة هي التي ترتبط بموضوع هذا الفصل؛ التركيز. يُمثِّل القِوام كثافة الخمر الذي نتذوقه في الفم والذي يعتمد في جانب كبير منه على كمية الكحول في الخمر. وتُمثل الكثافة المرتبطة بالتركيز جانبًا حيويًّا في عملية صنع الخمر أيضًا.

ويُعتبَر «الخمر الفطير» (عصير العنب قبل التخمر وأثناءه) الخليط المبدئي، حيث يكون عصير العنب والفاكهة المعصورة جاهزًا لعملية التخمر، وعملية التخمر هي العملية التي تُستهلَك فيها خميرة معينة السكر وتُنتج الإيثانول (الكحول) وثانيَ أكسيد الكربون. يُؤدي القليل جدًّا من السكر إلى القليل جدًّا من الكحول، ويُغير الكثير جدًّا من السكر طبيعةَ الخمر. ويُمكن استخدام الكثافة المَقيسة للخمر الفطير لتقدير محتوى السكر. وعن طريق معرفة محتوى السكر المَقيس يُمكن التنبُّؤ بمحتوى الكحول في المنتج النهائي، وعلى هذا الأساس يُمكن تحديد إذا كان الخليط في حاجة إلى إضافة المزيد من السكر، حيث إن السكر يُعتبَر أحد المتفاعلات ويُستهلك، وتُقاس الكثافة أيضًا أثناء عملية التخمر من أجل تتبُّع مدى جودة عملية التخمر.

وكما رأينا، القياس والتحكُّم في التركيز لهما أهمية بالغة في الكيمياء والخمر والمؤتمرات الجيدة، إلا أن الحالة السائلة لا تُعتبَر هي الحالةَ الوحيدة التي بُنِيت عليها الكيمياء. فالحالة الغازية تُعزز كيمياء مشوقة ومهمَّة أيضًا، ثمة فقاعات في الكيمياء، وثمة كيمياء في الفقاعات، في البالون وفي الهواء الذي نستنشقه.

# تجربة ١٠: سحق زجاجة المياه الغازية



يخلق الكبير جوًّا يُؤثر تأثيرًا سلبيًّا على الصغير ... فهو يُشبه الكاشف الكيميائي، فيوم واحد من أيام هذا الجو، مثل إحدى قطرات هذا الكاشف، سوف يُؤثر جدًّا على المناظر ويُزيل لونها ... حتى إنها ستظل بعد ذلك باهتة إلى الأبد. يوم منه بالنسبة إلى عقل لم يُجربه من قبل مثل الأفيون بالنسبة إلى جسم لم يتناوله من قبل. ويتولد في النفس اشتهاء إذا أُشبِع يُفضي إلى أحلام أبدية ... إلى أن يحين الموت ويُذيب الانحلال قوتها.

ثيودور درايزر في كتابه
«الأخت كاري»، ١٩٠٠

نحن عامة لا نعي الأجواءَ التي تُحيط بنا، مثلما لا تعي السمكة البحر. إلا أننا نسبح في محيط من الهواء ونُذكِّر بذلك من وقت إلى آخر عندما تسقط شجرة من جرَّاء عاصفة، أو يُسوي إعصارٌ مدينة بالأرض. وهذه التجرِبة التي نحن بصددها هي تَذْكار فعال أيضًا على وجود قوة الضغط الجوي.

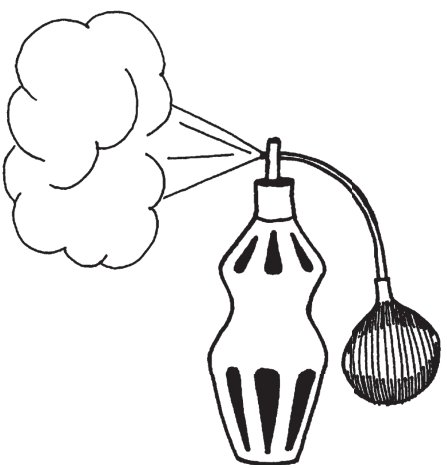
أحضِر حوضًا مملوءًا بماء مُثلَّج إلى آخره. املأ زجاجة مياه غازية بلاستيكية بماء ساخن من الصنبور واترك الماء الساخن بها لبضع ثوانٍ. فرِّغها من الماء ثم بسرعة غطِّها. ضع الزجاجة المغطاة في الماء البارد وانتظر ثوانيَ قليلة، تجد أن زجاجة المياه الغازية تنفجر إلى الداخل وتتهشم على نحو مثير.

يُسبب تسخين الغاز تمدُّده ويُقلل التبريد من ضغطه، ويعمل ماء الصنبور الساخن على تسخين جوانب الزجاجة التي بدورها تسخن الهواء بالداخل. وعندما يُحكَم غلق الزجاجة بعد تسخينها بالماء الساخن، فإن الهواء المحتجز بالداخل يكون هواءً دافئًا. وعندما تُغمَس الزجاجة في الماء البارد فإن الهواء بالغاز بالداخل يبرد باذلًا ضغطًا على الجوانب الداخلية أقلَّ من الضغط الذي يبذله الجو من الخارج على الجوانب الخارجية. عندئذٍ يضغط الجو على جوانب الزجاجة وتكون النتيجة زجاجة صودا مُحطَّمة.

وللمزيد من الخصائص عن الحالة الغازية — وما يحدث في زجاجات الصودا — تابع معنا.

الفصل العاشر

# إنه غاز



الكيمياء يا مدام فرانسوا ... تركيب الأسمدة، وتخمير السوائل، وتحليل الغازات، وتأثير الأبخرة العفنة التي تخرج من المستنقعات — أقول لك إن كل هذا ليس سوى كيمياء. هذا كل ما هنالك.

جوستاف فلوبير في روايته
«مدام بوفاري»، ١٨٥٧

لقد نحت يوهانز فان هلمونت كلمة gas «غاز» في منتصف القرن السابع عشر، ويُحتمَل أنها مُشتقة من كلمة chaos التي تعني الفوضى.[1] وإذا كان قد بُني اختياره على

كلمة chaos، فإن هذا انتقاء مُفعَم بالبصيرة، لأسباب كثيرة أكثر من تلك التي عرَفها فان هلمونت؛ ففي أيام فان هلمونت اعتقد معظمُ فلاسفة الطبيعة أن الهواء مكون من عنصر واحد، واعتبره الكثيرون سائلًا متصلًا. الآن نحن نعلم أن الهواء يتكون من ثلاثة عناصر على الأقل — وهي غاز النيتروجين وغاز الأوكسجين وغاز الأرجون — بالإضافة إلى مركبات عديدة مثل الماء وثاني أكسيد الكربون المختلطة فيها، ونعلم أيضًا أن الهواء يتكون من جزيئات وذرات تطن وتندفع بسرعات هائلة تصدم كلَّ ما تقابله وتُطيح به؛ ومن ثَم كان هلمونت محقًّا بشأن أمر واحد، ألا وهو أن الجزيئات عندما تكون في الحالة الغازية تقوم برقصات متواصلة وعنيفة وعشوائية، وبسبب كلِّ هذه الجلَبة العشوائية الرائعة التي تتَّسم بها جزيئاتُ الغازات، تمتاز الغازات بخواصها المعروفة.

وحتى يتسنَّى لنا أن نصف تصرف عينة من الغازات، نحتاج إلى أربع وصفات رئيسة: درجة حرارة الغاز، وضغط الغاز، والحيز الذي يشغله الغاز (الحجم)، وكم الغاز، وغالبًا يُعبَّر عنها بعدد المولات أيًّا كان الغاز الموجود. على سبيل المثال، إذا قلنا إن لدينا مولًا من غاز معين عند درجة حرارة ٢٥ درجة سيليزية (٧٧ فهرنهايت) وكان حجم الغاز ٢٢٫٤ لترًا (ما يقرب من ستة جالونات) تحت الضغط المحيط، فإنه سيكون لديك كلُّ المعلومات التي تحتاجها للتنبؤ بسلوك هذا الغاز في حال تغير الضغط أو درجة الحرارة. وتُعتبَر هذه المعلومات ضرورية للمهندسين الكيميائيين والغواصين الذين يتعمَّقون في أغوار البحار وحتى لصنَّاع الخمور، فأحد نواتج عملية التخمُّر هو غاز ثاني أكسيد الكربون وإذا لم يُتحكَّم في هذا الغاز على نحو جيد، فإن اندفاع السدادة يكون غير مقصود.

يمتاز الغاز بضغطٍ لا بأس به، وقد حطَّم ضغط الغازات التي تُحيط بالأرض، أي الغلاف الجوي، زجاجة الصودا. لم يتسنَّ تحطيم زجاجة الصودا عندما كانت ممتلئة، لكنها تحطمَت بسهولة عندما خُفِّف ضغط الهواء في الداخل. إذن لماذا لا نتحطم نحن عندما نقوم بعملية الزفير؟ لماذا لدينا المقدرة على الوقوف مُنتصبي القامة؟ السبب هو أن ضغط الهواء يضغط علينا في كل الجوانب بالتساوي، فإذا كان الضغط على قمة رءوسنا فقط، فعندئذٍ تكون لدينا مشكلةٌ بالفعل. يُمكن تطبيق نفس المبدأ على أنبوبة معجون الأسنان، حيث لا يُمكنك الحصول على المعجون إلا عندما تضغط على منتصف الأنبوبة أو قاعِها، أما إذا ضغطت بالتساوي على فتحة الأنبوبة وقاعها، فإن معجون الأسنان يظلُّ داخل الأنبوبة.

ويُمكن شرح منشأ الضغط الذي يُظهِره الغاز، وكذلك التفاعل بين المتغيرات التي هي الضغطُ ودرجة الحرارة والحجم وعدد المولات، عن طريق نظرية تُسمَّى «النظرية الحركية لجزيئات الغازات»، والافتراض الأساسي الذي تقوم عليه هذه النظرية هو أن الغازات تتألَّف من جُسيمات منفردة (ومن ثَم هي جزيئات)، ويكون لهذه الجسيمات حركةٌ ثابتة (مثل تلك التي في الفن الحركي). ومن الممكن أن نفهم جيدًا الكيفية التي تُشرَح بها هذه النظرية خواصُّ الغازات إذا جرى مقارنة خواصِّ الغازات بخواص مجموعة أخرى من الجسيمات في حالة حركة دائمة: سِرْب من البعوض.

الضغطُ هو القُوى المتراكِمة لجزيئات الغاز التي تُصيب منطقة ما، تمامًا مثلما يضرب سربٌ من البعوض جوانبَ وعاء على نحو عشوائي ضاغطًا على هذه الجوانب، وإذا كان الوعاء أصغر، عندئذٍ سيُصاحب الأمر زيادة في عدد التصادمات الحادثة بين البعوض والوعاء وزيادة في ضغط البعوض، وبطريقة مماثلة؛ لكون جميع الأشياء الأخرى متساوية (بمعنى درجة الحرارة وكم الغاز)، فإن الحجم سيُؤثر مباشرة على ضغط عينة من الغاز. ويُمكن إثبات هذا التأثير عن طريق الحقنة الشرجية المذكورة في «قائمة المشترَيات والمحاليل»، فعند استخدام الحقنة دون الإبرة المتصلة بها، يُمكنك أن تسحب عيِّنة من الهواء إلى داخل الحقنة، ثم ضع إصبعك عند نهاية الفتحة التي عادة تُوصَّل بها الإبرة، وبالضغط على المكبس سيقلُّ الحجم، في بادئ الأمر سيسهل ضغط الغاز، لكن الأمر سيُصبح أكثر صعوبةً فيما بعد، تُعزى هذه الصعوبة إلى أن حقيقة أن الضغط والحجم يرتبطان معًا بعلاقة عكسية؛ حيث كلما قلَّ الحجم زاد الضغط، وتُعرَف هذه العلاقة باسم «قانون بويل».[2]

لم يكتشف روبرت بويل — فيلسوف الطبيعة الإنجليزي في القرن السابعَ عشر — العلاقة التي أصبحت معروفةً فيما بعدُ قانونًا يحمل اسمه فقط، بل إن أبحاثه كانت تُؤكِّد الملاحظات التي أوردها الآخرون، إلا أنه أدرك المغزى من هذه الحقائق ووضَعها بحماس أمام ناظِرَي زملائه العلماء، وكان حماسه مبرَّرًا تمامًا، فلقد زحزح بهذه العلاقة الكيمياء من عالم السحر، مؤسسًا إياها كعلم كمي؛ أي علم معادلات ومقاييسَ وقوانين راسخة مثل قوانين الرياضيات.

في حقيقة الأمر يبدو أن أبطال كيمياء الطَّوْر الغازي أشخاص يُثيرون الاهتمام؛ فالشخص الذي طالما يُستشهَد باسمه كثيرًا، على الأقل في العالم المتحدث بالإنجليزية، لكونه مرتبطًا بخاصيَّة مهمة أخرى مرتبطة بالغازات — وهي العلاقة بين درجة

الحرارة والحجم — كان قائد مِنْطاد هواء ساخن، جاك تشارلز.[3] فلقد عُرِفت هذه العلاقة بـ «قانون تشارلز»، لكن تشارلز الذي كانت دراسته في مجال الغازات في مطلع القرن التاسعَ عشر، امتاز بكونه قائدَ منطاد أكثرَ منه تجريبيًّا، ولم يستطع تشارلز أن يصل من النتائج التي استخلصها إلى أيِّ نتائجَ محددة فيما يخصُّ العلاقة بين حجم الغاز ودرجة حرارته. ويرجع سبب ارتباط القانون باسم تشارلز إلى أن الشخص الذي كتب التاريخ كان إنجليزيًّا، ورأى أن اسم تشارلز يبدو اسمًا إنجليزيًّا جيدًا، أما الشخص الذي وصف العلاقة بين درجة الحرارة والحجم على نحوٍ صحيح؛ فهو جوزيف لوي جاي لوساك، الذي وُلِد أيضًا أواخر القرن الثامنَ عشر.[4]

وكان جاي لوساك قائدَ منطاد هواء ساخن أيضًا. وفي إحدى المرات، تخلص من كرسيٍّ وبعض المعدات ليُخفِّف من حمل البالون حتى يتمكَّن من التحليق إلى ارتفاعٍ أعلى، وقد اكتشف فيما بعد أن مُزارعين متحيِّرين بالأسفل شاهدوا الكرسيَّ يسقط من السماء، وبسبب عدم وجود أي تفسير، كان عليهم أن يُرجِعوا الأمر إلى فعل إلهي، بشيء من المزاح. وقد أثبت لوساك عن طريقِ تَجارِبَ عملية عددية أن حجم الغاز يتمدَّد بارتفاع درجات الحرارة وهو يتمدَّد بنِسَب طردية؛ بمعنى أنه إذا تضاعفت درجة الحرارة يتضاعف معها الحجم، وإذا قلَّت درجة الحرارة إلى المنتصف يقلُّ الحجم إلى منتصفه، وهو أمر معقول حيث إن قائد المنطاد الذي يعمل بالهواء الساخن هو الشخص الجدير بوصفِ هذه العلاقة؛ لأن هذا هو المبدأ الفعال في عمل المنطاد الذي يعمل بالهواء الساخن، يتمدَّد الهواء الساخن، بمعنى أن نفس الكتلة تشغل حيزًا أكبر من الفراغ الذي كانت تشغله، وعليه تقلُّ الكثافة، وترتفع الفقاعات الموجودة في الهواء الساخن الذي يُوجَد في المنطاد في الغلاف الجوي شأنها في ذلك شأن الفقاعات التي تُوجَد في الماء المغلي.

ويصعب إثبات تمدد الغازات وانكماشها في مدًى مناسب من درجات الحرارة، أي في المدى من نقطة تجمُّد الماء إلى نقطة غليان الماء. إلا أن لوساك رأى أن العلاقة المصاحِبة يُمكِن قياسها؛ حقيقة أن الضغط يتزايد مع الحرارة. قِسْ ضغط إطار سيارتك في الصباح قبل القيادة إلى العمل، ثم بعد الوصول إلى العمل، ستجد أنَّ ارتفاع درجة حرارة الإطار (بسبب الاحتكاك بالطريق وبسبب الفرملة) قد سبَّب ارتفاعًا في الضغط. تعمل مُحرِّكات الديزل بنفس المبدأ، لكنها تستغلُّ الحجم لضبط درجات الحرارة. فالهواء مضغوط؛ لذا تُستخدَم حرارة الهواء المضغوط بشكل كبير في إشعال رذاذ الوقود.

ويُمكن شرح الضغط المتزايد للغاز عند تسخينه في ضوء النظرية الحركيَّة للجزيئات أيضًا، حيث تجعل الطاقة المضافة إلى عيِّنة غاز الجزيئات تدور بطريقةٍ أسرع، والدوران

بشكل أسرع يُسبِّب حدوث تصادمات متوالية بشكلٍ أكثرَ وأعنف مع جوانب الحاوية مما يُسبب ارتفاع الضغط. ويُعتبَر التشبيهُ الذي استخدمناه من قبل بخصوص البعوض أقلَّ دقةً هنا، لكن ما من تشبيهٍ كامل، يُمكنك أن تتخيل أن البعوض يلفُّ بشكل أسرعَ في مناخ دافئ، وإذا كان يلف في وعاء فإنه كثيرًا ما سيرتطم بالوعاء.

ولأن سلوك الغازات يتوقَّف على درجة الحرارة، وجَد علماء القرن التاسعَ عشر أنفسَهم في حاجة إلى مقياس لدرجة الحرارة؛ على ألَّا يكون له قيمٌ سالبة. في الحسابات التي تخصُّ الغازات مثل قانون جاي لوساك، يُمكن أن تُؤدي درجة الحرارة السالبة إلى حجم سالب وضغط سالب، أو نتائجَ غير واقعية أخرى. السؤال الذي يطرح نفسه إذن: إذا لم يكن هناك درجةُ حرارة سالبة، فأي درجة ستختارها لأن تكون صفرًا؟ اقترح لورد كلفين أو المعروف خلافًا لذلك باسم وليام طومسون، مقياسًا به صفرٌ مطلَق، أو درجة حرارة منخفضة جدًّا بحيث لا يُوجَد شيء على الإطلاق يُمكِنه أن يكون أقلَّ منها.[5] كيف يُمكن لأحدهم أن يشتقَّ مقياسًا مثل هذا؟ عن طريق ملاحظة الكيفية التي يتغيَّر بها كلٌّ من الضغط والحجم بتغير درجة الحرارة واستخدام هذه المعلومات للتنبؤ بالنقطة التي يصل عندها الضغط والحجم إلى الصفر. ويُطلَق على استخدام هذه النقطة على أنها الصفر، أي المقياس المطلق لدرجة الحرارة، يُطلَق عليها أيضًا «مقياس كلفن». وقد اتضح أن الصفر المطلق هو −٤٥٩٫٦٧ درجة فهرنهايت (−٢٧٣٫١٥ درجة سيليزية)، إنها غاية في البرودة.

ويصلح جدًّا مثال البعوض مع العلاقة التالية للحالة الغازية أيضًا، والشائعة باسم «قانون أفوجادرو».[6] سُمِّي قانون أفوجادرو نسبة إلى الفيزيائي الإيطالي أميدو أفوجادرو الذي اقترح في أوائل القرن التاسع عشر، أن الأحجام المتساوية للغازات تحوي عددًا متساويًا من المولات إذا لم يتغيَّر كلٌّ من درجة الحرارة والضغط في نفس الوقت، أو بكلماتٍ أخرى، تشغل مجموعتان من البعوض الفراغ مرتَين على أنهما مجموعة واحدة، ويفعل الشيء نفسَه مجموعتان من جسيمات الغاز.

لكننا نرغب في أن تلحظ أن العلاقات المذكورة قد تبدو إلى حدٍّ بعيدٍ غيرَ واقعية قليلًا حتى إن متغيرًا واحدًا فقط قد يتغيَّر في المرة الواحدة، حين يتغير الضغط أو درجة الحرارة أو عدد المولات أو الحجم. وبالتأكيد، يندر جدًّا أن يكون هذا هو الحالَ في الواقع، حيث يتغير الضغط والحجم ودرجة الحرارة في الوقت نفسِه، أو يزداد عدد المولات في حين يتغير كلٌّ من درجة الحرارة والضغط أيضًا. ولحسن الحظ يُمكِن دمج التأثيرات المتنوعة

في معادلة واحدة مباشرة، تُحسَب فيها كافة المتغيرات التي هي درجة الحرارة والضغط والحجم وعدد المولات. والمعادلة التي تتمكَّن من عمل توازن للتأثيرات تُسمَّى «المعادلة المثالية للغاز»، وبهذه المعادلة يتسنَّى لنا بشكل طبيعي أن نُقدِّر جيدًا المتغير المفقود، مثل الحجم إذا كان لدينا درجة الحرارة والضغط وكمية الغاز.

(الضغط × الحجم)/(درجة الحرارة × عدد المولات) = قيمة ثابتة

تنصُّ هذه المعادلة على أن نسبة حاصل ضرب الضغط × الحجم على حاصل ضرب درجة الحرارة في عدد المولات؛ تظل ثابتة، حتى إن معرفة ثلاثة متغيرات تُساعد على التنبؤ بالمتغير الرابع. فعلى سبيل المثال إذا كان كلٌّ من درجة الحرارة والحجم والضغط معروفًا لدينا، فإننا يُمكِننا أن نحسب كمية الغاز.

ونقول إن معادلة الغاز المثاليةَ هي التي تُوفر نسبة تقديرية، لأن هذه المعادلة «مثالية»؛ بمعنى أن المثالية قد أُضفيت عليها، وليس بمعنى أنها أفضلُ معادلة ممكنة، والمثالية هي تجاهل القوى البينجزيئية. في حقيقة الأمر، ستأتي قوى الجذب البينجزيئية إلى المشهد في لقطة ما مُسببةً انحراف الغاز عن تصرفه المثالي. وقد يتكثف الغاز تحت الضغط، ويدفع الضغط الجزيئات إلى تقارب كافٍ حتى تقوم قُوى الانجذاب بممارسة تأثيرها. من ناحية أخرى، إذا كان الضغط كبيرًا جدًّا، فقد ينضغط الغاز أقلَّ من المتوقع حيث إن قوى التنافر تعزل الجزيئات، لكن هذا جيد؛ فالانحراف عن قانون الغاز المثالي يذكرنا بأن الغازات تتألف من نقاط ساكنة هندسية، بل من موادَّ حقيقية لها شكل وحجم، وقدرةٌ على الالتصاق … بل ورائحة أحيانًا.

### على سبيل المثال: غازات البطن

افترض أنك اشتريت أدوية مقللة لغازات البطن، فقد يكون من المثير للاهتمام أن تلحظ بعض خصائص وتصرفات غازات الهضم التي نُحاول أن نكبح جماحها.

تنتج غازات البطن في الأمعاء عن طريق البكتيريا والفطريات التي تعيش هناك، وكما سنكتشف على نحو أكثرَ تفصيلًا في أثناء خوضنا في غمار الكيمياء الحيوية أن هذه البكتيريا والفطريات ضرورية؛ ذلك لأن أجسادنا البشرية لا تحوي المعدَّات الكيميائية الضرورية لكي تُحلل بعض السكَّر المركب الموجود في الطعام مثل الفول والبسلة. من ناحية أخرى تتمتع هذه البكتيريا والفطريات بالمقدرة على تحليل هذه الأطعمة، لكنها

عندما تقوم بذلك، يكون من أعراضها الجانبية هذه الغازات التي تحوي ثانيَ أكسيد الكربون والهيدروجين والميثان. هذه الغازات هي بلا رائحة في حد ذاتها، لكنها تلتقط في رحلتها عبر الأمعاء القليلَ من الشوائب، بما فيها بعض المركبات المحتوية على الكبريت ذي الرائحة الكريهة. ويُعتَبر الميثان مادة قابلة للاشتعال؛ لذا بالفعل تُعتَبر بعض غازات البطن قابلةً للاحتراق، لكن الأسطورة الأخرى القائلة إن الغازاتِ القابلةَ للاحتراق يُمكنها أن تبعث إشعاعاتٍ ضوئيةً داخل الأمعاء؛ غير صحيحة. وكما لاحظنا، يتطلب الاحتراق وجودَ الأوكسجين، أما الغازات التي لا تزال داخل البطن فهي ممنوعة نسبيًّا من الأوكسجين، ولكن حتى إذا أُزيلَت الومضات الضوئية من المعدة باعتبارها أمرًا خطيرًا، فالفكرة القائلة بمحاولة إشعال غازات المعدة فكرة سيئة، والعوائق واضحة.

إلا أن الأمر الوثيق الصلة بمناقشتها الحاليَّة هو لماذا تخرج غازات المعدة على أي حال؟ تُفيدنا الخبرة الشائعة أن الحالة الغازية تكون أقلَّ كثافةً من الحالة السائلة وأن فقاعات الغاز تخرج خارج المواد شبه السائلة، وتُؤكد مرة أخرى مناقشتنا حول خواص الحالة الغازية هذه الفكرة، إلا أنه يبدو أن غازات الأمعاء تنتقل في الاتجاه المعاكس.

وسبب هذا السلوك المعاكس هو حدوث التمعُّج (الحركة الدودية للأمعاء) هو فعل التقلُّص الذي تقوم به الأمعاء وهي تدفع ما بداخلها نحو الخارج. يُثار فعل التمعُّج

بالأكل أو الشرب مما يُسبب خروج الغازات مباشرة بعد الأكل حتى إذا كانت الوجبة الحالية لا تزال داخل المعدة في مراحل هضمها الأولى، وإذا تمكَّن أحد الغازات من التسلل في عكس اتجاه عمل التمعج، فإن الانحناءات والالتفافات الكثيرة داخل الأمعاء تعمل على الحيلولة دون تقدم سيره، ولكن عندما يستلقي الفرد على ظهره، تبطل قضية الاتجاهات مما قد يُسبب خروج الغازات مباشرة بعد الاستيقاظ.

ومن الممكن إيجاد وسائل مساعدة على الهضم يُمكنها أن تُقلِّل من كمِّ الغازات المنتَجة (سوف نرى كيف تعمل هذه الوسائل لدى تناولنا لهذا الموضوع مرة أخرى في أثناء مناقشتنا للكيمياء الحيوية). ومن الممكن أيضًا تجنُّب الغازات الزائدة عن طريق الابتعاد عن الأطعمة المسببة لها، مثل الأرز والمكرونة والبطاطس والفول والبازلاء. كل هذا التجنب ليس من أجل الصحة، لكن من أجل السلوك الاجتماعي اللائق؛ حيث تُعتبَر رائحة الغازات التي تتنوع بتنوع الأكل المهضوم شيئًا مُحرجًا في ثقافات عديدة، ويُعتبَر الصوت الذي يتحرك على حد سواء مثل الغاز عبر الأمعاء ثم عبر المخرج، شيئًا بذيئًا، لكن ليس هناك مجال للربط بين الحالات المرَضية والغازات الزائدة، في حقيقة الأمر قد يكون العكس صحيحًا؛ لذا فمن المحتمل ألَّا يكون صحيًّا أن تُحاول أن تكتم الغازات المعوية. عمومًا، يُعتبَر خروج الغازات علامة على أن الأمعاء تعمل جيدًا، وهو أمر جيد أن تعرفه.

# تجربة ١١: إنه في الهواء

ما الكيمياء!
أهي أن الرياح غير معدية بحق،
وأنه ليس هناك خدعةٌ في أن مياه البحر الخضراء تتبعني في لهفة،
وأنه من المأمون السماح لها بأن تلعق جسدي العاريَ بألسنتها ...
فالمتورِّم والمتشنج والمنقبض يستيقظون ليَجدوا أنفسهم في كمال الصحة،

فتراهم يحملون نسيم الليل وكيمياء الليل ويستيقظون ... فيا أيها الحب، حلَّ كافة الأمور واجعلها تُثمر بالكيمياء الأخيرة ...

والت وايتمان في «أوراق العشب»، ١٨٥٥

لقد لاحظنا في مناقشتنا عن تركيز المحاليل أن تفاعلاتٍ عديدةً مهمة تحدث في المحاليل؛ حيث إن المحاليل تُوفِّر الحركة ووسيلة الاحتكاك، إلا أن ثمة تفاعلاتٍ أخرى تحدث في الحالة الغازية وفي المرحلة التي تتوسط الغاز والمادةَ الصلبة أو السائلة، فجزيئات الغاز تتمتع أيضًا بالقدرة على الحركة.

وتُسمَّى حركة الجزيئات هذه «الانتشار»، وانتشار الغازات يُمكن برهنته بسهولة: اختر منطقة خاليةً من النسمات. ارتدِ نظارتك الواقية. اسكب القليل من النشادر في وعاء، ثم ضعه في أحد جوانب الحجرة ثم امشِ إلى الجانب البعيد من الحجرة. إذا انتظرت دقيقة أو اثنتَين، ستصل إليك رائحة النشادر؛ لأن جزيئات النشادر في الحالة الغازية خفيفةُ الوزن جدًّا وتنتشر بسرعة. تعتمد الحشرات بصورةٍ كبيرةٍ على الانتشار. فالفيرمونات مركبات كيميائية تبعث روائحَ تُستخدَم كوسيلة اتصال لجذب بعض الحشرات بعضها لبعض. يُمكِن لذكَر الجيبسي موس (نوع من العثَّة) أن يشتم رائحة القليل من مئات جزيئات الهرمونات الجاذبة للجنس في أنثى العثة المنطلِقة في الهواء من على بُعد ثلاثة أميال؛[1] فالحب شيء رائع.

ينتج الانتشار عن حقيقةِ أن الجزيئات تكون في الحالة الغازية في حالة حركة دائمة، ومع ذلك فمتوسِّط معدل الحركة يتنوَّع بِناءً على درجة الحرارة وكتلة الجزيء. والأسباب بديهية، حيث تشير درجاتُ الحرارةِ العاليةُ إلى أن مزيدًا من الطاقة موجود في النظام؛ ومِن ثَم تنتقل الجزيئات على نحوٍ أسرع، تمامًا مثلما تنتقل رمية كرة السلة المقذوفة بمزيدٍ من الطاقة بسرعة أعلى، وتنتقل الجزيئات التي لها كتلة أكبر على نحوٍ أبطأ من الجزيئات التي لها كتلة أقل، تمامًا مثلما تنتقل كرة البولنج على نحوٍ أبطأ من كرة السلة إذا قذفنا الاثنتَين بنفس الطاقة، ويُمكِن إثبات توقف الانتشار على الكتلة على النحو التالي.

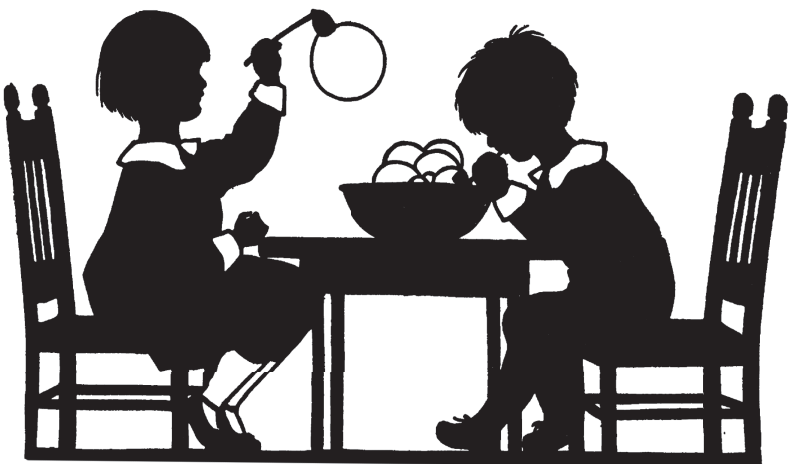
ارتدِ نظارتك الواقية، خذ كوبَين طويلَين بنفس الارتفاع، واملأ أحدَهما بنحو بوصتَين من الخل، واملأ الآخرَ بنفس المقدار من محلول النشادر المنزلي. تأكد من أن الارتفاع متساوٍ في الكوبَين.

بلل مِنشفة ورقية، ثم أضِف قطراتٍ قليلةً من دليل الفينول الأحمر، الذي يُوجَد في عبوة اختبار قلوية محلول حمام السباحة المقترح في «قائمة المشتريات والمحاليل»، على المنشفة الورقية. ضع المنشفة الورقية والمبللة ببقعة الفينول على فوهة كوب الخل. بعد مضي ثلاث دقائق نجد أن لون المنشفة الورقية يتحول إلى اللون الأصفر. يحدث هذا التغيير في اللون بسبب هروب جزيئات حامض الخليك من الخل، وانتشارها وهي في الحالة الغازيَّة حيث تصطدم بدليل الفينول الأحمر الموجود في المِنشَفة الورقية. وعندما يتغير لون المنشفة إلى اللون الأصفر؛ التقِطْها وضعها على فوهة الكوب الذي يحوي النشادر. ينبغي أن يتحوَّل لون المنشفة الآن إلى اللون الأحمر لكن بشكلٍ أسرع من ذي قبل. يتغير لون المنشفة إلى اللون الأحمر؛ لأن النشادر قلوي، وتتحوَّل إلى اللون الأحمر بسرعة لأن جزيئاتها أخفُّ بمعدل ثلاث مرات ونصف من جزيئات حامض الخليك؛ فتتحرَّك على نحوٍ أسرع في الهواء. بمجرد تحوُّل لون المنشفة إلى اللون الأحمر، يُمكن وضعها مرةً أخرى على محلول حامض الخليك نجد أنها تتحول إلى اللون الأصفر مرة أخرى، لكن التفاعل يكون بطيئًا مرة أخرى.

لنستعرض الآن بمزيدٍ من التفصيل الانتشارَ والفوارق الدقيقة الأخرى في تفاعلات الحالة الغازية.

الفصل الحادي عشر

# عندما تُوضَع الغازات في الأجواء



بدون الرماد ما كنا لنعرف أنه يُوجَد نار،
لا تستهن بأكثر المحروقات سوادًا،
من أجل المخلوقات الراحلة،
التي كانت تُرفرف أرواحُها منذ فترة وجيزة،

* * *

في البدء كانت النيران تُوجَد في الضوء،
ثم قويت،

ما من أحد يستطيع أن يكشف
ما الكربونات إلا الكيميائي.

إميلي ديكنسون في «قصائد»،
المجموعة الثالثة، ١٨٥٠

تتميز التفاعلات الكيميائية في الحالة الغازية بأنها واسعة الانتشار جدًّا ومهمة جدًّا وغريبة الأطوار جدًّا. وسنُوضِّح هنا بعض ميول التفاعلات المتضمنة لحالة الغاز عن طريق أمثلة قد تبدو مألوفة جدًّا.

تنبع معظم الأشياء المميزة في تفاعلات الحالة الغازية من حقيقة أن جزيئات الحالة الغازية، في المتوسط، متباعدة جدًّا نسبيًّا — ونقول نسبيًّا، مقارنة بمجموعات جزيئات الحالة الصلبة أو الحالة السائلة. فهي أيضًا تتطاير بسرعاتٍ عاليةٍ عمَّا يجب أن تكون عليه في الحالة السائلة أو الصلبة، وكنتيجةٍ لذلك تكون قُوى الجذب البينجزيئية غيرَ مهمة نسبيًّا، وبسبب أقفاص المذيب واللزوجة الناتجة عن التفاعلات البينجزيئية، قد تستغرق المتفاعلات في الحالة السائلة المزيدَ من الوقت حتى يذوب بعضها في بعض، ولكنها تستغرق المزيد من الوقت أيضًا حتى ينعزل بعضها عن بعض، مما يُسهل التفاعل. تجد المتفاعلات نفسها في السائل على البعد نفسِه لمدة طويلة من الوقت، وقد تتحرك في المزيد من التصادمات بعضها مع بعض. وكلما كان هناك مزيدٌ من التصادمات، زادت إمكانية حدوث التفاعل. وإذا حدثت وارتطمت جزيئات الحالة الغازية بعضها ببعض، فإنها غالبًا تميل إلى التباعد بالقدر نفسه الذي تميل به إلى التفاعل.

من ثَم هناك عددٌ من العوامل التي تعمل ضدَّ نجاح تفاعلات الحالة الغازية، حتى إن العديد من تفاعلات الحالة الغازية تشتهر بأنها لا تتفاعل فحسب، بل إنها تتفاعل مُحدِثة انفجاراتٍ أيضًا، مثل تفاعل غازات أدخنة البنزين والأوكسجين، إلا أن الفحص من كَثَب يُبين أن عددًا من هذه التفاعلات يجب أن تُستهَل أو يُشعَل بها شرار قبل أن تنطلق. قد يُسبب الشرارُ حدوث التفاعل، وإلا فلن يحدث أي شيء، حيث إن الشرار يُفضي إلى تكوين ما يُعرَف بـ «الراديكال» أو الجذر، وهو نوع كيميائي ذو إلكترون مفرد.

وقد يكون مصطلح الراديكال مألوفًا لمشاهدي أخبار المساء؛ فالسياسي الراديكالي يُسبب الشغْب بأفعاله المتطرِّفة، كذلك يُسبب النوع الكيميائي الراديكالي الشغْب في الجسم؛ فالزيادة المفرِطة في النوع الراديكالي أكثرَ من اللازم يُعزى إليها كلٌّ من الشيخوخة ومرض

السرطان. وقد شرحنا من قبل كيف أن الذرات تميل إلى أن تجمع إليها الإلكترونات أو تلفظها بعيدًا عنها حتى تصل إلى حالةٍ من الامتلاء في أغلفتها الخارجية. الآن يُمكننا أن نُشير إلى أن هذه الأغلفة الممتلئة تمامًا غالبًا تنتهي بعدد زوجي من الإلكترونات، وكما اتضح، تميل كلٌّ من الذرات والجزيئات إلى أن يكون لديها عدد زوجي من الإلكترونات؛ لأن الإلكترونات تدخل في أزواج. مثل زوجَيِ الحذاء داخل العلبة التي يُوضع فيها حيث يُطابِق كلٌّ منهما الآخرَ كزوج، وأحدهما بجانب الآخر. وعندما يحدث شيء ما يجعل الإلكترون غير متزاوج، أي راديكالي، يميل هذا النوع إلى أن يُصبح ذا نشاط عالٍ؛ بمعنى أنه يبحث عن إلكترون آخر. يزيد وجود الجذور الحرة في الحالة الغازية من عدد فرص التلاقي الناجحة على نحو ملحوظ.

وكما رأينا في مناقشتنا لتفاعلات الأكسدة والاختزال، يُمكن لتفاعلات الاحتراق الانتقالُ عبر الحالة الغازية بسرعة عالية. وتُعتبَر المذيبات الغازية بالمثل ذات قابلية عالية للاشتعال؛ ولهذا ينبغي أن تُستعمَل بعيدًا عن أية شرارة أو مصدر للهب وفي مكان جيد التهوية. ولا ينبغي أن يتصل المذيب السائل باللهب؛ لأنه سيُحدِث مشكلة. وإذا اختلطت المذيبات الغازية مع الأوكسجين في الهواء، عندئذٍ قد يكون الشرار هو كل ما نحتاج إليه لحدوث التفاعل.

وتتشابه تمامًا الانفجارات الحادثة في محرك الاحتراق الداخلي، ويُنثَر البنزين كطبقة ضبابٍ رقيقة على الأسطوانة حيث يختلط بالهواء ويُضغَط قبل إشعاله، وتكون درجةُ الحرارة النهائية مرتفعةً جدًّا حتى إن غازَي النيتروجين والأوكسجين الموجودَين في الهواء يتفاعلان ويُكونان مركبات نيتروجينية وأوكسجينية عديدة مثل NO، $NO_2$. ويُمكن أن يُشار أحيانًا إلى هذه الأدخنة إجمالًا على أنها NOx (تُنطَق نوكس)، ويُعلَّل اللون البني المحمر لمركَّبات NOx اللون البني المحمر الموجود في الدخان. وتُعتبَر الأدخنة التي ربما تكون قد لاحظتها عند إعداد محلول كبريتات النحاس، كما هو مذكور في «قائمة المشتريات والمحاليل»، من بين مركبات NOx.

ويُطلِق الهيدروجين المختلط بالأوكسجين أحدَ تفاعلات الحالة الغازية الانفجارية الأخرى المعروفة، الذي يُحتمل غالبًا أنه كان له يدٌ في انفجار مكوك كولومبيا الفضائي، وكذلك في كارثة هيندينبورج. وعادة ما تتفاعل انفجارات الحالة الغازية عبر سلسلة من التفاعلات؛ فالإلكترون في الجذر أو الراديكال يجد رفيقه، لكنه يسرق إلكترونًا من زوج آخر في أثناء العملية، مما يُؤدي إلى نشوء جذر آخر، وغالبًا أكثر من جذر إذا تمزقت الرابطة.

وبسبب هذه السلسلة من الأحداث، يتباين تفاعل الحالة الغازية في سِماته الانفجارية بناءً على إجمالي الضغط، بمعنى عدد الجزيئات الممكنة المستهدفة الموجودة، ففي الضغط المنخفض يُخفق تفاعل الهيدروجين والأوكسجين حيث إن تركيز المتفاعلات لا يكون كافيًا لحدوث التفاعل، ويكون التفاعل انفجاريًّا تحت الضغط المعتدل، لكن من المثير أن الخليط يُصبح أقل انفجارية مرة أخرى تحت الضغط المرتفع جدًّا، والسبب في هذا التغيير هو إخماد تكوُّن الجذور، وفي ظل الضغوط الهائلة، فإن الجذور يُمكِن أن تفقد الطاقة عن طريق التصادمات بينها وبين جدران الأوعية التي تحتويها فتُكوِّن نظائرَ سالبة بدلًا من حدوث سلاسل تفاعلات انفجارية. وفي ظل هذه الضغوط الهائلة نفسِها، ثمَّة جزيئاتٌ متفاعلة كثيرة؛ إذ إن جدران الأوعية تعجز عن إبطال مفعول الجذور بالسرعة الكافية التي تُمكنها من إيقاف تفاعل انفجاري، ثم يتولى الانفجار مسألة الجدار على نحو مستمر. ويبرز الأوكسجين في تفاعلات انفجارية عديدة، ويرجع ذلك إلى أن الأوكسجين يُوجَد طبيعيًّا كجذر ثنائي؛ فإلكترونان حول جزيء الأوكسجين مفرَدان، وكل إلكترون فردي يكون أكثر نشاطًا.

ولطالما ناقشنا التفاعلات التي يكون فيها كلٌّ من المتفاعلات والنواتج في الحالة الغازية، لكن هذه ليست هي التفاعلات الوحيدة التي تتضمَّن الحالة الغازية، فأحيانًا يكون المتفاعل مادة صلبة، ويكون الناتج في الحالة الغازية. وقد يظن البعض أن التفاعلات التي تكون متفاعلاتها موادَّ صُلبة ونواتجها غازات تتصرف ببطء؛ لأن الجزيئات في المادة الصلبة محدودة الحركة، إلا أن البارود يُعتبَر مثالًا على تفاعل يتحول فيه الصلب إلى غاز حيث يتصرف التفاعل بنشاطٍ شديدٍ عند إشعاله. ففي حالة البارود، يتحول كلٌّ من النترات الصلبة والكربون والكبريت إلى مركبات NOx الغازية، وثاني أكسيد الكربون وأكسيد الكبريت بسرعةٍ عالية جدًّا حتى إن التمدُّد يُمكنه أن يُطلِق رصاصة تصل سرعتها إلى نحو ألف قدم في الثانية. بالمثل، يملأ تحلُّل أزيد الصوديوم، الذي هو مركب الصوديوم والنيتروجين، إلى غاز النيتروجين، الوسائدَ الهوائية في السيارات في واحد على عشرين من الثانية. فالمستشعِرات تكتشف الأثر ثم تبعث بشرارة كهربية إلى تفاعلِ أداة الاشتعال التي تُوَلِّد بدورها ما يكفي من حرارة لبدء عملية تحلُّل أزيد الصوديوم إلى غاز النيتروجين.

وتفاعلات الحالة السائلة التي تُنتج غازات تتضمَّن بعض التفاعلات التي نريد أن نتجنَّبها، وقد تتذكَّر أن أحد التحذيرات التي قدمناها في «كلمات قليلة وضرورية بشأن الأمان والسلامة» ألَّا تكون مبدعًا مع مخاليط المواد الكيميائية، ومن أهم الأسباب منتجات

الحالة الغازية، فيُمكن أن تُنتِج المنظفاتُ المنزلية غازاتٍ ضارةً يُمكنها أن تُسبب صعوبة في التنفس أو أكثرَ من ذلك، وتُعَد نواتج الحالة الغازية نواتجَ غادرة ولا سيما في هذا الشأن؛ لأنها تنتشر في جميع أرجاء الحجرة، حتى الغازات التي يبدو أنها غير مؤذية يُمكنها أن تُسبب اختناقًا إذا كانت مركزة بشكل كافٍ حتى تحل محل الأوكسجين اللازم للتنفس. في وقت ما في تاريخ أوروبا كان ثاني أكسيد الكربون يُسمَّى «غاز سلفستر»، تأتي كلمة سلفستر عن الكلمة اللاتينية التي تعني «غابة»، حيث كان يُوجَد الغاز في كهوف تحوي خشبًا فاسدًا فتحلَّلت مركبات الكربون في الخشب إلى ثاني أكسيد الكربون، وغاز ثاني أكسيد الكربون هو غاز أثقل من الهواء؛ لذا استقر في أرضية كهوف غير جيدة التهوية، وكانت الكلاب التي تأتي إلى الكهف تختنق في حين ينجو الإنسان لأنه يتنفس في مستوى أعلى من الأرض. وبالطبع كل هذه الأمور لا تُرى، وفي هذا الوقت من تاريخ أوروبا، كان يصعب على العالم الأوروبي إدراكُ هذه الأمور غير المرئية، فكانت غامضة جدًّا بالنسبة إليهم. لهذا السبب وغيره من الأسباب العديدة، يُمكن أن نغفر للأوروبيين الأوائل اعتقادَهم الذي يبدو غيرَ عقلانيٍّ في السحر والخرافات؛ فعندما ترى كلبك يسقط ميتًا أمام عينَيك بقوًى غير مرئية ليس لها تأثير عليك، قد يقنع هذا أيَّ أحد بالقوى الخارقة للطبيعة!

ويصعب أيضًا أن نتعامل ببساطةٍ دائمًا مع التفاعلات التي تتضمَّن متفاعلات غازية؛ لأن هذه المتفاعلات ينبغي تركيزها أو تجميعها قبل حدوث تفاعل هام. ويعني تجميع متفاعلات الحالة الغازية عامة زيادة ضغط غازات محددة. في أحد تفاعلات الغاز المشهورة التي يتفاعل فيها النيتروجين والهيدروجين ليُكوِّنا النشادر، يكون ضغط الغازات مرتفعًا، ويُسخَّن خليط التفاعل، ويُستخدَم مُيسِّر أي عامل حفَّاز.

وتُسمَّى هذه العملية «عملية هابر» ويُنتج فيها النشادر الذي يُمكن تحويله إلى نترات، وهو مكون لا يُمكن الاستغناء عنه في البارود. وقبل أن تُعرَف هذه العملية كانت الطبيعة تُوفِّر النترات، فبعض النباتات مثل البازلاء والفول تحتفظ بالبكتريا في جذورها، التي يُمكنها أن تأخذ النيتروجين من الهواء، بمعنى أنها تُحوِّل النيتروجين في الحالة الغازية إلى مركَّبات يُمكِن أن يستخدمها النبات. والحيوانات تأكل النباتات ويتكون النيتروجين في سمادها الغنيِّ بالنيتروجين، والكميات الكبيرة من السماد مثل تلك التي تُوجَد في المناطق التي تتوافد عليها أسراب ضخمة من الطيور موسميًّا، تُستخدَم كمصدر للنترات. وفي أوروبا قُبيل الحرب العالمية الأولى، كان يتعيَّن استيراد مثل هذه النترات، مما يعني أن

الدول المستوردة كانت عرضة للحصار؛ ومن ثَم كان التركيز منصبًّا على أكثر الطرق الداخلية لتصنيع النشادر من غاز النيتروجين الموجود في الجو.

وكان أول من استنبط طريقة عملية، هو الكيميائي الألماني فريتس هابر الذي تلقى الكثير من المدح والتقدير (بما في ذلك جائزة نوبل ١٩١٨) ومكانة مميزة عندما تعلق الأمر بصرف الأموال والتسهيلات الجديدة. وعندما تعاقبت الحرب استمر في خدمة الحكومة الألمانية ووافق على العمل في تطوير غاز الخردل والأسلحة الكيماوية الأخرى. في تلك الأثناء، أُصيبَت زوجته بالاكتئاب، ثم انتحرت، وعندما خسرت ألمانيا الحرب العالمية الأولى، أُجبِر على الهرب من ألمانيا لأنه يهودي، عندما احتلت النازية السلطة.[1]

وكان إنجاز هابر هو إيجاد العامل الحفاز، الميسِّر لحدوث التفاعل، الذي كان في هذه الحالة الخاصة الحديد وصدأ أكسيد الحديد. تُيسِّر العوامل الحفازة الصلبة التفاعلات؛ لأن الجزيئات هي وحوش ثلاثية الأبعاد، وعندما يتعلَّق الأمر بالتفاعلات، فإن التوجيه مطلوب. ويُمكن فهم هذا القيد عن طريق الأخذ بعين الاعتبار التفاعلاتِ بين الأشياء الأخرى ثلاثية الأبعاد، فالقِبلة هي مجرد قبلة، لكن الإنسان ثلاثي الأبعاد ينبغي توجيهه إلى القبلة الصحيحة لتكون هادفة وفعالة. وقد تُعتبَر إحدى مميزات العامل الحفاز الصلب هي أنه يُمكِنه أن يحفظ المواد المتفاعلة في حالة من التوجه المناسب. تستخدم السيارات المحولات الحفازة لتحول NOx مرة أخرى إلى نيتروجين وأوكسجين، ولكي تحول أول أكسيد الكربون السام إلى ثاني أكسيد الكربون.

من التفاعلات الأخرى التي تتضمن الغازات والعوامل الحفازة تلك التفاعلات التي تكون فيها المتفاعلات في الحالة الغازية والنواتج في الحالة الصلبة أو السائلة، وتُعتبَر عملية «فيشر-تروبش» مثالًا على هذا التفاعل.

في عملية «فيشر-تروبش»، يتولد أول أكسيد الكربون عن طريق تعريض الفحم للبخار، وتُسمَّى هذه الطريقة «تحويل الفحم إلى غاز».

$$C + H_2O \longrightarrow Co + H_2$$

ويُسمَّى خليط الغازات الناتجة «الغازات التخليقية» ويُمكِن تخصيبه بالهيدروجين من خلال التفاعل المحول للماء.

$$CO + H_2O \longrightarrow H_2 + CO_2$$

وإذا تم هذا عدد مرات كافية، يتولد هيدروجين نقي تمامًا ليُستخدَم في تخليق النشادر على طريقة هابر، ويُمكن أيضًا تحويل أول أكسيد الكربون والهيدروجين إلى الميثانول والكحول اللذَين يُمكن استخدامهما كوقود، أو إذا كُرِّرَت عملية التحويل هذه لعدة مرات مع استخدام العامل الحفاز يتحول إلى سلسلة طويلة من مركبات الكربون التي تُكون الشمع والزيت.

$$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O \longrightarrow \longrightarrow \text{long chain of } CH_3CH_2CH_2CH_2 \ldots$$

رأينا الآن أن التفاعلات بين المواد الصلبة والسائلة والغازية تُعتبَر ضرورية لتفاعلات هامة عديدة تدخل في الصناعات، علاوةً على أن التفاعلات الأخرى التي تشتمل على تفاعلات المواد الغازية والمواد السائلة والمواد الصلبة هي تفاعلات حيوية لنا على مستوى الحياة غير الصناعية، مثل التفاعلات بيننا وبين الهواء الذي نتنفسه على سبيل المثال.

**على سبيل المثال: توصيلات معدنية للتنفس**

لعل أكثر الأمثلة الأخاذة للتفاعلات المشتملة على الحالة الغازية هو التنفس، والتنفس هو العملية التي تتبادل الكائنات الحية عن طريقها الغازات مع بيئتها، وبعملية التكافل العظيم في كوكب الأرض، تستهلك النباتات ثانيَ أكسيد الكربون وتُطلق الأوكسجين، في حين أن حلفاءها الحيوانات تستهلك الأوكسجين وتُطلِق ثانيَ أكسيد الكربون، إلا أن

النباتات تحتاج أيضًا إلى الأوكسجين، والأمر الذي قد يُثير الذهول هو أن تفسير ذلك الأمر يتضمن فكرة عمل البطاريات.

تُدير البطارياتُ الأجهزة الكهربية عن طريق مدها بفيضٍ من الإلكترونات، ويُضاهي مجرى الإلكترونات تدفق النهر (في حقيقة الأمر كل منهما يُسمَّى تيارًا)، وتُعتبَر هذه المضاهاة جيدة، وتمامًا مثلما يعمل تيار الماء من خلال دوران الساقية، يُمكن أن يعمل تيار الإلكترونات أيضًا. تُنتج البطارية تيار إلكترونات بتفاعلَين؛ أحدهما يُنتج الإلكترونات والآخر يستهلكها، وهذان التفاعلان منعزلان فيزيائيًّا أحدهما عن الآخر، لكن يُمكن توصيلهما بسلك.

تحتاج البطارية إلى تفاعلَين لأن تيار الإلكترونات لا يتدفق إلا إذا كان لديه مصدرٌ ومقصد يتجه نحوه، ويُعتبَر الاحتياج الثاني — المقصد الذي يتجه نحوه — في غاية الأهمية، وإذا أُعيق التيار، فإن الماء لا يتدفَّق. في هذه الحالة لا يكون لديك تيارُ ماء متدفق، وإنما بِركة. بالمثل، كي تتدفق الإلكترونات في تيار كهربائي ينبغي أن يكون لديها مقصد، وتُخزِّن البطاريات المختزنة الشحنة؛ لأن الإلكترونات لا يُمكنها أن تغادر إذا لم يُوجَد مكان تذهب إليه، ولكي تُنتج تيارًا من الإلكترونات ينبغي أن تُوصَّل أطراف البطاريات المختزنة بسلك لكي تُنشئ قاعًا للتيار المتدفق.

ويُمكن أن تُدار أيضًا عمليات النباتات عن طريق تيارات الإلكترونات من تفاعلات ثنائية — أحدهما يجلب الإلكترونات والآخر يستهلكها — وهذه التفاعلات يُمكنك فصلها أيضًا، وينبغي أن تُوصل تفاعلات النباتات أيضًا لكي يُسمَح بتدفق الإلكترونات، لكن بدلًا من استخدام الأسلاك، تملك النباتات شيئًا يُسمَّى «سلسلة نقل الإلكترونات»، وسنسرد هنا طريقة عملها.

تُعتبَر النباتات ذاتية التغذية، بمعنى أنها قادرة على صُنع غذائها بنفسها، لكنها لا تخلقه من الهواء الشحيح، بل من الهواء الكثيف: الكثيف بثاني أكسيد الكربون ($CO_2$). تأخذ النباتات ثانيَ أكسيد الكربون والماء وتُنتج الكربوهيدرات والأوكسجين عن طريق سلسلة متناسقة على نحو خلاق من الأحداث تُسمَّى «البناء الضوئي»، ثم تقوم النباتات بعد ذلك عن طريق طريقةٍ مماثلة لتلك التي يقوم بها أقرانها الحيوانات، باستقلاب السكريات من أجل الطاقة وتستهلك في تلك العملية الأوكسجين. كل خطوة في تلك العملية تحتاج أن تُزوَّد بالطاقة، وتأتي الطاقة من تدفق الإلكترونات، تمامًا مثلما يُمكن لتدفق الإلكترونات أن يُدير جهازًا كهربائيًّا. وعادة يكون مصدر الإلكترونات في الجهاز هو البطاريات، ويكون مصدر الإلكترونات في أوراق الأشجار شبيهًا للبطاريات أيضًا، لكن أصغر كثيرًا.

في المرحلة الأولى من عملية البناء الضوئي، التي تُسمَّى المرحلة الضوئية، فإن التفاعل الآتي:

$$2H_2O \longrightarrow 4H^+ + O_2 + 4 \text{ electrons}$$

يُمِد الكلوروفيل، وهو جزيء الصبغة الخضراء في النبات، بالإلكترونات. وتهيج أشعة الشمس الإلكترونات كي تتدفَّق في الكلوروفيل إلى سلسلة نقل الإلكترونات، التي تعمل كشبكة أسلاك في أوراق النبات، وقد أصبح استخدام الضوء لإثارة الإلكترونات حدثًا يوميًّا مع انتشار الأجهزة التي تعمل من على بُعد بالريموت كنترول. يُثير الضوء عن طريق التحكم من بُعد الإلكتروناتِ الموجودةَ في أجهزة الاستقبال المصنوعة من أشباه الموصلات والموجودة — ولنَقُل — في جهاز التلفاز، ويعمل التيار الناتج بدوره بتشغيل الدوائر الإلكترونية أو فصلها في جهاز التلفاز. وفي أوراق النبات، يُثير الضوء الإلكترونات الموجودة في الكلوروفيل والتيار الناتج يجري عن طريق السلسلة الناقلة للإلكترونات، والسلسلة الناقلة للإلكترونات هي سلسلة من الجزيئات يُمكنها أن تُمرِّر الإلكترونات، وتقع في تركيب نباتي يُسمَّى غشاء الثيلاكويد.

لكن كما أشرنا لن يتدفَّق التيار ما لم يكن هناك مكانٌ يذهب إليه، وفي المرحلة الضوئية من عملية البناء الضوئي، يقوم فوسفات ثنائي نيكليوتيد النيكوتين والأدينين — وهو جزيء يحوي العديد من الرموز في صيغته الكيميائية مثل تلك الحروف الموجودة في اسمه الصعب — بامتصاص الإلكترونات المتَّفقة لأسفل عبر سلسلة نقل الإلكترونات، ومن حسن حظنا، أنه يكفي الإشارة إلى هذا الجزيء بالأحرف الأولى منه $NADP^+$، وهي ممارسة شائعة في عالم الكيمياء الحيوية المعقد.

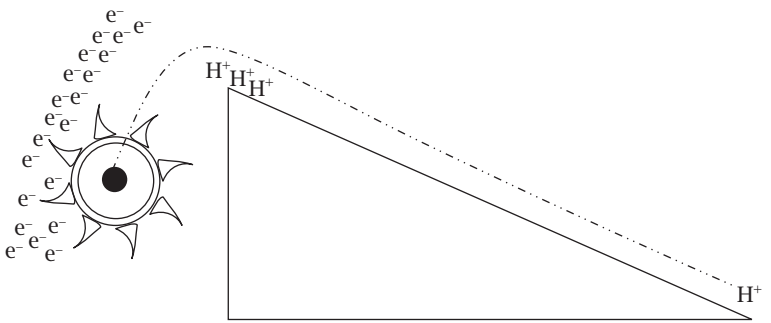
ومن الخصائص البارزة في $NADP^+$ شحنته الموجبة الصافية التي يُمكِن أن تعمل بطريقة ما كإسفنجة للإلكترونات.

$$NADP^+ + H^+ + 2 \text{ electrons} \longrightarrow NADPH$$

وخلال تدفق سلسلة نقل الإلكترونات إلى $NADP^+$، تعمل الإلكترونات، وفي هذه الحالة يُستخدَم العمل الذي تقوم به لخلق «ميل البروتون».

في هذه النقطة، يجب علينا أن نُقحِم شيئًا ما غير متعلق بالموضوع: الهيدروجين كما قد تتذكرون، يتكون من بروتون واحد وإلكترون واحد عندما تكون ذرته متعادلة،

وعندما تُجرَّد ذرة الهيدروجين من الإلكترون، فإنها تُكوِّن أيون الهيدروجين، ويُشار غالبًا إلى أيون الهيدروجين الناتج على أنه مجرد بروتون؛ لأن هذا هو الحال بالفعل عندئذٍ، إذ يُصبح بروتون ليس إلا. ويكون «للميل» نفس الدلالة في العلوم مثل ميل جبل أو ميل طريق، أي إنه الاختلاف في الحجم بين كميتَين، مثل الارتفاع، أو كما في هذه الحالة عدد البروتونات التي تفصلها مسافة ما، وعليه يُشار إلى حركة أيونات الهيدروجين من أحد جوانب غشاء الثيلاكويد إلى الجانب الآخر على أنها إعادة ضبط لميل البروتون.




شكل ١١-١: العمل الذي يقوم به تدفُّق الإلكترونات لأسفل سلسلة نقل الإلكترونات يُستخدَم لنقل البروتونات إلى قمة ميل البروتون.

لماذا ترغب أوراق الأشجار في أن تُنشئ ميلًا بروتونيًّا؟ من ثم تستطيع البروتونات، شأنها في ذلك شأن الإلكترونات، أن تتدفق من مكانها بغزارة إلى المكان الذي يُوجَد فيه عجز وتقوم بعملها. والعمل الذي تقوم به البروتونات هو إدارة مصنع الكيمياء الموجودة في الخلايا الحية كافة ATP.

يستطيع الـ ATP، الذي يُعرَف أكثرَ باسمِ ثلاثي فوسفات الأدينوسين، تخزين الطاقة للعمليات الخلوية، وعندما يتفاعل ATP، تُستخدَم الطاقة المختزنة في روابط لقيادة عمليات عديدة مثل نقل المواد التي تُوجَد في الخلايا، وتخليق المركبات التي تحتاج إليها الخلية، وفي انقباض الأنسجة العضلية في الحيوانات، لكن لإنتاج ما يكفي من ATP للقيام بكل هذا العمل، ينبغي أن تُوجَد آليات أخرى لتوليد ATP، التي تبدأ بالمرحلة المظلمة من البناء الضوئي.

والمرحلة المظلمة هي مرحلة «ظلام» لأنها لا تحتاج إلى ضوء لإتمامها، وتُسمَّى المرحلة المظلمة أيضًا «دورة كالفين»، حيث إن أول كيميائي وصفها هو ملفين كالفين. وفي مرحلة الظلام، يُثبَّت الكربون الموجود في ثاني أكسيد الكربون، بمعنى أنه يتحول إلى شكل أقل تطايرًا، وهو السكر، الذي يُمكِن أن تستخدمه النباتات والحيوانات مصدرًا للطاقة، وينتج غاز الأوكسجين في هذه الخطوة، لكنه يخرج إلى الهواء كأحد المنتجات الثانوية:

$$6CO_2 + 6H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 \text{ (glucose)} + 6O_2$$

ويُعتبَر أحد مصادر الطاقة لهذا التفاعل NADPH الذي يُنتَج في أثناء عملية البناء الضوئي، وتشتمل هذه التفاعلات أيضًا على ثلاثي فوسفات الأدينوسين، الذي يَنفد في أثناء تلك التفاعلات — لكن يُعوَّض عنه في المرحلة التالية، بل تجلب تلك المرحلة المزيد — وتتضمن الخطوة التالية كسر الكربوهيدرات/السكر لإطلاق الطاقة عن طريق عملية تُسمَّى «التنفس الخلوي».

يُؤدِّي كلٌّ من الحيوان والنبات مرحلة التنفس الخلوي من الأيض، ومع أن عملية البناء الضوئي لا يُمكِن حدوثها إلا في أثناء النهار، علاوة على أن بعض النباتات تُمارِس بياتها الشتوي دون أن تقوم بعملية البناء الضوئي في فصل الشتاء، فإنه يجب الاستمرار في عملية التنفس، ليلًا ونهارًا، صيفًا وشتاءً، وتُشبِه عملية التنفس الخلوي التي تحدث في خلايا النبات عمليةَ التنفس الخلوي التي تحدث في خلايا الحيوان تشابهًا كبيرًا. وتنكسر الكربوهيدرات في عملية التنفس الخلوي لإنتاج ATP. مرة أخرى يقوم بالعمل تيار إلكتروني يسري عبر سلسلة نقل الإلكترونات، وتخلق الإلكترونات المنحدرة إلى أسفل سلسلة نقل الإلكترونات، ميلًا بروتونيًّا يُستخدَم للعمل على تكوين ATP. أحد الاختلافات هو أن مصدر الإلكترونات هو الشكل المُختزَل لجزيء ثلاثي فوسفات نيكليوتيد النيكوتين والأدينين، أو NADH، وليس الماء. وفي هذه المرة، يُستخدَم الأوكسجين لسحب الإلكترونات خارجًا في الطرف الآخر، بدلًا من $NADP^+$، ويُستهلَك الأوكسجين في هذا التفاعل.

$$O_2 + 4 \text{ electrons} + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$$

مما يُعلِّل احتياج النباتات إلى الأوكسجين أيضًا.

إلا أنه ما زالت هناك إمكانية لبعض الخلايا أن تُنتج الطاقة أحيانًا دون الحاجة إلى الأوكسجين، وتُسمَّى عملية إنتاج الطاقة الخالية من الأوكسجين «عملية التخمر»، ومع أنه

غالبًا يُؤخَذ مصطلح التخمُّر على أنه العملية المنتِجة للكحول، فإنه واقعيًّا يشمل عملياتٍ عديدةً تعمل بدون الأوكسجين؛ فعلى سبيل المثال، عندما يحدث نقص في الأوكسجين في خلايانا العضلية، كما هو الحال عندما نُمارس الرياضة بعنف، ولا يستطيع تنفسُنا أن يتواكب وحاجتَنا من الأوكسجين، فإن عضلاتنا يجب أن تعتمد على وسائل أخرى لإنتاج الطاقة، لا تتطلب وجود الأوكسجين، والمنتج النهائي لإحدى هذه الوسائل البديلة التي لا تعتمد على الأوكسجين هو نوع من الأحماض المعروف بحامض اللاكتيك. وفي حينِ يدخل حامض اللاكتيك في بِنية الخلايا العضلية المحرومة من الأوكسجين، فإن الخلايا لا تزال أقلَّ قدرة على القيام بوظيفتها، والنتيجة هي كلل وألم وإعياء. تعتمد الخميرة على نوع آخر من توليد الطاقة الخالية من الأوكسجين الذي يكون الإيثانول الناتجَ النهائي عنه، ونحن نستفيد من هذا التخمر عند صنع الخمور وغيرها من المشروبات الكحولية.

ومع أن الهضم الخاليَ من الأوكسجين قد يكون مؤلمًا لنا، فثمة كائناتٌ حية دقيقة تنمو في أجواء تُعاني نقص الأوكسجين؛ فالبكتيريا التي تُفسد الأغذية المُعلبة، من المحتمل أن تكون غير مُعقمة على نحو جيد، في غياب الأوكسجين، وتتسبَّب مخلفاتها الغازية في حدوث انتفاخ لعلب الأغذية الفاسدة. إلا أن توليد الطاقة بدون الأوكسجين لا يُعتبَر كفئًا، إلى جانب أن أنماط الحياة التي تعتمد على الطاقة الخالية من الأوكسجين فقط ليست بالكثيرة، وثمة وِجهة نظر تقول إن الديناصورات عاشت كل هذا العمر المديد بسبب توافر الأوكسجين في الهواء في ذلك الوقت، علاوة على وجود بعض الأدلة الجيولوجية على أن مستويات الأوكسجين قد تناقصت بالتدريج،[2] ومن الواضح أننا الآن على وشك الاقتراب من الحجم الصحيح؛ كي نستخدم كمية الأوكسجين الموجودة، لكنه إذا تناقص مرة أخرى، فإن الأمور ستئول إلى غير ذلك.

ستستمر الحياة، لكن المخلوقات الموجودة ستُشبهنا أقلَّ من الحد الذي نُشبِه به نحن الديناصورات، وأقلَّ مما تُشبه الديناصورات الكائنات أحادية الخلايا من حيث أتت، إلا أن هذه الكائنات أحاديةَ الخلايا تضطلع بمسئولية إنتاج الأوكسجين في الأجواء، الذي تراكم في آخر الأمر إلى الحد الذي سمح بالحياة المتعددةِ الخلايا؛ ومِن ثَم قد تكون هذه الدورة تكرَّرت أخيرًا، وقد اعتدنا أن نُفكر بطريقة خطية في ضوء البداية والنهاية؛ لأننا لا نقتنع إلا بهذه الطريقة، إلا أن الحياة غيرُ مقيدة بمثل هذا، فالحياة تميل إلى تقدير الدوائر، والحياة تتعاقب في الارتفاع والانخفاض.

# تجربة ١٢: كيف تنمو حديقتك؟

أشعر أنني كتلة محببة من بِلَّورات لا شكل لها.

استشهد لافكاديو هيرن بهذه الجملة في كتابه
«الحياة عصور لافكاديو هيرن»، ١٩٠٠

لا تُعَد كلٌّ من الحالتَين الغازية والسائلة الشكلين الوحيدين للمادة اللذين يُصاحبهما تفاعلات مثيرة للكيميائي؛ فالحالة الصلبة للمواد مع أنها تبدو بلا حَراك أو حياة تمامًا، فإنها تحظى بجانب حيوي أيضًا.

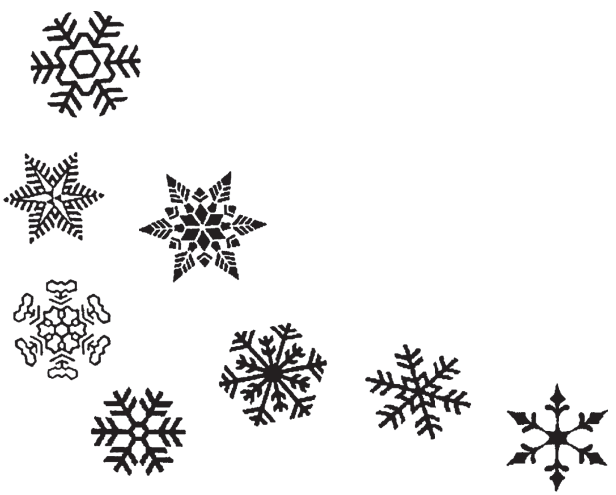
ارتدِ نظارة الأمان الواقية. انتقِ وعاءً صغيرًا من البلاستيك أو الزجاج مُشابهًا لوعاء الحبوب ليكونَ كالحديقة الخاصة بك، وتأكَّد من أنك لست في حاجة إليه، ويُمكنك إلقاؤه بعد الانتهاء من التجرِبة. ضع هذا الوعاء داخل وعاءٍ أكبر أو صندوق أو حاوية أو على فرخ كبير من ورق الصحف أو رقائق الألمنيوم؛ ومن ثَم أي بلَّورات تتساقط من حديقتك ستظل في الداخل مما يُسهل عليك عملية التنظيف. اختر مكانًا لحديقتك يُمكن لها فيه أن تقع بلا إزعاج أو عائق، وحيث لا تُزعج رائحةُ النشادر أي أحد.

خذ إسفنجة مطبخ صغيرة، بلِّلها ثم اعصرها بحيث تكون رطبة فقط. قطع الإسفنجة الرطبة على شكل مكعبات صغيرة وضَعْها في الحديقة، وانثرها بالتساوي في القاع، بحيث يكون هناك ما يقرب من نصف بوصة (١سم) مسافة تفصل بين كلٍّ منها وبين جوانب الوعاء، ويتوقف عدد المكعبات على حجم الوعاء؛ فغالبًا سيأخذ الوعاء ثلاثةً إلى خمسة مكعبات. أنت الآن مستعد لتُضيف المواد التي ستُشكل حديقتك.

خذ زهرةَ غسيل، والنشادر المستخدم في المنازل، ومِلح الطعام، وماءً مقطرًا وهو مقترح شراؤه ضمن «قائمة المشتريات والمحاليل»، ثم أحضر ملعقة بلاستيكية. أضف مِلعقتَين صغيرتَين من زهرة الغسيل، وماءً مقطرًا، والنشادر إلى الوعاء، وإذا شئت يُمكنك أن تُضيف لونًا بإضافة قليل من قطرات ألوان الطعام مباشرة على مكعبات الإسفنج، ولا تُعتبَر المقادير الدقيقة أمرًا حيويًّا للناتج هنا. رجَّ الوعاء بخفة. انثر ملعقتَين صغيرتَين من ملح الطعام فوق المكعبات، ولا تنزعج إذا وقع بعض الملح على المحلول الذي في قاع الوعاء. اترك الوعاء ساكنًا طيلة الليل. انثر في اليوم التالي ملعقتَين من مِلح الطعام أيضًا على المكعبات واترك الوعاء لليلةٍ أخرى. في اليوم الثالث يجب عليك أن تُكرر إضافة المكونات كافةً التي استعملتها في اليوم الأول، مراعيًا ألَّا تُزعج نموَّ أي بِلورات تكونَت. نجد أن الملح قد تحوَّل إلى الكثير من البلورات الرقيقة في هيئة أصابع اليد، ويُمكنك أن تُعزز جولتك عبر الحديقة باستخدام عدسة مكبرة للنظر إلى البلورات.

الفصل الثاني عشر

# كيمياء البلورات النقية



لقد كان الطريق شاسعًا ومستقيمًا وبراقًا مثل البلورة، وينتهي بالشمس.

فيودور دوستوفسكي،
«الإخوة كارامازوف»، ١٨٨٠

يُمكن أن تستحضر كلمةُ كيمياء إلى الذهن صورًا لموادَّ لزجةٍ، وأشكالًا كرويةً وسوائلَ هُلامية، وليست صورًا لتركيباتٍ بارعة ومتقَنة ومنظمة، لكن المواد الكيميائية في الحالة

الصلبة يُمكن أن تكون ذات تماثل رائع وتركيبات شديدة الكياسة، ويتضح التماثل الجميل والرياضي في تجرِبة بلورات الحديقة، وتظهر حتى في حُبيبات الملح المتماثلة، وهنا سوف نفحص القُوى التي تُحدث مثل هذا التركيب، والظواهرَ الأخرى المرتبطة بالحالة الصلبة للمادة.

وحتى هذه اللحظة، لم نَخُض بعد في الطبيعة ثلاثية الأبعاد للجزيئات؛ لأننا لم نكن في حاجةٍ إلى هذه الدرجة المزيدة من التعقيد، ومن الناحية التاريخية، كان هذا التدرج الطبيعي للأحداث أيضًا، ليس إلا. ولم يكن حتى منتصفِ القرن التاسعَ عشر، أي ما يقرب من نحو نصف قرن بعد أن أصبحت نظرية دالتون للذرات مقبولةً بشكل عام، لم يكن عددٌ كبير من العلماء الأوروبيين قد بدَءوا التعاطيَ مع احتمالية الترتيب ثلاثيِّ الأبعاد لذرات الجزيئات وعواقِبه.

ويأتي أحد الأدلة الأولى على أنه قد يكون هناك شيءٌ ما له أهمية جوهرية في الطريقة التي تُرتب بها الذرات نفسها في المركبات — من اكتشاف الإيسوميرات، وهي الجزيئات التي لها الصيغة الكيميائية نفسُها ولكنها ذات خواصَّ مختلفة، وكما ناقشنا من قبل، كلٌّ من كحول الحبوب والميثيل إثير لهما الصيغة الكيميائية نفسُها، $C_2H_6O$، لكن أحدهما سائل في درجة حرارة الغرفة والآخر غاز، ورائحتهما أيضًا مختلفة بوضوح، ومع ذلك فلا يُوصى أن نستنشق أيًّا منهما، حيث يُمكن أن تُسبب الغازات المتصاعدة منهما — في تركيزات معينة — الموت. ويتكون كلٌّ من الجليكوجين والسليلوز من سلاسل طويلة من جزيئات الجلوكوز المرتبطة معًا، لكن في حين يخزن الجليكوجين الطاقة في جسم الإنسان، فإن الرابطة في أيسومر السليلوز، هي تلك الرابطة التي لا يستطيع الجهاز الهضمي في الإنسان أن يُحللها إلى غذاء، ففي أثناء النُّدرة التي حدَثت في محصول البطاطس بأيرلندا منتصفَ القرن التاسعَ عشر، اضطُر الناس إلى أن يأكلوا العشب، لكنهم مع ذلك ماتوا جوعًا على كل حال؛ لأنهم لم يستطيعوا أن يهضموا سلاسل الجلوكوز الموجودةَ في العشب.

وفي القرن التاسع عشر، حتى عندما عُرف أنه من الممكن أن يكون مركبان لهما الصيغة نفسُها لكن ترتيب ذراتهما مختلف، استغرق الأمر بعض الوقت حتى اعتُرِف بشكل عام أن الزوايا ثلاثيةَ الأبعاد والفراغاتِ بين الذرات يُمكِنهما أن يُؤثِّرا على سلوك الذرات الكيميائي. وقد اكتشف لويس باستير، منقذ صناعة الخمور في فرنسا في

القرن التاسعَ عشر، أن ملح حامض الطرطريك الموجود في الخمور، يُوجَد في شكلَين متمايِزين.[1] ويُمكن فصل هذَين الشكلَين بحذر، بملقاط إذا رُئِيا بعدسة مكبرة. ولأن البلَّورتَين هما حامض الطرطريك، فإن العناصر في الجزيئات تكون مرتبطة بنفس الترتيب؛ ومِن ثَم يكمن الاختلاف في الطريقة التي رُتِّبت بها الروابط في الفراغ.

إلا أن هذا التفسير المنطقي لم يلقَ الاستحسان العالمي الفوري عندما طُرح لأول مرة، وقد نُعِت المؤيدون للفكرة بالحماقة، أو بما هو أكثر من ذلك، وكان عليهم تحملُ هذا النقد، وبمرور الوقت، اتضَحت صحة أقوالهم. ولتفسير تركيب البلورات التي لُوحظت في الملح والسكر وبلورات الحديقة سنتعرض الآن لطبيعة الذرات والجزيئات والأيونات ثلاثية الأبعاد في عالمنا ثلاثي الأبعاد.

ولكي نفهم القوى الكامنة وراء تركيب الجزيئات ثلاثية الأبعاد، نحتاج إلى أن نرجع إلى الوراء لتشبيهٍ استخدمناه من قبل؛ قلنا إن نواة الذرة، لكونها مؤلَّفة من بروتونات ونيترونات، فإن كتلتها تُعادل كتلة الإلكترونات المحيطةِ بها آلاف المرات، وقد تابعنا القول بأن الإلكترونات تُشبه البرغوث الذي يقف على الفيل، لكن مع أن البراغيث صغيرة جدًّا فإنها تُؤثر بالطبع على سلوك الفيل. ويُعتبَر التركيب ثلاثي الأبعاد للجزيء أحد الأماكن التي فيها تشعر بهذا التأثير، ويرجع التركيب ثلاثي الأبعاد للبلورات إلى حقيقة واحدة أساسية، ألا وهي: أن الإلكترونات تميل إلى أن تُوجَد في أزواج، وهي تزاوج أحادي على نحوٍ صارم، وما إن تتزاوج الإلكترونات حتى تحتفظ بمسافة لائقة بينها وبين الأزواج الأخرى، ويُسمَّى هذا بلغة الكيميائيين «تنافر أزواج الإلكترونات». ولكي ترى كيف يحدث هذا في الجزيئات، تأمل معي الماء.

كما قد تتذكر من مناقشتنا حول القوى البينجزيئية، يأخذ جزيء الماء شكل حرف V الذي يقع الأوكسجين فيه عند مركز حرف V والهيدروجين عند كل طرف، ولم نُناقش في ذلك الحين لماذا يأخذ الماء هذا الشكل، لكننا نستطيع أن نتناول هذا الأمر الآن. كما يتبين من الجدول الدوري، المُبيَّن في شكل ١٢-١، يملك الأوكسجين ثمانية إلكترونات حول نواته، لكنَّ اثنَين منها يُوجَدان في الطبقة الأولى القريبة منه، ويُوجَد في الطبقة الخارجية ستة إلكترونات، وهي إلكترونات التكافؤ، التي تُؤثر فعليًّا في السلوك الكيميائي للذرة، وكما قد نتذكر أن الأوكسجين يكون في حالة السعادة عندما يكتسب إلكترونَين آخرَين ليملأ غلافه الخارجي، ويملك الهيدروجين إلكترونًا واحدًا ويسعى نحو الحصول على إلكترون آخر ليملأ غلافه الأول، كما يُمكن أن يتحدد عن طريق الرجوع إلى الجدول الدوري الموضح في شكل ١٢-١ مرةً أخرى.

| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ١٢-١: يحتاج الهيدروجين القائم في بداية الصف الأول إلى إلكترون آخر ليملأ غلافه، ويحتاج الأوكسجين الواقع بعد اثنَين من نهاية الصف الثاني إلى إلكترونَين ليكمل غلافه.

يستخدم الكيميائيون وسيلة بصرية تُسمَّى «أشكال لويس ذات النقطة» (نسبةً إلى الكيميائي الأمريكي جي إن لويس) لتوضيح الطريقة التي تُرتب بها الأنويةُ في الجزيئات نفسها بحيث يكون أكبر قدر ممكنٍ من الأنوية مُحاطًا بطبقات ممتلئة بالإلكترونات.[2] تبدأ هذه الوسيلة بوضع نقطة لكل إلكترون تكافؤ (لذا سُمِّي بتركيب لويس النقطي) حول رمز العناصر، يُمكِن تقديم الهيدروجين والأوكسجين على النحو الآتي:

$$H\cdot \quad \cdot\ddot{O}\cdot$$

في تركيب لويس النقطي هذا، يأخذ الهيدروجين نقطة واحدة لتُعبر عن إلكترونه الوحيد، ويأخذ الأوكسجين ست نقاط لتُعبر عن تكافُئِه بستة إلكترونات.

ويُسهل العرض بهذه الطريقة رؤية الكيفية التي تتحد بها ذرتا هيدروجين وذرة أوكسجين، فهما يشتركان في الإلكترونات؛ ومن ثَم تملك كل ذرة هيدروجين غلافًا ممتلئًا بإلكترونَين، ويملك الأوكسجين غلافًا ممتلئًا بثمانية إلكترونات.



إلا أن هذا الترتيب يظل لا يُشبه كثيرًا شكل حرف V. ولكي نُفسر كيف يأخذ الجزيء شكل حرف V، من الضروري إثارة تنافر زوجَين من الإلكترونات، وإثارة انشغالات طبقات التكافؤ أيضًا من خلال نظرية رئيسية تُناسب تمامًا ما نُريده، تُسمَّى نظرية «تنافر زوجَي الإلكترونات في طبقة التكافؤ». وفي هذه النظرية تُصنَّف الإلكترونات على أنها أزواج مترابطة بمعنى أنها إلكترونات تُوجَد في روابط، أو تُصنَّف على أنها أزواج وحيدة (أو أزواج غير مترابطة) بمعنى أنها أزواج إلكترونات لا تُوجَد في روابط، فعلى سبيل المثال، تُعتبَر الأزواج المترابطة، أزواج الإلكترونات المتشاركة بين الأوكسجين والهيدروجين في جزيء الماء الموضح سابقًا عن طريق تركيب لويس النقطي، أما الأزواج الوحيدة فهي تلك الأزواج التي تُوجَد على جانبَي ذرة الأوكسجين التي لا تدخل في عملية المشاركة.

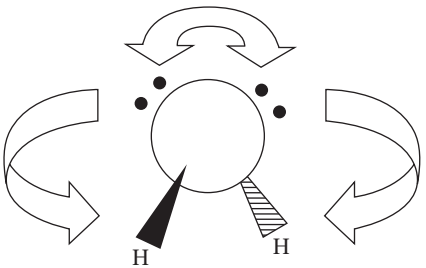
وهذه هي أنماطُ نظرية تنافر أزواج الإلكترونات في طبقات التكافؤ:

- أزواج وحيدة (أزواج غير مترابطة) يتنافر بعضُها مع بعض.
- أزواج وحيدة (أزواج غير مترابطة) تتنافر مع الأزواج المترابطة، وهي أقلُّ تنافرًا من السابقة.
- تنافر الأزواج المترابطة مع الأزواج المترابطة، وهي أقل تنافرًا من السابقة أيضًا.

ويُمكِننا فهمُ هذه المبادئ من تحليل شكل جزيء الماء كالآتي:

ترغب جميع أزواج الإلكترونات، سواءٌ تلك التي تُوجَد في روابط أو الوحيدة، في أن يتباعد بعضُها عن بعض بقدر المستطاع، إلا أن الزوجَين الوحيدَين الموجودَين في الأوكسجين يرغبان في ذلك بأقصى درجة؛ لذا تتباعد الأزواج الوحيدة، وتُجبر بهذا الصنيع أزواج الهيدروجين المترابطة على أن يقترب بعضها من بعض كما هو موضَّح في شكل ١٢-٢.

إلا أن شكل ١٢-٢ لا يزال لا يعرض سوى بُعدَين حيث إننا اضطُررنا أن نرسمه على ورقة ثنائية البعد. ولكي نُصور الموقف في شكل ثلاثي الأبعاد، جرب استخدام




شكل ١٢-٢: الإلكترونات في الأزواج الوحيدة يتنافر بعضها عن بعض أكثرَ من تنافر الإلكترونات في الأزواج المترابطة؛ ومِن ثَم تنبسط الأزواج الوحيدة وتتقارب أزواج الهيدروجين معًا، مما يجعل الماء يأخذ شكل حرف V.

البالونات: اختر بالوناتٍ لها الشكل والحجم نفسُهما لكن بلونَين مختلفَين مثل الأحمر والأخضر. انفخ بالونتَين من البالونات الحمراء وبالونتَين من البالونات الخضراء حتى يصلا إلى الحجم نفسِه، ثم اربط أطرافها كلها معًا (سيسهل عليك عمل ذلك إذا لم تنفخ البالونات على نحوٍ زائد). ينبغي أن ينتهيَ الحال بشكل عنقودي ثلاثي الأبعاد، بحيث تخرج البالونات عنوة في أربعة اتجاهات مختلفة، ويُسمَّى الشكل الذي قمت أنت بتصميمه ثلاثي الأبعاد «الشكل الرباعي الأوجه».

الآن انفخ أربعة بالونات أخرى (لكن اجعل كل البالونات الحمراء بالحجمِ نفسِه وأكبر من البالونات الخضراء). وعندما تربطها معًا مثل المرة الأولى تحصل على الشكل الأكثر تمثيلًا لجزيء الماء: فالبالونات الأكبر حجمًا سوف تُقصي نفسها بعيدًا بأقصى درجة عن الأخرى وتعصر البالونات الأصغر معًا. والشكل ثلاثي الأبعاد للجزيئات كما هو محدَّد من نظرية «تنافر زوج الإلكترونات في طبقة التكافؤ»، والمقايضة بين الانجذابات الأيونية والروابط التساهمية وقوى الجذب البينجزيئية، كلها تُفسِّر مجتمعةً التركيبَ ثلاثي الأبعاد للبلورات.

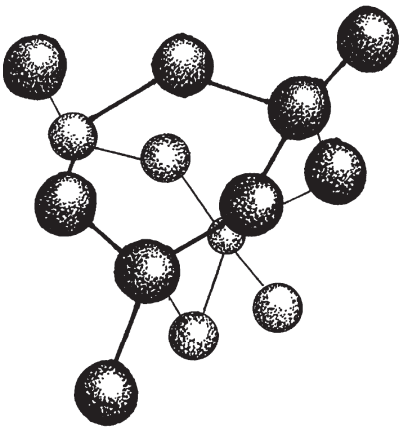
وتُعتبَر بعض البلورات أيونية، بمعنى أن الشبكات الأيونية الطويلة تتماسك معًا بانجذابات أيونية. ويُعتبَر كلوريد الصوديوم أو ملح الطعام ملحًا أيونيًّا. وفي بلورات كلوريد الصوديوم، يُحاط أيون الصوديوم بستة أيونات كلور — أيون من أعلى وأيون من

أسفل وأيون في كل اتجاه من اتجاهات البوصلة — ويُحاط كلُّ أيون كلور بستة أيونات صوديوم بالطريقة نفسِها. ومن ناحية أخرى، تتماسك بلورات السكر معًا عن طريق قوى الجذب البينجزيئية. وهي تنسجم بعضها مع بعض لتحقيق الدرجة القصوى من التوازن بين قوى التجاذب والتنافر، مما يُفضي إلى تركيب من البلورات منظَّمٍ إلى حد ما. والفلزات النقية هي مجموعات كبيرة من الذرات المتطابقة؛ ومِن ثَم لا يُمكن أن يشوب الترابطَ بين أي زوج أيُّ اختلاف عن الترابط بين الزوج الذي يليه. وعليه، يستحيل أن نقول إن إلكترونات الترابط الخارجية تنتمي إلى أية ذرة بعينها، وينعكس هذا الاستقلال على التوصيل الكهربي الرائع للفلزات، فعند توصيلها بأي مصدر كهربائي مثل بطارية، فإن الإلكترونات تنتقل بحرية من إحدى الذرات إلى الأخرى في تيار.

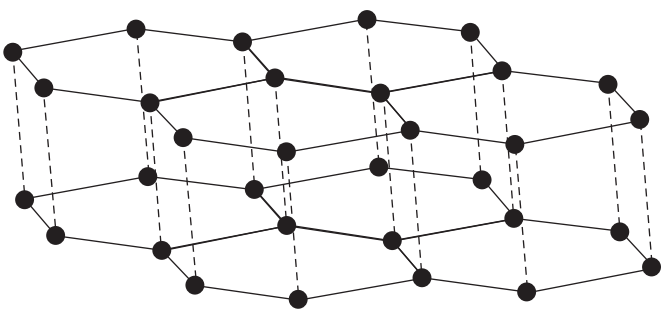
وتُشكِّل المواد الصلبة التي ترتبط بروابط تساهمية مثل الكوارتز والماس والجرافيت، فئةً أخرى من البلورات، والكوارتز هو سلسلة متواصلة من ثاني أكسيد السليكون المرتبط في ترتيب بلوري منتظم، والرمل هو خليط من الكوارتز والصخور الأخرى. والزجاج هو كوارتز صلب كُبِي بمادة معدنية وأُعيدَ تقسيتُه، لكن دون أن يأخذ الشكلَ البلَّوري المنتظمَ نفسَه قبل عملية الإذابة، بنفس الطريقة التي تحدث مع الزبدة عند إذابتها حيث تأخذ شكلها نفسَه قبل الذوبان بعد أن تبرد وتتجمد مرة أخرى، ومن المعروف أن الزجاج يتكون بشكل طبيعي عندما يضرب البرق الرمال.

والماس هو شبكة من ذرات الكربون، فكلُّ جزء من الكربون يرتبط بالجزء الذي يليه برابطة تساهمية في ترتيب رباعي الأسطح، كما هو موضَّح في شكل ١٢-٣. أما الجرافيت الصلب الذي ينتمي إلى نفس عائلة الماس فهو مصنوع أيضًا من الكربون النقي، لكن في حالة الجرافيت يرتبط الكربون في ألواح تنزلق بعضها فوق بعض، كما هو موضح في شكل ١٢-٤. لكن الفرق بين الماس والجرافيت في الخصائص وفي السعر يُعتبَر كبيرًا بشكل مذهل، يُعبِّر الجرافيت فعليًّا عن الشكل الأكثر ثباتًا للكربون الصلب، كما سنُناقش بعد قليل، إلا أن الفترة الزمنية المطلوبة لحدوث عملية التحويل هي فترة ممتدة امتدادَ عمر كوكب الأرض تقريبًا.

وثمة نوعٌ جيد من الخلط بين الجزيئات التي ترتبط برابطة أيونية والجزيئات التي ترتبط برابطة تساهمية يُمكن أن نجده في أملاح الأيونات المتعددة الذرات. والأيونات المتعددة الذرات هي مجموعات مشحونة تحتوي على العديد من الأنواع المختلفة من الأنوية الذرية مثل $CO_3^{2-}$، وهو أيون أصبح مألوفًا لدينا من بعد تَجارِب بيكربونات الصودا.



شكل ١٢-٣: الماس هو شبكة من ذرات الكربون المرتبطة تساهميًّا في تركيب رباعيِّ الأسطح لكل ذرة كربون.



شكل ١٢-٤: الجرافيت هو كربون مرتبط تساهميًّا في شكل ألواح سداسية.

وبيكربونات الصودا هي بيكربونات الصوديوم وصيغتها الكيميائية هي $NaHCO_3$. وثمة أيون متعدد الذرات آخَرُ قد تعاملنا معه، لكن ليس بشكل صريح؛ هو أيون الكبريتات $SO_4^{2-}$. وكما ذكرنا من قبل، الرقم الذي يُكتَب أعلى الرمز ٢−، الذي يُقرأ «سالب اثنَين»،

يُشير إلى أن الأيون له شحنتان سالبتان. ويتكوَّن ملح كبريتات النحاس — المركب الذي يُعطي لون المحلول الأزرق الجميل الذي استخدمناه في تَجارِب عديدة — من أيون النحاس وأيون الكبريتات. ويُعتبَر نوع الرابطة التي تُوجَد في كلٍّ من أيونات الكربونات والكبريتات رابطة تساهمية، أما التي تُوجَد بين الأيونات الموجبة (سواء الصوديوم أو النحاس) والأيون متعدد الذرات فهي رابطة أيونية. وقد استُخْدِمَت هذه الأملاح البلورية للأيونات المتعددة الذرات في منتصف القرن التاسع عشر للإجابة عن التساؤل القائم منذ زمن بعيد وهو: كيف يُمكن قياس وزن الذرة؟

من الواضح أن السؤال غايةٌ في الصعوبة، لكن لطالما كان سؤالًا غايةً في الأهمية أيضًا، وتنبع أهمية هذا السؤال من حقيقة أن الذرات تتفاعل بمعدل ذرةٍ واحدة إلى ذرة واحدة، فإذا أردت أن تُفسر أفعالها فأنت على مقربة من أن تحسب وزنها، لكنها غايةٌ في الصغر حتى إنك لن تستطيع. كل ما يُمكنك فعله هو أن تقيس مجموعة كبيرة من الذرات معًا مثل ملء ملعقة كبيرة أو ملء كوب، ثم احسب كم عدد الذرات الموجودة في ملء الملعقة أو ملء الكوب، لكن لكي يتسنَّى لك معرفة عدد الذرات التي في الملعقة أو في الكوب، يجب عليك أن تعرف كتلة إحدى الذرات. بدأ العلماء يعملون بالطريقة المطلوبة في هذا الأمر عندما أدركوا أن ثمة معادنَ مختلفة تُكوِّن أملاح الكبريتات وأن جميعها تتبلور بنفس الطريقة تقريبًا. وكيف يُمكن أن يُفيد هذا في موضوعنا؟ إن هذا الأمر يرتبط بالكثافة.

والكثافة كما قد ذكرنا من قبل، هي مقدار كتلة المادة لكل وحدة من الحجم، وتتنوع الكثافة من مادة إلى أخرى؛ فعلى سبيل المثال، تختلف كثافة حقيبة مملوءة بالريش بشكلٍ ملحوظٍ عن كثافة الحقيبة ذاتها عندما تكون مملوءةً بالطوب. ومن إحدى ميزات الكثافة التي تجعلها مفيدة للغاية أنها لا تحتاج إلى كمية معينة كي يتسنَّى لك قياسها، فكثافة الطوب لا تتغير إذا نظرت إلى قالب طوب واحد أو إلى حائط طوب بأكمله، وكثافة ملء ملعقة من ملح الطعام هي نفس كثافة ملء كوب من ملح الطعام؛ لأن الكثافة لا تعتمد على حجم عينة المادة، ولقياس الكثافة لا تحتاج سوى قياس كتلة حجم معين.

أما بلورات الكبريتات، فلقد افتُرِض أن كل قالب من البلورات يحتوي على العدد نفسِه من وحدات الكبريتات، ووحدات المعدن؛ سواءٌ كان المعدن نُحاسًا أو مغنسيوم أو غير ذلك؛ ومن ثَم ينبغي أن يكون أي اختلاف في الكثافة يرجع إلى اختلاف في كتلة المعدن، وعند تحديد كتلة أحد هذه المعادن يُمكننا أن نُحدد الأوزان النسبية للعناصر الأخرى. ولقد كانت هذه الفكرة ملائمة ومفيدة في الوقت الذي استُنبِطت فيه، لكنها تطورت منذ

ذلك الحين، فاليوم تُستخدَم أشعة X لتحديد ترتيب الذرات وعددها في الحجم المعين من البلورات، وتكون النتائج التي نحصل عليها أكثر دقة.

إلا أن تِقنية أشعةِ X المستخدمةَ مع البلورات لا تكون هي نفسها المستخدَمة في مجال الطب البشري أو في مجال طب الأسنان؛ ففي حالة الطب البشري أو طب الأسنان، يُسمَح لأشعة X أن تتخلَّل الجسم وتكون الصورة الناتجة هي صورة لظل الغشاء الكثيف — أو العظام أو الأسنان — التي لا تتمكَّن أشعة X من اختراقها. وتبحث دراسات أشعة X المعنيَّة بالبلَّورات (تُسمَّى علم البلورات) في أشعة X المنعكسة بدلًا من أشعة X النافذة، وتحلل الأنماط في الأشعة المنعكسة.

وتعكس إلى حدٍّ ما البلورات أشعة X مثلما تعكس الأقراص المضغوطة الضوء المرئي، وينعكس هذا الضوء المرئي على المحزوزات الموجودة على القرص المضغوط بنفس الطريقة التي يتشتت بها الضوء إلى ألوان كثيرة معطيًا شكل قوس قزح على القرص. وتتصرف الطبقات المتعددة على البلورات ثلاثية الأبعاد بطريقةٍ ما مثل شكل المحزوزات الصغيرة جدًّا الموجودة على القرص المضغوط، وتنعكس أشعة X على تركيبات البلورات البالغة الصغر، وتكون نمطًا على فيلم أشعة X. وبرؤية التفاصيل الدقيقة للشكل يُمكننا أن نُدرك حجم وحدة واحدة من البلورات وتركيبها، ونستخلص موقع الأجزاء — الذرات أو الأيونات أو الجزيئات — التي تُشكِّل البلورة من هذه المعلومات. وبمجرد معرفة حجم أصغر وحدة من البلورات وعدد الذرات التي تحتويه، يُمكننا أن نُحدد كتلة الجزء الواحد أو الذرة الواحدة أو الجزيء الواحد عن طريق الكثافة.

وبالطبع، ليس كل ما يلمع ذهبًا، وليس كل ما هو صلب بِلَّورًا. ويُشار عامة إلى المواد الصلبة التي ليست بِلورية إلى أنها غير متبلورة (أي لا شكل لها). وتتضمَّن هذه الموادُّ الصلبة المطاطَ والبلاستيك والشمع والزجاج، مع بعض الجدل حول التحديد الفعلي لسِمات هذه الفئة. ويُعتبَر المسمَّى «موادُّ صلبة غير متبلورة» محاولةً بشرية لتصنيف طبيعة المواد غير الطيِّعة، وتتميز المواد الصلبة غير المتبلورة عن المواد الصلبة البلورية بأن الأولى ليست لديها نقطةُ ذوبانٍ واضحةٌ مميزة، في حين تحظى الثانية بنقطة ذوبان محددةٍ تمامًا إذا كانت نقية، وعليه يُعتبَر حدوث عملية الذوبان عند النقطة المحددة الدقيقة مؤشرًا على نقاوة المادة.

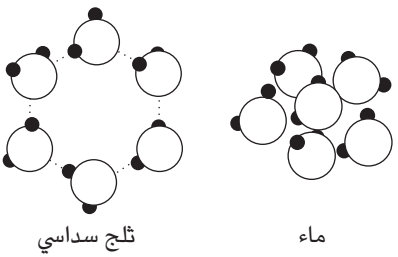
ويُعتبَر الماء أشدَّ المواد الصلبة إثارةً لسببَين؛ أولهما أنه يُعتبَر إحدى المواد الصلبة القليلة التي تتمدَّد عندما تتجمد، بدلًا من أن تنكمش، ويُعلل هذا التمددُ سببَ طفو الثلج

على سطح مشروباتنا، فالماء الصُّلب المتمدد أقلُّ كثافة من الماء السائل؛ فهو يملك عددًا أقلَّ من الجزيئات لكل وحدة من الحجم، وسبب هذا التمددِ هو الرابطة الهيدروجينية، فعندما يتجمد الماء، يصل إلى ذروة متعته عندما يصطفُّ الأوكسجين مع جيرانه من الهيدروجين، مثل ألعاب تينكر تويز التركيبية التي تُركَّب بعضها في بعض، والتينكر تويز هي مجموعة من العصي المصنوعة من الخشب التي تُجمَع معًا عن طريق توصيلات وتُكوِّن أشكالًا عديدة (والطواحين الهوائية والمنازل هي أمثلة عامة ومُفضَّلة) فهي تُوضَع كقِطَع منفصلة في صندوق، ولا تأخذ مكانًا كبيرًا داخل هذا الصندوق، لكن عند تركيبها وتجميعها في تركيب صارم، فإنها تأخذ الكثير من الفراغ. ولأن جُزيء الماء يأخذ شكل حرف V، وبسبب حاجته إلى أن يصطفَّ في الرابطة الهيدروجينية القصوى، فإن الماء يتصلب شاغلًا فجواتٍ كبيرةً تُملَأ طبيعيًّا في الحالة السائلة التي تتسم بحرية الحركة (انظر شكل ١٢-٥).

يتمدد الماء عندما يتجمَّد بسبب الفجوات، ويُسبب تمددُ الماء عند تجمده تحطيمَ الأرصفة في فصل الشتاء، وهو ما يُعَد جزءًا من خطة الطبيعة لتفتيت الصخور إلى تربة. ويكون الماء مخادعًا إلى درجة أنه يستطيع أن يستوفيَ احتياجات الرابطة الهيدروجينية بأشكال بلورية مختلفة عديدة، وأحد أشهر هذه الأشكال هو التركيب السداسي الذي يُعطي القشرة الثلجية تَماثُلَ الأضلاع الستة.

وتتكون القشرة الثلجية عندما تضرب جزيئاتُ ماءٍ سطحَ البلورات الصغيرة، التي تنمو إلى تركيب سداسي الأذرع؛ حيث إن الجزيئات التي تضرب أطراف البلورة تُفضل أن تلتصق بها، فتبرز الحافة إلى الخارج وتجعل الجزيئات الطليقة تعلق بها بالطريقةِ نفسِها التي يعلق بها الركام المتطاير في غُصن ناتئٍ نحو نبع مياه.

وتُعتبَر الأسطح كائناتٍ مختلفةً عن الأجسام التي تحوي هذه الأسطح، فعلى سبيل المثال، تتخذ قطرة الماء نفسها شكل كرة؛ وذلك لأن جزيئات الماء الموجودة بداخل قطرة الماء تحظى بجميع فرصها في تكوين رابطة هيدروجينية، وتكون في حالةِ امتلاء، في حين أن جزيئات الماء التي تُوجَد على السطح تملك بعض الأطراف الهيدروجينية غير المتلئة؛ حيث ينقصها الرفيقُ الأوكسجيني من الجزيء المتاخِم، والعكس صحيح. ويُحدِث هذا الموقف توترًا يُسمَّى «التوتر السطحي»، ويكون ردُّ فعل النظام الطبيعي لتقليل هذا التوتر هو أن تتخذ القطرة نفسها شكل كرة، ويعمل شكل الكرة على تقليل مساحة السطح إلى أقصى درجة، وبذلك يُقلل عدد الجزيئات المعرضة للهواء، ومن ثَم للتوتر السطحي.




شكل ١٢-٥: الثلج السداسي هو الأساس الذي يُبنى عليه تكوين القشرة الثلجية.

لا تملك الموادُّ الصلبة القدرةَ على أن تلف نفسها في شكل كرة؛ ومِن ثَم لا يُعبَّر دائمًا عن الموقف المتفرد لأسطح المواد على نحوٍ دراماتيكي، لكن مع ذلك تختلف أسطح المواد الصلبة أيضًا عن جسم المادة، ولها تفاعلٌ خاص أيضًا.

وأكثر الأمور الشائعة التي تُهِمنا فيما يتعلق بالأسطح التي نتعرض لها في حياتنا اليومية هو جعل الأشياء تلتصق بالأسطح عندما تريد ذلك، وجعل أشياء لا تلتصق بالسطح عندما لا تريد ذلك، وغالبًا تُستخدَم المواد اللاصقة أو الغِراء لجعل المواد تلتصق بالأسطح، ولولا هذه الموادُّ الرائعة لما حَظِينا ببعض الأشياء الضرورية بكل هذا التنوع، مثل الخشب الرقائقي (خشب مصنوع من طبقات رقيقة مُغرَّاة) أو لما استطعنا لصق الكتب والمذكرات، ولا كان لدينا الكيمياء القديمة قِدمَ الزمن. يُصنَع الغِراء في الأصل من بروتين الحيوانات، مما يعني أنهم كانوا فعلًا يُرسلون الأحصنة الكبيرة في السن إلى مصانع الغراء. وثمة ارتباط بين كلمة غراء وكلمة الجلوتين، وهي مادة لزجة تُستخرَج من القمح والدقيق يُصنَع منها عجينة لزجة كافية لتشكيل كرات، وعضلات الألوية وهي كرات عضلية تُشكِّل الأرداف التي نجلس عليها. وقد ترجع قدرة نوع معين من الغِراء على اللصق إلى الرابطة الكيميائية أو قوى الجذب البينجزيئية، أو كِلَيهما معًا. ويعمل بعض الغراء أفضل من الآخر بِناءً على أصل المادة — هل هي مادة حيوانية أو معدنية أو نباتية — حيث إنه يُستغَل نوع الرابطة أو الانجذاب، ويُرغَب أحيانًا في إلغاء تأثير الغراء أو إزالة الغراء، وفي هذه الحالة من الجيد أن نستخدم مادة تُقحِم نفسها بين الغراء والمادة المُلصقة بها لكسر روابط السطح، وغالبًا تُفيد الزيوت، مثل زيت الطعام، في

مثل هذا الأمر، يُستخدَم الزيت لإزالة العلكة من معظم الأسطح؛ وذلك لأن الزيت يُمكنه أن يُكوِّن غشاءً على الأسطح، وفي الواقع يُغير الزيت خصائص روابط السطح، ويُصنَّف الزيت من ضمن مجموعة من المواد تُسمَّى «مخفضات التوتر السطحي»؛ وذلك بسبب تفاعلات السطح هذه التي يقوم بها الزيت.

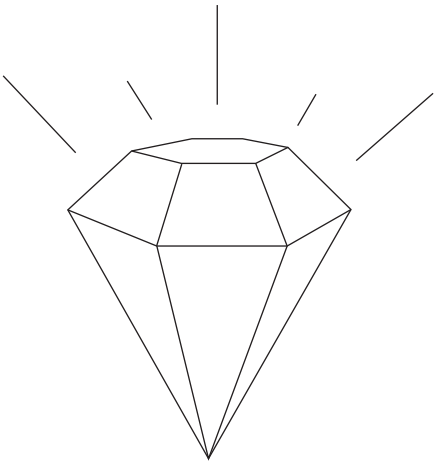
ومن أشهَر هذه المواد الصابون؛ فهو يحتوي على سلسلة طويلة من الكربون تنجذب إلى المواد العضوية مثل القاذورات والدهون والأطراف الأيونية التي تنجذب إلى الماء. فالصابون يُمكنه أن يتدخل في انجذاب السطح، كما يُفيد في إزالة الأشياء اللاصقة مثل الأشياء العالقة على خاتم الزواج أو السدادات اللاصقة في الزجاجات. تُعَد مواد التشحيم أيضًا المستخدَمة لتشحيم الماكينات من المواد الخافضة للتوتر السطحي؛ لأن موادَّ التشحيم تتدخل في الانجذاب الحادث بين الأجزاء المعدنية العارية.

وتطرح الأسطح المسامية مشكلة مختلفة؛ لأن مساحة السطح الفعليةَ، بما فيها الجزء الداخلي من المسام، تكون ضِعفَ مساحة السطح الظاهرة عدة مرات. وعليه يُعتبَر السطح المساميُّ أصعبَ كثيرًا في تنظيفه، وقد يُقاوم المحاولات المضنية التي تبذلها المنظفات لتنظيفه، وهذا العناد الذي تتسم به الأسطح المسامية هو الذي يجعل المواد الطبيعية، مثل الخشب والعظم والأسنان، ميالة إلى أن تجذب البقع إليها، وتتضمَّن الطرق الحديثة لإزالة البقع من الأسنان استخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي؛ كي تحتفظ بمادة مطهرة لطيفة لحماية الأسنان. ولأن كلًّا من العظام والأسنان والعاج تتشابهُ في تركيبها، فتُستخدَم نفس المنتجات المبيضة للأسنان في تنظيف مفاتيح البيانو القديمة المصنوعة من العاج الطبيعي المبقعة (وغير القابلة للاستبدال).

وتُعلل الخصائص المميزة للسطح أيضًا أداءَ العوامل الحفازة الصلبة، فغالبًا يعتمد أداء العامل الحفاز على قدرته في أن يُوجِّه الجزيئات في الاتجاه الذي سيُسهل التفاعل، أما العوامل الفعالة في الحالة الصلبة أو السائلة فتكون الإصابة في الاتجاه الصحيح هي مسألة حظ، فإذا جرى توجيهُ الجزيء، الذي نهدف إلى توجيهه، في الاتجاه الذي نصبو إليه على السطح، فإن فرص حدوث مواجهة فعالة تتزايد.

والركيزة في حالتها الصلبة هي نوعٌ من العوامل الحفازة التي تسمح للكثير من التفاعلات أو طبقات الناتج بالنمو على سطحها، وقد ذكَرنا في مناقشتنا للحالة الغازية أنه يُمكن استخدام الركيزة في إنماء المواد العضوية الطويلة السلسلة للشمع والزيت. تستخدم الركيزة أيضًا في إنماء المنتجات البلورية مثل الماس.

**على سبيل المثال: يبقى الماس للأبد (تقريبًا)**



استُخدِمَت العديد من المواد على مدى عصور من المحار إلى تلك الأنواع التي استُخدِمت كوسيلة للتبادل، إلا أن أكثر المواد الشائعة هي تلك المواد القابلة للتحمل التي يتوقف غلوُّ قيمتها على مدى نُدرتها، وكذلك مدى الانتفاع بها، ويُعتبَر الذهب خير مثال على ذلك، وكذلك الأحجار الكريمة، ولا سيما الماس، وقد أسهمت قدرة الذهب على التحمل ومقاومته للصدأ في نفعه في الاستخدامات مثل استخدامه في عمل الأسنان وفي الوصلات الكهربية، وبالمثل، أسهمت قوة تحمل الماس في الانتفاع بهذا المعدن الخاص في قطع الأدوات، مثل مِثْقاب الحفَّار والسكَّاجات.

وأفضى الطلب المتزايد على الذهب في أوروبا في العصور الوسطى، إلى محاولات فُضولية ومبدعة عديدة لتصنيعه من معادن أكثر توفُّرًا مثل الرَّصاص والنُّحاس، وكما ذكرنا من قبل فإن هذه الصناعة التي تُسمَّى الخيمياء لم تنجح، إلا أنها عزَّزَت الكثير من المعرفة الجديدة الكافية عن التفاعلات الكيميائية حتى يتسنَّى لها الصمود كمرحلة هامة في تاريخ الكيمياء، وثمة طريقة وحيدة لتخليق الذهب صناعيًّا عن طريق تفاعل نووي، إلا أن تكلفة هذه العملية تُعتبَر أضعافَ أضعافِ ثمن الذهب الذي تُنتجه، إلا أن ثمة طرقًا عديدة لإنتاج الماس المُخلَّق المُجدي اقتصاديًّا منذ منتصف القرن العشرين.

تتضمن إحدى الطرق إزالة الهيدروجين من الميثان ($CH_4$، غاز المستنقعات) استخدام الموجات الميكروية المستحثة، في الحالة الغازية الخفيفة للغاية؛ لذا يتسنَّى لذرات الكربون المعرَّاة من معظم الهيدروجين، أن تترسب على المادة الأساسية، وتبدأ في بناء بلورات الماس، وكان الماس المتكون بهذه العملية في الماضي غايةً في الصغر ولا يصلح إلا للاستخدامات الصناعية، لكن ازدادت جودة الأحجار الكريمة في الآونة الأخيرة. وعمليًّا، لا يُمكن تمييز الماس الصناعي عن الماس الطبيعي؛ لأن كِلَيهما شكل بلوري من الكربون.

تصنيع الماس — بدلًا من استخراجه من المناجم — هل سيُبهت بريقه في عيون محبيه؟ على الأرجح، سيُقلل هذا من بريقه بعض الشيء! لكننا نَأمُل يومًا ما أنه يُمكن أن تُصنَع الموادُّ أشباه الموصلات ذات الخصائص الهامة على نفس الوتيرة من الماس المُخلَّق الأقلِّ ثمنًا والأكثرِ نقاوة، وإذا وُجدت فائدة للماس في أدوات أشباه الموصلات، فإن هذا سيُعطي معنًى جديدًا تمامًا لرقائق الماس.

ويُعزى الاهتمام بالماس، سواءٌ كان طبيعيًّا أو صناعيًّا، إلى خصائصه المتفردة، التي مِن بينها متانتُه، لكن هل الماس غير قابل للتلف؟ ليس تمامًا، فكما ذكرنا في مناقشتنا حول برهان لافوازيه لبقاء الكتلة، أن الماس يحترق في وجود الأوكسجين عند تسخينه بما يكفي، وكما سنرى لاحقًا، أنه في العلوم كما في المواقف الاجتماعية ثمة أشياءُ غريبة تحدث عندما تتفاقم الأمور.

# تجربة ١٣: الكمادات الساخنة والباردة

حقول الطبيعة تأخذ وقتًا طويلًا في إعدادها وحرثها — وهي تُشير إلى الكيمياء الدورية الساكنة؛ فالأطوار الزمنية الثابتة والبطيئة تتهادى خطواتها — والأسطح الخالية تنضج والمعادن النفيسة تتكون تحتها.

والت وايتمان في كتابه
«أوراق العشب»، ١٩٠٠

يخوض حامض الستريك العديد من التفاعلات الكيميائية والكيميائية الحيوية، كما يتمتع بخاصية ذات نفع خاص لنا، فعندما يذوب حامض الستريك في الماء فإن المحلول

يبرد. يتطلب حامض الستريك طاقة حرارية كي يذوب، وهو يسحب هذه الطاقة من البيئة المحيطة به، ويُطلَق على العملية التي تتطلب طاقة حرارية لحدوثها «عملية ماصة للحرارة».

ولكي نُبيِّن هذا الأثر، ارتدِ نظارة الأمان الواقية ثم خذ علبة بلاستيكية لحفظ الشطائر، وضَعْ فيها نحو ملء ملعقتَين صغيرتَين (١٠ ملیلترات) من حامض الستريك المقترح شراؤه في «قائمة المشتريات والمحاليل»، ثم ضع ملعقة كبيرة (١٥ ملیلترًا) من الماء في العلبة وأحكِم غلقها. عند لمس العلبة ستشعر ببرودتها بسبب ذوبان حامض الستريك، وهذا الأثر يُمكن ملاحظته عند بداية الذوبان، وكي يتسنى لك إجراء مقارنة جيدة، خذ علبة أخرى ولا تضع بها إلا ملء ملعقة كبيرة من الماء، فإنك ستجد أن العلبة التي تحوي حامض الستريك أكثر برودة بوضوح من العلبة التي بها ماء فقط. وإذا وجدت صعوبة في الحصول على حامض الستريك، حاول أن تستخدم بيكربونات الصودا، لن تكون البرودة عالية جدًّا، لكن يُمكن ملاحظتها. يُستخدَم حامض الستريك في بعض مخاليط المشروبات الذاتية التبريد المستحدثة.

ثمة عمليات عديدة أيضًا تنطلق فيها الطاقة الحرارية، تتضمن إحدى هذه التفاعلات ذوبان اللي في الماء. عليك توخي الحذر نظرًا لأن هذه العمليات تُطلق قدرًا كبيرًا من الحرارة؛ لذا ينبغي أن تستخدم كمًّا كبيرًا من الماء مع القليل فقط من بلورات اللي. تأكد أيضًا من ارتداء نظارة الأمان الواقية. املأ كوبًا كبيرًا سعته سعة كوبَين (٤٨٠ ملیلترًا) بكوب واحد (٢٤٠ ملیلترًا) ماء. لا تستخدم علبة الشطائر في هذه العملية حيث يُصاحبها انطلاق حرارة تتسبب، كما ذكرنا من قبل في مناقشتنا عن الحالة الغازية، في احتجاز الهواء في العلبة ما يُؤدِّي إلى تمدُّده. إذا حدث التفاعل في علبة مغلقة، فإن تراكمَ ضغط الهواء يسبب حدوث خرق في العلبة.

ضع برفق نحو نصف ملعقة بلاستيكية من بلورات اللي في كوب الماء، ثم قلِّب برفق، ستجد أن كمية الطاقة الحرارية المنتقلة إلى الكوب بسبب هذه العملية تُسبب دفءَ الكوب، وهو ما نشعر به عند لمس الكوب من الخارج. مرة أخرى، يكون التأثير في أقوى حالاته في بداية العملية، يُطلَق على العملية التي تُولد طاقة حرارية «عملية طاردة للحرارة».

وتُباع الكمادات الساخنة والباردة في العديد من متاجر بيع اللوازم الرياضية والصيدليات لعلاج ألم العضلات والإصابات أثناء اللعب، ومع أنها تُصَنَّع عادة باستخدام أملاح مختلفة، إلا أن المبادئ الرئيسية التي تقوم عليها هي نفس تلك المستخدمة في التجربة السابقة.

الفصل الثالث عشر

# عندما تُسخَّن المواد

أنت تعي جيدًا أن المركبات الكيميائية موجودة ... تلك المركبات التي بمساعدتها يُمكنك الكتابة على ... ورق ... ومن ثَم لا تُصبح الأحرف مرئية إلا عندما تخضع لتأثير النار. فالعملة المغموسة في الماء الملكي والمخففة بأربعة أضعاف وزنها ماء، تُستخدَم أحيانًا، وتُنتج لونًا أخضر خفيفًا. والكتل المعدنية المُشكلة تحت الخبَث عند صهر الكوبالت، التي تذوب في كحول النترات تُعطي اللون الأحمر. وتختفي هذه الألوان على فترات زمنية متباعدة أو متقاربة بعدما تبرد المادة المكتوب عليها، إلا أنها تظهر مرة أخرى عند إعادة التسخين ... أنا أفحص

الآن الجمجمة بعناية. إن حوافها الخارجية — حواف الرسم الأقرب من حواف الورق — مميزة أكثر من غيرها. لقد كان واضحًا أن فعل السيل الحراري ناقص أو غير متكافئ.

إدجار آلان بو في قصته القصيرة
«الحشرة الذهبية»، ١٨٤٠

لقد كان جانب التدريس العملي الذي اطلع عليه فيما بعد بفضول كبير للغاية، دورةً دراسية في الكيمياء التي تعلَّم منها عددًا من النظريات التي شوشت ذهنه مدى الحياة.

هنري آدمز في كتابه
«تعليم هنري آدمز»، ١٩٢٠

لقد استعنَّا باقتباس من كتاب إدجار آلان بو؛ لأنه يُشير إلى «السيل الحراري» وهو الاسم الذي كان يُطلَق على الحرارة عندما كان لا يزال يُعتقَد بأن الحرارة مادة، ويُلمِّح الاستشهاد أيضًا إلى «تأثير النار». وقد ألحقنا الاقتباس الثاني؛ لأن «الديناميكا الحرارية» التي تختص بفَهم واستخدام تأثير النيران، يشوبها سمعة سيئة بأنها تُشوش الأذهان، لكن فهمها حقًّا يستحق العناء؛ فالديناميكا الحرارية تتضمن نظريةً غاية في القوة تُمكن الكيميائيين من أن يتنبَّئوا هل سيحدث التفاعل الكيميائي، وإلى أي مدًى سيحدث، وكمية الطاقة المنطلقة أو المستهلكة أثناء حدوث التفاعل، كل هذا قبل خلط مواد التفاعل معًا؛ ذلك لأن بعض التفاعلات تُطلِق طاقة كافية لصهر المعادن؛ لذا من الجيد أن نعرف كمَّ الطاقة لنتوقع ذلك قبل بدء التجريب العملي. ثمة تفاعلات أخرى تبدو جيدة من الناحية النظرية، لكنها لا تتفاعل سوى بقدر محدود في المختبر. وجيدٌ أن نعرف هذه المعلومة أيضًا قبل الخوض في بحث عميق في مشروع ما.

وبسبب وجود قوة التنبُّؤ التي تمنحها الديناميكا الحرارية، تحظى نظرية الديناميكا الحرارية بمكانة بارزة في دراسة الكيمياء، ويُمكن تلخيصُ آلية الديناميكا الحرارية في ثلاثة مفاهيم: الطاقة، والأنتروبيا، والطاقة الحرة. وسوف نبدأ بالطاقة ونُكمل على ذلك.

يقوم فهمنا لطاقة الجزيئات على النموذج الجزيئي للمادة الذي يَفترض أن جميع المواد في حالة حركة مستمرة. يبدو للوهلة الأولى أنه لا يُمكن تصديقُ هذه الفكرة؛ ذلك

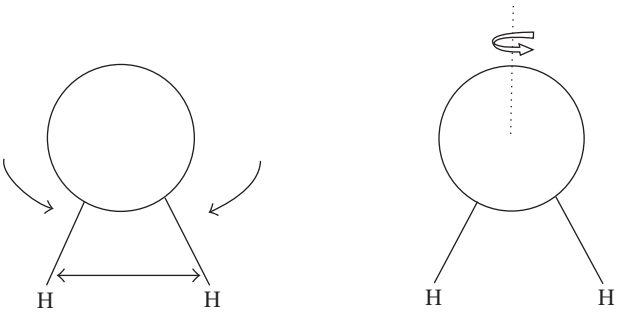
لأن ثمة ملاحظاتٍ عديدة في حياتنا اليومية تُخبرنا بأن بعض المواد هي موادُّ صلبة وثابتة وراسخة، فمن الصعب أن نُقرَّ أن رصيف الشارع المصنوع من الأسمنت، يكون على المستوى الجزيئي في حالة التواء مثل تلك التي تُصيب مجموعة من الديدان المتهيجة داخل علبة، لكنها تكون كذلك الفعل. يصلح نموذج الجزيئات التي تكون في حالة حركة جيدة لشرح لماذا تتصرف الغازات والسوائل بطريقتها هذه، ويسمح أيضًا للأسمنت بأن يسلك الطريقة التي يسلكها.

فعليًّا، لا يصلح النموذج إلا عندما نُقر بثلاثة أنماط مختلفة للحركة على الأقل، هذه الأنماط: هي الحركة الدورانية، والاهتزاز، والحركة الانتقالية. والحركة الانتقالية هي حركة خط مستقيم مثل السير في خط مستقيم بعرض الغرفة، والحركة الاهتزازية هي المقابل الجزيئي للتلويح بذراعَيك لأعلى ولأسفل. والحركة الدورانية هي المقابل الجزيئي للدوران السريع في المكان حول محور، ربما مثلما يفعل المتزلج على الجليد. ولا تُتاح كلٌّ من الحركة الاهتزازية والحركة الدورانية إلا للجزيئات، فهي غير متاحة للذرات؛ ذلك لأن الحركة الدورانية والاهتزازية تتعلق بمركزٍ تُحدده العناصر المترابطة.

فعلى سبيل المثال، يحوي الماءُ كلًّا من الحركة الدورانية والحركة الاهتزازية، ويُمثل أحدُ الأنماط الاهتزازية الحركةَ التي تُشبه حركة المقص التي تقوم بها ذرات الهيدروجين بعضها نحو بعض وبعيدًا عن بعضها البعض أيضًا، أما الحركة الدورانية فيُمثلها دوران الهيدروجين السريع حول محور خيالي من خلال الأوكسجين، ويُوضح شكل ١٣-١ نمطَي الحركة هذَين.

وترجع أهمية أنماط الحركة هذه إلى أن الطاقة المُضافة إلى مجموعة من الجزيئات تُوزِّع نفسها بين الأنماط المتعددة للحركة، ويُمكِن استخدام قنديل البحر كتشبيه لذلك. عند وغز قنديل البحر، فإن قنديل البحر لن يرتجف محدثًا حركة اهتزازية عنيفة فقط، بل إنه يدور في مكانه كأنه يدور حول محور أيضًا. وفي عينة معينة، يُسمَّى مجموع متوسط الطاقة المعبَّر عنها في كل نمط «الطاقة الداخلية». كل جزء ضئيل من المادة له مقدار من الطاقة الداخلية، حتى إذا كان غاية في البرودة. تذكر أن مقياس كلفن للحرارة يُحدد نقطة طاقة الصفر المطلَق، التي تُسمى «الصفر المطلق»، لكن هذه النقطة ما هي إلا مجرد حد نظري يستحيل الوصولُ إليه عمليًّا.

وتُعَد درجة الحرارة مقياسَ الطاقة الداخلية للشيء، إلا أن استخدام درجة الحرارة كمقياس للطاقة الداخلية يفترض أن الطاقة موزَّعة على نحو متساوٍ بين الأنماط المتعددة




شكل ١٣-١: جزيئات الماء تكون في حركة مستمرة؛ فالجزيئات تهتز وتدور وتتحرك في خطوط مستقيمة تُسمَّى بالحركة الانتقالية. يُوضِّح هنا نمط الحركة الدورانية والاهتزازية.

للحركة، ويُعَد هذا الافتراض غايةً في الضرورة؛ ذلك لأن درجة الحرارة هي بالفعل المقياس الوحيد لأحد أنماط الحركة، وهو نمط الحركة الانتقالية. يسجل الترمومتر الطاقة المنتقلة إليه من الجزيئات التي تضرب سطحه، وثمَّة مواقف لا تُوزَّع فيها الطاقة المضافة بالتساوي على كل أنماط الحركة. وفي هذه الحالات من الممكن أن تُضاف الطاقة دون إحداث تغيير في درجة الحرارة، ويُعتبَر غليان الماء مثالًا حيًّا على ذلك، حيث تُضاف الطاقة لكن الطاقة المضافة تتجه إلى تحرير الجزيئات من قوى التجاذب البينجزيئية؛ ومن ثَم يُمكنها أن تنتقل إلى الحالة الغازية، فنجد أن الترمومتر الذي يُوضَع في وعاء به ماء في درجة حرارة الغرفة يُسجل تغييرًا في درجة الحرارة؛ لأن الطاقة تُضاف من الموقد وحتى الوصول إلى نقطة الغليان، ثم تستمر الطاقة المضافة في غلي الماء، لكن تظل درجة الحرارة ثابتة عند ٢١٢ درجة فهرنهايت (١٠٠ درجة سيليزية).

وعندما تُوضَع مادتان في وضع اتصال حراري، تتدفق الحرارة من المادة ذات الطاقة الأعلى إلى المادة ذات الطاقة الأقل، حتى يصل الاثنان إلى نفس المستوى من الطاقة. وتدفُّق الطاقة هو ما يُطلَق عليه من الناحية الفنية مصطلح «حرارة»، مع أنه في أي حديث عرَضي يُمكِن أن يُستخدَم المصطلح على نحو أوسع، فعلى سبيل المثال، عندما نشعر بالبرد، نطلب من أحدهم أن يرفع درجة الحرارة، في حين أننا ينبغي أن نطلب منه أن يرفع درجة

الطاقة الحرارية؛ فالحرارة هي الطاقة التي يجري تبادلها، والتي تتدفق من إحدى المواد إلى الأخرى أو التي تنتقل إلى المادة عبر الأشعة مثل أشعة الموجات الميكروية القصيرة ومثل أشعة الشمس؛ ولهذا نحن لا نُخطئ القول عندما نقول إننا نشعر بالحرارة الآتية من الشمس أو نشعر بالحرارة عند لمس زجاجةٍ بها ماء ساخن؛ لأنها تُعتبَر طاقة منتقلة إلى بشرتنا.

يُعتبَر العمل أيضًا نوعًا من انتقال الطاقة، فعندما تعمل في نظام فإنك تُعطي هذا النظام الطاقة على حساب طاقتك أنت الخاصة، ويُمكِن أن يأخذ العمل عدة أشكال؛ يُمكنك الضغط على النظام (فيُمكن أن يُسبِّب نفخ إطار عجلة في ارتفاع درجة حرارتها)، ويُمكنك أن تبثَّ تيارًا كهربائيًّا عبر النظام (ينبغي تبريد أجهزة الحاسب الآلي حتى لا ترتفع درجات حرارتها)، ويُمكنك أيضًا أن تستخدم الكيمياء للقيام بالأعمال، بعض الأمثلة على استخدام الكيمياء في القيام بالأعمال هي حرق البنزين لتشغيل السيارة أو هضم المواد الكيميائية التي نُسمِّيها الطعام؛ حتى يتسنى لأجسامنا القيام بالأعمال كافَّة.

نحن نستخدم الكيمياء للقيام ببعض الأعمال أو نقل الطاقة، يا ترى، من أين تأتي الطاقة اللازمة للقيام بمثل هذه الأعمال؟ تأتي هذه الطاقة من كسر روابط كيميائية وبنائها.

يبدأ تَكوُّن الرابطة عندما تتحد ذرتان معًا، وإذا كانت الظروف مواتيةً لحدوث الترابط — الظروف التي تتضمَّن رغبة كل ذرة في المزيد من الإلكترونات أو القدرة على منح إلكترونات — تُعيد الإلكترونات ترتيب نفسها في مدارات جزيئية بدلًا من مدارات ذرية منفصلة، وعندما يحدث هذا تنخفض طاقة النظام. وتُعتبَر الأقطاب المغناطيسية خيرَ تشبيه لذلك، فإذا اقترب قطبان مغناطيسيان مختلفان بعضهما من بعض، فإن الأمر يتطلب قدرًا من الطاقة حتى يحول دون ارتباطهما معًا، في حين أنه يقلُّ القدر المطلوب من الطاقة حتى نترك لهما العِنان في الانجذاب بعضهما إلى بعض، هكذا يكون الأمر مع الذرات التي ترغب في الارتباط. تكون الطاقة أقلَّ عند ارتباطها بعضها ببعض.

يقلل الارتباط طاقة الذرتَين المرتبطتَين معًا، لكنه لا يمحوها تمامًا، ربما تنجذب كل نواةٍ إلى إلكترونات الذرة، في حين تتنافر النواتان معًا؛ لأن كل نواة تكون مشحونة بشحنة موجبة؛ ومن ثم يضعف تشبيه الأقطاب المختلفة في هذه النقطة، فقد تستقر النواتان في موقف ترابط، لكنهما يكونان في حالة توتر مستمر فيما بينهما. وعندما يظهر موقف أكثر ملاءمة، تنكسر الرابطة وتتكوَّن رابطة جديدة، وفي بعض الأحيان تنطلق الطاقة

الصافية، وفي أحيانٍ أخرى تنقص الطاقة الصافية، ويُطلَق على التفاعل الذي تنطلق فيه الطاقة «تفاعل طارد للحرارة»، ويُطلَق على التفاعل الذي يحتاج إلى وجود حرارة «تفاعل ماص للحرارة».

دعونا نُلخِّص الأمر في بضع كلمات، نحن نعني في جوهر حديثنا أن الطاقة الداخلية لمجموعة من الجزيئات أو الذرات هي مجموع (١) الطاقة الدورانية، و(٢) الانتقالية، و(٣) الاهتزازية، ويُمكن أن يتغيَّر مقدار الطاقة الداخلية التي يحويها نظام بالحرارة. يُمكن أن تُضاف الحرارة إلى نظام أو تُطرَح منه بطرق عديدة، لكن الطريقة التي تُهمنا هنا في المقام الأول هي طريقة التفاعلات الكيميائية. عندما يُطلِق تفاعل كيميائي حرارة، يُسمَّى «تفاعل طارد للحرارة»، وعندما يمتص تفاعل كيميائي الحرارة يُسمَّى «تفاعل ماص للحرارة».

والآن نُضيف معلومةً جديدة وهي أن الجزيئات والذراتِ تتسم بالكسل، فتميل كلٌّ من الجزيئات والذرات إلى تقليل طاقتها متى سنحَت لها الفرصة، فكرة البولنج تنحدر إلى أسفل المنحدر، والقارب يعوم في اتجاه مجرى النهر، والجزيئات تستقر في أدنى ترتيب للطاقة يُمكنها أن تكون عليه.

لكن لنا هنا وقفة؛ فالجزيئات تميل إلى أن تكون في أدنى توزيع للطاقة ممكن لها، لكن قد لا يكون هذا أدنى توزيع ممكن للطاقة. لقد شرحنا في التجربة التي في مطلع هذا الفصل نوعَين مختلفَين من التفاعلات، أحدهما يطرد الطاقة والآخر يمتصها، وعندما يصل نظام كيميائي إلى أدنى مستويات الطاقة، فهو يطرد حرارة، ولا يحتاج النظام إلى طاقة إلا عندما يصل إلى توزيع أعلى للطاقة ولا يمتص النظام الحرارة من البيئة المحيطة به إلا عندما يكون هناك احتياج للطاقة، لكن التفاعل الذي امتص الحرارة حدث بتلقائية، من ذاته دون تدخل أي عوامل حفازة غير مواد التفاعل. والآن لدينا سؤال نود أن نطرحه: لماذا حدث ما سبق؟ وهل تخضع الأنظمة الكيميائية إلى قوانين مختلفة غير تلك التي تخضع لها كرة البولنج والقارب؟ هل المواد الكيميائية حرة بالدرجة التي تُمكِّنها من أن تصعد الجبال وأن تسبح ضد التيار؟

هذا السؤال ليس بالسؤال اليسير، ولقد دار بالفعل قدر لا بأس به من المناقشات عن طبيعة الحرارة طوال القرن الثامن عشر والتاسع عشر وحتى مطلق القرن العشرين، وترتبط الإجابة بشيء يُدعى «الإنتروبيا». والإنتروبيا هي ميل الأنظمة إلى الوصول إلى الحالة القصوى من الفوضوية.

المشروبات يختلط بعضها ببعض، والفوضى تعم المكاتب، وأوراق اللعب تُخلط بعشوائية بعضها في بعض، والإنتروبيا هي الميل الطبيعي للفوضوية. وتُعرف الإنتروبيا أيضًا بأنها الضريبة التي تدفعها البيئة، وأيضًا بأنها حكم الإعدام الصادر ضد الكون. في حين أن الإنتروبيا ما هي إلا تفسير فلسفي أو نظرة متشائمة، وهي دافع حقيقي يقود نحو العمليات الفيزيائية، ويكون له أهمية كبرى في تحديد مصير الكون.

وبتساوي جميع الاعتبارات الأخرى، يتحرك النظام نحو الحالة القصوى من الفوضوية، ولا تتسم الجزيئات والذرات بالكسل فحسب، بل بالفوضوية أيضًا. لماذا تسعى النظم نحو الحالة القصوى من الفوضوية؟ والإجابة، مع أنها استغرقت وقتًا طويلًا وكفاحًا مريرًا لاكتشافها، هي أن الحالة الفوضوية هي الشيء المحتمل في كل مكان.

وعادة يُمكِن تفسير الأمر بتشبيهه بمجموعة أوراق اللعب، ثمة طريقة واحدة لتوزيع أوراق اللعب بطريقة صحيحة ومنظمة في لعبة البريدج (لعبة من ألعاب الورق): وهي توزيع ثلاثَ عشْرة ورقة من النقش نفسِه، لكن ثمَّة ٦٤٠ مليار طريقة أخرى غير منظمة لتوزيع الورق. والمثير للدهشة أن احتمالية وجود الفوضوية أكبر بكثير من احتمالية النظام، وبطريقة ما يُمكِن النظر إلى هذه الحقيقة من منظور إيجابي، وهي أن كل شيء محتمل، لكن ليس محتملًا بنسبة كبيرة. وعلى مستوى الجزيئات نجد أنه من الممكن أن تتحرك جميع جزيئات كرسي في الاتجاه نفسِه وفي الوقت نفسِه، وقد يتحدى الكرسي الجاذبية ويقفز من فوق الأرض، لكن هذا مستبعَد تمامًا. من المحتمل تمامًا أن تظل حركة الجزيئات فوضوية، وكل حركة جزيء إلى أعلى تقابلها حركة جزيء إلى أسفل؛ لذا يظل الكرسي في مكانه. ويُعتبَر ميل الأنظمة إلى أن تُصبِح فوضوية وتظل فوضوية، قويًّا للغاية بدرجة تسمح له أن يُفسر — بالإضافة إلى اعتبارات الطاقة الأخرى — نتائجَ التفاعلات الكيميائية.

ويكون تأثيرُ الإنتروبيا في العمليات الفيزيائية وفي العمليات الكيميائية أيضًا هو تحفيز التفاعلات، وحتى في التفاعلات التي قد تتطلَّب الطاقة ضمن مدخلاتها. ويُعتبَر البخار السائل مثل بخار الماء والكحول من الأمثلة التقليدية على ذلك، ويُعتبَر الملمس البارد للجلد عندما يتبخَّر الماء أو الكحول دليلًا على أن هذه العملية تحتاج إلى طاقة. فالماء والكحول يمتصان بعض الطاقة من الجسم، إلا أن العملية تحدث بشكل أسهل كثيرًا، باستخدام مصطلح أقرته العلوم وهو يتناسب مع معنًى خاص ومحدود، وهو أن التفاعل يحدث تلقائيًّا، وتكتسب التلقائية معنًى أكثر دقة في الديناميكا الحرارية؛ لأنه

بوجود آلية الميكانيكا الحرارية يُمكِن حصر وتحديد ميل التفاعل للحدوث تلقائيًّا بالأرقام، ويُطلَق على الرقم الذي حُدِّد «الطاقة الحرة».

ما هي الطاقة الحرة؟ الطاقة الحرة هي الطاقة الناجمة عن التفاوت بين الطاقة المكتسبة أو المفقودة في تفاعل كيميائي وبين الكمية المستعارة أو المستهلَكة بسبب الإنتروبيا. تُدوِّن الطبيعة، تمامًا مثل دفتر الشيكات أو بيان الميزانية، كمَّ الطاقة المفقودة أو المكتسبة وتخصم الضرائب المُستحَقة للإنتروبيا، وتُمثِّل الطاقة المتبقية رأس المال المتاح، أو كما نقول نحن في الديناميكا الحرارية الطاقة الحرة، وهي الطاقة الطليقة اللازمة لتنفيذ العمل. وقد ذكرنا أن إعادة تنظيم تلك للطاقة تحدث عند تكوُّن الروابط الكيميائية أو كسرها، لكن الأمر نفسَه يدخل في اللعبة عند حدوث انجذابات بينجزيئية أو كسرها. ويُعتبَر التبخير، وهو تحول السائل إلى الحالة الغازية، مثالًا على عملية تتطلَّب طاقة، لكنها لا تزال تحدث بطريقة تلقائية بسبب اكتساب الكثير جدًّا من الإنتروبيا. هل يُؤثِّر تمدُّد الغاز بالفعل؟ يُؤثر تمدد الغاز بالفعل في أسطوانة الاحتراق الداخلي للمحرك.

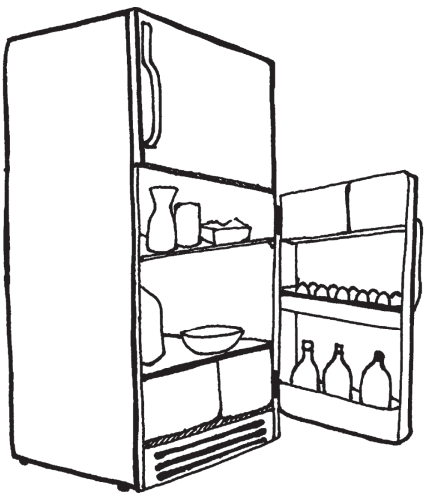
يُمكن رؤية السائل على أنه مجموعة أسماك أو سِرْب طيور؛ فالكلُّ يتحرك، لكن في وحدة وانسجام، فجميعُها تنطلق في طريق واحد أولًا، ثم تنعطف في طريق آخرَ معًا، ويكون كلٌّ منها في موقع في المجموعة، وهذا الموقع محدَّد له من قبل، ولا يختلف كثيرًا بتحرُّك المجموعة بأكملها معًا، إلا أن الغاز يُشبه سربَ بعوضٍ يطير في الجوار بشكل فردي وفي اتجاهات عشوائية، فتطير المجموعة حيث تحملها الرياح دون أن تستهدف اتجاهًا بعينه. يسهل علينا جدًّا أن نتنبَّأ بحركة سمكة واحدة من أحد أسراب السمك على أن نعرف اتجاه بعوضة في سربِ بعوض، كذلك يكون السائل أكثر تنظيمًا من الغاز. يتبخر الكحول من الجلد مسببًا تعطيلًا لقوى الجذب البينجزيئية، مما يتطلَّب قدرًا من الطاقة؛ لأن الكحول قادرٌ على اكتساب إنتروبيا بالتحوُّل إلى غاز.

ويُمكن أن تكون مثلُ هذه العملية التي تمتص الحرارة تلقائية إذا أحدثت قدرًا لا بأس به من الفوضى في نفس الوقت، ومن ناحية أخرى، إذا حدث استهلاك طاقة كافية، فإن التفاعلات التي تخلق التنظيم يُمكن أن تُدفَع للأمام، فالكعكة التي تكون صلبة ومنتظمة الشكل تُعَد من مخيض اللبن السائل غير منتظم الشكل بالإضافة إلى الحرارة.

يحدث التبريد في الثلاجة عندما يمتص المبرد المضغوط الحرارة ويتمدَّد؛ مما يعوق قوى الجذب البينجزيئية. جميعنا يألف صوت المبرد المُنساب عبر شبكة الأنابيب المصطفة خلف الثلاجة، وكذا صوت مِضخَّة الضغط الدائرة، لكن كيف يتسنى لهم أن يمنعوا فعل

المبردات في المكان المخصص لإشعال السجائر بالسيارة؟ هل من خلال سلاسل الأنابيب الصغيرة جدًّا ومضخات الضغط المصغرة؟ ليس تمامًا، لكن بعض المبادئ الأساسية تظل كما هي.

**على سبيل المثال: التبريد على الطريق**



قبل أن نتعرض لموضوع التبريد على الطريق؛ دعونا نتطرق إلى المبادئ التي يقوم عليها التبريد المنزلي المألوف لنا. عندما يُسمَح للسائل أن يتبخر على الجلد، يُصبح الجلد أبرد. جرب هذا باستخدام الأيزوبروبيل. والتعرق هو المحاولة التي يقوم بها الجسم لكي يُبرد نفسه من خلال إنتاج سائل يتكثف على الجلد ويُلطفه. يمتص العرقُ الحرارة من الجسم ويستخدمها في كسر قوى الجذب البينجزيئية التي تحمل المواد في الحالة السائلة. ووضع وعاء به ماء يغلي على موقدك، يخوض في التأثيرات نفسِها التي يمر بها المبرد الذي في ثلاجتك؛ إذ تظل درجة حرارة الماء المغلي ثابتة عند درجة ٢١٢ فهرنهايت (١٠٠ درجة سيليزية) (على افتراض أنك في مستوى البحر)؛ لأن الحرارة المُضافة من الموقد تكسر قوى الجذب البينجزيئية لجزيئات الماء، ولا تزيد الطاقة الانتقالية. في واقع الأمر، يتسبب وعاء

الماء في تبريد الموقد نفسه عن طريق تبديد الحرارة، ويُمثل المضيُّ قدمًا في هذه العملية حاجةَ السائل المنظم إلى الفوضى بتحوله إلى بخار.

وفي الواقع، يَستخدم سائل النيتروجين المبدأ نفسَه لإزالة الثآليل الصغيرة. وكما ذكرنا من قبل في مناقشتنا حول القوى البينجزيئية، يحدث الانجذاب بين الأقطاب الثنائية الاستقطاب المُستحثة، وقوى التشتت بسبب توزيعات الإلكترونات المؤقتة غير المتساوية في السحب الإلكترونية التي تنتج مناطق موجبة وسالبة سريعة الانقضاء. يتكون النيتروجين من نواتَي نيتروجين متحدتَين معًا — ولا تملك الإلكترونات مبررًا لتفضيلها نواة نيتروجين واحدة في الجزيء على الأخرى — ومن ثم لا تُعتبَر القطبية الثنائية — وهي الانفصال الدائم للشحنة الموجبة والسالبة — من سمات جزيئات النيتروجين. وعند تبريد النيتروجين وضغطه يتحول إلى الحالة السائلة بسبب جذب قوى التشتت وحدها، لكن لهؤلاء الذين شعروا ببرودة سائل النيتروجين، لا يُمكن أن يترك الألم أيَّ شك فيما يخص تأثير هذه القوى؛ فالطاقة التي تُمتَص من الجلد عندما يتبخر سائل النيتروجين تُسبب صقيعًا شديدًا يُصيب الجلد بما يكفي لقتل هذا الجزء من الجلد، وإذا كان هذا الجزء من الجلد هو الذي يحوي الثألول الصغير، فإن الثألول يتلاشى.

والسائل الذي يتدفق عبر الملفات التي تُوجَد خلف الثلاجة يُزيل الحرارة من الداخل على المنوال نفسِه. في الواقع، يمتص المبرد المُستخدَم في الثلاجة قدرًا كبيرًا جدًّا من الحرارة حتى إنه يستطيع أن يُجَمِّد الجلد، ويُضغَط الغاز عن طريق آلة، ثم يُسمَح له بالتمدد عبر الملفات، تُدار عملية الضغط بمحرك كهربائي، وتكون عملية التمدد مدفوعة بالإنتروبيا؛ فالحالة الغازية تكون أكثر فوضوية من الحالة السائلة.

ومع أن عملية التبخر تكون مدفوعة بالإنتروبيا، فإنها لا تزال في حاجة إلى طاقة كي تحدث؛ ومِن ثَم فهي تمتص طاقتها من الأشياء المحيطة بها؛ وبالتالي تبرد الأشياء المحيطة بها في هذه العملية، تُجمَع المادة المبردة ويُعاد ضغطها إلى سائل، ويَطرد السائل المعاد ضغطه الحرارةَ التي سحبها من الثلاجة، والتي تكون سبب الحرارة التي نشعر بها خلف الثلاجة، بعد حدوث عملية الضغط، تُعاد الكَرَّة من جديد.

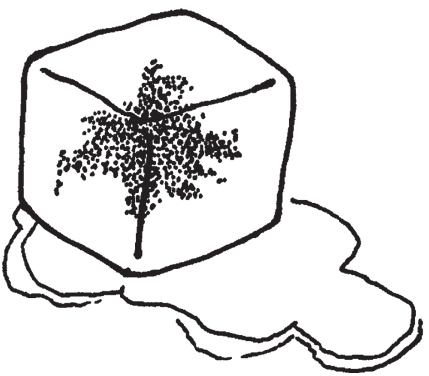
لكن لا يُوجَد ضجيج ناتج عن مكبس التبريد الموجود في السيارة، إذن لماذا؟ يُعزى ذلك إلى شيء يُسمَّى «تأثير بلتير للكهرباء الحرارية»، الذي يُمكِن شرحه أيضًا في ضوء الديناميكا الحرارية كالآتي:

تسمح بعض أشباه الموصلات بمرور الإلكترونات بشكل أسهل من غيرها، وعليه عندما ترتبط أي مادتَين مختلفتَين من أشباه الموصلات في دائرة كهربية، فإن الإلكترونات

تمر بحالة من تغيير الطاقة، وهي تعبر من أحد أشباه الموصلات إلى الآخر. عندما تقفز الإلكترونات من إحدى موادِّ أشباه الموصلات إلى مادة جديدة من أشباه الموصلات — ثم تعود مرة أخرى إلى المادة الأولى — فإن إحدى القفزات الإلكترونية هذه تكون مع التيار والأخرى تكون ضد التيار. تحتاج إحدى القفزات إلى طاقة، في حين تُطلق أخرى طاقة. من أين تأتي الإلكترونات بهذه الطاقة؟ ولماذا لا تُبتلَع في الطريق عبر الوصلة حيث تنطلق الطاقة؟ هذا هو ما يحدث في المقام الأول: فالطاقة تتدفق، وتسخن إحدى الوصلات وتبرد الأخرى، إذا كانت الوصلة الساخنة خارج الصندوق المعزول والباردة داخله، فهنيئًا مريئًا، أنت تملك ثلاجة.

وتتعدد استخدامات الديناميكا الحرارية في الكيمياء، كما تتعدد الثلاجات، لكنها مفيدة على نحو فريد في فهم توازن الحالة، بالإضافة إلى مفهوم التوازن الكيميائي الهام؛ لأن التوازن الكيميائي يتضمَّن توازن الحالة، وسنُلقي نظرة على توازن الحالة أولًا، والحالة قبل التوازن.

# تجربة ١٤: الثلج المعزول



ما اعتبره الشباب بلورات، أثبتت الأيام أنه قطرات ندًى.

روبرت براونينج،
«يوكنان هكادوش»، ١٨٤٠

لقد ناقشنا للتو الحالة الصلبة للمادة والحالة الغازية والسائلة أيضًا، وصادفنا كيمياء شيقة في كلٍّ منها، لكن هذا ليس إلا قمة الجبل الثلجي. وسيكون موضوع مناقشتنا التالي هو التغيرَ من حالة إلى أخرى. مع أن طبيعة التغيرات التي تطرأ على الحالة التي اختبرناها من طريق المواد النقية — مثل الذوبان والتجمد والغليان — لها بريقها الخاص، فإن

الأمر يُصبح أكثرَ إثارةً عند إضافة القليل من الكيمياء إلى الخلطة. ولتوضيح التغيرات التي تطرأ على الحالة مع القليل من الطابع الكيميائي، جرب التجرِبة الآتية:

بعد ارتداء نظارة الأمان الواقية، التقِط زجاجة دليل اختبار قلوية مياه حوض السمك المقترح شراؤها في «قائمة المشتريات والمحاليل». أضف ثلاث نقاط من الدليل على نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) ماء موضوع في وعاء من الزجاج الشفاف أو البلاستيك، ملاحظًا كما تفعل دومًا لون النقاط وهي متساقطة من زجاجتها ولونها وهي تتخلل الماء. يكون لون النقاط برتقاليًّا ضاربًا إلى الصفرة قبل إضافتها إلى الماء، ويتغير لونها إلى اللون الأزرق المخضر عند إضافتها إلى الماء. يُعزى تغير اللون إلى أن الدليل حامضي نوعًا ما. يفقد الدليل أيون هيدروجين في الماء الذي بدوره يُغيِّر لون المحلول. رج المحلول قليلًا لكي تخلط الدليل ثم غطِّ الوعاء بغلاف بلاستيكي. تأكد من أن الغلاف في مكانه بتثبيته بشريط مطاط أو بشريط لاصق. نظف الوعاء من الخارج بمنديل ورقي، ثم ضعه في المجمد على منديل ورقي. قم بالاحتياطات اللازمة كي تحفظ الوعاء بعيدًا عن أي أطعمة، ثم اكتب عليه محذرًا، في بطاقة: ممنوع الاستخدام. دع الخليط يتجمد ويُصبح مادة صلبة.

بعد أن يتجمد الخليط، خذه وانظر فيه عن كثب. ستُلاحظ أن مكعب الثلج المتكونَ رائقٌ من الخارج يتخلله الدليل متجمعًا كلُّه في المنتصف، ويتحول لون الدليل المنعزل في الوسط إلى اللون الأصفر.

ثمة تقنية في الصناعة تُعرَف باسم «التنقية بالعزل» تُستخدَم لتنقية المعادن، وفي هذه التقنية تُبرَّد المعادن ببطء بداية من أحد طرَفَي قضيب معدني مصهور. وتُضغَط الشوائب إلى قاع المادة حيث يُمكن التخلص منها. في حالة مكعب الثلج، أخذ الماءُ في التجمُّد ببطء بداية من جوانب الوعاء، وكما رأينا، فإن الماء دفع الدليل إلى خارج الخليط إلى منتصف مكعب الثلج، وتحول الدليل إلى لونه الأصلي عندما كان مركزًا في زجاجته بسبب دفعه خارج المحلول إلى المركز. ويُمكن رؤية التنقية بالعزل في الثلج أيضًا في مكعبات الثلج المنتظمة الشكل، حيث يكون الجانب الخارجي للثلج شفافًا في حين يكون داخله صلبًا وكثيف البياض، وتتكون هذه المنطقة الكثيفة البياض في المنتصف عندما تُدفَع الغازات المذابة في صنبور الماء إلى وسط مكعب الثلج بالتجمد.

الفصل الرابع عشر

# طور جديد تمامًا

في الأسابيع التي أمضيناها معًا، أضحى هوبر رمزًا للشاب الإنجليزي؛ لذا كلما قرأت بعض الأقوال العامة التي تُنادي بما يتعين على الشباب فعله في المستقبل وما يدين به العالم للشباب، اختبرت هذه الجمل العامة باستبدال هوبر ومعرفة هل لا يزال الأمر يبدو معقولًا؛ ومن ثَم في الساعات المتأخرة وقبل البدء في السهر والعربدة، كنت أحيانًا أفكر مليًّا في شجاعة وصمود هوبر، وفي نزل

هوبر، وفي اتحاد هوبر الدولي، ودين هوبر. لقد كان هوبر الاختبار الحامضي لكل تلك السبائك.

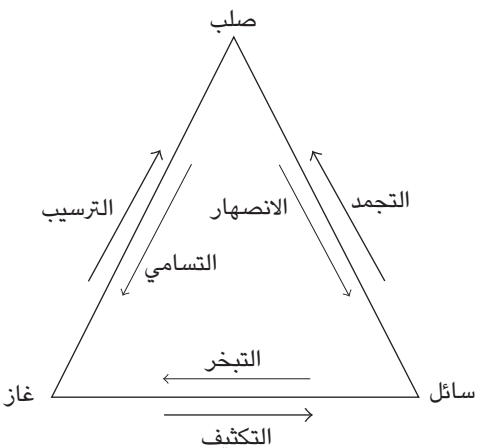
الكاتب البريطاني إفيلين وا في روايته
«العودة إلى زيارة برايدزهيد»، ١٩٤٥

يُعتبَر التوازن الكيميائي من أهم مفاهيم الكيمياء، وللأسف يُعتبَر التوازن الكيميائي أيضًا من أكثر المواضيع المعقدة التي يُمكن أن تُحدث ارتباكًا، ولتجنب هذه المعضلة سنتناول هذا الموضوع بإسهاب، ولقد اتخذنا بالفعل الخطوة الرئيسية في هذا الموضوع عن طريق الخوض في موضوع الديناميكا الحرارية، وسنتخذ خطوة أخرى الآن بمناقشة توازن حالة المادة، وهي ظاهرة أقلُّ صعوبة وأكثرُ ألفة بين الناس. في حقيقة الأمر، جميعنا يعرف جيدًا الحالات المختلفة لإحدى المواد الكيميائية، وهي $H_2O$، ولدينا اسم تدليل لكلٍّ منها — فالماء للحالة السائلة، والثلج للحالة الصلبة، والبخار للحالة الغازية — مع أن الحالة التي نُطلق عليها البخار، وهو الشيء الذي يُمكنك أن تراه، ما هو إلا ضباب للماء المكثف بالفعل، فالبخار الحقيقي لا يُمكِن رؤيته يتكون عندما يبرد البخار الساخن غير المرئي ويتكثف في الهواء المحيط، ومن الأفضل أن ندعوَ ما يُعرَف بالبخار «ضبابًا». وتغير الحالة هو ما يحدث عندما يذوب الثلج، وعندما يغلي الماء، وعندما يتكثف البخار إلى ضباب.

والحرارة هي ما تُسبب تغير الحالة؛ فثَمة حرارة تتدفق إلى داخل المادة لتُحدث بعض التغيرات، وثمة حرارةٌ أخرى تنطلق إلى الخارج لتُحدث تغيرات أخرى. فالحرارة المتدفقة إلى داخل نظام عادة ما تظهر كزيادة في الطاقة الدورانية والطاقة الاهتزازية والطاقة الانتقالية، مُحدِثة زيادة في درجات الحرارة، لكن عند درجة حرارة معينة (تختلف من مادة إلى أخرى)، يُضاف قدر كبير جدًّا من الطاقة إلى النظام، لدرجة أن الجزيئات تقدر أن تُفلت من تورطها في الانجذابات البينجزيئية، وتنقل نفسها إلى الحالة التالية. تخف قسوة قوام المادة الصلبة إلى الحالة اللينة للسائل، أو تخف الحالة اللينة للسائل إلى الحالة الطليقة للغاز، وعندما تنطلق الحرارة من النظام، تُبطئ الحركة الجزيئية، وتُصبح القوى البينجزيئية ذات أهمية مرة أخرى. فالغاز يتحول إلى سائل والسائل يتحول إلى صُلب لكن لا يُشترط أن تمر المواد بالحالات الثلاث بالترتيب، فمن الممكن لمادةٍ أن تتحول مباشرة من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية والعكس، تبعًا للضغط. ويُعتبَر الثلج الجاف، الذي هو ثاني أكسيد الكربون الصلب ($CO_2$)، مثالًا للمادة التي تتحول مباشرة من الحالة الصلبة

إلى الحالة الغازية في درجة الحرارة العادية وتحت الضغط الجوي العادي. فخاصية الثلج الجاف هذه وحقيقة أن ثانيَ أكسيد الكربون أكثرُ كثافة من الهواء، تُؤديان إلى استخدام ثاني أكسيد الكربون على خشبة المسرح كمُؤثرات دخانية.

ويُطلَق على عملية التحول من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية مباشرة دون المرور بالحالة السائلة «التسامي». أما الترسيب فهو العملية التي يحدث فيها التحول من الحالة الغازية إلى الحالة الصلبة مباشرة، دون المرور بالحالة السائلة، وقد يكون التجمد أحدَ الأمثلة على الترسيب؛ ففي ظل ظروف معينة يترسَّب بخار الماء الموجود في الهواء كصقيع، دون أن يتكثف إلى سائلٍ أولًا، وتُوضح عملية التسامي ورفيقتها عملية الترسيب في شكل ١٤-١، مع المراحل العامة للمادة والعمليات التي تربطهما.




شكل ١٤-١: المراحل العادية للمادة والتغيرات الفيزيائية التي تربطها.

في شكل ١٤-١ تشير الأسهم المظللة بظل خفيف داخل المثلث إلى التغيرات التي تحتاج إلى طاقة كي تحدث، ويُطلق على هذه التغيرات «تغيرات ماصة للحرارة». أما الأسهم الكثيفة التظليل خارج المثلث فتُشير إلى التغيرات التي تُطلق طاقة عند حدوثها، ويُطلَق عليها «تغيرات طاردة للحرارة». والتغيرات الماصة للحرارة هي تلك التغيُّرات

التي تحدث على سطح الموقد؛ وهي الانصهار، والتبخير والتسامي أما التغيرات الطاردة للحرارة فهي تلك التي تحدث داخل المبرد، وهي التكثيف والترسيب وبالطبع التجمُّد. ويُمكِن إثبات أن التكثيفَ هو عملية طاردة للحرارة عن طريق العواصف المطيرة؛ عندما تتكثف جزيئات الحالة الغازية الموجودة في الجو إلى أمطار، تنطلق الحرارة، وهو ما قد يجعلنا نشعر بمقدار ضئيل من الدفء في الهواء المحيط.

ولو كانت هذه هي كلَّ أحداث القصة، لكان هذا فصلًا قصيرًا ولكانت الكيمياء فقيرة، ولكن كما ذكرنا سابقًا، يلعب الضغط دورًا متمِّمًا في التصرفات الواسعة النطاق للمواد المختلفة، مما يُضيف بعدًا آخرَ على مناقشتنا، وفي عملية الخلط يجب أخذ التركيب أيضًا بعين الاعتبار، مما يُضيف عاملًا آخر. يُعلل الضغط لماذا يُعتبَر التزلُّج على الجليد ممتعًا في حين لا يُعَد التزلج على الجليد الجاف (ثاني أكسيد الكربون المجمد) ممتعًا، وتتناول دراسة التركيب سبب تعفُّن البيتزا الجيدة. سنبدأ بالتزلج على الجليد ثم نتجه إلى البيتزا بعدها.

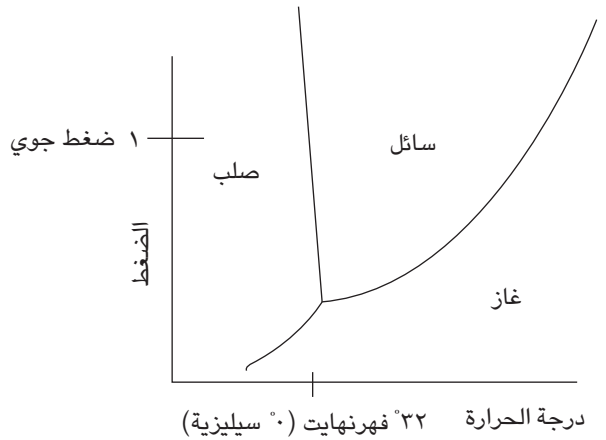
عندما يغلي الماء على الموقد، يحدث تغيير في حالته؛ إذ يتحول من سائل إلى بخار، والفقاعات هي جيوب من البخار تتكون في الماء وهو يتبخر، ويتساوى الضغط داخل الفقاعة مع الضغط الذي يضغط على الماء لأسفل، وإلا فما تمكنت هذه الفقاعات من الارتفاع فوق سطح الماء ولا تمكن الماء من الغليان. عندما يقل الضغط الواقع على سائل، يتمكن السائل من الغليان عند درجة حرارة أقل؛ لأنه لا يُشترَط أن يكون ضغط البخار داخل الفقاعة كبيرًا للغاية، ويُلاحَظ حدوث انخفاض ضئيل في نقطة غليان الماء في الارتفاعات الأعلى، مما يعني أن أقصى درجة حرارة للماء عند الغليان التام تكون أقل من ٢١٢ درجة فهرنهايت (١٠٠ درجة سيليزية)، وعند درجات الحرارة المنخفضة هذه، يستغرق الطعام وقتًا أطولَ لكي يُطهى جيدًا؛ لهذا السبب تُوصي بعض وصفات الطعام إتاحةَ وقت أطول لطهي الطعام، وفي درجات حرارة مرتفعة جدًّا.

وتُبين الطريقة التي يُؤثر بها الضغط في تغير الحالة بالحقنة الشرجية الموصوفة في «قائمة المشتريات والمحاليل». سخِّن قطعة قماش صغيرةً في ماء ساخن، واعصرها. أزِل الإبرة من الحقنة واسحب مقدارًا قليلًا من كحول الأيزوبروبيل إلى داخل الحقنة، ثم غطِّ بأحد أصابعك مكان الفتحة التي تُوضَع فيها الإبرة. لف قطعة القماش حول قمة الجزء الأسطواني الذي في الحقنة، في ذلك الحين اترك الطرف المسدود بأصبعك بحيث يتسنَّى لك ملاحظةُ تغير الحالة. اسحب لأعلى برفق مكبس الحقنة، مما يُنشئ فراغًا فوق الكحول،

ويُقلل الضغط. ينبغي عليك أن تلحظ الأيزوبروبيل وهو يبدأ في الغليان من جراء الحرارة المنبعثة من قطعة القماش الدافئة فحسب.

نحن نُعايش كلَّ يوم مع الطقس عملياتِ تغير حالة المادة حتى لو لم تُمطر السماء أو لم يتساقط الجليد، فغالبًا يتساقط الندى في الصباح، وتتوقف النقطة التي يحدث عندها الندى، وهي درجة الحرارة التي تتكثَّف عندها الرطوبة من الهواء على الأرض، على الضغط المحيط، وعليه كان يُستخدَم الندى في الماضي كبارومتر بُدائي للتوقعات الجوية. وتعتمد أيضًا الدرجة التي يتجمد عندها الماء على الضغط؛ لذا عندما نقول إن نقطة تجمد الماء هي ٣٢ درجة فهرنهايت (٠ درجة سيليزية)، يجب علينا أن نُحدِّد بأن نقول إن هذه درجة تجمد الماء في ظل الظروف العادية للضغط الجوي، إلا أن التغيرات الطفيفة التي نمر بها في الضغط الجوي لا تكفي لأن تُغير نقطة التجمد على نحو كبير؛ لذا من الممكن أن نُبرر إهمالنا لهذا التحديد في حديثنا اليومي. وعندما نقول إن الدرجة ٣٢ درجة فهرنهايت (٠ درجة سيليزية) هي نقطة تجمد الماء، فإن هذا يُشير فعليًّا أيضًا إلى أن هذه هي النقطة التي يبدأ عندها الماء في التحول إلى الحالة الصلبة؛ لذا يُوجَد عند درجة الحرارة هذه بعض الماء الذي لم يتجمَّد بعد، وهو الذي يجعل التزلج على الجليد ممكنًا، فطبقة الماء الخفيفة على الجليد تسمح للزلاجات بأن تنزلق بسهولة. ومع أنه يُمكن التزلج على الجليد بسهولة باستخدام الحذاء الذي يُرتدى على الجليد بدون مِزْلاج، بسبب طبقة الماء الموجودة على الجليد في درجة الحرارة والضغط العاديَّين التي تُسهل التزلق، فإن التزلج على الجليد باستخدام المزلاج هو أكثر متعة؛ لأن إحدى الخصائص المميزة للماء تتمثل في أن زيادة الضغط تُقلل نقطة الذوبان. تُركز آلية تصميم المزلاج على وزن المتزلج على المزلاج الرفيع الذي بدوره يعمل على زيادة الضغط عندما يستخدم المزلاج عند مستويات أكثر انحدارًا. ولا يُعتبَر التزلج على الجليد الجاف ممتعًا؛ لأن الجليد الجاف، كما يُوحي وصفه، جافٌّ، بمعنى أنه لا يُوجَد عمليًّا طبقة سائلة في درجة الحرارة والضغط العاديَّين.

ولأن كل مادة تُظهِر تصرفًا فريدًا من نوعه فيما يتعلق بتغير درجة الحرارة والضغط أو كلَيهما — الشمع يتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة عند تسخينه، وبياض البيض يتحول من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة — فإن الأمر يتطلب مصفوفات من البيانات لوصف تصرف كلٍّ من درجة الحرارة والضغط مع كل مادة، وقد يتطلب الأمر أيضًا منظومة مختلفة لكل مادة. في أواخر القرن التاسع عشر، استنبط جوزيه ويلارد جيبس، وهو عالم رياضيات وفيزياء موهوب في الولايات المتحدة الأمريكية، وسيلة تُسمَّى




شكل ١٤-٢: الرسم التخطيطي لطور $H_2O$.

«رسم تخطيطي للطور» تسمح بعرض كافة البيانات في رسم بياني ملائم،[1] فعلى سبيل المثال، الرسم التخطيطي لطور $H_2O$ مُوضَّح في شكل ١٤-٢.

يعرض الرسم التخطيطي للطور مناطقَ درجات الحرارة والضغط هذه التي تُؤدي إلى حالات عديدة للماء؛ الحالة الصلبة، والسائلة، والغازية، أما الخطوط التي تُوجَد بين الأطوار فهي تُمثل الظروف التي تكون المادة في ظلها في حالة «اتزان»، بمعنى أنها الحالة التي تحيا فيها المادة في سعادة في كل طَور من الأطوار؛ لذا تكون بعض المقادير في أحد الأطوار وتكون بعض المقادير الأخرى في طور آخر. ويُوضح التخطيط البياني أنه تحت جو واحد من الضغط، وهو الوضع العادي، يكون $H_2O$ الصلب في توازن مع $H_2O$ السائل — بمعنى أنها سوف تبدأ إما في التجمد وإما في الذوبان — حيث إن درجة التجمُّد العادية لها هي (٣٢ درجة فهرنهايت، ٠ درجة سيليزية). إذا كانت درجة الحرارة أعلى، أو إذا انتقلنا إلى اتجاه اليمين في مخطط الطور، فإننا سنجد أن الماء يكون في الحالة السائلة تحت الضغط العادي. إذا كانت درجة الحرارة أعلى، أو إذا اتجهنا إلى جهة اليمين من مخطط الطور، فسنجد أن الماء يكون في الحالة السائلة تحت الضغط العادي، وإذا زادت

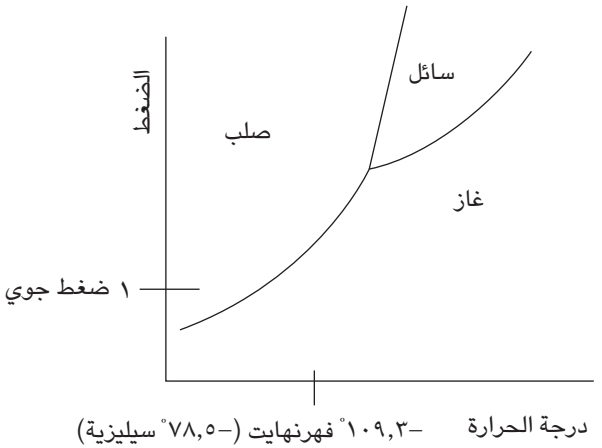
درجة الحرارة إلى ١٠٠ درجة سيليزية ونحن لا نزال في الجو نفسه، حينئذٍ يكون الماء في حالة انتقال إلى الحالة الغازية.

لكن كما هو الحال مع الجدول الدوري، ثمَّة مَعانٍ عديدةٌ أخرى يحملها مخطط الطور، فإذا كانت درجة الحرارة مثلًا هي ١٠٠ درجة سيليزية وكان الضغط أعلى من الضغط العادي، فيُمكننا عندئذٍ القول استنادًا إلى المخطط إن لدينا $H_2O$ السائل، ومع ذلك فنحن لا نزال عند درجة الغليان العادية. وأيضًا إذا كان الضغط يتجه إلى أسفل، فإن درجة الحرارة التي تنتقل عندها المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية تنخفض أيضًا. وهذا نفس ما حدث للكحول في الحقنة، ويُمكننا أن نرى أيضًا من مخطط الطور أن الماء في درجة الحرارة المنخفضة يُمكنه أن يظل في حالة اتزان مع بخاره، إلا أن ضغط البخار سيكون أقلَّ منه عند نقطة الغليان.

يُوضح شكل ١٤-٣ مخطط الطَّور لثاني أكسيد الكربون. ومن هذا المخطط نرى عند جوٍّ واحد للضغط أن ثانيَ أكسيد الكربون ($CO_2$)، لا يكون في الحالة الصلبة للمادة إلا في درجات الحرارة المنخفضة جدًّا، وعند أي درجة فوق −١٠٩٫٣ فهرنهايت (−٧٨٫٥ درجة سيليزية) فإنه يكون في الحالة الغازية. فهو يتحول مباشرة إلى غاز (المرحلة الانتقالية التي تُسمَّى التسامي)؛ لأن ثانيَ أكسيد الكربون الصلب يُسخَّن في جو واحد؛ لهذا يُستخدَم ثاني أكسيد الكربون لإثارة الدخان، ولهذا يصعب التزلج عليه في درجة الحرارة والضغط العاديَّين؛ فلا تُوجَد طبقة لزجة سائلة، لا يُوجَد إلا الغاز.

ويُمكن أيضًا لمادة نقية أن تحظى بحالات صُلبة مختلفة؛ فالقصدير، وهو المادة التي كانت تُستخدَم في وقتٍ ما في أنابيب الأرغن، يُمكنها أن تتغير من مادة القصدير في الحالة الصلبة ذات اللون الأبيض إلى قصدير مسحوق رمادي اللون في درجة الحرارة المنخفضة، ويُطلَق على التحول المرحلي هذا «مرض القصدير» أو «آفة القصدير».[2] ويُمكن للثلج أن يأخذ أشكالًا صلبة عديدة مميزة، بما فيها شكل الجليد IX. وطبقًا لما هو مذكور، لم يكن كرت فونيجت، الكيميائي بالتدريب، مدركًا للوجود الفعلي لشكل الجليد IX، عندما استخدم هذا الاسم في روايته «مهد الهرة».[3]

ويُمكن تمثيل التغيرات المرحلية التي تحدث للمخاليط من مخطط الطور أيضًا، إلا أن هذه المخططات البيانية تكون أكثر تعقيدًا في الغالب. والطور هو أي مرحلة متسقة وثابتة للمادة، سواءٌ أكانت نقية أم مختلطة؛ ومِن ثَم تُعتبَر كل الحالات المختلفة، التي يُمكن أن يجد الخليط نفسه عليها، تُحدَّد على أنها طور منفصل في مخطط الطور. ومن الممكن أن تُوجَد مراحل عديدة معًا في توازن، ويجب إيضاح هذا أيضًا في المخطط،



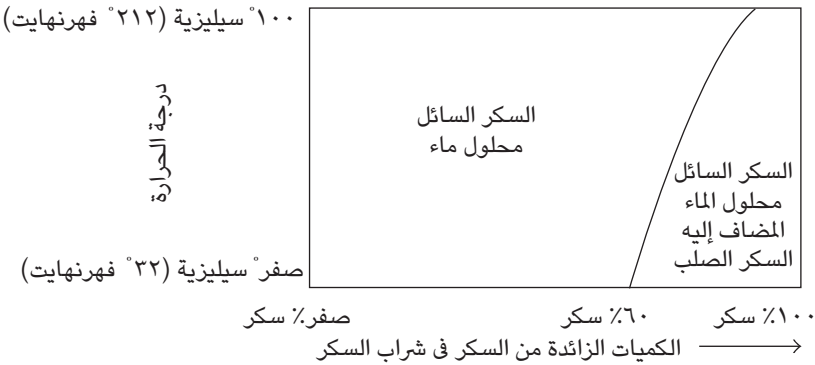

شكل ١٤-٣: مخطط الطور لثاني أكسيد الكربون.

والسبيكة هي فئة من المخاليط التي يُمكنها أن تحظى بمراحل مميزة، ويُمكنها أن تُبين مدى التعقيد الذي يشوب تغيرات المرحلة. إذا كان لديك نحاس، يُمكن أن يكون هذا النحاس نُحاسًا سائلًا أو نحاسًا صلبًا، تبعًا لدرجة الحرارة، وإذا كان لديك خارصين فإما أن يكون هذا الخارصين سائلًا أو صلبًا، تبعًا لدرجة الحرارة، لكن إذا كان لديك سبيكةٌ من النحاس والخارصين، فمن الممكن أن تكون هذه السبيكة من سائل النحاس وسائل الخارصين، أو سائل النحاس مع الخارصين الصلب، أو سائل الخارصين مع النحاس الصلب، أو النحاس الصلب مختلطًا بالخارصين الصلب، وكل منها يُعتبَر مرحلة منفصلة، لكن أي حالة من هذه الحالات سيثبت، يتوقف هذا على درجة الحرارة والضغط والمقادير النسبية من الخارصين والنحاس في الخليط، هذا فقط عندما تتكون السبيكة من مادتَين فقط. إذا أحصينا عدد المكونات المُدرَجة على بطاقة زجاجة شامبو، من السهل أن نرى مدى الصعوبة التي يُمكِن أن يكون عليها مخطط الطور، وفي محاولة لتبسيط الموقف، عادة يُفترض أن الضغط ثابت، في الجو الواحد، ويكون المتغيران اللذان نُحاول أن نقتفيَ أثرهما درجة الحرارة والتركيب.

وخذ مثلًا النظام البسيط لبيكربونات الصودا في الماء، فهي تُضاف إلى الماء، فتذوب المقادير الضئيلة المُضافة أولًا في المحلول، لكن بإضافة المزيد يُصبح الخليط مشبعًا، وتوجَد المادة الصلبة بالمثل مع المادة السائلة. بكلمات أخرى، تعتمد القابلية للذوبان على التركيب: فإذا كان لديك نظام يسود الماء في تركيبه مع القليل جدًّا من البيكربونات، تذوب البيكربونات في المحلول. وإذا كان لديك نظام يسود الماء على تركيبه لكن مع الكثير من البيكربونات هذه المرة، فإن الصودا تترسَّب في المحلول. أما إذا ثبت التركيب، بمعنى أن تستخدم كوب ماء مشبعًا ببيكربونات الصودا، عندئذٍ يُمكنك أن ترى كيف أن القابلية للذوبان تعتمد على درجة الحرارة، فإذا سخنت المحلول في درجة حرارة منخفضة في ميكروويف، تذوب بيكربونات الصودا في المحلول؛ لأن النظام يسخن ويظهر المحلول بوضوح، وإذا تركنا المحلول يبرد، تخرج بيكربونات الصودا من المحلول مرة أخرى.

مثال آخر تتغير فيه القابلية للذوبان بتغير درجة الحرارة والتركيب هو في فن التقطير الجميل: يتميز التقطير بحقيقة أن البخار الموجود على المحلول يختلف عامة في تركيبه عن تركيب المحلول الذي أتى منه، وهذا الاختلاف في التركيب بين السائل والبخار يُمكن برهنته باستخدام كوب ماء به ألوان طعام. إذا قمنا بتغطية كوب به بوصة أو اثنتان ماء مع ألوان طعام بغلاف رقيق من البلاستيك وثبتنا الغلاف في مكانه بشريط من المطاط ثم قمنا بتدفئته في الميكروويف لفترة قصيرة (من خمسَ عشرة ثانية إلى عشرين ثانية)، نُلاحظ أن الجوانب الداخلية للكوب تتغطَّى بالتكاثف، إلا أن هذا التكاثف يكون شفافًا، ولا يتلوَّن بألوان الطعام، ويُعزى اختلاف الألوان إلى أن الحالة البخارية تختلف في تركيبها عن تركيب الحالة السائلة، والحالة البخارية هي ماء نقي، وليس خليطًا من ألوان الطعام والماء. يتمتع الماء بدرجة غليان منخفضة عن درجة غليان ألوان الطعام؛ ومِن ثَم يدخل الماء في حالة البخار بسهولة أكثر تاركًا لون الطعام خلفه، وقد يكون هناك بعض أنواع الطعام القادرة على التبخر مع الماء، لكن الأغلبية ليست لديها هذه القدرة وجيد أن نرى هذا التأثير. إذا لم تنجح التجرِبة مع لون الطعام الذي لديك، أحضر لون طعام آخرَ (يُرجَّح استخدام ألوان الطعام القديمة، حيث يبدو أنها تعمل أفضل) وحاوِلْ مرة أخرى.

يُستخدَم التقطير لتنقية المياه عند الضرورة ويُستخدَم أيضًا لغرض شائن. يُفصَل الإيثانول من الماء بتسخين الخليط حتى يتحول الإيثانول إلى الحالة البخارية، مخلفًا وراءه الماء، إلا أنه لا يُمكن إزالة كلِّ الماء من الإيثانول بهذه الطريقة بسبب قُوى الجذب البينجزيئية الشديدة. يكون هناك دائمًا بعض الماء في الإيثانول، وأقصى ما يُمكن أن تناله




شكل ١٤-٤: مخطَّط الطور لقابلية السكر للذوبان في الماء. لاحظ أننا عندما قمنا برسم مخطط طور للمادة النقية، سواءٌ كانت الماء أو ثانيَ أكسيد الكربون الجاف، كانت العوامل المتغيرة هي درجة الحرارة والضغط، لكن في هذا المخطط، يكون مخطط الطور لخليط، والعوامل المتغيرة هنا هي درجة الحرارة والتركيب، فالضغط يُفترَض أنه ثابت.

يدك بالطرق العادية هو ٩٥٪ إيثانول (درجة الكحول١٩٠)، وهي نسبة أكثر من رائعة بالنسبة إلى أغلبية الاستخدامات العرضية.

ويُمكن توضيح أيضًا الملاحظة العامة القائلة إن القابلية للذوبان تزداد عادة بزيادة درجة الحرارة عن طريق خليط الماء والسكر، لكن هذه المرة بشيء من التغيير. ففي حين قد يكون صحيحًا أن ملء ملعقة كبيرة من السكر لا تكون قابلة للذوبان في ملء ملعقة كبيرة من الماء في درجة الحرارة العادية، فإن التسخين الهين يجعل السكر يذوب في المحلول، وهذا الانتقال من مرحلة إلى أخرى، يُمكن التعبير عنه مرة أخرى بمخطط الطور، مثل ذلك الموضَّح في شكل ١٤-٤.

يُخبرنا هذا المخطط أنه إذا كان لدينا خليط، وثمة بعض السكر غيرُ الذائب فيه، ثم سُخِّن دون حدوث تغيرٍ في التركيب، فإن طور الخليط يتغيَّر من خليط سكر صلب وماء إلى محلول يتكون تمامًا من السكر والماء، أو بكلمات أخرى، سخِّن محلول السكر والماء، عندئذٍ تحصل على المزيد من السكر المذاب في المحلول.

قد تبدو هذه الحقيقة غيرَ مهمة إلى حدٍّ ما؛ فهي ليست سرًّا، فطريقة دفع المزيد من السكر إلى الذوبان في المحلول معروفةٌ للطهاة والسُّقاة منذ الأزل، وقد يبدو أنها لا تستحق أن تُعامَل على حدة، وقد تبدو الصلصة الهولندية أيضًا موضوعًا تافهًا لأن تُذكر في كتاب كيمياء، لكننا سنُناقشها هنا أيضًا للسبب الآتي: ألا وهو أن الصلصة الهولندية تختلف عن الماء الذي به سكر! فهي تُظهِر تصرفاتٍ لها فحوى بعيدة الأثر؛ حيث يمتد أثرها من جسر لندن إلى لمبرجر ببلجيكا، ويأتي الاختلاف في هذه الصلصة عندما تُترَك لتبرد مرة أخرى.

والصلصة الهولندية هي مُستعلَق لذيذ المذاق للزبد في البيض، وعندما تكون دافئة ومُعدَّة حديثًا، تنسكب الصلصة بانسيابية كخليط أحاديِّ الطَّور، ويكون محلول السكر والماء المحلَّى الساخن خليطًا متماثلًا من السكر والماء، وعندما يبرد الماء المُحلَّى، فإنه يظل خليطًا متجانسًا من السكر والماء، لكن عندما تبرد الصلصة الهولندية، يحدث شيء آخر، فهي تنفصل، لا تظل الصلصة الهولندية الباردة متماسكة؛ لأنها تكون في حالة شبه مستقرة، بمعنى أن هذا ليس أدنى وضع للطاقة لها، ولكنها تكون في مستوى استقرارٍ أعلى من الوضع الأدنى للطاقة.

وقد تُعتبَر كرة البولنج التي تتوازن أعلى درجة السلم مثالًا على حالة شبه الاستقرار. حيث تكون كرة البولنج مستقرة، لكنها لا تكون في أدنى موضع من الطاقة لها الذي تكون عليه عندما تستقر على الأرض، فعند تعرُّض الكرة لأقل إثارة ستسعى نحو أدنى مستوًى للطاقة؛ ومن ثَم تنحدر من على درجة السلم، أما الوضع الذي تكون فيه الكرة في طريقها نحو الاستقرار، عندما تتحرك الكرة ببطء، فهذا يُعتبَر أيضًا وضعًا شبهَ مستقر وليس مستقرًّا. كذلك تكون الصلصة الهولندية في حالة شبه الاستقرار، إلا أن الزيوت التي تدخل ضمن مكوناتها تسعى نحو الارتباط ثانية بعضها ببعض إذا تمكنَت من إيجاد مسلك لذلك، مما يُسبب انفصالها.

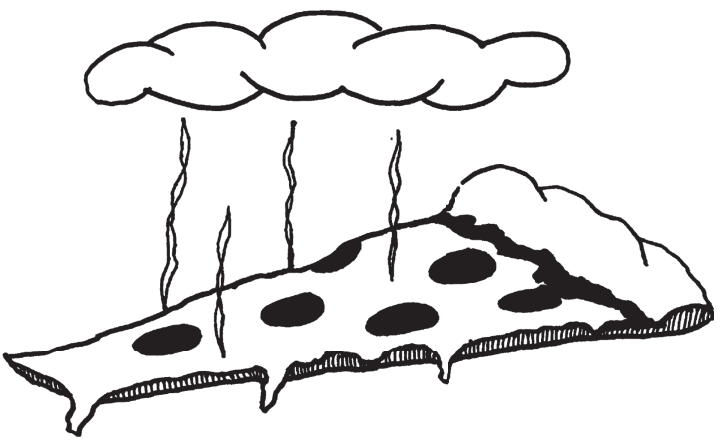
ولا تقتصر حالات شبه الاستقرار على الصلصة الهولندية فحسب، بل يُمكِنها أن تحدث في أنظمة متنوعة بنفس قدر تنوُّع الأدوية والسبائك، وتُعتبَر أدوية عديدة المستعلقات حيث تنتشر حالة عدم استقرار المواد الصلبة في السائل. والسبائك المعدنية هي مخاليط من المعادن التي ينبغي تسخينها عادة في درجات حرارة مرتفعة جدًّا كي تمتزج معًا، وإذا بُرِّدَ الخليط ببطءٍ تام، فإنه يُحتمَل حدوث انفصال مثلما يحدث في «التنقية بالعزل» المذكورة من قبل. أما إذا حدث تبريد سريع، ينتج خليط صُلب في حالة

شبه استقرار، بالطبع تُشير حالة شبه الاستقرار ضِمنيًّا إلى وجود حالة أخرى، وهي الحالة المستقرة، يُمكِن أن ينتقل إليها الخليط مع الوقت؛ ومِن ثَم يُمكِن أن تتغير خصائص السبائك المعدنية وإن يكن الأمر يحدث ببطء مع الوقت. بكلمات أخرى، التراكيب التي تتألَّف من سبائك، مثل الجسور، يُمكِنها أن تتقادم، فلا يجب أن نأخذ الصدأ فحسبُ بعين الاعتبار عندما نُقرر إذا كان الجسر سليمًا وآمنًا، لكن أيضًا عمر المادة المصنوع منها الجسر وطبيعتها.

لكن ما من مُبرر للقلق بشأن رحلة العودة إلى المنزل باستخدام المواصلات العامة. وليست الجسور وحدها هي التي تُرصَد بعناية من أجل تأثيرات الزمن، فملاحظة عودتها من حالات شبه الاستقرار إلى أقصى حالات الاستقرار يُمكن أن يكون في غاية البطء بحيث يتعذر رصده في غضون حياة بشر كثيرين، وقد بُنِيَت معظم الجسور لتدوم وتبقى.

لكن لا يكون الحال كذلك مع مخاوفنا التالية: وهي الجبن.

**على سبيل المثال: عندما تفسد البيتزا الجيدة**



تُعتبَر موادُّ كثيرة نتعامل معها يوميًّا في حالة شبه استقرار، مثل المستحلبات والمستعلقات الدوائية والشامبو وصوص السلاطة والصلصة والبهارات التي تُضاف للطعام مثل الكاتشب والمايونيز والماستردة، لكن من بين كل مخاليط الحالة شبه المستقرة التي تُستخدَم كأطعمة، ربما يكون الجبن هو أقدمَها وأكثرها شهرة.

يُعتقَد أن عمل الجبن قد اكتُشِف بالصدفة عندما حاول شخص ما أن يخزن اللبن في كيس مصنوع من معدة حيوان وكنتيجة لذلك أفسدت الإنزيمات الموجودة في المعدة اللبن.[4] بالتأكيد كان هذا الرجل الذي تذوق أول نوع من الجبن رجلًا شجاعًا أو شخصًا جائعًا جدًّا، لكن منذ ذلك الحين اكتسبْنا كجنس بشري ولوعًا بهذا الشيء، لدرجة أنَّ نصيب الفرد في الولايات المتحدة الأمريكية وحدها يُقارب ثلاثين رطلًا من الجبن سنويًّا. ويُنتج الجبن، الذي هو خليط شبهُ مستقر من الزيوت والماء والدهون ومركبات الكالسيوم واللبن، عندما تُحوَّل الإنزيمات التي تُفرَز في معدة العجول ببطء البروتينات المتخثرة إلى موادَّ صلبة. وتتواجد الإنزيمات التي تبدأ عملية هضم البروتين في معدة الثدييات كافة، لكن في أثناء عملية صنع الجبن، يُسمَح للإنزيمات بأن تُنفذ عملية الهضم ببطء تام لدرجة أن كتل المواد الصلبة التي تكون في شبه حالة استقرار تتكوَّن وتُحاط بسائل يحوي دهونًا وسكريات.

وتكون المواد الصلبة هذه هي الخثارة. وشرش اللبن هو الجزء الأكثر سيولة. ويُمكن أن نعتبر الجبن مستعلَقًا شبهَ مستقر لخثارة اللبن في الشرش. ويُحدِّد قوام نوع معين من الجبن على أساس كيفية تقطيع وعزل الخثارة من شرش اللبن، أو على أساس الوقت المستغرَق في تخثر اللبن أو تعتيقه. وعندما لا تنفصل الخثارة من اللبن ولا يكون الجبن قديمًا، ويكون القوام طريًّا يُسمَّى جبنًا غير ناضج، وهو ما يُشبه جبن الكوتدج (الجبن القريش). وعند عصر كل الشرش الممكن من الخثارة وترك الجبن فترة زمنية ليتعتَّق، تنتج قوالبُ صلبة تُسمَّى الجبن الجاف، مثل الجبن البارميزان الجاف. يتضمن التعتيق إتاحة الوقت للبكتريا لإتمام عملية التجبُّن التي تبدؤها الإنزيمات، مما يُفسر لماذا يظل الجبن الجاف بحالة جيدة؛ فهو قد تعرض بالفعل للبكتيريا ونجا. أما الجبن الطري مثل الجبن القريش الذي لم يتعتَّق، فينبغي حفظه في المبرد.

يُفيد عمل البكتيريا أيضًا في كسر أي لاكتوز متبقٍّ، وهو السكر الموجود في اللبن. ويُعاب على الجبن كثيرًا أنه طعام صعب الهضم، لكن في حقيقة الأمر، ينبغي أن يكون الجبن الجاف الذي يُصنَع باستخدام مزارع البكتيريا الحية أسهلَ في هضمه؛ لأنه لا يحوي لاكتوز، فعادة يُنصَح البالغون الذين لا يستطيعون تحمل اللاكتوز بأكل الجبن كمصدرٍ بديل للكالسيوم والبروتين. ويستدعي الأمر التفكير مليًّا في السمعة السيئة التي تشوب الجبن بأنه «يُسبب الإمساك»، التي قد تنبع من الخبرة التي عاينَها أولئك المصابون بحساسية للطعام لفترة طويلة ويكون برازهم رخو القوام؛ إذ يُسبب لهم الجبن إمساكًا

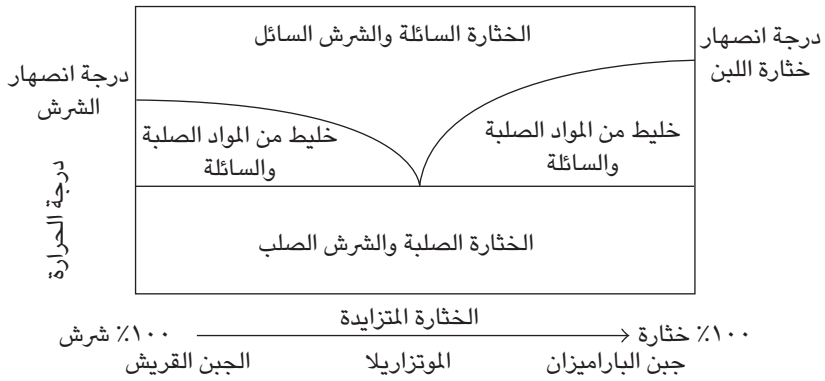
على غير العادة. إلا أن ثمة العديدَ من منتجات الجبن التي يُضاف إليها اللبن مرة أخرى؛ لذا اقرأ البطاقة الخارجية بعناية.[5]

ومن بين الثلاثين رطلًا من الجبن التي يستهلكها الفرد في الولايات المتحدة الأمريكية، يتمثل قدر كبير من الجبن المذاب في طعامنا المحلي الحديث: البيتزا. تتصدر عناوين محلات البيتزا معظم دلائل التليفونات، وهو امتياز لم يحظَ به التفاح ولا الخرشوف ولا السبانخ، ومع أن طبقتَي البيتزا الخارجية المقرمشة والصوص قد تكونان عنصرَين مهمَّين في البيتزا الجيدة، فإنه يجب أن نُقر ونعترف أنه بدون الجبن تكون البيتزا مجردَ شطيرة صوص طماطم مفتوحة للهواء. إن جودة جبن البيتزا وخصائصه المميزة هما أهمَّ ما ينشغل به العاملون في مجال البيتزا.

ما هي أهم خاصية في جبن البيتزا الجيد؟ الطعم، بالطبع، وقدرته على الذوبان بانسيابية أيضًا وفي شكل منتظم دون الانفصال مرة أخرى إلى خثارة وشرش، ولهذا السبب لا تُغطَّى البيتزا بجُبن غير ناضج مثل الجبن القريش أو جبن جاف مثل جبن البارميزان، لكن بجبن شبه طري: وهو الموتزريلا.

وكما ذكرنا سابقًا، تعتمد درجة ليونة أو جفاف الجبن على مقدار الخثارة والشرش؛ ومِن ثَم يُمكننا أن نُوضح المشكلة عن طريق مخطط طوري يُمكننا أن نُطلق عليه Little Miss Muffet (LMM): وهو مخطَّط طوري لخليط خثارة اللبن والشرش.

قبل أن نُفسر مخططنا، يجب علينا أولًا أن نُقر أن LMM ليس مخططَ طورٍ حقيقيًّا، فمخطط الطور الحقيقي للجبن الحقيقي يكون أكثر تعقيدًا، والغرض من مخطط الطور هذا هو أن نُوضح كيف أن سلوك كلٍّ من الانصهار والتجمد يعتمد على التركيب، وليس الغرض أن نُفسر كيمياء الجبن. فعلى سبيل المثال: إذا سُخِّن نوع من الجبن السائل جدًّا، مثل الجبن القريش، في ميكروويف، فإنه سيأخذ بالتدريج شكلًا هلاميًّا متجانسًا من الخثارة والشرش، وعندما يبرد فإنه سينفصل بالتدريج في آخر الأمر إلى طبقات من سائل الشرش الشفاف وسائل الخثارة الأبيض. والشيء الذي ندعوه جبن قريش هو خثارة صلبة مُستعلقة وشبه مستقرة في خثارة وشرش سائلَين، وقد يجب تسخين الجبن الجاف في درجات حرارة عالية لينصهر، وقد يحترق قبل أن ينصهر، لكن إذا سُخِّن تسخينًا هينًا في درجة حرارة أقلَّ من نقطة الانصهار، فقد يبدأ بالتعرق وفرز سائل زيتيٍّ القوام؛ ذلك لأن الجبن الجاف يكون عند شرائه في حالة شبه استقرار متقنة الصنع، ولا يعود الجبن إلى حالته الأصلية عندما يبرد، وبعد طور الانفصال المُستحَث بالحرارة، يتغير قوام الجبن عندما يبرد، حيث يُصبح أكثر هشاشة مشكلًا خيوطًا، إلا أن الأمر الذي نحتاج إليه لكي

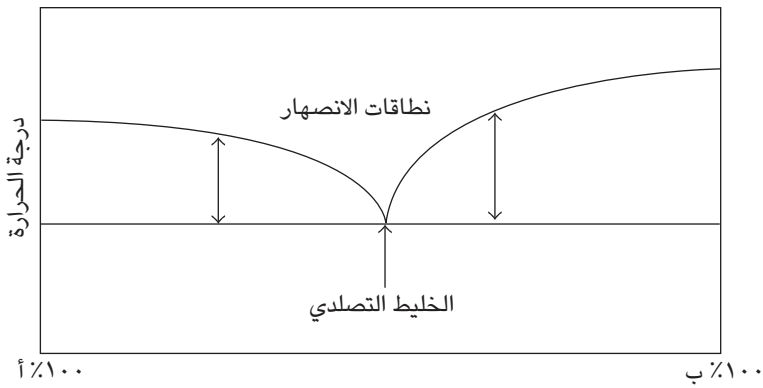



شكل ١٤-٥: مخطط الطور الافتراضي للجبن (LMM).

نحصل على بيتزا جيدة هو أن يكون لدينا جبنٌ لا ينفصل مثل الجبن غير الناضج، ولا يُفرز مادة زيتية مثل الجبن الجاف. وعندما يتعلق الأمر باختيار أفضل جبن للبيتزا، ينجذب الناس نحو جبن شبهِ طري، وهو الموتزريلا؛ لأن الموتزريلا تنصهر بانسيابية وتكون مستويةً فوق سطح البيتزا. ولقد اقتنعنا جميعنا بأن الموتزريلا تنعم بأفضل مذاق لجبن البيتزا؛ لأن هذا ما اعتدناه، في الواقع، أي جبن آخر كان سينجح في القيام بنفس الدور لو أن سلوكَ تغيرِه المرحلي كان أكثرَ ملاءمة.

وثمة ميزة أخرى لاستخدام الموتزريلا، وهي أن البيتزا كخليط تنصهر بسرعة وتجانُس عند نقطة انصهارها؛ وذلك لأنه في معظم المخاليط الصلبة، نجد أن الخليط ينصهر في مدًى معين من درجات الحرارة، بمعنى أن الخليط يبدأ في الانصهار عند درجة حرارة ما، لكن لا يتحول الخليط بأكمله إلى الحالة السائلة ما لم يُسخَّن إلى درجة حرارة نهائية معينة.

إلا أنه يُوجَد بعض المخاليط الانتقالية التي لديها التركيب المباشر حيث تصل إلى نقطة الانصهار على نحو مفاجئ وفوري. ويُطلَق في الكيمياء على الخليط الذي ينصهر عند نقطة انصهار واحدة (نقطة واحدة وليس مدًى معينًا من النقاط مثل باقي المخاليط) «الخليط سهل الانصهار»، ويُطلَق على هذا الخليط في عالم الجبن الموتزريلا. وسبيكة اللحام خليط سهل الانصهار.




شكل ١٤-٦: مخطط طور شامل للخليط الذي يُظهِر سلوك ذوبان لخليط سهل الانصهار مثل سبيكة اللحام.

إلا أن المعضلة التي تُواجه متعهِّدي البيتزا في أمريكا ليست صهر الجبن فحسب، بل تجميده أيضًا، حيث يطلب عشاق البيتزا في أمريكا الحصولَ على وجبتهم المفضلة في التو واللحظة، مما يعني أنها يجب أن تكون في وضع مجمَّد بحيث يسهل إعدادها سريعًا في الميكروويف أو في أفران الحمل الحراري. إلا أن الجبن يُمكن أن يفسد عندما يمر بتغيرات سريعة في الطور مثل تجميده في المبرد وتسخينه في الميكروويف. ويُفضي التجميد الذي يعقبه تسخينٌ سريع إلى جبن هش وخيطي وصُلب القوام، أو إلى جُبن محروق. والحل هو استخدام جبن معالَج وهو خليط من الجبن المطحون وأملاح استحلاب ومثبتات أخرى. يسمح الجبن المعالج للبيتزا بأن تتجمد وأن يُعاد تسخينها أو حتى تُترك خارج الثلاجة على المائدة لفترة مقبولة من الوقت، إلا أن أفضل فترة انتقالية من التجمد إلى الانصهار يُمكِن تحقيقها باستخدام جبن مُقلد مكوَّن من زيت فول الصويا والخثارة.

ولإثبات الاختلاف في سلوك تغير الحالة، اشترِ موتزريلا مبشورة أصلية، وموتزريلا مبشورة مقلدة ممتازة. وبقراءة البطاقة المكتوب عليها المكونات، ستجد علامة تدل على ما إذا كانت هذه الموتزريلا أصليةً أم مقلَّدة، أما إذا كان لديك بعض الشك، فبالنظر إلى قائمة المكونات سيتَّضح الاختلاف بين الاثنتَين. ضع مقدارًا ضئيلًا من كلٍّ منهما على كل جانب من جوانب طبق من الورق واكتب «أصلي»، و«مقلَّد» على الطبق بجانب كل

عينة على حسَبها. سخِّن الطبق الذي يحوي العينات في الميكروويف لمدة من عشرين إلى ثلاثين ثانية. نُلاحظ أن الموتزريلا المقلدة المنصهرة بانسيابية تحتفظ بلونها ومرونتها، أما الموتزريلا الأصلية فتتحول إلى اللون البُني وتُصبح هشة وصلبة بصورة سيئة. بترك عينات الموتزريلا الأصلية والمقلدة، بالخارج على منضدة لمدة يومَين، نجد أن الموتزريلا الأصلية تُصبح هشة وجافة، في حين أن سطح الموتزريلا المقلدة يبدو طازجًا تمامًا كما كان الحال عند إخراجها من عبوتها.

من ثَم إذا كان هدفك هو أن تتغلب على فيزياء تغيُّر الحالة، فإن الموتزريلا المقلدة هي طريقك إلى ذلك، لكنها ليست طريقك إذا أردت أن تحتفظ بالنكهة الغنية، فالكيمياء مختلفة هنا. وللأسف، لقد قادتنا خبراتنا الكثيرة مع الجبن المعالج إلى توقع صلابة في البيتزا التي لن تكون موجودة لو أنها كانت مصنوعة من مكونات غير معالَجة؛ لذا إذا كنت تستثمر في بيتزا جيدة بحقٍّ، وكان هناك متبقٍّ منها لتخزنه، فربما يتعيَّن عليك أن تفعل ذلك بحذر. فعند معالجة الموتزريلا بعناية، فإن كل شيء يكون على ما يُرام، فيجب تدفئة البيتزا المجمدة قبل إعادة تسخينها، ويجب إعادة تسخينها في درجة حرارة منخفضة في الميكروويف، أو ربما من الأفضل في فرن دافئ، لكن حتى مع كل هذه التحذيرات، قد يكون هناك تغيرات في القوام والمذاق؛ لذا من الأفضل أن تتمتع بالبيتزا بأكلها وهي طازَجة وبحالة جيدة، وإذا كان عليك أن تُجمدها، فلا تُحبط إذا فسدت هذه البيتزا الجيدة.

تبقى معضلة أخرى ألا وهي أنه ما من مقدار من المُثبتات يُثبت، وعليه، ستجف حتمًا البيتزا إذا لم يُحكَم غلق الكيس الذي يحويها. وأما غير المطلعين على مخطط الطور، فقد يبدو تجفيف الطعام في المجمد غريبًا عليهم، لكن بالنظر إلى مخطط طور الماء، نرى أنه في درجة الحرارة ٣٢ فهرنهايت (٠ درجة سيليزية)، وهي درجة حرارة معظم المجمدات، يكون الجليد الصلب في توازن مع بخار الماء، مع أن ضغط البخار أقلُّ من ضغط الجو؛ ومن ثم يتبخر الماء في المجمد، لكن لأن المجمد مغلق معظم الوقت، قد نظل نتوقع أن يكون انخفاض الماء بأدنى حدٍّ ممكن. إلا أن الصعوبة تكمن في أن المجمدات الخالية من الثلج تحتفظ بخلوِّها من الثلج بتدوير الهواء وتجميع بخار الماء قبل أن تأتي له الفرصة ويستقر في جوانب المجمد في هيئة ثلج. بكلمات أخرى، نظرًا إلى أن الماء يُزال باستمرار بسبب دوران الهواء، لا يكون الماء الذي في المجمد في حالة اتزان، فهو لا يكون في حالته السعيدة، الحالة التي يكون متوازنًا فيها مع بعض الماء في الحالة السائلة وبعض

الماء في الحالة البخارية. ينتج المزيدُ من بخار الماء من الأطعمة نظرًا إلى أن النظام يُحاول أن يستعيد التوازن، وهذا الدافع لإحداث التوازن يُفسِّر سبب تضاؤل مكعبات الثلج ببطء في المجمد، ويُفسِّر أيضًا سبب «فساد» البيتزا الموضوعة في كيس غير محكم الغلق، وبذلك لا تظل البيتزا على حالها إلى الأبد. ويُعَد أخذ ما يحدث عندما ينشر أحدهم ملابسه لتجفَّ في قارة أنتاركتيكا بعين الاعتبار، امتدادًا مشوقًا لهذا التوضيح المتعلِّق بالتوازن الفيزيائي، فهل تجف هذه الملابس؟ نعم تجف، ما دام الهواء يعمل على إزالة بخار الماء الذي يُحيط بالملابس المتجمدة مباشرة؛ فإن رقاقات الثلج في الملابس الداخلية سوف تستمر في التبخر لاسترداد التوازن.

أما النوع الآخر من التوازن الذي سنبحثه الآن، فيُطلَق عليه التوازن الكيميائي. والتوازن الكيميائي ليس أقلَّ شيوعًا لكن لا يُمكن التعرف عليه بنفس القدر من السهولة دائمًا، فهو بالتأكيد أكثرُ تعقيدًا، لكن سواء كان معقدًا أم لا، فإننا متجهون إليه الآن.

# تجربة ١٥: عندما تتكافأ جميع الأشياء

دون حدوث أي تغير موضوعي أيًّا كان هذا التغير، يحل التنوع محلَّ الرتابة والملل. مضيفه وأهل مضيفه ... بدءوا في تمييز أنفسهم كما يحدث في العمليات الكيميائية.

توماس هاردي، «تس سليلة دربرفيل»، ١٨٩٠

ارتدِ نظارة الأمان الواقية. خذ محلول كبريتات النحاس كما هو معدٌّ في «قائمة المشتريات والمحاليل»، وصب نحو بوصتَين في كوب زجاجي شفاف أو كوب بلاستيكي شفاف يُمكن

الرؤية من خلاله بوضوح. ضع في زجاجة مياه غازية شفافة نصف كوب من الماء (١٢٠ مليلترًا)، ثم استخدم القُمع لتُضيف ملعقتَين كبيرتَين من بيكربونات الصودا إلى الماء. رج المحلول. صبَّ من اثنَين إلى ثلاث بوصات (٥سم) من الخل في زجاجة صودا شفافة أخرى في أثناء الوقت المنقضي حتى يستقر المحلول.

أضف من ثلاث قطرات إلى أربع قطرات من محلول بيكربونات الصودا إلى كبريتات النحاس، وتأكد من عدم انتقال بيكربونات الصودا غير المذابة إلى المحلول وأنت تُضيف القطرات. يُمكنك تجنُّب انتقال بيكربونات الصودا غير المذابة باستخدام قطارة العين أو ماصة يُمكنك أن تسحب المحلول من خلالها بسد إحدى طرفَيها بإصبعك حتى يُمكنك سحبُ بعض القطرات من أعلى المحلول، وكن حذرًا من أن تُثير الراسب في قاع الزجاجة.

بمجرَّد أن تُضيف بيكربونات الصودا إلى محلول كبريتات النحاس، يتكون راسب خفيف ملون بلون باهت ويترسب في قاع الكوب. ولأنك كنت حذرًا في عدم إضافة أي موادَّ صلبة، يجب أن يكون هذا الراسب هو ناتجَ تفاعل كبريتات النحاس مع بيكربونات الصودا الذي هو كربونات النحاس.

أيون النحاس + أيون الكربونات ⟵ كربونات النحاس (الصلبة)

إذا أضفت مرة أخرى قليلًا من قطرات محلول بيكربونات الصودا، تُلاحظ أن حجم الراسب يزداد، ويظل المحلول الذي يعلو الراسب ملونًا باللون الأزرق الذي يُشير إلى وجود كبريتات النحاس التي لم تدخل في التفاعل.

الآن أضف العديد من قطرات الخل إلى الكوب، ثم لاحظ حدوث الفوران الذي يُوضح زوال الكربونات من المحلول. تذكر أن الخل حامضي وأن بيكربونات الصودا قاعدية؛ لذا فهما يتفاعلان معًا ليُكوِّنا حامض الكربونيك الذي يذوب على التوالي إلى ماء وفقاعات ثاني أكسيد الكربون.

خل + بيكربونات الصودا ⟵ ثاني أكسيد الكربون + ماء

إذا لاحظت بعناية فسوف ترى أن الفوران يحدث على سطح المحلول بمجرد إضافة قطرات الخل. استمر في إضافة قطرات الخل إلى أن يتوقف المحلول عن الفوران. قد تحتاج إلى تقليب المحلول قليلًا في الكوب بعد كل مرة تُضيف فيها قطرات الخل، وعندئذٍ ينبغي أن يبدأ الراسب الذي في القاع في الاختفاء بسبب إضافة الخل وزوال أيون الكربونات.

كربونات النحاس + الخل ⟵ أيون النحاس + ثاني أكسيد الكربون + ماء

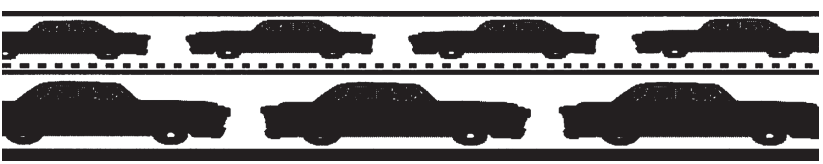
وعند توقف الفوران واختفاء الراسب، أضف محلول بيكربونات الصودا مرة أخرى إلى أن يتكون الراسب. عندئذٍ أزل الراسب مرة أخرى عن طريق إضافة قطراتِ الخل. وهكذا تستمرُّ عملية التقدم والتراجع ما دمتَ مستمرًّا في إثارة الوضع عن طريق إضافة أو إزالة أيون كربونات بإضافة الخل (أو حتى يُصبح المحلول مخففًا للغاية، لكن من المحتمل أن يمتلئ الكوب قبل حدوث هذا).

عند إضافة بيكربونات الصودا في بادئ الأمر، تخرج كربونات النحاس من المحلول حتى يحدث توازن للنظام، بمعنى أن النظام أصبح مستقرًّا ومتوازنًا مع أقصى كميات يُمكن أن يتشبَّع بها المحلول من أيونات النحاس والكربونات. غير أن التفاعلات الكيميائية ليست شوارعَ ذاتَ اتجاه واحد، لكن معدل التدفق يحدث في الاتجاهَين؛ ومِن ثَم عندما حدث خلل لهذا النظام المتعادل عن طريق إزالة بعضٍ من أيونات الكربون بالسماح لها بالتفاعل مع الخل، حدث التفاعل العكسي، واستعاد النظام توازنه عندما أُعيد بعضٌ من الراسب إلى المحلول مرة أخرى، وعندما أُضيف المزيد من أيونات الكربونات، استجاب النظام عن طريق تكوين المزيد من الراسب مرة أخرى.

إن فهم عملية تقدم وتراجع التوازن الكيميائي في غاية الأهمية لفهم فنِّ التلاعب في التفاعلات الكيميائية، وهو موضوع المناقشة التالية.

الفصل الخامس عشر

# الاتزان الكيميائي:
# الكيمياء الثنائية الاتجاهات



جلسَت ليلي محدقة وهي غارقة في التفكير في الدخان الخارج من سيجارتها الذي يأخذ شكل حلقات زرقاء اللون.

ثم نطقت أخيرًا قائلة: «إنه يبدو لي أنك قضيت قدرًا لا بأس به من الوقت مع العنصر الذي تستنكره.»

استقبل سيلدن هذه اللطمة دون أن يرتبك، وردَّ قائلًا: «أجل، لكن الخيمياء الحقيقية تكمن في القدرة على إرجاع الذهب مرة أخرى إلى شيء آخر، وهذا هو السر الذي خفي على معظم أصدقائك.»

إيديث وارتون في روايتها
«بيت المرح»، ١٩٠٥

كان الغرض من التجربة السابقة، «عندما تتكافأ كل الأشياء»، هو إيضاح ثلاثة أمور غاية في الأهمية والحساسية فيما يتعلق بالتفاعلات الكيميائية ألا وهي: أولًا: مع أننا غالبًا

ما نرمز للتفاعلات الكيميائية بأسهُم صغيرة، تشير إلى اتجاه التفاعل من المتفاعلات إلى النواتج؛ كالآتي:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

فإنه في حقيقة الأمر، كما رُجِّح مرات عديدة في المناقشات السابقة، فإن التفاعلات الكيميائية هي تفاعلات ثنائية الاتجاهات، بمعنى أنها تفاعلات قابلةٌ للارتداد مرة أخرى. إذا كان من الممكن أن تُصبح أحدُ المواد المتفاعلة مادةً ناتجة؛ فمن ثَم يكون من الممكن للمادة الناتجة أن تُصبح مادةً متفاعلة أيضًا. ولذلك، مع أننا لم نُؤكد على هذا الجانب في التفاعلات الكيميائية حتى الآن، فإنه كلما حدث تفاعل كيميائي كان من الطبيعي أن يُوجَد خليطٌ من المتفاعلات والنواتج التي يُطلق عليها «خليط الاتزان».

في بعض الأحيان يكون من المؤكد أن التفاعل يسير باتجاه النواتج في المقام الأول، فعلى سبيل المثال، عندما ينفجر البارود، فغالبًا ما يتحوَّل بأكمله إلى نواتج، واللفظة «غالبًا» هي ظرف في غاية الأهمية هنا؛ إذ إن بقايا البارود ستزيد من شر الكثير من المجرمين وفي أوقات أخرى ربما يظلُّ مزيج التفاعل كما هو؛ إذ تبقى موادُّ المتفاعلات كما هي دون أن تدخل في تفاعل، وهو ما قد نُواجهه في طريقة هابر التي تُستخدَم لتحضير النشادر، وهو ما يُمكن أن نسترجعه من مناقشتنا لتفاعلات الحالة الغازية؛ إذ كان كلٌّ من غازَي الهيدروجين والنيتروجين حوله، لكن تعيَّن عليه أن يبذل قصارى جهده كي يخلطهما معًا لعمل النشادر. غير أن تفاعلاتٍ عديدةً أخرى تُشبه تفاعلات اللبن المُخثَّر، اللبن المُخثر هو اللبن الذي تتكون فيه الخثارة التي يُمكن صنعها عن طريق إضافة الخلِّ إلى اللبن، فما إن يُضاف الخل حتى تتكون الخثارة في التو، لكن يتبقى بعض اللبن والخل دون أن يتفاعلا معًا، ويحدث هذا التفاعل بسرعة شديدة لكنه بمجرد أن ينتهي، تظل نِسَب خثارة اللبن واللبن غير المتخثر والخل كما هي على مر الوقت؛ إذ يصل التفاعل إلى حالة من الاتزان.

النقطة الثانية التي أردنا أن نُوضحها من تجربة «عندما تتكافأ كل الأشياء» هي أن قولنا «إن التفاعل قد وصل إلى حالة الاتزان» ليس بنفس معنى قولنا «لا يُوجَد مزيدٌ من التفاعلات». في الواقع، تميل مَخاليط الاتزان إلى أن تكون نشطة للغاية — مع استمرار تحوُّل المتفاعلات إلى نواتج والنواتج إلى متفاعلات مرة أخرى. ويُمكن توضيحُ هذه الخاصية الحركية للنظام الكيميائي بطريقة مباشرة كالآتي: اقطع قطعة من ورق

الحمام وضعها على حافة كوب يحوي القليل من الماء بحيث يتدلَّى طرَف قطعة الورق في الماء. يرتفع الماء في قطعة الورق لكن إلى حد معين إذ يصل كلٌّ من الماء وورق الحمام في آخر الأمر إلى حالة من الاتزان بين جذب الورقة للماء والانجذابات التي تحدث بين جزيئات الماء نفسها، والجاذبية التي تشدُّ الماء إلى أسفل. انتظر عشر دقائق حتى تسمح للورقة أن تتشبَّع بأكبر قدر ممكن من الماء، ثم أضف قطرة ألوان الطعام في بُقعة بعيدة تمامًا عن قطعة الورقة المتدلية في الماء، نجد أن لون الطعام ينتشر عن طريق الإنتروبيا (كما برهنَّا في الفصل الذي يدور حول الديناميكا الحرارية)، وفي النهاية يتسلل اللون لأعلى إلى الورقة أيضًا. يُمكن للون أن يتسلق إلى أعلى للورقة لأن جزيئات الورقة في حالة الاتزان تُغيِّر أماكنها دائمًا. وبعض جزيئات الورق تُصبح جزيئاتٍ ملطخةً بالماء وتُصبح جزيئات الماء هي جزيئات الورقة. وعند إضافة الصبغة تجلب جزيئات الماء الجديدة التي تحل محل الجزيئات القديمة الصبغة معها أيضًا إلى الورقة.

لكن مع كل هذا النشاط الحادث، فإن النظام لا يزال يحتفظ بالاتزان؛ لأن المتفاعلات تتحول إلى نواتج والنواتج تتحول إلى متفاعلات بمعدلات تحفظ الكميات النسبية نفسَها من المتفاعلات والنواتج، ونُطلِق على هذا النوع من الاتزان «الاتزان الديناميكي». ومع أن التأثير النهائي قد يبدو بلا تغيير فإنه يُحفَظ ثابتًا هكذا عن طريق معدلات التغيير الثابتة. ويُمكن أن نُشبِّه ذلك بما يحدث في حركة المرور، فعند مشاهدة إحدى إشارات المرور من طائرة هليكوبتر نجد أن كثافة السيارات المزدحمة في إحدى الطرق العامة تبدو ثابتة تمامًا، لكن ذلك في الواقع نتيجة للتغيير الثابت؛ فثمَّة سيارات تدخل وتخرج طوال الوقت.

ولنتطرق الآن إلى النقطة الثالثة من النقاط التي خلصنا إليها من تجربة «عندما تتكافأ جميع الأشياء»، فنتيجةً لكل هذا النشاط — الذي يتمثل في تحول النواتج إلى متفاعلات والمتفاعلات إلى نواتج — نستنتج أن التفاعلات الكيميائية تتَّسم بالمرونة؛ فهي يُمكنها أن تستجيب للتغييرات، وتتكيَّفَ طبقًا لها. فإذا أُزيلت النواتج، يستجيب النظام لذلك بتكوين المزيد من النواتج حتى يحدث الاتزانُ مرة أخرى. وإذا أُضيفت المتفاعلات، يكون رد فعل النظام هو تكوينَ المزيد من النواتج. وقد يتطابق هذا مع الاتزان الحادث في التشبيه السابق بحركة المرور بين السيارات في الطرق الجانبية والسيارات في الطريق العام:

السيارات في الطرق الجانبية ↔ السيارات في الطريق العام

وتُمثل السيارات في الطرق الجانبية المتفاعلاتِ، والسياراتُ في الطريق العام النواتجَ، ويُشير السهم هنا إلى الطريقَين؛ لأن السيارات تتدفق إلى الطريق العام وتخرج منه، ويكون نوع الاتزان هنا هو اتزانًا حركيًّا وانعكاسيًّا.

وفي الصباح الباكر يُمكن أن يُوجَد عدد قليل من السيارات في الطرق الجانبية وقليلٌ من السيارات في الطريق العام، لكن في السابعة والنصف صباحًا قد يتزايد عدد السيارات في الطرق الجانبية على حين غِرَّة.

**السيارات في الطرق الجانبية** ↔ السيارات في الطريق العام

وعلى الفور يستجيب النظام ويتزايَد عدد السيارات في الطريق العام حتى يحدثَ الاتزان مرة أخرى.

**السيارات في الطرق الجانبية ↔ السيارات في الطريق العام**

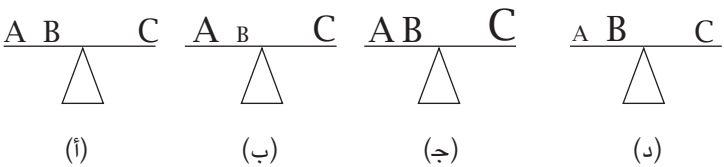
وبالرجوع إلى تجربتنا الكيميائية السابقة، نجد أن لدينا موقفًا حركيًّا وانعكاسيًّا أيضًا؛ إذ يتكون راسبُ كربونات النحاس لكنه ذاب مرة أخرى أيضًا. فعندما أضفنا الخل، فإننا أزلنا بعض الكربونات من الاتزان. والمادة الصلبة المذابة مرة أخرى ليست إلا محاولةً لاسترجاع تركيزات متزنة لكلٍّ من النواتج والمتفاعلات.

أما قدرة النظام الكيميائي على الاستجابة للضغط فهي مُعبَّر عنها في قاعدة لوشاتيليه التي سُمِّيت على اسم العالم الفرنسي الشهير الذي عاش في أوائل القرن العشرين، هنري لوشاتيليه.[1] فأينما وُجِد نظام كيميائي في حالة اتزان مضغوطًا، فإن النظام سوف يتغير بطريقة تُقلل من هذا الضغط، وقد يحدث هذا الضغط من جراء حدوث تغيير في كميات النواتج أو المتفاعلات، مما يعني أنه يُمكننا أن نُلاطف المتفاعلات لإنتاج المزيد من النواتج حسب الحاجة، لنرَ تفاعلًا عامًّا على سبيل المثال:

$$A + B \leftrightarrow C$$

حيث A، B مادتا التفاعل، وC الناتج.

ويُمكن أن نستخدم التشبيه التقليدي المستخدم للأرجوحة هنا، ولن نتردد في استخدامه لأن هذه الصورة تخدم الغرض جيدًا. عندما يكون النظام متزنًا، تكون الأرجوحة في وضع اتزان. ويُبرز شكل ١٥-١(أ) الموقفَ.




شكل ١٥-١: التوازن يُمكن أن نراه كما لو كان أرجوحة في وضع اتزان، وعندما يتغير أحد الطرفَين، يعدل الطرف الآخر من نفسه كي يسترجع التوازن.

إذا زدنا من كمية A، يستجيب النظام باستهلاك B لتكوين C؛ ومن ثم يستعيد النظام توازُنَه، ويُوضح هذا الموقفَ الشكل ١٥-١(ب).

وحتمًا ستكون هذه الحيلة مفيدة إذا كنت تُدير عملًا الغرض منه إنتاج المادة C. أما إذا كان الغرض هو إنتاج المادة B، فثمة حيلتان يُمكنك إجراؤهما؛ أولهما: يُمكنك زيادة C كي تدفع للحصول على المزيد من المادة B، وهو ما سيعمل على الحصول على المزيد من A أيضًا. ويُوضح هذا الموقفَ شكلُ ١٥-١(جـ) وقد ذكرنا في مناقشتنا حول المواد المستخدَمة في إزالة عسر الماء أنه بعدما تتشبَّع تلك المواد بأيونات الكالسيوم، يُمكن إزالة هذه الأيونات عن طريق الغسيل العكسي باستخدام كمية كبيرة من الصوديوم. وتُعَد عملية الغسيل العكسي هذه مثالًا على زيادة المادة الناتجة لتغيير اتجاه الاتزان للخلف باتجاه المتفاعلات.

وكبديل عن هذا، يُمكنك إزالة بعض من المادة A، مما قد يُسبب تغيُّرَ اتجاه التفاعل نحو المتفاعلات في محاولة لاسترجاع الاتزان، وفي حين تُضاف المادة A، يتكون المزيد من المادة B، وتُستنفَد المادة C، ويوضح هذا الموقفَ شكل ١٥-١(جـ). ولطالما استُخدِمت كلٌّ من تلك التقنيات في أوقات عديدة في التطبيقات الصناعية، فهي ذاتُ فائدة كبيرة للغاية.

ومن الممكن أن يحدث أيضًا التوتر في الاتزان بسبب التغيير في كمية الطاقة المتاحة، فإذا كان التفاعل يتطلب طاقة، فمن الممكن أن يُنظَر إلى الطاقة على أنها أحد المتفاعلات. عندما أذبنا بيكربونات الصودا في الماء، لاحظنا أن المحلول أصبح باردًا، ورأينا أيضًا أن تدفئة محلول بيكربونات الصودا ساعدت على زيادة قابلية بيكربونات الصودا للذوبان.

حرارة + بيكربونات الصودا + ماء ↔ محلول بيكربونات الصودا

وعند أخذ هذه الملاحظة بعين الاعتبار إلى جانب قاعدة لوشاتيليه، يُمكننا التحكم بالتفاعلات بالحرارة، فإذا كان التفاعل يتطلَّب وجود حرارة، فإن إيجاد الحرارة سوف يُغيِّر اتجاه التفاعل ليسير في اتجاه النواتج.

**حرارة** + بيكربونات الصودا + ماء ↔ **محلول بيكربونات الصودا**

ويُمكننا أن نُغير اتجاه الاتزان إلى الطرف الآخر عن طريق تبريد المحلول، الذي هو في جوهره عملية إزالة للحرارة. عندما تركنا محلول بيكربونات الصودا الدافئ ليبرد، نتج المزيد من بيكربونات الصودا من المحلول.

حرارة + **بيكربونات الصودا** + **ماء** ↔ محلول بيكربونات الصودا

والآن، بعد أن برهنَّا على أن التفاعلات الكيميائية هي تفاعلات حركية وانعكاسية؛ ومِن ثَم يكون التفاعل الكيميائي خليطًا متزنًا للمتفاعلات والنواتج. وقد شاهدنا أيضًا أن التفاعل يميل بقوةٍ في بعض الأحيان إلى أن يسير في اتجاه النواتج (كما في تفاعل البارود)، وأحيانًا في اتجاه المتفاعلات (كما في طريقة هابر لتخليق النشادر من النيتروجين والهيدروجين). غير أننا لم نُجِب عن هذا السؤال: لماذا يميل التفاعل في بعض الأحيان إلى السير في اتجاه المتفاعلات وفي أحيان أخرى في اتجاه النواتج؟ وما هو الشيء الذي يُحدِّد الاتجاه الذي سيَركَن إليه التوازن؟

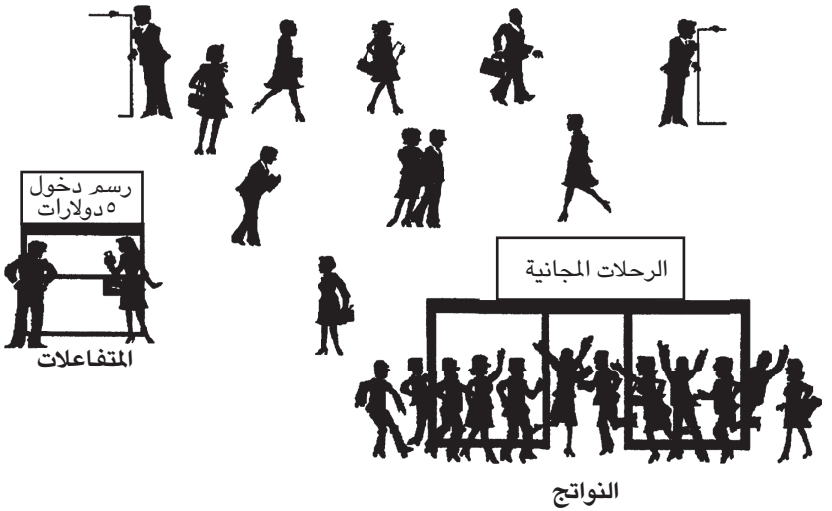
الطاقة هي أحد العوامل المحددة، فالميل الطبيعي للأنظمة الكيميائية، وكذلك الحال في الأنظمة الفيزيائية الأخرى، هو الاتجاه إلى حالة أدنى من الطاقة. فعلى سبيل المثال تعادل الأحماض القواعد. وتضعف البطاريات. فعندما تتساوى العوامل الأخرى كافةً، فإن التفاعل سيُعدِّل تلقائيًّا من وضعه كي يُقلل من طاقته ويُفرغ الطاقة الزائدة في العملية، لكننا رأينا حامض الستريك يتوغَّل في المحلول بمنتهى التلقائية، فبرد الخليط الذي امتص الطاقة؛ ومن ثم لا تكون الطاقة الأدنى هي الأمرَ الوحيد الذي يُعتَدُّ به. ولكي نفهم العامل الثاني الذي يلعب دورًا هنا، ضع نُصب عينَيك الأمثلة التي طرحناها في بداية هذه المناقشة، لقد سار أحد التفاعلات في اتجاه النواتج على نحوٍ يكاد يكون تامًّا وهو تفاعل البارود، في حين ظل الآخر على نحوٍ شبهِ تام كمتفاعلات، كما الحال في عملية تخليق النشادر من النيتروجين والهيدروجين. فالتفاعل الذي سار في اتجاه النواتج، كوَّن نواتجَ في الحالة الغازية. والتفاعل الذي ظل في حالة المتفاعلات اشتمل على متفاعلات أكثرَ

في الحالة الغازية. ما المثير في الحالة الغازية إذن؟ وما الذي تتمتَّع به الحالة الغازية دون الحالات الأخرى؟ المثير الذي تتمتع به الحالة الغازية هو الأنتروبيا؛ إذ تتمتع بالأنتروبيا الفياضة. وما يُحدد وضع الاتزان في آخر الأمر، ما إذا كان يميل إلى اتجاه المتفاعلات أم النواتج أم فيما بينهما هو المقايضة التي تحدث بين الطاقة والأنتروبيا، وهو الموقف الذي يُمكن أن يُشبَّه بمعرِض تجاري.

لقد انتشرت جدًّا المعارِض التِّجارية في عالمنا المعاصر لدرجة أنه يُوجَد الآن مَعارضُ تِجارية لأي شيء ولأي أحد، بداية من مُحبي الحاسبات الآلية إلى عُشاق المخيمات، ومن الكيميائيين إلى موظَّفي الإصلاحيات. وفي المعارض التجارية، وكذلك في المعارض التي تُقام في المراكز الكبرى المتخصصة في هذا الأمر، يُقيم الناس الذين يتخصصون في تجارة سلعة معينة أو يخدمون فئة معينة من الناس أكشاكًا لعرض بضائعهم. ولأن الغرض من المعرض التجاري هو فعليًّا الإعلانُ عن السلعة أكثرَ من بيعها، فإن العاملين يقيسون نجاحهم بعدد الناس الذين زاروا أكشاكهم، وقد يُقدم البائعون هدايا لجذب الزوار إلى أكشاكهم، مثل أقلام وقصافات أظافر وحافظات أوراق وما إلى ذلك. وفي معرضنا التجاري للاتزان سوف نتخيل معًا شركةً صغيرة وجريئة للغاية قرَّرت أن تُقدم رحلات مجانية كهدايا لأي أحد يزور كشكها، والآن لنرَ ما يُمكن أن يترتب على هذا الفعل.

بادِئَ بَدْء، لنعتبر أن الكشك ذا الهدايا المجانية يُمثِّل حالة الطاقة المنخفضة، وسنضع هذا الكشك في جانب النواتج من صالة العرض. ولنتخيل الآن كشكًا آخر يكون رسم دخوله خمسة دولارات، وسوف نُطلق عليه حالة الطاقة المرتفعة، وسوف نضعها في جانب المتفاعلات في صالة العرض. ويُوجَد فيما بينها وفي أنحاء أخرى أكشاكٌ لا تُقدم هدايا ولا يتطلب دخولُها رسمَ دخول. والآن سوف نفتح الأبواب وندع الزوار يدخلون. وكما يُمكن أن نتخيل، على الفور سينجذب الكثير من الناس إلى كشك الطاقة المنخفضة للحصول على رحلاتهم المجانية، ويتضح الموقف من شكل ١٥-٢. والتفاعل الممثَّل هنا يميل إلى اتجاه النواتج؛ لأنه عند الذَّهاب إلى النواتج تنخفض الطاقة في شكل استرخاء. فالرحلات المجانية تُقلل الطاقة.

غير أنه لن يكون بإمكان كل الناس الذهابُ إلى كشك الهدايا المجانية؛ لأنه لا يُوجَد مساحة حول الكشك كافية لتسع كل الناس، بعض الناس سوف يُدفَعون إلى الخارج وسوف يجدون أنفسهم مدفوعين نحو أكشاك أخرى. سوف ينتشر الناس عبر كل أنحاء صالة العرض؛ لأن الناس لا تُحبذ أن تكون متكدسة معًا، وسوف نُطلِق على هذه الرغبة في الانتشار بعشوائية «الأنتروبيا».




شكل ١٥-٢: الحضور عند المعرض التجاري يميل إلى التجمع عند الكشك الكبير الذي يُقدِّم الرحلات المجانية؛ لأن هذا الكشك يَعِدُ برحلات الاستجمام المقلِّلة للطاقة.

إذا كنا نُمسك بأيدينا حَفْنة من السكر فمن المؤكد أن ثمة جزيئًا من السكر في قبضة يدِنا، لكن إذا ألقينا هذه الحَفنة في المحيط، فإن جزيئات السكر سوف تنتشر إلى أربعة أطرافِ الكرة الأرضية. وهذا الدفع الذي تُثيره الأنتروبيا يُمكن أن يدفع بعض المتفاعلات على الأقل كي تمتصَّ مقدارًا ضئيلًا من الحرارة وتصعد في صورة طاقة. ولأن الناس لديهم رغبةٌ في الانتشار فإن بعضهم سوف يذهب إلى كشك الطاقة المرتفعة، ولعل واحدًا أو اثنَين سيدفع الدولاراتِ الخمسةَ رسم الدخول. وتتحكم رغبة الحضور في تقليل طاقتهم والانتشار في معدل الاتزان النهائي الذي حدث بين الناس في كشك النواتج، والناس في كشك المتفاعلات، لكن الميل سيكون إلى اتجاه النواتج.

دعونا الآن نُدخِل بعض التعديلات الطفيفة على الموقف، لنجعَلْ مساحة كشك الرحلات المجانية صغيرةً للغاية، ومساحة كشك الدولارات الخمسة كبيرة جدًّا. نجد أن عددًا قليلًا من الناس يذهب إلى كشك الرحلات المجانية؛ لأن الناس يمقتون الانحشار معًا في مكان صغير، ويُفضِّلون التحرك بحرية في مكان فسيح؛ لذا سيجد عددٌ كبير من الناس أنفسَهم في كشك الدولارات الخمسة الفسيح، مع أنه سيُكفلهم خمسة دولارات؛

شكل ١٥-٣: إذا تكدس كشك الهدايا المجانية بالناس، فإن الناس سوف ينجذبون إلى الكشك الذي سيسمح لهم بالتحرك بحُرية بالرغم من التكلفة العالية.

ومن ثَم سوف يُحفظ معدَّل توازن الموقف. وسيميل هذا الاتزان إلى اتجاه المتفاعلات كما هو موضح في شكل ١٥-٣.

وتتصرف التفاعلات الكيميائية بهذه الطريقة نفسها أيضًا. في حال حدوث الاتزان تُوزِّع الجزيئات نفسها بين النواتج والمتفاعلات بطريقةٍ تسمح لها بتقليل الطاقة إلى أدنى حدٍّ وتعظيم الوصول إلى أقصى حد من الأنتروبيا، لكن ثمة مقايضة دائمًا، ومع ذلك إذا لم تكسب الأنتروبيا الكثير في كِلا الموقفَين، فإن الطاقة الأدنى هي التي ستكسب الجولة. أما إذا كان هناك الكثير من الأنتروبيا لتُكتسَب، فحتى التفاعلات التي تتطلب لحدوثها طاقة يُمكن أن تحدث تلقائيًّا.

وبالطبع تتضمن بعض التفاعلات كل هذه المقومات؛ ففي الاحتراق الذي يحدث في محركات السيارات، يُقلل الجازولين الطاقة عن طريق طرد الحرارة ويَزيد الأنتروبيا عن طريق التحول إلى غازات، وتتسبَّب الطاقة المتولدة في تمدد الغازات، بل وزيادة الأنتروبيا أيضًا.

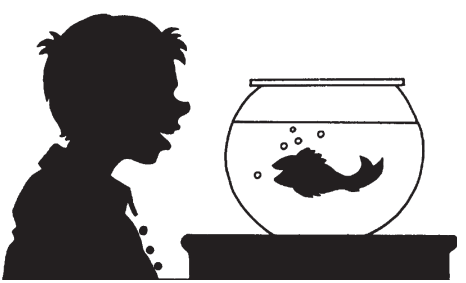
جازولين + أوكسجين ⟵ ثاني أكسيد الكربون + ماء

من ثَم تكون النواتج الأساسية الخارجة من الأنبوب الخلفي (شكمان السيارة) هي ثاني أكسيد الكربون والماء — مع القليل من السخام وأكسيد النيتروجين كما ذكرنا من قبل.

من ثم نكون قد بلَغنا مرادنا، وعليه يُحدَّد الوضع النهائي للاتزان عن طريق الرغبة في تقليل الطاقة وتعظيم الأنتروبيا وهو أقصى حالة من استقرار النظام، وتحدث المقايضة بين الطاقة والأنتروبيا. وقد نتذكر من مناقشتنا للديناميكا الحرارية أننا أطلقنا على هذه المقايضة مصطلح «الطاقة الحرة». وعندما لا يتوفر المزيد من الطاقة الحرة لكي تُطلَق أو لكي تعمل، فإننا نكون قد وصلنا إلى حالة مُرضية من الاتزان الساكن.

ودائمًا يُحقق الاتزانُ النجاح، ومع أنه قد يُحرَم من أن يكون له تأثيرٌ لوقتٍ ما، بل وقد يدخل النظام في حالة شبه استقرار، فإن التوازن يسود في نهاية الأمر. وتحظى التفاعلات الكيميائية بالمقدرة على الاستجابة لحالة الطاقة المنخفضة والأنتروبيا المرتفعة والتأقلم معهما؛ وذلك لأن التفاعلات الكيميائية تتسم بالقدرة على التحرك والانعكاس. وتعني القدرة على التحرك والانعكاس أن التفاعلات الكيميائية يُمكن أن تكون غاية في المرونة، ويُمكن التأثير فيها للحصول على المزيد من النواتج أو الرجوع إلى متفاعلات مرة أخرى. وتُعَد مثل هذه الممارسات أمرًا حتميًّا في الصناعة والمختبرات الكيميائية. غير أنها تحظى بأهمية تفوق كل ذلك، فالاتزان يخصنا جميعًا في حياتنا اليومية ما دمنا نحيا ونتنفس.

**على سبيل المثال: الشهيق والزفير**



يلعب الاتزان أدوارًا كثيرة في الأنظمة الحيوية، وأحد هذه الأدوار الذي قد يكون أكثر اعتيادًا لنا هو ذلك الدور الذي نختبره من ألف إلى ثلاثة آلاف مرة في الساعة الواحدة، على مدار أربع وعشرين ساعة يوميًّا — سواءٌ كانت السماء تُمطر أو الثلوج تتساقط، سواءٌ

كنت نائمًا أو مستيقظًا — وسنتناول الآن الاتزان الذي يُحدِثه التنفُّس. وهنا سوف نعتبر الهيموجلوبين الخاليَ من الأوكسجين، والأوكسجين هما المتفاعلات، ومركب الهيموجلوبين المحمَّل بالأوكسجين هو الناتج. ويُمكن أن نوضح هذا التفاعل بالمعادلة الآتية:

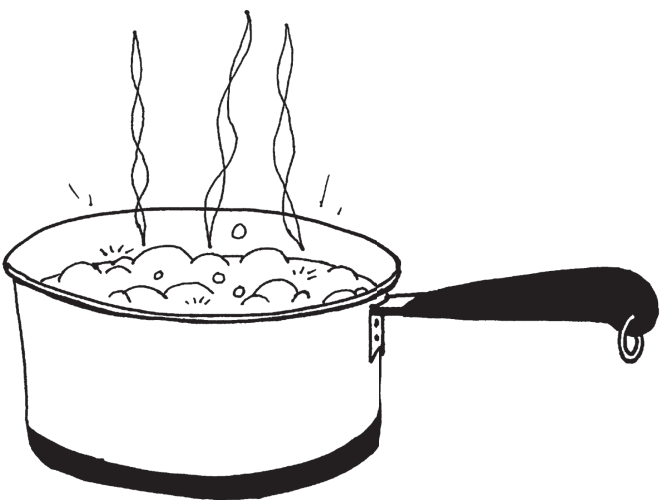
$$Hb + O_2 \leftrightarrow HbO_2$$

ونجد داخل الرئتَين أن الأوكسجين الزائد في الهواء الغني بالأوكسجين يساعد في تكوين المزيد من مركب الهيموجلوبين والأوكسجين $HbO_2$. عندئذٍ ينتقل الدم المحمل بمركب الهيموجلوبين والأوكسجين إلى الخلايا التي نضب منها الأوكسجين، وإذا وُجدت خلايا بعينها تُعاني قلة الأوكسجين، فإن الأوكسجين يتدفق إليها.

وعندما يحوي الغلاف الجوي كميةً أقلَّ من الأوكسجين، كما هي الحال في الارتفاعات الشاهقة، فإنه قد لا يتدفَّق القدر الكافي من الأوكسجين إلى الرئتَين. وعندما لا تحصل الرئتان على حاجتهما من الأوكسجين يُصاب الفرد بالهيبوكسيا أو نقص الأوكسجين الذي قد يُسبِّب وجعًا في الرأس وإعياءً ودُوارًا وتعثرًا وغثيانًا. ويفقد الجسم توازنه، وهو أمر سيِّئ بالنسبة إلى الجسم. عندئذٍ يعمل الجسم على أساس مبادئ الاتزان؛ لذا إذا حدث عجزٌ في مكان ما، فإن الجسم يتدبر أمر نفسِه؛ كي يُعوض هذا العجز. وبالتأكيد لا يستطيع الجسم أن يُنتج الأوكسجين؛ لذا فهو يقوم بالخيار التالي الذي أمامه فيصنع المزيد من مادة المكونات الأخرى وهي الهيموجلوبين؛ ومن ثم يمتلك قاطنو الجبال هيموجلوبينًا أكثرَ من أولئك الذين يعيشون في مستوى سطح البحر مرةً ونصفَ المرة. وحتمًا يُسبب صنع المزيد من الهيموجلوبين نقصًا في البروتينات المستخدمة لصنع الهيموجلوبين مما يضغط على الخلايا لصنع المزيد من هذه البروتينات مما يخلق سلسلة كاملة منتظمة من تفاعلات إعادة التوازن التي تحدث جميعها بدافع تقليل الطاقة وتعظيم الأنتروبيا.

والسؤال هنا: أيُوجَد تفاعلٌ كيميائي لا ينطوي على تغيير في الطاقة والأنتروبيا؟ بالطبع لا. فتعريف التفاعل الكيميائي نفسه يقول إنه إذا كانت هناك مادةٌ جديدة تتكون، فثمة روابطُ كيميائية تتكوَّن وروابط تتكسَّر، مما يعني أنه سيكون هناك تغييرٌ في الطاقة والروابط. في حقيقة الأمر، من الصعب أن نتخيل حدوث أية عملية، فيزيائيةً كانت أم كيميائية، تتضمَّن وجود طاقة دون أن يُصاحبها وجود أنتروبيا. ومع ذلك، فثمة بعضُ العمليات الفيزيائية التي تدفعها الأنتروبيا ولا يُصاحبها أي تغيير فعلي في الطاقة. ويُعَد الخلط الطبيعي لألوان الطعام والماء مثالًا على العمليات المدفوعة بالأنتروبيا. ففعليًّا، ثمة فئةٌ كاملة من التفاعلات التي تدفعها الأنتروبيا وهو ما سنتعرَّض له الآن.

# تجربة ١٦:
# موانع التجمد وموانع الغليان



شبابُ كلِّ فرد هو حلم، هو نوعٌ من الجنون الكيميائي.
ما أبهجَ أن يُصبح الفرد مجنونًا إذن!

فرنسيس سكات فيتزجيرالد في روايته
«ماسة كبيرة مثل فندق ريتز»، ١٩٢٢

سوف نشرح في هذه المجموعة المكونة من أربع تَجارِب الخصائصَ الترابطية الأربعَ للمحلول. وتصف الخصائص الترابطية الأربعُ للمحلول كيف أن وجود المذاب يُغير سلوك تغيُّر الحالة للمذيب. وتتشابك هذه الخصائص معًا لدرجة أنها لا تعتمد إلا على الطريقة التي يُوجَد بها العديد من جسيمات المذيب معًا، ولا تعتمد على هُوية الجسيمات نفسِها. ويُمكن أن نُشبه ذلك بسلوك الجموع المحتشدة معًا من الناس، فهذه الجموع تميل إلى أن تتصرف بطريقةٍ تتوقف على حجم الجموع، وليس على الطبائع الفردية للناس الذين تتكون منهم المجموعة. وحتمًا تحظى شخصيات الناس بأهميتها عند مستوًى معين، وكذلك يكون لخصائص الجسيمات أهميتُها في مواقف معينة أيضًا. غير أن التأثير النهائي الذي هو سلوك الجموع هو ما نُعنى به هنا.

والخصائص الترابطية التي سنُلاحظها هي: الانخفاض في درجة التجمد، والارتفاع في درجة الغليان، وتقليل الضغط البخاري، والأزموسية (الانتشار الغشائي). وعليك الآن أن ترتديَ نظارة الأمان الواقية إذ سنقوم بإجراء التجارِب الأربعِ جميعها.

لإثبات الانخفاض في درجة التجمُّد، خذ زجاجتَي صودا أو ماءٍ مصنوعتَين من البلاستيك وقديمتَين، ومعهما أغطيتُهما ثم اغسلهما جيدًا بالماء. ضع كوبَ ماءٍ (٢٤٠ مليلترًا) في كِلتَيهما ثم أغلق إحداهما. ضع في الأخرى ملءَ ملعقة كبيرة (١٥ مليلترًا) من ملح الطعام، ثم غطِّها ورُجَّها جيدًا. إذا ذاب كل الملح في الماء ضع مرة أخرى القليلَ من الملح ورجَّ الزجاجة أيضًا. استمِر في إضافة كميات قليلة من الملح إلى أن تجد الملح لا يذوب بعد رج الزجاجة ويترسب بعضه في قاع الزجاجة. ضع علامة على الزجاجة المذاب فيها الملح بقلم فوسفوري أو بشريط لاصق، أحكم غلق الزجاجتَين وضع كلتَيهما في المجمد. لاحِظ الزجاجتَين من وقت لآخر، ستجد أن الماء العاديَّ قد تجمد كما هو متوقع، أما الزجاجة التي تحوي المحلول المشبع بالملح فنجد أن المحلول لا يتجمد إلا عند درجة حرارة منخفضة جدًّا، ولا تُوجَد درجة الحرارة هذه في المجمد العادي، مما يدل على الانخفاض في درجة التجمد. ويُمكنك أن تترك الزجاجتَين في المجمد إلى أن تقتنع أن المحلول الملحي لن يتجمد.

وقد تكون الخاصية التي أوضحناها في التجرِبة الأولى مألوفةً لديك إذا استخدمت من قبل الماكينة المستخدمة في صنع الآيس كريم. في هذه الماكينة، يُصَب خليط الآيس كريم في وعاء وهذا الوعاء موضوع في حمام من المحلول الملحي المجمد. ويُبرد خليط الآيس كريم المتلامس مع الثلج الملحي عند درجةٍ أقلَّ من درجة تجمد الماء. من ثم عندما يتلامس الماء

الموجود في الكريم مع جوانب الوعاء، يتجمد. وتُدار الريشة المستخدمة في التقليب على نحوٍ ثابتٍ حتى يأخذ الكريم والثلج شكلًا شبه جامد وموحدًا. وتنخفض درجة تجمد خليط الآيس كريم المتلامس مع الثلج الملحي بسبب وجود مذاب منحل (الملح) في المذيب (الماء). وتقوم فكرة عمل موانع التجمد على نفس المبدأ. وموانع التجمد هي موادُّ غير مسببة للتآكل، وهي تلك الموادُّ التي تُضاف إلى مياه مبرد السيارة لتقليل درجة التجمد؛ ومن ثَم لا تتجمد مياه مبرد السيارة بسهولة.

أما الخاصية الترابطية الثانية التي تُدعى الارتفاع في درجة الغليان، فيُمكن التدليل عليها باستخدام الخل. يُظهِر الخلُّ تأثيرات ترابطية؛ لأنه محلول حامض الخلِّيك المذاب في الماء. ويُمكنك أن تقيس درجة غليان الخل باستخدام الترمومتر ذي المقياس الكبير المقترَح في قائمة المشترَيات والمحاليل. ولا تكون هذه الترمومترات على قدرٍ من الدقة في كل الأوقات؛ ومِن ثَم لكي ترى الفرق عليك أن تُقارن درجة حرارة الخل المغلي بدرجة حرارة الماء المغلي عن طريق وضع الترمومتر أولًا في أحدِهما ثم في الآخر. ولا بد أنك ستجد أن الخل يغلي عند درجة ٢١٦ فهرنهايت (١٠٢ درجة سيليزية) على حد التقريب بدلًا من درجة ٢١٢ فهرنهايت (١٠٠ درجة سيليزية)، وهي درجة الحرارة التي يغلي عندها الماء النقي. وقد لا يُعطيك الترمومتر هذه القراءة بالضبط، فينبغي أن تظل درجة الغليان التي للخل أعلى من تلك التي للماء. وتكون درجة حرارة المحلول أعلى في حال وجود المذاب، وهو ما يُعَد مثالًا على الارتفاع في درجة الغليان.

وتتضمَّن تجربتنا الثالثة القدرةَ المنخفضة للمحلول على التبخر عند مقارنته بالمذيب النقي. وأود أن أُكرر مرة أخرى أن هذه الخاصية التي يُطلَق عليها «تقليل الضغط البخاري»، لا تعتمد على الطبيعة الكيميائية للمادة لكن على الكم المنحل من المذاب في المذيب. أحضر ملعقتَين، وافْرُك ثلاثة أقراص أسبرين، ثم خذ كوبَين شفافَين صغيرَين، وضع الأسبرين المفروك في أحدهما. صب في كلٍّ منهما نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) من كحول الأيزوبروبيل. ومن الضروري أن يكون المحلول عند نفس المستوى في كلٍّ منهما. قلِّب الكوب الذي يحوي كحول الأيزوبروبيل والأسبرين لتخلط المحتويات (قد يظل البعض غير ذائب). ضع بطاقة على كلٍّ منهما لتُميز أيُّ الكوبَين يحوي الأسبرين، ثم ضعهما في وسط متماثل؛ ومِن ثَم يحصلان عل نفس القدر من الحرارة والتيار الهوائي وغير ذلك. ويُفضَّل أن يُوضَع الكوبان متلاصقَين في وعاء. اتركهما نحو ساعة، عندئذٍ عليك أن تُلاحظ اختلافًا واضحًا في مستوى الكوبَين. ومع أن المذيب يتبخَّر من كلا الكوبَين،

فإنه يتبخَّر بدرجة أكثر بطئًا من الكوب الذي يحوي الأسبرين. يحدث التأثير نفسُه عند استخدام أقراص الفيتامين أو الحديد المذابة في الكحول؛ من ثَم فالذي يُحدث التأثير هو وجود المذاب وليس طبيعته.

ولكي تعرف أن عدد جسيمات المذاب يُحدِث اختلافًا، جرِّب تجربة الأسبرين السابقة مرة أخرى باستخدام ثلاثة أو أربعة أكواب، ونوِّع عدد الأسبرين في كل كوب. وبعد أن تتركها تتبخر لما يقرب من ساعة، ستحصل على ثلاثة أو أربعة مستويات مختلفة تمامًا من المذيب تتنوع ما بين القليل في الكوب الذي يحتوي على أقل عدد من الأسبرين إلى المرتفع في الكوب الذي يحتوي على أكبر عدد من الأسبرين.

وآخر خاصية ترابطية سنوضحها هي الأزموسية، وتُعَد الأزموسية أكثر تخصصية إلى حدٍّ ما؛ نظرًا إلى أنها تتطلب غشاء شبه منفذ. والغشاء شبهُ المنفذ هو تلك المادة التي تسمح بنفاذ جزيئات المذيب وليس جزيئات المذاب. يتدفق المذيب في عملية الأزموسية من أحد المحاليل إلى الآخر عبر غشاء شبه منفذ. وإذا كان كلا الوعاءَين معرَّضَين لنفس الضغط الجوي، فإن اتجاه التدفق يكون من المحلول الأكثرِ تخفيفًا إلى المحلول الأكثر تركيزًا.

ولكي نُبين تدفق المذيب إلى المحلول الأكثر تركيزًا، ضع زبيبة أو أي قطعة أخرى من الفاكهة المجفَّفة في الماء ثم لاحِظها بعد مرور ما يقرب ساعة، تجد أن الزبيبة تنتفخ إذ ينتقل المذيب النقي الذي هو الماء عبر الغشاء شبه المنفذ — الذي هو قشرة الزبيبة — إلى الزبيبة وإلى خلاياها في محاولة لتخفيف المكونات المركزة للخلايا. ولكي نُبين تدفق المذيب من المحلول الأقل ملحية للخلايا إلى المحلول الشديد الملوحة، قطع شريحتَين من البطاطس النيئة بحيث تكونان رفيعتَين بقدر الإمكان. وستجد أن شريحة البطاطس النِّيئة الرفيعة للغاية لا تزال قوية ونضرة؛ لأن الخلايا المكونة للبطاطس تكون مشبعة بالماء. ضع إحدى الشريحتَين في محلول ملحي شديد الملوحة بإضافة ملعقة كبيرة (١٥ مليلترًا) من ملح الطعام إلى نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) ماء. ضع الشريحة الأخرى في ماء نقي. انتظر لمدة نصف ساعة ثم أخرِج كِلتا الشريحتَين ثم افحصهما. نجد أن الشريحة التي كانت موضوعة في الماء النقي لا تزال نضرة، أما الشريحة التي كانت موضوعة في المحلول الملحي فستكون رخوة وضعيفة. قارن شريحة البطاطس التي كانت موضوعة في المحلول الملحي بشريحة بطاطس جديدة مقطوعة للتو، لتتبيَّن الفرق. السبب في ضَعف شريحة البطاطس هو أن بعض الماء ترك الخلايا وانتقل إلى المحلول الأكثر ملحية.

ويُعبِّر عن حركة المذيب في الأزموسية التي تبدو سهلة مصطلحُ «التعلم بواسطة الأزموسية». وينطوي التعلمُ بواسطة الأزموسية على أنه يُمكن التشبُّع بالمعرفة عن طريق مجرد الجوار، أي الوجود الزمني أو المكاني معها، ولا يتطلب الأمر جهودًا من قبل المتعلم، لكن هذا غير صحيح، فما كان التعليم بلا عناء أبدًا، وسواءٌ في التعليم أو في الكيمياء، فثمَّة قُوًى تدفع الأزموسية، كما هو الحال مع سائر الخصائص الترابطية الأخرى، كما سنكتشف في الصفحة التالية.

الفصل السادس عشر

# الخصائص الترابطية: القوة في الأعداد

في العلوم التجريبية، نُطلِق على الأشياء التي نعرفها «قوانين الحتمية» والتي نجهلها «القوة الحيوية». والقوة الحيوية ما هي إلا مصطلح يُعبِّر عن البقية المجهولة، إلى جانب ما نعرفه عن جوهر هذه الحياة.

الكاتب الروسي ليو تولستوي في رواية
«الحرب والسلام»، ١٨٦٦

عند التعامل مع التفاعلات الكيميائية، عادةً تتعلق الأسئلة الأولى بنوعيَّة المادة؛ ما المادة المتفاعلة؟ وماذا سيكون الناتج؟ ما رائحته؟ لكن عندما يتعلق الأمر بالخصائص الترابطية للمحاليل، يكون السؤال: ما مقدار المذاب؟ وليس ما نوعه؟ بكلمات أخرى، قد يُهمك إذا كنت ستضع سكرًا أم خمرًا في الشاي الخاص بك، أما الخصائص الترابطية للشاي فلا تهم البتة ما دمت ستضع عدد الجزيئات نفسه من السكر أو الخمر.

والخصائص الترابطية للمحاليل هي خصائصُ فيزيائية وليست كيميائية؛ لأن الطبيعة الكيميائية للمذاب وللمذيب ستظل كما هي دون تغيير. في الواقع، في المحاليل التي تحوي قوًى بينجزيئية شديدة بين الجسيمات، قد تتصرف المواد المذابة المختلفة بطرق مختلفة بدرجة طفيفة، غير أن التأثير العام سيكون هو نفسه. وتكون هذه التأثيرات وثيقة الصلة بعمليات كيميائية عديدة، ويُمكنها أن تتحكم في الظروف المتنوعة تنوعًا كبيرًا قدر تنوع المهام التي تقوم بها الخلايا الحية للحفاظ على الحياة على الطريق السريع.

وتُعد الخصائص الترابطية للمحاليل هي خصائصَ تغير الحالة، وتتضمن مجموعة غريبة من التأثيرات. يُشير الانخفاض في درجة التجمد إلى الملاحظة التي تقول إن المحاليل تتمتع بدرجة تجمد منخفضة عن درجة تجمد المذيبات النقية. فكلما أُضيفت جسيمات من المذاب انخفضَت درجة التجمد. ويستفيد العاملون بالطرق من هذا التأثير في الشتاء فيقومون برشِّ الملح على الطرق الجليدية لإذابة الجليد، فكما ذكرنا في مناقشتنا لتغيرات الحالة أن الجليد يُغطَّى بطبقة رقيقة من الماء بسبب التوازن الحادث بين حالات المادة. ويذوب الملح المرشوش على الجليد في طبقة الماء التي تكسو الجليد ويُكوِّن محلولًا مركزًا جدًّا. وكما أشرنا من قبل، يكون التوازن حركيًّا بمعنى أن الجزيئات في الحالة الصلبة تقوم باستمرار بتبادل الأماكن مع الجزيئات في الحالة السائلة، لكن الموقف يختلف قليلًا في هذه الحالة، فعندما تتحرك الجزيئات الصلبة نحو المحلول، فإنها تكون محلولًا لم يعد عند نقطة التجمد، وعليه لا تعود مرةً أخرى إلى الحالة الصُّلبة، فالاتزان يميل إلى اتجاه الحالة السائلة، ويجد عددٌ أكثر فأكثر من الجزيئات نفسه في المحلول. وتُستخدَم الرمال أيضًا أحيانًا في الطرق الزلِقة، غير أن الرمال تصلح للاستخدام في المواقف التي تتضمَّن وجود الجليد أو في الأماكن الموحِلة حيث يُمثل السَّحبُ والجر مشكلة. وعندما يكون الهدف هو إذابةَ الجليد، تُستدعى على الفور شاحنات الملح.

وتُشير خاصية الارتفاع في درجة الغليان إلى حقيقة أن المحاليل تغلي عند درجاتٍ أعلى من تلك التي تغلي عندها المذيبات النقية. فكلما وُجد المزيد من المواد المذابة ارتفعت

درجة الغليان. وعند إضافة مذاب مثل إحدى المواد المانعة للتجمد إلى مذيب مثل ماء مبرد السيارة، فإن درجة تجمد المحلول في المبرد تنخفض؛ ومن ثَم لا يتجمد بسهولة. وقد اتضح أنه يُمكن أن يُطلَق على موانع التجمد، موانع الغليان أيضًا؛ لأن الموادَّ التي تُساعد في حفظ مبرد السيارة من التجمد هي نفسُها التي تُساعد في حفظه من الغليان، لكنَّ ثمَّة تحذيرَين ينبغي أن نذكرهما هنا؛ أولهما: موانع التجمد وموانع الغليان التي لا تتطلَّب مبردات لا تتجمد أو تغلي أبدًا، كل ما هنالك أنه يجب الوصول إلى درجة أقلَّ من درجة التجمد أو درجة أعلى من درجة الغليان لتحقيق التجمد أو الغليان. وثانيهما: المادة مانعة التجمد التي تُضاف إلى المبرد هي مادة مُتخمرة سامة؛ ومن ثَم لا ينبغي تجربتها.

وعندما نتحدث عن تقليل الضغط البخاري، فإننا نتحدث عن تصرف الأدخنة؛ أي مُذيب متطاير لديه أدخنة مقترنة به، مثل الأدخنة اللاذعة التي تقترن بالبنزين أو الكحول. يُشار في لغة الكيمياء إلى هذه الأدخنة على أنها الأبخرة المتصاعدة فوق المذيب، وتتوقف كمية الأبخرة المقترنة بمذيب على درجة حرارة المذيب وهو السبب الذي يربط الكثيرون من أجله أدخنةَ البنزين بحرارة الصيف أكثرَ من برودة الشتاء. ويتوقَّف ضغط الأبخرة أيضًا على مقدار المذاب المنحلِّ في المذيب.

أما خاصية الأزموسية فهي مَيل المذيب إلى التدفق في اتجاه المحاليل الملحية لتخفيفها. والأزموسية هي التي تتولَّى مسئولية إحياء أوراق نبات الكرفس الذابلة عند نقعها في الماء النقي؛ إذ يتدفق الماء إلى داخل خلايا الكرفس كي يُخفف الخلايا الملحية. والأزموسية هي المسئولة عن تخليل المخللات؛ إذ يتدفق الماء خارج المخللات ليُخفف المحلول الملحيَّ للمخلل. كيف يصل الطعم إلى المخلل؟ الأزموسية هي المسئولة عن الوصول إلى الاتزان، والمواقف التي يحدث فيها الاتزان هي مواقفُ ديناميكية. وفي الاتزان يُعاد توزيع الجزيئات التي تحمل النكهة بين المخلل والمحلول الملحي. لنتذكر معًا التجربةَ التي استُخدِم فيها ورق الحمَّام وألوان الطعام؛ فقد سُمِح لورق الحمام وهو في حالة اتزان أن يحمل قدرًا من الماء من جزء من الكوب، وعندئذٍ أُضيفَت صبغة الطعام إلى هذا الجزء من الكوب. ولأن الاتزان ديناميكي؛ فإن بعض ألوان الطعام انتقلت إلى الورقة. وفي حالة المخللات، في وضع الاتزان، يكون مقدار من الماء خارج خلايا المخلل أكثرَ من مقداره داخلها، لكن ينتقل جزء من النكهة الموجودة في المحلول الملحي إلى داخل المخلل.

تُوجَد الخلايا، وهذه الخلايا هي السبب في الحياة لأن أغشية الخلية أغشيةٌ شبهُ مُنفذة، أي تسمح بدخول احتياجات الخلية إليها وتسمح بطردِ ما لا تحتاجه، كما تحافظ

على محتويات الخلية من أن تُهدَر خارجها أو تقطر بعيدًا. ويُمكن لواحد من هؤلاء الذين يمكثون أوقاتًا طويلة في حوض استحمام أن يرى مثالًا على عمل الغشاء شبه المنفذ للخلية؛ إذ تتجعد بشرتهم. وإذا سألت بعضهم عن السبب، سيُجيب الكثيرون أن سبب هذا التجعيد هو فقدان البشَرة للماء. في حقيقة الأمر، تحدث هذه الانثناءات والتجعيدات للبشرة بسبب انتفاخ البشَرة بالماء الذي امتصَّته، فالسائل الذي يُوجَد في البشَرة هو خليط من المواد المذابة تركيزه عالٍ جدًّا، فهو يتركب من بروتينات وأملاح وسكريات وبعض الجزيئات الأخرى، وعليه يُحاول الماء الموجود في حوض الاستحمام أن يتدفق إلى الخلايا في محاولةٍ لتخفيف تركيز محتويات الخلية.

لكن الاستجمام الذي يحدث للجسم عند المكوث في حوض الاستحمام ليس الفائدة الوحيدة التي تعود على الجسم من الأزموسية. فالجسم يستغلُّ وجود موادَّ ذائبة معينة أو غيابها كي يُحفِّز حدوث عملياتٍ كثيرةٍ ضروريةٍ لنمو الخلايا أو تكاثرها أو إصلاحها، أو يمنعها. لقد تمكَّن العالم الألماني جاك لوب، في نهاية القرن التاسع عشر من استثارة بيض غير مخصَّب لحيوان قنفذ البحر لكي يُنمي طور اليرقة عن طريق تغيير تركيز الملح في المحاليل المحيطة بها؛ ومن ثَم يبثُّ فيها الحياة باعتبارها عمليةً فيزيائية كيميائية، لا قوةً حيوية خفية.[1]

ومع ذلك، فلا يزال يشوب الخصائصَ الترابطية للمحاليل قدرٌ من الغموض منها وفي طبيعتها ذاتها. ويُشير الرأي السائد إلى أن ثمَّة عاملَين أساسيَّين يدفعان السلوك الترابطي الذي يجري ملاحظته؛ أحدهما هو أن الوجود الفيزيائي للمذاب في المحلول يعوق الدور المعتاد الذي تُؤدِّيه جسيمات المذيب. فعلى سبيل المثال، ينخفض الضغط البخاري؛ لأن جُسيمات المذاب تَشغل بعض مناطق السطح التي من المفترض أن يرحل منها المذيب إلى الحالة الغازية. ويتسبَّب هذا المنع للبخار في انخفاض الضغط البخاري — ومن ثم ارتفاع درجة الغليان — وذلك لأن الغليان يحدث عندما يتساوى الضغط البخاريُّ للمذيب مع الضغط المحيط وعندئذٍ يُمكن لفقاعات البخار أن تتصاعد. ويُمكِن لجزيئات المذاب أن تعوق أيضًا قوى الجذب البينجزيئية التي تُسهل عملية التجمد؛ ومن ثَم تعمل على انخفاض درجة التجمد. ولكن، مع أن هذه التأثيرات لها تعليلاتها، فإن الدافع الرئيسيَّ وراء الخصائص الترابطية المرصودة هو الأنتروبيا.

ذكرنا من قبل أن النظام يميل إلى حالة من الفوضى العارمة، أي حالة أنتروبيا قصوى، وأن المحلول المخفَّف أكثر فوضوية من المحلول المركز. والآن تخيل موقفَين

متناقضَين تمامًا، يُوجَد في أحدهما جُسيمان — واحد لمذاب والآخر لمذيب — وفي الموقف الثاني يُوجَد جسيمٌ واحد من مذاب موضوعٍ في بحر من مُذيب. يُعتبَر الموقف الأول منظمًا للغاية؛ إذ يسهل تحديد موضع جسيم المذاب، أما في الموقف الثاني فيُعتبَر غايةً في الفوضى إذ يستحيل تحديد موضع جسيم المذاب الموضوع في بحر من المذيب، ومن ثَم فكلما زادت خفةُ المحلول زادت فوضويته.

ويميل النظام بطبيعته إلى حالةٍ من الأنتروبيا القصوى، كما شدَّدنا على ذلك في مناقشتنا للديناميكا الحرارية. وتميل الأنظمة الكيميائية والفيزيائية على حدٍّ سواء نحو الفوضى، فهذه هي حالتها الطبيعية، فالغازات تتمدَّد، والأصباغ تنتشر، والمخاليط تبذل ما في وسعها كي تصبح مُخففة، والمحاليل لا تُريد أن تفقد المذيبات كي تُصبح مركزة؛ إذ إن الأنتروبيا تزيد بالتخفيف. ويُقلِّل الضغط البخاري للمحلول، كي لا يفقد المحلول المذيب ويُصبح أكثر تركيزًا. وتُرفَع درجة الغليان للسبب عينِه. وتزيد الأنتروبيا أيضًا في الحالة السائلة عن الحالة الصلبة؛ ومن ثَم يمنع التجمد حدوث الأنتروبيا. وعليه، تختبر المحاليل انخفاض درجة التجمد. ويكون الدافع في الأزموسية هو السعيَ نحو محلول منظَّم مخفف كوسيلة لزيادة الأنتروبيا.

وبالمرور عبر المخللات إلى الكرفس إلى الخلايا، إذا كان هناك قوًى حيوية وراءها، فستكون الأنتروبيا.

## على سبيل المثال: الكُلى والكيمياء

ما الذي ينبغي أن تفعله الكُلى حيال المخللات والكرفس؟ في الواقع، هي تقوم بدورٍ لا بأس به حيالَهما. تبرز الخصائص الترابطية في كيمياء الجسم بدرجة كبيرة؛ لأن الجسم محلولٌ ملحي واحد كبير موزَّع في خلايا عن طريق الأغشية شبه المنفذة. غير أن الأغشية شبهَ المنفذة للخلايا لديها دورٌ تُؤديه يفوق في أهميته مجرد السماح للماء بالنفاذ إلى الخلايا الذابلة في نبات الكرفس أو النفاذ من المخللات. يغمر الدم الخلايا في محلول مركَّب من جسيمات متنوعة إلى جانب الماء، علاوة على أن الخلايا نفسَها تحوي سائلًا مكونًا من جسيمات مُتنوعة إلى جانب الماء أيضًا. بعض هذه الجسيمات كبير نسبيًّا والبعض الآخر صغير نسبيًّا. ويكون البعض منها أيونات والبعض الآخر متعادل، وبعضها قطبي والآخر غير قطبي، وجسيمات يُفترَض وجودها، وأخرى لا يُفترَض وجودها. ولكي يُضبَط تركيب محتويات الخلية، يجب أن تُوجَد احتياجات الخلية في الدم وينعدم فيه أي شيء تعتبره

الخلية فضلات. والجانب الشائك هنا هو تقرير أي هذه الأشياء فضلات وأيها ليس كذلك، بمعنى تقرير أيهما سيبقى وأيهما سيُخرج.

فعلى سبيل المثال، اليوريا، الذي هو نتاج هضم البروتين والذي اشتقت منه كلمة يورين، يجب أن يجري التخلص منه. وكذلك الفضلات الأخرى الناتجة عن عمليات الأيض، أو أي سموم تنتجها البكتيريا، أو أي بقايا أدوية أو مواد غير مستخدمة أو هرمونات زائدة. ومن ناحية أخرى، لا ينبغي التخلص من الجلوكوز أو إفراز البروتينات، وينبغي الاحتفاظ بالفيتامينات والكالسيوم ونسبة معينة من الصوديوم والمعادن الأخرى. غير أنه ينبغي ضبط كمية الماء؛ لأن ارتفاع الماء في الدم مضرٌّ لأن الدم إذا أصبح مخففًا للغاية حينئذٍ لن يُوجَد قدر كافٍ من المواد الغذائية كي تُنقل إلى الخلية. وإذا كان الدم يحوي كمية قليلة من الماء، فإن العملية الفيزيائية المتعلقة بضخ الدم في كل أنحاء الجسم سوف تضعف، ووظيفة الكُليتين هي فرز المواد المتنوعة التي تطفو بالقرب منها ثم تختار ما تحتفظ به وما تطرده.

ويُعتبَر الترشيح الجيد والمعروف منذ القِدَم هو إحدى الآليات المباشرة التي تستخدمها الكُلى؛ إذ تُخفِّض نسبة الماء والجزيئات الصَّغيرة باستخدام الضغط، كما في ماكينة صنع القهوة. فالمحلول الذي يمرُّ عبر المرشِّحات يُطلَق عليه «المادة المُرشحَة» (التي تُقابلها القهوة في ماكينة صنع القهوة). وتكون خلايا الدمِ الحمراء كبيرةً في الحجم على أن تُرشح عند هذه الدرجة، وينبغي أن تبقى بعيدةً عن عملية الترشيح. ويُشير وجود أي خلايا دمٍ حمراءَ في البول إلى إمكانية حدوث ارتشاح في الشُّعيرات الدموية، وينبغي استشارةُ الطبيب في هذه الحالة.

غير أن المرشِّح لا يُمكنه أن يُفرِّق جيدًا بين الأشياء التي يجب التخلُّص منها والأشياء التي لا يجب؛ فبعض الموادِّ التي يجب أن تُحتجَز تكون دقيقةً للغاية حتى إنها تستطيع المرور. وتُعوَّض الكُلى عن ذلك باحتوائها على بروتينات خاصة تُدعى «الناقلات» تُوجَد على أغشية الكُلى، التي يُمكنها أن تُميز الجزيئات وتُعيد امتصاصها مثل بعض أنواع السكر والبروتين. وبالطبع يكون للجسم ناقلاتٌ خاصة لهذه المواد فحَسْب؛ يصنعها بنفسه، أو يأخذها بانتظامٍ من البيئة الداخلية. ويُصنِّف الجسمُ الأدوية التي يصنعها الإنسان على أنها فضلات، وعليه يجري التخلص منها؛ ومن ثَم يجب أن يُضبَط وقتُ جرعات الدواء وكمياتها بما يحفظ كمياتٍ مناسبةً منه في الدم.

ولا يجب تركُ الدم ليُصبح غايةً في الحامضية أو غايةً في القاعدية — أي لا يجب تركُ رقم الأسِّ الهيدروجيني (pH) ليُصبح مرتفعًا أو منخفضًا للغاية — من ثَم يجب أن تُضبَط بعناية نسبةُ أيونات الكربونات والبيكربونات. فإذا كان هناك مزيدٌ من نسبة الكربونات، فإنها سوف تُقشَد وتُطرَد، أما إذا كان هناك القليل، فثمَّة آليةٌ لاستعادة هذا الاتزان أيضًا.

ينتج عن أيضِ خلايا الكلى، شأنها في ذلك شأن الخلايا الأخرى كافَّة، ثاني أكسيد الكربون. وكما ذكرنا من قبل، يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء ليكون حامض الكربونيك، الذي يُصبح البعض منه كربوناتٍ في الدم. وينتقل ثاني أكسيد الكربون تحت ظروف أخرى إلى الرئتَين ويُطرَد، أما إذا كان الدم في حاجة إليه لاستعادة اتزان الأس الهيدروجيني (pH)، فإنه يُمكن احتجازه.

وعليه، تتولد عن كل هذه الآليات المعقَّدة والمتخصصة لتوزيع المواد بين الدم ومنبع الفضلات حاجةٌ مُلحَّة وشديدة إلى الأزموسية، لكن إذا تُرِك العِنان للأزموسية لكي تحدث دون ضبطها فإن خلايانا قد تتورم أو تتلف مثل الكرفس والمخللات غيرِ المنضبطة، لكن

مِن حسن الحظ، ثمَّة هرمونات يُنتجها الجسم تُؤثر على نفاذية الأغشية التي تُحدِث الأزموسية من خلالها، وأحد هذه الهرمونات هو هرمون ADH المضادُّ لإدرار البول.

وهرمون ADH تُفرِزه الغدةُ النُّخامية الموجودة في الجزء السفلي من المخ. والغدة النخامية مسئولة أيضًا عن إفراز هرمونات أخرى تقوم بتنظيم النموِّ والأيض. وعندما تكتشف الغدة النُّخامية وجود نِسَب عالية من الصوديوم في الدم، فإنها تُفرز هرمون ADH ومن ثم تمنع الكلى الماء من الخروج، ويُصبح الدم أكثرَ تخفيفًا، وستفقد الخلايا نسبةً أقلَّ من الماء — ومما لا يُشَك فيه أن هذه الآلية تعمل جيدًا عندما نركض عبر إقليم السافانا ونأكل وجبات الحمية التي تُغيرنا بالتدريج. وللأسف، لم نعد نُمارس رياضة الركض كثيرًا كما اعتدنا أن نفعل من قبل، ونحن نميل إلى أن نتناول كمياتٍ كبيرةً من الصوديوم في وجَباتنا أكبرَ كثيرًا مما كان هذا متاحًا لنا في إقليم السافانا؛ ومن ثم يُمكن أن يكون معدل احتجاز الماء في الجسم مرتفعًا بدرجة غير طبيعية، مما يُمكنه أن يُؤديَ إلى حدوث خللٍ في العديد من أنظمة الجسم. وبالطبع، يُمكن أن تفسد العديد من أنظمة الحمية؛ إما بسبب أكل وجبات الحمية اللذيذةِ المذاق التي تحتوي على نسبةٍ كبيرة من الصوديوم، وإما بسبب الامتناع عن شرب الماء؛ اعتقادًا أن الماء الزائد سوف يُختزَن في الجسم. في حقيقة الأمر الماء الزائد يُخفف الدم؛ ومن ثَم يُقنع الجسم أن كل شيء على ما يُرام، ويُمكنه أن يصرف الماء بدلًا من أن يحتجزه. فضلًا عن أن الجفاف يُسبِّب الإعياء (عندما يشعر الجسم بنقص الماء، ويُحاول أن يحتفظ بما لديه)، الذي يُقلل من أداء الفرد. لذا، في حين قد يبدو أن الإفراط في شرب الماء في الحمية الغذائية مُناقض للبديهة، فهو في الحقيقة يُساعد على زيادة مُعدَّل الأيض.

وليست مُعدلات الأيض وحدَها هي التي يُمكن التحكُّم فيها، فالتفاعلات الكيميائية كافةً — بداية من أكثر التفاعلات نشاطًا إلى أبطئها — تقوم على مجموعةٍ من القواعد والمبادئ، وهو ما سننتقل إليه الآن.

# تجربة ١٧: لمزيد من الإثارة

شاهدتُ رجلًا يزِن مائتي رطل يجلس على مكتبه وهو يتسلَّم إحدى البرقيات ... أعطى الرجلُ الصبيَّ خمسة سنتات، ثم فتح الظرف وقرأ البرقية. صاح الرجل بعدها قائلًا: «يا إلهي!» قفز ليلتقط قبعته ومعطفه وركض نحو المصعد، ثم استقل سيارة أجرة إلى محطة القطار ... لقد كان أشبهَ بمجموعة من البلَّورات المرصوصة في أنبوبة الكيميائي ومقدار قليل جدًّا من الملح ... أنا أعرف صانع

أحذية يعمل في بدرو، وكان هذا الرجل يركب نصف نعل في الحذاء، وعندما سألته عن ذلك أجابني قائلًا: «أنا أدفع فواتيري، وأحب زوجتي، ولا أخشى أحدًا.»

كارل ساندبرج، «الدخان والفولاذ»، ١٩٢٢

وثب سايم على قدَمَيه، وارتدَّ قليلًا للوراء مثلما يرتد مُحاضِر الكيمياء لدى إجرائه انفجارًا ناجحًا.

جيه كيه تشسترتون في
«الرجل الذي كان يوم الخميس»، ١٩٠٨

يُؤثِّر عاملان رئيسان على معدل التفاعل الكيميائي — علم حركة التفاعلات الكيميائية — وهما التركيز ودرجة الحرارة. ويُمكن توضيح كِلَيهما بسهولة ويُسر باستخدام موادَّ من «قائمة المشتريات والمحاليل».

لإجراء التجرِبة الأولى، ارتدِ نظارة الأمان الواقيةَ وصُب مباشرة نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) من مادة التبييض المنزلية في كوبَين صغيرَين شفافَين. وكن حذرًا من أن تنشر رذاذ المادة المبيضة، صبَّها بالطريقة نفسِها التي تصبها بها عند الغسيل، وقد تحتاج إلى ارتداء قفَّاز لحماية يدَيك. ضع كِلا الكوبَين على فرخ ورق أبيض حتى يُمكنك أن تُلاحظ اللون بسهولة. تأكد من وجود ساعة إيقاف أو ساعة حائط في مكان ذي رؤية مناسبة.

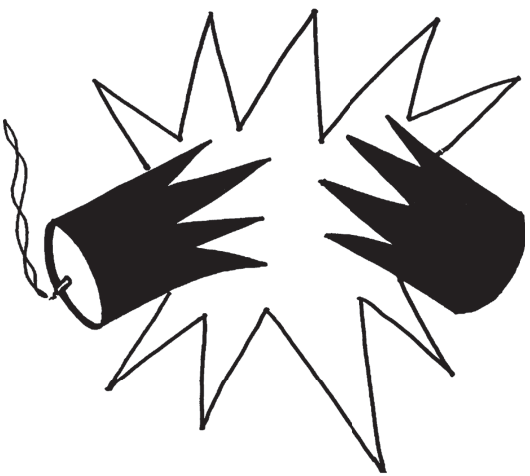
أضف قطرتَين من دليل الميثيل الأحمر (الموجود في عُبُوَّة اختبار قاعدية مياه حمام السباحة) للكوب الأول. بعدما أضفتَ نقطتَين إلى الكوب الأول، أضف بعدها مباشرة إلى الكوب الثاني أربع قطرات. قلِّب كلا الكوبَين برِفق للتأكُّد من حدوث امتزاج. ضع كلا الكوبَين على فرخ الورق الأبيض، ثم دوِّن على الورقة الوقت الذي أُضيفت عنده القطرات في كلا الكوبَين. نجد أن اللون الأحمر الموجود في كلا الكوبَين يتلاشى تدريجيًّا في وقت يتراوح بين خمس وعشر دقائق؛ إذ تُهاجم مادة التبييض جزيئات الصبغة التي تُلون المحاليل. عندما يختفي اللون الأحمر من الكوب الذي يحوي القطرتَين، دوِّن الوقت المستغرق على الورقة ثم عاوِد ملاحظة الكوب الذي يحوي القطرات الأربع، ثم دوِّن أيضًا وقت انتهاء التفاعل. يُمكنك أن تُفرغ كل المحتويات في المرحاض، وتجنب نشر رذاذ مادة التبييض.

يُمكنك أن تُشاهد اللون وهو يزول لأن التفاعلات الكيميائية تستغرق وقتًا لحدوثها؛ فبعض التفاعلات سريع جدًّا والبعض الآخر بطيء جدًّا، لكن جميعها يستغرق وقتًا. وتفاعل مادة التبييض له سرعة معينة حتى إنه يُمكننا أن نُلاحظ عملية التفاعل دون أن ننتظر لسنواتٍ طِوال. وحتمًا لاحظتَ أن الكوب الذي يحوي أربع قطرات من الصبغة يستغرق وقتًا أطولَ حتى يُتمم التفاعل أكثر من الكوب الذي يحوي قطرتَين. غير أنه لا يُشترَط أن الكوب الذي يحوي أربع قطرات يستغرق ضِعف الوقت الذي يستغرقه الكوب الذي يحوي القطرتَين، مع أن مادة التبييض تُهاجم في هذه الحالة كمية مضاعفة من الصبغة. ويتأثر معدل التفاعل بتغير التركيز، لكن لا يحدث عادة هذا التأثير بطريقة مباشرة.

ويُمكن توضيح تأثير درجة الحرارة على معدل التفاعل الكيميائي باستخدام قرصَي فوار مضاد للحموضة، وكوبَين وماء صنبور. ضع في أحد الكوبَين نصف كوب (١٢٠ مليلترًا) ماءً فاترًا من صنبور الماء البارد. وضع في الكوب الآخر الكمية نفسَها من الماء الساخن من صنبور الماء الساخن. ضع قرصًا فوارًا في كل كوب في الوقت نفسِه. نجد أن فعل الفوران يكون أكثرَ حركةً في الكوب الذي يحوي الماء الساخن من الكوب الذي يحوي الماء الفاتر. تعمل درجة الحرارة الأعلى في هذه الحالة بطريقتَين، فهي تدفع المزيد من الفقاعات خارج المحلول (وهذا هو السبب نفسُه الذي يجعلك حذرًا وأنت تفتح علبة مياه غازية دافئة)، كما تَزيد معدل التفاعل لأن الجزيئات ذات درجة الحرارة المرتفعة تتحرك بدرجة أسرع، وأحيانًا يجد بعضُها بعضًا، وعندما يجد بعضها بعضًا تتصادم بطريقة عنيفة. وهذا التأثير وغيره من المبادئ فيما يرتبط بالحركيَّة الكيميائية، هي موضوع مناقشتنا التالية.

الفصل السابع عشر

# الحركية الكيميائية: انفجار حقيقي



حسنًا. أنتِ إنسانة بريئة مباركة! ... الحياة لن تظلَّ هادئة مع فتاة في التاسعةَ عشْرة من عمرها تعيش في مثل هذا المكان. قد تخدعين نفسك، لكنكِ لا تستطيعين أن تخدعيني. ألا تتفاعل فتاة في التاسعة عشرة من عمرها مع الأشياء! إنها قد تنفجر! الأشياء لا تتفاعل في أي مكان باستثناء بوسطن وفي المختَبرات الكيميائية. أظن أنكِ تعلمين أنكِ تصطحبين معكِ قنبلةً إنسانية إلى مستودَع أسلحة، ألست كذلك؟

كريستوفر مورلي، «المكتبة المسكونة»، ١٩٤٠

تتعامل الديناميكا الحرارية كما ذكَرنا من قبلُ مع تأثيرات الحرارة والأنتروبيا على الاتزان، وهي تُفيد في التنبُّؤ بالمدى الذي سيحدث عنده التفاعل، لكن الديناميكا الحرارية تُشبِه طفلًا مشاغبًا يتجنَّب القيام بمهامه اليوميَّة؛ فهي قد تُخبِرك بأن التفاعل سيحدث لكن لن تُخبرك متى، فعلى سبيل المثال، تتنبَّأ الدِّيناميكا الحرارية بأن الجرافيت هو أحدُ أشكال الكربون النقيِّ الأكثرِ ثباتًا من الماس، وعليه سيتحوَّل كل الماس في آخر الأمر إلى جرافيت، لكني أودُّ أن أنصحك قبل أن تَشرع في تعديل حافظتك الاستثمارية بأن هذا التحوُّل قد يستغرق مليارات السنين.

ولا ينبغي أن تُلام الديناميكا الحراريَّة؛ فثمَّة مُمارسات عديدة تكون أكثرَ سهولةً في التنبُّؤ بحدوث الحدث من معرفةِ توقيت حدوثه. فعلى سبيل المثال، يُمكننا توقُّع أننا حتمًا سنموت، لكن لك أن تتخيل كيف كنا سنتصرف إذا عرَفنا متى! لكن بصرف النظر عن القابلية للتنبؤ، من الضروري جدًّا معرفة معدلات التفاعل عند التحكم بالتفاعلات الكيميائية. قد لا نتعرض في حديثنا اليومي لتحول الماس تدريجيًّا إلى تراب الكربون، غير أن الانفجارات هي التي تتصدر الأخبار الليلية. والغرض من دراسة معدلات التفاعلات — الحركية الكيميائية — هو قياس ودراسة معدلات التفاعلات الكيميائية بالعين التي تُمكننا من التنبؤ بمدى السرعة أو البطء اللذَين يحدث بهما التفاعل الكيميائي وكيفية تعجيله أو إبطائه حسبما تتطلب الحاجة.

ويتضمَّن المصطلح الإنجليزي kinetics معنى حركة — كما في الفن الحركي kinetic art، أو في علم الحركة الذي يهتمُّ بدراسة عضلات الإنسان وحركته kinesiology. وقد اختِيرَت الكلمة الإنجليزية kinetics لتصفَ الدراسة التي تهتمُّ بمعدلات التفاعل الكيميائي لأن معدلاتِ التفاعل تعتمد على حركة الجزيئات. ويقيس العلماء في أوروبا معدلات التفاعل منذ منتصف القرن التاسعَ عشر على الأقل، لكن التفسيرات التي توصلوا إليها بشأن المعدلات التي لاحَظوها كان عليها أن تنتظر حتى تُصدَّق عليها نظرية الحركة الجزيئية. تذكر نظرية علم الحركة بشأن الحركة الجزيئية أن الجزيئات والذرات تكون في حالة حركة دائمة، وإن كانت هذه الحركة دقيقة مثل اهتزاز الأيونات في سبيكة بلَّورية أو شديدة الاهتياج مثل الجزيئات في الحالة الغازية التي تنتشر بسرعة ١٦٤٠ قدمًا (٥٠٠ متر) في الثانية الواحدة.

ولكن المسافة التي يقطعها جزيء غاز واحد في الثانية الواحدة، تحت الضغط الجوي العادي، لا تكون في خطٍّ مستقيم؛ وذلك لأن كثافة جزيئات الغلاف الجويِّ تحت الظروف

العادية في الأرض تكون هي تلك الكثافةَ التي يمرُّ عندها الجزيء الواحد في الحالة الغازية بما يقرب من سبعة مليارات تصادم كل ثانية. وتُعَد كل هذه التصادمات بمنزلة أخبار سارة للكيميائي الذي يدرس معدل التفاعلات الكيميائية؛ لأن معدل التصادم يرتبط بمعدل التفاعل، الذي يرجع إلى أن الجزيئات يجب أولًا أن تجتمع مع بعضها البعض قبل حدوث أي شيء آخر في التفاعل، بمعنى أنها يجب أن تتصادم.

ويُطلَق على الفكرة القائلة إن معدل التفاعل الكيميائي يرتبط بمعدَّل التصادم «نظرية التصادم لمعدلات التفاعل» غير أن الغموض الذي يكتنف الطبيعةَ لا يُمكن حلُّه بهذه السهولة. فأثناء التفاعلات الكيميائية، تتشابك مدارات الإلكترونات (أي السحُب الإلكترونية) في المتفاعلات الفردية ويندمج بعضها مع بعض بالطريقة التي تندمج بها فقاعتان معًا وتُصبحان فقاعة واحدة. وما إن تُصبح الظروف مواتية حتى تستغرق الإلكترونات في المدارات الفردية ما يقرب من كوادريليون من الثانية؛ كي تُعيد ترتيب نفسها في المدارات حول النواتج، لكن إذا حدثت جميع التفاعلات بالسرعة نفسِها التي تحدث بها التصادمات، فإن الطعام كان سيُطهى في أقلَّ من لمح البصر، وكان الدهان سيجف بمجرد وضعه، وكنا سنموت فور ولادتنا؛ لأن تفاعلات الأيض التي تحدث في أجسامنا كانت ستُدمرنا. إذن، لماذا لا تحدث التفاعلاتُ كافةً في أجزاء من الثواني؟ تكمن الإجابة في هذه الجملة: «عندما تُصبح الظروف مواتية.»

في البداية، يجب أن نعرف أن المتفاعلات في الحالة الغازية قد يتصادم بعضها مع بعض مليارات المرات في الثانية الواحدة، أما المتفاعلات في حالة المحلول فيُمكن أن يعزل بعضَها عن بعضٍ بحرٌ من المذيب، وقلما يتصادم بعضها مع بعض. ويُمكنك أن تتأكد من ذلك عن طريق إضافة بعض قطرات صبغة الطعام في الماء والبعض الآخر في الجلسرين، فستجد أن معدل انتشار — أي حركة المذاب في المذيب — يختلف اختلافًا جذريًّا من مذيب لآخر (شاهد هذا الانتشار من جانب الكوب للحصول على مشاهدة أفضل). لكني أود أن أُكرر مرة أخرى أن اللزوجة لا تمنع دائمًا حدوث التفاعل الكيميائي، بل إنها تعمل في بعض الأوقات على تعزيز حدوث التفاعل عن طريق وضع المتفاعلات معًا.

لكن، مع أن المتفاعلات تكون قادرةً على التصادم معًا فإنه ليست كلُّ التصادمات تُفضي إلى حدوث تفاعل، كما أنه ليست كل مواعدة ينتج عنها زواج. أُكرر مرة أخرى، يجب أن تكون الظروف مناسبة؛ لأن المدارات يجب أن تكون مصفوفة كما ينبغي، والتصادم يلزمه كمٌّ كافٍ من الطاقة كي يحدث. عندما يحدث اصطدامٌ بين سيارتَين

قريبتَين إحداهما من الأخرى بسرعة خمسة أميال في الساعة، فإنه قد لا يحدث حتى انبعاجٌ في الرفارف، أما إذا حدث هذا التصادم من الجنب وكان متوسط سرعة السيارتَين هو أربعين ميلًا في الساعة، فإن جانب السيارة يتحطَّم؛ ومن ثَم، كي يحدث التفاعل، فإن المتفاعلات يجب أن تجتمع معًا، وأن يكون لها اتِّجاه معيَّن، ويجب أيضًا أن تتمتَّع بالقدر المناسب من الطاقة.

ولنفترض أننا نعرف عن الجزيئات وحركتها، عندئذٍ يُمكننا أن نفعل أشياءَ معينة للتحكم في معدلات التفاعل. فعلى سبيل المثال، يُمكننا أن نتحكم في التركيز، وهي فكرة مباشرة وبسيطة؛ فكلما زاد الكمُّ، زادت فرصة حدوث التفاعل، لكن كما لاحظنا في توجيهات التجرِبة الأولى المطروحة سابقًا، لا تُعَد دائمًا الزيادة في المعدلات هي نتيجةً مباشرة للزيادة في التركيز، فعلى سبيل المثال، إذا لم يكن التفاعل يحدث في خطوة واحدة لكن بواسطة سلسلة من التفاعلات (مثل معظم التفاعلات)، فسيكون عندئذٍ استجابة معقدة للزيادة في التركيز، وذلك لأنَّ التركيزات العالية لبعض المتفاعلات تعوق حدوث التفاعل لبعض التفاعلات.

وثمة عاملٌ آخر يُمكِنه أن يُؤثِّر على معدل التفاعل الكيميائي هو الحالة الفيزيائية للمتفاعلات، فمثلًا الطباشير المستخرَج من الأرض يذوب في الخل أسرعَ من الطباشير الصُّلب المُصنَّع. ويُمكن أيضًا للحالة التي تكون عليها المتفاعلات أن تُؤثر على معدلات التفاعل، فالبنزين السائل يحترق أما بخار البنزين فينفجر. ولطالما تتواجد الأسطح الغريبة في التفاعل، حتى لو كان مجرد سطح الوعاء الذي يحوي التفاعل؛ لذا يجب أن تُؤخَذ أيضًا بعين الاعتبار. ففي بعض الأحيان تعمل هذه الأسطح على زيادة معدلات التفاعل عن طريق حمل أحد المتفاعلات على السلوك في الاتجاه المناسب. وفي أحيانٍ أخرى تعوق الأسطحُ التفاعل عن طريق جعل التفاعل يسير في اتجاه عكسي، أو عن طريق تهدئة المتفاعلات عند التصادم.

أما درجة الحرارة فهي تُعَد دائمًا عاملًا رئيسيًّا نظرًا إلى أهميتها على عدة مستويات، فالأغلبيةُ العظمى من التفاعلات تزيد سرعتها مع الارتفاع في درجة الحرارة؛ لأن ارتفاع درجة الحرارة يعمل على زيادة السرعة التي تبدأ عندها الجزيئاتُ الانتشارَ في كل الأنحاء، ممَّا يَزيد عدد التصادمات؛ ومن ثَم الطاقة الناجمة عن تلك التصادمات. فعلى سبيل المثال، عند حدوث عدوى أو إصابة لدى إحدى الثدييات، فإنها تستجيب لذلك بعدة طرق؛ من بينها رفع درجة حرارة الجسم؛ ومن ثم تكون استجابة كلٍّ من الجهاز المناعي واستجابة

الخلايا المختصة بالتصليح أسرع. فعادةً يُصاحب الارتفاعَ في درجة الحرارة زيادةٌ في معدل التفاعل، لكن ذلك لا يحدث دائمًا. فإذا نتجت حرارة عن خطوة معينة من خطوات التفاعل، فإن زيادة درجة الحرارة عن طريق إضافة حرارة إلى التفاعل يُمكنه أن يُغير اتجاه التفاعل إلى الخلف، وينتهي الأمر بتقليل سرعة التفاعل، لذلك، قلَّما كان التنبؤ بمعدلات التفاعل والقدرة على التحكم بها مباشرًا وبسيطًا.

ويجب أن يُؤخَذ أيضًا بعين الاعتبار الحالة التي تتوسط الطريق بين المتفاعلات والنواتج، التي يُطلَق عليها الحالة الوسيطة أو المتراكب النشط. لو استخدمت سمنًا وبيضًا ودقيقًا وسكرًا ولبنًا (كمتفاعلات)، فقبل أن تُصبح هذه الأشياء كعكة (النواتج) يجب أن تمر بالمرحلة الوسيطة وهي الخفقان والضرب.

ويمر كل تفاعل كيميائي بهذه الحالة الوسيطة، لكنها تكون قصيرةَ الأجل. فالمتفاعلات يجب أن يتَّحد بعضُها مع بعض وتُكون المتراكِب الذي تُنظَّم فيه المدارات وتتكوَّن النواتج. والأمر يتطلب دائمًا وجود الطاقة حتى يتكون هذا المتراكب النشط، أي الحالة الوسيطة، مع أن هذه الطاقة قد تكون كبيرة للغاية أو صغيرة للغاية. ويتحدث الكيميائيون عن حاجزٍ يُدعى الحاجز النشط، بمعنى الحد الأدنى من الطاقة المطلوبة لتكوين الحالة الوسيطة، ثم عندئذٍ يدفعه إلى أسفل في اتجاه النواتج. ويُمكن أن يُفهَم هذا الحاجز النشط في ضوء أي جهد يبذله الإنسان، فالأمر يتطلب قدرًا من الطاقة في الفترة التي تتوسط بزوغ الفكرة، ووصولًا إلى الناتج النهائي، بصرف النظر عن الاستحسان الذي قد يناله المنتَجُ النهائي. أما في حالة التفاعل الكيميائي، فإن الأمر يتطلب الطاقة للتغلب على المعضلة الأولى المتمثلةِ في التحول من متفاعلات إلى نواتج، حتى إن انطلقت الطاقة من التفاعل برُمَّته.

لكن في أوقاتٍ أخرى، يُمكن التأثير في الموقف (أخيرًا وجدنا أخبارًا سارة)، بمعنى أنه في بعض الأحيان يُمكن أن يعمل عامل حفَّاز على التسريع من وتيرة التفاعل المطلوب. والعامل الحفاز هو تلك المادة التي تُقلل من طاقة التنشيط المطلوبة لإتمام التفاعل. والعامل الحفاز لا يُغير من كم المنتج المكون؛ فكل دوره يقتصر على جعل التفاعل أسرع. وقد يُشبه العامل الحفاز رصيف مشاة متحركًا في مطار، فهو لا يجعل الجهة الأخرى للمطار أقرب، لكنه يُقلل كمَّ الطاقة المطلوبة للتنقل من جهة لأخرى، كما أنه يُسرع من معدل الخطوات التي قد تخطوها هناك. وأود أن أُوضح التشبيه أكثر، ينقل الرصيف المتحركُ المسافرين من جهة لأخرى لكنه لا يُغادر المطار نفسه. وبالمثل يدخل العامل الحفاز الحقيقي في التفاعل، لكنه لا يُستهلَك في التفاعل.

وتُعَد الإنزيمات من العوامل الحفازة؛ فالمكمِّلات الغذائية التي تُساعد الجسم على هضم المنتجات المصنوعة من اللبن أو موادِّ الطعام الخشنة التي لا تُهضَم مثل الفول، هي في حقيقة الأمر إنزيمات. وتُضاف الإنزيمات في بعض الأحيان إلى المنظِّفات لتُسرع من تفتيت الدهون. ويُعجل العامل الحفاز المحول في السيارة من كسر مركبات النيتروجين والأوكسجين ومركبات الكربون والهيدروجين إلى غاز النيتروجين، وغاز الأوكسجين، والماء، وثاني أكسيد الكربون. وعلى المحولات الحفازة أن تُجري هذه التفاعلات بسرعة تامة كي تتواءم مع عادم السيارة العادية.

آلية الفعل الحفزي فيما يتعلق ببعض العوامل الحفازة مفهومة تمامًا، فعلى سبيل المثال، قد تُنظم الإنزيمات الحفازة البيولوجية بحيث تعمل قُوى الجذب البينجزيئية على تجميع المتفاعلات معًا في الوضع الأمثل لحدوث التفاعل. وتعمل هذه الإنزيمات عمل اليد التي تُثبت الغطاء بطريقة لولبية على الوعاء. لكي تُثبت غطاء على وعاء، يُمكنك أن تُلقي الغطاء والوعاء في حقيبة معًا حتى يجد أحدهما الآخر في النهاية، ويصل الغطاء إلى مكانه الصحيح ويثبت بداخله، لكن إذا كانت هذه هي الطريقة الوحيدة التي يُمكن أن يجد بها الغطاءُ وعاءه، فإن ذلك سيستغرق وقتًا طويلًا حتى يثبت الغطاء على الوعاء، لكن من الممكن أن تُوجَد يدان تُمسكان بالغطاء والوعاء معًا وتُثبتهما بسرعة أكبر. ونجد في شكل ١٧-١ رسمًا توضيحيًّا لهذه الطريقة التي تعمل بها الإنزيمات.

أما الأنواع الأخرى من العوامل الحفازة، فلا تُفهَم تمامًا آلية عملها، ولا يزال الأساس الذي يقوم عليه اختيار عامل حفاز لتفاعل معين هو نوعًا من الفن. فعلى سبيل المثال، يُحفز سلك نُحاس تحلل فوق أكسيد الهيدروجين بدرجة أفضل كثيرًا من سلك من الصوف الفولاذي. ويُمكن توضيح هذا الفرق بطريقة مقنعة كالآتي: ارتدِ نظارتك الواقية، ثم ضع سلك نُحاس في منتصف كوب (١٢٠ مليلترًا) من فوق أكسيد الهيدروجين الذي يُباع في الصيدلية. ضع قليلًا من أسلاك الصوف الفولاذي في عينةٍ مماثلةٍ من فوق أكسيد الهيدروجين، نجد أنه يظهر على طول سلك النُّحاس فقاعاتٌ حيث تحلل فوق أكسيد الهيدروجين إلى غاز الأوكسجين والماء.

وبسبب العوامل العديدة التي تُؤثِّر على معدل التفاعل — مثل تركيز المتفاعلات ودرجة الحرارة والعوامل الحفازة — وحقيقة أن المتفاعلات تجتمع معًا بشكل عشوائي ولا تسير دائمًا في الاتجاه الصحيح أو تتمتع بالقدر المناسب من الطاقة؛ فإنه لا تُوجَد وصْفةٌ مباشرة للتنبُّؤ بمعدلات التفاعل، ولكنَّ الكيميائيين يُحرِزون تقدمًا حقيقيًّا، وربما

شكل ١٧-١: بعض تفاعلات الإنزيمات التي تُسرع من حدوث التفاعل عن طريق تجميع المتفاعلات معًا في الاتجاه الصحيح. ويُبيِّن التفاعل في أربع خطوات ابتداءً من اليسار وحتى اليمين، فنجد في الخطوة الأولى أن مادة التفاعل (البيضاء اللون) تسبح بحرية في المحلول، وعندئذٍ تلتصق بالإنزيم (الأسود اللون). وعندما تتجمع مادتا المتفاعلات معًا، تتفاعلان معًا ويترك الناتج النهائي الإنزيم، ويُصبح الإنزيم حرًّا كي يُحفز تفاعلًا آخر.

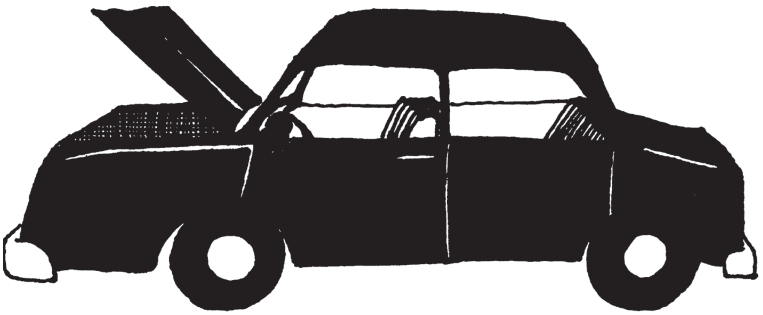
يُصبح لدينا يومًا ما قدرٌ كافٍ من المعرفة حتى نتمكَّن من ضبط معدلات التفاعل تمامًا، لكننا نتحرك بخُطًى متثاقِلة حتى الآن؛ بسبب قيود السرعة التي تفرضها الطبيعة.

### على سبيل المثال: عندما تُطقطق سيارتك

عادة ما ترتبط كلمة «انفجار» في أذهاننا بالتدمير، لكنها لا تعني في الواقع سِوى «رد الفعل السريع»، فهو يكون في غاية السرعة حتى إن الأشياء المحيطة ليس لديها الوقت حتى تسع أو تمتص التغيير. لقد أضحت الانفجارات في عالمنا المعاصر شيئًا مألوفًا مثل النفَس الذي نتنفسه، ومحرك الاحتراق الداخلي يُمكنه أن يُنتج آلافًا عديدة من الانفجارات في الثانية الواحدة.

ويبدو الأمر غريبًا لنا أن محرك الاحتراق الداخليَّ لا يزأر حولنا إلا لما يقرب من قرنٍ من الزمان، في حين تقوم البشرية بالانفجارات على مدار عدة آلاف من السنين. وبالطبع يرتبط التعليل بالهندسة التي تُعَد غايةً في الأهمية للتحكم في الانفجارات، بما في ذلك

كيفية تفعيل العديد من الانفجارات في الوقت ذاتِه وجعلها جميعًا تعمل معًا، وبكلمات أخرى، يتعلق الأمر بالتوقيت.



يختلط البنزين والهواء في محرك الاحتراق الداخلي في أسطوانة محكمة الغلق تحوي مكبسًا متحركًا. يتحرك المكبس لأعلى ويضغط خليط الهواء والبنزين الذي يحترق عندئذٍ بشرارة. ويدفع الانفجارُ الناتج المكبسَ لأسفل، وتُحرك الحركة من أعلى لأسفل رافعةً تدور حول عمود الإدارة. ويُضبَط توقيت الانفجارات؛ ومِن ثَم عندما يندفع أحد المكابس إلى أسفل، يُستخدَم جزء من قوة اندفاعه لأسفل في تحريك مكبسٍ آخرَ لأعلى، على غِرار طريقة عمل الأرجوحة — أو على الأقل هذا ما يحدث عندما تسير الأمور على ما يُرام. وأحد الأمور التي قد تفسد في محرك الاحتراق هي تلك الحالة التي يُطلَق عليها «خبط المحرك»، وهي عبارة عن انفجار غير مكتمل ينتج عنه «فرقعة المحرك»، أو فقدان مفاجئ في القدرة، ويُمكِن فهمُ سبب خبط المحرك في ضوء معدلات التفاعل الكيميائي.

عند النظر إلى صورة مبسَّطة تعرض محركًا في حالة تشغيل، فقد يبدو أن مكبسًا يتحرك لأعلى ضاغطًا على خليط البنزين والهواء حتى يصل إلى قمة الشوط لأعلى، وعندئذٍ يطلق البوجيه شرارة كهربائية فينفجر البنزين ويتحرك المكبس لأسفل. غير أن هذه الصورة المبسطة تغفل حقيقة أن اشتعال البنزين هو تفاعل كيميائي ويشتمل على انفجارات ولا يحدث تلقائيًّا شأنه في ذلك شأن التفاعلات الكيميائية كافة، والانفجارات تستغرق بعض الوقت كي تنتشر في خليط البنزين والهواء.

ويُعزى السبب في استغراق الانفجار لبعض الوقت إلى أن البوجيه عادةً يُصمَّم كي يُطلِق الشرارة قبل أن يصل مباشرة إلى قمة الشوط لأعلى، وبهذه الطريقة يستقبل المكبسُ

الدفعَ من انفجار الغاز بمجرد أن يكون في وضعِ استعدادٍ لبدء التحرك لأسفل، كما أنَّه يستفيد من الأثر الكامل للانفجار. وإذا كان مِن المفترض أن يبدأ الانفجارُ مباشرة عندما يصل المكبسُ إلى قمة الشوط، فإن المكبس عندئذٍ سيكون بالفعل في حالةِ حركةٍ في الاتجاه البعيد؛ لأن قوة الغازات المنفجرةِ بأكملها تتحرَّك نحوه، وأثرُ القوة سيكون قد خُفِّف. وإذا كان من المفترض أن تحدث الشرارة الكهربية بعيدًا جدًّا عن المكبس، فإن الانفجار الكامل كان سيُقابِل المكبس في طريقه لأعلى؛ ومن ثَم يعمل ضد شوط القدرة للمكابس الأخرى التي تُوجَد أسفل الخط.

ويُمكن أن يُدمر الإشعالُ المحظور الفوائدَ التي تُجنى من كلِّ هذه التوقيتات المعقَّدة. فإذا حدث شيء ما تسبب في اشتعال خليط البنزين والهواء قبلما يُطلق البوجيه شرارته الكهربية، أو تسبب في احتراق الخليط في أماكن مختلفة في ذات الوقت، فإن النتيجة ستكون مجموعة من الموجات الصدمية (موجات صوتية تنطلق بسرعة فوق صوتية). وهذه الضغوط الشاذة وغير الموضوعة في الحسبان يُمكنها أن تتداخل على نحو خطير مع وظيفة المكبس.

وكما رأينا، تُعَد درجة الحرارة عاملًا مهمًّا لمعدلات التفاعل. وكما ذكرنا في مناقشتنا للحالة الغازية، يُمكن لزيادة الضغط أن تتسبَّب في ارتفاع درجة الحرارة، حتى إنه يُمكن تسخين خليط البنزين والهواء إلى درجة الاشتعال عن طريق الضغط وحده. وفي الواقع يعتمد عمل محركات الديزل على هذه الفكرة، فلا تحوي محركات الديزل بوجيهات إشعال، لكنها تعتمد على الضغط لإشعال خليط الوقود والهواء، لكن إذا حدث هذا في محركات أخرى غير محركات الديزل، فإنه يتسبب في حدوث احتراق لا يُمكن التحكم فيه ويتسبَّب في حدوث الاضطرابات؛ إذ يجب التحكم الجيد في خليط البنزين والهواء في محركات تُدار بعناية لمنع حدوث الخبط.

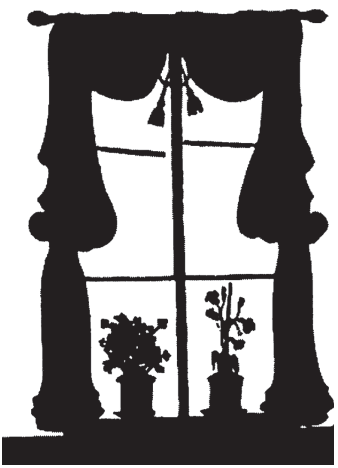
وثمة عاملٌ مهم آخرُ هو الوقود؛ فإذا كانت درجة البنزين ذات قدرةٍ أكبرَ على تحمُّل درجة الحرارة والضغط داخل الأسطوانة دون حدوث اشتعال تلقائي داخل الأسطوانة، فعندئذٍ سيكون الخبط أقل على الأرجح. وقد أُعِدَّ الوقود الذي يحوي درجة «أوكتان» عالية، بحيث يُمكنه أن يُقاوم الاحتراق حتى يشتعل.

ويُشير اسم «أوكتان» إلى مركب يحوي ثمانيَ أنوية من الكربون في تركيبه، وتعني درجةُ الأوكتان الموجودة في البنزين، في الأساس، نسبةَ نوعٍ معين من الأوكتان (فثمَّة طرُق عديدة لترتيب ثماني أنوية كربون في سلسلة) إلى نسبة سلسة معينة ذات سبع أنوية

كربون، لكن هذا المصطلح قد تغيَّر منذ بدء استخدامه ليصفَ خصائص احتراق الوقود أكثرَ مما يصف التركيب الدقيق للوقود. فعلى سبيل المثال عندما وُجد أن بعض مركبات الرَّصاص بإمكانها أن تُحسن طريقة احتراق الغازات، ومن ثَم تجنب الخبط، حينئذٍ قيل إن المواد المُضافة من منتجات الرَّصاص تعمل على رفع نسبة «الأوكتان» في البنزين.

ولحسن الحظ، يُمثل تصميم المحرك عاملًا مهمًّا أيضًا من العوامل التي تعمل على منع الخبط؛ ومِن ثَم عندما تَزيد نسبة الرصاص في البيئة بسبب زيادة نسبة الرصاص في الوقود، فإن السيارة يُعاد تصميمها كي تُزوَّد بوَقود ذي نسبةٍ أقلَّ من الأوكتان. لكن ليست بالضرورة أن تَستخدم جميعُ السيارات وقودًا عاليَ الأوكتان كي تكون بمأمن! فبعض السيارات تُدار بطريقةٍ أفضل باستخدام وَقودٍ منخفضِ الأوكتان؛ ففائدة الوقود عالي الأوكتان تتوقف على تصميم المحرك وعمره، وحالته وموقعه، وكيفية ضبطه، والوقت من السنَة. والتجرِبةُ هي خير دليل لك، فإذا كانت سيارتك تعمل جيدًا، دعها وشأنها فلا تخبطها.

# تجربة ١٨: كيمياء الضوء الأسود، وكيمياء المشابك



أولئك الذين يُشكلون الأرستقراطية الطبيعية، لا تجدهم في الواقع أرستقراطيين، أو بالكاد يكونون أرستقراطيين، مثل الطاقة الكيميائية للطَّيف؛ لا تكون أقوى إلا بالقرب منه.

رالف والدو إيمرسون في «مقالات»، ١٨٣٠

في مناقشتنا عن العوامل التي تُؤثر على أداء محرك السيارة، من الأشياء التي لم نذكرها هي شدة ضوء الشمس؛ لأن التفاعلات التي تحدث داخل المحرك لا تتعرض لأشعة الشمس، لكن ضوء الشمس يُؤثر على السيارات، فالموادُّ الكيميائية الموجودة في دهان السيارة والإطارات والتركيبات المصنوعة من اللدائن تفسد من الشمس. في الواقع، الضوء يُمكِنه أن يكون عاملًا مهمًّا لتفاعلات عديدة، ويُمكن أن يكون الضوء أيضًا عاملًا غامضًا؛ لأنه في أوقاتٍ كثيرة لا يتوقف الأمر على الضوء فحسب، بل على نوعه أيضًا، ولكي نُبين تأثير الضوء على التفاعلات الكيميائية، راجع التجربة التي طرحناها في الفصل الأخير التي قمنا فيها بقياس معدل التبييض باستخدام محلول دليل.

ارتدِ نظارتَك الواقية، ثم ضع مادة التبييض في الأكواب تمامًا مثلما فعلنا من قبل، لكن في هذه المرة عَرِّض أحد المحاليل للضوء الأسود المقترح شراؤه ضمن قائمة المشتريات والمحاليل. يجب أن يُقرب الضوء الأسود لمسافة بوصة من سطح المحلول لضمان أكبر تأثير. فالضوء يجب أن يُسلَّط فوق السطح مباشرة وليس عن طريق جانب الوعاء الزجاجي أو البلاستيكي. ويجب أن يدوم التعرض لما يقرب من خمس عشرةَ دقيقة. احرص على ألَّا يتعرض المحلول الآخر للضوء. الآن أضف قطراتٍ متساويةً من الدليل إلى كِلا الكوبَين اللذَين يحويان مادة التبييض، ثم احسب الوقت الذي يستغرقه اللون حتى يتلاشى منهما. عندئذٍ ينبغي أن يحدث التفاعل في المحلول الذي تعرَّض للضوء الأسود أسرع جدًّا من تفاعل المحلول الذي لم يتعرَّض؛ ذلك لأن مادة التبييض تفكَّكَت ضوء كيميائيًّا، بمعنى أن الضوء الأسود تسبَّب في تفتيت مادة التبييض كيميائيًّا إلى أنواع أكثرَ قدرةً على التفاعل.

والآن وأنت لا تزال مرتديًا نظارة الأمان، صُب نحو نصف بوصة (١سم) من محلول كبريتات النحاس (المعدة كما هو مشار في قائمة المشتريات والمحاليل) إلى كوب من الزجاج أو البلاستيك على أن تتخلص من الكوب بعدها. فكِّك مشبك ورق واغمس أحد طرَفَيه في المحلول، ثم ضع طرَف مسمار مطليًّا بالخارصين في المحلول على ألَّا يَلمس المشبك، ضع أيضًا طرف سلك ألمنيوم طويلًا في المحلول بحيث لا يلمس المعادن الأخرى. انتظر ساعة ثم أخرج المعادن من المحلول وافحصها جيدًا. ينبغي أن يتغطى المشبك بطبقة رقيقةٍ من النُّحاس، والمسمار المطلي بالخارصين يصبح لونه أغمق في الموضع الذي لمس المحلول، أما سلك الألمنيوم فينبغي أن يظل كما هو بلا تغيير. في حالة المشبك المعدني والمسمار المطلي بالخارصين، فإن الإلكتروناتِ الموجودةَ على سطح المعدن تنتقل إلى أيونات النحاس

في المحلول تُكوِّن النحاس الفلزي عندما قبلت الأيونات الإلكترونات. وترسب النحاس على المشبك المعدني وعلى سطح المسمار؛ لأن الحديد الموجود في المشبك والمسمار تأيَّن وانحلَّ. غير أن الإلكترونات مرَّت بوقتٍ أصعبَ بتركها الألمنيوم. ويُطلَق على تبادل الإلكترونات عبر المحاليل أو عبر المعادن مصطلحُ «الكيمياء الكهربائية». ولَسوف نفحص المزيد من هذه التفاعلات — وأسبابها وعواقبها — في الفصل التالي.

الفصل الثامن عشر

# الإلكترونات والفوتونات: أنِر الضوء

ولم يصعق البرق الذي سبقها أحدًا غيري،
لكنني لن أبدل مصباحي ما حييت.
عندما يُصبح هناك عجز في الأوكسجين،
قد يُسده الكيميائي،
ولكن ليس العجز في الكهرباء.

إميلي ديكنسون «قصائد»،
المجموعة الثالثة، ١٨٥٠

ما الشيء المشترك بين الألعاب النارية وتغير لون أوراق الشجر في فصل الخريف؟ الشيء المشترك هو الكيمياء الضوئية، وهي الكيمياء التي يكون فيها الضوء إحدى مواد المتفاعلات أو النواتج. ففي الألعاب النارية يكون الضوء هو إحدى النواتج وهو أمر جليٌّ للعيان بالطبع، وفي تغيُّر لون أوراق الشجر في فصل الخريف يكون الضوء هو إحدى موادِّ التفاعل، فعند وضع كيس ورقي فوق كُتلة من أوراق الشجر المتساقط، فإن هذا سوف يمنع تغيُّر لونها؛ ومِن ثَم يُعتبَر الضوء إحدى موادِّ التفاعل في أشهَر تفاعلات التساقط.

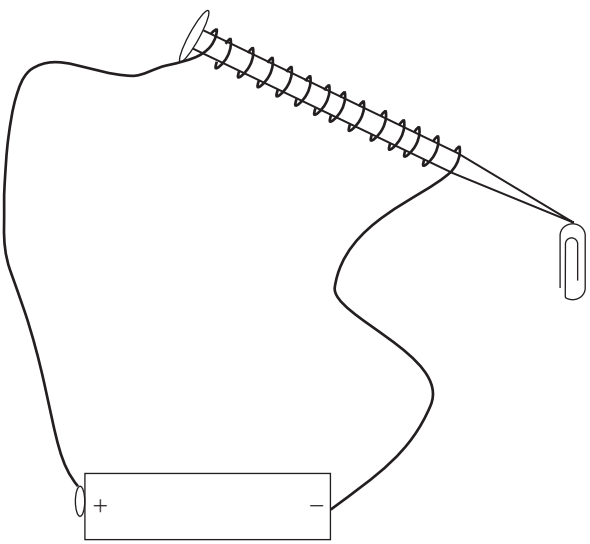
ما الشيء المشترك بين البطاريات والمِصدَّات؟ الشيء المشترك هو الكيمياء الكهربائية، وهي الكيمياء التي تكون فيها الكهرباء هي أحدَ المتفاعلات أو النواتج. فالبطاريات تُنتج الكهرباء عبر التفاعلات الكيميائية، وتخلق قدرًا من الإلكترونات كافيًا لإنارة المصباح الكهربي. وعند الطِّلاء بالكهرباء يُستخدَم نبع من الإلكترونات لاختزال المعادن، مثل الكروم، على السطح، كما في المصدَّات في السيارات المعروفة بكراون فيكتوريا، موديل عام ١٩٥٦. ما الشيء المشترك بين الكيمياء الضوئية والكيمياء الكهربائية؟ كلاهما يُمثل بعضًا من أنواع التفاعلات الكيميائية التي تتضمن جسيماتٍ صغيرة، ولكنها ليست ذرَّات، ولكنها تُؤثر كيميائيًّا. وفي الكيمياء الكهربية تكون هذه الجسيمات الدقيقة هي الإلكتروناتِ التي نألَفُها الآن. أما في الكيمياء الضوئية فتكون الجسيمات الصغيرة فوتونات، وهي قد تحتاج إلى بعض الشرح.

ونبدأ الآن بشرح طبيعة الضوء، يُمكِن وصف الضوء على أنه «مجال كهرومغناطيسي متذبذب»، وهو مصطلح يحتاج شرحًا في حد ذاته. وتُعرَّف كلمة «مجال» في العلوم الفيزيائية على أنها الأثر الذي ينتشر عبر منطقة من الفراغ، فعلى سبيل المثال، إذا كانت هناك نارٌ مشتعلة في منتصَف فِناء، فإنها تخلق مجالًا من السخونة، وتكون درجة الحرارة أعلى في المكان المشتعلة فيه النيران، ثم تمتد الحرارة في المنطقة المحيطة وتقلُّ بالتدريج إلى أن تتلاشى مع بُعد المسافة عن النيران. والمجال المتذبذب هو ذلك المجال الذي يتغير بانتظام مع الوقت. فعندما تُسلِّط مِروَحة على كتلة جليدية فإنها تكون مثل المجال الحراري المتذبذب السابق، والمجال الكهرومغناطيسي المتذبذب هو مجال كهربائي متذبذب مصحوبًا بمجال مغناطيسي متذبذب.

ويُمكنك أن تُبين العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية باستخدام مسمار وقطعةٍ من السلك، وبطارية قاعدية الخلية جهدها ١٫٥ فولت، وحامل بطارية (يُمكنك استخدام حامل بطارية أو لا). يُلف السلك حول المسمار في سلسلة من اللفات الضيقة، وعندئذٍ

تُوصِّل الأطراف أو تُمسِك بأطراف البطارية. وعليه، يُصبح المسمار مغناطيسًا كهربائيًّا، ويستطيع أن يلتقط مشبكًا معدنيًّا. ويُمكن أن يُشغَّل المِغناطيسُ ويُطفَأ عن طريق توصيل البطارية وفصلِها. وقد يسخن السلك؛ لذا لا تتركه موصلًا لفترة طويلة أكثرَ من الحاجة. ولا تُخزن على الإطلاق بطارية موصلة بأسلاك؛ لأنه قد يحدث تلامس وتسخن لدرجةٍ يُمكنها أن تُشعِل مادة قابلة للاشتعال.

والسؤال الذي نود أن نطرحه: لماذا يخلق التيار المتحرك مجالًا مغناطيسيًّا؟ لكي نكون أمناء تمامًا في الردِّ على هذا السؤال، أود أن أذكر أنه ما من أحد قطُّ أجاب عن هذا السؤال إجابة شافية بعد؛ لذا لن نُحاول نحن ذلك، لكن يكفي أن نذكر أن التأثير قوي للغاية، ويُقدم كيمياء مثيرة أيضًا.




شكل ١٨-١: مغناطيس كهربائي يُمكن عمله في البيت ويُمكنه أن يجذب مشبكًا معدنيًّا.

لماذا يرتبط المجال الكهرومغناطيسي المتذبذبُ بالكيمياء؟ كما يُمكن أن نتذكر من مناقشتنا للتركيب الذرِّي أن الذرةَ نفسها تتمتع بمجالٍ إلكتروني، كما أوضحنا بتجرِبة «الساحرة والماء». وتكون شحنة الإلكترون سالبةً وشحنة البروتون موجبة، وكلاهما

منفصلان أحدُهما عن الآخر؛ ومِن ثَم يُوجَد بين الإلكترونات والبروتونات مجال، وهو مجال الجذب. وقد يمتصُّ الجزيء الطاقة من المجال الكهرومغناطيسي المتذبذب للضوء؛ لأن الإلكترونات تُدفَع وتُجذَب من أماكنها الطبيعية، كما لو كانت طفلًا يتأرجح على أُرْجوحة إذ يمتصُّ الطاقة من والِدَيه اللذَين يدفعانه من موضعِ الاتزان على الأرجوحة. تتلخَّص كلُّ الكيمياء في إعادة تنظيم الإلكترونات؛ ومِن ثَم قد تجد الإلكترونات المدفوعة في كلِّ مكانٍ نفسَها في موضع جديد، مما قد ينتج عنه موادُّ جديدة.

لكن لماذا قلنا إن الضوء قد يتفاعل مع الذرات؟ إذا كان الضوء هو مجالًا كهرومغناطيسيًّا متذبذبًا والذرات تحوي مجالًا كهربائيًّا، ألَا ينبغي إذن أن يتفاعل الضوء دائمًا مع الذرات؟ قد نجد الإجابة في سؤال آخر قد تكون سألته في غضون التجرِبة التي أجريناها في هذا الفصل، وهو: هل يجب عليَّ أن أشتري مِصباحَ ضوءٍ أسود؟ فهو مكلف للغاية! ألا يُمكن أن أستخدم المصباح العادي أو حتى أُعرِّض المحلول للشمس؟

والإجابة على ذلك هي أن الضوء الأسود يُقدم وفرة من الأشعة فوق البنفسَجية، وهي نوع الضوء الذي نحتاجه لإتمام التفاعل. ويُفسر عمل الأشعة فوق البنفسجية أيضًا لماذا يجب رصد نِسَب الكلور في حمامات السباحة، فلا يُمكن التسليم بوضع نفس الكمية من الكلور كل يوم؛ لأنه لا يُوجَد كمٌّ ثابت من أشعة الشمس كل يوم، لكن إذا كانت الشمس تُرسل أشعَّة فوق بنفسَجية، لماذا لا نكتفي بتعريض التفاعل لأشعة الشمس ونُوفِّر نفقات مصباح الضوء الأسود؟ والإجابة هي أن الأشعة فوق البنفسجية ليست الأشعة الوحيدة التي تُرسلها الشمس، وأن وجود أنواع أخرى من الأشعة قد يُؤثر على نتائج التجربة، فالشمس تُرسل أيضًا أشعَّة مرئية والأشعة تحت الحمراء، والأشعة تحت الحمراء يُمكنها أن تُسخن المحلول. وكما ذكرنا في مناقشتنا حول «الحركية الكيميائية»، تستطيع الحرارة أن تُسرع من التفاعل الكيميائي؛ ومِن ثَم إذا عرَّضنا المحلول للشمس، فإننا لن نكون متيقِّنين أيهما السبب في تفتيت مادة التبييض؛ الأشعة فوق البنفسجية أم الحرارة. ويكون نوع الضوء المطلوب لإتمام التفاعل محددًا للغاية؛ لأن نوع المجال الكهربائي المحيط بالجزيء محدَّد للغاية. ويعتمد المجال على طبيعة العناصر التي تكون الجزيء وموقعها في الجزيء.

وتعتمد الطاقة التي تحملها الأشعة على نوع الأشعة، فنوع الأشعة التي تُسخن المحلول إذا عرَّضناه للشمس (الأشعة تحت الحمراء)، هي أشعَّة منخفضة الطاقة نسبيًّا،

والأشعة المرئية التي تستجيب لها أعينُنا هي أشعة متوسطة الطاقة، أما الأشعة فوق البنفسَجية التي أتمت التفاعل الكيميائي فهي أشعَّة عالية الطاقة نسبيًّا. والأشعة فوق البنفسجية هي ذلك النوع من الأشعة الذي يُمكنه أن يُدمر البشرة إذا تعرَّضت للشمس لفترات طويلة. ويُمكن أن تكون الأشعة التي نحتاجها لإتمام تفاعل كيميائي محددةً للغاية، لدرجة أن الأشعة يُمكن النظر إليها على أنها تيار من حُزَم الطاقة، يُحدِث كل جسيم فيها تغييرًا كيميائيًّا واحدًا. ويُطلَق على حُزَم الطاقة تلك فوتونات ويُمكن أن نعدَّها مثلما نعد الإلكترونات والجزيئات والذرات.

كيف يُمكن أن يكون الضوءُ جسيمًا وموجة؟ لقد أربك هذا السؤال أجيالًا من دارسي الكيمياء والفيزياء، لا سيما وأن الإجابة هي أن الضوء ليس هذا ولا ذاك — وهو هذا وذاك في الوقت ذاته — فالضوء يُمكن تصوره على هيئة جسيم عندما تكون صورة الجسيم مناسبة، ويُمكن تصوره على هيئة موجة عندما تكون صورة الموجة مناسبة، وفي الوقت ذاته لا تُعبر أيٌّ من الصورتَين عن جوهر الضوء، بل يُمثلان أحد جوانبه.

ويُمكِن أن نُشبه ذلك بالقطط المدلَّلة العادية التي تُربَّى في المنازل. هل القطط التي تُربَّى في المنازل هي حيوانات أليفة أم حيوانات متوحِّشة؟ تتصرف القطط كحيوانٍ أليف عندما تأتي أو تُدعَى للطعام أو للهو معها، لكنها تتصرف كحيوان متوحش عندما يعترض طريقَها عنكبوتٌ منحوس. إذن هل القط أليف أم متوحِّش؟ من الممكن أن نُطلِق عليه في وقت ما إحدى هاتَين الصفتَين، وفي وقت آخر الصفة الأخرى، فالقط ليس هذا ولا ذاك، وفي الوقت نفسِه هو كلاهما. وبالمثل، يُوصَف الضوء في بعض الأوقات على أنه جُسيم وفي أوقاتٍ أخرى على أنه موجة.

وقد شاهدنا بالفعل أن الضوء قادر على استثارة التفاعلات الكيميائية، لكن كيف يُمكننا أن نُوضِّح أن التفاعلات الكيميائية قادرة على إنتاج الضوء؟ إن أسهل طريقة على الأرجح هي الذَّهاب إلى أحد المعارض التِّجارية أو السيرك أو متجر بيع الأشياء المبتكرة لشراء أنابيب متوهجة. تعمل هذه الأنابيب الطويلة المكسوَّة بالبلاستيك والطويلة عن طريق ثَنيِها وبرمها حتى ينكسر الغشاء الذي يفصل ما بين سائلَين، ويمتزج هذان السائلان معًا ويتفاعلان، ويحوي هذان السائلان مواد تتفَسْفر عندما تتفاعل، وينتج عن ذلك أضواء متوهجة مبهجة. ويُمكننا أن نجد مثالًا آخر على ذلك في الألعاب النارية؛ إذ يسخن انفجار البارود الأملاح المعدنية الموجودة في الألعاب النارية إلى الدرجة التي تُثار بها الإلكترونات في مداراتها. وفي حين تسترخي الذرات عائدة إلى حالة سكونها الأكثرِ استقرارًا، تبثُّ الطاقة الزائدة في صورة ضوء.

وتُعَد الكيمياء الضوئية، الكيمياء التي يُحدِثها الضوء، هي المسئولة عن تفاعلات عديدة تحدث في الغلاف الجوي وتحدد جودة هوائنا. والضباب الضوئي الكيميائي هو الاسم الذي يُطلَق على الضباب الرقيق البنِّي الضارب للحمرة الذي يتكون فوق المدن تحت ظروف مُناخية معينة. والنيتروجين ($N_2$) والأوكسجين ($O_2$) مكونات طبيعية للهواء ويُمكنهما أن يكونا NO في البرق. ويتفاعل NO مع $O_2$ ليكونا $NO_2$، الذي يذوب في ماء المطر ويسقط إلى الأرض. وهنا يُمكِن الحصول على النيتروجين عن طريق نوعٍ من البكتيريا، وعن طريق سلسلة من التفاعلات يُمكن تكوين البروتينات لأنماط الحياة المختلفة للنبات والحيوان. وللأسف، ثمَّة مصدرٌ آخر لـ $NO_2$، لكنه صناعي إلى حد ما، هو الناتج عن أسطوانات السيارات، ولن يكون NO2 الناتج سبب مشكلة إذا وُجِد بكميات صغيرة، لكنه قد يُسبب الأضرار إذا وُجد بكميات كبيرة. ويُمكِن أن يمتصَّ $NO_2$ المنطلق في الهواء الأشعة فوق البنفسجية من الشمس، ويفتت ويتحول إلى NO، وO مرة أخرى. وتكمن المشكلة في أن O يُمكنه أن يتفاعل مع $O_2$ ويكونا $O_3$، المعروف بالأوزون. وفي حين يكون الأوزون ذا فائدة في طبقات الغلاف الجوي العليا — إذ يحمي سطح الأرض من القوة الكاملة لأشعة الشمس — فإن وجوده في المستويات الدُّنيا، في مستوى الشارع، لا يُعَد أمرًا جيدًا، فالأوزون يُتلف المطاط والبلاستيك والنباتات والحيوانات ويتفاعل مع عوادم السيارات؛ ليُكون موادَّ ملوثة ضارة.

وهكذا نجد أن الطاقة المنطلقة من الضوء يُمكنها أن تُحدِث بعض التفاعلات الكيميائية، لكن السؤال هنا هو: لماذا تطلق بعض التفاعلات ضوءًا؟ الإجابة هي أن التفاعلات الكيميائية تتكون من إلكترونات معادة التنظيم، واستنادًا إلى المواد الكاشفة والنواتج، قد تجد هذه الإلكترونات نفسها في مدارات جزيئات النواتج التي لا تكون في حالة الطاقة الدنيا، وكما هو الحال مع الإلكترونات في الألعاب النارية، ففي طريق عودتها إلى حالة السكون، قد تُطلِق بعض الضوء.

وثمة طريقة أخرى يُمكن عن طريقها إعادة ترتيب الإلكترونات في تفاعل كيميائي، وذلك عن طريق الأسلاك. والكيمياء الكهربائية هي كيمياء أكسدة واختزال، وهي تلك التي ينفصل فيها الموضع الذي تُجرى فيه تفاعلاتُ الأكسدة عن الموضع الذي تُجرى فيه تفاعلات الاختزال. وتظهر طبيعة الكيمياء الكهربائية في المقام الأول في شكلَين مميزَين، هما خلايا التحليل الكهربي والخلايا الفولتية (المعروفة بالجلفانية أيضًا). والخلايا الفولتية

هي خلايا تنتج الكهرباء؛ من ثم تُصنَّف البطاريات باعتبارها خلايا فولتية. والمبادئ التي تقوم عليها فكرة عمل الخلايا الفولتية هي نفس المبادئ التي تقوم عليها باقي التفاعلات الكيميائية الأخرى، باستثناء أن الإلكترونات تتبادل بعضُها مع بعض عبر أسلاك، وليس عبر اتصال مباشر. والتفاعلات هي تفاعلات أكسدة واختزال (ولذلك هي تُنتج تيارًا من الإلكترونات) بمعنى أن التفاعلات تخضع لقوانين الديناميكا الحرارية وتميل إلى الاتزان (ولهذا تفقد البطاريات طاقتها)، وأن التفاعلات لها معدلات محددة (ولهذا يجب أن تُدفَّأ بعض البطاريات حتى تصل إلى درجة حرارة الغرفة قبل أن تُنتج الحد الأقصى من الطاقة).

لكن تفاعلات الكيمياء الكهربية يجب أن تخضع لقوانين الكهرباء أيضًا مثلما تخضع لقوانين الكيمياء؛ لذلك حتى إن اتصلت المحاليل عن طريق سلك، فإن الدائرة الكهربية يجب أن تكون مكتملة، وإلا فلن تنتقل الإلكترونات إلا بعيدًا ليس إلا. ويحدث الاتصال عامة عن طريق محلول يحتوي على أيونات يُسمَّى «الإلكتروليت». لأن الأيونات هي جسيمات صغيرة مشحونة تتحرك في الإلكتروليت وتكون قادرة على توصيل الشحنة الكهربائية من موضع الأكسدة إلى موضع الاختزال؛ إذ تتحرك الإلكترونات عبر السلك، وفي حال البطاريات التي تشتريها من المتجر، عادةً ما يكون الإلكتروليت في شكل عجينة رطبة وليس سائلًا، لكن في بطاريات السيارات التي تنتج تيارات كهربائية عالية، عادة ما يكون الإلكتروليت هو حامض الكبريتيك.

ويكون الليمون حامضيًّا؛ ومِن ثَم يُعَد عصير الليمون فعليًّا إلكتروليت جيدًا أيضًا. والآن ارتدِ نظارة الأمان الواقية، واغرز مسمارًا مطليًّا بالخارصين في طرف ليمونة ودبوسًا في طرفها الآخر في أحد شقوقها الضيقة، ثم قِسْ فرق الجهد الكهربائي بين المسمار والدبوس وباستخدام فولتميتر يُمكن شراؤه من متجر بيع الخردوات، عن طريق توصيل الطرَف السالب بالمسمار المطلي بالخارصين والطرف الموجب بالنُّحاس. يعتمد فرق الجهد المَقيس الفعلي على الليمون والعوامل الأخرى.

والتفاعل الذي يحدث في بطارية الليمون هو اختزال أيونات النحاس (إذ يذوب القليل من النحاس من دبوس النحاس في عصير الليمون الحامضي) وأكسدة الخارصين إلى أيونات الخارصين — وهي الحالة الأكثر ثباتًا وفقًا للديناميكا الحرارية. ولأن التفاعل يتحرك نحو حالة أكثر ثباتًا؛ ومِن ثَم يُمكنه أن ينتج الكهرباء تمامًا مثل الخلية الجلفانية.

وخلية الإلكتروليت هي نقيض الخلية الجلفانية، ففي الخلية الجلفانية يُستخدَم التفاعل الكيميائي لكي يُنتج الكهرباء، أما في خلية الإلكتروليت فتُستخدَم الكهرباء لتُنتج التفاعل الكيميائي، ويُمكن عمل خلية إلكتروليتية كالآتي:

ارتدِ أولًا نظارة الأمان الواقية، ثم التقط مسمارك الحديد المطلي بالنحاس من التجربة السابقة، ثم أدخله في كوب يحوي نحو بوصة من المحلول المُخفِّض لقلويةِ ماءِ حوض السمك، المقترَح شراؤه في قائمة المشتريات والمحاليل. ثبِّت المسمار بواسطة سلك في الطرف الموجَب من بطارية جافة في حامل بطارية. أضف مسمارًا حديديًّا آخر إلى المحلول ثم وصِّله بالطرف السالب لنفس البطارية. يترك النحاسُ المسمارَ الحديدي الأول بالتدريج ويتحول ليُغطي المسمار الثاني. وهذه العملية، التي يُطلَق عليها الطلاء الكهربي، تُستخدَم لإضافة الطبقات المعدنية لكل شيء، بدءًا من المفروشات إلى المجوهرات. ويُمكِن أن يكون الغرض من الطلاء الكهربي هو التزيين، لكنه يتمتع بأغراض عملية أكثر، فهو يُستخدَم بنجاح ليحمي المعادن النشطة مثل الحديد أو سبائك الحديد من تأثيرات الصدأ التي تُحدِثها الرطوبة. ولماذا تُتلِف الرطوبة الحديد؟ قد يظن المرء أن الكباري الفولاذية التي يُمكنها أن تتحمل أطنانًا من الشحنات كل يوم ينبغي أن تُقاوم قطرات قليلة من الماء، ولكن تُشكل قطرات الماء على الحديد خليةً كهروكيميائية، تمامًا مثل سلك الحديد الذي يوصل ما بين محلولَين. في التفاعل المكون للصدأ، يتأكسد الحديد إلى أكسيد حديد الذي هو الصدأ، ويُختزَل الأوكسجين الموجود في الهواء إلى ماء. ولكي نُثبت أن هذا التفاعل يحدث في موضعَين مختلفَين — أحدهما للأكسدة والآخر للاختزال — فكِّك مشبكًا معدنيًّا، وضع نصفه داخل كوب يحتوي على خل والنصف الآخر خارج الخل لمدة يومَين. عندئذٍ خذ الدبوس خارج المحلول وتفحَّصْه تحت عدسة مكبرة. ينبغي أن ترى الصدأ متجمعًا على موضع واحد بعينه، ثم ستجد تحت بقعة الصدأ تلك منطقة نظيفة، فالصدأ يتجمع فوق المحلول؛ لأن التفاعل يحتاج إلى أوكسجين.

والآن أثبتنا أنَّ ثمةَ شيئًا مشتركًا بين الألعاب النارية وتغيُّر لون أوراق الشجر في فصل الخريف، وأيضًا هناك شيءٌ مشترك بين البطاريات والمصدَّات، لكن في هذا الفصل، نضع أساسًا مشتركًا لتلك الأشياء الأربعة معًا، إذن ما الشيء المشترك بين الألعاب النارية، وتغيُّر لون أوراق الشجر في فصل الخريف، والبطاريات، والمصدات؟ الشيء المشترك بينها هو الطاقة الشمسية.

**على سبيل المثال: الفوتون يُقابل الإلكترون: الطاقة الشمسية**

تستفيد كلٌّ من الحرباء وعبَّاد الشمس من الطاقة الشمسية منذ أمدٍ بعيد قبل أن يظهر الإنسان على وجه البسيطة، ويُمكن أن نقول بوجه عام إن كل الحياة مبنية على الطاقة الشمسية. غير أننا قد أضفنا تقنيات ضئيلة عبر السنين، فقد استعنَّا في بادئ الأمر بفكرة الحرباء، وطورنا مجمعات للطاقة الشمسية تمتص الطاقة من الشمس ثم تختزنها. كما طورنا أيضًا الخلايا الفوتوفلطية بنجاح في تشغيل الأجهزة الصغيرة مثل الآلات الحاسبة وحتى في تشغيل المنتجات التي تحتاج لمقدار هائل من الطاقة في المناطق التي تتعرض للشمس بغزارة. ويعمل العلماء أيضًا على استنباط تقنيات إبداعية أخرى للاستفادة من الطاقة الغزيرة المنبثقة من الشمس، وتتمثَّل إحدى هذه التقنيات في استغلال الطاقة الشمسية في التحويل الإلكتروليتي للملوثات.

ومن أكثر الملوثات صعوبة في السيطرة عليها، الملوثات العضوية التي تُشتق من المخصبات والمبيدات الحشرية. والمركبات العضوية هي أنواع من المواد يتركَّب منها الزيوت والشمع والبلاستيك، وهي مُقاوِم جيِّد للماءِ والأملاح البسيطة التركيب أو حتى الأحماض والقلويات، غير أن المواد العضوية يُمكن أن تتفتت عن طريق وضعها في خلايا إلكتروليتية ثم دفع إلكترونات عبرها أو إزالة إلكترونات منها، لكن الإلكترونات يجب أن تأتي من مصدر ما. فإذا دُفِع التيار في نبات يُحرَق بالزيت، فعندئذٍ تُنتج عملية تفتيت الملوثات

ملوثاتٍ أخرى، ومن ثَم نعود إلى نقطة البداية. لكن لحسن الحظ، تُوجَد بعض المواد مثل جسيمات أكسيد التيتانيوم.

ويُستخدَم أكسيد التيتانيوم في مواد الدهان بسبب لونه الأبيض النقي، وعندما تظهر الشمس، يُمكن أن تمتصَّ جسيماتُ أكسيد التيتانيوم إشعاعاتِ الشمس، وتَستخدمَ هذه الطاقة في تنشيط إلكتروناته بجعلها في حالة نشطة وذات قدرة أكثرَ على التفاعل، عندئذٍ تعمل هذه الإلكترونات مثل مصادر الإلكترونات الصغيرة الحجم في البطاريات المصغَّرة لتحليل الملوثات العضوية جزيئًا جزيئًا. لذا كما هو الحال في أساطير إيسوب — التي تدور حول الصراع ما بين الشمس والرياح فيما يتعلق بأيِّهما الأقوى — نجد أن الذي يُقاوم القوة يُمكن التغلب عليه في كثير من الأحيان بالإقناع اللطيف. ضوء الشمس الدافئ المرحَّب به.

# الباب الثاني

# مقدمة

# عزف النغمات

قال إم والدمان: «إنني سعيد لأن يكون لي تلميذ، وإذا كان عملك على نفس قدر قدراتك، فأنا متيقن تمامًا من نجاحك. والكيمياء هي ذلك الفرع من الفلسفة الطبيعية التي حدث فيها أعظم التطورات، ولا تزال هناك إمكانية حدوث المزيد، إنها في غاية الأهمية حتى إنني جعلتها دراستي الخاصة.»

ماري شيلي، «فرانكنشتاين»، ١٨٢٠

لقد قطعنا قدرًا لا بأس به، فقد ناقشنا طبيعة الكيمياء، وتركيب الذرات والمركبات الكيميائية، وخصائص العناصر كما هي موضحة في الجدول الدوري. واكتشفنا أيضًا الفئاتِ الأساسيةَ للتفاعلات الكيميائية مثل تفاعلات الأكسدة والاختزال، وتفاعلات الأحماض والقواعد، وكذلك تفاعلات الإزاحة. وشرحنا النظرية التي تشرح طبيعة الروابط الكيميائية ومبادئ التفاعلات الكيميائية. وناقشنا الاعتبارات العملية للقوى البينجزيئية والتركيز، كما درسنا الخصائص التي تقتصر على الغازات وتفاعلاتها. وكشفنا عن الفروق الصارخة بين الخصائص المراوغة للمحاليل والخصائص الملموسة للمواد الصلبة. ونقَّبنا في الديناميكا الحرارية واكتشفنا مرحلة الاتزان، وتفحصنا أهمية مفهوم الاتزان الكيميائي، ورأينا كيف أنه يُمكن لمبادئ الديناميكا الحرارية أن تتنبأ بخصائص المحاليل الترابطية المُلاحظة. واطَّلعنا على قواعد علم الحركية الكيميائية، وختمنا دراستنا لمبادئ الكيمياء بنظرة للكيمياء المستحَثَّة بالكهرباء والضوء.

يا له من عمل جيد!

وبعد أن قضينا الكثير من الوقت والجهد في البحث والتمعن والاستقصاء، نحن الآن مستعدون لجني الثمار؛ إذ سنرى كيف تجتمع معًا هذه المبادئ الأساسية في بعض من مجالات الكيمياء المميزة والمتخصصة — مثل الكيمياء العضوية والكيمياء غير العضوية والكيمياء الحيوية والكيمياء التحليلية — وسنُلقي نظرة للأمام على مستقبل مثير.

وقبل أن نبدأ لنلقِ نظرة عامة قصيرة.

وأود أن أذكر أن الكيمياء العضوية والكيمياء غير العضوية ليستا تطبيقاتٍ للكيمياء بقدر ما هما استكشافاتٌ للكيمياء لها أهدافٌ محدَّدة. ويهتم أخصِّائيُّو الكيمياء العضوية بكيمياء الهيدروكربونات، وهي المواد المكوَّنة من كربون وهيدروجين مرتبطَين برابطة تساهمية. والهدف من الكيمياء العضوية هو تركيب خصائص السلاسل المترابطة وتفاعلاتها، والمعقودة في شكل حلقات للهيدروكربونات في كل تنويعاتها المطلَقة وفهمها، وتُوجَد هذه المواد في كافة أنحاء عالمنا الزيتي الشمعي، وفي المواد التي تُصنَع منها أجسادنا.

أما أخصائيو الكيمياء غير العضوية فهم يبحثون في المواد المصنوعة من العناصر المائة أو ما يزيد، الموجودةِ في الجدول الدوري، الذي يُعَد مشروعًا ضخمًا. ولكن، مع أن هذه المركبات غنية ومعقدة في سلوكها، فهي لا تكوِّن سلاسل طويلة ومترابطة مثلما تفعل الهيدروكربونات؛ ومِن ثَم يُمكن تنوعها في تركيبها العنصري. وتُكوِّن المواد غيرُ العضوية

المحاليلَ الصخرية والمِلحية التي تُكوِّن الأرض والكواكب وموادَّ النجوم كافة. ويعمل أخصائيُّو الكيمياء غيرِ العضوية على استنباط تركيبات لأشباه الموصلات والموصلات الفائقةِ التوصيل، والسبائك والكثير غيرها من المواد الجديدة.

ويدرس علماءُ الكيمياء الحيوية هُويةَ المواد التي تُعَد أساسَ الحياة وخواصَّها وتفاعلاتها. وتُستمَد هذه المحاولة المهمة التي تتعقد باطِّرادٍ من جميع أنظمةِ الكيمياء، وتُوظَّف مبادئُ الكيمياء كلُّها لفهم تفاعلات الكيمياء التي تقود إيقاعات الحياة.

ويأخذ علماء الكيمياء التحليلية عن الأنظمة السابق ذِكرُها كافَّة. والهدف الذي يسعى نحوه علماءُ الكيمياء التحليلية هو تحديد هوية المواد ومقاديرها — سواءٌ أكانت موادَّ عضوية أم غير عضوية أم موادَّ كيميائية حيوية — عن طريق فصلها في بعض الأحيان من المزيج، وفي أحيان أخرى عن طريق عزلها في قالب معتم. وعلى كل كيميائي أن يتمتع ببعض الإجادة لفن تحليل المواد الكيميائية من حيث تركيبُها وتركيزُها. ويجد اختصاصيُّو الكيمياء التحليلية العملَ كجزء لا يتجزَّأ من المختبرات الأكاديمية والصناعية والحكومية. وسوف نكتسب بعض التقدير للبراعة الفنية التي يتمتع بها اختصاصيو الكيمياء التحليلية عن طريق متابعة بعضٍ من المغامرات الخاصة التي يتمتع بها اختصاصيُّو الكيمياء التحليلية — كيميائيو الطبِّ الشرعي — في أحداث يوم مشوِّق.

والآن، هيا بنا إلى المختبر ...

# تجربة الكيمياء العضوية:
# من أسبرين إلى حامض

لقد حدث هذا في غضون يومٍ من أيام الدراسة، حدث في خضمِّ انغماسهم في غموض الكيمياء العضوية وأسرارها أن دوريس فان بنشوتن اقتحمت حياتهم.

جاك لندن، «وجه القمر وروايات أخرى»، ١٩٠٥

عندما تمكنتُ من إذابة الهيدروكربونات التي كنت أعمل بها، تقابلت مرة أخرى مع مشكلة الشُّلتوس، وتفكرت مليًّا في الأمر برمته مرة أخرى.

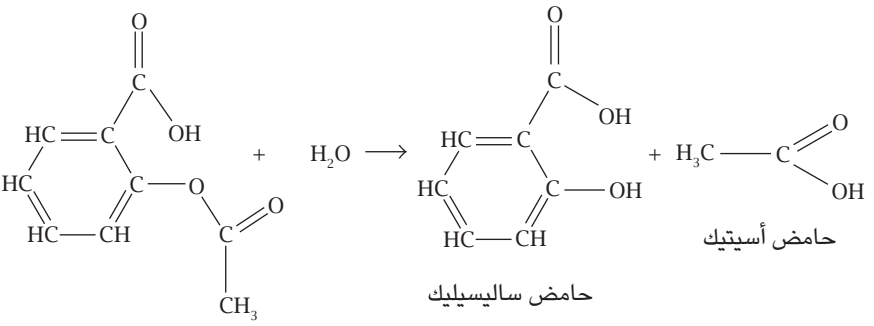
آرثر كونان دويل في روايته
«علامة الأربع»، ١٨٩٠

لأن الكربون يتمتع بخصائصَ فريدةٍ عديدة، مثل قدرته على تكوين سلاسل طويلة، تظهر المركَّبات العضوية — أو مركبات الكربون — في أنواع غير منتهيةِ العدد تقريبًا. ويقضي اختصاصيُّو الكيمياء العضوية وقتَهم في دراسة الطرق التي يتفاعل بها الكربون مع نفسه ومع المركبات الأخرى، ثم يَستخدمون هذه المعلومات لكي يُصمموا التراكيب، وهي إجراءات تدريجية يُمكن عن طريقها تخليقُ مركَّب معينٍ من المادة المعطاة في البداية. وقد صمم اختصاصيو الكيمياء العضوية، باستخدام معلوماتهم عن نشاط الكربون، تركيبًا لكل الموادِّ العضوية الرائعة التي لدينا، ابتداءً من اللدائن وحتى الأدوية. غير أن هذه الليونةَ التي تتمتَّع بها جزيئاتُ المواد العضوية تُمثل أيضًا التحديَ الذي تُكابده الكيمياء العضوية؛ إذ يجب مُراعاةُ الأنظمة التخليقية بشدة وهي قد تتضمَّن خطواتٍ عدةً تتطلب كلٌّ منها ضبطًا مُحكَمًا، وتُقدِّم التجرِبةُ الآتية لمحةً عن الخطوات التي قد تُتضمَّن في مثل هذا التخليق.

وفي هذه التجرِبة، سنعزل أولًا المكوِّن النشط الذي يُوجَد في الشكل الحديث للأسبرين، حامض الإستيل ساليسيليك، باستخدام إجراء يتمتع بقداسة تقادمه، خاص بالكيمياء العضوية يُسمَّى «الاستخلاص». ويُعَد تحضيرُ دليل الكرنب القرمزي نوعًا من الاستخلاص العضوي، فالصِّبغة القرمزية العضوية تُستخرَج من الكرنب مع الماء، وهنا سنستخدم الكحول لاستخراج حامض الإسيتيل ساليسيليك من الأسبرين.

ثم بعد ذلك، سوف نحول حامض الإسيتيل ساليسيليك إلى حامض الخليك عن طريق اتباع تخليق عضوي خطوة خطوة. ومعادلة التفاعل موضَّحة أدناه، ويُبين شكل ١ تركيب الجزيئات في التفاعل. وتُمثل الخطوط الموجودة بين رموز العناصر الروابط. لاحظ أن بعضها يُمثل روابطَ ثُنائية، فالكربون عنصر متنوع جدًّا.

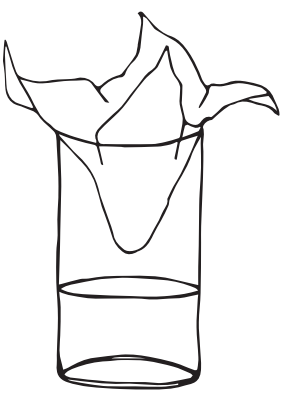
والكيمياء العضوية هي نظام صارم، ولكن يُمكن تقليل الألم بقليل من الأسبرين.




$$CH_3CO_2C_6H_4CO_2H + H_2O \longrightarrow C_6H_4CO_2HOH + CH_3CO_2H$$

شكل ١: يُمكن تحويل حامض الإسيتيل ساليسيليك، المكون النشط للأسبرين، إلى حامض ساليسيليك وحامض أسيتيك الذي هو مكون أساسي للخل.

## استخلاص حامض الإسيتيل ساليسيليك وعزله



ضع من عشرة إلى خمسة عشر قرص أسبرين، سواء أكان أسبرينًا خالصًا أم في محلول منظَّم، في وعاء زجاجي. ارتدِ نظارة الأمان الواقية ثم صبَّ نصف كوب (١٢٠ مليلترًا)

من كحول الأيزوبروبيل، ويُمكن أن يفيَ ٧٠٪ من الأيزوبروبيل بالغرض، لكن ينبغي أن تكون هذه الكمية كافية لتغطية الأقراص مع ترك بعض الفراغ. ولن يتطلب الأمر الكثير من المذيب لاستخراج حامض إسيتيل ساليسيليك من الأقراص. سخِّن الوعاء تسخينًا هينًا في ميكروويف على نصف الطاقة لمدة ثلاثين ثانية، ثم أخرجه. ينبغي أن يكون المذيب دافئًا وليس مغليًّا. يستخرج المذيب الدافئ مركب الأسبرين من الأقراص تاركًا الغلاف النشوي ومكونات أخرى غير مذابة. تذكر مناقشتنا التي تدور حول أن «الأشباه تُذيب الأشباه»، لا تُذِب النشا غير القطبية في مذيب الكحول والماء القطبي. إذا كان لديك ملعقة أو شوكة قديمة، يُمكنك أن تُفتت برفق المادةَ المتبقية لكي تحصل على المزيد من حامض إسيتيل ساليسيليك المستخلص. تستغرق هذه العملية ما يقرب من خمسَ عشرة إلى عشرين دقيقة، لكنك ينبغي أن تتحلى بالصبر.

خذ منشفة ورقية وابسطها فوق سطح كوب كبير. اضغط عليها من المنتصف بخفة حتى تشبه القمع. صب بحذر محلول الأسبرين والكحول عبر المنشفة الورقية، وسيعمل هذا على تجميع المتبقِّي من الأقراص في المنشفة الورقية، وسيسمح بنفاذ السائل الصافي، الذي يُدعى «السائل الأم»، إلى قاع الكوب. وبمجرد ترشيح كل المحلول، ارتدِ قفَّازك المصنوع من المطاط وأزِل المنشفة والمتبقيَ من الأقراص. حاول ألا تلمس الجزء الرَّطْب من المنشفة الورقية؛ إذ يكون المذيبُ مُحمَّلًا بحامض الإسيتيل ساليسيليك الذي قد يَعلَق ببشَرتِك بعدما يتبخَّر المذيب. قد ترغب في غسل يدَيك إذا حدث ذلك، مع أن الأسبرين لا يُعَد مركبًا خطيرًا عندما يعلق بنسب ضئيلة بيدَيك. والآن نجد أن حامض الإسيتيل ساليسيليك ذاب في الكحول الموجود في الكوب.

افتح الصنبور واملأ الكوب المحتويَ على السائل الأم بماء الصنبور الفاتر حتى يمتلئ نحو ثلاثة أرباع الكوب، وإذا كان استخلاصك للكحول ناجحًا، ينبغي أن يكون هناك بلَّورات بيضاء صغيرة مسطحة من حامض الإسيتيل ساليسيليك تملأ الخليط. ويُعتبَر حامض الإسيتيل ساليسيليك عديمَ القطبية إلى حد ما ويذوب بسهولة في مذيب عديم القطبية إلى حد ما مثل كحول الأيزوبروبيل، لكن ما إن يُضاف الماء ذو القطبية الشديدة حتى يُجبر حامض الإسيتيل ساليسيليك على الخروج من المحلول بسبب انخفاض قابليته للذوبان ويكون بلورات، ولكنها لا تظهر في شكل بلورات كبيرة مستقلة لكنها تميل إلى أن تُشبِه رقائقَ صابون بيضاء، وقد تبدو لزجة إلى أن تجف.

ومن المثير دائمًا أن تُلاحظ حجم البلورات المتكونة، ولا سيما عندما تُقارنه بحجم الأقراص التي استخدمت من البداية. أعد مرشحًا آخر باستخدام منشفة ورقية في كوب

كبير وجمع فيه بلورات حامض الإسيتيل ساليسيليك عن طريق صب خليط الكحول والماء والبلورات في المنشفة. أزِل البلورات من الكوب الأول بغسله بقليل من ماء الصنبور الفاتر، ثم صب هذه الكيمياء الضئيلة عبر المنشفة الورقية. وسيعمل هذا أيضًا على إزالة البلورات من المنشفة. احتفظ بالبلورات في المنشفة وتخلص من المذيب المستعمل المتساقط من المنشفة الورقية.

عندئذٍ من الممكن أن تنتقل إلى الإجراء التالي، وفي حال إذا كان لديك متسَعٌ من الوقت، ابسط المنشفة التي تحوي البلورات على طاولة لتجفَّ في الهواء، قد يستغرق هذا الليلَ بطوله. تأكد من وضع البلورات بعيدًا عن متناول الأطفال والحيوانات الأليفة. وقد يكون النسيم القوي ضارًّا أيضًا لأن البلورات الجافة تكون هشة ورقيقة. لاحظ أن رائحة البلورات تختفي بمجرد أن تجف، وتختفي حتى أيضًا رائحةُ كحول الأيزوبروبيل. وعندما تجفُّ البلورات، يُمكِنك أن تُلاحظ كيف أصبحَت هشة عن طريق التقاط المنشفة. كان معظمُ الوزن الأصلي للبلَّورات المبللة خاصًّا بالمذيب.

## التحلُّل بالماء المُحفَّز بالحمض إلى حامض الساليسيليك وحمض الخليك

إذا كنت قد تركت بلَّوراتك تجف طوال الليل، عندئذٍ ارتدِ نظارة الأمان الواقية مرة أخرى. خذ نحو ربع مقدار من بلورات حامض الإسيتيل ساليسيليك المبللة أو الجافة، وضَعْه في وعاء زجاجي يُمكِن أن يُستخدَم في التسخين. البلورات الجافة هشَّة للغاية وينبغي أن تتعامل معها بحذر حتى لا تتبعثر. خذ زجاجة من المحلول المُخفِّض لقلوية ماء حوض السمك الموصى بشرائه في قائمة المشتريات والمحاليل، ثم صبَّ منه قطرة قطرة حتى تُغطَّى عينة حامض الإسيتيل ساليسيليك تمامًا. والمحلول المُخفض للأس الهيدروجيني هو حامض الكبريتيك الذي يكون غير مركز جدًّا بحيث يتلاءم تمامًا مع هذا التفاعل، فهو يعمل كعامل حفاز؛ إذ يُسرع التفاعل ولا يُستهلَك في أثناء التفاعل. وينبغي أن تتوخَّى الحذر البالغ في هذه المرحلة من التجرِبة، إذ سيتبقَّى حامض الكبريتيك المخفَّف في نهاية التجرِبة، وحتى الحامض المخفَّف ينبغي أن يُعامَل بحذر بالغ.

سخِّن هذا الخليط ببطء لما يقرب من خمسَ عشْرةَ ثانية في فرن ميكروويف عند درجة حرارة منخفضة (بنسبة ٥٠٪). أخرج الوعاء من الميكروويف، وأبعد بيدك أيَّ روائح منبعثة من قمة الوعاء في اتجاه أنفك. نجد في نهاية التفاعل أن جزءًا من حامض الإسيتيل ساليسيليك سوف ينفصل عن هذا الجزيء بسبب البيئة الحامضيَّة. والجزيء

الذي ينعزل يُصبح حامض الخليك الذي يُمثل الأساس النشط للخل، وفي آخر الأمر يُمكنك أن تُميز الرائحة بوضوح. وبمجرد تبخر حامض الخليك، تكون بقايا البلورات هي حامض الساليسيليك ذا التأثير المسكِّن للألم. ويُمكن التخلُّص من كافة المواد الصُّلبة بإلقائها في سلة القمامة، والتخلص من السوائل بسكبها بحذرٍ في المرحاض.

والتفاعل الذي أجريته لتوِّك هو تفاعل عضوي يُعرَف باسم التحلل المُحفَّز حامضيًّا. وهنا تتم عملية التحليل بالماء. وقد حدث في هذا التفاعل فصلُ حامض الإسيتيل ساليسيليك باستخدام الماء لتكوين حامض الساليسيليك وحامض الخليك كما هو موضَّح في شكل ١.

الفصل الأول

# عضوية ليس إلا

ومن ناحية أخرى، اعتدت أن أرى بول تيكلورني منغمسًا بعمق في دراسة استقطاب الضوء وحُيوده وتداخله وانكساره الأحاديِّ والثنائي ومختلِف المركبات العضوية الغريبة.

جاك لندن،
كتاب «وجه القمر وقصص أخرى»، ١٩٠٥

حتى ونحن نتحدث، يصنع بعض الكيميائيِّين في كولومبيا الصوف خلسةً من نبات الجوتة.

روبرت فروست،
قصيدة «بناء التربة»، ١٩٥٠

إنه لشيء بنَّاء أن ننظر حولنا إلى عدد الأشياء المكوَّنة في المقام الأول من موادَّ عضوية — أي المواد المكونة من مركبات الكربون والهيدروجين المرتبطة بروابط تساهمية التي يُطلَق عليها الهيدروكربونات — سواء المعالجة أو غير المعالجة، بداية من الأسفلت إلى الأسبرين، فعالمنا مغمور بالهيدروكربونات.

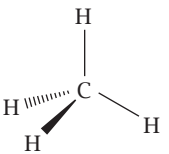
وتشتمل هذه الهيدروكربونات على اللدائن التي أصبحت هذه الأيامَ موجودةً في كل شيء بداية من السيارات إلى تجهيزات المكاتب، ومن مُعدات المزارع إلى الملابس. وجميع الأطعمة تُعتبَر موادَّ عضوية من شرائح اللحوم إلى رقائق البطاطس المقلية، ومن السكر إلى السردين؛ مما يضعنا أمام أكبر فئة وهي الكائنات الحية كافة — أي النباتات والحيوانات والفطريات والبكتيريا. أنواع الوقود التي نستخدمها — مثل البنزين والغاز الطبيعي والبروبان والبيوتان — هي أيضًا مواد عضوية لأنها تُشتَق من كائنات كانت حية يومًا ما مثل الأشجار والديناصورات والأسماك. وتتراوح المنتجات النفطية من الأسفلت وحتى الأسيتون. والفحم كتلة مادة عضوية. والصابون والشامبو أيضًا هما مواد عضوية سواء أُذْكِرَ ذلك عنهما أم لم يُذكر. وماذا عن مواد التجميل، أتُعَد مواد عضوية؟ نعم. وماذا بشأن معجون الأسنان ومزيل العرق؟ غالبًا ما يتكوَّنان من مركَّبات عضوية قاعدية مُضافًا إليها القليل من المواد الفعالة. والأدوية؟ الأدوية هي مواد عضوية، وإذا لم تكن المواد الفعالة موادَّ عضوية، فإن الناقل النشوي أو الكبسولة الجيلاتينية موادُّ عضوية. وقد يكون أي مشروب ذي نكهة مكونًا من الماء في المقام الأول، لكن المواد الملونة أو النكهات سواءٌ أكانت طبيعية أم مصنوعة من قطران الفحم فهي موادُّ عضوية. أما عن الملابس، سواء الطبيعية أو الاصطناعية فهي مصنوعة من الألياف. وفي كثير من الأوقات، تُستخدَم كلمة «عضوي» لِتَعني «الأشياء المُنتَجة طبيعيًّا وليس صناعيًّا»، لكن في حقيقة الأمر، تكون كل الهيدروكربونات موادَّ عضوية بصرف النظر عن الطريقة التي جاءت بها إلى حيز الوجود، لكن المركبات العضوية الأولى كانت طبيعية بلا أدنى شك، وجسم الإنسان هو عضوي أيضًا.

السؤال إذن: لماذا تتكون العديد من المواد من الهيدروكربونات؟ في الواقع، اللغز ليس بهذا القدر من العمق، وتفسيره لا يكمن في أعماق الكرة الأرضية! فعندما نُقارن كتلة الأرض بما فيها باطنُها غيرُ العضوي، بكتلة الهيدروكربونات نجد أن الهيدروكربونات، مع كل ذلك، ليست بكل هذا القدر من الانتشار. فالكربون لا يُصنَّف ضمن عناصر القمة الثمانية التي يتألف منها كوكبنا (الحديد والأوكسجين والسيليكون والماغنسيوم والنيكل والكبريت والكالسيوم والألمنيوم على الترتيب من حيث الوفرةُ)، ولا حتى من بين عناصر القمة الثمانية التي تُكون قشرة الأرض (الأوكسجين والسيليكون والألمنيوم والحديد والماغنسيوم والكالسيوم والبوتاسيوم والصوديوم على الترتيب من حيث الوفرة). غير أن الكربون الذي لدينا يتكدس بشدة في الأطراف العلوية من قشرة الأرض بسبب كتلة الكربون الذَّرية المنخفضة. وخلال التغيرات الكبيرة التي حدثت في الفترات الطويلة من عمر الأرض، انتقلت العناصر الأخفُّ إلى القمة، مثل حب الفُلفل الذي يطفو فوق سطح حِساء البازلاء الخضراء. وبمجرد وجوده داخل القشرة الأرضية، كان الكربون قادرًا على أن يُشكِّل أكبر قدر من المركبات المتنوعة. يرجع ذلك في المقام الأول إلى تمتُّعه بالقدرة على تشكيل سلاسل روابط طويلة ومستقرة، وتُدعى هذه الموهبةُ «التسلسل». وتتجلى قوة روابط الهيدروكربونات واستقرارُها عند كسرها وانبعاث الطاقة منها، فالهيدروكربونات تُعتبَر وَقودًا جيدًا.

ويُمكن للهيدروكربونات أن تُصبح سلاسلَ معقَّدةً ومتداخِلة بشكل جذَّاب؛ وذلك لأن الكربون يُمكِنه أن يُكوِّن أربع روابط منفصِلة مع العناصر الأخرى ويُمكنه أن يُكوِّن روابطَ مستقرة مع نفسه. وبالطبع ثمة عناصرُ أخرى يُمكنها أن تُكون سلاسلَ ذاتية مثل $N_2$، $O_2$، ولا يزال هناك عناصرُ أخرى يُمكنها أن تُكون سلاسلَ مثل الشكل الحلقي للكبريت $S_8$. غير أن هذه المقدرة على تكوين السلاسل المتعددة الأنواع والأطوال، وفي الوقت نفسِه البقاء طيِّعة وسائلة، هي موهبةٌ ينفرد بها الكربون وحده. وتتمتَّع أيضًا مُركَّبات الكربون بخصائصَ ثلاثية الأبعاد، وهي تُعَد مهمة لبناء عالمنا ثلاثيِّ الأبعاد. ويتكوَّن الميثان — الذي هو أكثر الجزيئات العضوية حيويةً — من ذرةِ كربون واحدة وأربعِ ذرات هيدروجين؛ إذ تقع ذرةُ الكربون في مركز الجزيء وتمتدُّ أنوية الهيدروجين الأربع إلى الخارج نحو الأركان الأربعة للشكل الرباعي الأوجه المألوف، كما هو موضَّح في شكل ١-١. ويُطلَق على ذلك النوع من الرسم «الرسم الإسقاطي»؛ لأن كلًّا من الأوتاد المصمَتة وتلك

المرسومة في هيئة خطوط متقطعة تُشير إلى الروابط التي ستقع داخل مستوى سطح الورقة أو خارجَه في التركيب ثلاثيِّ الأبعاد الحقيقي.

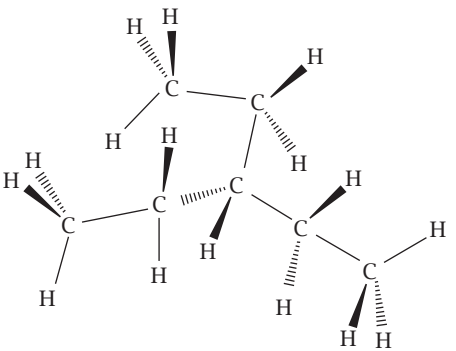
ومن زوايا هذا الجزيء الواحد، يُمكننا أن نتخيل الطريقة المعقدة التي يُمكِن أن تُبنَى بها السقَّالات بحيث تتلولب وتلتفُّ مُكوِّنة أشكالًا متنوِّعة ومثقَّبة. وثمة مثالٌ بسيط نسبيًّا، يتضمن سبع ذرات كربون فقط، وهو الهبتان الموضَّح في شكل ١-٢.



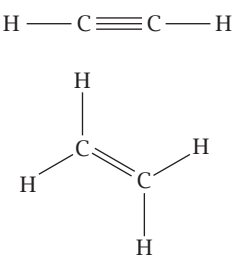

شكل ١-١: تركيب الميثان $CH_4$. تُشير الروابط التي تُمثلها الخطوط المستقيمة إلى أنوية الهيدروجين في السطح المستوي للورقة. وتُشير الروابط التي تُمثلها الأسهمُ المصمتة إلى أنوية الهيدروجين الآتيةِ من خارج سطح الورقة، وتُشير الروابط التي تُمثلها الأسهم المشرطة إلى نوى الهيدروجين الموجودة على الجانب الخلفي من سطح الورقة.

بل يُمكننا أن نرى الكربون في مواقف أكثر مهارة من هذا، فالكربون يُمكنه أن يُكون روابطَ ثنائية وثلاثية مع نفسه كما هو موضَّح في شكل ١-٣. وينتج عن الروابط المتعددة أشكالٌ هندسية مثلَّثية وخطية، مما يُؤدي إلى اتساع دائرة الخيارات البِنْيوية. وعندما تكون كلُّ روابط المركب أحاديةً يُقال إن المركَّب مُشبع، وبعبارة أخرى سيُقال إن الميثان المبيَّن في شكل ١-١ والهبتان المبيَّن في شكل ١-٢ مشبعان، في حين أن التركيبات الموضحة في شكل ١-٣ سيُقال إنها غير مشبعة. ولكي نُقدِّر قيمة الاختلاف الذي يجلبه هذا التغيُّر البسيط، فكر في الضجة المثارة حول الدهون المشبعة في مقابل الدهون غير المشبعة. إذن ما الفرق الناتج عن الرابطة الثنائية؟ سوف نستعرض الدهون المشبعة عند مناقشتنا لدور الدهون في الكيمياء الحيوية.

وكنتيجةٍ لهذه البراعة الفائقة التي يتمتَّع بها الكربون في تكوينِ الروابط، فإن الكربون يُمكِنه أيضًا أن يُكون مركباتٍ مستديرةً وحلقية دورية شبيهة بالسلاسل، ويُمكنه أيضًا أن يَربط دوائرَ عديدة معًا كما هو موضَّح في شكل ١-٤. وبعد أن تتقوَّى هذه الأنواعُ من المركَّبات بالحلقات المترابطة معًا، تُصبح قوية بما يكفي لأنْ تتحمَّل

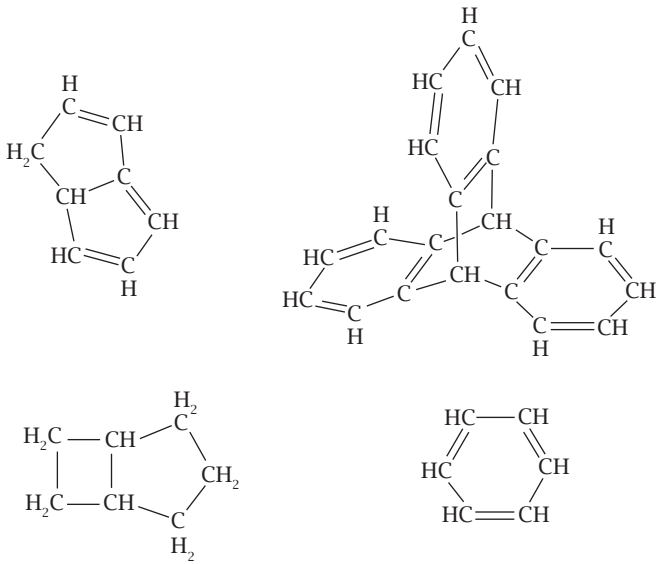


شكل ١-٢: سلسلة مكوَّنة من سبعِ ذرَّات كربون ملفوفة حول روابطها.



شكل ١-٣: الرابطة الثنائية والثلاثية في جزيئات الكربون. يُطلق عادة على المركب ثنائي الرابطة اسم إيثيلين في حينِ يُطلَق عادة على المركب ثلاثيِّ الرابطة اسم أستيلين.

ضغوط الحياة، وتتواجد في موادَّ مهمةٍ عديدة من الناحية البيولوجية. وما إن يتكون الكربون في شكل دائرة، حتى تُشارك نواة الكربون في بعض الأحيان الإلكتروناتِ في مدار جزيئي كبير ينبسط عبر الحلقة بأكملها، وتُوصَف الرابطة الناتجة بأنها أروماتية؛ لأنها تُوجَد في جزيئات عضوية عديدة ذات رائحة مثل مركب البنزين — المركَّب الذي يُضفي رائحةً نفَّاذة على الجازولين — والجزيئات الأروماتية تكون مستقرة للغاية بسبب مداراتها الجزيئية المشتركة وهي تُوجَد بالمثل في موادَّ عديدة مهمة من الناحية البيولوجية.

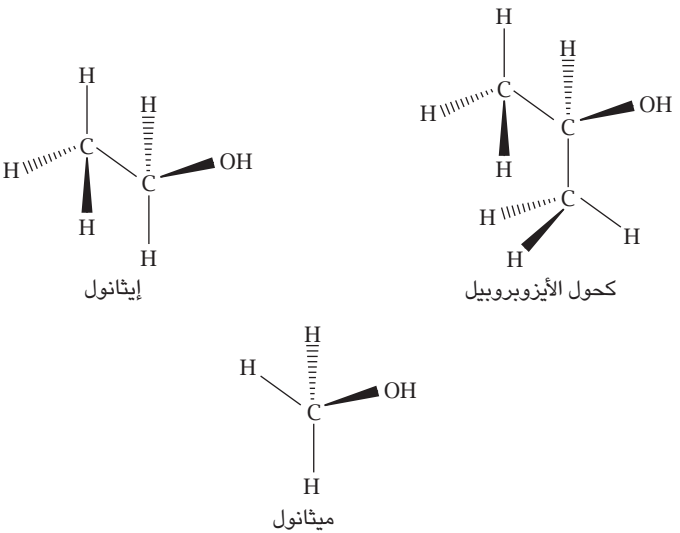


شكل ١-٤: بعض تراكيب الهيدروكربونات ذات الحلقات.

ومع وجود التنوع الهائل في الجزيئات العضوية، فإن الكيميائيِّين بذلوا جهدًا كبيرًا في تصنيف المواد المتعددة في عائلاتٍ من المركبات. وطريقة التَّصنيف التي نتجَت عن هذه الجهود هي أن تُصنف المركبات في عائلات طبقًا لوجود تراكيبَ معينة محددة للنوع التي تُدعى «المجموعات الوظيفية». ومثال على ذلك، سنتأمَّل في أربع عائلات من الهيدروكربونات تحتوي على الأوكسجين في مجموعاتها الوظيفية، وهي الكحوليات، والإيثرات، والأحماض العضوية، والإسترات.

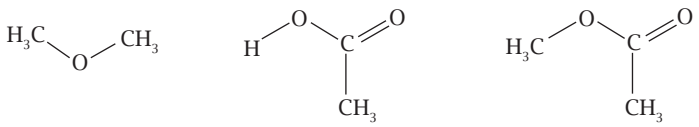
أما الكحوليات فالمجموعة الوظيفية أو التركيب المحدد للهوية هو OH. وتتضمن كافة الكحوليات مجموعة OH، غير أن طبيعة باقي الجزيء هي التي تُحدد الخصائص المتفردة التي يتباين بها هذا النوع من الكحول عن غيره؛ فالإيثانول هو الكحول الموجود في المشروبات الكحولية، والأيزوبروبيل هو الموجود في كحول الأيزوبروبيل، والميثانول يُستخدَم في بعض الأوقات وَقودًا، ولا يُمكن أن يحل أيٌّ من هذه الأنواع محلَّ الآخر. وقد يبدو مقبولًا للبالغين أن يتجرعوا كمياتٍ قليلةً من الإيثانول في المناسبات الخاصة، لكنه

من غير المحبذ على الإطلاق أن يتناولوا كحول الأيزوبروبيل أو الميثانول؛ لأن هذه الأنواعَ من الكحول تُسبب ضررًا جسديًّا جسيمًا بل قد تُؤدي إلى الموت. والميثانول — الذي يُمكنه أن يُلوث المشروبات الكحولية المصنَّعة بطريقة غير احترافية — يُعرَف بأنه يُسبب العمى أو تلفَ المخ. ويُوضح شكل ١-٥ هذه التراكيب الثلاثة، لاحظ كيف يُمكن أن يُحدث تغيرٌ طفيف في التركيب تأثيرًا كبيرًا على السلوك الكيميائي.




شكل ١-٥: ثلاثة أنواع من الكحول ذات خصائص مختلفة.

والترتيب المحدَّد للهوية للمجموعة الوظيفية للإيثر هو ذرة أوكسجين بين ذرتَي كربون (انظر شكل ١-٦). ويُعرف نوع معين من الإيثر، وهو الإيثر ثنائي الإيثيل، بتأثير المخدِّر على مخ الثدييات، وهو تأثيرٌ يحظى بأهمية قصوى للمرضى الذين يُجرى لهم العمليات الجراحية حينما أُتقِن استخدامُه كمادة مخدِّرة أثناء العمليات الجراحية. والأحماض العضوية الموضَّحة في شكل ١-٦ تحتوي أيضًا على الأوكسجين في مجموعاتها الوظيفية المحدَّدة للهُويَّة التي هي $CO_2H$. وحامض الخليك الذي استخدمناه في تَجارِبنا على نطاقٍ واسع في شكل الخلِّ هو حامض عضوي وله الصيغة الكيميائية $CH_3CO_2H$.



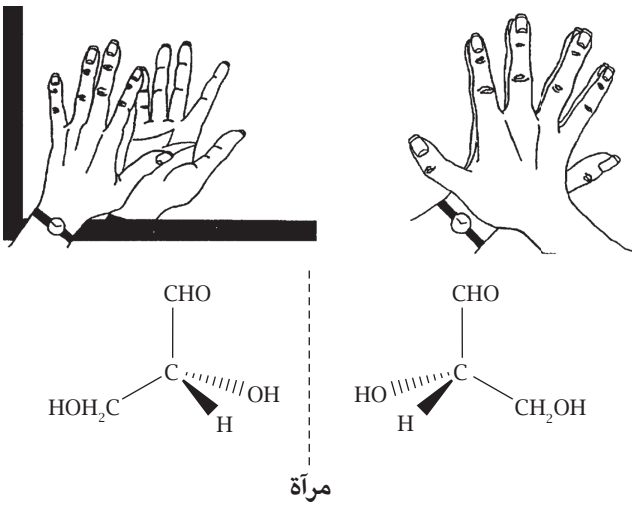

**إيثر** **حامض** **إستر**

شكل ١-٦: مثال على الإيثر والحامض والإستر.

وتُعَد الأمثلة على الأنواع الثلاثة من المجموعات الوظيفية الموضحة في شكل ١-٦، الإسترات، من مشتقات الأحماض العضوية. ففي الإستر، يُستعاض عن $CO_2H$ بمجموعة عضوية، وتتميَّز الإسترات برائحة تُشبه رائحة الفاكهة المبهِجة، وتُستخدَم في الروائح المقلدة؛ ومن ثَم أيضًا تُستخدَم في نكهاتِ الموز والكمَّثْرى والأناناس. أما الأسبرين الحديث، أو حامض الإسيتيل سالسيليك، فهو من الإسترات. ونرى في شكل ١-٦ مثالًا لكلٍّ منها: مثال للإيثر والحامض والإستر.

وقد تضمُّ مركباتُ الكربون أيضًا ذرات عناصرَ أخرى يُطلَق عليها «الذرات غير المتجانسة»، مثل النيتروجين والكبريت والكلور والبرومين وغيرها، لكن مهما كانت هُوية الأنواع المترابطة، فالكربون دائمًا سيُكوِّن أربعَ روابط سواءٌ كانت روابطَ أحادية أم ثنائية أم ثلاثية، وعندما يكون للكربون أربعُ روابطَ أُحادية، تظهر خاصية مُثيرة، وهي خاصية اليدوية.

وتُشبه خاصية اليدوية في الجزيئات مع خاصية اليدوية في الإنسان؛ لقد خُلِق الإنسان بيد يُمنى وأخرى يُسرى، وهاتان اليدان مختلفتان اختلافًا واضحًا، فلا يُمكن الخلطُ بينهما. وتتطابق كلٌّ منهما مع الأخرى تمامًا عندما تُوضَع راحة اليد اليمنى على مثيلتها اليُسرى أو عندما تُوضَع على مِرآة، لكن عندما تُحاول أن تُلصق إحدى اليدَين على الأخرى — أي بطن إحدى اليدَين في ظهر الأخرى — ستجد أن إبهامَيك يذهبان في اتجاهَين مختلفَين. تحظى الجزيئات بخاصية اليدوية هذه أيضًا، فالكربون الذي يملك أربعَ روابط مختلفة يُمكنه أن يتَطابق مع صورته المعكوسة وجهًا لوجه في مرآة، لكن إذا وضع فوق صورته المعكوسة في المرآة فقد لا يظل متطابقًا مع الصورة، ويُمكِننا أن نرى مثالًا على ذلك في شكل ١-٧.




شكل ١-٧: انعدام التناظر في المرآة لليدين وللجزيئين.

وقد نتذكر من مناقشتنا حول قانون النسب الثابتة أن الأيسوميرات هي جزيئات بُنيت من نفس العدد والنوع من الذرات غير أنها منظمة في ترتيب مختلف، وقد استشهدنا بالحامض الفلمينيك وحامض السيانيك والحامض الأيزوسيانيك وصيغها الكيميائية على الترتيب هي: HONC، HOCN، HCNO. وقد رأينا أن الترتيب البسيط لهذه العناصر جعل من الأول مادةً متفجرة والثاني مادةً سامة والثالث مادةً هادئة شريكة في تركيبات عضوية بنَّاءة عديدة. والأيسوميرات التي لا تختلف إلا في كونها صورة انعكاسية للأخرى تُعرف «بالأيسوميرات انعدامية التناظر في المرآة».

تتصف التوائم انعداميةُ التناظر في المرآة بخصائص مختلفةٍ بعضِها عن بعض، فعلى سبيل المثال، الشكل الواحد من مركب الكارفوني، وهو جزيء عضويٌّ منعدم التناظرية المرآوية، يُعطي رائحة النَّعناع، في حين أن صورته المنعكسة في المرآة تُعطي رائحة الكراويا. وشكل واحد من جزيء الليمونين، وهو جُزيء منعدِم التناظر المرآوي أيضًا، يُعطي رائحة ليمون في حين أن صورته المرآوية تُعطي رائحة برتقال. ولكي نَعيَ السببَ الذي يجعل هذا الاختلاف الدقيق في الشكل يُؤدِّي إلى مثلِ هذا الاختلاف الهائل في

الخصائص، حاوِل أن تُصافح يدَيك بنفسِك أو أن تضَع قدمك اليمنى في الحذاء الأيسر، ستجد أن هذا لا يصلح؛ فالحذاء لن يتَطابق مع قدمك، وهذا هو الحال في أنظمة بيولوجية كثيرة، إذا لم يكن الجزيء مطابقًا فإن الأمر لن يُجدي.

ويُمكن أيضًا تمييزُ هذه الجزيئات المنعكسة صورتها في المرآة بعضها عن بعض بواسطة الطريقة التي تتفاعل بها مع الضوء المستقطَب، والضوء المستقطب هو ضوء ذو مدًى محدود الاتجاه. وفي مجال صناعة النظارات الشمسية، يُطلَق على الضوء المنبعث في كل الاتجاهات «السطوع»، ولكي تَعرف الفرق بين السطوع والضوء المستقطب، قلِّب نظارة شمسية مستقطبة على الوجهَين للداخل والخارج وأنت تنظر إلى أشعَّة الشمس المنعكسة على سطح لامع. وتسمح نظارة الشمس المستقطبة فقط بمرور الضوء ذي المدى المحدود من الاتجاهات، أو الاستقطاب؛ فمِن ثَم تُقلل من السطوع. وعندما يُواجه الضوء جزيئًا منعدم التناظرية المرآوية، قد يمر الضوء بانحراف عن المجال الكهربائي للجزيء غير المتماثل، يبدو هذا الأمر مثل ميل السيارة أثناء انعطافها. وإذا كان هناك عددٌ كبير من مثل هذه الجزيئات تتفاعل مع الضوء، فإن التأثير يُمكن أن يكون كبيرًا لدرجة تكفي لقياسه.

لنستخدم رمز حرف L لنُشير إلى كلمة «الدوران لليسار» وحرف D لنُشير إلى كلمة «الدوران لليمين»، وهما الجزيء المنعدم التطابقية المرآوية التي تُعادل اليد اليسرى واليد اليمنى، والجزيء المنعدم التطابقية المرآوية يُمكن تصنيفه إلى الفئات L، D، طبقًا للطريقة التي يتفاعل بها مع الضوء المستقطب. وتُعَد جزيئاتٌ جسدية كثيرة جزيئاتٍ عديمةَ التطابقية المرآوية، بما فيها السكَّريات التي تبني مجموعات الحامض النووي DNA، والأحماض الأمينية التي تكون البروتينات. علاوةً على أنه قد اتضح أن لدى الجسم ميلًا شديدًا نحو الشكل L. وقد استخدمت كاتبة الروايات البريطانية دوروثي سايرز هذه الفكرة في إحدى القصص البوليسية التي كتبَتها عام ١٩٣٠ وهي قصة «مستندات القضية» التي افتُرِض في بدايتها أن الضحية ماتت على إثر تناول عيش غراب مسموم[1] غير أن الفحص الدقيق للسموم كشَف عن أنها من ذلك النوع من الجزيئات المنعدمة التناظرية المرآوية؛ ومن ثَم يكون هذا السمُّ صناعيًّا وليس طبيعيًّا.

إن أصل ميل الطبيعة نحو الاتجاه الأيسر غيرُ معروف، لكن من المحتمل أن يكون نفس السبب الذي يُفسِّر التقليد البريطاني المتبع في أن يكون موضعُ قائد السيارة في الجهة اليسرى من الطريق، فهي مجرد الطريقة التي بدأت عليها الأمور وظلت كما

هي، ولكن لا يُسبِّب الاختلاف في الصورة المرآوية للأيسوميرات هذا الاختلاف في حاسَّتَي الشم والتذوق فحسب، بل إن التعرض للأيسومر غير المتناظر في المركبات البيولوجية يكون ضارًّا أيضًا. وإحدى حالات الخلل تلك المشهورة بشأن التعرض للأيسومر غير المتطابق هي حالة الثاليدوميد (دواء مُسكِّن) وهو مزيج من صورتَيه المنعدمتَي التناظر في المرآة. وللأسف، يعمل الشكل الذي لا يقوم بدور المسكن كمادة ماسخة يُمكنها أن تُسبب تشوهات للأجنة. فبسبب مثلِ هذا الاختلاف في الأنشطة، وأيضًا لكي نُقلِّل الجرعة المطلوبة، يُحبَّذ أن يُنتَج دواءٌ يحوي أحد الأيسومرين قدر المستطاع؛ ومِن ثَم يُبذَل قدرٌ لا بأس به من الجهود حاليًّا نحو هذا الهدف.

ولأن أيسوميرات الصورة المرآوية للمركبات المنعدمة التطابقية المرآوية هي موادُّ منفصلة في المقام الأول، فإن عدد الهيدروكربونات المختلفة كيميائيًّا يزداد باطِّراد شديد، فالهيئة التي تَضْطلع بمسئولية مثل هذه الأشياء في الولايات المتحدة تُسمَّى «الجمعية الكيميائية الأمريكية»، تُقَدِّر عددُ المواد الكيميائية العضوية المعروفة حاليًّا بما يقرب من عشرين مليون مادة، ويُكتشَف المزيد كلَّ يوم تقريبًا، وبالطبع تُعَد عملية إيجاد أسماء لكل هذه المنتجات شاقة للغاية، ولكن لحسن الحظ، تقوم هذه المهمة، التي يُؤديها «الاتحاد العالمي للكيمياء البحتة والتطبيقية» IUPAC، على أسس منهجية.

وتُسمَّى المركبات العضوية بِناءً على خصائصها المميزة، تمامًا مثلما يُمكن أن يُوصَف شخص نحيل ذو شعر أحمر، إمَّا بالنَّحيل أو أحمر الشعر. والكحوليَّات التي وصَفْناها مسبقًا، يُطلق عليها الكحوليات لأنَّها تتمتَّع بخصائصِ مجموعة OH، أما الجزء الثاني من الاسم — مثل الميثيل أو الإيثيل أو الأيزوبروبيل — فهو يُشير إلى نوع السلسلة التي ترتبط بها مجموعة OH.

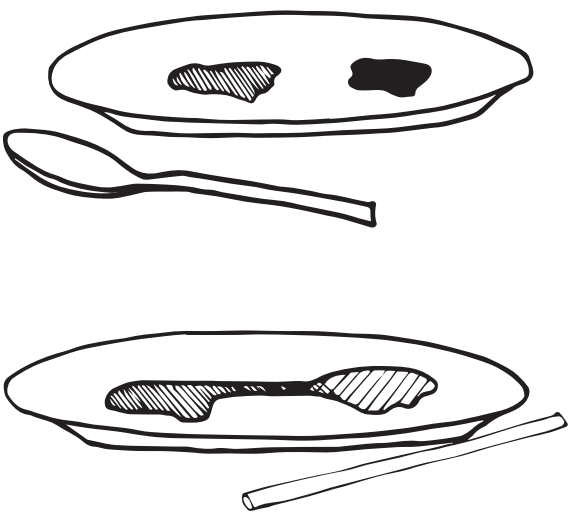
غير أن هذا هو المكان الذي تترك فيه الكيمياءُ النحيلة صُحبة الكيمياء العضوية. إذن لا يُمكن تسمية الجزيء العضوي بِناءً على خاصية واحدة فحسب. فاسمُ الجزيء يجب أن يصف ملامحه كافَّة؛ ومن ثَم يكون اسمه مميزًا، ولكي نُقرر الاسم الذي ينبغي ألَّا يُطلَق على جزيء معيَّن، يُحدَّد أولًا اسم المركب الأساسي، الذي عادةً ما يُكون سلسلة كربون تُمثل الهيكل الأساسي مثل الميثيل أو الإيثيل، ثم تُضاف أسماءُ كلِّ المجموعات الوظيفية، والخصائص التي يتمتَّع بها المركب كافَّة، وكل المجموعات المحددة للهُويَّة، وعندئذٍ يُمكن أن تكون أسماء الجزيئات العضوية ثقيلةً للغاية في حد ذاتها.

ويُقال إن كلمة Tetramethyldiaminobenzhydrylphosphinous هي واحدةٌ من أطول الكلمات في قاموس اللغة الإنجليزية وتعني «رباعي ميثيل ثنائي أمينو

بنزهيدريل فوسفينس»، غير أن هذا الطُّول ليس بالأمر الغريب على الكيمياء العضوية. وقد اشتهَر بعض الكيميائيِّين بالتعبير عن قدراتهم الإبداعية عندما تُتاح لهم فرصة تسمية تركيب قلوي جديد. وقد سُمِّيت إحدى الموادِّ الجديدة «بكمنستر فوليرين» Buckminsterfullerene؛ لأنها تُشبه شكل القبة الجيوديسية، وهو التصميم الذي أنشأه المهندس المعماري آر. بكمنستر فولير. ويقال إن حامض البربيتوريك، المادة التي تبدأ بها عائلة المركبات المعروفة بـ «البروبيتويرات»، قد سُمِّيت على اسم باربرا، اسم محبوبة العالِم الذي كان أولَ من عزَل هذا المركَّب.

وبعيدًا عن استخدام أسماء المهندسين والمحبوبات في تسمية المركبات، فأخصائيو الكيمياء العضوية يقضون وقتهم أيضًا في التقصي عن الأعداد المذهلة من التفاعلات التي يُمكن أن يدخل فيها كلُّ مركب من هذه المركبات. وكما شاهدنا في تجرِبتنا، فإن تحريك جزء واحد فقط أو إزالته، يُمكنه أن يُغير خصائص المادة تغييرًا جذريًّا؛ لذا تمتلئ أدراج الكيميائيين العضويين بالدوريات المخصصة لتعقيدات الكيمياء العضوية، ويبقى قدر لا بأس به من المهام للعمل عليها. وكما تتحول المواد الخام من مواد بترولية إلى كتلة حيوية أو استخدام المواد المعاد تصنيعها — إذ إنه أمرٌ حتمي بلا جدال — فإن الكيمياء العضوية تتردد على الكيمياء الكلاسيكية وتبتكر كيمياء جديدة، لكن تذكر أن كل مادة لزجة عضوية يجب أن يكون لها علاقة بتربة صخرية رملية، ومحيط من الماء، وغلاف جوي من الهواء، أما عن عالم الكيمياء غير العضوية فهو ما سنخوض فيه لاحقًا.

# تجربة الكيمياء غير العضوية:
# أنتروبيا، وأمونيا، وأميبا



ثمة سنوات أخرى محمَّلة بدفعات من الزهور والأوراق وطيور العندليب والسُّمنة والحسون، وتأخذ مثلُ هذه المخلوقات الزائلة مواقعَها، التي كانت منذ سنة واحدة فقط مقرًّا لغيرها حينما لم تكن هذه المخلوقات سوى بذورٍ أو أجنَّة وجسيمات غير عضوية.

توماس هاردي في روايته
«تَس سليلة دربرفيل»، ١٨٩٠

خذ كوب ماء وبعض قطرات من ملوِّن الطعام المقترَح في «قائمة المشتريات والمحاليل». أضف برفقٍ شديد قطرةً من مُلون الطعام إلى كوب الماء، مراعيًا أن تجعل زجاجة ملون الطعام قريبة من السطح بقدر ما تستطيع حتى تُقلل الاهتياج. عندئذٍ استرخِ واستمتع بمشاهدة رقصة الباليه الجميلة التي تُؤدِّيها قطرة ملون الطعام وهي تنتشر في الماء، نجد أن قطرة ملوِّن الطعام تمتزج تلقائيًّا بالماء بسبب الأنتروبيا، التي هي ميل النظام الطبيعي نحو حالة من الفوضى القصوى.

الآن، وبعد أن تتأكد من ارتدائك لنظارة الأمان الواقية، خذ محلول خلات الحديد المذكور في «قائمة المشتريات والمحاليل»، وضَعْه في طبق من السيراميك أو الزجاج بحيث يكون قُطر المحلول نصف بوصة (١سم). راعِ ألَّا تجعل بقعة المحلول الصغيرة تنتشر في الطبق. إذا وجدت أنَّ لبقعةِ المحلول قمةً بارزة لأعلى ومستديرة بسبب التوتر السطحي، فعندئذٍ تكون جاهزًا للخطوة التالية، أما إذا لم تجد ذلك، فإن ذلك يُشير إلى وجود بعض البقايا في الطبق. في هذه الحالة أحضِر طبقًا نظيفًا وجافًّا وحاوِل مرة أخرى.

خُذ بعض القطرات من النشادر، واصنع بقعة أخرى لها نفس البروز لأعلى على بُعد نحو ربع بوصة (نصف سم) من بقعة محلول خلات الحديد. والآن ارسم بحذَر خطًّا من السائل يصل ما بين السائلين عن طريق جرِّ طرف ماصَّة من بقعة إلى الأخرى، على أن تُراعي ألَّا تندمج البقعتان إلا في نقطة اتصالهما.

لاحِظ أن المحلولَين يمتزجان أحدُهما في الآخر، وتكون الأشكال المتكونة غايةً في الجمال والروعة، وكأنها حديقةٌ مُتحرِّكة، ويُمكن جعلُ حرَكة هذه العَملية أبطأ عن طريق إضافة قطرةٍ من الجلسرين أو زيت مَعدِني بين الخليطَين وتوصيل البقعتَين إلى البقعة التي تتوسطهما. ويُمكن مُشاهدة تفاعل دمج للأشكال مُشابه عن طريق إضافة بقعةٍ من محلول كبريتات النُّحاس إلى محلول النشادر أو كبريتات النُّحاس ومحلول بيكربونات الصوديوم.

وأودُّ أن أذكر مرةً أخرى أن هذا الخلط يَحدث تلقائيًّا، لكنَّ ثَمَّة عنصرًا آخرَ للتسلية في مثل هذا التفاعل الكيميائي أيضًا. شاهد الحركة التي تُشبه حركة الأميبا التي يخطو بها المحلولان غير العُضويَّين أحدهما نحو الآخر وموجات التَّفاعل التي تنتشر عبر الطبق في شكلٍ أشبهَ بأصابع اليد، ويُمكن للمرء أن يتخيَّل التكوُّن الأول للأجسام في الحساء الكوني البُدائي كما بوُسعه أن يتخيَّل التقدم ببطءٍ واطِّراد للخروج من هذا الحساء.

الفصل الثاني

# صخور الكيمياء

حالما تكون هناك، ستشعر كأنَّك قطرةٌ من الماء على قطعة البلَّور الصخري، ووسيلتك ستُسبِغ طابَعَ الجلال على عدم تميُّزك.

توماس هاردي في رواية
«عيون زرقاء»، ١٩٠٠

نرجو أن نكون قد أقنعنا القارئ بأهمية الكيمياء العضوية، ولكن ليس على حساب الكيمياء غير العضوية. فمن الأحجار الكريمة إلى الحجر الجيري ومن النترات إلى الفوسفات، الكيمياء غير العضوية مُهمة للغاية أيضًا. وإذا كان من الممكن وصفُ الكيمياء العضوية على أنها كيمياء الهيدروكربونات، فإن الكيمياء غيرَ العضوية يُمكن وصفُها على أنها كيمياء كلِّ شيءٍ آخر — وتعبير «كل شيء آخر» يشملُ الكثير جدًّا. في الواقع، موادُّ عديدة من التي ذكرناها هي بالفعل موادُّ غير عضوية مثل المعادن وأشباه الموصِّلات والأملاح والكثير من الأحماض والقواعد. على أن اهتمامنا الثقافي بالمركبات العضوية، الذي

ينبع من غَزارة الموادِّ العضوية الأولية وتوفُّرها في شكل النفط أو الفحم، قادنا إلى عقلية عضوية. وهذه العقلية التي تستحوذ عليها هذه الفكرة الواحدة قد أفضَت إلى اعتمادية مؤسِفة على مصدرٍ محدود، غير أنه، بإلقاء نظرةٍ إلى الوراء على العناصر الموجودة في القشرة الأرضية، نجد أنَّ الأوكسجين والهيدروجين أكثرُ وفرةً من الكربون (فالأوكسجين يُمثل وحش الجودزيلا في الرسم البياني، والكربون يُمثل الفأر الخارق)؛ ومن ثَم قد يكون هناك بعضُ البدائل. فنجد في الوقت الحاليِّ أن خلايا الوقود التي تستخدم الهيدروجين والأوكسجين تُستخدَم في تشغيل المكوك الفضائي، ولديها القدرةُ على تشغيل السيارات وكذلك أجهزة الدي في دي. ومن السارِّ أن نعرف أنه حتى بالرغم من صعوبة الوصول إلى المثالية، يحمل المستقبل بدائلَ للبترول الخام. وسنُلقي هنا نظرةً على بعض الموضوعات التي تُمثل حاليًّا الإطار الخاص للكيمياء العضوية، وهي المركبات التناسقية الترابط المتراكِبة للفلزَّات الانتقالية، وكيمياء المجموعات النموذجية، والكيمياء الإشعاعية.

وتقع الفلزات الانتقالية في جزءٍ عريض ضمنَ العناصر التي تُشكِّل مرحلة الانتقال من لافلزَّات إلى فلزات، كما هو موضَّح في شكل ٢-١.

وتتمتع هذه العناصر بكيمياء نابضةٍ بالحياة بدرجةٍ مميزة تنبع في المقام الأول من براعتها في الدخول في حالات أكسدة مختلفة. وكما نتذكر من مناقشتنا لكيمياء الأكسدة والاختزال، تسعد معظم العناصر جدًّا بمشاركة إلكتروناتها مع عناصر أخرى؛ ومن ثَم يُمكِنها جميعًا أن تصل إلى العدد الأمثل من الإلكترونات. والأمر المذهل بشأن الفلزات الانتقالية هي أنها يُمكن أن تصل إلى حالة الإشباع عن طريق اثنتَين أو ما يَزيد من توزيعات مختلفة للإلكترونات، ويُمكن أن نتذكر من تجربة الأكسدة والاختزال أن خلات الحديد ذاتَ اللون البرتقالي الفاتح قد تحولَت إلى اللون الأخضر عند إضافة النشادر، وإلى اللون الأحمر عند إضافة فوق أكسيد الهيدروجين. تَسبب فوق أكسيد الهيدروجين في تحويل الحديد من أيون فاقدٍ لإلكترونَين ($Fe^{2+}$) إلى أيون فاقد لثلاثة إلكترونات ($Fe^{3+}$). ويأتي التغيير الأول الحادث في اللون (من اللون البرتقالي إلى اللون الأخضر) نتيجةً لإضافة النشادر. ويحدث التغيير الثاني (من الأخضر إلى الأحمر) نتيجةً لتفاعل جزيئات النشادر مع الأيون الجديد بطريقةٍ مختلفة. ويُطلَق على الطريقة التي تحفظ بها الأيونات أو الجزيئات المحيطة نفسَها بالقرب من الأيون المشحون والطريقة التي تُغير بها نفسها حوله «تناسقها» مع الأيون. ويكون التركيب الناتجُ هو أيونًا ومجموعاتٍ تناسقية

يُطلَق عليها «متراكب التناسق». ويُطلَق على دراسة متراكبات التناسق المتكونة بين أيونات الفلزات الانتقالية والجزيئات المحيطة بها «كيمياء التناسق».

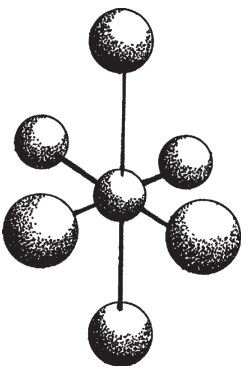
| H | | | | | | | | | | | | | | | | He |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Li | Be | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | العناصر الانتقالية | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٢-١: الفلزات الانتقالية التي تُوجَد في الجزء الذي يتوسط الجدول الدوري.

وتنبع دراسة كيمياء التناسق من الملاحَظة التي تُشير إلى أنه لا يُوجَد شيء في المحلول على الإطلاق يكون في حالة عُزلة تامة. فحتى أكثر الأيونات عزلةً في المحلول تكون مُحاطة ببطانةٍ من الأيونات المخالفة (الأيونات التي تحمل شحنة مخالفة) وبمادة مُذيبة أو بكِلَيهما معًا؛ لأنَّ الفلزات الانتقالية غالبًا ما تُكوِّن أيونات موجبة (وتحدث الاستثناءات النادرة لهذا الأمر مع الفلزات الشاذة أو في ظل ظروف غير عادية)، وتكون مُحاطة بجزيئات الماء التي تحمل في أحد طرَفَيها جزيئات الأوكسجين التي تحمل شحنة سالبة عالية للغاية تقترب من الجزيئات الموجبة. وإذا وُجِدَت أيونات أو جزيئات أخرى في المحلول مثل أيون الخلات أو النشادر كما هو الحال في تجرِبتنا، يُمكن لهذه الأيونات أو الجزيئات أيضًا أن تُحدِث تناسقًا مع الأيون الفلزي المركزي كما هو موضَّح في شكل ٢-٢. وعامة يُوجَد متَّسَع لأربعة أو ستة أنواع من هذه المرافقات تُسمَّى «الليجندات».

والليجند هو أيُّ جزيء صغير أو أيون ينجذب إلى أيون الفلزِّ ويُحيط به، والليجندات المعروفة: $H_2O$، $NO_2$، $Cl^-$، $NH_3$ (الماء، وثاني أكسيد النيتروجين، والكلوريد، والنشادر). ويتوقف مدى كون الأيونات أو الجزيئات مُحكَمة أو غيرَ محكمة، على طبيعة الليجندات والشحنة التي يحملها الأيون.



شكل ٢-٢: أيون فلز في المنتصف مُحاط به ستة أيونات أو جزيئات مصاحبة/ملتحمة.

وكما أشرنا في مناقشتنا للكيمياء الضوئية — وكما نُواجه في الحياة اليومية لدى استخدامنا للمواد بداية من معجون الأسنان المبيض وحتى الأكواب الملونة باللون الوردي — يتفاعل الضوء مع المواد الكيميائية، وسواءٌ أكانت هذه التفاعلات تفاعلاتٍ مُلمعات أو مُعتمات، فجميعها تحدث على مستوى الجزيئات. وفيما يتعلق بمتراكبات التناسق غير العضوية، يعتمد لون الضوء الذي يتفاعل مع الجزيء على طبيعة الليجندات، ومدى كونها في وضع محكم أو غير محكم في التحامها بأيون الفلز. ونتيجة لحدوث امتزاج معقد للمؤثرات، بما في ذلك التجاذب الإلكتروني وقوى الجذب البينجزيئية والأنتروبيا، ينجذب النشادر بشدة نحو أيون الحديد. وعندما أُضيف النشادر إلى محلول الحديد، أحاطت جزيئات النشادر بأيون الفلز حيث حلت محلَّ بعض جزيئات الماء وأيونات الخلات وغيرت لون المركب في هذه الأثناء. وعندما أضفنا فوق الأكسيد، غيرنا حالة أكسدة الحديد ومدى إحكام الليجند حول الفلز. وعليه، غيرت إعادة الترتيب تلك الطريقة التي تفاعل بها الضوء مع المركَّب، أو بكلمات أخرى، غيرت اللون.

ويُمكن للجزيئات العضوية الأكبرِ أن تُكوِّن معقَّدات مع الأيونات الفلزية أيضًا؛ فمنظف الراداياتير يتكون من عامل متراكِب قابلٍ للذوبان في الماء مثل المركَّب العضوي حامض الأوكساليك، الذي يُكوِّن قفصًا قابلًا للذوبان في الماء حول أيونات الفلز ثم يرفعها من جدران المبرد. أما المعادن التي تُوجَد مترسِّبة على جدران المبرد مثل الكالسيوم، فإنها كانت مذابة في ماء المبرد في وقتٍ ما، ونحن عادةً لا نُفكر في الكالسيوم على أنه فلز، لكنه كذلك، فالكالسيوم يقع في الجانب الأيسر من الجدول الدوري مما يجعله فلزًّا، ويُمكنه أن يُكوِّن مُعقدات تناسقية كما تفعل أيونات الفلزات الانتقالية، وعندما يكون الكالسيوم متراكبًا مع حامض الأوكساليك، يُصبح الكالسيوم قابلًا للذوبان في الماء.

وجزيئات المتراكبات العضوية التي تدفع الأيونات الفلزية إلى داخل المحلول تُعرف باسم «عوامل ربط مخلبية». ولعل أهم الروابط المخلبية العضوية هي تلك التي تحدث في أجسادنا، فمُعظم أيونات الفلزات الضئيلة الضرورية للحياة ترتبط بجزيئات البروتين بطريقة أو بأخرى، ويُمكن اعتبار البروتين عامل ربط مخلبيًّا. ويُعَد الهيموجلوبين في أحد أوجُهِه شكلًا مخلبيًّا للحديد، فبدون متراكِب تناسقِ الهيموجلوبين والحديد، لا يُمكن نقلُ الأوكسجين في دمائنا. ولأن البروتين الموجود في الهيموجلوبين يتجمَّع حول أيون الحديد؛ فهو يكون جيبًا جيدًا لغاز الأوكسجين، عندئذٍ يحمل الهيموجلوبين المنقول في الدم هذا الأوكسجين إلى الخلايا التي تحتاجها.

وتقدم الخانة المكونة من عمودَين في اليسار الأقصى من الجدول الدوري (التي تشتمل على الكالسيوم) والستة أعمدة الموجودة في اليمين الأقصى من الجدول الدوري، «العناصر النموذجية»، كما هو موضَّح في شكل ٢-٣.

وتكون هذه العناصر في باقات متنوعة، تحوي فلزاتٍ ولافلزات، وأيضًا بعض الغازات والسوائل والمواد الصلبة في درجة حرارة الغرفة والضغط العادي. ويُوجَد ضمن المجموعة النموذجية عائلات عديدة جديرة بالاعتبار من العناصر، كلٌّ فيما يختص به في فرع من فروع الكيمياء.

ويحوي العمود الأول من أقصى اليسار عائلة الفلزات القلوية، التي نعرف العديد منها مثل الليثيوم (Li)، والصوديوم (Na)، والبوتاسيوم (K)، ولا تُوجَد معظم هذه العناصر — وكذلك الحال مع باقي الفلزات النموذجية — في الحالة الفلزية الطبيعية البتة. فهي تُوجَد في صورة متراكبات تناسقية أو أملاح. وفي الحكايات الأسطورية التي كانت تُروى عن صحراء «ديث فالي» في كاليفورنيا، غالبًا ما كانت هناك إحدى الشخصيات

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | |
| Na | Mg | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La* | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac† | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | • | • | • | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| †Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

شكل ٢-٣: العناصر النموذجية.

تُسمَّى ألِقلي «سام» Alkali Sam أو ألِقلي «بيتي» Alkali Pete أو ألِقلي «العجوز» old Alkali، وهو اسم مأخوذ عن أملاح الصحراء المحيطة بهذه الشخصية المِلحية.

ويُوجَد كلٌّ من الصوديوم والبوتاسيوم في كل مكان في المعادن واليابسة، وفي مسطحات المياه الطبيعية أيضًا، وقد أدى وجودهما في مياه المحيطات إلى اندماجهما في الكائنات الحية التي نشأت هناك. وفي هذه الأيام، يرتبط الاعتناء بالصحة بتركيزات أيونات الصوديوم العالية في الجسم، لكن التأكيد هنا هو على «التركيز». فالأمر الذي يتسبب في حدوث مشكلة هو في المقام الأول غياب الماء وليس وفرة الصوديوم. فقد اتجهنا في ثقافتنا إلى إضافة الصوديوم والابتعاد عن الماء، وهو ما يُعَد مزيجًا يُضعِف أحد أركان الآخر، فهو رفضٌ مؤسف لأبسط فَهم للمحلول الملحي (إذ يتكون من ماء وملح) كي نُخِل بالتوازن بهذه الطريقة.

ويحوي العمود الثاني من جهة اليسار الفلزات الترابية القلوية، التي هي البريليوم والماغنسيوم والكالسيوم والأسترونتيوم والباريوم والراديوم (على التوالي Be، Mg، Ca، Sr، Ba، Ra). ويُوجَد الماغنسيوم والكالسيوم في كل مكان، كما تحتاجهما أجسامنا الملحية

والأجسام الملحية للمخلوقات الأخرى، ويُعَد الكالسيوم عنصرًا حيويًّا للعظام والأسنان والأصداف والهياكل الخارجية. ويلعب الكالسيوم دورًا حيويًّا في العمليات التي تقوم بها عضلاتنا وكذلك في التواصل الذي يجري فيما بين الخلايا. ولأن عنصر الأسترونتيوم يُوجَد في هذه العائلة، يُمكن أن يمتص الجسم الأسترونتيوم الإشعاعي النشاط، الذي هو ناتج انشطار تفاعلات ذرية معينة، ويستخدمه كما لو كان كالسيوم. ويُوجَد الراديوم، وهو عنصر إشعاعي أيضًا، في هذه العائلة.

أما عن العمودَين الثالث والرابع في المجموعة النموذجية، فهما يقعان أعلى الجهة اليمنى من الجدول الدوري، وهي المجموعة التي يُمكن وصفها على أنها فلزات «أشباه الموصلات». فعناصر هذه المجموعة تعمل كأشباه موصلات جيدة بسبب موقعها المتميز في الجدول الدوري. فهي تقع على مَقرُبة كافية من الفلزات الانتقالية حتى تعمل كموصلات بدرجة ما مثل الفلزات الانتقالية، غير أنه، بإمكانها أيضًا أن تكون روابط تساهمية شأنها في ذلك شأن المواد الأخرى التي تقع في الجهة اليمنى من الجدول الدوري. وتُستخدَم مخاليط القصدير والرصاص والجاليوم والإنديوم والألمنيوم (ورموزها على التوالي كالآتي: Sn، Pb، Ga، In، وAl) لصنع المواد شبه الموصلة التي تتمتع بمجال واسع من الخصائص. ويتفرد الجاليوم بأنه معدن صُلب يذوب عند درجة حرارة جسم الإنسان، وعليه يتحول إلى سائل بمجرد إمساكه باليد. أما الألمنيوم، كما رأينا، فهو أحد أكثر العناصر شيوعًا في القشرة الأرضية، غير أنه لم يكن يُستخدَم على نطاق واسع كمادة معدنية حتى بدايات العقد الأول من القرن العشرين؛ لأن الألمنيوم العالي التفاعلية/النشاط. وقبل أن يُستغَلَّ الألمنيوم استغلالًا تامًّا، كان يتعيَّن أن تُوجَد طريقة لاستخراج الفلزِّ من المِلح. ولم تنبع أهميةُ إعادة تصنيع فلزِّ الألمنيوم من نُدرته، لكنَّ كمًّا من الطاقة والمواد التي يتعين أن تنفد من أجل استخراجه من الصخور وتنقيته.

ونجد في العناصر النموذجية الخانةَ التي تحوي الكربون والنيتروجين والأوكسجين والفوسفور والكبريت، وهي العناصر التي تكون أساس الحياة إلى جانب الهيدروجين. ولكننا أطلقنا في الفصل السابق على كيمياء مركبات الكربون والهيدروجين، أو الهيدروكربونات، «الكيمياء العضوية»، وذكرنا أننا سوف نتناول الكيمياء العضوية والكيمياء غير العضوية كموضوعات منفصلة. فهل يُسمَح لنا الآن أن نمسَح هذه الأسطر وأن نضمَّ عناصرَ الكيمياء العضوية إلى عناصر الكيمياء غير العضوية؟ لن يُسمَح لنا فحسب، بل إنه يجب علينا أيضًا، فليس الكيميائي هو الذي مسحَ الأسطر، بل الطبيعة

نفسُها؛ ففي عالمنا المتكافل والمتعايش، لا يُوجَد فصلٌ مطلَق بين الحيوان والأرض، غير أننا قد نسعى إلى فرض أحدهما من أجل التيسير على الكيميائي. ولا يُوجَد مكان أثبت فيه هذا التكافل وجوده بطريقة لافتة للنظر أكثر من ذلك الذي في دورات الكيمياء العضوية والكيمياء غير العضوية، حيث تتناوب الحياة استخدامَ عناصرَ مثل الكربون والنيتروجين، اللذَين يعودان إلى الأرض ثم إلى الهواء، ثم يُعاد استخدامهما مرةً أخرى لكي يُعزِّزا وجود الحياة.

في دورة النيتروجين، يتفاعل النيتروجين $N_2$ غير العضوي الموجود في الغلاف الجوي، الذي يكون مادة غير عضوية، مع الأوكسجين $O_2$ غير العضوي الموجود في الغلاف الجوي، في تفاعل يتسبَّب فيه البرق؛ ومن ثم فإن أكاسيد النيتروجين المتكونة وهي: NO، $NO_2$، $N_2O_4$، يُمكن أن تذوب في ماء المطر مما يجعلها في متناول نوع معيَّن من البكتيريا التي تُوجَد في الأرض. ويُمكن لهذه البكتريا أن تستخدمها كي تصنع جزيئات النيتروجين – الكربون – الأوكسجين – الهيدروجين العضوية التي تُعرَف باسم الأحماض الأمينية. وحينئذٍ تتلقَّى النباتات والحيوانات المركَّبات العضوية التي تحوي النيتروجين الذي كوَّنَته البكتيريا، وتجري لها عمليات أيض، ثم تُخرِجها، وعندئذٍ تُعيدها مرة أخرى إلى الدورة كمركَّبات عضوية وغير عضوية وأملاح. وقد استغلَّ الكاتب إدجار آلان بو في قصته القصيرة «برميل أمونتيلادو»، وجود أملاح النترات ليشير إلى الموت وتحلل الجسد.[1]

> فتعجبت قائلًا: النترات! انظر إنها تزداد، إنها تتدلى كالطحالب التي تغشى سطح المقابر، نحن الآن تحت سطح قاع النهر، وقطرات الندى تسيل بين العظام.

ولكي تكتمل الدورة، تتغذى حشرةٌ بكتيرية أخرى تعيش في ظروف لاهوائية (أي بدون الأوكسجين) على المركبات المتعفنة التي تحوي النيتروجين، ثم تُعيد غاز النيتروجين ($N_2$) إلى الهواء.

وبالمثل يمرُّ الكربون عبر دورة من هذا التعايش العضوي وغير العضوي؛ إذ يبدأ الكربون (C) في شكل ثاني أكسيد الكربون غير العضوي في الهواء، ثم يُعدل من خلال عملية البناء الضوئي إلى سكريات في النباتات. وهذه السكريات — التي تهضمها الحيوانات والنباتات والبكتيريا وتخرجها — تعود مرةً أخرى في صورة ثاني أكسيد الكربون للمشاركة في دورة أخرى.

وثَمة عنصرٌ آخر مصاحبٌ للكربون ويليه مباشرة في الجدول الدوري هو السليكون، ويُمكن للسليكون (Si) أن يُكوِّن أيضًا سلاسلَ طويلةً من أنوية السليكون المترابطة، كما يُمكنه أيضًا أن يتخذ الشكل الرباعي الأوجه مثل الكربون، غير أنه لا يُمكنه أن يُكوِّن بسهولة الروابط الثنائية والثلاثية التي يُكوِّنها الكربون؛ ومِن ثَم لا يملك السليكون البراعة اللازمة لهذا الشكل المعقد من الحياة، مع أن بعضًا من كتاب الخيال العلمي تناولوه تناولًا مخالفًا تمامًا، ولا يزال السليكون يُشكل أساس الكوارتز والأحجار الكريمة والزجاج التي تُسهم في جمال الحياة.

أما عن باقي عناصر المجموعة النموذجية في الجهة اليمنى من الجدول الدوري، فأود أن أُكرِّر أنه من الأفضل أن يجري تناولها كعائلات، لكن هذه المرة كعائلات أحادية الأعمدة. وتُسمَّى العناصر الموجودة في العمود الذي يحتوي على الفلور (F)، التي هي الكلور (Cl)، والبروم (Br)، واليود (I)، «عائلة الهالوجينات»، كما في المصباح الهالوجيني. يُوجَد في المصباح الهالوجيني غاز الهالوجين في الحالة الغازية في انتفاخٍ صغير بداخل المصباح (يُمكنك أن تراه إذا نظرت عن كثب). عندما يسخن سلك التنجستين، يتطاير جزء صغير من سطحه، والغرض من وجود غاز الهالوجين هو حفظ السلك من التطاير كلية. فعندما تتطاير ذرات التنجستين من فوق السطح، فإنها تصطدم بالغاز فتعود مرة أخرى إلى السطح، وتزيد إعادة الوضع تلك من عمر السلك بدرجة ملحوظة، وتُوجَد الهالوجينات أيضًا في الطبيعة بغزارة، وخاصة في المحيطات وفي المعادن، وأُكرر مرة أخرى في الكائنات الحية. ويُعَد اليود أحدَ العناصر الضرورية في جسم الإنسان، فهو ضروري لوظيفة تقوم بها الغدة الدرقية، لهذا يُضيف مصنِّعو مِلح الطعام اليودَ إلى ملح الطعام.

وفي أقصى اليمين من الجدول الدوري تقع الغازات النبيلة — التي هي الهليوم والنيون والأرجون والكربتون والزينون والرادون. وتكون هذه العناصر كما أشرنا من قبل غايةً في الخمول، ولهذا السبب، نُقدِّم لأطفالنا بالونات مليئة بالهليوم دون أن نقلق بشأن الانفجارات (ولا يجب أن نُعطي هذه البالونات للرضع، ليس بسبب الهليوم ولكن بسبب المادة المصنوع منها البالونُ نفسُه). ويشتهر الرادون باعتباره مصدرًا للتعرض الإشعاعي المكثَّف؛ لأنه غاز نبيل — فهو خامل وغاز في الوقت ذاته — ويُمكِنه أن يتخلل التربة وينفذ إلى المنازل السيِّئة التهوية. ومع أن الرادون خامل كيميائيًّا، فإنه يُمكنه أن يتحمل التحلل الإشعاعي، وإذا استنشق فإن الجسيمات النافذة يُمكنها أن تُدمِّر أنسجة الرئتَين.

ويقع الرادون في الجهة السفلى من الجدول الدوري، شأنه في ذلك شأن العناصر المشعَّة كافة تقريبًا. وللأسف، تستحضر كلمة «إشعاعي» للذهن صور القنابل والأمراض والكوارث والدمار، ولكن على المستوى السلمي، يُمكننا أن نُقِر بأن النشاط الإشعاعي أمدَّنا بالأشعة السينية، وتقنيات التصوير العالية وعلاجات فعالة وغير جراحية للأمراض، لكن على مستوى المشاعر، فإننا تأقلمنا على أن نتفاعل سلبيًّا مع الأشياء المرتبطة بالنشاط الإشعاعي كافة. غير أن الخطر الناجم عن المواد الكيميائية هو نسبي دائمًا — فالكثير من الأسبرين يُمكن أن يكون مميتًا مثلما يكون الكثير من الماء مميتًا إذا كنت لا تُجيد العوم — وكذا الحال مع المواد الكيميائية الإشعاعية. ومع أنه ينبغي أن يُعامَل النشاط الإشعاعي والعناصر المنتِجة له بحرص شديد، فإنه إذا استخدم بطريقة مناسبة يُمكن التحكُّم فيه والسيطرة عليه.

وتخضع الكيمياء الإشعاعية أو كيمياء العناصر المشعة للسيطرة عن طريق النوع نفسِه من الكيمياء التناسقية التي تخضع لها العناصر الانتقالية، وأحد المخاوف التي تُساورنا بشأن عدم الانتشار النووي هي أن كيمياء اليورانيوم والبلوتنيوم هي بالفعل كيمياء غير عضوية صريحة، فمُعظم العناصر المشعَّة تُوجَد في مجموعة يُطلَق عليها «العناصر الأرضية النادرة» (التي تقع في هذَين الصفَّين المنفصلَين أسفل الجدول الدوري)، مع أنه تُوجَد عناصرُ ذات نظائرَ مشعَّة منتشرة في كلِّ أنحاء الجدول الدوري. وكما لاحظنا من قبل، النظائر هي ذرات لعناصر لا تختلف إلا في عدد النيترونات، فلها العدد نفسُه من البروتونات، ولكنها تختلف في عدد النيترونات. وتمتلك بعض النظائر عددًا غيرَ مستقرٍّ من البروتونات والنيترونات. وتتناثر هذه النظائر جزيئيًّا في محاولة للوصول إلى حالة الاستقرار؛ إذ تُطلق بعضَ الجسيمات وقدرًا كبيرًا من الطاقة أثناء ذلك.

وثمَّة نظيرٌ مشعٌّ شائعٌ للكربون وكذلك للبوتاسيوم؛ ومن ثَم يكون لدى أي شيء حي — أو أي شيء كان حيًّا من ذي قبل أو يحوي شيئًا كان حيًّا في وقتٍ ما — قدرٌ ما من الإشعاعية، ويُستخدَم الكربون المشعُّ في «التأريخ بالكربون». والنظير المشعُّ الذي يجعل التأريخَ باستخدام الكربون ممكنًا يُسمَّى كربون-١٤؛ لأنَّ عدد البروتونات والنيترونات في الأنوية يبلغ أربعة عشر (إذ يحوي ستة بروتونات لأنه كربون وثمان نيترونات لهذا النظير الكربوني). وتنتج الأشعة الكونية الكربون-١٤ بلا انقطاع، وتُطلِقه في الطبقة العليا من الغلاف الجوي. ولما كانت النباتات تتعامل مع الكربون-١٤ على أنه ثاني أكسيد الكربون والحيوانات التي تأكل هذه النباتات تستهلكه باعتباره سكَّرًا ونشا، فإنه أصبح منتشرًا

بشكل منتظِم في كل الكائنات الحية، وظل عند مستوًى ثابت بدرجة لافتةٍ للنظر. أو بكلمات أخرى هو موجود ما دامت الكائنات الحية موجودة. وبمجرد أن يتوقف الكائن الحي عن الحياة، فهو لا يعود يمتصُّ الكربون-١٤، وعندئذٍ يبدأ كربون-١٤ الموجود في الكائن الميت في التحول إلى كربون-١٢. وعند مقارنة كمية الكربون-١٤ الموجودة في المادة الميتة بالكمية المتوقَّع وجودها في المادة الحية، يُمكِن للعلماء أن يُقدِّروا عمر الكائن الميت، أي منذ متى فارق هذا الكائن الحياة تقريبًا. وتنحصر هذه التقنية في تحديد عمر الأشياء الصناعية المشتقة من النباتات أو الحيوانات التي يقلُّ عمرها عن خمسين ألفَ عام، ومع ذلك فلا يزال هذا أمرًا مذهلًا؛ فقد استخدمت تقنية التأريخ باستخدام الكربون في تحديد عمرِ لفائف الورق البردي التي وُجِدَت عند البحر الميت، وبلغ عمرها ألفَيْ عام.[2]

ونحن نُقابل أيضًا العناصر المشعَّة كلَّ يوم في الأجهزة التي عادة ما تُثبَّت بهدوء وعلى نحوٍ غيرِ ظاهر في أسقف المطابخ والقاعات: كاشفات الدخان. أحقًّا، تكون كاشفات الدخان مشعَّة؟ أجل، هي مشعَّة، فالعنصر النشط في كاشفات الدخان مصدرٌ مشع، فهو عيِّنة من عنصر الأميريسيوم (Am)، الذي يُرسل تيارًا من الأشعة إلى الكاشف، فينطلق إنذارُ الدخان عندما يعوق دخانٌ هذا التيار — أو حتى بخار — ولهذا السبب تُثير أجهزة إنذار الحريق الموجودة في المطابخ الإزعاج؛ إذ ينطلق الإنذار حتى بدون وجود حريق. غير أننا لا نستطيع أن نُنكر أن كاشفات الدخان قد أنقذت أرواح الكثيرين؛ ومِن ثَم لا تنصاع للفكرة التي تُساورك كي تتخلص من جهاز كشف الدخان المزعج، وتستعيض عنه بوسيلة جيدة للتهوية.

وثَمة استخدامٌ آخرُ للأشعة المنطلقة من العناصر المشعة، الذي قد يكون أكثرَ إثارة للجدل من أجهزة الكشف عن الدخان، وهو استخدام الأشعة لقتل البكتيريا في الطعام. تعمل هذه الطريقة جيدًا، فهي تعمل على إطالة فترة تخزين العديد من الأطعمة، غير أن الكثيرين يرفضون استخدام طعام عُرض للإشعاع، ربما خوفًا من التلوث.

ولا ينبغي أن تنتابنا المخاوفُ بشأن التلوث؛ فالأغذية المعرَّضة للإشعاع لا تتعرض للمصدر الإشعاعي مباشرة، لكنَّ ثمة أفكارًا أخرى مُثيرة لرفض هذه الأطعمة، بعضها معنيٌّ بأن الإشعاع قد يُسبِّب حدوث تفاعلاتٍ في الطعام نفسِه مما قد يكون مركَّبات عادةً ما لا تكون موجودةً في الطعام. والبعض يقولون إننا ينبغي أن نقلق بشأن أي شيء يقتل فعليًّا كلَّ البكتيريا الموجودة في الطعام. لماذا؟ ذلك لأن البكتريا لا تُعَد أساسًا شيئًا سيِّئًا، فهي جزءٌ من النظام الكبير. فالطبيعة هي حافظٌ جيد للحياة، بما فيها حياة البكتيريا،

فلا يُوجَد تحيُّز خاص لحياة الإنسان. من ثَم إذا تمكَّنا من تدمير بعض البكتيريا، مما قد يُسبب وجود فجوة ما، وقد ينشأ نوع جديد من البكتريا لسدِّ هذه الفجوة، ولا يُمكِننا أن نتنبأ بما إذا كان هذا النوع الجديد من البكتيريا ضارًّا بالإنسان أو غيرَ ضار. ويعدُّ هذا التعديل ممكنًا من جانب الطبيعة؛ لأن الأنظمة الطبيعية غيرُ جامدة، بمعنى أنها قابلة للتغيير. ونحن نميل إلى أن نُفكر في عالمنا في ضوء الاستمرارية والبقاء؛ لأنه عادةً ما يحدث التغيير ببطء شديد. غير أن الأنظمة الحيوية تستجيب للضغوط، كما هو الحال مع التفاعلات الكيميائية التي تنشأ عنها الأنظمةُ الحيوية. ونتناول في موضوعنا التالي المزيد من المناقشات حول الجزيئات الكيميائية الحيوية.

# تجربة الكيمياء الحيوية: دهون، وانتفاخ البطن، وحساء البقوليات

كيف لك بحق السماء أن تنتوي شرح ظاهرة بيولوجية مهمة مثل ظاهرة الحب الأول في ضوء الكيمياء والفيزياء؟

ألبرت أينشتاين، ١٩٤٠

من إحدى الحقائق الموجودة في حياتنا هي أننا نحتاج أن نتناول طعامًا صحيًّا، والطعام الصحي يمدنا بالغازات. وتكمن المشكلة في أن النشويات الموجودة في الخضراوات العشبية لا تُهضم كليةً في الأمعاء الدقيقة للإنسان قبل أن تنتقل إلى الأمعاء الغليظة. ومع ذلك، فلا يُمثل هذا القصور أيَّ مشكلة للطبيعة. فمن إحدى أروع أنظمة التكافل التي تعشقها الطبيعة هي مستعمرات البكتيريا التي يُطلَق عليها صراحة «النُّبيتات الجرثومية المعوية»، التي تعيش في أمعائنا. وكما ذكرنا في مناقشتنا لخصائص الحالة الغازية فإن هذه البكتيريا لديها الإنزيمات اللازمة لهضم المأكولات العشبية ويروق لها أن تتغذى على

البقايا. غير أنها تنتج الغازات في غضون هذه العملية. وتنتج أيضًا عملية الهضم الكبريتيد الذي هو موادُّ كيميائية عضوية تحتوي على الكبريت، وهي تقترن بانتفاخ البطن الغازي، فرائحة البيض الفاسد هذه تُنتجها البكتيريا التي تُؤدي نفس الدور في إتلاف البيض. وتأتي رائحة انتفاخ البطن من هذا الكبريتيد المحمول مع الغاز، ولهذا السبب في بعض الأوقات تكون رائحة الغاز القادم من الأمعاء نفاذة أكثر من أوقات أخرى.

غير أن مشكلة الرائحة هي مشكلة مُصطنَعة تفرضها الأعراف الاجتماعية، لكن تنفيس الغاز الذي تُسببه غزارة غازات الأمعاء يُمكن صرفُ الأنظار عنه في أفضل الأحوال وإضعافه في أسوأ الأحوال؛ ومِن ثَم تُوجَد أسباب لتجنب الكميات المفرطة من الغازات، أحدها بالطبع عدمُ تناول الأطعمة التي تُسبب الغازات مثل الخضراوات غير المطهوة والبقوليات. غير أن معظم هذه الأطعمة تكون مفيدة وتُعَد مصادر غنية بالبروتينات والفيتامينات والخشائن الضرورية، ولا ينبغي تجنبها تمامًا. وإن كان لديك رغبة، يُمكنك أن تتناول إنزيم ألفا جلاكتوزايداز قبل الأكل الذي يُساعد في هضم النشويات قبل أن تتناولها البكتيريا، وفي التجرِبة التالية سنُسلط الضوء على هذه الإنزيمات وهي تُؤدي وظيفتها.

ارتدِ نظارة الأمان الواقية، جهز محلولَين باستخدام أقلَّ من ربع ملعقة صغيرة (١ مليلتر) من النشا في كوب (٢٤٠ مليلترًا) ماء. افرك قرصًا من الأقراص المساعدة على الهضم التي يجري تناولها قبل الوجبات للتقليل من غازات الأمعاء. ينبغي أن تحوي هذه الأقراص إنزيم ألفا جلاكتوزايدز الذي يهضم النشا. تفقَّدْ نشرة الدواء للتأكُّد من احتوائه على هذا الإنزيم. أضف القرص المفروك إلى أحد الكوبَين المحتوِيَين على محلول دقيق الذرة النشوي. اترك كِلا الكوبَين نحو ساعة ثم أضف إلى كلٍّ منهما قطرةً من صبغة اليود. واليود هو دليلٌ معروف للنشا؛ لأن اليود يُكوِّن مع النشا مركبًا ذا لونٍ أزرق جميل. ويتحوَّل لون محلول النشا الذي لا يحوي الإنزيمَ إلى اللون البنفسجي المائل للزُّرقة دليلًا على وجود النشا. أما المحلول المُضاف إليه الإنزيمُ فينبغي أن يظلَّ محتفظًا باللون البُني الخاص بصبغة اليود. وإذا وُجِد لون أزرق، فإنه سيكون ضعيفًا جدًّا. تُبرهن هذه التَّجرِبة على أن النشا تحللت.

وتخضع الإنزيمات والنشويات لِمظلَّة الكيمياء الحيوية، المملكة التي سننتقل إليها الآن.

الفصل الثالث

# الكيان الكيميائي
# في مقابلة مع كيمياء الجسم

لأنه لا النترات ولا الفوسفات ولا امتداد الألياف في القطن هي الأرض، فإنه لا الكربون ولا الملح ولا الماء ولا الكالسيوم هم الإنسان؛ فالإنسان هو كلٌّ ذلك معًا، بل هو أكثر من ذلك كله.

جون شتاينبك في روايته
«عناقيد الغضب»، ١٩٤٠

لدي يا بني كلمة واحدة فحسب، كلمة ليس إلا ...
ما هي؟
اللدائن.

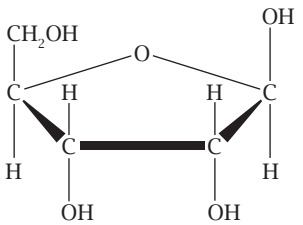
كالدر ويلينجهام وباك هنري في سيناريو فيلم
«ذا جراديويت»، المأخوذ عن روايةٍ تحمل الاسم
نفسَه للكاتب تشارلز ويب، ١٩٦٠

ما هي علاقة اللدائن بالبشر؟ كما هو واضحٌ للعيان، فالعلاقة كبيرة جدًّا. تُصنَع الموادُّ البلاستيكية عن طريق البَلْمرة، وهي العملية التي ترتبط من خلالها الجزيئاتُ البسيطة معًا في سلاسلَ طويلة ممتدةٍ من آلاف الجزيئات. ولا تُوجَد بوليمرات أبرعُ من الخلايا الحية.

والمواد التي تتكون منها أجسامُنا، ابتداء من الجلد وحتى الشعر ومن اللَّوزتَين إلى ظفر إصبَع القدم، هي موادُّ بوليمرية ليِّنة ومستمرَّة. وكما أشَرنا في مناقشتنا للكيمياء العضوية فإن نجاح أشكال الحياة العضوية يتوقَّف على قدرة الكربون على تكوين سلاسلَ طويلة، وعندما تتكرَّر الوحداتُ المكونة من هذه السلاسل الطويلة يتكوَّن ما يُعرَف بالبوليمرات. وتتألف أجسامنا — شأنها في ذلك شأن جسم أي شخص وأي شيء آخر، ابتداءً من الأميبا فصاعدًا — من سلاسلَ طويلةٍ من الوحدات الأساسية المتكررة — من الكربوهيدرات والدهون والأحماض الأمينية والنيوكليوتيدات — أي البوليمرات التي نُصنَع منها.

ولنبدأ بالكربوهيدرات والبوليمرات التي تُكونها، ما هي الكربوهيدرات؟ نحن نعلم أن الكربوهيدرات هي الشيء الذي يجب أن يتجنَّبه أولئك الذي يتَّبعون أنظمةَ حمية معيَّنة، لكن ما هي؟ لقد اعتُقِد في البداية أن الكربوهيدرات هي كربون مُحاط بالماء (ومن ثم أُطلِق عليها كربوهيدرات)، بدرجة ما، مثلما تتكون متراكبات التناسق غير العضوية من فلز محاطٍ بالليجندات، لكننا نعرف الآن أن الوحدة الأساسية في الكربوهيدرات هي السكاريد (مركب سكري)، وهو جزيء كربون حَلْقي الشكل، كما هو موضَّح في شكل ٣-١.

والكربوهيدرات هي سكَّريات – الجلوكوز والفركتوز وجلاكتوز. والسكروز المعتاد هو ثنائي السكاريد، أي جزيئَي سكاريد مرتبطان معًا. وعندما يرتبط أكثر من جزيئَي



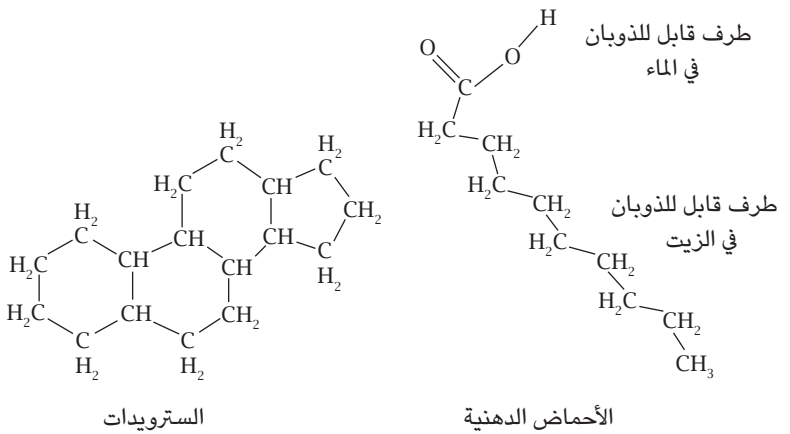

شكل ٣-١: السكاريد: وحدة بناء الكربوهيدرات.

سكاريد يتكون عديد السكاريد. وتكون السلسلة الطويلة من عديد السكاريد المواد الأساسية للنشا التي هي السليلوز والجليكوجين.

وكما هو معروف جيدًا لأولئك الذين يتبعون الحميات الغذائية والمعنيِّين بالأمور الصحية، يقوم الجسم بأيض السكريات لإطلاق الطاقة وعندما يُوجَد المزيد من السكر، يخزنه الجسم لاستخدامه فيما بعد. وتخزن الحيوانات السكريات كبوليمرات الجلوكوز التي يُطلَق عليها «الجليكوجين». أما النباتات فتصنع بوليمر من السكر يختلف اختلافًا طفيفًا بغرض التخزين، وهذا هو ما نُطلِق عليه النشا. وتستخدم النباتاتُ أيضًا سلاسلَ طويلة من الكربوهيدرات لعمل السليلوز، الذي تستخدمه لأغراضٍ بنائية، وليس لأغراض تخزينية. ولا يستطيع جسم الإنسان أن يستعيد السكاريد من السليلوز، وفي بعض الأحيان تُدمَج الكربوهيدرات عَسِرةُ الهضم في الطعام كي تُقلِّل عدد السعرات الحرارية لكل مكوِّن من مكونات الطعام.

ويخزن الجسم أيضًا بعض أنواع الليبيدات أو الدهون لعملية الأيض النهائية، والدهون نوعٌ آخر من الطعام يُوصى بعدم الإفراط في تناوله بسبب الآثار السلبية الناجمة عن زيادة استهلاكه، لكن يحتاج الجسم الدهون بلا أدنى شك، ولا سيما أجسام الأطفال التي تكون في مرحلة نمو، فعلى سبيل المثال تحتاج فيتامينات أ، ك، د إلى الدهون لكي تُمتَص؛ ومِن ثَم يحتاج مقدار الدهون أن يُضبَط حقًّا عن طريق معرفة أيِّ أنواع الدهون ينبغي الحد منها وأيها ضروري. وثمَّة أنواعٌ عديدة من الدهون تتمتع بوظائفَ مختلفة.

وثمَّة نوعان أساسيان من الدهون هما الأحماضُ الدُّهنية الستيرويدات، والتركيب الأساسي لهذَين النوعَين مختلفٌ تمامًا، كما هو موضَّح في شكل ٣-٢، غير أنه قد يبدو أمرًا مثيرًا للفضول أن الكيميائيِّين يُصنِّفونهما معًا.




شكل ٣-٢: فئتان أساسيتان من الليبيدات هما الستيرويدات والأحماض الدهنية.

ويُوضَع هذان المركبان معًا في مجموعة واحدة؛ إذ يتمتعان بخاصية مشتركة وهي قابلية الذوبان في السوائل الزيتية القِوام، ففي حالة الأحماض الدهنية، يُوجَد طرفٌ واحد قابل للذوبان في الزيت، والطرف الآخر قابلٌ للذوبان في الماء، وهو غموض يتَّضِح أنه مفيدٌ بدرجة مذهلة، كما سنرى.

الأحماض الدهنية هي سلاسلُ كربون طويلة تنتهي بمجموعة حمض عضوي COOH. وتُخزن هذه الدهون في تشكيلاتها المتنوعة الطاقة (وهي المكون الأساسي لكل خلايا الدهون التي تُعتبَر مصدر إزعاج) وكذلك تعمل على حماية وعزل الأعضاء الداخلية. وهي تعمل كمادَّة عازلةٍ على الألياف العصبية كما أنها المكون الأساسي لجدار الخلية. ويُمكِن إطلاقُ أحد هذه الأحماض الدهنية الطويلة السلسلة، ويُطلَق عليه حامض الأركيدونيك، عندما تُجرَح إحدى الخلايا من جراء قطع أو حدوث ارتطام. ويتحول هذا الحامض إلى مركَّب لإثارة الخلايا العصبية (الذي هو الألم)، يدفع الدم إلى الموقع

(وهذا هو الالتهاب)، ويرفع درجة حرارة الجسم كي يُسرِّع من عمليات الإصلاح التي يُجريها الجسم (وهو ما يُعرَف بالحمى). أن يحدث كلُّ هذا أمرٌ جدير بالملاحظة بما يكفي، لكن عندما تُجرَح في المرة القادمة، لاحِظ كيف يحدث هذا سريعًا، إنه يحدث سريعًا لكن ليس لحظيًّا، إن حدوث التفاعلات الكيميائية يستغرق وقتًا، لكن حدوث كلِّ ردود الأفعال تلك داخل الجسم لدى تُعرِّضك للجرح يحدث في وقت قصير بدرجة مذهلة.

والستيرويدات هي ليبيدات لها نفس التركيب الحلقي الأساسي الموضح في شكل ٣-٢. وتشوب الستيرويدات سمعةٌ سيئة في حد ذاتها، لكن أود أن أُكرر مرة أخيرة أنها تقوم بعملها، ولا يُمكن الاستغناء عنها كُلية، وتُمثل الستيرويدات مكونات غشاء الخلية، وعازلًا للخلايا العصبية وأساس الهرمونات الستيرويدية.

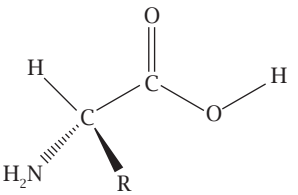
والكولسترول هو ستيروید، وكما يعرف الكافة فإن الإفراط في تناول الكولسترول ضارٌّ، لكن يستحيل أن يجري التخلُّص من الكولسترول كليةً من النظام الغذائي، فالجسم نفسُه يصنع الكولسترول لأنه يحتاج إليه ليقوم بعمليات ضروريَّة كثيرة. إذن ما مشكلة الكولسترول؟ تظهر المشكلة عندما توجد كميات كبيرة من الكولسترول في الجسم، إذ يُمكن أن تتراكم على جدران الأوعية الدموية وتُسبب ضيقًا في الأوعية حيثما ينبغي أن يتدفق الدم بحُرية، وقد ذكرنا في مناقشتنا للكيمياء العضوية أن المركبات المشبعة هي تلك المركبات التي تكون جميع روابطها أحادية (C–C)، أي إنه لا تُوجَد فيها روابط ثنائية (C=C)، أو ثلاثية (C≡C) في الكربون وروابطه. وقد اتضح أن الدهون المشبعة هي أيضًا الدهون الصلبة مثل دهن الخنزير أو الدهن النباتي الصلب، وتدوم الدهون المشبعة لفترات طويلة دون أن تفسد؛ ومِن ثَم يتعمَّد مُصنِّعو السمن النباتي أن يُهدرِجوا منتجاتهم — بمعنى أن يَكسِروا الروابط الثنائية والثلاثية عن طريق إضافة الهيدروجين — حتى يَحولوا دون تلَفِها. غير أنه أُدرِك حديثًا أن الدهون المشبعة يُمكِنها أن تُحفز الجسم لتخليق الكولسترول؛ ومن ثَم تَحول دون القضاء عليه. ومن ناحية أخرى، تُعزز الدهون غيرُ المشبعة القضاءَ على الكولسترول.[1] ومع ذلك فالمشكلة لا تكمن بأكملها في كمية الكولسترول.

وتتراكم الرَّواسب غيرُ المرغوب فيها من الكولسترول لأن الكولسترول يحتاج إلى المساعدة حتى يُنقَل في كل مكان في مجرى الدم، وذلك لكونه ليبيدًا لا يحظى بطرَفٍ قابل للذوبان في الماء. ويُطلَق على الناقلات دهون منخفضة الكثافة، وهي تُشكِّل فقاعات حول الكولسترول، وعلى غِرار بقايا الصابون المذاب، تُستخدَم أطرافها الهيدروكربونية الزيتية

القوام كي تربط ما بين الكولسترول وأطرافه الحامضية العضوية وسائل الدم الذي قوامه كالماء. ويُساعد تركيب الدهون المنخفضة الكثافة (الذي يُشار إليها بـ LDL) (دهون الكولسترول) في أن تُرسب حملها من الكولسترول حينما تصل إلى الخلايا التي تكون في حاجة إليها، ولكن للأسف يُسهِّل تركيبها أيضًا تفريغ الزائد من الكولسترول في جدران الأوعية الدموية عندما تأخذ الخلايا كل كفايتها، وعندما نتحدث عن «الكولسترول السيئ»، فإن ما نَعنيه حقًّا هو مركَّب الكولسترول والدهون المنخفضة الكثافة. والأشخاص الذين هم عُرضة لنِسَب عالية من الكولسترول في الدم يجب أن يتجنَّبوا تناول الكولسترول، لكن ينبغي أن يتجنَّبوا كذلك الدهون المشبعة؛ لأن هذه الدهون تُسهِم في تكوين منتجات الدهون المنخفضة الكثافة.

غير أنه يُوجَد تركيب آخر من الدهون يُسمَّى الدهون المرتفعة الكثافة (HDL) تغسل الزائد من الكولسترول من على الجدران ثم تدفعها أسفلَ إلى الكبد كي تتفتَّت هناك. وعندما نتحدث عن «الكولسترول الجيد»، فإن ما نَعنيه هو مركَّب الكولسترول والدهون المرتفعة الكثافة؛ من ثم قد يبدو الأمر للوهلةِ الأولى أنه يُمكن تجنُّب رواسب الكولسترول عن طريق حفظ التوازن المناسب للدهون المنخفضة الكثافة في مقابل الدهون المرتفعة الكثافة، لكن الأمر أكثر تعقيدًا من هذا؛ إذ يجب أن تُخفَّض أيضًا كل أنواع الدهون على وجه العموم، إذ تُثير الدهون الزائدة إنتاج الكولسترول بواسطة الكبد، والشخص الذي يتبع نظامًا غذائيًّا مرتفعًا في نسبة الدهون يُمكنه بالفعل أن يستعيد امتصاصَ بعضٍ من الكولسترول الذي كان قد انتقل بالفعل إلى الكبد، وعليه فإن النظام الغذائي المرتفع في نسبة الدهون له أضراره أيضًا.[2] لذا مفتاح النظام الغذائي الصحي هو الذي نعرفه جميعًا منذ وقتٍ طويل، ألا وهو التوازن، إذ يجب أن نتناول بعض الفاكهة وبعض الخضراوات وبعض الكربوهيدرات وبعض الدهون وبعض البروتينات.

ما البروتينات؟ هي بالطبع بوليمرات؛ هي بوليمرات ذات وحدات أساسية تُدعى الأحماض الأمينية، والأحماض الأمينية هي جزيئات عضوية صغيرة تحتوي على مجموعة نيتروجين وحمض عضوي. ويُوضح شكل ٣-٣ شكل الحامض الأميني العام. ومجموعة الحامض العضوي هي كربون مرتبط بالأوكسجين برابطة ثنائية، ومجموعة OH مرتبطة برابطة أحادية. وتُسمَّى مجموعة النيتروجين $NH_2$، مجموعة الأمينو (ومن ثَم الأحماض الأمينية). وإلى جانب مجموعة الأمينو تُوجَد مجموعة يُشار إليها بالرمز R لترمز إلى المجموعات المتنوعة الأخرى التي يُمكن إضافتها في هذا المكان، وبهذه الطريقة يُمكن تكوينُ تنويعات من الأحماض الأمينية.




شكل ٣-٣: التركيب العام للحمض الأميني.

لاحظ أن الكربون له أربعُ روابط، والأحماض الأمينية يُمكن أن يكون لها «يد مفضلة» والأحماض الأمينية التي تتكون طبيعيًّا، لديها يد مفضلة، فإذا أُدخل جزيء ذو تشكيلٍ خاطئ — أو حتى إذا جرى تبادل أوضاع رابطتَين — يكون الجزيء غيرَ مناسب ويُمكن أن تكون النتيجة مميتة.

ويُوجَد ما يقرب من عشرين حمضًا أمينيًّا مختلفًا موجود بشكل طبيعي في جسم الإنسان، وتُكوِّن بوليمرات هذه الأحماض الأمينية البِنَى البروتينية مثلَ أظافر الأصابع والغضاريف، وكذلك الإنزيمات والهرمونات. ويُمكن تصنيع بعض الأحماض الأمينية في الجسم، لكن يجب أن يأتيَ عددٌ مساوٍ تقريبًا عن طريق الغذاء، فكل الأحماض الأمينية الضرورية تُوجَد في البروتين الحيواني مثل اللحوم والبيض، غير أنها يُمكن أن تُكتسَب من مصادر غير حيوانية أيضًا، ولا تُوجَد خضراوات تحتوي على كل البروتينات الضرورية، لكن ما دام يُوجَد تنوعات مختلفة كثيرة تُستهلك، مثل القرع والذُّرة والأرز والبقوليات وفول الصويا والمكسرات، فإن حاجة الجسم من البروتين يُمكن أن تُلبَّى.

ومن بين كلِّ المواد التي تناوَلْناها حتى الآن، فإن البروتينات هي التي تقوم بمعظم المهام. وتتضمَّن سلاسلها الطويلة الحامض COOH، والقاعدة $NH_2$، وتسمح قُوى الجذب البينجزيئية بين روابط R المختلفة لسلاسل البروتين أن تَنثنيَ على نفسها في تشكيلات عديدة معقدة، لكنها قابلة لإعادة التكوين. أما القوى التي تحكم البروتين في شكلها المنثني فهي نفس قوى الجذب البينجزيئية التي قابلناها من قبل ومثل هذه يُمكن كسرها بسهولة. ولا تُؤدي الغالبية العظمى من البروتينات النشطة بيولوجيًّا أدوارها جيدًا إلا في بيئتها الطبيعية، وعندما تُشوَّش أو تُغيِّر طبيعتها حتى بأبسطِ التغييرات، فإنها لا تعود تُؤدِّي دورها، فعلى سبيل المثال، البروتين الموجود في البيض النِّيء يُمكِنه أن يُغير

من تشكيله الوظيفي حتى بإضافة أقلِّ قدرٍ ممكن من الحرارة، وهو الأمر الذي تدور حوله كل أمور الطهي. والهيموجلوبين هو بروتين يضم أيونات حديد، وينتج اللون البني الذي يُلون اللحم المطهو أو الفاسد عن حدوث تغيُّر في حالة أكسدة الحديد الموجود في الهيموجلوبين، تمامًا كما رأينا عندما غيَّرنا خلات الحديد البنية اللون إلى المركب الأحمر بإضافة فوق أكسيد الهيدروجين.

ويستحيل أن نَصِف في هذه الصفحات القليلة عددَ المواد التي تُكونها البروتينات في الجسم وأدوارها المتعددة، لكن من الممكن أن نُلقِيَ نظرة على فئة بعينها وهي الإنزيمات التي تعمل على نقل براعة البروتينات الفائقة.

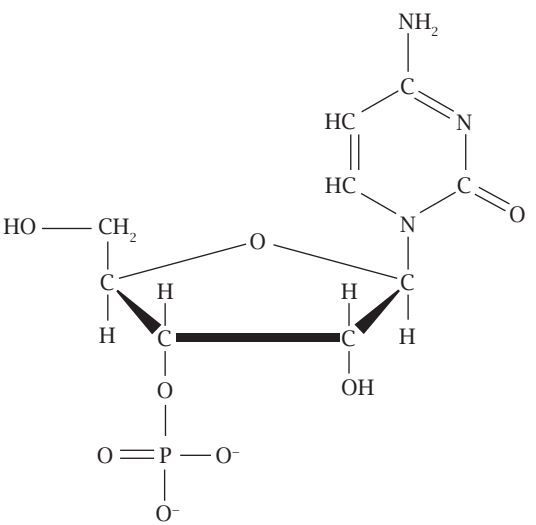
والإنزيمات هي العوامل الحفازة للجسم، فهي تُسهل حدوث التفاعلات السريعة الضرورية للحياة (تذكر أن ثَمة رسالةً يجب أن تنتقل إلى مخِّك عندما تجرح أصبعك، وإذا لم تصل هذه الرسالة بالسرعة الكافية، فإنه يحدث تلفٌ يتعذر إصلاحه.) وتُؤدي الإنزيمات دورها التحفيزي عن طريق تركيبها ثلاثي الأبعاد، ويتمتع كل إنزيم بشكل متفرد يسمح له بالارتباط بالجزيئات المستهدفة، وقد أوضحنا إحدى الطرق التي يُمكن لهذا الربط أن يُسرع عن طريقها التفاعلاتِ الكيميائية لدى تناولنا لموضوع معدلات التفاعلات الكيميائية، فعندما ترتبط مادتان متفاعلتان بإحدى الإنزيمات، فإن الإنزيم يجمعهما معًا في التقارب الأمثل إلى أن يتفاعلا.

وتُعَد الطريقة التي يستخدم بها الجسمُ الإنزيماتِ طريقةً رائعةً للغاية، فلا يجب أن تعمل الإنزيمات على نحوٍ دائم إذ إنها لو كانت كذلك فسوف تُحفز التفاعلات بلا انقطاع، فإذا لم تكن هناك حاجةٌ إلى ناتج التفاعل، يجب أن تتوقَّف الإنزيمات عن العمل، ففي أوقاتٍ عديدة، وفي موقفٍ أشبهَ برقصة البالية الرشيقة، تقوم المادة الناتجة نفسُها التي يُنتجها الإنزيم بإيقافه عن العمل. ويُؤدي الإفراط في تكوين النواتج إلى انحراف اتجاه التفاعل، فبدلًا من أن يُكوِّن النواتج، يكسرها، ويجب أن يحتفظ الجسم بتوازنٍ حساس للمواد، سواءٌ كان من ناحية النُّدرة أو الغزارة؛ ومِن ثَم يجب أن تعمل آلية إيقاف الإنزيمات عن العمل تمامًا مثل آلية تحفيزها، ومن المدهش أن هذا هو ما يحدث.

ويجب أن يُنظِّم أيضًا عددُ البروتينات نفسَه، ويعمل النظام المسئول عن إنتاج البروتينات وفقًا لمبادئ التوازن أيضًا، فعلى سبيل المثال، إذا كان الإنزيم اللازم لتكسير اللاكتوز موجودًا بصورة دائمة في مجرى الدم، فإنه كان سيجلط الدم ويُعرقل النشاط، فقط في انتظار منتج خاصٍّ بالألبان كي يُستهلَك. ومن ثَم يكسر الجسم بروتيناتِ هذه

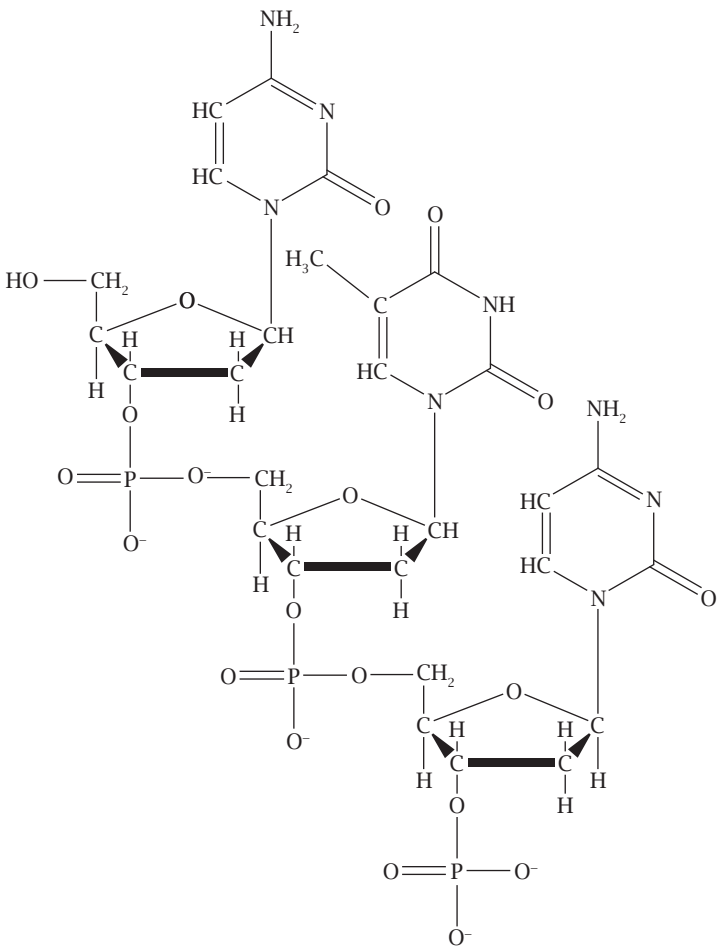
الإنزيمات ويُعيد تصنيعها، مُخزِّنًا إياها في السائل البروتيني الموجود في الجزء الداخلي لكلِّ خلية، وعندما يظهر اللاكتوز ثانيةً في مجرى الدم، فإن الخلية تُحفَّز لإنتاج المزيد من الإنزيم للتعامل معه، ولكن كيف تُنتج الخلية المزيدَ من الإنزيمات؟ بالطبع، عن طريق بوليمر آخر.

غير أن البوليمر الذي نتحدث عنه هذه المرة يتميَّز بكونه يتركَّب من ثلاثة أنواع مختلفة من الوحدات الأساسيَّة، وهي: قاعدة نيتروجينية، وسكَّر، ومجموعة فوسفات، كما هو موضَّح في شكل ٣-٤. ويكون الاتصال عن طريق مجموعة الفوسفات والسكر، وهما يرتبطان معًا كما هو موضَّح في شكل ٣-٥، وهما يُشكِّلان تركيبًا على شكل سقَّالة معقَّدة التركيب تلتوي وتتحوَّل إلى مادة مضغوطة تُسمَّى «الحامض الريبي المنقوص الأوكسجين»، الذي يُعرف باسم الدي إن إيه DNA أو الحامض النووي، مادة الجينات والكرموزومات.



شكل ٣-٤: ارتباط مجموعة فوسفات وسكر قاعدة نيتروجينية.

والكروموزوم، الذي هو شريط طويل من الدي إن إيه، هو جزيء يحتوي على معلومات حول كيفية صناعة كل البروتينات الموجودة في الجسم، ويُمثِّل الجين أحدُ



شكل ٣-٥: قطاع من تركيب الدي إن إيه يُوضح الروابط التي تحدث بين النيوكليوتيدات.

قطاعات الكروموزوم الذي يُخبر عن كيفية صنع بروتين واحد بعينه، ويعمل تتابع النيوكليوتيدات في الجين كقابل يُترجَم في نهاية الأمر كتتابُعٍ للأحماض الأمينية في البروتين.

ويُمكِن النظر إلى الدي إن إيه على أنه ملف مصغر يحتوي على الوصفة أو طريقة العمل. وعندما يحتاج الجسم إلى هرمون يذهب إلى الدي إن إيه ليتلقَّى التعليمات حول كيفية عمل هرمون، وعندما يحتاج إلى إحدى خلايا البشرة أو ظفر، يذهب إلى الدي إن إيه كي يحصل على وصفات للبروتينات، وعندما يكون هناك حاجة إلى بروتين معين — عندما يكون هناك عجزٌ فيه أو يكون الجسم في حاجة إلى المزيد — يتولد ضغطٌ على الاتزان مما يُؤدي إلى حل شفرة جزء من الدي إن إيه. وبهذه الطريقة عندما يحتاج الجسم إلى المزيد من الشعر، تُحفز الخلايا لإنتاج بروتين الشعر، وعندما يحتاج الجسم إلى إنزيمات تُساعد على الهضم، تُستقبَل الرسالة ويُنتَج المزيد، وعندما يحتاج الجسم إلى هرمون الأدرينالين، يكون الهرمون مستعدًّا، بمعدلٍ يسمح لنا أن نقفز فوق السيارات أو نسبق الصرصار. لكن، كما أشرنا في التجرِبة التي بدأنا بها هذا الفصل، مع كل القدرات الهائلة التي تتمتَّع بها الخلية لكي تُلبِّي حاجة الجسم من الإنزيمات، فإن إنزيمًا واحدًا يبقى لا يستطيع جسم الإنسان أن يُنتجه، إنه الإنزيم الذي يُحلل البقوليات تمامًا.

والإنزيمات، مثل ذلك الإنزيم الذي استخدمناه في تجرِبتنا، يَحكمها مبادئُ علم الحركة الكيميائية — وهو يُمثل إحدى الروابط العديدة التي تربط بين المبادئ الأساسية للكيمياء والكيمياء المعقَّدة للحياة. وتعرض دراستنا السريعة والخاطفة للكيمياء الحيوية هنا، ممزوجة بمناقشتنا السابقة للأنظمة الكيميائية الحيوية، أن كل مبادئنا الكيميائية تلعب دورًا هامًّا في الحياة، مثل التفاعلات الحمضية القاعدية، وتفاعلات الأكسدة والاختزال، والروابط الكيميائية، وقُوى الجذب البينجزيئية، والتركيز، والمواد الصُّلبة والقابلية للذوبان، وعلم الحركة الكيميائية، وحتى تغييرات الحالة والحالة الغازية.

ويلعب الاتزانُ دورًا حيويًّا، وكذلك الديناميكا الحرارية التي تحكمه، وأيضًا الطاقة والأنتروبيا على السواء. وأينما وُجِدت الحاجة لمركب، ينتجه الجسم، وحينما يكون هناك وفرةٌ منه، يتوقَّف الجسم عن الإنتاج، ويستهلك أو يُخرِج الزائد، فعندما نحتاج إلى طاقة نأكل، وجسم الكائن الحي يُؤدِّي دوره عن طريق العرض والطلب من الاتزان الكيميائي.

وقد يبدو الأمر غريبًا حينما نُفكِّر في الأنتروبيا في ضوء الكيمياء الحيوية؛ لأن الأنظمة البيولوجية تكون غاية في التنظيم والترتيب، غير أن الكيمياء الحيوية تُعتبَر قوة هائلة على الأنظمة البيولوجية وكذلك على أي مكان في الكون. وتُعطي الرسوماتُ البيانية للخلايا الموجودة في الموسوعات انطباعاتٍ خاطئةً بأن الخلايا تُشبه صفَّ منازل في مدينة أو شقة في مجمع سكني، وجميعها متكدسة معًا ومنظمة ولها الشكل نفسُه، غير أن نظرةً

واحدة عبر الميكروسكوب ستعمل على تصحيح ذلك الانطباع، فالخلايا غيرُ منظمة حقًّا وفوضويةٌ، وكل واحدة منها لها شكلها وعاداتها الخاصة، ولا يكون غشاء الخلية صلبًا، فهو مائعٌ ويُغيِّر شكله تِباعًا بصورة دائمة، والدي إن إيه ليس مطبوعة جامدة من المعلومات، لكنه يحتوي على «الجينات القفازة»، و«الجينات المهمَلة»، وهي الجينات التي يُمكنها أن تتحرَّك حول الجينات، التي يبدو أنها لا تقوم بأي دور سِوى زيادة التشويش والفوضى.

لكنَّ ثمَّة بعضَ الأسباب لتقدير كلِّ هذه الفوضى؛ فهي تَعني أنه لا يُوجَد نظامان بيولوجيَّان طبيعيان متطابقان تمامًا. لقد تعلَّمنا أن نتفهَّم هذا التفرد ونُحسن استغلاله في ضوء تقنيات الكيمياء التحليلية التي سنتناولها لاحقًا. والآن، تُمكِّننا أدوات الكيمياء التحليلية من تحليل المعلومات واستخراجها من إحدى رقائق الجلد أو من قطرة اللُّعاب. سيفتخر بنا شارلوك هولمز.

# تجربة الكيمياء التحليلية:
# الدليل في بصمات الأصابع

بافتراض أن هُوية الشاعر يُرمَز لها بالرقم عشَرة، وحتمًا سيجد الكيميائيُّ وهو يُجري تحاليله عليها أنه مُكوَّن من جزء واحد يتعلق بالمصلحة الذاتية. فالتسعة أجزاء من احترام الذات لدى جرينجوير التي زادت وتعاظمَت نتيجة عبير الإعجاب الشعبي قد أضحت في حالة تضخُّم مذهلة، طامسة ذلك الجزيء الدقيق جدًّا من المصلحة الذاتية.

فيكتور هوجو في رواية «أحدب نوتردام»، ١٩٢٠

لقد ثبت أن دليلَ الدي إن إيه ذو قيمةٍ عالية، وعلى قدر مرتفع من الدقة، ويُمكن التعويلُ عليه، غير أنه لا يكون متاحًا دائمًا، لكن بصمات الأصابع يَسهل رؤيتها ويجري السعي إليها في كل موقع جريمة، ولكي نرى كيف يُمكن جعلُ البصمات الخفية مرئية، ارتدِ نظارة الأمان الواقية وأجرِ التجربة الآتية:

خُذ بعض رقائق الألمنيوم واصنع شكل مربع صغير في طاسة أو كِفة ميزان. خذ وعاءَ طعام بلاستيكيًّا سَعتُه نحو واحد جالون (إذا استخدمت وعاءَ زبدة كبيرًا، فسيفي بالغرض تمامًا). اغسل الوعاء وغطاءه ثم جفِّفهما. أحضر برطمانًا صغيرًا، وليكن زجاجة دواء فارغة أو كوبًا أملس أو أي وعاء شفَّاف صغير يُمكِن أن يدخل في وعاء الزبدة، اغسله كلَّه أولًا جيدًا من الداخل والخارج، ثم تناوله باستخدام قفاز أو مِنشَفة لتجنُّب أي بصمات أصابع غير مخطَّط لها. أحضر ملقاطًا نظيفًا، أو كماشة نظيفة، والآن أنت قد حصلت على كل العدة اللازمة لغرفة تحميض بصمات الأصابع.

أحضر الغراء الممتاز المدرج في قائمة المشتريات والمحاليل، وتأكد من أنه النوع الذي يحوي سيانواكريلات. وستظهر بصمات الإصبع على البرطمان الزجاجي الصغير أو الوعاء الذي اختارته أنت؛ لذا أمسك بإحكام بأصابعك العارية الكوب، واحرص على ألَّا تلطخ البصمات، ثم ضع البرطمان داخل وعاء الزبدة. دوِّن في مفكرة أين لمست البرطمان لتذكرتك في المستقبل. خذ الكفة التي تحوي رقائق الألمنيوم وضع نحو ثلاثين نقطة من الغراء فيها. وعندئذٍ تتوقف كمية الغراء الموضوعة على حجم غرفة التحميض، فكلما كانت غرفة التحميض أكبر تطلب الأمر إضافة المزيد من الغراء. ضع الكفة التي تحوي الرَّقائق والغِراء في قاع الغرفة إلى جانب البرطمان. وقد تحتاج أن تمسك الطاسة بالملقاط أو الكماشة كي تتجنَّب وصول الغِراء إلى يدَيك وأنت تضع الكِفة في الغرفة. ضع الغطاء بحذر على الغرفة، وتأكد من أن الغراء لا يسيل من الكفة، ثم ضع الغرفة جانبًا طوال الليل. سيتبخر الغراء طوال الليل، وسوف يتفاعل بخار الغراء مع الزيوت والمركبات التي خلفتها وراءك على البرطمان بأصابعك.

وفي الصباح، ارفع الغطاء بحذر وأزل البرطمان عن طريق إدخال قلم رصاص أو مسبار آخر طويل في فتحة البرطمان. حاول ألَّا تُلطخ بقايا بصمات الأصابع التي يُمكِن ملاحظتها الآن على البرطمان. هل هناك أي بصمات في أماكنَ أخرى من البرطمان لم تكن ملحوظة اليوم السابق؟ كانت هناك بصمات على برطماننا مع أننا حاولنا أن نكون حَذِرين. وإذا كنت تتمتع بيدَين ثابتتَين، ولديك بعض الورق الأسود، وشريط لاصقٌ

شفاف، يُمكنك أن ترفع البصمات من على البرطمان وتجعلها على الشريط. ضع بحذر قطعة صغيرة من الشريط على بصماتك. ولأن البصمات المحمضة تظهر بلون رمادي فاتح، فإن إلحاق الشريط بالبطاقة السوداء يجعلها أكثر وضوحًا، والبصمات يُمكن رفعها من عدة أسطح، حتى الأسطح غير المحتملة أيضًا، فعلى سبيل المثال، يُمكن رفع البصمات من داخل القفازات الجراحية بحرص شديد.

ارتدِ قفازًا جراحيًّا وأمسك مقبض الباب أو أي شيء آخر بإحكام. انزع القفاز بحيث تُخرج الجزء الداخلي للخارج ثم ضعه في غرفة التحميض. انشره قليلًا بحيث يتسنَّى للبخار أن يصل كل المناطق. ظهر البصمات بنفس الطريقة السابقة. وها قد تمكَّنا من تظهير إحدى البصمات من داخل قفازاتنا التي تَمكنا من نقلها على شريط.

وتُعَد بقع الدم أيضًا غاية في الأهمية في إعادة بناء موقع الجريمة، وتُوضح هذه التجربة الأخرى كيف يُمكن اكتشاف وجود الدم، فالهيموجلوبين الموجود لدى الثدييات يعمل كعامل حفاز في انحلال فوق أكسيد الهيدروجين، ويُمكننا الحصولُ على القدر الكافي من الهيموجلوبين لهذه التجربة من قطعة لحم نِيئةٍ، أو عندما تشتري قطعة لحم بقري يُمكِنك أن تأخذ الأنسجة الماصة الموجودة تحتها وتستخدمها كمصدر للدم. وسوف تحتاج إلى كوبَين صغيرَين شفَّافَين من البلاستيك ولون أحمر من ألوان الطعام كعنصر ضابط. ضع مقدارًا قليلًا من لون الطعام الأحمر في أحد الكوبَين مع بعض الماء ثم اخلطهما معًا. خذ اللحم النِّيء أو الأنسجة من اللحم البقري، ثم اعصر القليل من الدم في الكوب الآخر. ثم صُب نحو ملء ملعقة صغيرة (٥ مليلترات) من فوق أكسيد الهيدروجين في كل كوب. يتأكسد لون الطعام ببطء بسبب فوق الأكسيد ويتلاشى اللون تدريجيًّا، لكن الدم سوف يُسبب تحللًا سريعًا وقويًّا لفوق أكسيد الهيدروجين، ويُميز الاختلاف في التفاعلَين بوضوح الدم عن لون الطعام.

الفصل الرابع

# الكيميائي محللًا

لقد عثرت على شارلوك هولمز وحده، لكنه كان نِصفَ نائمٍ بقِوامه الطويل النحيل منكمشًا في كرسيِّه الهزاز. وقد استنتجت من وجود مجموعة هائلة من الزجاجات وأنابيب الاختبار، ومع تصاعد ... رائحة حامض الهيدروكلوريك النفاذة، أنه قد قضى يومه في العمل الكيميائي الذي كان يُقدِّره أيَّما تقدير.

وسألت وأنا أدخل: «هل وجدتها؟»

أجابني: «أجل، لقد كانت بيكبريتات أكسيد الباريوم.»

صرخت: «لا، أعني حل اللغز!»

سير آرثر كونان دويل في روايته «قضية هوية»، ١٨٩٠

بالطبع يسهل على السكر أن يكون حلوًا وعلى نترات البوتاسيوم أن تكون مالحة.

رالف والدو إيمرسون في
«رجال مندوبون»، ١٨٥٠

الكيميائي باعتباره محللًا، أيُعقَل هذا؟ بالطبع نعم، فنحن لا نستخدم أريكة لكي نُحلل كيميائيًّا، نحن نستخدم كيميائيًّا لكي نُحلل أريكة. لكننا أرجأنا مناقشتنا للكيمياء التحليلية إلى قرب النهاية؛ لأنها تُخرج أفضل ما لدى الكيميائي بطرقٍ شتَّى. ففي الكيمياء التحليلية، تُحضَر كافة أدوات الكيمياء وكل مواهب الكيمياء من أجل طرح سؤالَين هما: ما الكيمياء التحليلية، وما الكمُّ الموجود لدينا منها؟ عند نقطة ما سنجد كل الكيميائيين كيميائيين تحليليين، وأن كل الكيمياء تتطلب تحليلًا. وثمة مناطقُ عديدة متخصصة تهم الكيميائيين التحليليين مثل خبراء مراقبة الجودة الذين يضمنون جودة الأطعمة التي نتناولها، ومدى الوثوق بالأدوية، وكل السيارات الجديدة التي تدور في خطوط التجميع لها البريق نفسُه، لكن الكيمياء التحليلية منتشرة للغاية حتى إن العديد منا، عادةً ما يعمل كاختصاصي في الكيمياء التحليلية عندما يستخدم عبوات اختبار مياه الصنبور وعبوات اختبار ماء حمامات السباحة، وعبوات اختبار الرادون، وعبوات اختبار مياه أحواض الأسماك، وعبوات اختبار التُّربة، واختبار نِسَب الرصاص في موادِّ الدهان, وحتى اختبارات الحمل، واختبارات مرض السكَّري، ومُحللة النفس الشهيرة التي تَقيس نسبة الكحول في نفس السائق. وتَكمن وظيفة كيميائي التحاليل في إيجاد — أو استنباط — الأداة أو الأدوات اللازمة لتحديد كمية المادة المعطاة أو طبيعة مادة غير معروفة.

وتقع الكيمياء التحليلية في نطاق الأعمال البحثية، ومثل محقق يحل الألغاز، يتعيَّن على كيميائي التحاليل أن يتحرك بحذرٍ وبمثابرة أيضًا كي يجدَ الإجابات الصحيحة. وكما أن الشرطيَّ يتعين عليه لدى حدوثِ جريمة أن يُؤمِّن مسرح الجريمة حتى يَحول دون إفساد أي دليل موجود، كذلك يتعين على كيميائي التحاليل أن يتأكد من أن كل المعدات والأدوات الزجاجية التي يستخدمُها نظيفة تمامًا وخالية من أيِّ تلوث. وكما أن مُحقق الشرطة يجمع أتفه الأدلة، يتعامل كيميائيُّ التحاليل في بعض الأحيان بالمثل مع مقادير مثل الميكروجرام (جزء من مليون من الجرام)، والنانوجرام (جزء من مليار من الجرام)، والبيكوجرام (جزء من تريليون من الجرام) كي يحصل على الإجابات. وقد يصل الأمر بكيميائي التحاليل إلى أن يأخذ بعين الاعتبار طفو الهواء؛ لكي يحصل على الوزن الدقيق.

وكما يجب على رجال الشرطة أن يحتفظوا بأسلحتهم ويُقدِّموها في الميعاد في مكان التدريب، هكذا يجب على الكيميائيين التحليليين أن يضمنوا دائمًا أن أدواتهم لا تزال محتفظة بالتدرج وتعمل جيدًا. وفي عمل الشرطة، إذا اعترف أحدهم دون أن تُتَّبع الإجراءات المناسبة التي تنصُّ عليها اللوائح، فإن أكبر الدلائل تُصبح عديمة الجدوى. وعلى نفس المنوال، يجب أن يكون كيميائي التحاليل قادرًا على الدفاع عن النتائج التي يصل إليها عن طريق تسجيل المعالم مثل حدود الثقة ومستويات التشويش الصادرة عن الأدوات والأشكال المهمة.

ويجب أن يكون كيميائيُّ التحاليل ضليعًا دائمًا، فإذا وُجِد خيط من سجادة لن يُساعد على تحديد موقع المجرم في مسرح الجريمة، لكن خيط السجادة مع شعرة الكلب مع بقعة دهان لم يجفَّ بعدُ قد تُكوِّن معًا أدلة مقنعة لهيئة المحلَّفين. ويجب على كيميائي التحاليل في أوقاتٍ عديدة أيضًا أن يُقدِّم مجموعة من الأدلة، أي نتائج تُثبِت أدلته باستخدام طرق بديلة وتَكْرار نفس الإجراءات مرات عديدة لكي يُثبت أن النتائج منطقيةٌ من الناحية الإحصائية.

وفي بعض الأوقات، يجب أن يُعيد الاختصاصي في الكيمياء التحليلية، شأنُه في ذلك شأن البوليس السري الذي يتبع المبادئ العلمية في البحث، هيكلةَ الأحداث، فعندما يحدث انفجار، قد يكون لذلك أسباب عدة، ليست جميعُها شريرة، لكن إذا كان هنالك آثارٌ لموادَّ كيميائية لا تُستخدَم لأي أغراض أخرى غير التفجير، عندئذٍ يكون هذا دليلًا قويًّا على أن التفجير مُتعمَّد. وعندما يُشتبَه في تعاطي المخدرات، يُفحَص الدم، غير أن دليل وجود الهيروين في الدم لا يعتمد على وجود آثار من الهيروين، لكنه يعتمد على وجود نواتجِ أيض الهيروين، أي المورفين، ومع ذلك حتى وجود المورفين لا يشير دائمًا إلى استهلاك الهيروين، فقد وُجد أن بذور نبات الخَشْخاش التي تُستخدَم في المخبوزات تحتوي على نسبة ضئيلة من الأفيون، ويُمكِن أن يُنتج نسبًا ضئيلة من المورفين في البول. والأدوية المصرَّح بها يُمكن أن يقوم الجسم بأيضها إلى موادَّ خاضعةٍ للسيطرة؛ ومِن ثَم يجب أن تُؤكِّد الأدلة الأخرى وجود الأدوية المحظورة أو تدحضه. في الواقع، ثمة تشابهات عديدة بين كيميائي التحاليل المحنَّك والمحقق الجنائي، لدرجةِ أننا سوف نستخدم تحقيقًا افتراضيًّا بواسطة كيميائي تحليليٍّ يعمل في مجال الطبِّ الشرعي؛ كي نُوضح كيف يتحرك هذا المتخصص المحترف.

إن مهمة الكيميائي العامل في مجال الطب الشرعي هي أن يُطبِّق الكيمياء التحليلية على القضايا الهامة للنظام القانوني. عادة ما يعمل الطبيب الشرعي في مختبر حكومي

وقد يتحمَّل مسئولية الذَّهاب بنفسِه إلى مسرح الجريمة، وتجميع الأدلة، وفحص الأدلة والشهادة في المحكمة. ولكي نرى كيف يُمكن أن يعمل كل هذا، دعونا نبدأ بسيناريو لموقع جريمة افتراضي ونتتبَّع سير عمل اختصاصي الكيمياء التحليلية وهو يتحرك.

ولنقل مثلًا إن الشرطة قد استُدِعَيت في إحدى الليالي إلى مبنًى ما بسببِ الصَّرخات العالية الصادرة عن إحدى الشُّقق والتي تبعها غلق الباب بعنف شديد. تصل الشرطة وتجد جثةَ امرأة غارقة في بِركة من القيء. ويذكر الطبيب الشرعيُّ من الفحص المبدئي أنه يبدو أن المرأة ماتت إثر حادثة من جراء إصابتها بصدمة تأقية (فرط شديد في الحساسية)، غير أنه يجب بالطبع أن يُجري تشريحًا للجثة للتأكد.

والصدمة التأقية، التي تكون السبب وراء العديد من حالات الوفاة سنويًّا، هي تفاعل تحسُّسي شديد للغاية حتى إنه يُسبب انقباضًا في الحنجرة لدرجة الاختناق، والمادة التي تُسبب التفاعل التحسسي، التي يُطلَق عليها المسبب للحساسية، قد تكون من مكسرات أو بيض أو سُمِّ نحلة أو العديد من المواد المعروفة. وعادة يُعاني الأكثر عرضة للصدمة التأقية استجابة أولية خفيفة لنفس المسبب للحساسية، ثم تزداد حساسيتهم باطِّراد شديد مع كل تعرُّف للمسبب للحساسية. والذين يعرفون أنهم عرضة لمثل هذه الاستجابات الشديدة يحملون جهاز «إيبيبن»، وهو جهاز صغير يُشبه القلم لحقن جرعة من الأدرينالين تُقاوم الانتفاخ وتنقذ الحياة، ووفقًا للطبيب الشرعي في قصتنا، المرأة التي عُثر عليها في الشقة لديها كل العلامات التي تدل على أنها قد عانت هذا الموت المؤسف لكن الطبيعي، لكن ثمة تقريرًا يُفيد بأنه كانت هناك صيحات عالية وغلقٌ عنيف للباب؛ ومِن ثَم استُدعي فريق كامل من الطب الشرعي.

عادةً يدرس الكيميائي العامل في مجال الطب الشرعي كل الأدلة الممكنة في مسرح الجريمة ويسجلها، لكن في هذه الحالة، يتفحص الكيميائي محتويات الأرفف وخزانة الأدوية ويأخذ أي عينات من فوق الأسطح ليرى ما إذا كان بمقدوره أن يُحدد مصدر المادة المسببة للحساسية، ويقوم بمسح يدِ الضحية ووجهها؛ كي يجمع أي آثار لموادَّ كيميائية، كما يأخذ عينة من دم الضحية ومحتويات المعدة المتوافرة في بركة القيء. ويُلاحِظ الكيميائي أن المأكولات الموجودة على الأرفف منتقاةٌ بعناية بحيث تكون خالية تمامًا من زيت الفول السوداني أو منتجات الفول السوداني؛ ومن ثَم يُشتبَه في أن المرأة تُعاني حساسية من الفول السوداني، المتهَم الأكبر في الصدمات التأقية. ويأخذ الكيميائي عيناتٍ بحذر من كل الأطعمة الموجودة في الثلاجة، وكل الأوعية الموجودة على الأرفف، كما

يفحص حافظة نقود الضحية وجيوبها، لكنه لا يجد شيئًا جديرًا بالاهتمام. ويفتح أيضًا الأدراج في المطبخ وحجرة النوم دون طائل أيضًا. وينظر في خزانة الأدوية ولا يجد إلا بعض الأدوية التي ليس لها وصفات طبية مثل أسبرين ومضاد للحموضة وضمادات. وعندما كف الكيميائي عن العمل وكان يستعد للرحيل، توقف ليُخبر الضابط المسئول أن ثمة حاجةً إلى إجراء المزيد من التحقيقات، فهو يعتقد بِناءً على ما رآه حتى الآن أنها جريمة قتل. عزيزي القارئ، أتعتقد أنت أيضًا ذلك؟

بدأت الشرطة تتصرف بناء على اقتراح الكيميائي، وعاد هو إلى مختبَره لكي يُؤكِّد بعض شكوكه. أولًا، إذا قلنا إن سبب الوفاة هو استجابة حادَّة بسبب الفول السوداني، إذن يجب أن يكون هناك بعضٌ من زيت الفول السوداني أو بقايا للفول السوداني في مكانٍ ما في جسم الضحية. عندئذٍ يأخذ الكيميائي عيناتِه ويَشرع في تحليلها.

وأول مشكلة قد تُواجه اختصاصيَّ الكيمياء التحليلية عمليةُ الفصل، فكما تفصل الشرطة الشهود وتأخذ كلَّ واحد في حُجرة على حِدَةٍ لتستمع إلى شهادته حتى تتجنَّب أيَّ تدخُّلٍ أو تشويشٍ من ذوي النفوذ على غيرهم، كذلك سوف يبذل اختصاصي الكيمياء التحليلية أقصى جهده كي يفصل مكونات الخليط غير المعروف؛ ومن ثَم يُمكن تحليل المواد المفصولة دون تشويش من الأنواع الأخرى. وإذا كانت المواد تُوجَد في مراحل منفصلة، عندئذٍ يُمكن استخدام تقنية مباشرة مثل الترشيح، فعلى سبيل المثال، يُرشح الكيميائي عينات محتويات المعدة، ثم يبرد المرشح كي يتبيَّن إذا كانت موادُّ أخرى ستنفصل.

إذا كان المركب موضع الاهتمام مركبًا عضويًّا، فإنه يُمكن فصلُه عن المركبات غير العضوية المصاحبة له بواسطة طريقة استخلاص مبسطة مثل تلك التي استخدمت لاستخراج حامض الأسيتيل ساليسيك من الأسبرين في تجربة الكيمياء العضوية، لكن نتيجة استخلاص محتويات المعدة والدم ستكون خليطًا من المواد العضوية، وإذا كانت المحاولة التي نود أن نُجريَها هي محاولة فصل مادتَين عضويتَين، إذن الطريقة التي ستجري هذا العمل البارع هي طريقة الكروماتوغرافيا (الاستشراب). والكروماتوغرافيا هي تقنية للفصل يُمرَّر فيها المذيب على خليط ويحمل العديد من المواد المذابة على مسافات مختلفة. وربما يُمكن تشبيه ذلك بعملية فصل الأتربة عن الذهب؛ إذ يغسل الماء الذي يتدفق بلا انقطاع فوق الرمال الجزيئات الأقل كثافة، مُخلفًا وراءه الذهب.

ويُمكن توضيح التقنية التي تقوم عليها الكروماتوغرافيا بطريقة مبسطة باستخدام الأسيتون أو مُزيل طِلاء الأظفار وبعض أوراق الشجر. اقطع ورقَتَي شجرة خضراوَين

أو ثلاثًا، ومزقهما ثم ضعهما في قاع كوب شرب زجاجي. وبعد أن ترتديَ نظارة الأمان الواقية، أضِف نحو ثلاث بوصات من الأسيتون (مُزيل طِلاء الأظفار)، الذي ينبغي أن يُغطي كومة أوراق الشجر. اترك خليط الأوراق هذا لعدة دقائق حتى يتمكَّن الأسيتون من استخراج مركبات من الأوراق.

قصَّ قطعتين من ورق الحمام طويلتَين بما يكفي ليصلا إلى قاع الكوب. لف إحدى طرَفَي الورقتَين حول قلم رصاص وثبِّتها بشريط لاصق، ينبغي أن تكون الورقة الآن أقصر قليلًا من ارتفاع الكوب لكن بالقدر الذي يُسمَح لها أن تلمس السائل.

ضع القلم الرصاص في الكوب، واغمس ورق الحمام في خليط الأسيتون وورق الشجر. وبعد مرور بضع ساعات ينبغي أن يظهر على الأقل شريطان مختلفان من الألوان على الورق؛ إذ ينتقل الأسيتون إلى أعلى الورق بفعل الخاصية الشعرية، وينقل معه صبغة ورق الشجر، لكن انتقال صِبغة ورق الشجر بهذه السهولة مع المذيب يتوقَّف على نوع الصبغة؛ ومِن ثَم عندما يكون هناك أكثرُ من صبغة واحدة في الورقة، فإنها تنفصل إلى مجموعات. انتظر دقيقةً ثم انظر إلى لونِ المجموعات، ينبغي أن يكون لون إحداها أخضر، لكن المجموعة أو المجموعات الأخرى يكون لونها الأصفر أو البرتقالي أو الأحمر. ويُقال في موسم الخريف إن الأوراق تغير لونها، لكن حقيقة الأمر، هذه الألوان التي يبدو أن الورق قد غيرها موجودة بالفعل في الورقة من البداية، لكن ما يَحدث هو أن الكلوروفيل هو الذي يُفقَد في موسم الخريف، وباختفاء الكلوروفيل وبقاء الصبغات الأخرى تظهر الألوان الأخرى.

والتجرِبة التي استخدمنا فيها الأسيتون وورق الحمام وورق الشجر هي مثال على «كروماتوغرافيا المحلول»، لكن ثمة كروماتوغرافيات أخرى تعمل وَفقًا لنفس المبدأ، فالموادُّ المختلفة يُمكنها أن تنفصل عندما تنتقل مع مُذيباتها عبر سطح ماص. وفي حالة كروماتوغرافيا الغازات يكون المذيب غازًا، ويتخلل الغاز عمود من الجسيمات الصلبة. والمواد التي يلتقطها الغاز تنفصل إلى مجموعات وتذوب المادة، ويُعاد امتصاصها، وتذوب مرة أخرى في الغاز. وأيون الكروماتوغرافيا الذي يستخدم الماء كمذيب، يُمكنه أن يُستخدَم في فصل الأملاح غير العضوية. وتستخدم الكروماتوغرافيا السائلة العالية الأداء (HPLC) الضغط العالي كي تَدفع عيِّنات السائل خلال عمود كثيف السمك؛ ومن ثَم تحقيق درجة عالية من الفصل.

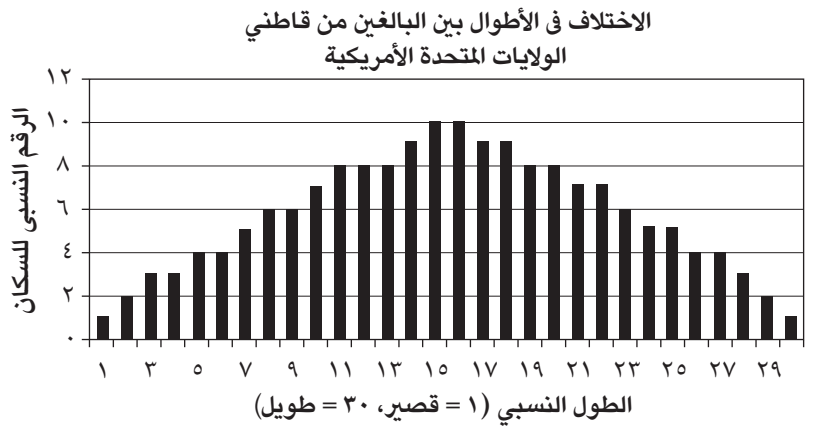
وما إن يفصل كيميائي الطب الشرعي كل المواد العضوية من الأقطان التي استخدمها في مسح الجثة وغيرها، قد تكون الخطوة التالية التي سيُقدِم عليها هي التركيز. ويتعين

التغلب على مشكلة التركيز إذا كانت المادة التي ستخضع للتحليل موجودة بكميات قليلة. فمع أن الطرق التحليلية في تقدُّم مستمر طوال الوقت، وتزداد حساسية الأجهزة باطِّراد مستمر، فإنه لا يزال هناك حدٌّ أدنى، ولا يُمكن لأجهزة معيَّنة أن تكتشف المادة إذا كانت كميتها أقلَّ من هذا الحد الأدنى. فعلى سبيل المثال، قد يصعب كشف الكميات الصغيرة من السموم في الدم. فأجسامنا بطبيعتها تركز السموم في الكبد، وقد يستفيد المحلل من هذه الحقيقة إذا كان الكبد متاحًا، أما إذا لم يكن متاحًا، فقد يحدث التركيز عن طريق التبخير أو الترسيب أو الطَّرد المركزي — وهي الطريقة التي تُدار فيها العينات في أنابيبِ الاختبار بمعدلات سرعة عالية حتى تترسَّب المكونات الأكثر ثقلًا في القاع.

وثَمة إجراءٌ مختلف يُطبَّق على العينات الضئيلة من الدي إن إيه، إذ تُستخدَم تقنية تُعرَف باسم «تفاعل البوليميراز المتسلسل» PCR، حيث لا يُركَّز الدي إن إيه بل يُضاعَف، ويُستخدَم تفاعل البوليميراز المتسلسل الآلية الكيميائية للجسم نفسه التي تُجنى من الخلايا وتُحضر إلى أنبوبة الاختبار لعمل نسخ من الدي إن إيه حتى تصل التركيزات إلى مستوى ارتفاع يسمح بتحليلها.

ولأن المادة التي يجري تحليلها، بقايا الفول السوداني، التي يسعى الكيميائي وراءها هي مادة عُضوية، فإن طريقة التحليل المفضَّلة هنا للكيميائي هي على الأرجح «كروماتوغرافيا الغاز مع التحليل الطيفي للكتلة» GCMS، وتتضمَّن آلية عمل هذه الطريقة، فصل المادة إلى مكوناتها باستخدام الكروماتوغرافيا بما قد بيَّناه سابقًا. ففي حين يتدفَّق الغاز الناقل الذي يُقابله الأسيتون في تَجربة صبغة أوراق الشجر، فوق العينة التي لدينا، عندئذٍ تنفصل مكونات الخليط إلى مجموعات تتحرَّك أسفلَ الأنبوبة مع حُزمة من المادة المتصَّة تُسمَّى «العمود». ويكمن التحدِّي في تحليلها في الطرَف الآخر من العمود بأقصى سرعة ممكنة وهي تخرج من العمود. ويُمكن إتمام التحليل بواسطة عدة طرق، من أشهرها «التحليل الطيفي للكتلة».

والتحليل الطيفي هو الاسم العامُّ الذي يُطلَق على أية تقنية يكون الطيف هو إحدى نتائجها النهائية، والطيف رسم بياني ذو متغيرَين، أحدهما هو الكيف الذي يجري تتبُّعه، وثانيهما هو كَميته. فعلى سبيل المثال، يُمثل الناسُ في الولايات المتحدة طيفًا واسعًا من حيث الطول، فتتدرَّج أطوالهم من القصير جدًّا إلى الطويل جدًّا. وإن كان علينا أن نفترض مثلًا خريطة لعدد الناس في مقابل الطول النسبي، فقد يكون لدينا تحليل طيفي مثل ذلك الموضح في شكل ٤-١.

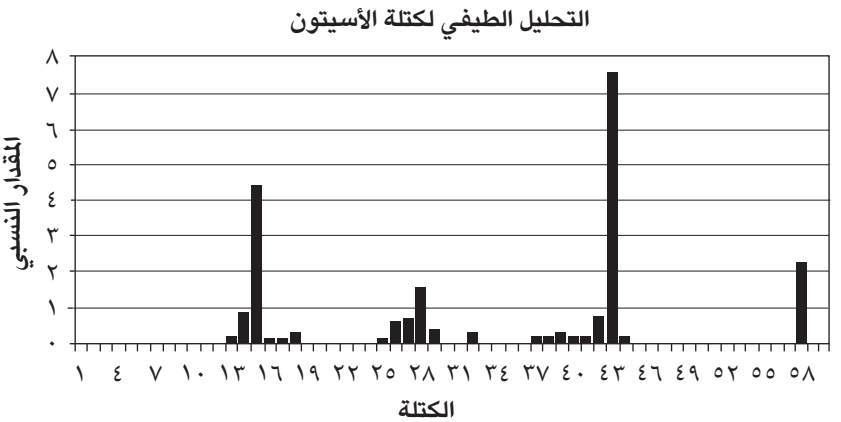



شكل ٤-١: تحليل طيفي افتراضي لأطوال الناس في الولايات المتحدة الأمريكية.

وفي التحليل الطيفي للكتلة، تُفرز الكتلة شظايا من الجزيئات، كما هو موضح في شكل ٤-٢.

وتُعَد الكتلة خاصية مُحدِّدة للهوية جيدة جدًّا، فإذا كان لديك شيءٌ مستدير يَزِن عشَرة أرطال (خمسة كيلوجرامات)، وشيء آخر يزن أوقية واحدة (٢٨ جرامًا)، فإنك ستكون قادرًا على الفور أن تُميز الكرة الحديدية عن كرة التنس، لكن الموقف ليس بهذه السهولة للتحليل الطيفي للكتلة، فلكي تُفصل الجزيئات بِناءً على الكتلة، يجب أن تُحولها أولًا إلى أيونات، والطريقة التي يُمكن بها تحويل الجزيئات إلى أيونات هي تحطيمها، وهي الطريقة التي تصطدم فيها الجزيئات بمصدر من الإلكترونات بمجرد خروجها من عمود الكروماتوغرافيا، ونرى هنا مرة أخرى قوة الإلكترونات، وقد ذكرنا من قبل أن الإلكترونات بالنسبة للجزيئات مثل البُرْغوث بالنسبة إلى الفيل، لكن تخيَّل لو أن سِربًا ضخمًا قويًّا من هذه البراغيث هاجم الفيل! كذلك، قد تكون الإلكترونات صغيرة للغاية، لكنها تمتلك القوة التي تُساعد على حدوث الكيمياء.

وشظايا الجزيئات عامَّة تفقد إلكترونات؛ ومِن ثَم تتمتع بشحنة صافية، وتمامًا كما رأينا في الكهرباء المغناطيسية التي حصلنا عليها من توصيل سلك بمسمار وبطارية، يتفاعل المجال الكهربائي الخاص بالشحنة المتنقلة مع المجال المغناطيسي، وقد صُنِعت




شكل ٤-٢: التحليل الطيفي لكتلة الأسيتون؛ إذ يُفتت تيار من الإلكترونات جزيئات الأسيتون، وتُقاس كمية كل قطعة وكتلتها النسبية، وبواسطة هذه المعلومات، إلى جانب مقارنة نموذج القطعة بالنماذج المعروفة، يُمكن تحديد هوية الجزيء.

الشظايا كي تنتقل في مسارٍ مُنحنٍ عن طريق المجال المغناطيسي، بالإضافة إلى أن الكتلة والشحنة الموجودة على الشظية يُحددان نصف قطر المنحنى، ومن ثم تُرتب الشظايا بالكتلة.

ولكي نُفسر ذلك التحليل الطيفي يجب أن ندمج القليل من العمل البوليسي البارع كما هو الحال في نواحي الكيمياء التحليلية كافَّة، وسيبحث اختصاصي الكيمياء التحليلية عن أضخم الشظايا، أو الشظية الرئيسية؛ لأن هذه الشظية هي الأقرب للكتلة الأصلية، فربما لا تكون ناقصة سوى ذرة أو اثنتَين من ذرات الهيدروجين، ولا تكون الشظية الرئيسية بالضرورة هي الأكثر وَفْرة لكنها تتمتع بالكتلة الأكبر، ويعتمد نموذج التكسير، أو الطريقة التي يكسر بها تيَّار الإلكترونات الجزيئات، على الهشاشة النِّسبية للروابط الأحادية. ولهذا، يأخذ الكيميائي في اعتباره نموذج الشظايا؛ لأن هذا النوع نفسَه من الجزيء يميل للانكسار بنفس الطريقة تحت الظروف نفسها، وتُحفظ مصادر النماذج المفتتة على الحاسبات الآلية ويُمكِن مقارنتها بالنماذج غير المعروفة، وفي هذه الحالة،

تكون الشظية الرئيسية ذات القيمة الأعلى للكتلة هي الذِّروة؛ إذ تصل كتلتها نحو ثمانية وخمسين. والصيغة الكيميائية للأسيتون: $C_2H_6CO$. وبالاستعانة بالملحق، يُمكننا أن نستدل على أن كتلة جزيء الأسيتون: ٥٨؛ إذ يتكون من ذرتَي كربون تبلغ وحدة كتلتها الذرية ١٢٫٠١ بالإضافة إلى ستِّ ذرات هيدروجين تبلغ كتلة وحدتها الذرية ١ وذرة كربون أخرى وحدة كتلتها الذرية ١٢٫٠١ وذرة أوكسجين تبلغ وحدة كتلتها الذرية ١٦؛ ومن ثَم يكون لدينا دليلٌ كافٍ على أن المركب الذي بين أيدينا هو الأسيتون، غير أننا نحتاج إلى دليل يدعم هذا الكلام للتأكد، فمركب مثل $C_3H_8N$ كتلته الذرية هي ثمانية وخمسون أيضًا.

وبنهاية هذا الاختبار يأمُل الكيميائي أن المعدل كان جيدًا وأن التفسير كان دقيقًا — أو أن هناك عينة كافية لمحاولة أخرى — لأن هذه التقنية تعد تقنية مدمرة، وذلك لأن العينة قد نَفِدَت الآن ولا يُمكن استعادتها، ولحسن الحظ، ثمة طرقٌ أخرى متعلقة بالمنظار وغير مُدمِّرة، وإحداها هو التحليل الطيفي للضوء.

لقد شاهدنا عندما عرَضنا مادة التبييض للضوء الأسود أن الأنواع المختلفة من الضوء تتفاعل مع المادة بطرق مختلفة، وأن نوع الضوء الذي تتفاعل معه المادة يُمكن أن يكون إحدى خواصِّ المادة. ويُستغَل هذا التفاعل الحادث بين الضوء والمادة عن طريق التحليل الطيفي للضوء، فعينةٌ من المادة تتعرض لشعاع ضوئي انفصل إلى مكوناته بنفس الطريقة التي يفصل بها المنشور الضوء إلى ألوان، ويُسمَح لحُزمة معينة من الضوء أن تنفذ من خلال العينة، ثم يُكشَف عن كمية الضوء التي تنجح في النفاذ من العينة من الجانب الآخر وتُسجَّل. ثم يُسلَّط تردُّد جديد من الضوء على العينة، وعندئذٍ يُسجَّل مرة أخرى مقدار الضوء الذي نفذ من العينة وهلم جرًّا. وحتمًا إذا جرت العملية بالتدريج والبطء الممل كما أشرنا، فإن التحليل الطيفي للضوء سيكون تقنية شاقة للغاية وقد كان بالفعل كذلك في وقتٍ ما، غير أن تحسيناتٍ عديدةً أُدخِلَت عليه فيما بعد حتى أصبح الآن تقنيةً سريعة ودقيقة للغاية.

وتتضمَّن أنواع التحليل الطيفي للضوء، التي تُستخدَم على نطاق واسع، التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية، والتحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء، والتحليل الطيفي للموجات الميكروئية الذي يكون أقلَّ شيوعًا في مختبرات الطب الشرعي. وغالبًا يُستخدَم التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسَجية في تحليل المركبات غير العضوية، في حين أن التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء يُستخدَم غالبًا في تحليل المركبات

العضوية. وفي الواقع، تُرجع بعض المصطلحات المستخدمة للإشارة إلى التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء ذاكرتنا مرة أخرى إلى طبيبنا الشرعي، فالمنطقة التي أظهر فيها مطياف الامتصاص الخواص التي تميز بشدَّة المركب الذي يخضع للتحليل تُسمَّى منطقة «بصمة الإصبع»، وهو مفهوم ينبغي أن يتشجَّع به طبيبنا الشرعي!

غير أن التحليل الطيفي للضوء، شأنه شأن التحليل الطيفي للكتلة، لا يطبع اسم المركَّب على قُصاصةٍ من الورق ويُسلمها لك، فالطريقة التي يتفاعل بها الجزيء مع الضوء سوف تعتمد على طبيعة كلِّ أنواعه وترتيبها؛ ومِن ثَم تُعَد الاستجابة للضوء متنوعةً ومعقَّدة، ويُمكن أن يلجأ اختصاصيُّ الكيمياء التحليلية مرة أخرى إلى مجموعة البيانات، لكن إن لم يكن الفصل نقيًّا تمامًا، ويُصاحبه بعض الملوثات أو التشويش أو الشظايا، فعندئذٍ سيكون هناك الكثيرُ من العمل البوليسي لنقوم به.

عادةً تكون المركَّبات غير العضوية أقلَّ حساسية عن المركَّبات العضوية (فعلى سبيل المثال لا تحترق الأملاح مثلما يحترق الإيثانول)، وعامةً يسهل تحليله باستخدام التقنيات التي لا تُسبب الأضرار، فعلى سبيل المثال، يُجرى التحليل التقليدي لأيون غير عضوي لكي يُرى ما الذي يجعله يترسَّب، فأيونات الكربونات الموجودة في بيكربونات الصودا تُكوِّن راسبًا مع أيونات النحاس، ولا تُكوِّن أيونات الكبريتات والنيترات السائلة راسبًا، ولعل مطياف الامتصاص الذري (ويشار إليه في المختبر بـ AA) هو تقنية أكثر حساسية ودقة لتحليل المركبات غير العضوية في أيدي الخبراء التحليليين المهرة، غير أنه تقنية مدمِّرة، وفي مطياف الامتصاص الذري يُفصَل المحلول الذي يحوي المادة المراد تحليلها إلى ذرات، بمعنى أن السائل يحول إلى قطرات صغيرة أو رذاذ، تمامًا كما في البخاخة المستخدمة مع زجاجات العطور أو زجاجات منظفات النوافذ، وبمجرد جعل المحلول في صورة رذاذ، فإن المحلول المراد تحليله يُرَش في صورة لهب غاز الأسيتيلين المُعالَج بعناية؛ ومن ثَم يتمتَّع بدرجة الحرارة المناسبة.

ويجب أن تُوضَع العينة في الموضع المناسب في اللهب، ويتمتَّع اللهب نفسه بكيمياء مذهِلة تتمثل في أن بعض المناطق في اللهب نفسه تكون أكثرَ سخونة من غيرها، وبعض المناطق تُساعد على حدوث تفاعلات أكسدة، والبعض الآخر تفاعلات اختزال. وبالطبع، يُوجَد هناك أكثرُ أوجه كيمياء اللهب تشويقًا، المتمثلة في اللهب الذي ينتج حرارةً وضوءًا معًا. ويعتمد لون اللهب على المادة الموضوعة في اللهب، مثلما تعتمد ألوان الألعاب النارية على المادة الموجودة في المدفع، وفي أحد الأوضاع، يستفيد جهاز مطياف الامتصاص الذري

من هذه الحقيقة كي يُحلل المادة التي فُصِلَت ذراتها في اللهب، فالكاشف الضوئي الموجود بالقرب من اللهب يُسجِّل الألوان المختلفة لألسِنة اللهب وكثافتها، التي تُعَد متناسبة مع كمية كلِّ مادة موجودة في اللهب.

وفي وضع آخر، يستخدم جهاز مطياف الامتصاص الذري بعض الظواهر الفيزيائية الأخرى المعروفة والمستخدمة، مثل حقيقة أن الموادَّ تميل إلى امتصاص تردد الضوء نفسِه الذي ينبعث منها، فمثلًا النظارات التي تكون عدساتها ذات لون وردي تجعل لون الأشياء من حولنا كافةً أقربَ إلى اللون الوردي؛ لأن المواد المصنوع منها العدسات صُمِّمَت لكي تمتصَّ كل الألوان عدا اللون الوردي، ويُمكن تحديد المواد عن طريق الألوان التي تمتصها. وفي جهاز مطياف الامتصاص الذري أيضًا، يُوجَّه ضوء المصباح المصمم كي يبعث خطًّا رفيعًا جدًّا من الألوان نحو العينة الموجودة في اللهب. ويُصمَّم المصباح بحيث تكون مادة التحليل هي أيضًا المادة التي تُنتج ضوء المصباح، أو بكلمات أخرى، إذا أراد المحلل أن يُحلل الصوديوم، فعندئذٍ يُستخدَم مصباح يحتوي على صوديوم، وفي هذه الحالة يبعث المصباح ضوءًا مُميزًا للصوديوم، وإذا كان يُوجَد أي صوديوم في العينة، فإنه يمتص الضوء، ويبين الكاشف أن ثمة بعضَ الضوء المفقود.

والطرق التي يستخدمها طبيبنا الشرعي الشجاع هي تقنيات التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء وللكتلة، وبنهاية الجهود التي بذلها، وجَد بالفعل آثارًا لزيت الفول السوداني في فم الضحية؛ ومِن ثَم فالأسئلة التي تطرح نفسها هي: من أين جاء هذا الزيت؟ وإلى أين ذهب؟ يُحلِّل بطلُنا عينات الطعام والدواء التي أخذها من الشقة لكنه لا يجد شيئًا، ويُلاحظ أن المريضة قد قرأت البطاقات حتمًا بعناية شديدة كي تتجنَّب حتى المنتجات التي يبدو أنها غير مضرة مثل بعض أنواع الآيس كريم والسلع المخبوزة وصوص السلطة والحساء التي من الممكن أن تحتوي على زيت الفول السوداني، ولم تكشف المعدة أو الدم عن وجود أية سموم أخرى، مع أن هناك دليلًا على حدوث استجابة تحسسية حادة، ويظل يُفكر مليًّا بعناية بالغة، ويُجدول النتائج التي توصَّل إليها وإذا بالهاتف يرن؛ إنها الشرطة تتصل به كي تُخبره بأنه كان محقًّا؛ فقد وجدوا ما أخبرهم أن يبحثوا عنه، ألا وهو جهاز إيبيبن غيرُ مستعمَل — وهي حقنة مليئة بدواء منقِذ — مُلقاة في وعاءِ قُمامة خلف البناية التي تعيش فيها، مع زوج من القفازات الجراحية.

ما الذي جال بخاطر الكيميائي وجعله يخبر رجال الشرطة أن يبحثوا عن جهاز إيبيبن خارج الشقة؟ عندما بحث هو في الأرفف وفي خزانة الأدوية وبجانب الضحية لم

يجد جهاز إيبيبن، لقد علم أن الضحية كان حريصة للغاية بشأن اختيار مأكولات خالية من المادة المسببة للحساسية (زيت الفول السوداني)؛ ومِن ثَم كانت الضحية على دراية بالحساسية المصابة بها، وأي شخص كان على علم بأنها مصابة بمثل هذا النوع من الحساسية الخطيرة، يعلم حتمًا أنها ينبغي أن تكون محتفظة بجهاز إيبيبن في متناولها أو في مكان يسهل الوصول إليه، وهي قد مُنعت من الوصول إليه. ويعلم طبيبنا الآن أنه سوف يجد على سطح القفاز زيت الفول السوداني، وقدرًا لا بأس به من بصمات الأصابع داخل القفاز.

ومن ثَم قد تكون مهنة اختصاصي الكيمياء التحليلية معقدة وصعبة ومرهقة ودقيقة، غير أنها لا تزال تُستخدَم على نطاق أوسع من نطاق الجرائم. ومع أن بعض الناس قد يكون لديهم حساسيةٌ لبعض النباتات، وبعض النباتات قد تكون سامَّة لكل الناس، فإن التفاعلات بين النباتات والحيوانات لا تكون دائمًا متضادة؛ إذ تكون النباتات في بعض الأحيان مفيدةً للغاية، في حقيقة الأمر، عندما يتعلق الأمر بالنباتات والحيوانات، فإنَّ لهما مستقبلًا معًا، مستقبل الكيمياء.

# تجربة للمستقبل: كيمياء خزانة الأدوية

لإجراء تَجرِبتنا الأخيرة، اذهب إلى خزانة الأدوية وخذ مُشابهًا صناعيًّا لخلاصة لحاء نبات الصَّفصاف المعالَج لتخفيف التأثير الحامضي، أو بكلمات أخرى: خذ أسبرينًا.

ما علاقة الأسبرين بمستقبل الكيمياء؟ واصِل القراءة.

الفصل الخامس

# هاري، وهوجوارتس، ودستور الأدوية العامة؛ غموض في الماضي وسحر في المستقبل

أنت هنا كي تتقن العلم البارع والفن الدقيق لصناعة الأدوية ... ولأن هناك عصًا سحرية خرقاء تلوح، سيصعب على الكثيرين منكم تصديق أن هذا سحر ... جمال الغلاية التي تتصاعد أدخنتها اللامعة، والقوى الدقيقة للسوائل التي

تزحف عبر أوردة البشر ساحرة أذهانهم، وملهبة مشاعرهم ... بمقدوري أن أعلمك كيف تُعبئ الشهرة في زجاجات، وتطهو المجد، وتُوقف زحف الموت ...

صاح سناب فجأة قائلًا: «بوتر، ما الذي يُمكن أن أحصل عليه إذا أضفت جذورًا مطحونة من نبات البروق إلى منقوع الشيح؟»

جيه كيه رولنج في
«هاري بوتر وحجر الساحر»، ١٩٩٧

هل تظن أن العلوم كانت لتنشأ وتصبح رائعة لو لم يكن هناك سحرة وخيميائيون ومُنجِّمون ومشعوذون الذين كانوا متعطشين لقوى محظورة؟

فريدريش فيلهلم نيتشه، ١٨٩٠

هناك عشرات الملايين من المركبات الكيميائية المعروفة، ويُجمَع المزيد كلَّ يوم، وفعليًّا عددُ مجموعات العناصر التي ستُكتشف في المستقبل عددٌ لا نهائي، وهكذا يستمرُّ الجدول الدوري في التوسُّع، وقد أصبحنا تقريبًا ماهِرين في مهنتنا. ومثلما يكونُ الأطفال في متجر الحلوى حيث يُوجَد الكثير من الحلوى، لكنهم لا يعرفون من أين يبدَءُون، هكذا الحال معنا؛ إذ لا يكون السؤال هو هل هناك المزيدُ من الكيمياء لتُكتشَف، لكن السؤال هو أين ينبغي أن نُركز أولًا. ومع كل المشكلات التي تُواجه بقاء الجنس البشري، فلا يُمكننا أن نضع مليونَ كيميائي في مليون مختبر، ونأمُلَ أن نجد الحلول لهذه المشكلات، ولنأخذ على سبيل المثال مشكلة اكتشاف الأدوية، فكيف يُمكِننا أن نُقرر أي مركَّب من عشرات ملايين المركبات غير التقليدية الموجودة لدينا سوف نُجربه كعلاج للأمراض؟ لقد حدث في الماضي بعضُ الصُّدف السعيدة، لكن لا يُمكِننا أن نعتمد على الحظ.

وهناك اختياران في عملية التصنيع الرشيد للأدوية؛ أوَّلهما: أنه يُمكِننا أن نُجرِيَ اختباراتٍ متنوعةً على المركبات التي نجح استخدامها في الماضي وهذا النهج مقبول ومعقول وغالبًا ما ينجح؛ فعندما يتغيَّر نوع معيَّن من البكتيريا يُطوِّر سُلالة مُحصنة ضدَّ أدويتنا، عندئذٍ يُمكِنُنا أن نأخذ الدواء الذي كان يعمل من قبل ونُضيف مجموعةً جديدة من الذرات، أو نُغير رابطة لنرى هل بمقدورنا أن نجعله فعالًا مرة أخرى، وقد أنتج هذا النهج، الذي يُسمَّى «النهج التوفيقي»، مركباتٍ نافعةً عديدة، غير أن هذا النهج قد شُبِّه أيضًا بشجرةٍ ذات جذور عدة، فهي يُمكنها أن تختبر أنواعًا عدة من التربة، لكن أنواع

التربة التي تقع على مقربة منها فحسب، فإذا كان هناك دواء جديد ذو تركيب جديد تمامًا، فمن أين للنهج التوافقي أن يكتشفه؛ فهو ينحصر في مجموعة معينة من المركبات!

أما عن النهج الآخر الذي كان ناجحًا في الماضي، سواءٌ أكان عن قصد أم لا، فهو تُرك ملايين السنين من التفاعلات بين الإنسان والنبات تُؤدي دور ملايين الاختبارات والأبحاث، فالأسبرين اكْتُشِفَ عندما قرَّر أحدُهم أن يرى هل يُوجَد شيءٌ متعلِّق بالدواء الشعبي القديم المتمثِّل في مضغ لحاء الصفصاف بُغية تخفيف الألم، وشرب شاي لحاء الصَّفصاف لتقليل الحُمَّى.[1] واكْتُشف الكينين عندما قَدِم راهبٌ يئس من سيدة من إحدى الطبقات النبيلة كانت تحتضر إحدى مستخلصات لحاء اقترحه عليه السكان الأصليون لدولة بيرو.[2] وأُجْرِيَ حاليًّا أبحاثٌ جادة ومكثَّفة لدراسة العلاج الشعبي ولا سيَّما ذلك المُستمَد من النباتات.

ويُعزَى نجاح جيه كيه رولينج مؤلفة سلسلة هاري بوتر الشهيرة، بلا أدنى ريب، إلى شخصياتها الفاتنة، وقصصها التي تأسر الألباب وحواراتها الجريئة ومشاهدها الخلابة،[3] لكنَّ ثَمَّة عنصرًا آخر أيضًا وهو الإشارة للسحر وللأعشاب السحرية والأحجار والفُطْريات الرنَّانة بالإضافة إلى الذاكرة الثقافية، فقد وجَدنا الأمر غايةً في اليُسر بأن نعتقد في السحر؛ لأن أجدادنا اختبَروا الأشياء التي يبدو أنها سِحر. والعديد من الأعشاب السحرية التي ذُكرت في سلسلة هاري بوتر، مثل الشيح، نبات الأفسنتين wormwood، الذي سُمِّي هكذا بسبب قدرته على إزالة ديدان الأمعاء، له هذه الفاعلية في الواقع.[4] تخيل أنك تُقاسي من ديدان الأمعاء، وأنك ستجد مستحضرًا من الشيح يُخلصك من هذه الطُّفيليات، وتخيَّل أيضًا أنك ابتُليتَ بتضخُّم في الغدة الدرقية ثم وجدت علاجًا في طُحْلب بحريٍّ محروق يحتوي على اليود، وتخيل أنك مُصاب بداء الإسقربوط، وهو نقص فيتامين ج، ووجدت وصفة طبية في عصير الليمون، وهذه هي كل أنواع العلاجات الحقيقية التي استخدمَت في الماضي وكانت بمنزلة السحر للمريض.

ألقِ نظرةً أخرى على خِزانة الأدوية الخاصة بك لترى منتجات أخرى مصنوعة من النبات في الأصل، مثل الأدوية المثبِّطة لمستقبلات البيتا، وأدوية تنظيم النسل، والمسكنات، والمليِّنات، والمطهرات، والصابون ... من ثم المرة القادمة التي تتناول فيها الأدوية المهمة اذهب للخارج، واحضن شجرة كي تُعبر لها عن امتنانك.

ويُطلَق على دراسة كيمياء النباتات مصطلح «الكيمياء النباتية أو كيمياء العقاقير»، وحقيقة أن أدوية فعالة عديدة وُجِدت في المواد الطبيعية التي تُنتجها النباتات (يُقال إنها

قد تصل إلى ثلث الأدوية المصنَّعة حاليًّا) تُثير التساؤل: لماذا؟ لماذا يُفترَض أن النباتات تُنتج موادَّ تتفاعل مع الإنسان؟ ولماذا تجعلنا بعض المواد التي تُنتجها نباتات معينة في صحة جيدة، وبعضها يجعلنا سعداء، وأخرى تجعلنا ننام، والبعض منها يُميتنا؟

بالطبع من الممكن أن يكون هذا مجرد صدفة، فكلُّنا وُجِدنا في الكوكب نفسِه — الإنسان والنبات — ومن ثَم ينبغي أن تكون كيمياؤنا متشابهة، ومن المرجح جدًّا أن الأدوية التي هي في أصلها نباتاتٌ متوافقة تمامًا مع أنظمتنا؛ لأننا نتشارك في الحيز الكيميائي نفسِه (الكوكب)، ولكن هناك أيضًا علاقة نفعيَّة بين النبات والحيوان، فكلاهما على القدر نفسِه من الأهمية، تستهلك النباتات ثانيَ أكسيد الكربون وتُنتج الأوكسجين، والحيوان يستهلك الأوكسجين وثانيَ أكسيد الكربون. ويُلقِّح النحلُ الزهور، وتُغذِّي الزهورُ النحل. ونجد أن أكثر القطط المتوحشة وآكلة اللحوم تأكل الأعشاب من وقتٍ لآخرَ لِتَحصل على الألياف التي تحتاجها. وتنمو مبايِضُ بعض النباتات إلى فاكهة، وعليه تأكل الحيوانات البذور وتنقلها بعيدًا؛ ومن ثم يجري تجنُّب المنافسة مع النبات الأم على الموارد.

وتُعَد بعض المواد الكيميائية التي تنتجها النباتات مفيدة لنا؛ وذلك لأنَّ النباتات تحمي نفسها من نفس الأشياء التي نحمي أنفسنا منها، مثل البكتيريا والفيروسات والفطريات، لكن النباتات يُمكِنها أن تقوم بدور أكثرَ من مجرد المطهرات، ففي هاري بوتر، كانت إحدى الشخصيات التي تُدعى سناب يُوبِّخ بوتر، وكان هاري بحاجة إلى أن يعرف عشبه، نبات البروق، الذي يُستخدَم لصنع منوِّم قوي للغاية حتى إنه يُعرَف بـ «إكسير الحياة».[5] وهذا أمر حقيقي،[6] فقد حُذِّرَ هاري من أن نبات خانق الذئب، ونبات أصفر الزهر هما سُمَّان قويَّان جدًّا،[7] وهما كذلك بالفعل،[8] ويُوجه سناب هاري إلى أن يكتب اسم «أكونيت أو نبات خانق الذئب السام» — ونبذة تاريخية تخبرنا بأن الأكونيت والبلادونا (حشيشة ست الحسن) كانا في وقتٍ ما يُستخدَمان معًا لعمل عقار للهلوسة الخاصة بالطيران.[9]

لماذا تُنتج النباتات موادَّ كيميائية تتمتع بهذه الخصائص المميزة؟ هل النباتات يُصيبها آلامٌ في الرأس؟ هل لديها اضطراباتٌ في النوم؟ لماذا تُكوِّن النباتات موادَّ كيميائية بها نسبة من المسكنات أو المهدئات أو تكون ذات خصائص سيكلوجية المفعول؟

مرة أخرى نقول إن الأمر قد يكون مجرد صدفة؛ فالنباتات تُنتج موادَّ كيميائية لقتل الحيوانات الضارية، لكن السم الذي قد يقتل حشرة، قد يُسبب مجرد اهتياج للإنسان فحسب، بل قد يعمل كمُهدِّئ له، فغالبًا ما يكون الفرق بين المهدئ والسم هو فرق

في الجرعة فحَسْب، فابتلاع السموم دون المستويات المميتة من أجل الحصول على اللذَّة أصبحت معروفة باسم «نشوة التسمم»، إشارةً إلى أصلها السُّمِّي.

ومن ناحية أخرى، قد تُكوِّن النباتات بعضَ المسكنات والمهدئات؛ لأن هذا يُفيد النبات نفسه، فإذا كان الحيوان الضاري يأكل النبات بغرض الأكل، فقد لا يكون هناك مُنبِّهات تجعل الحيوانَ يُوقِف نفسَه عن أكل البراعم أو الزهرة كلها، أما إذا كان يأكل بغرض الفائدة الحسية، فإن الحيوان قد يأكل فقط ما يكفي لإشباعه ثم يتوقَّف؛ إذ يُخدر الحيوان. ما الفائدة التي تعود على النبات إذن؟ لعلها التَّخصيب؛ فعلى الأرجح، يتبرَّز الحيوان الذي هدَّأه النبات على مَقرُبة من النبات بدلًا من التجوُّل بعيدًا بالعناصر الغذائية للنبات الضحية. أو هناك فائدةٌ أخرى قد تعود على النبات وهي التقليم، فالنباتات العُشبية يُمكِنها أن تتكاثر عن طريق قطع أوراقها وبذورها، فإزالةُ أطراف هذه الأنواع من النباتات يسمح للنبات أن يُوجِّه كلَّ طاقاته نحو الأجزاء الباقية، عندئذٍ يكون التشذيب علاجًا ذاتيًّا، ونفس المادة الكيميائية التي تكون مهدئًا للحيوان، تكون سامَّة لبعض الحشرات مما قد يحدُّ من تكاثر الحشرات أيضًا.

وأيًّا كانت الضغوط النابعة من التطور، فإن النباتات تُكوِّن مركبات تؤثر علينا مثل القهوة والشاي والتبغ وعرق السوس والكودين والكوكايين والأفيون، وكل هذه جميعها في الأساس هي أدوية عشبية. وتُعَد النباتات أيضًا مصادرَ للمُطهِّرات، والمسكنات، والمضادات الحيوية، والأدوية الطاردة للديدان، والمهدئات، والمنبهات، والمجهضات، والسموم، والملينات، والأدوية المدرَّة للبول، ومضادات الإسهال، وأيضًا الأدوية الترويحية الفعالة، وكما يقول معلم هاري بوتر إنها الشهرة المكتومة، والمجد المختمِر، وحتى الموت المختوم.

وعلم العقاقير هو الدراسة التي تدور حول اكتشاف الأدوية المنتجة طبيعيًّا وتطويرها، وهو يتضمَّن في نطاقه البحث في الادِّعاءات الخاصة بالسلالات النباتية — أو بكلمات أخرى «الطِّب الشعبي» — وتنظر هذه الأبحاث في مُمارسات الثقافات الحديثة، مثل قاطِني الغابات المطيرة، كما يُنعِمون النظر أيضًا في الممارسين البارزين مثل ناسكو ومُتسوِّلي القرون الوسطى في أوروبا، والزوجات المتقدِّمات في السنِّ والعرَّافين والساحرات.

وثمَّة إدراك جديد مفاده أن الناس الذين اضطُهِدوا بوصفهم سَحرةً ومُشعوِذين في العصور الوسطى في أوروبا، كانوا في حقيقة الأمر مجردَ قابِلات ومُعالِجين، وبعضٌ

مِن علاجاتهم المزعوم أنها سحرية هي أدوية ذاتُ كفاءة وفاعلية معترَف بها؛ فقد كانوا يَنصحون الشخص الذي يُعاني ألم الأسنان باستعمال زيت القرنفل المسكن للألم، وقشر البيض الجيري لاضطرابات المعدة؛ لأنه مصدر لكربونات الكالسيوم المكون الأساسي لمضادات الحموضة المستخدمة اليوم.

لكن ليست كل الممارسات الطبية التي كان يُمارسها القدماء ذات فائدة؛ فهم لم يتبعوا الإجراءات العلمية السليمة المتعارف عليها مثل الاحتفاظ بسجلات المحاولات الناجحة لاتباعها والخاطئة لتجنُّبها، ولم يُميزوا بدقةٍ أيضًا السبب والنتيجة، وكانت تشتهر فلسفاتهم الطبية بأنها تتضمن علاج السلاح الذي سبب الجرح بدلًا من علاج الجرح نفسه، وكانوا يستخدمون أدوية ذات تأثيرات تُشبِه تأثيرات المرض المقصود علاجه، ولعل أصل الاعتقاد بأنك سوف تُشفى إذا أخذت شعرة من الكلب الذي عضَّك. وقد جلب العربُ الكثيرَ من المعرفة الطبية العملية، وكذلك المعرفة الخاصة بالرومانيين واليونانيين القدامى إلى أوروبا الغربية في أواخر العصور الوسطى، فبدأ المعالجون الأوروبيون في محاكاة الكلام العربي في محاولة لتحسين مجهوداتهم، ومن ثم كلمة «سحرية» مثل ألاكازام alakazam، وأبراكادبرا abracadabra. وتلتقط جيه كيه رولينج في هاري بوتر الفكرة عندما تجعل العرَّافين الصِّبية يُنشِدون تعويذاتهم السحرية بجمل سحريَّة بارعة أشبهَ باللغة اللاتينية.[10]

غير أن المعالجين القدامى كانوا يعرفون جيدًا ماذا يفعلون، لكنهم لا يُريدون أن يعرف أحدٌ غيرهم ما يَعرفون، ولقد كان للأوروبِّيين الذين عاشوا في القرون الوسطى السبقُ بعدة سنوات في عملِ براءة اختراعٍ للأدوية، فكان على المعالجين الناجحين أن يَصونوا أسرارَهم إذا أرادوا أن يُحافظوا على مهنتهم، فكثيرٌ من الأدوية التي استخدموها كان يُمكِن إدراكها بسهولة مثل الأعشاب العطرية (البهارات)؛ ومِن ثَم كانوا يُخْفون المكون الفعال الأساسي في طبخةٍ دوائية مَذاقها ورائحتها كريهان، وكانوا يَعملون ستائرَ دُخانية لطقوسٍ مُتقَنة؛ ومِن ثَم لم يَكُن تناول الدواء إلا مجرد خطوة مِن بين خطوات عديدة مؤثِّرة، ولم يكن الأمر مجرد صدفة حينما كان هاري بوتر المبتدئ يتطلَّع بلهفةٍ إلى عصاه السحرية.[11] مما هو معروف أن مُمارسين آخَرين للسحر كانوا يستخدمون عصًا، ويُلوحون بها حول المريض، فيُركز المريض نظره على العصا ولا يلحظ ما كانوا يُضيفونه خُفْية للمزيج، ولعل شعوذة «الهوكس بوكس» hocus-pocus كانت بمنزلة ضمان للممارسات السيئة البُدائية، فإذا لم يكن العلاج فعالًا، فإن السحرة يدَّعون أن

تعليماتهم لم تُتَّبَع، أو أن هذا النوع بعينه من الأعشاب ينبغي أن يُقطَف في منتصف الليل عند اكتمال القمر.

وإذا كان هناك الكثير من الهراء، فكيف نُميز عندئذٍ الأعشابَ المفيدة مما لا فائدة له؟ وهل نستطيع أن نفعل هذا؟ وهل هناك درجةٌ حقيقية في فحص التقاليد الطبية القديمة؟ نعم، فثمة دراسة لطرق استخدام الأدوية الآن — وطرق استخدامها في الماضي — تُخبرنا عن أكثرَ من مجرَّد طحن النباتات وتمريرها في مطياف ضخم، ومن الضروري أن نعرف الطريقة التي تُعَد بها الأعشاب لدى تقييم مدى كفاءتها، فالإعدادُ المناسب قد يكون ضروريًّا لإطلاق المادة الفعالة، ومن الضروري أيضًا أن نَعرف طريقة تقديم العشب، ففي كثير من الأوقات لا بد أن تكون العقاقير خليطًا تآزريًّا، بمعنى أنها لا تعمل إلا عند مَزجِها مع عقاقير أخرى، وهو التأثير الذي لا يُمكِن تمييزه أو إدراكه عند اختبار هذه العقاقير بمعزِل عن العقاقير الأخرى. وتُعَد إمكانية حدوث أية تفاعلات السبب في ضرورة استشارة الطبيب لدى مزج العقاقير، حتى في حال التحضيرات العشبية، ففي بعض الأحيان يُمكن أن تحدث تفاعلات عكسية، فعلى سبيل المثال، يُمكن أن يتحوَّل التخلص المذهل من آلام الطفيليات المعوية بسبب تناول الشيح إلى كارثة، بل قد تُفضي إلى الموت؛ فالشيح يُستخدَم مع بعض الأعشاب الأخرى في عمل الأفسنت، وهو مُسكِر معطِّر إدماني يُعرَف أنه يُسبب العمى وتلَف الأعصاب والاضطرابَ العقلي لمُدمِنيه.[12] وتقدم الأبحاث التي تُجرى بالطرق التقليدية التي كانت تُستخدَم فيها الأعشاب معلومات، قد تُغفَل في نواحٍ أخرى.

وبالإضافة إلى دراسة دستور الأدوية الشعبية، يبحث علم العقاقير عن أدوية جديدة في الموارد الطبيعية أيضًا، وثمة مُبشرات لإيجاد موادَّ كيميائية مثيرة عديدة، فهناك أشجارٌ تعيش آلاف السنين، فما الذي تعرفه هذه الأشجار ولا نعرفه نحن؟ وعندما يتعلَّق الأمر بنموٍّ أفرُع الأشجار، فالأشجارُ تعرف كل شيء أكثر منا! فعند تَعرُّض النباتات للآفات الحشرية، وُجِد أن النباتات تبثُّ إشاراتٍ كيميائيةً لجذب حشرات أخرى تتغذى على هذه الآفات الضارة، وقد اتضح حديثًا أن بعض النباتات التي تتعرض للهجوم يُمكنها أن تُرسِل إشارات تحذيرية لنباتات أخرى كي تسلح نفسها من الخطر الوشيك الحدوث.[13] وقد يُوجَد مثل هذه المركبات الكيميائية في النباتات التي لا تظهر إلَّا في جزء من اليوم، مثل ذلك الوقت الذي يكون فيه النبات في حالة تهديد، أو تحت ظروف مُناخية معيَّنة. كأن تكون في منتصف الليل وعند اكتمال القمر؟!

ولا شك في أنَّ هناك أيضًا موادَّ أخرى ذات فائدة في أماكنَ أخرى في الطبيعة، مثل المحيطات، والأغطية الجليدية القطبية، والبراكين، وربما حتى في كواكِبَ أخرى وأقمار، وقبل أن نَستفيد من هذه الموارد، ثم كمًّا كبيرًا من المشكلات التي تحتاج إلى إيجاد حلول لها، بيد أنَّ هناك احتمالًا لحدوث الوفرة الكيميائية إذا قُمنا بحلِّ هذه المشكلات. أين نُكثِّف جهودنا؟ قد تجد الإجابة في كلمات العالم المبجَّل مؤلف الكتب العلمية إيزاك أزيموف حينما قال: «إن أكثر العبارات التي يُمكِن أن تسمعها في العلم إثارة ... ليست «وجدتها»، ولكن «هذا ممتع» ...»

إننا سوف نجد الوجهة التي نقصدها عندما نحصل على اكتشاف ما، عندما يلتقط أحدهم حصاة ويلحظ نمطًا جديدًا، أو يجد حشرة جديدة أو معدنًا غريبًا، إنها تحتاج إلى شخص يتمتع ببعض الفضول والرغبة في المعرفة، شخص يستمتع بالتاريخ والموسيقى والفنون، وربما بعض كتب الكيمياء الغريبة.

# خاتمة

أنا أحتفي بنفسي وأُشيد بها، وما أفترضه أنا تفترضونه أنتم؛ لأنَّ كل ذرة تخصني تخصُّكم أنتم أيضًا.

والت ويتمان في «أوراق العشب»، ١٨٥٥

إذا أثار موجز علم الكيمياء المختصر هذا كل قرائنا، فحتمًا سينهضون معًا نهضة امرئ واحد ويهتاجون كالعاصفة بحثًا عن مزيد من الاستنارة، صارخين: لا شيء يُمكنه أن يبهجنا أكثر من هذا، فهذا الكمُّ من المعلومات هائل جدًّا.

لقد ذهبنا في رحلة رائعة، وفحصنا تركيب الجسيمات الدقيقة للمادة وسلوكها، وشاهدنا كيف أن خواصَّها البالِغةَ الصِّغرِ تتكاثر كي تكون العالم من حولنا، ودرسنا الكيمياء القديمة وشرحنا هذه التفاعلات الحية باستخدام موادَّ عادية، ورأينا كيف أن الكيمياء ترتبط بخبرات الحياة اليومية، وطورنا فهمًا بديهيًّا لأساسيات الكيمياء عن طريق الأمثلة والتشبيهات، ورأينا كيف أن المبادئ والنظريات المستمدة من الماضي قد انهالت علينا بوابلٍ من ثروات التكنولوجيا والمواد، وقد رأينا التحديات الموضوعة أمامنا. وفي هذه الألفية الجديدة، سيكون هناك أدويةٌ جديدة ومداخلُ ابتكارية للشفاء، وسيكون هناك كَبارٍ قابلةٌ للثَّني دون أن تنكسر حينما تهتز الأرض، وسيكون هناك مصادرُ جديدة للوقود غزيرة غزارةَ ضوء الشمس وطعامٌ كافٍ لإطعام العالم المتضوِّر جوعًا، وسيكون هناك أيضًا فَهمٌ جديد لكل العلوم، وسوف نتعلم كيفية حماية هذا الكوكب والحياة بأشكالها كافة.

لكن من أين نبدأ؟ ومن الذي يُحدِّد أين نستخدم مواردنا؟ وإذا وجدنا شكلًا جديدًا للحياة في المحيط يُمكنه أن يُنتج دواءً فعالًا جديدًا، فإذن سيخص مَن هذا الدواء؟ ولمن سيُسمَح بالحصول على فوائده، وتطويره، وضمان الحفاظ عليه؟ الإجابة هي الناس، كل الناس، فكيمياء المستقبل سوف تعتمد على أكثرَ من مجرد كيميائي؛ إنها سوف تتطلب تضافر الجهود الدولية التي تستقطب مواهب الفلاسفة، والباحثين، وعلماء البيئة، وأخصائيِّي علم الأخلاق والاقتصاد والإحصاء، ورجال القانون ومُنفِّذيه، وعلماء النبات والبكتيريا والأعشاب، والمؤرخين من كتاب وجمهور، وعلماء التكنولوجيا العاملين في المعامل والمختبَرات وفي مجال الكهرباء والحاسب الآلي، وكل أولئك المستعِدِّين لصُنع قرارات مستنيرة ومُطَّلعة.

فلا يَزال هناك الكثيرُ من العمل الذي يحتاج إلى إنجازه والكثير من الأسباب لإتمامه، فالعمل بعيدٌ كلَّ البعد عن بلوغ نهايته، وليس للمتعة منتهًى أبدًا.

# الملحق

## ترتيب العناصر وَفق أسمائها ورموزها وأعدادها الذرية

ترتيب العناصر وَفْق أسمائها.

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ac | Actinium | الأكتينيوم | ٨٩ | (٢٢٧) |
| Al | Aluminum | الألنيوم | ١٣ | ٢٦,٩٨ |
| Am | Americium | الأميريسيوم | ٩٥ | (٢٤٣) |
| Sb | Antimony | الأنتيمون | ٥١ | ١٢١,٧٦ |
| Ar | Argon | الأرجون | ١٨ | ٣٩,٩٥ |
| As | Arsenic | الزرنيخ | ٣٣ | ٧٤,٩٢ |
| At | Astatine | الأستاتين | ٨٥ | (٢١٠) |
| Ba | Barium | الباريوم | ٥٦ | ١٣٧,٣٣ |
| Bk | Berkelium | البركيليوم | ٩٧ | (٢٤٧) |
| Be | Beryllium | البريليوم | ٤ | ٩,٠١ |
| Bi | Bismuth | البزموث | ٨٣ | ٢٠٨,٩٨ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Bh | Bohrium | البوريوم | ١٠٧ | (٢٦٤) |
| B | Boron | البورون | ٥ | ١٠,٨١ |
| Br | Bromine | البرومين | ٣٥ | ٧٩,٩٠ |
| Cd | Cadmium | الكادميوم | ٤٨ | ١١٢,٤١ |
| Ca | Calcium | الكالسيوم | ٢٠ | ٤٠,٠٨ |
| Cf | Californium | الكاليفورنيوم | ٩٨ | (٢٥١) |
| C | Carbon | الكربون | ٦ | ١٢,٠١ |
| Ce | Cerium | السيريوم | ٥٨ | ١٤٠,١٢ |
| Cs | Cesium | السيزيوم | ٥٥ | ١٣٢,٩١ |
| Cl | Chlorine | الكلور | ١٧ | ٣٥,٤٥ |
| Cr | Chromium | الكروم | ٢٤ | ٥٢ |
| Co | Cobalt | الكوبلت | ٢٧ | ٥٨,٩٣ |
| Cu | Copper | النحاس | ٢٩ | ٦٣,٥٥ |
| Cm | Curium | الكوريوم | ٩٦ | (٢٤٧) |
| Db | Dubnium | الدوبنيوم | ١٠٥ | (٢٦٢) |
| Dy | Dysprosium | الديسبروسيوم | ٦٦ | ١٦٢,٥٠ |
| Es | Einsteinium | الأينشتاينيوم | ٩٩ | (٢٥٢) |
| Er | Erbium | الإربيوم | ٦٨ | ١٦٧,٢٦ |
| Eu | Europium | اليوروبيوم | ٦٣ | ١٥١,٩٦ |
| Fm | Fermium | الفيرميوم | ١٠٠ | (٢٥٧) |
| F | Fluorine | الفلور | ٩ | ١٩ |
| Fr | Francium | الفرانسيوم | ٨٧ | (٢٢٣) |
| Gd | Gadolinium | الجادولينيوم | ٦٤ | ١٥٧,٢٥ |
| Ga | Gallium | الجاليوم | ٣١ | ٦٩,٧٢ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ge | Germanium | الجرمانيوم | ٣٢ | ٧٢,٦٤ |
| Au | Gold | الذهب | ٧٩ | ١٩٦,٩٧ |
| Hf | Hafnium | الهافنيوم | ٧٢ | ١٧٨,٤٩ |
| Hs | Hassium | الهاسيوم | ١٠٨ | (٢٦٩) |
| He | Helium | الهيليوم | ٢ | ٤ |
| Ho | Holmium | الهولميوم | ٦٧ | ١٦٤,٩٣ |
| H | Hydrogen | الهيدروجين | ١ | ١,٠١ |
| In | Indium | الإنديوم | ٤٩ | ١١٤,٨٢ |
| I | Iodine | اليود | ٥٣ | ١٢٦,٩٠ |
| Ir | Iridium | الإريديوم | ٧٧ | ١٩٢,٢٢ |
| Fe | Iron | الحديد | ٢٦ | ٥٥,٨٥ |
| Kr | Krypton | الكريبتون | ٣٦ | ٨٣,٨٠ |
| La | Lanthanum | اللانثانم | ٥٧ | ١٣٨,٩١ |
| Lr | Lawrencium | اللورنسيوم | ١٠٣ | (٢٦٢) |
| Pb | Lead | الرصاص | ٨٢ | ٢٠٧,٢٠ |
| Li | Lithium | الليثيوم | ٣ | ٦,٩٤ |
| Lu | Lutetium | اللوتيشيوم | ٧١ | ١٧٤,٩٧ |
| Mg | Magnesium | الماغنسيوم | ١٢ | ٢٤,٣١ |
| Mn | Manganese | المنجنيز | ٢٥ | ٥٤,٩٤ |
| Mt | Meitnerium | المايتنريوم | ١٠٩ | (٢٦٨) |
| Md | Mendelevium | المنديليفيوم | ١٠١ | (٢٥٨) |
| Hg | Mercury | الزئبق | ٨٠ | ٢٠٠,٥٩ |
| Mo | Molybdenum | المولبيدنوم | ٤٢ | ٩٥,٩٤ |
| Nd | Neodymium | النيوديميوم | ٦٠ | ١٤٤,٢٤ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ne | Neon | النيون | ١٠ | ٢٠,١٢ |
| Np | Neptunium | النبتونيوم | ٩٣ | ٢٣٧,٠٥ |
| Ni | Nickel | النيكل | ٢٨ | ٥٨,٦٩ |
| Nb | Niobium | النيوبيوم | ٤١ | ٩٢,٩١ |
| N | Nitrogen | النتيروجين | ٧ | ١٤,٠١ |
| No | Nobelium | النوبليوم | ١٠٢ | (٢٥٩) |
| Os | Osmium | الأوزميوم | ٧٦ | ١٩٠,٢٣ |
| O | Oxygen | الأوكسجين | ٨ | ١٦ |
| Pd | Palladium | البالاديوم | ٤٦ | ١٠٦,٤٢ |
| P | Phosphorus | الفوسفور | ١٥ | ٣٠,٩٧ |
| Pt | Platinum | البلاتين | ٧٨ | ١٩٥,٠٨ |
| Pu | Plutonium | البلوتونيوم | ٩٤ | (٢٤٤) |
| Po | Polonium | البلونيوم | ٨٤ | (٢٠٩) |
| K | Potassium | البوتاسيوم | ١٩ | ٣٩,١٠ |
| Pr | Praseodymium | البراسيوديميوم | ٥٩ | ١٤٠,٩١ |
| Pm | Promethium | البروميثيوم | ٦١ | (١٤٥) |
| Pa | Protactinium | البروتكتينيوم | ٩١ | ٢٣١,٠٤ |
| Ra | Radium | الراديوم | ٨٨ | (٢٢٦) |
| Rn | Radon | الرادون | ٨٦ | (٢٢٢) |
| Re | Rhenium | الرينيوم | ٧٥ | ١٨٦,٢١ |
| Rh | Rhodium | الروديوم | ٤٥ | ١٠٢,٩١ |
| Rb | Rubidium | الروبيديوم | ٣٧ | ٨٥,٤٧ |
| Ru | Ruthenium | الروثنيوم | ٤٤ | ١٠١,٠٧ |
| Rf | Rutherfordium | الرذرفورديوم | ١٠٤ | (٢٦١) |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Sm | Samarium | الساماريوم | ٦٢ | ١٥٠,٣٦ |
| Sc | Scandium | السكانديوم | ٢١ | ٤٤,٩٦ |
| Sg | Seaborgium | السيبورجيوم | ١٠٦ | (٢٦٦) |
| Se | Selenium | السيلينيوم | ٣٤ | ٧٨,٩٦ |
| Si | Silicon | السيليكون | ١٤ | ٢٨,٠٩ |
| Ag | Silver | الفضة | ٤٧ | ١٠٧,٨٧ |
| Na | Sodium | الصوديوم | ١١ | ٢٢,٩٩ |
| Sr | Strontium | السترونشيوم | ٣٨ | ٨٧,٦٢ |
| S | Sulfur | الكبريت | ١٦ | ٣٢,٠٧ |
| Ta | Tantalum | التانتالوم | ٧٣ | ١٨٠,٩٥ |
| Tc | Technetium | التكنيشيوم | ٤٣ | (٩٨) |
| Te | Tellurium | التيلوريوم | ٥٢ | ١٢٧,٦٠ |
| Tb | Terbium | التربيوم | ٦٥ | ١٥٨,٩٣ |
| Tl | Thallium | الثاليوم | ٨١ | ٢٠٤,٣٨ |
| Th | Thorium | الثوريوم | ٩٠ | ٢٣٢,٠٤ |
| Tm | Thulium | الثوليوم | ٦٩ | ١٦٨,٩٣ |
| Sn | Tin | القصدير | ٥٠ | ١١٨,٧١ |
| Ti | Titanium | التيتانيوم | ٢٢ | ٤٧,٨٧ |
| W | Tungsten | التنجستين | ٧٤ | ١٨٣,٨٤ |
| U | Uranium | اليورانيوم | ٩٢ | ٢٣٨,٠٣ |
| V | Vanadium | الفاناديوم | ٢٣ | ٥٠,٩٤ |
| Xe | Xenon | الزينون | ٥٤ | ١٣١,٢٩ |
| Yb | Ytterbium | الإيتربيوم | ٧٠ | ١٧٣,٠٤ |
| Y | Yttrium | الإتريوم | ٣٩ | ٨٨,٩١ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Zn | Zinc | الخارصين | ٣٠ | ٦٥,٣٩ |
| Zr | Zirconium | الزركونيوم | ٤٠ | ٩١,٢٢ |

* يُمكن تقديرُ الكُتَل بوَحْدة كتلٍ ذرية لكل ذرة (انظر الفصل الثاني) أو بالجرامات لكل مول (انظر الفصل التاسع). الأعداد المُدرجة بين قوسَين تقريبيَّة؛ لأن هذه العناصر مُخلَّقة صناعيًّا. وهي ليست موجودة طبيعيًّا بوفرة يُعتمَد عليها كأساس لمتوسط الكتلة. ترتيب العناصر وفق رموزها.

ترتيب العناصر وَفْق رموزها.

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ac | Actinium | الأكتينيوم | ٨٩ | (٢٢٧) |
| Ag | Silver | الفضة | ٤٧ | ١٠٧,٨٧ |
| Al | Aluminum | الألنيوم | ١٣ | ٢٦,٩٨ |
| Am | Americium | الأميريسيوم | ٩٥ | (٢٤٣) |
| Ar | Argon | الأرجون | ١٨ | ٣٩,٩٥ |
| As | Arsenic | الزرنيخ | ٣٣ | ٧٤,٩٢ |
| At | Astatine | الأستاتين | ٨٥ | (٢١٠) |
| Au | Gold | الذهب | ٧٩ | ١٩٦,٩٧ |
| B | Boron | البورون | ٥ | ١٠,٨١ |
| Ba | Barium | الباريوم | ٥٦ | ١٣٧,٣٣ |
| Be | Beryllium | البريليوم | ٤ | ٩,٠١ |
| Bh | Bohrium | البوريوم | ١٠٧ | (٢٦٤) |
| Bi | Bismuth | البزموث | ٨٣ | ٢٠٨,٩٨ |
| Bk | Berkelium | البركيليوم | ٩٧ | (٢٤٧) |
| Br | Bromine | البروم | ٣٥ | ٧٩,٩٠ |
| C | Carbon | الكربون | ٦ | ١٢,٠١ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ca | Calcium | الكالسيوم | ٢٠ | ٤٠,٠٨ |
| Cd | Cadmium | الكادميوم | ٤٨ | ١١٢,٤١ |
| Ce | Cerium | السيريوم | ٥٨ | ١٤٠,١٢ |
| Cf | Californium | الكاليفورنيوم | ٩٨ | (٢٥١) |
| Cl | Chlorine | الكلور | ١٧ | ٣٥,٤٥ |
| Cm | Curium | الكوريوم | ٩٦ | (٢٤٧) |
| Co | Cobalt | الكوبلت | ٢٧ | ٥٨,٩٣ |
| Cr | Chromium | الكروم | ٢٤ | ٥٢ |
| Cs | Cesium | السيزيوم | ٥٥ | ١٣٢,٩١ |
| Cu | Copper | النحاس | ٢٩ | ٦٣,٥٥ |
| Db | Dubnium | الدوبنيوم | ١٠٥ | (٢٦٢) |
| Dy | Dysprosium | الديسبروسيوم | ٦٦ | ١٦٢,٥٠ |
| Er | Erbium | الإربيوم | ٦٨ | ١٦٧,٢٦ |
| Es | Einsteinium | الأينشتاينيوم | ٩٩ | (٢٥٢) |
| Eu | Europium | اليوروبيوم | ٦٣ | ١٥١,٩٦ |
| F | Fluorine | الفلور | ٩ | ١٩ |
| Fe | Iron | الحديد | ٢٦ | ٥٥,٨٥ |
| Fm | Fermium | الفيرميوم | ١٠٠ | (٢٥٧) |
| Fr | Francium | الفرانسيوم | ٨٧ | (٢٢٣) |
| Ga | Gallium | الجاليوم | ٣١ | ٦٩,٧٢ |
| Gd | Gadolinium | الجادولينيوم | ٦٤ | ١٥٧,٢٥ |
| Ge | Germanium | الجرمانيوم | ٣٢ | ٧٢,٦٤ |
| H | Hydrogen | الهيدروجين | ١ | ١,٠١ |
| He | Helium | الهيليوم | ٢ | ٤ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Hf | Hafnium | الهافنيوم | ٧٢ | ١٧٨,٤٩ |
| Hg | Mercury | الزئبق | ٨٠ | ٢٠٠,٥٩ |
| Ho | Holmium | الهولميوم | ٦٧ | ١٦٤,٩٣ |
| Hs | Hassium | الهاسيوم | ١٠٨ | (٢٦٩) |
| I | Iodine | اليود | ٥٣ | ١٢٦,٩٠ |
| In | Indium | الإنديوم | ٤٩ | ١١٤,٨٢ |
| Ir | Iridium | الإريديوم | ٧٧ | ١٩٢,٢٢ |
| K | Potassium | البوتاسيوم | ١٩ | ٣٩,١٠ |
| Kr | Krypton | الكريبتون | ٣٦ | ٨٣,٨٠ |
| La | Lanthanum | اللانثانوم | ٥٧ | ١٣٨,٩١ |
| Li | Lithium | الليثيوم | ٣ | ٦,٩٤ |
| Lr | Lawrencium | اللورانسيوم | ١٠٣ | (٢٦٢) |
| Lu | Lutetium | اللوتيشيوم | ٧١ | ١٧٤,٩٧ |
| Md | Mendelevium | المنديليفيوم | ١٠١ | (٢٥٨) |
| Mg | Magnesium | الماغنسيوم | ١٢ | ٢٤,٣١ |
| Mn | Manganese | المنجنيز | ٢٥ | ٥٤,٩٤ |
| Mo | Molybdenum | المولبيدنوم | ٤٢ | ٩٥,٩٤ |
| Mt | Meitnerium | المايتنريوم | ١٠٩ | (٢٦٨) |
| N | Nitrogen | النيتروجين | ٧ | ١٤,٠١ |
| Na | Sodium | الصوديوم | ١١ | ٢٢,٩٩ |
| Nb | Niobium | النيوبيوم | ٤١ | ٩٢,٩١ |
| Nd | Neodymium | النيوديميوم | ٦٠ | ١٤٤,٢٤ |
| Ne | Neon | النيون | ١٠ | ٢٠,١٢ |
| Ni | Nickel | النيكل | ٢٨ | ٥٨,٦٩ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| No | Nobelium | النوبليوم | ١٠٢ | (٢٥٩) |
| Np | Neptunium | النبتونيوم | ٩٣ | ٢٣٧,٠٥ |
| O | Oxygen | الأوكسجين | ٨ | ١٦ |
| Os | Osmium | الأوزميوم | ٧٦ | ١٩٠,٢٣ |
| P | Phosphorus | الفوسفور | ١٥ | ٣٠,٩٧ |
| Pa | Protactinium | البروتكتينيوم | ٩١ | ٢٣١,٠٤ |
| Pb | Lead | الرصاص | ٨٢ | ٢٠٧,٢٠ |
| Pd | Palladium | البالاديوم | ٤٦ | ١٠٦,٤٢ |
| Pm | Promethium | البروميثيوم | ٦١ | (١٤٥) |
| Po | Polonium | البولونيوم | ٨٤ | (٢٠٩) |
| Pr | Praseodymium | البراسيوديميوم | ٥٩ | ١٤٠,٩١ |
| Pt | Platinum | البلاتين | ٧٨ | ١٩٥,٠٨ |
| Pu | Plutonium | البلوتنيوم | ٩٤ | (٢٤٤) |
| Ra | Radium | الراديوم | ٨٨ | (٢٢٦) |
| Rb | Rubidium | الرابيديوم | ٣٧ | ٨٥,٤٧ |
| Re | Rhenium | الرينيوم | ٧٥ | ١٨٦,٢١ |
| Rf | Rutherfordium | الرذرفورديوم | ١٠٤ | (٢٦١) |
| Rh | Rhodium | الروديوم | ٤٥ | ١٠٢,٩١ |
| Rn | Radon | الرادون | ٨٦ | (٢٢٢) |
| Ru | Ruthenium | الروثنينوم | ٤٤ | ١٠١,٠٧ |
| S | Sulfur | الكبريت | ١٦ | ٣٢,٠٧ |
| Sb | Antimony | الأنتيمون | ٥١ | ١٢١,٧٦ |
| Sc | Scandium | السكانديوم | ٢١ | ٤٤,٩٦ |
| Se | Selenium | السلينيوم | ٣٤ | ٧٨,٩٦ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Sg | Seaborgium | السيبورجيوم | ١٠٦ | (٢٦٦) |
| Si | Silicon | السيليكون | ١٤ | ٢٨,٠٩ |
| Sm | Samarium | الساماريوم | ٦٢ | ١٥٠,٣٦ |
| Sn | Tin | القصدير | ٥٠ | ١١٨,٧١ |
| Sr | Strontium | السترونشيوم | ٣٨ | ٨٧,٦٢ |
| Ta | Tantalum | التانتالوم | ٧٣ | ١٨٠,٩٥ |
| Tb | Terbium | التربيوم | ٦٥ | ١٥٨,٩٣ |
| Tc | Technetium | التكنيشيوم | ٤٣ | (٩٨) |
| Te | Tellurium | التيلوريوم | ٥٢ | ١٢٧,٦٠ |
| Th | Thorium | الثوريوم | ٩٠ | ٢٣٢,٠٤ |
| Ti | Titanium | التيتانيوم | ٢٢ | ٤٧,٨٧ |
| Tl | Thallium | الثاليوم | ٨١ | ٢٠٤,٣٨ |
| Tm | Thulium | الثوليوم | ٦٩ | ١٦٨,٩٣ |
| U | Uranium | اليورانيوم | ٩٢ | ٢٣٨,٠٣ |
| V | Vanadium | الفاناديوم | ٢٣ | ٥٠,٩٤ |
| W | Tungsten | التنجستين | ٧٤ | ١٨٣,٨٤ |
| Xe | Xenon | الزينون | ٥٤ | ١٣١,٢٩ |
| Y | Yttrium | الإتريوم | ٣٩ | ٨٨,٩١ |
| Yb | Ytterbium | الإيتربيوم | ٧٠ | ١٧٣,٠٤ |
| Zn | Zinc | الخارصين | ٣٠ | ٦٥,٣٩ |
| Zr | Zirconium | الزركونيوم | ٤٠ | ٩١,٢٢ |

* يُمكن تقدير الكتل بوحدة كتل ذرية لكل ذرة (انظر الفصل الثاني) أو بالجرامات لكل مول (انظر الفصل التاسع). الأعداد المُدرجة بين قوسَين تقريبية؛ لأن هذه العناصر مُخلَّقة صناعيًّا. وهي ليست موجودة طبيعيًّا بوفرة يُعتمَد عليها كأساس لمتوسط الكتلة. ترتيب العناصر وفق أعدادها الذرية.

ترتيب العناصر وَفْق أعدادها الذرية. (الجدول الدوري هو أيضًا قائمة من العناصر مرتبة وفق أعدادها الذرية.)

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| H | Hydrogen | الهيدروجين | ١ | ١,٠١ |
| He | Helium | الهيليوم | ٢ | ٤ |
| Li | Lithium | الليثيوم | ٣ | ٦,٩٤ |
| Be | Beryllium | البريليوم | ٤ | ٩,٠١ |
| B | Boron | البورون | ٥ | ١٠,٨١ |
| C | Carbon | الكربون | ٣ | ١٢,٠١ |
| N | Nitrogen | النيتروجين | ٧ | ١٤,٠١ |
| O | Oxygen | الأوكسجين | ٨ | ١٦ |
| F | Fluorine | الفلور | ٩ | ١٩ |
| Ne | Neon | النيون | ١٠ | ٢٠,١٢ |
| Na | Sodium | الصوديوم | ١١ | ٢٢,٩٩ |
| Mg | Magnesium | الماغنسيوم | ١٢ | ٢٤,٣١ |
| Al | Aluminum | الألومنيوم | ١٣ | ٢٦,٩٨ |
| Si | Silicon | السيليكون | ١٤ | ٢٨,٠٩ |
| P | Phosphorus | الفوسفور | ١٥ | ٣٠,٩٧ |
| S | Sulfur | الكبريت | ١٦ | ٣٢,٠٧ |
| Cl | Chlorine | الكلور | ١٧ | ٣٥,٤٥ |
| Ar | Argon | الأرجون | ١٨ | ٣٩,٩٥ |
| K | Potassium | البوتاسيوم | ١٩ | ٣٩,١٠ |
| Ca | Calcium | الكالسيوم | ٢٠ | ٤٠,٠٨ |
| Sc | Scandium | السكانديوم | ٢١ | ٤٤,٩٦ |
| Ti | Titanium | التيتانيوم | ٢٢ | ٤٧,٨٧ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| V | Vanadium | الفاناديوم | ٢٣ | ٥٠,٩٤ |
| Cr | Chromium | الكروم | ٢٤ | ٥٢ |
| Mn | Manganese | المنجنيز | ٢٥ | ٥٤,٩٤ |
| Fe | Iron | الحديد | ٢٦ | ٥٥,٨٥ |
| Co | Cobalt | الكوبلت | ٢٧ | ٥٨,٩٣ |
| Ni | Nickel | النيكل | ٢٨ | ٥٨,٦٩ |
| Cu | Copper | النحاس | ٢٩ | ٦٣,٥٥ |
| Zn | Zinc | الخارصين | ٣٠ | ٦٥,٣٩ |
| Ga | Gallium | الجاليوم | ٣١ | ٦٩,٧٢ |
| Ge | Germanium | الجرمانيوم | ٣٢ | ٧٢,٦٤ |
| As | Arsenic | الزرنيخ | ٣٣ | ٧٤,٩٢ |
| Se | Selenium | السلينيوم | ٣٤ | ٧٨,٩٦ |
| Br | Bromine | البروم | ٣٥ | ٧٩,٩٠ |
| Kr | Krypton | الكريبتون | ٣٦ | ٨٣,٨٠ |
| Rb | Rubidium | الروبيديوم | ٣٧ | ٨٥,٤٧ |
| Sr | Strontium | السترونشيوم | ٣٨ | ٨٧,٦٢ |
| Y | Yttrium | الإتريوم | ٣٩ | ٨٨,٩١ |
| Zr | Zirconium | الزركونيوم | ٤٠ | ٩١,٢٢ |
| Nb | Niobium | النيوبيوم | ٤١ | ٩٢,٩١ |
| Mo | Molybdenum | المولبيدنوم | ٤٢ | ٩٥,٩٤ |
| Tc | Technetium | التكنشيوم | ٤٣ | (٩٨) |
| Ru | Ruthenium | الروثنيوم | ٤٤ | ١٠١,٠٧ |
| Rh | Rhodium | الروديوم | ٤٥ | ١٠٢,٩١ |
| Pd | Palladium | البلاديوم | ٤٦ | ١٠٦,٤٢ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Ag | Silver | الفضة | ٤٧ | ١٠٧,٨٧ |
| Cd | Cadmium | الكادميوم | ٤٨ | ١١٢,٤١ |
| In | Indium | الإنديوم | ٤٩ | ١١٤,٨٢ |
| Sn | Tin | القصدير | ٥٠ | ١١٨,٧١ |
| Sb | Antimony | الأنتيمون | ٥١ | ١٢١,٧٦ |
| Te | Tellurium | التيلوريوم | ٥٢ | ١٢٧,٦٠ |
| I | Iodine | اليود | ٥٣ | ١٢٦,٩٠ |
| Xe | Xenon | الزينون | ٥٤ | ١٣١,٢٩ |
| Cs | Cesium | السيزيوم | ٥٥ | ١٣٢,٩١ |
| Ba | Barium | الباريوم | ٥٦ | ١٣٧,٣٣ |
| La | Lanthanum | اللانثانم | ٥٧ | ١٣٨,٩١ |
| Ce | Cerium | السيريوم | ٥٨ | ١٤٠,١٢ |
| Pr | Praseodymium | البراسيوديميوم | ٥٩ | ١٤٠,٩١ |
| Nd | Neodymium | النيوديميوم | ٦٠ | ١٤٤,٢٤ |
| Pm | Promethium | البروميثيوم | ٦١ | (١٤٥) |
| Sm | Samarium | الساماريوم | ٦٢ | ١٥٠,٣٦ |
| Eu | Europium | اليوروبيوم | ٦٣ | ١٥١,٩٦ |
| Gd | Gadolinium | الجادولينيوم | ٦٤ | ١٥٧,٢٥ |
| Tn | Terbium | التربيوم | ٦٥ | ١٥٨,٩٣ |
| Dy | Dysprosium | الديسبروسيوم | ٦٦ | ١٦٢,٥٠ |
| Ho | Holmium | الهولميوم | ٦٧ | ١٦٤,٩٣ |
| Er | Erbium | الإربيوم | ٦٨ | ١٦٧,٢٦ |
| Tm | Thulium | الثوليوم | ٦٩ | ١٦٨,٩٣ |
| Yb | Ytterbium | الإيتربيوم | ٧٠ | ١٧٣,٠٤ |

| الرمز | الاسم باللغة الإنجليزية | الاسم باللغة العربية | العدد الذري | الكتلة* |
|---|---|---|---|---|
| Lu | Lutetium | اللوتيشيوم | ٧١ | ١٧٤,٩٧ |
| Hf | Hafnium | الهافنيوم | ٧٢ | ١٧٨,٤٩ |
| Ta | Tantalum | التانتالوم | ٧٣ | ١٨٠,٩٥ |
| W | Tungsten | التنجستين | ٧٤ | ١٨٣,٨٤ |
| Re | Rhenium | الرينيوم | ٧٥ | ١٨٦,٢١ |
| Os | Osmium | الأوزميوم | ٧٦ | ١٩٠,٢٣ |
| Ir | Iridium | الإريديوم | ٧٧ | ١٩٢,٢٢ |
| Pt | Platinum | البلاتين | ٧٨ | ١٩٥,٠٨ |
| Au | Gold | الذهب | ٧٩ | ١٩٦,٩٧ |
| Hg | Mercury | الزئبق | ٨٠ | ٢٠٠,٥٩ |
| Tl | Thallium | الثاليوم | ٨١ | ٢٠٤,٣٨ |
| Pb | Lead | الرصاص | ٨٢ | ٢٠٧,٢٠ |
| Bi | Bismuth | البزموث | ٨٣ | ٢٠٨,٩٨ |
| Po | Polonium | البولونيوم | ٨٤ | (٢٠٩) |
| At | Astatine | الأستاتين | ٨٥ | (٢١٠) |
| Rn | Radon | الرادون | ٨٦ | (٢٢٢) |
| Fr | Francium | الفرنسيوم | ٨٧ | (٢٢٣) |
| Ra | Radium | الراديوم | ٨٨ | (٢٢٦) |
| Ac | Actinium | الأكتينيوم | ٨٩ | (٢٢٧) |
| Th | Thorium | الثوريوم | ٩٠ | ٢٣٢,٠٤ |
| Pa | Protactinium | البروتكتينيوم | ٩١ | ٢٣١,٠٤ |
| U | Uranium | اليورانيوم | ٩٢ | ٢٣٨,٠٣ |
| Np | Neptunium | النبتونيوم | ٩٣ | ٢٣٧,٠٥ |
| Pu | Plutonium | البلوتونيوم | ٩٤ | (٢٤٤) |

| الكتلة* | العدد الذري | الاسم باللغة العربية | الاسم باللغة الإنجليزية | الرمز |
|---|---|---|---|---|
| (٢٤٣) | ٩٥ | الأميريسيوم | Americium | Am |
| (٢٤٧) | ٩٦ | الكوريوم | Curium | Cm |
| (٢٤٧) | ٩٧ | البركيليوم | Berkelium | Bk |
| (٢٥١) | ٩٨ | الكاليفورنيوم | Californium | Cf |
| (٢٥٢) | ٩٩ | الأينشتاينيوم | Einsteinium | Es |
| (٢٥٧) | ١٠٠ | الفيرميوم | Fermium | Fm |
| (٢٥٨) | ١٠١ | المنديليفيوم | Mendelevium | Md |
| (٢٥٩) | ١٠٢ | النوبليوم | Nobelium | No |
| (٢٦٢) | ١٠٣ | اللورنسيوم | Lawrencium | Lr |
| (٢٦١) | ١٠٤ | الرذرفورديوم | Rutherfordium | Rf |
| (٢٦٢) | ١٠٥ | الدوبنيوم | Dubnium | Db |
| (٢٦٦) | ١٠٦ | السيبورجيوم | Seaborgium | Sg |
| (٢٦٤) | ١٠٧ | البوريوم | Bohrium | Bh |
| (٢٦٩) | ١٠٨ | الهاسيوم | Hassium | Hs |
| (٢٦٨) | ١٠٩ | المايتنريوم | Meitnerium | Mt |

* يُمكن تقدير الكتل بوحدة كتل ذرية لكل ذرة (انظر الفصل الثاني) أو بالجرامات لكل مول (انظر الفصل التاسع). الأعداد المُدرجة بين قوسَين تقريبية؛ لأن هذه العناصر مُخلَّقة صناعيًّا. وهي ليست موجودة طبيعيًّا بوفرة يُعتمَد عليها كأساس لمتوسط الكتلة.

# حقوق الصور

Original artwork by Linda Muse appears on pages 15, 17, 27, 29, 33, 69, 73, 83, 95, 114, 115, 117, 119, 123, 131, 141, 182, 187, 198, 212, 233, 241, 247, 271, 273, 282, 287, 311, and 315.

# ملاحظات

### لماذا هذا الكتاب؟

(1) Kerry K. Karukstis and Gerald R. Van Hecke, *Chemistry Connections: The Chemical Basis of Everyday Phenomena* (New York: Harcourt/Academic Press, 2000); Joe Schwarcz, *The Genie in the Bottle* (New York: W. H. Freeman, 2001).

### كلمات قليلة وضرورية بشأن الأمان والسلامة

(1) For example, Robert Gardner, *Kitchen Chemistry: Science Experiments To Do at Home* (New York: J. Messner, 1982); Alan Kramer, *How To Make a Chemical Volcano and Other Mysterious Experiments* (New York: F. Watts, 1989); Louis V. Loeschnig, *Simple Chemistry Experiments with Everyday Materials* (New York: Sterling, 1994); Nathan Shalit, *Cup and Saucer Chemistry* (New York: Dover, 1989).

### تَجرِبة تمهيدية: صاروخ الزجاجة والأوبليك

(1) Dr. Seuss, *Bartholomew and the Oobleck* (New York: Random House, 1976).

## مقدمة

(1) “Nobel Lectures, Chemistry 1942–1962,” http://www.nobel.se/chemistry/index.html.

(2) Tore Frängsmyr, ed., *Les Prix Nobel 1995* (Stockholm: Almqvist & Wiksell International, 1995). Also online at http://www.nobel.se/chemistry/index.html.

(3) Georgina Ferry, *Dorothy Hodgkin: A Life* (Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1998), pp. 7–25.

(4) Frängsmyr, *Les Prix Nobel 1996*.

## الباب الأول

## تجربة ١: الساحرة والماء

(1) Paul A. Tipler, *Physics for Scientists and Engineers* (New York: Worth, 1992), pp. 598–600.

## الفصل الأول: الإلكترونات والذرات، أو الفيلة والبراغيث

(1) Lennard Bickel, *The Deadly Element: The Story of Uranium* (New York: Stein and Day, 1979), p. 66.

(2) C. C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography,* 18 vols. (New York: Scribner, 1970–1990), 13: 362–72.

(3) Mary Jo Nye, *Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin* (New York: American Elsevier, 1972), pp. 51–172.

(4) Ruth Lewin Sime, *Journal of Chemical Education* 66 (1989): 373.

(5) Linda Merricks, *The World Made New: Frederick Soddy, Science, Politics, and Environment* (New York: Oxford University Press, 1996), p. 70.

(6) Gillispie, *Dictionary of Scientific* Biography, 17: 143–48.

(7) Many thanks to Jack Goldsmith for making us aware of this analogy.

## الفصل الثاني: تحدث دوريًّا

(1) Mary Elvira Weeks and Henry M. Leichester, *Discovery of the Elements*, 7th ed. (Austin, TX: Journal of Chemical Education, 1968), p. 662.

(2) Ira N. Levine, *Quantum Chemistry,* 3rd ed. (Boston: Allyn and Bacon, 1983), p. 242.

(3) Elaine N. Marieb, *Human Anatomy and Physiology,* 3rd ed. (New York: Benjamin/Cummings, 1991), p. 28.

(4) "Alzheimer's Disease," National Institute of Environmental Health Science (NIEHS), http://www.niehs.nih.gov/external/faq/aluminum.htm.

## الفصل الثالث: الأسباب، والتفاعلات، والأكسدة والاختزال

(1) Norman Mclean, *Young Men and Fire* (Chicago: University of Chicago Press, 1992), pp. 57–130.

## تجربة ٦: الرابطة. الرابطة الكيميائية

(1) Lee R. Summerlin, Christie L. Borgford, and Julie B. Ealy, *Chemical Demonstrations: A Sourcebook for Teachers,* 2 vols. (Washington, DC: American Chemical Society, 1987), 2: 179.

## الفصل العاشر: إنه غاز

(1) J. R. Partington, *A Short History of Chemistry,* 3rd ed. (New York: Macmillan, 1957), p. 46.

(2) Ibid., pp. 72–73.

(3) C. C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography,* 18 vols. (New York: Scribner, 1970–1990), 3: 207–209.

(4) Ibid., 5: 317–26.

(5) Ibid., 13: 374–88.

(6) Keith J. Laidler, *The World of Physical Chemistry* (New York: Oxford University Press, 1995), p. 348.

## تجربة ١١: إنه في الهواء

(1) Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, and George S. Kriz Jr., *Introduction to Organic Laboratory Techniques* (Philadelphia: Saunders, 1976), pp. 125–29.

## الفصل الحادي عشر: عندما تُوضَع الغازات في الأجواء

(1) C. L. Cobb and H. Goldwhite, *Creations of Fire: Chemistry's Lively History from Alchemy to the Atomic Age* (New York: Plenum, 1995), pp. 302–306.

(2) Richard A. Kerr, "Ancient Air Analyzed in Dinosaur-Age Amber," *Science* 238 (November 13, 1987): 890.

## الفصل الثاني عشر: كيمياء البلورات النقية

(1) C. L. Cobb and H. Goldwhite, *Creations of Fire: Chemistry's Lively History from Alchemy to the Atomic Age* (New York: Plenum, 1995), pp. 205–208.

(2) C. L. Cobb, *Magick, Mayhem, and Mavericks: The Spirited History of Physical Chemistry* (Amherst, NY: Prometheus Books, 2002), pp. 10, 250, 252–56, 293, 302, 303, 314, 319, 333, 342, 369, 374, and opening quote; Cobb and Goldwhite, *Creations of Fire,* pp. 310–13, 329, 332, 367, and 401.

## الفصل الرابع عشر: طور جديد تمامًا

(1) C. L. Cobb, *Magick, Mayhem, and Mavericks: The Spirited History of Physical Chemistry* (Amherst, NY: Prometheus Books, 2002), pp. 177–85.

(2) Kerry K. Karukstis and Gerald R. Van Hecke, *Chemistry Connections* (New York: Harcourt, 2000), p. 145.

(3) Ira N. Levine, *Physical Chemistry,* 4th ed. (New York: McGraw–Hill, 1995), p. 458.

(4) Kenneth F. Kiple and Kriemhild Coneè Ornelas, eds., *The Cambridge World History of Food,* 2 vols. (Cambridge: Cambridge University Press, 2000), 1: 693.

(5) Roberta Larson Duyff, *The American Dietetic Association's Complete Food and Nutrition Guide* (Minneapolis: Chronimed, 1996), p. 193.

## الفصل الخامس عشر: الاتزان الكيميائي: الكيمياء الثنائية الاتجاهات

(1) C. C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography,* 18 vols. (New York: Scribner, 1970–1990), 8: 116–19.

## الفصل السادس عشر: الخصائص الترابطية: القوة في الأعداد

(1) C. C. Gillispie, ed., *Dictionary of Scientific Biography,* 18 vols. (New York: Scribner, 1970–1990), 8: 445–47.

## الباب الثاني

## الفصل الأول: عضوية ليس إلا

(1) Dorothy Sayers, *The Documents in the Case* (New York: Avon, 1968), p. 201.

## الفصل الثاني: صخور الكيمياء

(1) Edgar Allan Poe, *Complete Stories and Poems of Edgar Allan Poe* (New York: Doubleday, 1966), p. 486.

(2) David Wilson, *The New Archaeology* (New York: Alfred Knopf, 1975), pp. 88–89.

## الفصل الثالث: الكيان الكيميائي في مقابلة مع كيمياء الجسم

(1) Elaine Marieb, *Human Anatomy and Physiology,* 3rd ed. (Redwood City, CA: Benjamin/Cummings, 1995), p. 881.

(2) Stuart Ira Fox, *Human Physiology* (Chicago: Brown, 1996), pp. 372–73.

## الفصل الخامس: هاري، وهوجوارتس، ودستور الأدوية العامة؛ غموض في الماضي وسحر في المستقبل

(1) C. L. Cobb and H. Goldwhite, *Creations of Fire: Chemistry's Lively History from Alchemy to the Atomic Age* (New York: Plenum, 1995), p. 290.

(2) Ibid., p. 285.

(3) J. K. Rowling, *Harry Potter and the Sorcerer's Stone* (New York: Scholastic, 1997).

(4) Ibid., p. 138; Suzanne E. Weiss, ed., *Foods that Harm, Foods that Heal* (Pleasantville, NY: Readers Digest, 1997), pp. 218, 306.

(5) Rowling, *Harry Potter and the Sorcerer's Stone,* p. 138.

(6) Deni Brown, *Encyclopedia of Herbs and Their Uses* (New York: Dorling Kindersley, 1995), p. 243.

(7) Rowling, *Harry Potter and the Sorcerer's Stone,* p. 81.

(8) Brown, *Encyclopedia of Herbs and Their Uses,* p. 228.

(9) J. Mann, *Murder Magic, and Medicine* (New York: Oxford University Press, 1992), p. 66–95.

(10) Rowling, *Harry Potter and the Sorcerer's Stone,* p. 273.

(11) Ibid., p. 81.

(12) Brown, *Encyclopedia of Herbs and Their Uses,* p. 243.

(13) Joel Achenback, "Plants on the Warpath: The Roots of Combat," *National Geographic* (February 2004).

هنـــداوي