الفصل 1

علم الأحياء

The Science of Biology

مقدمة

أنت على وشك أنْ تبدأ رحلة لاكتشاف طبيعة الحياة. منذ نحو 180 سنة خلت، قام عالِم طبيعة إنجليزي شاب اسمه شارلس داروين برحلة مماثلة على متن السفينة بيجل H.M.S Beagle التي تظهر في الصورة المجاورة نسخة عنها. استمرّت رحلته البحريّة خمس سنوات، ومباشرة أدى ما تعلمه إلى تطوير نظريّة التطور من خلال الانتخاب الطبيعي. وهي نظرية أصبحت لب علوم الحياة. إنّ رحلة داروين البحرية تبدو المكان المناسب لنبدأ فهم علم الأحياء: الدراسة العلمية للمخلوقات الحية، وكيف تطورت. قبل أنْ نبدأ، دعنا نفكر برهة من الوقت في ماهية علم الأحياء، ولماذا هو مهم؟

موجز المفاهيم

1-1 علم الحياة

- *علم الأحياء يوحّد الكثير من العلوم الطبيعية.*
- *الحياة تتحدى التعريفات البسيطة.*
- *تبدي الأنظمة الحية تنظيمًا تراتبيًا.*

2-1 طبيعة العلم

- *الكثيرُ من العلم وصفيٌّ.*
- *يستخدم العلمُ التعليلَ الاستنتاجيَّ والاستقرائيَّ.*
- *العلم الذي تدفعه الفرضيات يصمم التكهنات ويختبرها.*
- *الاختزاليّة تفكك نظامًا أكبر إلى أجزائه المكونة له.*
- *يبني العلماء نماذج لتفسير الأنظمة الحيّة.*
- *طبيعة النظريات العلمية.*
- *البحث العلمي قد يكون أساسيًا بحتًا أو تطبيقيًا.*

3-1 مثال على الاستقصاء العلمي: داروين والتّطوّر

- *فكرة التطوّر كانت موجودة قبل داروين.*
- *لاحظ داروين الفرق في المخلوقات المتقاربة.*
- *اقترح داروين الانتخاب الطبيعي بوصفه آلية للتّطوّر.*
- *اختبار تكهنات الانتخاب الطبيعي.*

4-1 المغزى الموحِّد في علم الأحياء

- *تصف نظرية الخليّة تنظيم الأنظمة الحية.*
- *الأساس الجزيئي للوراثة يفسّر استمرارية الحياة.*
- *العلاقة بين التركيب والوظيفة تشكّل أساس الأنظمة الحية.*
- *تنوع الحياة ظهر عن طريق التغير التّطوّري.*
- *المحافظة (الثبات) التطوّرية تفسر وحدة المخلوقات الحيّة.*
- *الخلايا أنظمة لمعالجة المعلومات.*
- *الخلايا الطارئة (البارزة) تنشأ من تنظيم الحياة.*

1-1 علم الحياة

إنّ الحقبة الراهنة هي الأكثر إثارة لدراسة علم الأحياء في تاريخ هذا الحقل؛ فكمية البيانات المتوافرة عن العالم الطبيعي تزايدت بشكل هائل في خلال الخمس والعشرين سنة الأخيرة، حيث نستطيع الآن أنْ نسأل ونجيب عن أسئلة لم نكن لِنحلمَ بها في السابق.

لقد استطعنا أنْ نحدِّد كامل تتابع المحتوى الجيني للإنسان، ونحن في الطريق إلى تحليل تتابع المحتوى الجنيني لأنواع أخرى بخطى متسارعة. وإننا على وشك الاقتراب من وصف التكوين الجزيئي للخليّة بتفصيل غير مسبوق، إضافة إلى أننا في الطريق إلى إماطة اللثام عن اللغز المتمثل في كيف يمكن أنْ تعطي خليّة مفردة التنظيم المعقد الذي نراه في المخلوقات متعددة الخلايا. فبوجود الإنسان الآلي (الرابوط) وأجهزة الرؤية المتقدمة، والتقنيات التّحليلية المختلفة لدينا ما يكفي من الأدوات التي كانت في السابق محض خيال علمي.

في هذا الكتاب، سوف نحاول أنْ نقدم رؤية لعلم الأحياء، كما يُمارَسُ الآن، في حين لا نزال نعرض الكيفية التي وصلنا بها إلى هذا الوضع المثير. وفي هذا الفصل التمهيدي، سنختبر طبيعة علم الأحياء، وطبيعة العلم بشكل عام؛ لكي نبدأ بوضع المعلومات التي يعرضها هذا الكتاب في مقامها المناسب.

علم الأحياء يوحِّد الكثير من العلوم الطبيعية

يقدم علم الأحياء الكثير من أجل توحيد المعلومات المتحصلة من العلوم الطبيعية الأخرى. فالأنظمة الحيوية تُعَدُّ من أعقد الأنظمة الكيميائية التي نعرفها على الأرض، ووظائفها الكثيرة تقررها، وتضع قيودًا عليها، مبادئ الكيمياء والفيزياء.

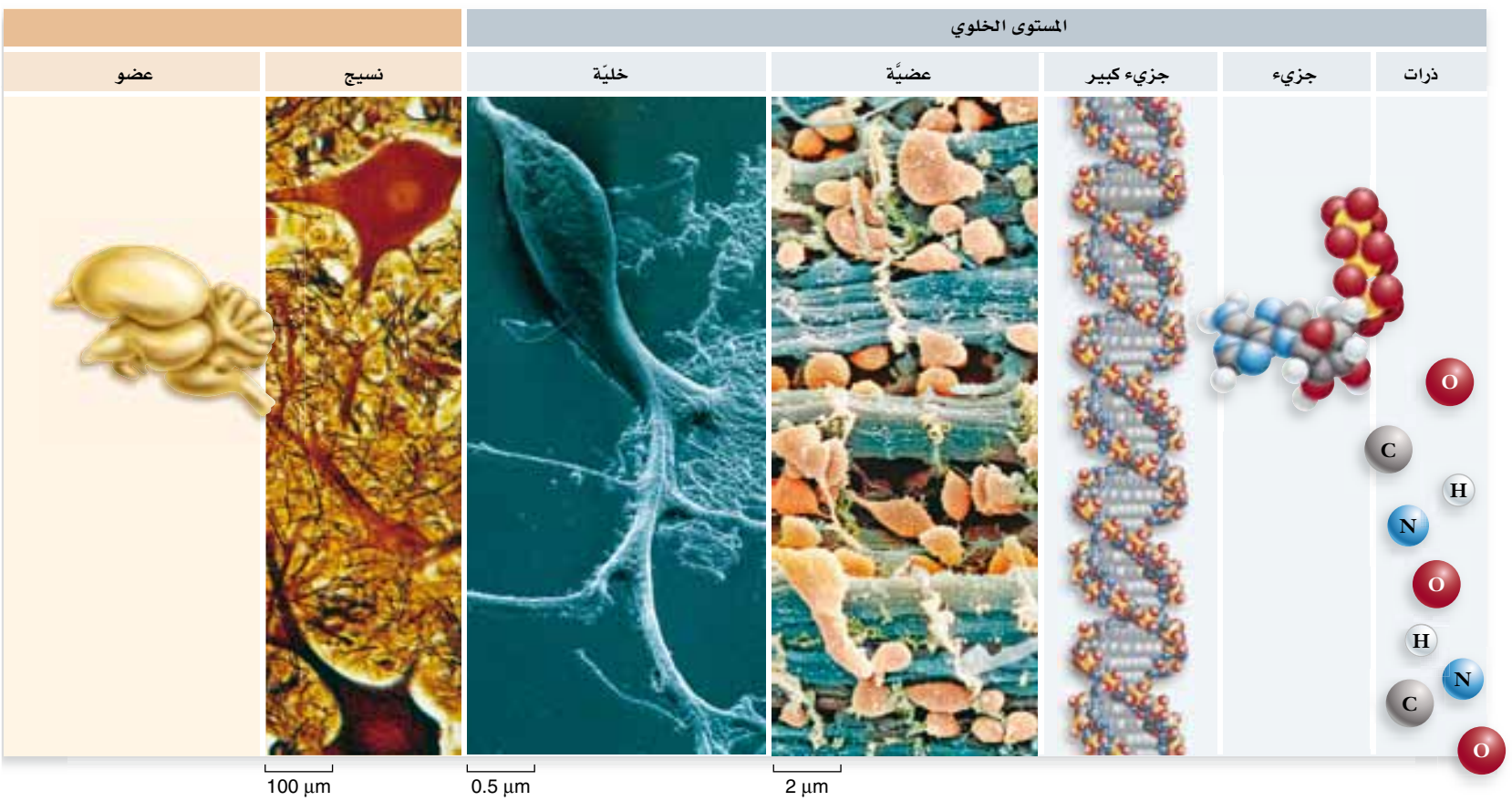
بعبارة أخرى، ليس هناك قوانين جديدة للطبيعة يمكن اكتشافها من علم الأحياء، ولكن دراسة الأحياء تنير وتوضح عمل القوانين الطبيعية.

إنّ العمل الكيميائي المعقد للخلايا يعتمد على كلّ ما تعلمناه من دراسة الكيمياء. وكلّ مستوى من التنظيم البيولوجي محكوم بطبيعة تحولات الطاقة التي تعلمناها من دراسة الديناميكا الحرارية. فالأنظمة البيولوجية لا تمثل أيّ شكل جديد من المادة، ومع ذلك، فإنّها تُعدّ التنظيم الأكثر تعقيدًا للمادة الذي نعرفه. إنّ ما يجعل الأنظمة الحية معقدة جدًا هو وجود مصدر ثابت للطاقة، ألا وهو الشّمس. إنّ تحويل مصدر الطاقة هذا إلى جزيئات عضوية بعملية البناء الضّوئيّ يمكن فهمه باستخدام مبادئ الكيمياء والفيزياء.

وعندما يأخذ العلماء مسائل أكثر تعقيدًا في الحسبان، فإنّ طبيعة كيفية قيامنا بإنجاز العلوم تتغير كذلك. فالعلوم جميعها أصبحت متداخلة التخصصات، فقد يجتمع ثلة من الخبراء في حقول جديدة مثيرة مثل حقل التقنيات المنمنمة. وعلم الحياة هو في قلب هذه المقاربة متعددة التخصصات؛ لأنّ المسائل البيولوجية غالبًا ما تتطلب مقاربات مختلفة متعددة للوصول إلى حلول.

الحياة تتحدى التعريفات البسيطة

علم الأحياء، بمعناه الأوسع، هو دراسة المخلوقات الحية؛ إنه علم الحياة. تأتي المخلوقات الحية بتشكيلة مذهلة من الأشكال والتكوين، وعلماء الأحياء يدرسون الحياة بطرق مختلفة متعددة. فهم يعيشون مع الغوريلا، ويجمعون المستحاثات، ويستمعون إلى الحيتان، ويقرؤون الرسائل التي ترمّزها جزيئات الوراثة الطويلة، ويعدون كم مرة يضرب الطائر الطّنان بجناحيه كلّ ثانية.



ما الذي يجعل شيئًا ما حيًّا؟ يمكن أنْ يستنتج كلّ شخص أن الحصان الجامح هو مخلوق حيّ، في حين أن السيارة ليست كذلك، ولكن لماذا؟ فنحن لا نستطيع أنْ نقول: "إذا كان الشيء يتحرك فهو حيّ" لأنّ السيارة تتحرك، والهلام يبدي اهتزازًا في الصحن، وهو ليس من الأحياء بالتأكيد. وعلى الرّغم من أننا لا نستطيع أنْ نعرف الحياة بجملة بسيطة واحدة، فإنّنا يمكن أنْ نأتي بسلسلة من سبع خصائص تشترك بها الأنظمة الحية، هي:

- **التنظيم الخلوي Cellular organization**: المخلوقات جميعها تتكون من خليّة واحدة أو أكثر. والخلايا، وهي غالبًا أصغر من أنْ ترى بالعين المجردة، تنجز الأنشطة الأساسية للحياة، وكلّ خليّة محاطة بغشاء يفصلها عما يحيط بها.
- **التعقيد المنظم Ordered complexity**: المخلوقات الحية جميعها معقدة، ولكنها بالغة التنظيم. فجسمك مكون من أنواع مختلفة من الخلايا التي يحتوي كلّ منها كثيرًا من التراكيب الجزيئية المعقدة. إنّ كثيرًا من الأشياء غير الحية معقدة أيضًا، ولكنها لا تظهر هذه الدرجة من التعقيد المنظم.
- **الحساسية Sensitivity**: تستجيب المخلوقات جميعها للمنبهات، فالنباتات تنمو في اتجاه مصدر الضّوء، وبؤبؤ العين يتسع عندما تدخل إلى غرفة مظلمة.
- **النّموّ والتّطوّر والتّكاثر Growth, development, and reproduction**: المخلوقات جميعها قادرة على النّموّ والتّكاثر، وجميعها يمتلك جزيئات وراثية تنتقل منها إلى نسلها، لكي تضمن أنْ يكون النسل من النوع نفسه.
- **استخدام الطاقة Energy utilization**: المخلوقات تأخذ الطاقة وتستعملها لكي تنجز أنواعًا مختلفة من العمل، فكلّ عضلة في جسمك تعمل بقوة الطاقة التي تحصل عليها من الغذاء الذي تتناوله.
- **الاتزان الداخلي Homeostasis**: المخلوقات جميعها تحافظ على ظروفها الداخلية، التي هي مختلفة عن بيئتها، وثابتة نسبيًّا، وهذا يدعى الاتزان الداخلي.
- **التكيف التّطوّري Evolutionary adaptation**: المخلوقات الحية جميعها تتفاعل مع المخلوقات الأخرى ومع مكونات البيئة غير الحية بطرق تؤثر في بقائها، ونتيجة لذلك، فإنّ المخلوقات تطور تكيفات لبيئاتها.

تبدي الأنظمة الحية تنظيمًا تراتبيًّا

إنّ تنظيم عالم الأحياء هو تنظيم تراتبي، بمعنى، أن كلّ مستوى يُبنى على المستوى الذي تحته، وهذه المستويات هي:

1. **المستوى الخلوي Cellular level**: على المستوى الخلوي (الشكل 1-1)، تجتمع **الذرات Atoms**، وهي العناصر الأساسية للمادة، مع بعضها في مجموعات تدعى **جزيئات Molecules**، والجزيئات البيولوجية المعقدة تجتمع في تراكيب صغيرة تدعى **عضيّات Organelles**، تقع ضمن وحدات محاطة بأغشية تدعى **خلايا Cells**. والخليّة هي الوحدة الأساسية للحياة. تتكون كثير من المخلوقات الحية المستقلة من خليّة واحدة فقط، فالبكتيريا هي خلايا مفردة مثلًا. في حين أن الحيوانات والنباتات جميعها، ومعظم الفطريات والطحالب، متعددة الخلايا؛ أيْ مؤلفة من أكثر من خليّة واحدة.
2. **مستوى المخلوق الفرد Organismal level**: تُظهر الخلايا في المخلوقات متعددة الخلايا المعقدة ثلاثة مستويات أساسية من التنظيم: الأول، **الأنسجة Tissues**، التي هي مجموعات من خلايا متشابهة، وتعمل بوصفها وحدة وظيفية. وفي الثاني، تجتمع الأنسجة بدورها في **أعضاء Organs**،

الشكل 1-1

التنظيم التراتبي في الأنظمة الحية. الحياة بالغة التنظيم ابتداءً من الذرات البسيطة، ومن المخلوقات متعددة الخلايا المعقدة. ضمن هذا التنظيم من التركيب، تشكل الذرات جزيئات تستخدم لتكوين العضيات، وهذه بدورها تشكل تحت أنظمة وظيفية في الخليّة. إن الخلايا منظمة في أنسجة، ثم في أعضاء وأجهزة عضوية كتلك الموجودة في الجهاز العصبي، الذي يبدو في الصورة، يمتد هذا التنظيم فيما وراء المخلوقات المفردة إلى المجموعات السكانية، وإلى المجتمعات والأنظمة البيئية، وأخيرًا إلى كامل المحيط الحيوي.

وهي تراكيب في الجسم مكونة من أنسجة عدة مختلفة، وتعمل بوصفها وحدة تركيبية ووظيفية. فدماغك عضو مُكَوَّنٌ من خلايا عصبية وتشكيلة من أنسجة مرتبطة بها، تشكل طبقات للحماية، وتزود بالدم. وفي المستوى الثالث من التنظيم، تجتمع الأعضاء في أجهزة عضوية Organ systems، فالجهاز العصبي مثلًا مُكَوَّنٌ من أعضاء الإحساس، والدّماغ، والحبل الشوكي، والعصبونات التي تنقل الإشارات.

3. **مستوى المجموعة السكانية Population level**: يمكن أن تتجمع المخلوقات المفردة في مستويات تراتبية عدة ضمن عالم الأحياء: المستوى الأساسي هنا هو **المجموعة السكانية Population**؛ وهي مجموعة من المخلوقات الحية من النوع نفسه تعيش في المكان نفسه. فكلّ المجموعات السكانية لمخلوق من نوع معين تشكل معًا **نوعًا Species** يكون أفراده متشابهين في المظهر والقدرة على التزاوج فيما بينهم. في المستوى الأعلى من التنظيم البيولوجي يقع **المجتمع البيولوجي Biological community** الذي يتكون من مجموعات سكانية للأنواع المختلفة، تعيش معًا في المكان نفسه.

4. **مستوى النظام البيئي Ecosystem level**: في الطبقة الأعلى من التنظيم البيولوجي، يشكل المجتمع البيولوجي والبيئة الفيزيائية التي يعيش ضمنها معًا **نظامًا بيئيًا Ecosystem**، فمثلًا، تتفاعل التربة، والماء، والجو لنظام بيئي جبلي مع المجتمع البيولوجي لهذا الجبل بطرق متعددة مهمة.

5. **الخصائص البارزة عند كلّ مستوى Emergent properties**: تبرز خصائص جديدة عند كلّ مستوى أعلى من التنظيم التراتبي الحيوي. تنتج الخصائص البارزة من الطريقة التي تتفاعل بها المكونات، والغالب أننا لا نستطيع التنبؤ بهذه الخصائص بمجرد النظر إلى المكونات نفسها. ففحص الخلايا المفردة مثلًا لا يعطينا إلا القليل من الأدلة على ما سيكون عليه المخلوق. فأنت، بوصفك إنسانًا، لديك التشكيلة نفسها من أنواع الخلايا، كما للزرافة. لهذا، فإنّه يصعب دومًا تعريف "الحياة"؛ لأنّ عالم الأحياء يظهر كثيرًا من الخصائص البارزة.

6. **المحيط الحيوي Biosphere**: يمكن النظر إلى كوكب الأرض بكامله، على أنه نظام بيئي، ونطلق عليه المحيط الحيوي أو الكرة الحيوية.

إنّ الوصف السابق للخصائص المشتركة، ولتنظيم الأنظمة الحية، يشكل بداية لفهمنا لماهية الحياة والأحياء. يوضّح الكتاب هذه الأفكار الأساسية وفي محاولة لتزويدنا بصورة كاملة للأنظمة الحية.

علم الأحياء هو علم موحّد يستخدم المعلومات القادمة من علوم طبيعية أخرى من أجل دراسة الأنظمة الحية. لا يوجد هناك تعريف بسيط للحياة، ولكن الأنظمة الحية تشترك في عدد من الصفات التي تصف مجتمعة الحياة. الأنظمة الحية أيضًا منظمة تراتبيًا، وتبرز خصائص جديدة، بحيث إنَّ الكلّ سيكون أكبر من مجموع أجزائه.

2-1 طبيعة العلم

كما هي الحياة نفسها، فإنّ طبيعة العلم تتحدى الوصف البسيط. لقد كتب العلماء عن "الطريقة العلمية" منذ سنوات عدة، وكأنما توجد طريقة واحدة لإجراء العلم. إن هذا التبسيط المبالغ فيه ساهم في إيجاد ارتباك حول طبيعة العلم لدى غير العلماء.

يتعلق العلم، في جوهره، بفهم طبيعة العالم حولنا باستخدام الملاحظة والتّحليل. بداية، دعنا نفترض أن القوى الطبيعية التي تعمل الآن عملت في الماضي، وأنّ الطبيعة الأساسية للكون لم تتغير منذ ابتداعه، وأنها لا تتغير الآن. هناك عدد من المقاربات المكملة لبعضها، تسمح بفهم الظواهر الطبيعية؛ أي ليس هناك طريقة واحدة صحيحة.

يحاول العلماء جاهدين أن يكونوا موضوعيين بأقصى درجة ممكنة في تفسير البيانات والملاحظات التي يجمعونها. ولأن العلماء مجرد بشر، فإنّ هذا ليس ممكنًا تمامًا. ولأن العلم جهد إنساني جماعي، فإنه يخضع للتدقيق، ومن ثم يصحح نفسه ومساره، فالنتائج التي يقدمها شخص، يتم التحقق منها من قبل آخرين، وإذا لم يكن بالإمكان تكرارها فإنّها ترفض.

الكثير من العلم وصفيّ

إنّ الرؤية التقليدية للطريقة العلمية هي أن الملاحظات تقود إلى فرضيات، تؤدي بدورها إلى وضع تكهنات قابلة للاختبار تجريبيًّا. بهذه الطريقة، نقيّم الأفكار الجديدة بموضوعية، لنصل إلى رؤية متزايدة الدقة للطبيعة. وسنناقش طريقة إجراء العلم لاحقًا في هذا الفصل، ولكن من المهم أنْ ندرك أنّ الكثير من العلم وصفي تمامًا: فلكي نفهم أمرًا، فإنّ الخطوة الأولى تكون بوصفه وصفًا دقيقًا. والكثير من علم الأحياء يتعلق بالوصول إلى وصف متزايد الدقة للطبيعة.

إنّ دراسة التنوع الحيوي مثال على العلم الوصفي، الذي له مضامين نحو الأوجه الأخرى لعلم الأحياء، إضافة إلى مضامينه الاجتماعية. فالجهود تنصب في الوقت الراهن لتصنيف كلّ أشكال الحياة على الأرض. هذا المشروع الطموح وصفي تمامًا، ولكنه سيقود إلى فهم أعمق للتنوع الحيوي، إضافة إلى أثر النوع الإنساني في التنوع الحيوي.

إنّ أحد الإنجازات المهمة في علم البيولوجيا الجزيئية في فجر القرن الحادي والعشرين، هو اكتمال مشروع تتابع المحتوى الجيني للإنسان. ستمكننا هذه المعرفة من صياغة كثير من الفرضيات الجديدة حول علم حياة الإنسان، وسيكون من الضروري إجراء كثير من التجارب لاختبار هذه الفرضيات، ولكن تحديد التتابع نفسه كان علمًا وصفيًّا.

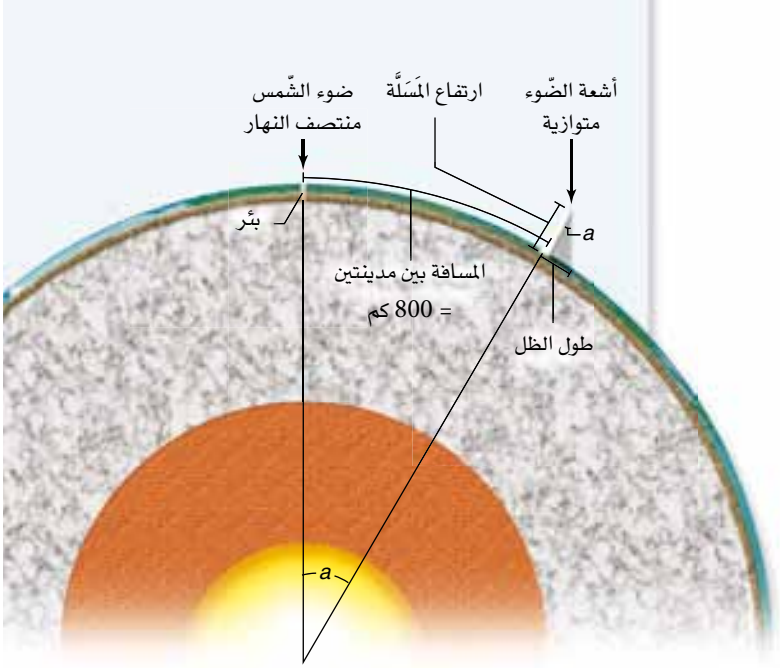
يستخدم العلم التّعليل الاستنتاجيّ والاستقرائيّ

تستخدم دراسة المنطق طريقتين متعاكستين في الوصول إلى الاستنتاجات المنطقية: التّعليل الاستنتاجيّ والتّعليل الاستقرائيّ. والعلم يستخدم كلًّا من هاتين الطريقتين على الرّغم من أن الاستقراء هو الطريقة الأساسية للتعليل في العلوم المعتمدة على الفرضيات.

التعليل الاستنتاجيّ

يطبّق **التّعليل الاستنتاجيّ Deductive reasoning** مبادئ عامة للتنبؤ بنتائج محددة. فمنذ أكثر من 2200 سنة، استخدم العالِمُ اليوناني إيراتوسثينز الهندسة الإقليدية والتّعليل الاستنتاجيّ، ليحسب بدقة محيط الأرض (الشكل 1-2).

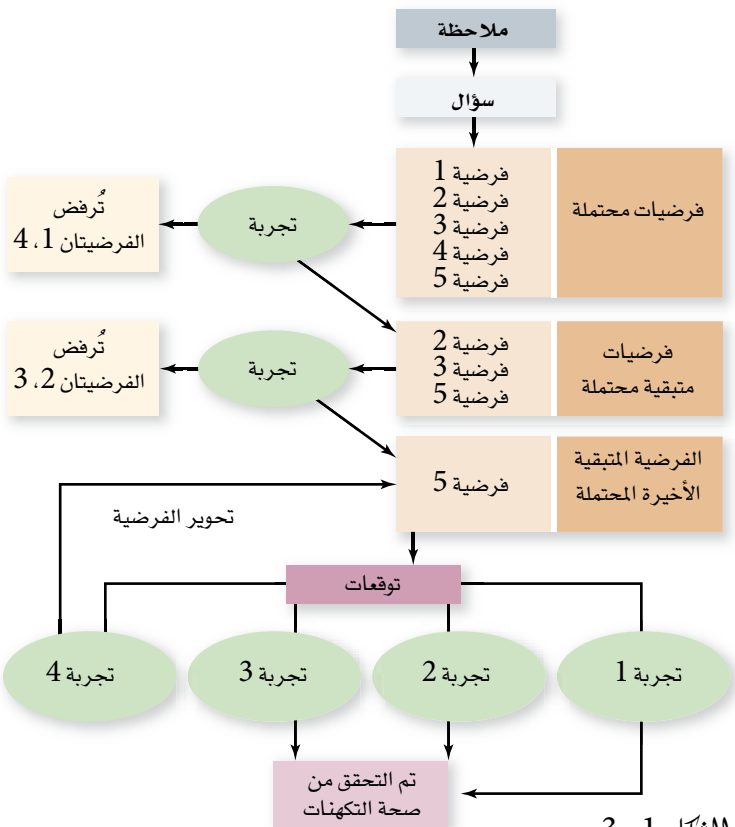
التّعليل الاستنتاجيّ هو التّعليل الرياضي والفلسفي، إنه يُستخدم لاختبار صحة الأفكار العامة في كلّ فروع المعرفة. فمثلًا، إذا كانت الثدييات جميعها لديها شعر،



الشكل 1-2

التّعليل الاستنتاجيّ. كيف قدر إيراتوسثينز Eratosthenes محيط الأرض باستخدام التّعليل الاستنتاجيّ.

1. في يوم ما، وعندما كان ضوء الشّمس يشع عموديًّا في بئر عميقة في سيناء بمصر، قاس إيراتوسثينز طول الظل لمسلة طويلة في مدينة الإسكندرية التي تبعد نحو 800 كم.
2. يشكل طولا الظل والمسلة ضلعين في مثلث. وباستخدام مبادئ الهندسة الإقليدية التي طورت حديثًا، حسب إيراتوسثينز الزاوية (a) فوجدها 7 درجات و12 دقيقة، وهذا يساوي بالضبط 50/1 من الدائرة (360 درجة).
3. إذا كانت الزاوية (a) هي 50/1 من الدائرة، فإنّ المسافة بين المسلة في الإسكندرية والبئر في سيناء يجب أن تساوي 50/1 من محيط الأرض.
4. سمع إيراتوسثينز أن المسافة بين المكانين تساوي رحلة 50 يومًا باستخدام جمل، وبافتراض أن الجمل يقطع مسافة 18.5 كم في اليوم، قدر المسافة بين المسلة والبئر بأنّها 925 كم (باستخدام وحدات قياس مختلفة بالطبع).
5. عندئذ، حسب إيراتوسثينز المحيط بأنّه 50 × 925 = 46.250 كم. وجدت القياسات الحديثة أن المسافة بين البئر والمسلة هي 800 كم فقط. وباستخدام هذا الرقم، 800 كم، فإنّ قيمة إيراتوسثينز كانت ستكون 50 × 800 = 40,000، أما المحيط الحقيقي فهو 40,075 كم.



الشكل 1-3

كيف يجري العلم يبين المخطط كيف تتقدم الاستقصاءات العلمية. أولًا، يضع العلماء ملاحظات تثير سؤالًا محددًا. ثم يفترضون عددًا من التفسيرات المحتملة (فرضيات) للإجابة عن السؤال. بعد ذلك، يجرون تجارب في محاولة لاستبعاد واحدة أو أكثر من تلك الفرضيات. ثم تُشتق تكهنات بناء على الفرضيات المتبقية، ويُجرى المزيد من التجارب لاختبار تلك التكهنات. هذه العملية يمكن أنْ تكون مكررة، وعندما تنجز النتائج التجريبية، فإنّ المعلومات يمكن أنْ تستخدم لتحوير الفرضية الأصلية لكي تناسب الملاحظات الجديدة.

ووجدت حيوانًا ليس لديه شعر، فإنّك قد تستنتج أن هذا الحيوان ليس حيوانًا ثدييًّا (لبونًا). فعالم الأحياء يستخدم التّعليل الاستنتاجيّ لمعرفة نوع عينة حيوان أو نبات من دراسة خصائصه.

التّعليل الاستقرائيّ

في **التّعليل الاستقرائيّ Inductive reasoning**، يتحرك المنطق في الاتجاه المعاكس، أيّ من الخاص إلى العام. يستخدم التّعليل الاستقرائيّ ملاحظات محددة ليبني مبادئ علمية عامة. فمثلًا، إذا كان كلب البُودِل ذا شعر، وكلب التَّرْيَر ذا شعر، وكلّ كلب آخر شاهدته كان ذا شعر، فإنّك قد تستنتج أنّ الكلاب جميعها لديها شعر. يقود التّعليل الاستقرائيّ إلى تعميمات يمكن اختبارها. لقد أصبح التّعليل الاستقرائيّ مهمًّا في العلوم في أوروبا في مطلع القرن السابع عشر، عندما بدأ فرانسيس بيكون وإسحاق نيوتن باستخدام نتائج تجارب محددة لاستنتاج مبادئ عامة حول كيفية سير الكون.

أحد الأمثلة على علم الأحياء الحديث، هو عمل جينات الصندوق الذاتي *Hox* في التكوين الجنيني، فقد حددت الدراسات على ذبابة الفاكهة *Drosophila melanogaster* هوية الجينات، التي يمكن أن تحدث تغيرات درامية في مصير التكوين الجنيني، كظهور الرِّجْل مثلًا في مكان قرن الاستشعار، وعندما عزلت الجينات نفسها، وتم تحديد تتابع DNA لها، وجد أن جينات مماثلة لها موجودة في حيوانات عدة، بما فيها الإنسان. لقد قاد هذا إلى الفكرة العامة بأنّ جينات الصندوق الذاتي تعمل كمفتاح الكهرباء، حيث تسيطر على مصير التكوين الجنيني.

العلم الذي تدفعه الفرضيات يصمم التكهنات ويختبرها

يقرر العلماء أي المبادئ العامة صحيحة من بين كثير من المبادئ التي تبدو كذلك، باختبار الفرضيات البديلة بشكل ممنهج، فإذا ثبت أن هذه الفرضيات غير منسجمة مع الملاحظات التجريبية، فإنّها تُرفض لأنها غير صحيحة، ويوضح الشكل 1-3 هذه العملية.

بعد جمع الملاحظات الدقيقة، يبني العلماء **فرضية Hypothesis**، وهي تفسير مقترح لهذه الملاحظات. الفرضية هي مقترح قد يكون صحيحًا، والفرضيات التي لم يثبت بطلانها بعدُ تبقى قائمة. فهي مفيدة لأنها تتلاءم مع الحقائق المعروفة،

ولكنها خاضعة دومًا للرفض في المستقبل، إذا وجد أنها غير صحيحة في ضوء توارد معلومات جديدة.

العمليةُ يمكن أنْ تكون تكرارية، بمعنى أن الفرضية يمكن أنْ تُغيَّر وتُصقَل بالمعلومات الجديدة. فمثلًا درس عالما الوراثة بيدل وتاتوم طبيعة المعلومات الوراثية ليصلا إلى فرضية "جين واحد / أنزيم واحد" (الفصل 15). هذه الفرضية تنص على أن الجين يمثل المعلومات الوراثية الضرورية لصناعة أنزيم واحد. وعندما جمع العلماء المزيد من المعلومات عن الطبيعة الجزيئية للمعلومات الوراثية، تَمَّ تحوير الفرضية لتصبح "جين واحد/ عديد ببتيد واحد"، ذلك لأن الأنزيمات يمكن أن تكون مكونة من أكثر من ببتيد واحد. وعند ورود مزيد من المعلومات حول طبيعة المعلومات الوراثية، وجد الباحثون أن الجين الواحد يمكن أن ينتج أكثر من ببتيد واحد، وهكذا عدلت الفرضية مرة أخرى.

اختبار الفرضيات

نسمي اختبار الفرضية **تجربة Experiment**. افترض أن غرفة ما تبدو مظلمة لديك. لكي تفهم لماذا تبدو مظلمة، فإنّك تقترح فرضيات عدة: الأولى قد تكون "لا يوجد ضوء في الغرفة؛ لأن مفتاح الإنارة مغلق". الفرضية البديلة هي "لا يوجد ضوء في الغرفة؛ لأن المصباح به عطل" وهناك فرضية أخرى قد تكون "إنني أصبحت أعمى، فلا أرى النور". لتقييم هذه الفرضيات، يجب أن تجري تجربة مصممة لاستبعاد واحدة أو أكثر من هذه الفرضيات.

فمثلًا، يمكنك اختبار فرضياتك بأنّ تضغط على مفتاح الكهرباء في الاتجاه المعاكس. إذا قمت بذلك وبقيت الغرفة مظلمة، فإنّك تكون قد أثبتَّ بطلان الفرضية الأولى: هناك شيء آخر غير مفتاح التشغيل هو الذي يسبب الظلام. لاحظ أن تجربة كهذه لا تثبت أن أيًّا من الفرضيات الأخرى صحيحة، فهي فقط تبين أن الفرضية التي اختبرتها لم تكن صحيحة. التجربة الناجحة هي تلك التي توضح أن واحدة أو أكثر من الفرضيات البديلة غير منسجمة مع النتائج، ومن ثم تُعَدُّ مرفوضة.

وبينما أنت تتقدم في قراءة هذا الكتاب، سوف تصادف كثيرًا من الفرضيات التي صمدت للاختبار التجريبي. والكثير سوف يستمر في الصمود، لكن بعضها الآخر سوف تعاد مراجعته، كلما جمع علماء الأحياء مزيدًا من الملاحظات الجديدة. فعلم الأحياء، مثلُه مثل العلوم الأخرى؛ حالة من التغير المنتظم، حيث تظهر أفكار جديدة لتحلّ محلّ الأفكار القديمة، أو تهذبها.

تحديد الضوابط

يهتم العلماء غالبًا بتعلم المزيد عن العمليات التي تتأثر بأكثر من عامل أو **متغير Variable**. لتقييم الفرضيات البديلة حول متغير ما، يجب تثبيت المتغيرات الأخرى جميعها. يتم هذا بإجراء تجربتين بشكل متواز: تجربة اختبارية وتجربة ضابطة. في **التجربة الاختبارية Test experiment** يُغيَّر أحد المتغيرات بطريقة معروفة لاختبار فرضية محددة. في **التجربة الضابطة Control experiment** يترك ذلك المتغير دون تغيير. تبقى التجربتان خلافًا لذلك متطابقتين في النواحي الأخرى جميعها، ولهذا فإنّ أيّ فرق في نتيجة التجربتين يجب أنْ يكون قد نتج عن تأثير المتغير الذي جرى تغييره.

يوجد معظم التحدي في العلم التجريبي في تصميم التجارب الضابطة، التي تعزل المتغير قيد الدراسة عن بقية العوامل الأخرى التي قد تؤثّر في العملية.

استخدام التوقعات

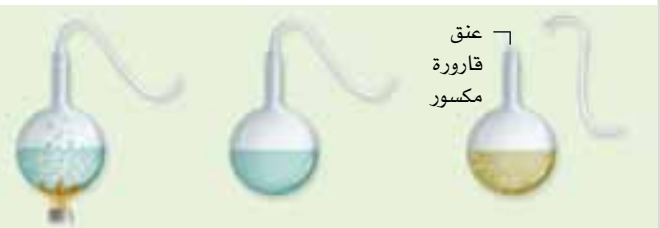
الفرضية العلمية الناجحة لا ينبغي أن تكون صحيحة فقط، بل مفيدة أيضًا – يجب أنْ تخبرنا عن شيء نريد معرفته. تكون الفرضية مفيدة عندما تصوغ تكهنات؛ لأن تلك التكهنات تزودنا بطريقة لاختبار مدى صحة هذه الفرضية، فإذا جاءت التجربة بنتائج غير منسجمة مع التكهنات، يجب أن ترفض الفرضية أو تعدل. في المقابل، فإنّه إذا أسندت التكهنات بالاختبار التجريبي، فإنّ الفرضية تدعم، وكلما دعمت التكهنات التي صنعتها الفرضية، ازدادت صحة الفرضية.

مثال على ذلك، فقد كان معروفًا في فجر علم الأحياء الدقيقة، أن البيئة الغذائية السائلة إذا تركت مكشوفة للهواء فإنها تصبح ملوثةً. كانت هناك فرضيتان لتفسير هذه الملاحظة: التوالد الذاتي وفرضية الجراثيم. تشير الفرضية الأولى إلى أن هناك خاصية فطرية في الجزيئات العضوية يمكن أن تقود إلى توالد ذاتي لأشكال الحياة. وتقترح فرضية الجراثيم أن مخلوقات دقيقة موجودة مسبقًا، ربما في الهواء سقطت، ولوثت البيئة الغذائية السائلة.

تم اختبار هاتين الفرضيتين بعدد من التجارب التي تضمنت ترشيح الهواء، وغلي البيئة الغذائية السائلة لقتل أي جراثيم ملوثة موجودة بها. التجارب الحاسمة نفذها العالم لويس باستور الذي صنع قوارير ذات أعناق معقوفة، يمكن أن تتعرض للهواء، ولكنها يمكن أن تحجز الجراثيم الملوِّثة. عندما عقمت هذه القوارير بالغلي، بقيت معقمة، ولكن إذا كسر العنق المعقوف فإنّ محتواها يصبح ملوثًا (الشكل 1-4).

فرضية الجراثيم
هناك أحياء دقيقة موجودة مسبقًا في الهواء يمكن أن تلوث البيئة الغذائية السائلة.

فرضية التوالد الذاتي
هناك مخلوقات حية يمكن أن تتوالد ذاتيًا من جزيئات عضوية غير حية في البيئة الغذائية السائلة.



النتيجة: الجراثيم المحمولة في الهواء سوف تدخل البيئة الغذائية السائلة، وتنمو فيها.

الشكل 1 – 4

تجربة لاختبار فرضية التوالد الذاتي وفرضية الجراثيم. بنى باستور قوارير، كلّ منها ذات عنق معوج كعنق الإوز؛ لمنع التلوث عن طريق الهواء. عندما سخنت القارورة، قتلت الجراثيم التي بها. ستبقى القارورة معقمة ما لم يكسر العنق، حيث تصبح عندها ملوثة. يتكهن التوالد الذاتي بحدوث نمو في أي من القارورتين، أما نظرية الجراثيم فتتكهن بحدوث النّموّ فقط، عندما تتعرض القارورة المعقمة للهواء.

هذه النتيجة تكهنت بها فرضية الجراثيم – أي إنه عندما تعرضت القارورة المعقمة للهواء، فإنّ الجراثيم المحمولة في الهواء ستصل إلى البيئة الغذائية السائلة وتنمو فيها، أما فرضية التوالد الذاتي، فإنّها لم تتنبأ بحدوث فرق في النتائج عند التعرض للهواء. أثبتت هذه التجربة بطلان فرضية التوالد الذاتي، ودعمت فرضية الجراثيم المحمولة بالهواء تحت الظروف التي جرى فيها الاختبار.

الاختزالية تفكك نظامًا أكبر إلى أجزائه المكونة له

يستخدم العلماء غالبًا المقاربة الفلسفية **للاختزالية Reductionism** لفهم نظام معقد باختزاله إلى مكوناته العاملة. لقد شكلت الاختزالية المقاربة العامة في حقل الكيمياء الحيوية، التي كانت ناجحة جدًا في كشف الأيض الخلوي المعقد وتحليله بالتركيز على مسارات مفردة وأنزيمات محددة. وبتحليلهم لكلّ المسارات ومكوناتها، أصبح لدى العلماء الآن صورة إجمالية لأيض الخلايا.

وللاختزالية حدودها أيضًا عندما تطبق على الأنظمة الحية، أحدها أن الأنزيمات لا تتصرف دومًا بالطريقة نفسها عندما تعزل، كما لو أنها في بيئتها الخلوية الطبيعية. المشكلة الأكبر هي أن التداخل المعقد لكثير من الوظائف المتشابكة يقود إلى وظائف بارزة لا يمكن التكهن بها اعتمادًا على عمل الأجزاء. وقد بدأ علماء الأحياء بحلّ هذه المشكلة، وذلك بالتفكير في طرق تهتم بالكلّ إضافة إلى اهتمامها بعمل الأجزاء. ويهدف حقل علم أحياء الأنظمة الذي برز حديثًا إلى الاهتمام بهذا الاتجاه المختلف.

يبني العلماء نماذج لتفسير الأنظمة الحية

يبني العلماء نماذج بطرق متباينة جدًا لكثير من الاستعمالات. فعلماء الوراثة يبنون نماذج للشبكات المتداخلة من البروتينات التي تسيطر على التعبير عن الجينات، وهم غالبًا ما يرسمون رسومًا كرتونية لتمثيل ما لا نستطيع رؤيته. أما علماء المجموعات السكانية فيبنون نماذج لكيفية حدوث التغير التّطوّري. في حين يبني علماء الخليّة نماذج لمسارات نقل الإشارات والأحداث التي تقود من الإشارات الخارجية إلى الأحداث الداخلية. ويبني علماء الأحياء التركيبي نماذج فعلية لتراكيب البروتينات والجزيئات الكبيرة المعقدة في الخليّة. تزودنا النماذج بطريقة لتنظيم تفكيرنا حول مسألة ما، والنماذج يمكن أنْ تقربنا أكثر فأكثر من الصورة الشمولية، وبعيدًا عن مقاربة الاختزالية المتطرفة، فالأجزاء العاملة يزودنا بها التّحليل الاختزالي، في حين تمكننا النماذج من رؤية كيفية التئام الأشياء بعضها مع بعض. وغالبًا ما تقترح هذه النماذج تجارب إضافية يمكن أنْ تنفذ النموذج أو تحسنه، أو تختبره.

وكلما جمع العلماء مزيدًا من المعرفة عن التدفق الفعلي للجزيئات في الأنظمة الحية، فإنّ نماذج حركية معقدة يمكن أنْ تستخدم لتطبيق المعلومات عن الأنزيمات المعزولة في سياقها الخلوي. وتستخدم هذه النمذجة، في علم أحياء الأنظمة، على نطاق واسع، على شبكات التنظيم في أثناء التكوين الجنيني، أو حتى لنمذجة كامل الخليّة البكتيرية.

طبيعة النظريات العلمية

يستخدم العلماء كلمة **نظرية Theory** بطريقتين رئيستين؛ فالمعنى الأول هو تفسير مقترح لظاهرة طبيعية، ويعتمد في الغالب على مبدأ عام. وهكذا، قد نتحدث عن المبدأ الذي اقترحه نيوتن أنّه "نظرية الجاذبية". بعض النظريات تجمع غالبًا مفاهيم كان يُعْتَقَدُ سابقًا أنّها غير مترابطة. المعنى الثاني هو مجموعة من المفاهيم المترابطة يدعمها تعليل علمي ودليل تجريبي، تفسر الحقائق في حقل الدراسة. تزودنا هذه النظرية بإطار لا يمكن الاستغناء عنه لتنظيم كم المعرفة. فمثلاً، النظرية الكمية في الفيزياء تربط معًا مجموعة من الأفكار عن طبيعة الكون وتفسر الحقائق التجريبية، وتشكل مرشدًا لمزيد من الأسئلة والتجارب.

تُعَدّ النظريات، بالنسبة إلى العلماء، أرضية صلبة للعلوم، فهي تعبر عن الأفكار التي نحن متأكدون منها تمامًا، أما بالنسبة إلى جمهور العامة، فإنّ النظرية تتضمن العكس – نقص المعرفة، أو التحزر. ليس غريبًا إذًا أن يُنتج هذا الفرق في الفهم ارتباكًا. وفي هذا الكتاب، ستستخدم كلمة نظرية بمعناها العلمي، أي عند الإشارة إلى المبادئ العامة المقبولة، أو إلى ذلك الكم من المعلومات.

يحاول بعض النقاد من خارج الوسط العلمي دحض التّطوّر بالقول: "إنه مجرد نظرية". إن فرضية حدوث التّطوّر، مع ذلك، هي حقيقة علمية مقبولة، أي يدعمها دليل علمي دامغ.

ونظرية التّطوّر الحديثة هي جسم معقد من الأفكار التي تنتشر أهميتها بعيدًا وراء تفسير التّطوّر. فتفرعاتها تتغلغل في كلّ حقول علم الأحياء، وتزودنا بإطار مفاهيمي يوحد فروع علم الأحياء بوصفها علمًا واحدًا. مرة أخرى، يكمن السر في كيف تلائم الفرضية الملاحظات وتستوعبها. ونظرية التّطوّر تستوعب الملاحظات بشكل جيد تمامًا.

البحث العلمي قد يكون في الأساس بحتيًا أو تطبيقيًا

كان يبدو أمرًا عصريًّا، في السابق، أن يتحدث المرء عن الطريقة العلمية، على أنها تتكون من تسلسل منظم من الخطوات المنطقية. وكلّ خطوة قد تدحض واحدًا من اثنين من البدائل غير المتماشية مع بعضها، وكأن اختبار التجربة- والخطأ سيقود الباحث حتمًا إلى متاهة من عدم اليقين تعيق التقدم العلمي دومًا. فإذا كانت تلك هي الحالة، فإنّ الحاسوب هو عالِم ممتاز، لكن العلم لا يتم بهذه الطريقة.

وكما أشار الفيلسوف البريطاني **كارل بوبر K.Popper**، فإنّ العلماء الناجحين، دون استثناء، يصممون تجاربهم، ولديهم فكرة جيدة عما ستكون عليه النتائج. فهم لديهم ما يسميه بوبر "الإدراك المسبق الخيالي" عما ستكون عليه الحقيقة. ولأن النظر الثاقب، والخيال يؤديان دورًا كبيرًا في التقدم العلمي، فإنّ بعض العلماء أفضل في مجال العلوم من غيرهم – تمامًا كما يبرز اسم بوب ديلن من بين كُتاب كلمات الأغاني، أو يبرز كلود مونيت بوصفه رسامًا انطباعيًّا.

يقوم بعض العلماء بالبحث الأساسي الذي يهدف إلى توسيع حدود ما نعرف. وهؤلاء الأشخاص يعملون عادة في الجامعات، وبحوثهم عادة تكون مدعومة بمنح من مؤسسات ووكالات مختلفة.

إن المعلومات التي يولدها البحث الأساسي تساهم في الحجم المتزايد للمعرفة العلمية، وتشكل الأساس العلمي الذي يستخدمه البحث التطبيقي. العلماء الذين يجرون البحوث التطبيقية يعملون في الصناعة غالبًا، وعملهم قد يتضمن صناعة مضافات الأغذية، أو تصنيع أدوية جديدة، أو اختبار نوعية البيئة.

تكتب نتائج البحوث، وتقدم للنشر في مجلات علمية، حيث تجرى مراجعة التجارب والاستنتاجات من قبل علماء آخرين. تدعى عملية التقويم هذه مراجعة الأقران، وهي تقع في قلب العلم الحديث، فهي تساعد على ألا تكتسب البحوث المغلوطة أو الادعاءات غير الصحيحة سلطة الحقيقة العلمية. وهي تساعد علماء آخرين بنقطة البداية لاختبار مدى قابلية النتائج التجريبية للإعادة. والنتائج التي لا يمكن إعادتها لا تصمد مدة طويلة.

يستخدم العلم طرائق متعددة للوصول إلى فهم العالم الطبيعي. العلم يمكن أن يكون وصفيًا، يكدّس الملاحظات للحصول على صورة متزايدة الدقة للعالم. إن كلًّا من التعليلين: التّعليل الاستنتاجيّ والاستقرائيّ يستخدم في العلوم. وإن العلم الذي تدفعه الفرضيات يبني فرضيات بناء على الملاحظات. وعندما يجرى اختبار فرضية بشكل مكثف تصبح نظرية مقبولة. إذن، النظريات هي تفسيرات مترابطة منطقيًا للبيانات الملاحظة في الوقت الراهن، ولكن قد يجري تحويرها لتستوعب بيانات جديدة.

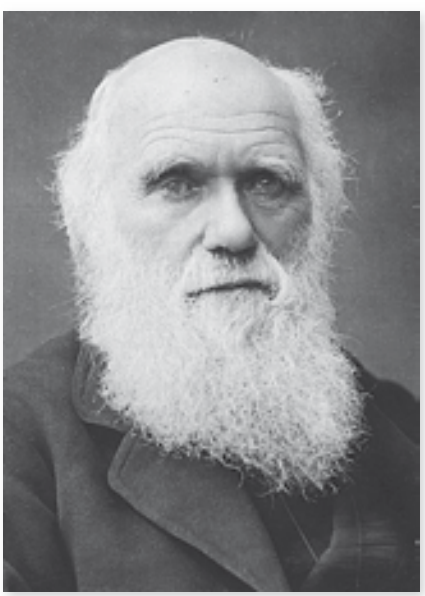
3-1 مثال على الاستقصاء العلمي: داروين والتّطوّر

تفسر نظرية داروين في التّطوّر وتصف كيفية تغيّر المخلوقات في الأرض عبر الزمن، واكتسابها تنوعًا هائلًا من الأشكال الجديدة. تقدم لنا النظرية المشهورة مثالًا جيدًا على كيفية تطوير العالم فرضيته، وكيف تنمو النظرية العلمية، وتكتسب قبولًا.

كان شارلس روبرت داروين (1809-1882) (الشكل 1-5) عالمًا طبيعيًّا إنجليزيًّا وكتب بعد 30 سنة من الدراسة والملاحظة واحدًا من أكثر الكتب شهرة وأوسعها نفوذًا في العصور جميعها. هذا الكتاب، اسمه "حول أصل الأنواع عن طريق الانتخاب الطبيعي" سبّب ضجةً واسعةً عند نشره، والأفكار التي عبر عنها داروين في هذا الكتاب أدت دورًا مركزيًّا في تطوير الفكر الإنساني منذ ذلك الحين.

فكرة التّطوّر كانت موجودة قبل داروين

في عصر داروين، كان معظم الناس يعتقدون أن الأنواع المختلفة من المخلوقات وتراكيبها المفردة نتجت من الفعل المباشر للخالق، (ولا يزال كثير من البشر يعتقدون ذلك في هذه الأيام). فالأنواع كان يُعتقد أنّها خُلقت بشكل خاص، وهي غير قابلة للتغير، أو ثابتة، عبر الزمن.



الشكل 1-5

شارلس داروين. أُخذت هذه الصورة، التي اكتشفت حديثًا، عام 1881، وهو العام الذي سبق وفاته، ويبدو أنها آخر صورة التقطت لعالم الأحياء العظيم.

في المقابل، فإنّ عددًا من علماء الطبيعة الأوائل والفلاسفة، قدموا وجهة نظر تقول: إنّ المخلوقات الحية كانت قد تغيرت خلال تاريخ الحياة على الأرض. هذا يعني أن **التّطوّر Evolution** قد حدث، وأنّ المخلوقات الحية الآن هي مختلفة عما كانت عليه في بداية نشأتها. كانت مساهمة داروين هي تقديم مفهوم سماه الانتخاب الطبيعي، الذي اقترح أنّه تفسير منطقي مترابط لهذه العملية، ثم قدم أفكاره للناس.

لاحظ داروين الفروق في المخلوقات المتقاربة

بدأت قصة داروين ونظريته عام 1831 عندما كان عمره آنذاك 22 عامًا. كان عضوًا في بعثة ملاحية لوضع الخرائط، استمرت خمس سنوات حول سواحل أمريكا الجنوبية (الشكل 1– 6) على متن السفينة بيجل. خلال الرحلة الطويلة، تهيأت لداروين الفرصة لدراسة تشكيلة واسعة من النباتات والحيوانات في القارات، والجزر، والبحار البعيدة. لاحظ داروين عددًا من الظواهر التي كانت ذات أهمية مركزية بالنسبة إليه في وصوله إلى استنتاجه النهائي.

لاحظ داروين بشكل متكرر، أن خصائص الأنواع المتشابهة تختلف بعض الشيء من مكان إلى آخر. هذه الأنماط الجغرافية دعته إلى افتراض أن السلالات تغيرت تدريجيًّا، عندما هاجرت الأنواع من منطقة إلى أخرى، فعلى جزر غالاباغوس، 960 كيلومترًا بعيدًا عن سواحل الأكوادور، وجد داروين تشكيلة من حسّون مختلف على الجزر المختلفة. كانت الأنواع الأربعة عشر مختلفة قليلًا في مظهرها، خاصة في مناقيرها، على الرّغم من أنها متقاربة نسبيًّا (الشكل 1 – 7).

اعتقد داروين أن من المنطقي الافتراض أن هذه الطيور جميعها تحدرت من سلف مشترك وصل من البر الرئيس لقارة أمريكا الجنوبية منذ ملايين عدة من السنين. ونظرًا لتناولها أنواعًا مختلفة من الغذاء على الجزر المختلفة، فإنّ مناقير الحسّون تغيرت في أثناء تحدرها "تحدر مع تحوير" أو تّطور. (أنواع الحسّون هذه سنناقشها بتفصيل أكبر في الفصلين 21، 22).

وبصورة عامة، فقد دهش داروين بحقيقة أن النباتات والحيوانات على هذه الجزر البركانية الحديثة النشأة نسبيًّا تشبه تلك الموجودة على السواحل القريبة لأمريكا الجنوبية. فلو كان كلّ واحد من هذه النباتات والحيوانات خلق بصورة مستقلة، ثم وضع على جزر غالاباغوس، فلماذا إذًا لا تشبه النباتات والحيوانات على الجزر ذات المناخ المماثل، كتلك الموجودة عند سواحل إفريقيا مثلًا؟ لماذا تشبه تلك

الشكل 1–6

رحلة السفينة بيجل التي استمرت خمس سنوات. انقضى معظم الوقت في استكشاف سواحل أمريكا الجنوبية والجزر الساحلية لها، مثل غالاباغوس. وأدت دراسات داروين للحيوانات في جزر غالاباغوس دورًا أساسيًّا في تطويره النهائي لمفهوم التّطوّر عن طريق الانتخاب الطبيعي.

الموجودة على سواحل أمريكا الجنوبية المجاورة؟

اقترح داروين الانتخاب الطبيعي بوصفه آلية للتّطوّر

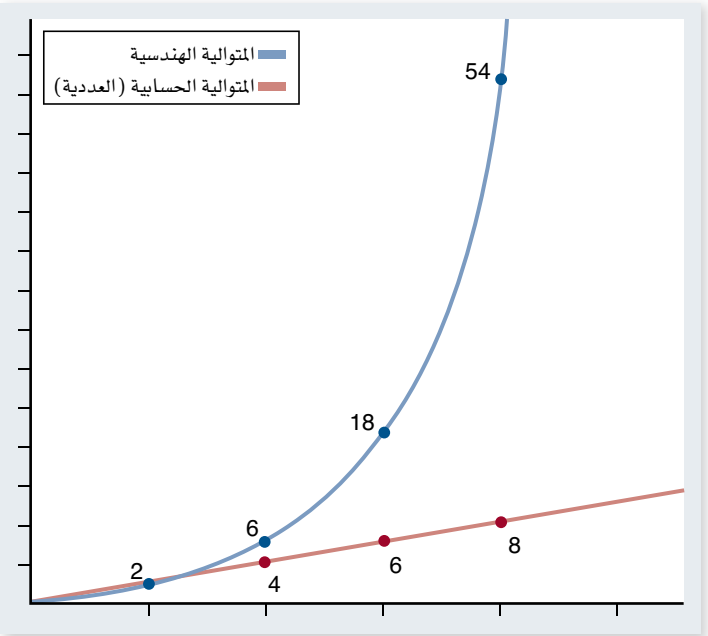
إنّ ملاحظة نتائج التّطوّر أمر، لكن فهم كيفية حدوثه أمر آخر. إنّ إنجاز داروين العظيم كان في صياغته لفرضية، مفادها أن التّطوّر يحدث بسبب الانتخاب الطبيعي.

داروين ومالثوس

كانت دراسة داروين لكتاب ثوماس مالثوس "مقالة في مبادئ المجموعات السكانية 1798"، ذات أهمية كبيرة في تطويره لرؤيته في التّطوّر. ففي هذا الكتاب ذكر مالثوس، أن المجموعات السكانية للنباتات والحيوانات (بما في ذلك الإنسان) تميل إلى الزيادة بصورة هندسية، في حين يُعد الإنسان قادرًا على زيادة غذائه بصورة حسابية فقط. بعبارة أخرى، فإنّ المجموعات السكانية تزداد بالضرب في عامل – مثلًا، في المتوالية 2، 6، 18، 54، فإنّ الرقم الأول يضرب في 3. أما

الشكل 1–7

ثلاثة أنواع من حسّون جزر غالاباغوس، وما تأكله من غذاء. لاحظ داروين وجود 14 نوعًا مختلفًا من الحسّون، على جزر غالاباغوس، تختلف بشكل أساسي في مناقيرها وعاداتها الغذائية. هذه الأنواع الثلاثة من الحسّون تأكل أنواعًا مختلفة من الغذاء، وقد حدس داروين أن الأشكال المختلفة لمناقيرها تمثل تكيفات تطورية حسنت من قدرتها على تناول الغذاء المتوافر في بيئاتها المحددة.



الشكل 1–8

المتوالية الهندسية والحسابية. تزداد المتوالية الهندسية بعامل ثابت (مثلًا المنحنى المبين يزداد بالضرب في 3 عند كلّ خطوة، أمّا المتوالية العددية فتزدادُ بفرق ثابت (مثلًا، الخط المبين يزداد بإضافة 2 في كلّ خطوة). يؤكد مالثوس أن منحنى نمو الإنسان هندسيٌّ، في حين أن منحنى إنتاج غذاء الإنسان عدديٌّ فقط.

استقصاء

ما تأثير تقليل العامل الثابت الذي تزداد به المتوالية الهندسية؟ هل يمكن تحقيق هذا التأثير في حالة الإنسان؟ كيف؟

موارد الغذاء فتزداد بزيادة عامل- مثلًا، في المتوالية 2، 4، 6، 8 يضاف 2 إلى كلّ رقم. ويبين (الشكل 1 – 8) الفرق الذي يُحدثه كلّ نوع من نوعي العلاقة مع الزمن.

ونظرًا لأن المجموعات السكانية تزداد هندسيًّا، فإنّ أي نوع من النباتات أو الحيوانات يمكن له افتراضيًّا، تغطية كامل سطح العالم خلال مدة قصيرة نسبيًّا من الزمن، إذا ما أتيح له التّكاثر بشكل غير مقيّد. بدلًا من ذلك، فإنّنا نجد أن المجموعات السكانية للأنواع تبقى ثابتة نوعًا ما سنة بعد أخرى؛ لأن الموت يحد من أعداد الأنواع.

لقد حفزت أفكار مالثوس داروين، الذي رأى أنه على الرّغم من أن كلّ مخلوق لديه القدرة الكامنة على إنتاج نسل أكثر مما يمكن بقاؤه، فإنّ عددًا محدودًا فعلًا يستطيع البقاء والتّكاثر لإنتاج نسل جديد. وبجمعه لهذه الملاحظات مع ما كان شاهده عندما كان في رحلة السفينة بيجل، إضافة إلى خبرته في تكثير الحيوانات الداجنة، تمكن داروين من وضع علاقة ارتباط مهمة: فالأفراد الذين لديهم خصائص فيزيائية وسلوكية وغيرها من الخصائص التي تمنحهم ميزة في بيئاتهم هم أكثر احتمالًا للبقاء والتّكاثر من أولئك الأفراد ذوي الصفات التي لا تمنحهم تلك الميزة. وعند بقاء الأفراد، فإنّهم يكتسبون قدرة على نقل خصائصهم المحببة إلى نسلهم. وكلما ازداد تكرار هذه الخصائص في المجموعة، فإنّ طبيعة المجموعة ككلّ سوف تتغير تدريجيًّا. وقد سمّى داروين هذه العملية الانتخاب.

الانتخاب الطبيعي

كان مألوفًا لدى داروين وجود الاختلافات بين الحيوانات المدجنة تمامًا، وقد بدأ كتابه "عن أصل الأنواع" بوصف مسهب عن تربية الحمام. لقد كان يعرف أن مربي الحيوانات كانوا يختارون سلالات محددة من الحمام والحيوانات الأخرى كالكلاب، لإنتاج صفات محددة، وهي عملية سماها داروين **الانتخاب الاصطناعي Artificial selection**.

ينتج الانتخاب الاصطناعي غالبًا تغييرًا كبيرًا في الصفات. فسلالات الحمام الداجن مثلًا تبدي تشكيلًا أوسع بكثير مما لدى كلّ الحمام البري الموجود في العالم. وقد اعتقد داروين أن هذا النوع من التغيير يمكن أن يحدث في الطبيعة أيضًا. فبالتأكيد، إذا كان مربو الحمام يمكن أن يراعوا هذه الاختلافات بالانتخاب الاصطناعي، فإنّ الطبيعة قد تصنع الشيء نفسه، وهي عملية سماها داروين **الانتخاب الطبيعي Natural selection**.

داروين يضع مسودة حجته

وضع داروين مسودة مرافعته الكلية حول التّطوّر بالانتخاب الطبيعي في مقالة أولية عام 1842. وبعد أن أطلع داروين بعض أصدقائه من العلماء على هذه المسودة، عاد لوضعها في دُرْجه ثانية، ثم تحول مدة 16 سنة إلى بحث آخر. لا أحد يعرف بالضبط لماذا لم ينشر داروين مخطوطته الأولى. فقد كانت عميقة، وتوضح أفكاره بالتفصيل.

إنّ المحفز الذي استدعى أنْ تُنشر فرضية داروين أخيرًا كان مقالة تسلّمها عام 1858. فقد بعث عالِم طبيعي إنجليزي اسمه ألفرد رسل والاس (1913 – 1823) مقالة إلى داروين من إندونيسيا؛ وهي بإيجاز تقدم فرضية التّطوّر بالانتخاب الطبيعي، وهي فرضية طورها والاس باستقلال تام عن داروين. وبعد تسلّم مقالة والاس، قام أصدقاء داروين بترتيب عرض مشترك لآرائهما في ندوة في لندن. قام داروين بعد ذلك بإكمال كتابه الخاص، بتوسيع مخطوطته التي وضعها عام 1842 والتي كان قد كتبها منذ مدة طويلة، ثم قدمها للنشر.

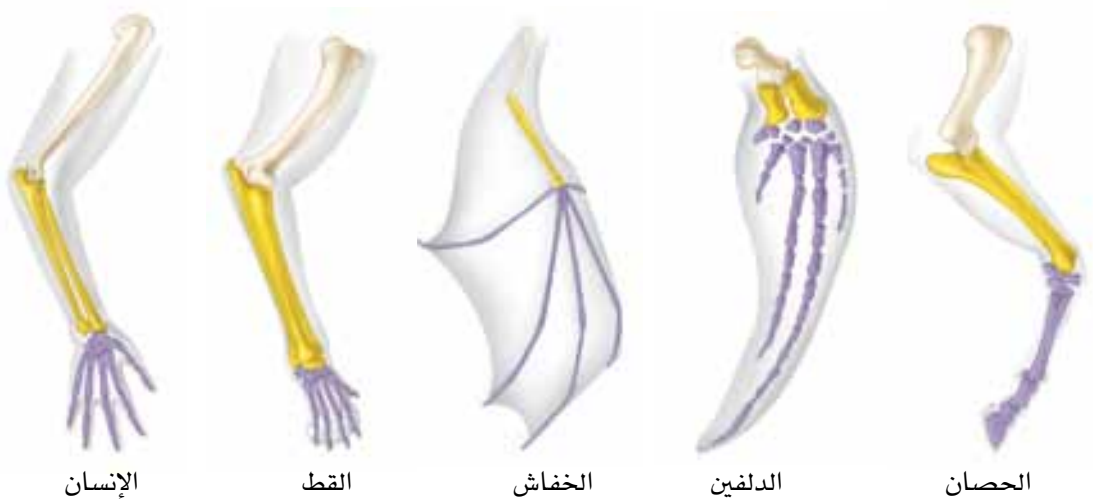
اختبار التوقعات من الانتخاب الطبيعي

لقد مرّ أكثر من 120 عامًا منذ وفاة داروين عام 1882. وخلال هذه المدة ازدادت قوة الدليل الذي يدعم هذه النظرية بشكل مستمر. وسوف نستكشف بعض الأدلة هنا، وفي (الفصل 22) سوف نعود إلى نظرية التّطوّر بالانتخاب، ونفحص الأدلة بمزيد من التفاصيل.

سجل المستحاثات (المتحجرات)

تنبأ داروين بأن سجل المستحاثات سيعطي حلقات وسطية بين المجموعات الكبيرة من المخلوقات – مثلًا بين الأسماك والبرمائيات، حيث كان يعتقد أن الأخيرة نشأت من الأولى، من جهة والزواحف والطيور من جهة أخرى. فضلًا على ذلك، فإنّ الانتخاب الطبيعي يتنبأ بالموقع النسبي الزمني لهذه الأشكال الانتقالية. ونحن نعرف الآن سجل المستحاثات لدرجة لم يكن ممكنًا التفكير فيها في القرن التاسع عشر. وعلى الرّغم من أن وجود مخلوقات "وسطية" حقًّا من الصعب تحديده، فإنّ علماء المستحاثات وجدوا ما يبدو أنه أشكال انتقالية. وقد وجدت هذه الأشكال في الموضع المتوقع زمنيًّا.

لقد وسعت الاكتشافات الحديثة للمستحاثات المجهرية تاريخ الحياة المعروف على الأرض نحو الخلف بما يعادل نحو 3.5 بليون سنة. وقد دعمت اكتشافات مستحاثات أخرى تنبؤات داروين، وألقت ضوءًا على كيفية تطور المخلوقات، خلال هذه المدة الطويلة من الزمن، من أشكال بسيطة إلى أشكال معقدة. وبالنسبة إلى الحيوانات الفقرية بشكل خاص، فإنّ سجل المستحاثات غنيٌّ بشكل خاص، ويظهر سلسلة متدرجة من التغيرات في الشكل، يظهر بها التعاقب التّطوّري لكلّ ذي عينين.



الشكل 1 – 9

التماثل بين أطراف الفقريات. الأطراف الأمامية لهذه الفقريات الخمسة تبين الطرق التي تغيرت بها النسب التقريبية لعظام الطرف الأمامي، وعلاقة ذلك بطريقة الحياة الخاصة بكلّ مخلوق.

عصر الكرة الأرضية

تتنبأ نظرية داروين بأن الأرض قديمة جدًا، ولكن بعض الفيزيائيين يرون أن عمر الأرض هو بضعة آلاف من السنين فقط. لقد أثار ذلك اهتمام داروين؛ لأن تطور المخلوقات الحية جميعها من سلف مشترك واحد سيتطلب وقتًا أكثر من ذلك بكثير. وباستخدام دليل، ثم الحصول عليه من دراسة معدلات التحلل الإشعاعي، نعرف الآن أن علماء الفيزياء الذين عاصروا داروين كانوا مخطئين تمامًا: فالأرض تكونت قبل نحو 4.5 بلايين سنة.

آلية الوراثة

تلقى داروين نقدًا لاذعًا في حقل الوراثة. ففي ذلك الوقت لم يكن لدى أحد فكرة عن الجينات أو كيف يحدث التوارث؛ ولهذا لم يكن ممكنًا لداروين أن يُفسر تمامًا كيف يعمل التّطوّر.

وعلى الرّغم من أن جريجور مندل كان قد أنجز تجاربه على نبات البازيلا في مدينة برون بالنمسا (اسمها آلان Brno وتعود لجمهورية التشيك)، في المدة نفسها تقريبًا، فإنّ الوراثة لم تؤسس بوصفها علمًا إلا في مطلع القرن العشرين. وعندما بدأ العلماء في فهم قوانين الوراثة (موصوفة في الفصلين 12، 13)، فإنّ المشكلة في نظرية داروين قد تلاشت.

التشريح المقارن

زودنا التشريح المقارن بدليل قوي على صحة نظرية داروين. ففي أنواع مختلفة عدة من الفقريات مثلًا، نجد العظام نفسها ما يشير إلى ماضيها التّطوّري. وهكذا، فإنّ الأطراف الأمامية المبينة في الشكل 1 – 9 مبنية جميعها من التشكيلة الأساسية من العظام نفسها التي تحورت لأغراض مختلفة.

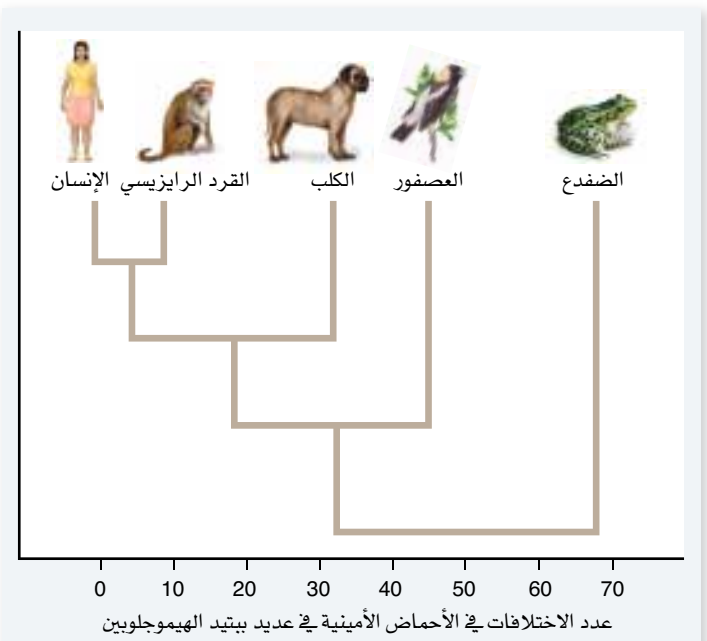
هذه العظام يقال: إنها **متماثلة Homologous** في الفقريات المختلفة، أي إن لها الأصل التّطوّري نفسه، ولكنها الآن تختلف في التركيب والوظيفة. وهذه تقارن دائمًا مع **التراكيب المتناظرة Analogous** كأجنحة الطيور والفراش التي لها الوظيفة نفسها، لكن لها أصولًا تطورية مختلفة.

الدليل الجزيئي

تظهر الأنماط التّطوّرية أيضًا على المستوى الجزيئي. فبمقارنة المحتوى الجيني (أي تتابعات الجينات جميعها) في المجموعات المختلفة من الحيوانات أو النباتات، فإنّنا نستطيع أن نحدد بدقة أكثر درجة العلاقة بين المجموعات. فسلسلة من التغيرات التّطوّرية عبر الزمن، يجب أن تتضمن تراكمًا مستمرًّا للتغيرات الوراثية في DNA.

يمكن أن يُشاهد الفرق بوضوح في بروتين هيموجلوبين (خضاب الدم) (الشكل 1 – 10). فالقرد الرايزيسي، وهو من الرئيسيات كالإنسان، توجد فروق أقل بينه وبين الإنسان في سلسلة β للهيموجلوبين المكون من 146 حمضًا أمينيًّا، ومما هو بينه وبين ثدييات بعيدة القرابة كالكلب. أما الفقريات غير الثديية، كالطيور والضفادع فالاختلاف أكبر.

تم تحديد تتابع بعض الجينات، كتلك التي تحدد بروتينات الهيموجلوبين في كثير من المخلوقات، ويمكن أن يُرسم كامل المسار الزمني للتّطوّر بثقة، وذلك بتتبع أصول



الشكل 1 – 10

الجزيئات تعكس أنماطًا تطورية. الفقريات بعيدة النسب عن الإنسان، لديها فروق أكبر في عدد الأحماض الأمينية في عديد ببتيد الهيموجلوبين.

استقصاء

أين تتوقع أن تقع الأفعى على هذا الرسم؟ لماذا؟

تغيرات محددة في النيوكليوتايد في تتابع الجين. إن نمط التحدر المتحصل عليه يدعى شجرة نشوء الأنواع **Phylogenetic tree**. إنها تمثل التاريخ التّطوّري للجين أو "شجرة العائلة" له. إن شجرة نشوء الأنواع الجزيئية تتوافق تمامًا مع تلك المشتقة من سجل المستحاثات، وهذا دليل قوي على حدوث التّطوّر. وإن نمط تراكم تغيرات DNA يمثل في معناه الحقيقي آثار أقدام التاريخ التّطوّري.

تقدم نظرية داروين في التّطوّر بالانتخاب الطبيعي مثالًا على تطور العلم. فقد لاحظ داروين اختلافات في المخلوقات المتقاربة، واقترح فرضية الانتخاب الطبيعي لتفسير هذه الاختلافات. وقد تم اختبار التنبؤات التي نجمت عن فكرة الانتخاب الطبيعي، ولا يزال اختبارها مستمرًا، باستخدام تحليل سجل المستحاثات، والوراثة، والتشريح المقارن، وحتى DNA للمخلوقات الحية.

4-1 المغزى الموحِّد في علم الأحياء

تضم دراسة علم الأحياء عددًا كبيرًا من التخصصات المختلفة التي تتباين من الكيمياء الحيوية وحتى علم البيئة. وفي هذه العلوم جميعًا يمكن تحديد أفكار رئيسة موحِّدة. من بين هذه؛ نظرية الخليّة، والأساس الجزيئي للوراثة، والعلاقة بين التركيب والوظيفة، والتّطوّر، وبروز خصائص جديدة.

تصف نظرية الخليّة تنظيم الأنظمة الحية

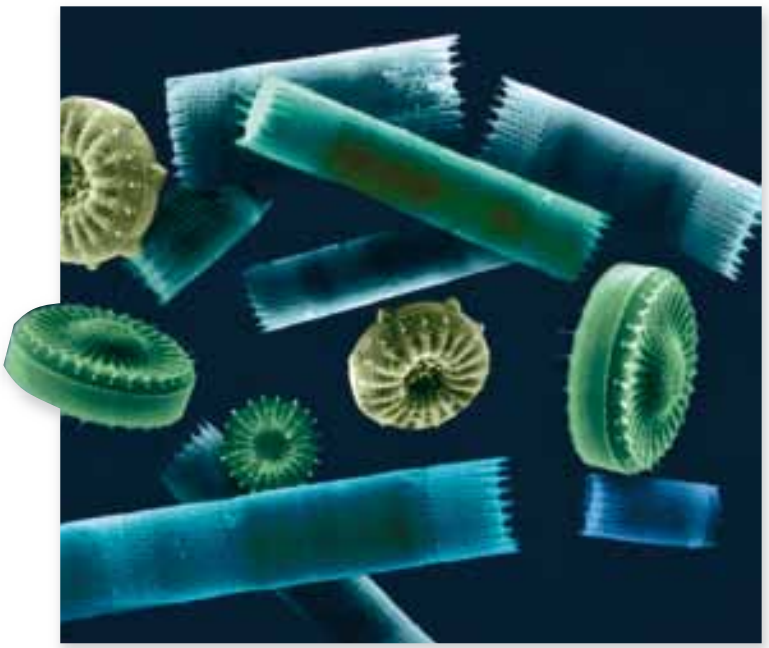
كما ذكرنا في بداية هذا الفصل، فإنّ المخلوقات جميعها مكونة من خلايا، وهي الوحدات الأساسية للحياة (الشكل 1 – 11). اكتشفت الخلايا من قبل روبرت هوك في إنجلترا عام 1665 باستخدام واحد من أقدم المجاهر الذي كان يكبر 30 مرة فقط. بعد مدة ليست طويلة، استخدم العالم الهولندي أنطون فان لوفنهوك مجهرًا قادرًا على التكبير 300 مدة، واكتشف عالمًا مذهلًا من أشكال الحياة.

عام 1839 لخص العالمان ماثياس شلايدن وثيودور شفان عددًا كبيرًا من الملاحظات التي وضعاها مع آخرين، واستنتجا أن المخلوقات الحية جميعها مكونة من خلايا. عُرف استنتاجهما هذا بنظرية الخليّة **Cell theory**. أضاف العلماء لاحقًا فكرة أن الخلايا جميعها تأتي من خلايا سابقة لها في الوجود. إن نظرية الخليّة، وهي واحدة من الأفكار الأساسية في علم الأحياء، تشكل حجر الأساس في فهمنا لتكاثر المخلوقات جميعها ونموها.

الأساس الجزيئي للوراثة يفسر استمرارية الحياة

إن الخلايا – حتّى أبسطها، معقدة بشكل لا يعقل – أكثر تعقيدًا من أي حاسوب. إن المعلومات التي تحدد ما ستكون عليه الخليّة – خطتها التفصيلية – مرمّزة في **الحمض النووي منزوع الأكسجين Deoxyribonucleic acid** (الذي سنشير إليه في هذا الكتاب من الآن فصاعدًا بصورته المختصرة DNA، وهو جزيء طويل كالحبل. كلّ جزيء DNA مكون من سلسلتين طويلتين من الوحدات البنائية، تدعى نيوكليوتايدات، ملتفتين حول بعضهما (الشكل 1 – 12). توجد أربعة أنواع من النيوكليوتايدات في DNA والتعاقب (التتابع) الذي توجد به يرمّز المعلومات المتعلقة بالخليّة. إن التتابع المحدد بمئات عدة إلى آلاف عدة من النيوكليوتايدات يشكل **الجين Gene**، وهو وِحْدة محددة من المعلومات.

إن استمرارية الحياة من جيل إلى آخر – الوراثة – يعتمد على النسخ المُخْلِص لمادة DNA التي في الخليّة إلى الخلايا الوليدة. وكامل مجموعة التعليمات في DNA التي تحدد الخليّة تدعى المحتوى الجيني. تم فك ترميز تتابع المحتوى الإنساني، وطوله 3 بلايين نيوكليوتايد، بصورة مسودة أولية عام 2001، وهو انتصار للاستقصاءات العلمية.

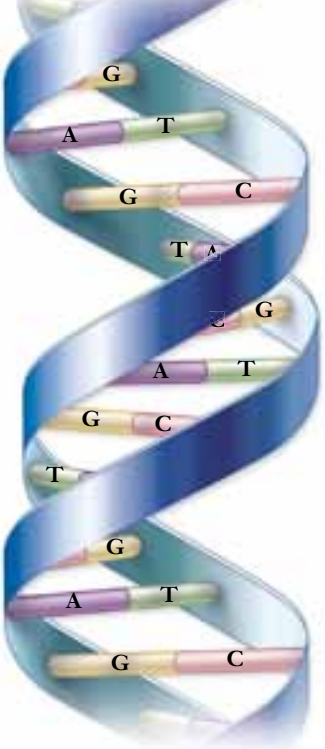


أ.

ب.

الشكل 1 – 11

الحياة في قطرة من ماء بركة. المخلوقات جميعها مكونة من خلايا. بعض المخلوقات، بما في ذلك المبينة في الجزء (أ) هي وحيدة الخليّة. بعضها الآخر، كالنبات المبين مقطعه العرضي في (ب) يتألف من خلايا عدّة.



الشكل 1 – 12

الجينات مصنوعة من DNA. يلتف شريطان من DNA حول بعضهما كحاجز درج لولبي ليشكلا حلزونًا مزدوجًا. وبسبب شكلهما وحجمهما، فإنّ النيوكليوتايدات التي تحمل الحرف A تزدوج فقط مع تلك التي تحمل الحرف T وكذلك الحال بالنسبة إلى الحرف G الذي يزدوج مع C. هذا يعني أنه مهما كان التعاقب على أحد الأشرطة، فإنّ التعاقب على الشريط الآخر سيكون مكملًا له. ويمكن بناء الشريط الآخر من كلّ شريط.

العلاقة بين التركيب والوظيفة تشكل أساس الأنظمة الحية

إنّ العلاقة بين التركيب والوظيفة هي أحد الأفكار الأساسية الموحِّدة لعلم الأحياء الجزيئي. فوظيفة الجزيئات والجزيئات الكبيرة المعقدة تعتمد على تركيبها.

وعلى الرّغم من أن هذه الملاحظة قد تبدو سطحية، فإنّ لها في الواقع مضامين بعيدة المدى. فنحن ندرس الجزيئات بعامة، والجزيئات الكبيرة المعقدة بخاصة لنفهم وظائفها. وعندما نفهم وظيفة تركيب ما، فإنّنا نستطيع استنتاج وظيفة تراكيب مماثلة موجودة في سياق آخر، كأن تكون في مخلوقات مختلفة.

يدرس علماء الأحياء كلا الجانبين، وهم يفتشون عن العلاقات بين التركيب والوظيفة. ففي جانب، يسمح هذا للتراكيب المتشابهة أن تُستخدم لاشتقاق وظائف متشابهة محتملة، وفي الجانب الآخر، فإنّ هذه المعرفة تعطينا دليلًا على أنواع التراكيب المنخرطة في عملية ما، إذا عرفنا شيئًا عن وظيفتها.

فمثلًا، افترض أننا عرفنا تركيب الأنسولين، وهو الهرمون الذي يسيطر على أيض الجلوكوز الموجود على سطح الخليّة في الإنسان، وافترض أننا وجدنا أيضًا جزيئًا مشابهًا في غشاء خليّة لنوع مختلف – ربما مخلوق مختلف تمامًا، كالديدان. بهذه الطريقة يمكننا أيضًا أن نتبين العلاقة التّطوّرية بين تناول الجلوكوز في الديدان وفي الإنسان.

تنوع الحياة ظهر عن طريق التغير التّطوّري

إن وَحْدة الحياة التي نراها ماثلة في صفات أساسية مشتركة بين كثير من أشكال الحياة المتقاربة، تتضارب مع التنوع الهائل للمخلوقات الحية في البيئات المختلفة على الأرض. فالأساس الموحَّد في كلّ من الكيمياء الحيوية والوراثة يتطلب أن كلّ أشكال الحياة تطورت من أصل واحد. وتنوع أشكال الحياة ظهر عن طريق حدوث تغير تطوري قاد إلى التنوع الحيوي الذي نشاهده.

يقسم علماء الأحياء التنوع الهائل لأشكال الحياة إلى ثلاث مجموعات كبيرة، تدعى فوق الممالك (الحقول): البكتيريا، والبكتيريا القديمة، وحقيقية النوى. تضم فوق مملكتي البكتيريا والبكتيريا القديمة مخلوقات وحيدة الخليّة، بها القليل من التراكيب الداخلية (تدعى بدائية النوى)، أما فوق مملكة حقيقية النوى، فتضم مخلوقات مكونة من خليّة منظمة بشكل معقد أو ذات خلايا معقدة متعددة (تدعى حقيقية النوى).

يقع ضمن حقيقة النوى أربع مجموعات رئيسة تدعى ممالك (الشكل 1 – 13). تتألف مملكة الطلائعيات من جميع المخلوقات حقيقة النوى وحيدة الخليّة،

تتألف مملكة النبات من مخلوقات لها جدار خلوي من السليلوز، وتحصل على الطاقة من عملية البناء الضّوئيّ. المخلوقات التي تنتمي لمملكة الفطريات لها

الشكل 1 – 13

تنوع أشكال الحياة. يصنف علماء الأحياء المخلوقات الحية جميعها في ثلاث مجموعات، تدعى فوق الممالك (الحقول): البكتيريا، والبكتيريا القديمة، وحقيقية النوى. فوق مملكة حقيقية النوى مكونة من أربع ممالك: النباتية والفطريات، والحيوانية، والطلائعيات.

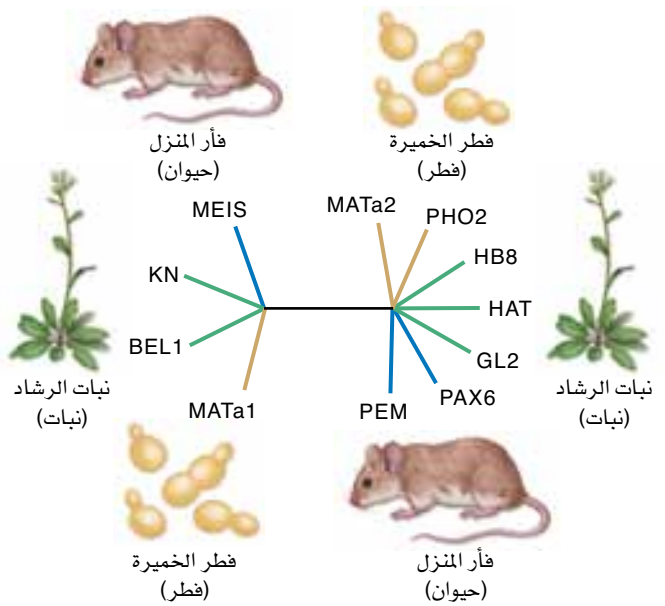
جدار خلوي من الكايتين، وتحصل على الطاقة بإفرازها أنزيمات هاضمة، ثم امتصاص نواتج الهضم المنطلقة من البيئة الخارجية. وتضم مملكة الحيوان مخلوقات ليس لديها جدار خلوي، وتحصل على الطاقة بالتهامها أولًا مخلوقات أخرى، ثم هضمها داخليًّا.

المحافظة (الثبات) التّطوّرية تُفسر وَحْدة المخلوقات الحية

يتفق علماء الأحياء على أن المخلوقات الحية اليوم تحدرت جميعها من مخلوق خلوي بسيط ظهر قبل 3.5 بلايين سنة. بعض صفات ذلك المخلوق الأول حُوفظ عليها. فخزن المعلومات الوراثية في DNA، مثلًا، هو مشترك للمخلوقات الحية جميعها.

إن الاحتفاظ بهذه الخصائص المحافِظة عبر خط طويل من التحدر والنشوء، يعكس أنه كان لها دور أساسي في بيولوجيا المخلوقات الحية – أمر لا يتغير بسهولة طالما تم تبنيه.

أحد الأمثلة الجيدة تزودنا بها البروتينات ذات المناطق الذاتية (المتماثلة)، التي تؤدي دورًا في التكوين الجنيني المبكر لحقيقية النوى. يمكن أن تُشاهد الصفات المحافظة في نحو 1850 بروتينًا ذا مناطق ذاتية، موزعة بين ثلاث ممالك مختلفة من المخلوقات (الشكل 1 – 14). إن البروتينات ذات المناطق الذاتية هي أدوات تطورية مهمة قوية تطورت مبكرًا، ولم يظهر بديل أفضل منها.



الشكل 1 – 14

شجرة البروتينات ذات المناطق الذاتية (المتماثلة). توجد هذه البروتينات في الفطريات (بني) والنباتات (أخضر) والحيوانات (أزرق). بناءً على التشابه في تتابعاتها، فإنّ الأحد عشر بروتينًا (مشار إليها بالأحرف الكبيرة عند نهاية الأفرع) تقع في مجموعتين مع عينات ممثلة لكلّ مملكة في كلّ مجموعة. هذا يعني مثلا، أن البروتين ذا المنطقة الذاتية PAX6 للفأر هو أكثر قربًا لبروتينات الفطريات والنباتات مثل PHO2, GL2 مما هو لبروتين الفأر MEIS.

الخلايا أنظمة لمعالجة المعلومات

إحدى الطرق للتفكير في الخلايا هي أنها آلات منمنمة دقيقة ومعقدة جدًا لمعالجة المعلومات. فالمعلومات المخزونة في DNA تستخدم لتوجيه بناء مكونات الخليّة، وتختلف مجموعة المكونات من خليّة إلى أخرى. إن السيطرة على التعبير عن الجينات يسمح بتمايز أنواع الخلايا في الزمان والمكان، ما يقود إلى تغيرات في زمن التكوين الجنيني لإنتاج أنواع الأنسجة المختلفة – على الرّغم من أن الخلايا جميعها في المخلوق الواحد تحمل المعلومات الوراثية نفسها.

تعالج الخلايا أيضًا المعلومات التي تستقبلها عن البيئة. فالخلايا تحس بالبيئة حولها عن طريق بروتينات موجودة في أغشيتها الخلوية، وهذه المعلومات تُبث عبر الأغشية إلى مسارات كيميائية معقدة لنقل الإشارات، ويمكنها تغيير وظيفة الخليّة.

إن قدرة الخلايا على الإحساس والاستجابة لبيئاتها، هو أمر حرج لوظيفة الأنسجة والأعضاء في المخلوقات متعددة الخلايا. فالمخلوقات ذات الخلايا المتعددة يمكن أن تنظم بيئاتها الداخلية، وتحافظ على درجة حرارة ثابتة، وعلى درجة pH، وعلى تركيز الأيونات المهمة. إن الاتزان الداخلي ممكن بسبب وجود شبكة معقدة من إشارات نقل المعلومات تنسق أنشطة الخلايا المختلفة في الأنسجة المختلفة.

الخصائص الطارئة (البارزة) تنشأ من تنظيم الحياة

كما ذكرنا سابقًا، فإنّ التنظيم التراتبي للحياة يقود إلى خصائص طارئة. إن فكرة أن الكلّ هو أكبر من مجموع أجزائه صحيحة بالنسبة إلى الأنظمة البيولوجية. في الوقت الراهن، لا يمكن التكهن بهذه الخصائص البارزة، ولكن يمكن ملاحظتها. وبينما يكتسب عالِم الأحياء فهمًا أعمق بتنظيم الأنظمة البيولوجية، تشكل قضية الخصائص البارزة واحدة من أكثر التحديات التي يمكن مواجهتها إثارة. إن علم بيولوجيا الأجهزة الجديد يهدف إلى حل هذه المشكلة، وهو يعدّ من أكثر الحقول إثارة في البحوث المستقبلية.

علم الأحياء واسع ومعقد، ولكن الأفكار الأساسية الموحِّدة له تساعد على تنظيم هذا التعقيد. الخلايا هي الوحدات الأساسية للحياة، وهي تمثل آلات لمعالجة المعلومات. إن تراكيب الجزيئات، والجزيئات الكبيرة المعقدة، وحتى المستويات الأعلى من التنظيم مرتبطة بوظائفها. يمكن تصنيف تنوع أشكال الحياة وتنظيمها اعتمادًا على خصائص متشابهة، والحفاظ التّطوّري يشير إلى وظائف مهمة. يقود تنظيم الأنظمة الحية إلى خصائص طارئة لا يمكن التنبؤ بها في الوقت الراهن.

مراجعة المفاهيم

1 - 1 علم الحياة

الأنظمةُ البيولوجية أنظمةٌ كيميائية معقدة، ووظائفها تقررها، وتضع قيودًا عليها مبادئ علمي الكيمياء والفيزياء.

- دراسةُ الأنظمة البيولوجية متداخلةُ التخصصات؛ لأن الحلول تتطلب مقاربات عدة مختلفة للمشكلات المختلفة.
- على الرّغم من أن تعريف الحياة صعب، فإن الأنظمة الحية لديها سبع خصائص مشتركة. فكلّ المخلوقات:
  - مكونة من خليّة واحدة أو أكثر.
  - معقدة وشديدة التنظيم.
  - تستجيب للمنبهات.
  - قادرة على النّموّ، والتّكاثر، ونقل المعلومات الوراثية إلى نسلها.
  - تحتاج الطاقة إلى إنجاز أنواع مختلفة من العمل.
  - تحافظ على ظروف داخلية ثابتة نسبيًّا باستقلال عن البيئة بعملية تدعى الاتزان الداخلي.
  - تطور تكيفات لبيئاتها.
- تنظيمُ الأنظمة الحية تراتبيٌّ. يبدأ من الذرات، وينتهي بالمحيط الحيوي.
- عند كلّ مستوى أعلى من التنظيم تظهر خصائص طارئة، بحيث يكون الكلّ أكبر من مجموع أجزائه.

2 - 1 طبيعة العلم

العلم في جوهره يتعلق بفهم طبيعة الكون، ويستخدم الملاحظة والتّعليل.

- يتعلق معظم العلم بوصف الطبيعة بدقة متناهية.
- هناك طريقتان للوصول إلى استنتاجات منطقية، هما:
  - تعليل استنتاجي يطبق المبادئ العامة ليتنبأ بنتائج محددة.
  - تعليل استقرائي يستخدم ملاحظات محددة ليبني مبادئ علمية عامة.
- العلم الذي يقوم على النظريات يصنع التكهنات، ويختبرها.
  - تبنى الفرضية من ملاحظات دقيقة.
  - تتغير الفرضيات بشكل متكرر، وتعاد صياغتها وتهذيبها، كلما وردت معلومات جديدة.
  - التجربةُ العلميةُ اختبارٌ للفرضيةِ.
  - تتضمن التجربة اختبارًا يتم به تحوير متغير ما، وتتضمن ضابطًا لا يتم به التلاعب بالمتغير.
  - ترفض الفرضيات إذا أنتجت تكهنات لا تتحقق صحتها تجريبيًّا.
  - يمكن دعم الفرضية بالتجارب، ولكن لا يمكن إثباتها.
- يستخدم العلماء الاختزالية لدراسة مكونات نظام أكبر. هذا الأمر له عيوبه؛ لأن الأجزاء يمكن أن تعمل بطريقة مختلفة، عندما تكون معزولة، عما لو كانت ضمن نظام أكبر.
- يستخدم العلماء النماذج لتنظيم تفكيرنا في المشكلات العلمية.
- يستخدم علماء الأحياء كلمة نظرية بطريقتين رئيستين: بوصفها تفسيرًا مقترحًا لظاهرة طبيعية، أو بوصفها مجموعة من المفاهيم تشرح الحقائق في حقل الدراسة.
- ينشغل العلماء بالبحوث الأساسية البحتة والبحوث التطبيقية.

3-1 مثال على الاستقصاء العلمي

تعد نظرية داروين في التّطوّر مثالًا جديدًا على كيفية تطوير العالِم لفرضيته، وكيف تنمو النظرية العلمية، وتكتسب قبولًا.

- اقتراح داروين الانتخاب الطبيعي بوصفه تفسيرًا منطقيًّا متماسكًا لكيفية تغيّر الحياة في أثناء تاريخ الأرض.
- لاحظ داروين اختلافًا في أنواع متشابهة من مكان إلى آخر.
- حفزت أفكار مالثوس داروين، فقد لاحظ أن الأنواع تنتج نسلًا كثيرًا، ولكن أعدادًا قليلة منها تبقى وتتكاثر.
- لاحظ داروين أن صفات النسل يمكن أن تتغير عن طريق الانتخاب الاصطناعي.
- اقترح داروين أن المجموعات التي تمتلك الصفات التي تزيد من إمكانية البقاء والتّكاثر بنجاح تصبح أكثر تعدادًا في المجموعة.
- يسمى هذا انتخابًا طبيعيًّا، وبلغة داروين: تحدرًا مع التحوير.
- توصل العالم والاس إلى الاستنتاج نفسه بشكل مستقل من خلال دراساته.
- تم اختبار الانتخاب الطبيعي باستخدام بيانات من حقول مختلفة.
  - يبين سجل المستحاثات حلقات وسطية بين مجموعات المخلوقات المختلفة.
  - عمر الأرض، الذي كان يعتقد أنه صغير في عصر داروين، تمت معرفته على أنه 4.5 بلايين سنة باستخدام دراسات معدل التّحلل الإشعاعي.
  - قدمت بحوث مندل وغيرها دليلًا على أن الصفات يمكن أن تورث على هيئة وحدات محددة.
  - قدم علم التشريح المقارن دليلًا على حدوث التّطوّر من خلال دراسة التراكيب المتماثلة.
  - تقدم البيانات الجزيئية من دراسة DNA والبروتينات دليلًا على حدوث التغير عبر الزمن.
  - تدعم شجرة نشوء الأنواع باستخدام البيانات الجزيئية العلاقات بين المخلوقات والملاحظة في سجل المستحاثات.
- الحقائق السابقة مجتمعة تدعم بقوة حدوث التّطوّر عن طريق الانتخاب الطبيعي.
- لم تظهر أي بيانات منذ عهد داروين وحتى الآن تناقض نظرية التّطوّر بشكل منطقي.

4-1 المغزى الموحِّد في علم الأحياء

تندرج الأفكار الموحِّدة في علم الأحياء تحت التخصصات المعقدة الكثيرة في هذا الحقل، وهي:

- نظرية الخليّة تصف الوحدات الأساسية للحياة، وهي أساس لفهم النّموّ والتّكاثر في المخلوقات جميعها.
- المعلومات الوراثية المرمّزة في الجينات توجد في جزيء DNA، وهي تنتقل من جيل إلى الجيل الذي يليه.
- تركيب الجزيئات العضوية ووظيفتها معتمدان على بعضهما.
- تنوع الحياة، ووجود تشابهات في الأساس الموحِّد لها في الكيمياء الحيوية والوراثة تدعم القناعة بأنّ أشكال الحياة جميعها تطورت من مصدر واحد.
- التطور محافظ، والمخلوقات الحية جميعها تشترك في صفات وُجدت في أشكال الحياة الأصلية؛ لأنها تخدم وظيفة مهمة.
- تستطيع الخلايا أن تحس وتستجيب للتغيرات في البيئة من خلال بروتينات موجودة على أغشيتها الخلوية.
- عند كلّ مستوى أعلى من التنظيم التراتبي تظهر صفات طارئة، لم يكن بالإمكان التنبؤ بها من مستويات أدنى من التنظيم.

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. واحد مما يأتي لا يعد خاصية للحياة:
   أ . استخدام الطاقة ب. الحركة
   جـ. النظام د . الاتزان الداخلي
2. الترتيب الصحيح للمستويات التراتبية للأنظمة الحية هو:
   أ . خلويّ، جزيئيّ، مجموعة سكانية، نظام بيئيّ، محيط حيويّ.
   ب. خلويّ، عضيّة، أعضاء، نظام بيئي، مجموعة سكانية.
   جـ. خلويّ، مخلوق فرد، مجموعة سكانية، مجتمع، نظام بيئيّ.
   د . نوع، مجتمع، مجموعة سكانية، نظام بيئي، محيط حيويّ.
3. عملية التّعليل الاستنتاجيّ تتضمن:
   أ . استخدام المبادئ العامة للتنبؤ بنتيجة محددة.
   ب. إنتاج تكهنات محددة بناء على نظام من الاعتقاد.
   جـ. استخدام ملاحظات محددة لتطوير مبادئ عامة.
   د . استخدام المبادئ العامة لدعم فرضية.
4. أفضل طريقة لوصف الفرضية في علم الأحياء هي أنها:
   أ . تفسير محتمل لملاحظة ما.
   ب. ملاحظة تدعم نظرية.
   جـ. مبدأ عام يفسر بعض نواحي الحياة.
   د . مقولة غير متغيرة تتنبأ بشكل صحيح ببعض نواحي الحياة.
5. تجربة باستور في اختبار فرضية الجراثيم مهمة؛ لأنها:
   أ . أثبتت أن الحرارة يمكن أنْ تُعقم البيئة الغذائية السائلة.
   ب. بَيّنت أن الخلايا يمكن أنْ تنشأ تلقائيًّا.
   جـ. بَيّنت أن بعض الخلايا هي جراثيم.
   د . بَيّنت أن الخلايا يمكن أنْ تنشأ فقط من خلايا أخرى.
6. واحد مما يأتي لا يُعدّ مثالًا على الاختزالية:
   أ . تحليل وظيفة الأنزيمات المعزولة في معايرة تجريبية.
   ب. استقصاء أثر هرمون على نمو الخلايا في طبق بتري.
   جـ. ملاحظة التغير في التعبير عن الجينات استجابة لمنبه محدد.
   د . تقييم السلوك الإجمالي للخليّة.
7. النظرية العلمية هي:
   أ . تخمين حول كيفية عمل الأشياء في العالم.
   ب. مقولة (كيف يعمل العالَم) تدعمها البيانات التجريبية.
   جـ. اعتقاد يقول به كثير من العلماء.
   د . أ + جـ.
8. تختلف عملية الانتخاب الطبيعي عن الانتخاب الاصطناعي في أن:
   أ . الانتخاب الطبيعي ينتج تغييرًا أكبر.
   ب. الانتخاب الطبيعي يجعل الفرد أفضل تكيفًا.
   جـ. الانتخاب الاصطناعي هو نتيجة تدخل الإنسان.
   د . الانتخاب الاصطناعي ينتج تكيفًا أفضل.
9. يساعد سجل المستحاثات على دعم نظرية التّطوّر بالانتخاب الطبيعي؛ لأنه:
   أ . يبين أن المخلوقات البسيطة تفترس المخلوقات الأكثر تعقيدًا.
   ب. يقدم دليلًا على حدوث تغير على هيئة المخلوقات عبر الزمن.
   جـ. يبين حدوث التنوع منذ ملايين السنوات التي خلت.
   د . أ + ب.
10. تعد نظرية التّطوّر بالانتخاب الطبيعي مثالًا جيدًا على كيفية تقدم العلم؛ لأنها:
    أ . تفسر الكمية الكبيرة من الملاحظات بصورة معقولة.
    ب. تصنع تكهنات جرى اختبارها بكثير من المقاربات.
    جـ. تمثل اعتقاد داروين حول كيفية الحياة عبر الزمن.
    د . أ + ب.
11. يساعد حقل الوراثة الجزيئية على دعم مفهوم التّطوّر:
    أ . مقارنة الجينات تبين وجود علاقة بين المخلوقات الحية جميعها.
    ب. المخلوقات المختلفة لها محتوى جيني مختلف.
    جـ. تحليل التتابعات يسمح بتحديد هوية جينات متميزة.
    د . يزداد عدد الجينات في مخلوق حي بزيادة درجة تعقيد هذا المخلوق.
12. تنص نظرية الخليّة على أن:
    أ . الخلايا صغيرة.
    ب. الخلايا بالغة التعقيد.
    جـ. هناك نوعًا أساسيًّا واحدًا من الخلايا.
    د . المخلوقات الحية جميعها مؤلفة من خلايا.
13. جزيء DNA مهم للأنظمة البيولوجية؛ لأنه:
    أ . يمكن أن يتضاعف.
    ب. يرمّز المعلومات لصناعة أفراد جديدة.
    جـ. يشكل تركيبًا حلزونيًّا مزدوجًا معقدًا.
    د . النيوكليوتايدات تشكل الجينات.
14. يمكن أن تجد مخلوقات وحيدة الخليّة فقط في (فوق مملكة):
    أ . حقيقية النوى. ب. البكتيريا.
    جـ. البكتيريا القديمة. د . ب + جـ معًا.
15. الثبات التّطوّري يحدث عندما تكون الصفة:
    أ . مهمة لحياة المخلوق.
    ب. لا تتأثر بالتّطوّر.
    جـ. تُختزل إلى شكلها الأقل تعقيدًا.
    د . موجودة في المخلوقات البدائية.

أسئلة تحدٍّ

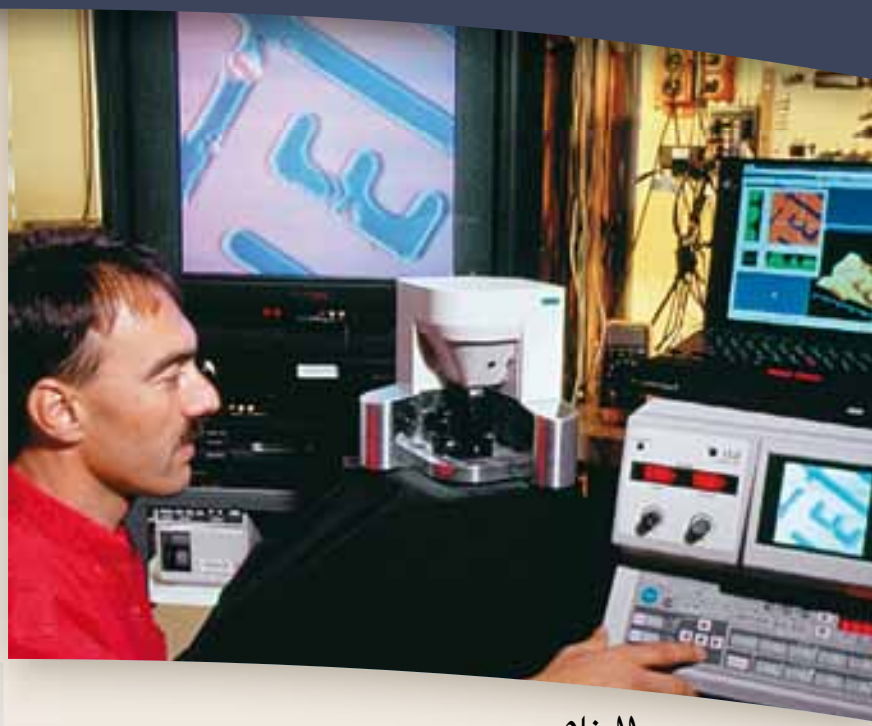
1. علم الأحياء الخارجي Exobiology هو دراسة الحياة على كواكب أخرى. في السنوات الأخيرة، أرسل العلماء سفنًا فضائية عدة داخل المجرة؛ بحثًا عن حياة خارج الكرة الأرضية. بافتراض أن كلّ أشكال الحياة تتشاطر صفات مشتركة، فما الذي يجب أن يفتش عنه عالم الأحياء الخارجي في الوقت الذي يكتشف فيه عوالم أخرى؟
2. التجربة التقليدية التي أجراها باستور (انظر الشكل 1 – 4) اختبرت فرضية أن الخلايا تنشأ من خلايا أخرى. في هذه التجربة، قِيسَ نمو الخلايا عقب تعقيم البيئة الغذائية السائلة في قوارير ذات عنق معقوف، أو في قارورة عنقها مكسور.
   أ . ما المتغيرات التي بقيت نفسها دون تغيير في هاتين التجربتين.
   ب. كيف يؤثر شكل القارورة في التجربة.
   جـ. تنبأ بنتائج كلّ تجربة اعتمادًا على الفرضيتين.
   د . بعض البكتيريا جراثيم قادرة على إنتاج أبواغ مقاومة للحرارة تحمي الخليّة، وتسمح لها بأن تستمر في النّموّ بعد أن تبرد البيئة. كيف يمكن أن تكون نتائج هذه التجربة قد تأثرت لو كانت البكتيريا المكونة للأبواغ موجودة في البيئة الغذائية السائلة.

هل أنت في حاجة إلى مراجعة إضافية؟ زر الموقع www.ravenbiology.com. لتتدرب على الاختبارات القصيرة، والرسوم المتحركة، والتسجيلات التلفزيونية، وأنشطة مخصصة لمساعدتك على فهم المادة الموجودة في هذا الفصل.

الفصل 2

طبيعة الجزيئات

The Nature of Molecules



موجز المفاهيم

2-1 طبيعة الذّرّات

- *التّركيب الذّريّ يتضمن نواة مركزية وإلكترونات مداريّة*
- *تحدد الإلكترونات الخصائص الكيميائيّة للذّرّات.*
- *تتضمن الذّرّات مستويات طاقة منفصلة.*

2-2 عناصر موجودة في الأنظمة الْحيويّة

- *يُصنّف الجدول الدّوريّ العناصر بحسب العدد الذّريّ والخصائص الكيميائيّة.*

2-3 طبيعة الروابط الكيميائيّة

- *الروابط الأيونيّة تكوّن بلّورات.*
- *الروابط التساهمية تبني جزيئات مستقرة.*
- *التفاعلات الكيميائيّة تغير الروابط.*

2-4 الماء: مركب حيوي

- *تركيب الماء يسهل تكوين الروابط الهيدروجينيّة.*
- *جزيئات الماء لها قوى تماسك.*
- *جزيئات الماء لها قوة تلاصق.*

2-5 خصائص الماء

- *السعة الحرارية العالية للماء تساعد في الحفاظ على درجة الحرارة.*
- *درجة تبخير الماء العالية تعمل على تلطيف درجة الحرارة.*
- *الماء الصّلب أقل كثافة من الماء السائل.*
- *خصائص الماء بوصفه مذيبًا مُذيب تساعد على تحريك الأيونات والجزيئات المستقطبة.*
- *يُعطي الماء بنية عضوية للجزيئات غير المستقطبة.*
- *المحاليل المنظمة (الدارئة) تُحافظ على ثبات قيم pH.*

2-6 الأحماض والقواعد

- *مقياس الرقم الهيدروجيني يقيس تركيز أيون الهيدروجين.*
- *تساعد المحاليل المنظمة على ثبات الرقم الهيدروجيني.*

مقدّمة

من المرجح أنّ بدء الكون قد تحدد قبل نحو 12.5 بليون سنة نتيجة لحدوث انفجار هائل. وهذا الانفجار أدّى إلى بدء عملية بناء كواكب مجموعتنا الشّمسيّة، الذي أدّى بدوره إلى تكوين الأرض قبل نحو 4.6 بلايين سنة. أما الحياة على الأرض، فقد بدأت وتنوعت قبل نحو 3.5 بلايين سنة. لفهم طبيعة الحياة على الأرض، كان لا بدّ أولًا من فهم طبيعة المادة التي كونت لبنات البناء لكلّ أنواع الحياة.

بدءًا بالتخمينات البدائية عن العالم من حولنا، فإنّ السؤال الأساسيّ جدًّا كان دائمًا: «ممّ يتكون؟» اعتقد قدماء اليونان أنّ الأشياء الأكبر ربما بنيت من الأجزاء الأصغر. ولكن هذا المفهوم لم يُبرهن عمليًّا حتى بداية القرن العشرين، عندما بدأ علماء الفيزياء بمحاولة تفكيك الذّرّات. من هذه البدايات المتواضعة، وحتى ظهور المسارعات الذرية الضخمة المستعملة حاليًا، فإنّ التصور الذي نشأ بخصوص عالَم الذّرّة مختلف كليًّا عن العالَم الذي يُرى من حولنا.

لنتمكن من فهم كيفية تكوين الأنظمة الْحيويّة، لا بدّ من البَدْءِ بفهم القليل عن التركيب الذّريّ، عن كيفية ربط الذّرّات ببعضها عن طريق الروابط الكيميائيّة لتكوين الجزيئات، وعن طرق التقاء الجزيئات الصغيرة معًا لتكون الجزيئات الأكبر، حتى نصل في النهاية إلى تركيب الْخليّة. وهكذا، فإنّ دراستنا للحياة على الأرض تبدأ بالفيزياء والكيمياء. لكثير منكم، فإنّ هذا الفصل هو مراجعة للمادة التي تمَّ التعرض لها في مقررات علمية أخرى.

1-2 طبيعة الذّرّات

تتصف **المادة Matter** بأنها كلّ ما له كتلة ويشغل حيزًا في الكون. تتكون المادة كلّها من وحدات صغيرة جدًا تسمى **الذّرّات Atoms** التي يصعب دراستها؛ لصغر حجمها. منذ بداية القرن الماضي، تمكّن العلماء من إجراء التجارب الأولى التي تُظهر طبيعة الذّرّات الفيزيائية.

التّركيب الذّريّ يتضمن نواة مركزية وإلكترونات مداريّة

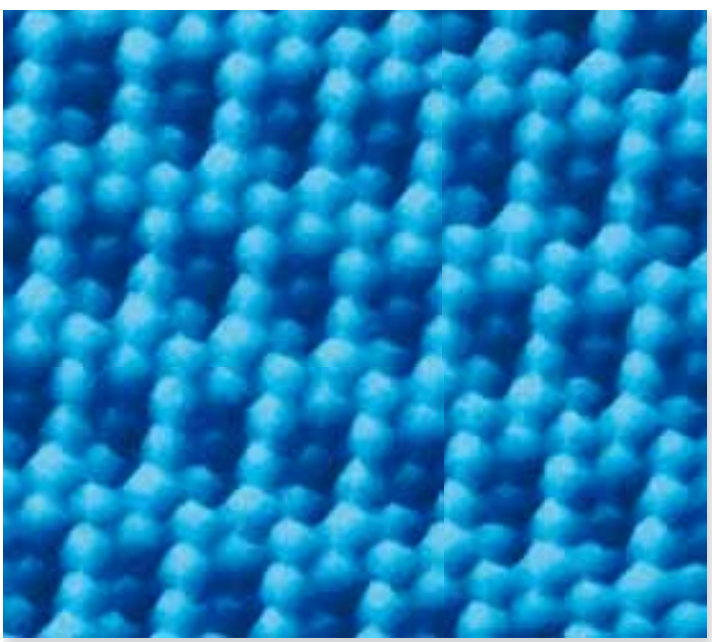
الأشياء الصغيرة الحجم كالذّرّات يمكن رؤيتها فقط بصورة غير مباشرة عن طريق استخدام التكنولوجيا المعقدة مثل المجاهر الماسحة النفقية (الشكل 2 - 1).

حاليًا نعرف الكثير عن تعقيدات التركيب الـذّريّ، ولكن النظرة البسيطة التي وضعها عالِم الفيزياء الدانماركي نيل بوُوَر عام 1913 وفرت نقطة انطلاق جيدة لفهم نظرية الذّرّة.

اقترح بوُوَر Bohr أنّ كل ذرة تمتلك سحابة مداريّة مكونة من جسيمات صغيرة جدًا تسمى **إلكتروناتُ Electrons** تدور بشكل سريع حول نقطة مركزية مشبهًا إياها بكواكب نظام شمسيّ مصغّر. في وسط كلّ ذرة، توجد نواة صغيرة، كثيفة جدًا تتكون من نوعين آخرين من الجسيمات: **البروتونات والنيوترونات Protons** and **neutrons** (الشكل 2-2).

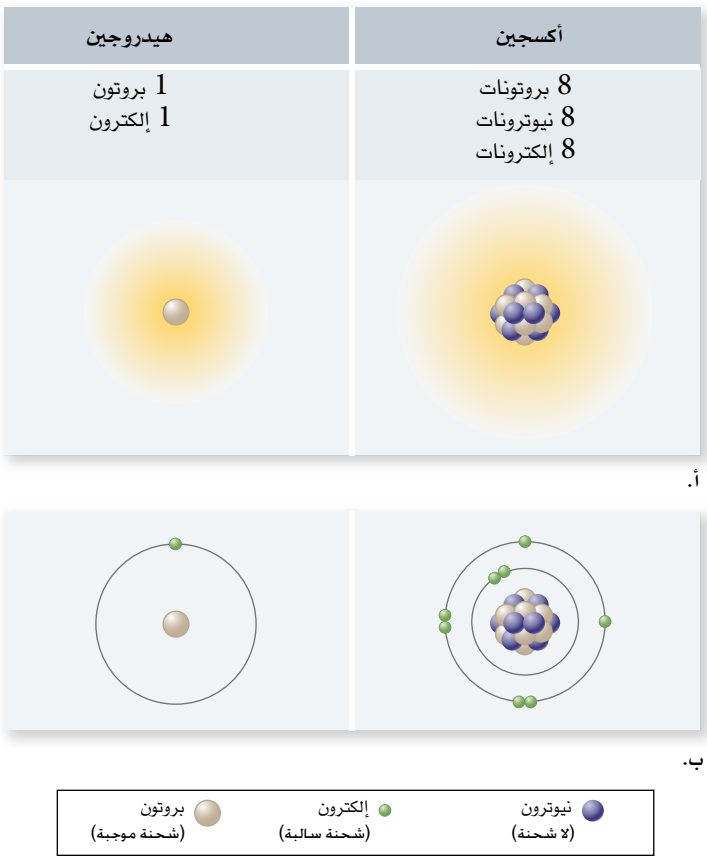
العدد الذّريّ والعناصر

داخل النواة، ترتبط مجموعة البروتونات والنيوترونات مَعَ بعضها عن طريق قوى تعمل فقط ضمن مسافات تحت ذرية قصيرة. كلّ بروتون يحمل شحنة موجبة (+)، وكلّ نيوترون لا يحمل أيّ شحنة. أما الإلكترونات فتحمل شحنة سالبة (-). وعادة، تمتلك الذّرّة إلكترونًا واحدًا مقابل كلّ بروتون، ولهذا فهي متعادلة كهربائيًّا. يكمن اختلاف الذّرّات في عدد البروتونات، وهذه القيمة تسمى **العدد الذّريّ Atomic number**. يُعزى السلوك الكيميائي للذّرّة إلى عدد الإلكترونات وتوزيعها، كما سنرى لاحقًا في هذا الفصل. الـذّرّات التي لها العدد الـذّريّ نفسه (أيّ، عدد البروتونات نفسه) لها الخصائص الكيميائيّة نفسها. ويُقال: إنها تنتمي إلى العنصر نفسه. والجدير بالذكر، أن **العنصر Element** هو أيّ مادة لا يمكن تكسيرها إلى مادة أخرى بالوسائل الكيميائيّة العاديّة.



الشكل 2-1

صورة أُخذت عن طريق المجهر النفقي الماسح. المجهر النفقي الماسح هو أسلوب غير بصري للتصوير. يُمرر مسبار ينتهي بذرة واحدة فوق سطح المادة التي يُراد تصويرها. تسمح التأثيرات الكَميّة بين المسبار والسطح بالتصوير. تُظهر هذه الصورة شبكة من ذرات الأكسجين (تظهر باللون الأزرق الداكن) فوق بلّورة روديوم (تظهر باللون الأزرق الفاتح).



الشكل 2-2

البنية الأساسية للذّرّة. الـذّرّات جميعها لها نـواة تتكون من البروتونات والنيوترونات، باستثناء الهيدروجين، أصغر الذّرّات، الذي تحتوي نواته عادة على بروتون واحد فقط دون نيوترونات. الأكسجين، على سبيل المثال، تحتوي نواته على ثمانية بروتونات وثمانية نيوترونات. في "نموذج بوُوَر" المبسط للذرات المصورة هنا، تدور الإلكترونات حول النواة عبر مسافة بعيدة نسبيًّا.

أ. يُظهر الشكل الـذّرّات مشتملة على نواة محاطة بسحابة من الإلكترونات. المقياس الذي تشغله السحابة غير واقعي.

ب. تظهر الإلكترونات في مستويات طاقة محددة منفصلة. وسيرد وصف لهذه الأمور بمزيد من التفصيل في النص وفي الشكلين الآتيين.

الكتلة الذرية

غالبا ما يُستخدم المصطلحان كتلة *Mass* ووزن *Weight* بالتبادل، لكنهما مختلفان قليلًا في المعنى؛ فالكتلة تشير إلى كمية المادة، لكن الوزن يُشير إلى قوة الجاذبية التي تُمارس على المادة. فشيء ما ستكون له الكتلة نفسها فيما إذا كان على الأرض أو على القمر، لكن وزنه سيكون أكبر على الأرض؛ لأنّ قوة الجاذبية الأرضية أكبر من تلك التي للقمر. **الكتلة الذرية Atomic mass** لذرة ما تساوي مجموع كتل البروتونات والنيوترونات التي تحتويها. والذّرّات التي توجد بشكل طبيعي على الأرض تحتوي على عدد من البروتونات يتراوح بين 1 إلى 92، وعدد من النيوترونات يصل إلى 146.

يُستعمل في قياس كتلة الذّرّات والجسيمات تحت الذرية وحدات تسمى دالتون *Daltons*. لإعطائك فكرة عن مدى صغر هذه الوحدات، لاحظ أنّ الأمر يتطلب 602 مليون مليون بليونًا (6.02×10^{23}) دالتون لعمل جرام واحد. فوزن البروتون يساوي نحو 1 دالتون (فعليًّا 1.007 دالتون)، كذلك النيوترون (1.009 دالتون). عكس ذلك، تزن الإلكترونات $\frac{1}{1840}$ من الدالتون فقط، ومن ثم فإنّ مساهمتها في الكتلة الكلية للذّرّة تكاد تكون ضئيلة.

الإلكترونات

تتعادل الشحنات الموجبة في نواة الذّرّة مَعَ الإلكترونات السالبة الشحنة، التي تقع في مناطق تسمى **مدارات Orbitals** تقع على أبعاد مختلفة حول نواة الذّرّة. الذّرّات التي يتساوى فيها عدد البروتونات والإلكترونات تكون متعادلة كهربائيًّا، أي ليس لها شحنة، وتسمى **الذّرّات المتعادلة Neutral atoms**.

تظل الإلكترونات في مداراتها بفعل تجاذبها مَعَ النواة الموجبة الشحنة. أحيانًا، تتغلب قوى أخرى على هذا التجاذب، ما يؤدي إلى فقدان أو اكتساب الذّرّة لواحد أو أكثر من إلكتروناتها. الذّرّات التي لا يتساوى فيها عدد الإلكترونات مَعَ عدد البروتونات تسمى **أيونات Ions**، وهي جسيمات مشحونة. والذّرّة التي تحتوي عدد بروتونات أكثر من عدد الإلكترونات تحمل شحنة موجبة، تسمى أيونًا **موجب الشحنة Cation**. مثال على ذلك، ذرة الصوديوم (Na) التي فقدت إلكترونًا واحدًا تصبح أيون الصوديوم (Na^+)، ولها شحنة موجبة واحدة (1+). والذّرّة التي تحتوي على عدد بروتونات أقل من عدد الإلكترونات تحمل شحنة سالبة، تُسمى **أيونًا سالب الشحنة Anion**. فذرة الكلور (Cl) التي كسبت إلكترونًا واحدًا تصبح أيون الكلوريد (Cl^-)، وله شحنة سالبة واحدة (1-).

النّظائـر

مَعَ أنّ ذرات العنصر جميعها لها عدد البروتونات نفسه، فمن الممكن ألا يكون لجميعها عدد النيوترونات نفسه. تسمى ذرات العنصر الواحد التي تمتلك أعدادًا مختلفة من النيوترونات **نظائر Isotopes** لذلك العنصر.

معظم العناصر في الطبيعة توجد على شكل خليط من نظائر مختلفة. فمثلًا، عنصر الكربون (C)، له ثلاثة نظائر، جميعها تحتوي على 6 بروتونات (الشكل 3-2). وأكثر من 99% من الكربون الموجود في الطبيعة يوجد نظيرًا يحتوي كذلك على 6 نيوترونات. ولأن الكتلة الكلية لهذا النظير تساوي 12 دالتونًا (ستة من البروتونات وستة من النيوترونات)، فإنّه يشار إليه بكربون 12، ويرمز إليه بالرمز C^{12}. معظم ما تبقى من الكربون الموجود في الطبيعة هو كربون 13، وهو نظير يحتوي على 7 نيوترونات. نظير الكربون الأكثر ندرة هو الكربون 14، وله ثمانية نيوترونات. وخلافًا للنظيرين الآخرين، فإنّ كربون 14 غير مستقر: إذ تلجأ نواته للتفكك إلى عناصر لها أعداد ذرية أصغر. هذا التفكك الذّرّيّ، يُطلق كمية لا بأس بها من الطاقة، ويسمى هذا الانحلال الإشعاعي *Radioactive decay*، والنظائر التي تنحل بهذه الطريقة هي **نظائر مشعة Radioactive isotopes**.

بعض النظائر المشعة أكثر عدم استقرار من غيرها، ولهذا فهي تنحل بشكل أسرع لأي نظير معين، من ناحية أخرى، يكون معدل التحلل ثابتًا. يُعبّر عادة عن معدل التحلل **بالزمن النصفي Half-life**، وهو الزّمن الضروري لتفكك نصف عدد الذّرّات في عينة ما. على سبيل المثال، يُستعمل الكربون 14، عادة في تحديد تاريخ الأحافير والمستحاثات، وله عمر نصفي يساوي 5730 سنة. فعينة من الكربون تحتوي على جرام واحد من الكربون 14 اليوم، ستحتوي على 0.5 جرام من الكربون14 بعد 5730 سنة، 0.25 جرام بعد 11.460 سنةً من الآن، 0.125 جرام بعد 17.190 سنةً من الآن، وهكذا. فبتحديد نسب النظائر المختلفة للكربون، وعناصر أخرى في العينات الحيويّة وفي الصخور، تمكن العلماء من تحديد متى تكونت هذه المواد بدقة.

للنشاط الإشعاعي تطبيقات عدة مفيدة في علم الحياة الحديث. والنظائر المشعّة هي أحد طرق تحديد، أو تمييز جزيء محدد، ومن ثمّ تتبع مصيره، إما خلال تفاعل كيميائي، أو داخل خلايا حيّة ونسيج. الجانب السيئ في الأمر، من ناحية أخرى، هو أن الجسيمات الحرارية التي تُطلق من المواد المشعة لها القدرة على تدمير الخلايا الحيّة بشكل خطير، مؤدية لحدوث طفرات وراثية، وإذا أُطلقت بكميات كبيرة، فإنّها تؤدي إلى موت الخلايا. وبناء على ذلك، فإنّ التعّرض للأشعة خاضع وباهتمام كبير للضبط والتنظيم. فالعلماء الذين يعملون في مجال الإشعاع يتبعون اتفاقيات دولية مشدّدة، ويحملون شارات حسّاسة للأشعة لضبط قوة النشاط الإشعاعي الذي يتعرضون له مَعَ الزمن للتأكد من تعرضهم للمستوى الآمن من الأشعة.

الإلكترونات تحدد الخصائص الكيميائيّة للذرات

كما ذكر سابقًا، يكمن مفتاح السّلوك الكيميائيّ للذّرّة في عدد إلكتروناتها وترتيبها في مداراتها. يبين نموذج بـوُوَر للذّرّة إلكترونات منفردة تتبع مـدارات دائرية محددة حول نواة مركزية؛ لكن، هذه الصورة مبسطّة لا تُظهر واقع الحال. يُبين

الشكل 2-3

نظائر الكربون الثلاثة الأكثر وفـرة. نظائر عنصر معين لها أعداد مختلفة من النيوترونات.

علم الفيزياء الحديث أنّه من غير الممكن تحديد موقع أيّ إلكترون بدقة في وقت محدد. وفي الواقع، فإنه من الممكن للإلكترون أن يوجد في أي مكان، قريبًا من النواة أو بعيدًا عنها إلى أبعد الحدود.

من ناحية أخرى، من المحتمل وجود إلكترون محدد في بعض الأمكنة دون غيرها. يُعرّف المدار بأنه المساحة حول نواة الذّرّة، حيث الاحتمال الأكثر لوجود الإلكترون. تمثل هذه المدارات التوزيعات المحتملة للإلكترونات، أي المناطق ذات الاحتمال العالية لاحتواء إلكترون. بعض مدارات الإلكترونات القريبة من نواة الذّرّة تكون كروية الشكل (s orbitals)، في حين تكون أخرى على شكل الدمبل (p orbitals) (الشكل 2-4). كذلك هناك مدارات أخرى، أكثر بعدًا عن النواة، يمكن أنْ يكون لها أشكال مختلفة. وبغض النظر عن شكله، فليس هناك مدار يمكن أن يحتوي على أكثر من إلكترونين.

حجم الذّرّة كله فضاء فارغ تقريبًا؛ لأن الإلكترونات في معدلها بعيدة جدًا عن النواة، مقارنة مَعَ حجمها. فلو شبهنا حجم نواة الذّرّة بحجم كرة الجولف، فسيبعد المدار الأقرب للنواة نحو ميل عنها. ولهذا، فنواتا ذرتين لن تقتربا أبدًا في طبيعة المسافة الكافية لهما للتفاعل مَعَ بعضهما. ولهذا السبب، فإنّ إلكترونات الذّرّة، وليس بروتوناتها أو نيوتروناتها، هي التي تحدد الخصائص الكيميائيّة لها، وتُفسركذلك، لماذا نظائر عنصر ما، التي جميعها تمتلك ترتيب الإلكترونات نفسه، تسلك الطريقة نفسها كيميائيًّا.

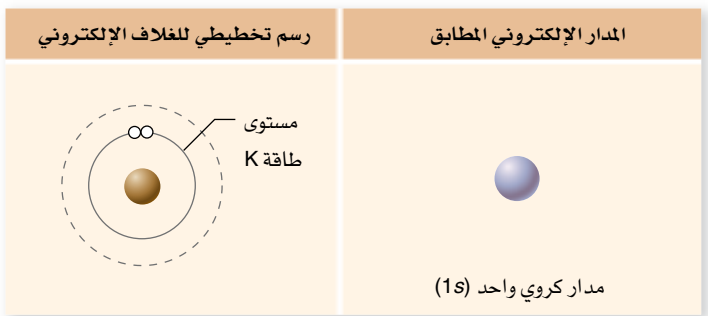
تحتوي الذّرّات على مستويات طاقة محدودة

لأنّ الإلكترونات منجذبة إلى النواة موجبة الشحنة، فإنّ الأمر يتطلب بذل شغلٍ لإبقائها في مداراتها، تمامًا كالشغل الذي يُتطلب للحفاظ على ثمرة الجريب فروت في يدك من السقوط بفعل الجاذبية الأرضية. التعريف الاصطلاحي للطاقة، الذي يحتمل أنّك تتذكره، هو؛ القدرة على إنجاز شغل.

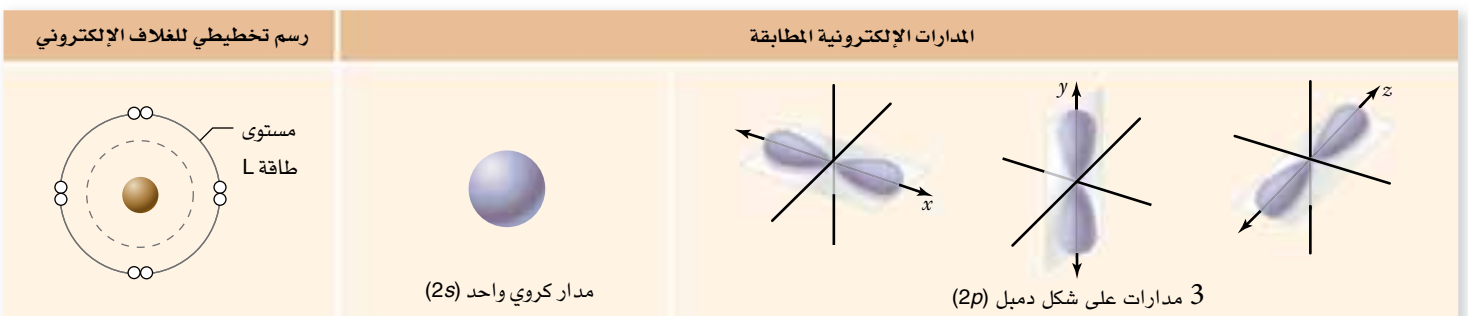
يقال: إن ثمرة الجريب فروت المحمولة فوق الأرض تمتلك **طاقة كامنة** نتيجة لموقعها؛ فلو أفلتّها، ستسقط وتنقص طاقتها الكامنة. عكس ذلك، لو حملت الثّمرة إلى قمة بناء، فإنك ستزيد طاقتها الكامنة. الإلكترونات كذلك تمتلك طاقة كامنة مرتبطة بموقعها. مقاومة جذب النواة وتحريك الإلكترون لمدار أبعد يتطلب اكتساب طاقة، مؤديًا إلى إلكترون يمتلك طاقة كامنة أكبر. يمتص الكلوروفيل طاقة من الضوء في أثناء عملية البناء الضوئي بهذه الطريقة، كما سترى في (الفصل 8) الطاقة الضوئية تهيج الإلكترونات في جزيء الكلوروفيل. إن تحريك إلكترون قريبًا من النواة له تأثير متضاد: تُطلَق الطاقة، عادة بوصفها طاقة إشعاع (حرارة أو ضوء)، وينتهي الإلكترون بطاقة كامنة أقل (الشكل 2-5).

أحد الأمور التي كانت تدعو للدهشة في بادئ الأمر بالنسبة إلى التركيب الذّرّيّ هو أنّ الإلكترونات في الذّرّة مقيدة **بمستويات طاقة محددة Energy levels**. هذه المستويات المنفصلة لكل منها مقدار محدد من الطاقة. فلو عدنا إلى مثال ثمرة الجريب فروت مرة ثانية، فكأنّ هذه الثمرة يمكن رفعها فقط إلى طوابق محددة من بناء. كلّ ذرة تظهر سلمًا من قيم الطاقة الكامنة، أي مجموعة منفصلة من المدارات عند «مسافات» طاقة محددة من النواة.

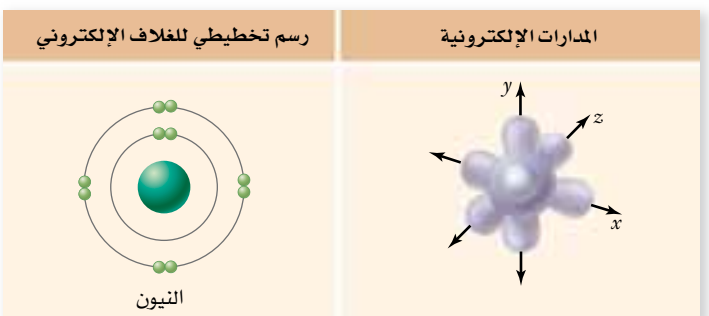
ولأنّ كمية الطاقة التي يمتلكها الإلكترون مرتبطة مَعَ المسافة التي تبعده عن النواة، فإنّ الإلكترونات التي تتساوى في بعدها عن النواة لها الطاقة نفسها، حتى لو كانت تشغل مدارات مختلفة. هذه الإلكترونات يقال: إنها تشغل مستوى الطاقة نفسه. يُرمز إلى مستويات الطاقة بالأحرف K,L,M، وهكذا (الشكل 2-5). يُرجى



أ.



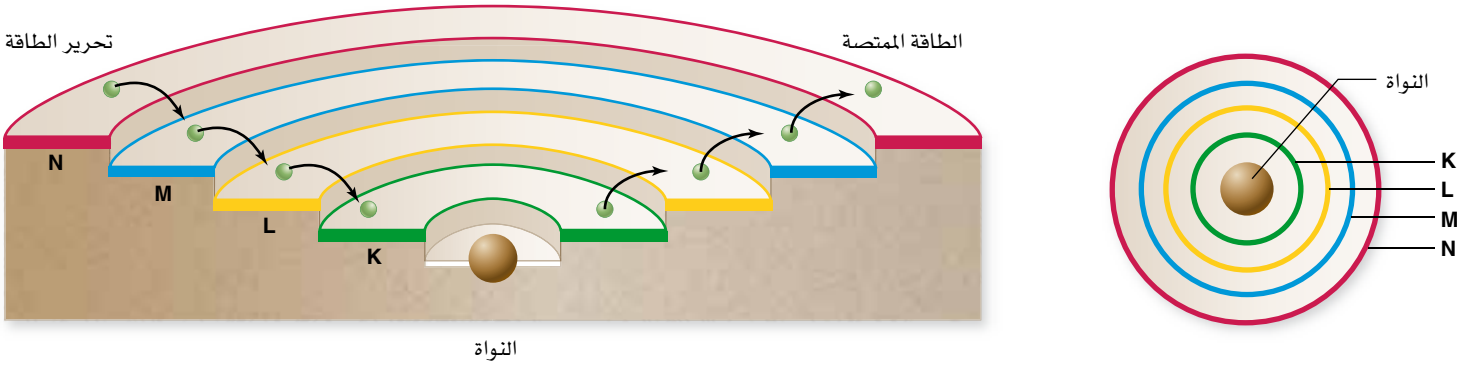
ب.



جـ.

الشكل 2-4

مدارات الإلكترونات. أ. مستوى الطاقة الأقل أو الغلاف الإلكتروني – الأقرب للنواة – هو مستوى K يُشغل بمدار s واحد، يُعبّر عنه بـ 1s. ب. مستوى الطاقة الأعلى اللاحق،L، يُشغل بأربعة مدارات: مدار s واحد (يُشار إليه بمدار $2s$) وثلاثة مدارات p (يُشار إلى كلّ منها بمدار $2p$). يحتوي كلّ مدار على إلكترونين مرتبطين لهما دوران باتجاهين متضادين. ولهذا، فإنّ مستوى K يُشغل بإلكترونين، ومستوى L يُشغل بما مجموعه ثمانية إلكترونات. جـ. ذرة النيون الظاهرة في الشكل لها مستويات طاقة L و K ممتلئة كليًّا بالإلكترونات، ولهذا فهي خاملة.

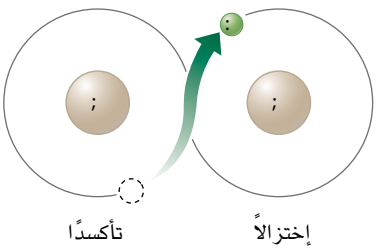


الشكل 2-5

مستويات الطاقة في الذّرّة. تمتلك الإلكترونات طاقة وضع. عندما تمتص الذّرّة طاقة، ينتقل إلكترون إلى مستوى طاقة أعلى، بعيدًا عن النواة. عندما يسقط إلكترون إلى مستويات طاقة أدنى، أي أقرب إلى النواة، تُطلق الطاقة. أول مستويي طاقة هما نفسهما، كما يظهران في الشكل السابق.

الانتباه إلى عدم الخلط بين مستويات الطاقة، التي رُسمت على شكل حلقات؛ لتبين طاقة إلكترون، مَعَ المدارات، التي لها مجموعة منوعة من الأشكال ذات الأبعاد الثلاثة، وتُبين الموقع الأكثر احتمالًا للإلكترون. مدارات الإلكترونات مرتبة، بحيث إنه عند ملئها، يتم ملء كلّ مستوى طاقة بشكل متتابع. ملء المدارات هذا ومستويات الطاقة هما المسؤولان عن النشاط الكيميائي للعناصر.

خلال بعض التفاعلات الكيميائيّة، تنتقل الإلكترونات من ذرة إلى أخرى. في هذه التفاعلات، يُسمّى فقد إلكترون **تأكسدًا Oxidation**، ويُسمّى كسب إلكترون **اختزالًا Reduction**.



ومن الملاحظ أنّه عند انتقال إلكترون بهذه الطريقة، فإنه يحافظ على طاقة الوضع لديه. في المخلوقات الحية تُخزّن الطاقة الكيميائيّة في الإلكترونات ذات الطاقة العالية التي تنتقل من ذرة إلى أخرى في تفاعلات تتضمن تأكسدًا واختزالًا (تم شرحها في الفصل 7). ولأن التأكسد والاختزال يمكن مقارنتهما، كذرة واحدة أو جزيء يتأكسد في حين يُختزل آخر في التفاعل نفسه، فإننا نسمي ذلك تفاعلات التأكسد والاختزال *Redox reactions*.

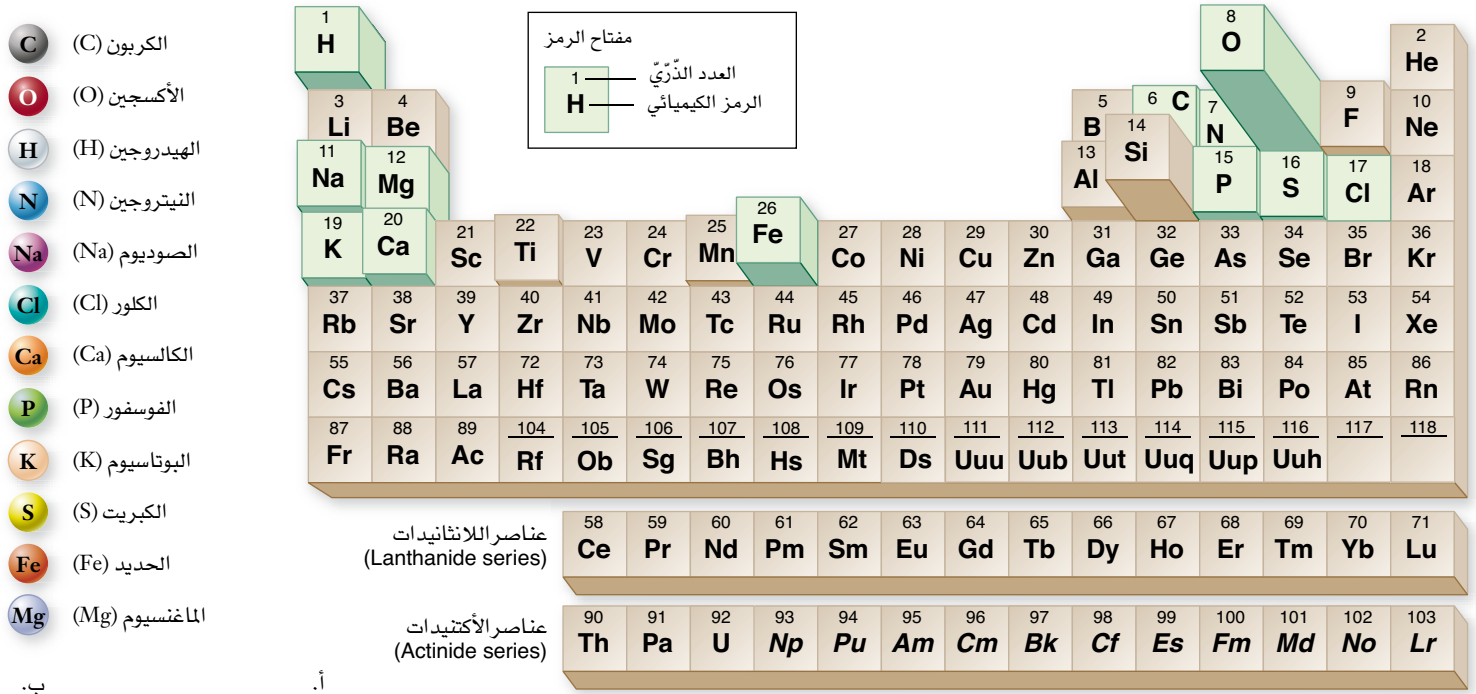
تتكون الذّرّة من نواة تضم البروتونات والنيوترونات مُحاطة بسحابة من الإلكترونات. عدد الإلكترونات يحدّد بشكل كبير الخصائص الكيميائيّة للذّرّة. الذّرّات التي لها عدد البروتونات نفسه، ولكن عدد النيوترونات فيها مختلف تسمى نظائر. تختلف نظائر الذّرّة في الكتلة الذرية، لكن لها الخصائص الكيميائيّة نفسها. تقع الإلكترونات في مناطق حول النواة تسمى مدارات. لا يمكن أن يحتوي المدار الواحد على أكثر من إلكترونين، لكن مدارات عدّة يمكن أن تبعد المسافة نفسها عن النواة، ومن ثم، تحتوي على إلكترونات لها الطاقة نفسها.

2-2 عناصر موجودة في الأنظمة الحيويّة

يوجد 90 عنصرًا في الطبيعة، كلّ منها له عدد بروتونات مختلف، وترتيب إلكترونات مختلف كذلك. عندما قام عالِمُ الكيمياء الروسي ديمتري مندلييف في القرن التاسع عشر بترتيب العناصر المعروفة في جدول بحسب أعدادها الذرية توصل إلى اكتشاف يُعدّ واحدًا من أهم المبادئ العامة في العلوم. تُظهر العناصر نمطًا من الخصائص الكيميائيّة يعيد نفسه في مجموعات من ثمانية. هذا النموذج المتكرر المنتظم أعطى الجدول اسمه: الجدول الدّوريّ للعناصر (الشكل 2-6).

يُصنف الجدول الدّوريّ العناصر بحسب العدد الذّرّيّ والخصائص الكيميائيّة

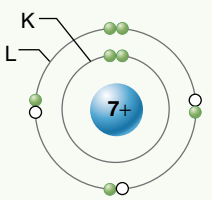
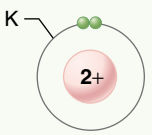
إن ثمانيّات مندلييف تعتمد على تفاعل إلكترونات في المستوى الرئيس الأخير للعناصر المختلفة. هذه الإلكترونات تُسمى **إلكترونات التكافؤ** (أو المستوى الأخير) **Valence electrons**، وتفاعلاتها هي الأساس في اختلاف الخصائص الكيميائيّة للعناصر. فلمعظم الذّرّات المهمة للحياة، لا يستطيع مستوى الطاقة الأخير أن يتسع لأكثر من ثمانية إلكترونات؛ ويعكس السلوك الكيميائي للعنصر كم من الأماكن الثمانية يكون ممتلئًا. فالعناصر التي تمتلك الثمانية إلكترونات كلّها في مستوى الطاقة الأخير لها (اثنان للهيليوم) تكون **خاملة Inert**، أو غير تفاعلية، وهذه العناصر، التي تشتمل الهيليوم (He)، والنيون (Ne)، والأرجون (Ar)، تسمى الغازات النبيلة *Noble gases*. أما الغازات **الصارخة**، فتكون لعناصرها سبعة إلكترونات (أقل بواحد من الحد الأعلى، وهو ثمانية) في مستوى الطاقة الأخير، كالفلورين (F)، والكلورين (Cl)، والبرومين (Br)، شديدة التفاعل. إذ تلجأ إلى كسب الإلكترون الإضافي الذي تحتاج إليه لملء مستوى الطاقة الأخير. العناصر التي لها إلكترون واحد في مستوى الطاقة الأخير كالليثيوم (Li)، والصوديوم (Na) والبوتاسيوم (K)، هي أيضًا شديدة التفاعل؛ إذ تلجأ لفقد الإلكترون الوحيد الموجود في مستواها الأخير.



الشكل 2-6

الجدول الدّوريّ للعناصر. أ. في هذا العرض، تردُّد العناصر التي توجد في قشرة الأرض يتم تبيانه عن طريق عُلو المكعب. توجد العناصر المظللة بالأخضر في الأنظمة الْحيويّة بكميات أكثر من ضئيلة (نادرة). ب. العناصر الشائعة التي توجد في الأنظمة الْحيويّة تظهر بألوان سيتم استعمالها خلال النص.

يقود جدول مندلييف الدّوريّ إلى مبدأ مفيد، أيْ إلى **قانون الثُّمانيات Octet rule** (لاتيني *octo*، "ثمانٍ"). تحاول الذّرّات تأسيس مستويات طاقة أخيرة ممتلئة تمامًا. فلعناصر المجموعة الرئيسة للجدول الدّوريّ يتحقق قانون الثمانيات بمدار s واحد ممتلئ، وثلاث مدارات p ممتلئة (الشكل 2-7). يُستثنى من ذلك عنصر الهيليوم (He)، في الصفّ الأول، الذي يحتاج فقط إلى إلكترونين لملء المدار 1s. معظم السلوك الكيميائي ذو الاهتمام البيولوجي يمكن التنبؤ به بدقة من هذا القانون البسيط، إضافة إلى ميل الذّرّات لمعادلة الشحنات الموجبة والسالبة. مثلًا، قرأت سابقًا أنّ أيون الصوديوم (Na^+) فقد إلكترونًا، وأيون الكلور كسب إلكترونًا. في الفقرة الآتية، سنصف كيف تتفاعل هذه الأيونات لتكون ملحَ الطعام.

نشطة (متفاعلة)	خاملة (غير متفاعلة)
7 بروتونات 7 نيوترونات 7 إلكترونات	بروتونان نيوترونان إلكترونان
	
النيتروجين	الهيليوم

الشكل 2-7

مستويات طاقة الإلكترونات للهيليوم والنيتروجين. الكرات الخضراء تُمثل الإلكترونات، والكرة الزرقاء تُمثل النواة محتوية على عدد من البروتونات يُشار إليها بعدد الشحنات الموجبة (+). لاحظ أنّ ذرة الهيليوم لها فلك K ممتلئ، ولهذا فهي خاملة، في حين تمتلك ذرة النيتروجين خمسة إلكترونات في فلك L، ثلاثة منها غير مرتبطة، جاعلة الذّرّة نشطة.

من العناصر التسعين الموجودة طبيعيًّا على الأرض، يوجد فقط اثنا عشر منها (C ، H ، O ، N ، P ، S ، Na ، K ، Ca ، Mg ، Fe ، Cl) في الأنظمة الْحيويّة بكميات أكثر من ضئيلة (0.01% أو أعلى). هذه العناصرجميعها لها أعداد ذرية أقل من 21، ولهذا، لها كتل ذرية منخفضة. من هذه، أربعة عناصر (الكربون، الهيدروجين، الأكسجين، والنيتروجين) تشكل 96.3% من وزن جسمك. معظم الجزيئات التي تُكون جسمك هي مركبات من الكربون، التي نسميها **مركبات عضوية Organic**. تحتوي هذه المركبات العضوية بشكل رئيس هذه العناصر الأربعة (CHON) ما يوضح سبب وجودها بشكل كبير في الأنظمة الْحيويّة. بعض العناصر التي توجد بكميات ضئيلة جدًا، مثل الزنك (Zn) واليود (I)، تؤدي دورًا مهمًّا جدًا في العمليات الْحيويّة مَعَ أنها موجودة بكميات ضئيلة. نقص اليود، على سبيل المثال، يمكن أنْ يؤدي إلى تضخم في الغدة الدرقية، ما يؤدي إلى انتفاخ في منطقة العنق يسمى مرض الجويتر Goiter.

يُظهر الجدول الدّوريّ العناصر مرتبة بحسب العدد الذّرّيّ والصفات الدّوريّة. يوجد 12 عنصرًا فقط بكميات ذات أهمية في المخلوقات الحيّة.

3-2 طبيعة الرّوابط الكيميائيّة

ترتبط مجموعة من الـذّرّات مَعَ بعضها عن طريق طاقة في تجمع ثابت يسمى **جزيء Molecule**. وعندما يحتوي جزيءٌ ذرات لأكثر من عنصر واحد، يُسَمَّى **مركبًا Compound**. ترتبط الـذّرّات في جزيء **بروابط كيميائية Chemical bonds** ؛ هذه الروابط يمكن أنْ تنشأ عندما تنجذب ذرات تحمل شحنات متضادة (الروابط الأيونيّة)، أو عندما تتشارك ذرتان بزوج أو أكثر من الإلكترونـات (روابط تساهمية)، أو عندما تتفاعل الذّرّات بطرق أخرى (الجدول 2 - 1). سنبدأ بدراسة **الروابط الأيونيّة Ionic bonds**، التي تحدث عند تجاذب ذرات تحمل شحنات متضادة (أيونات).

الروابط الأيونيّة تُكون بلّورات

ملح الطعام الشائع، أو جزيء كلوريد الصوديوم ($NaCl$)، هو بلّورة من الأيونات، ترتبط الذّرّات فيها بروابط أيونية (الشكل 2-8). يمتلك الصوديوم 11 إلكترونًا: اثنان في مستوى الطاقة الداخلي (K)، وثمانية في المستوى الثاني (L)، وواحد في المستوى الأخير (M). فالإلكترون الوحيد، غير المرتبط في المدار الأخير له ميل شديد لينضمَّ مَعَ إلكترون وحيد آخر غير مرتبط في ذرة أخرى. يمكن أنْ يتحقق شكل مستقر إذا فُقد إلكترون المدار الأخير لمصلحة ذرة أخرى لها أيضًا إلكترون غير مرتبط. فقدان هذا الإلكترون يؤدي إلى تكوين أيون الصوديوم الموجب الشحنة، Na^+.

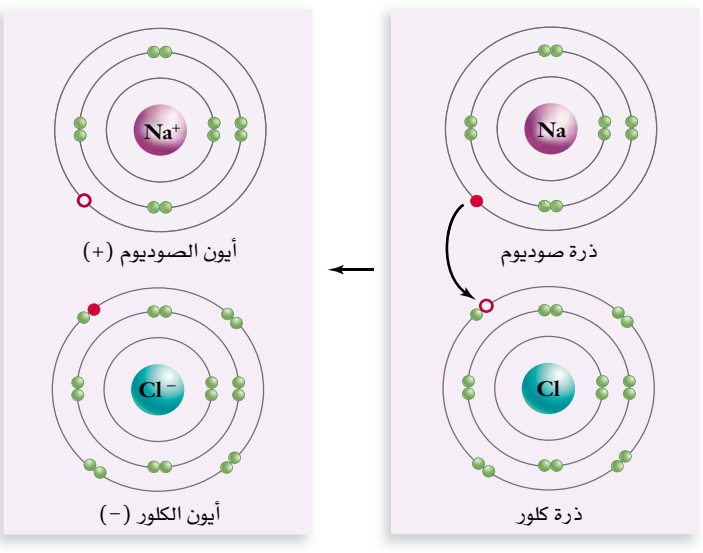
تمتلك ذرة الكلور 17 إلكترونًا: 2 في مستوى K، و8 في مستوى L، و 7 في مستوى M. كما تلاحظ، يحتوي أحد المدارات في مستوى الطاقة الأخير إلكترونًا غير مرتبط. إن إضافة إلكترون آخر يملأ ذلك المستوى، ويؤدي إلى تكوين أيون الكلور السالب الشحنة، Cl^-.

عند إضافتهما معًا، فإنّ الصوديوم الفلزّيّ وغاز الكلور سيتفاعلان بسرعة وبقوة شديدة، في حين تعطي ذرات الصوديوم إلكترونات للكلور؛ لتكون أيونات الصوديوم Na^+ والكلوريد Cl^-. ولأن الشحنات المتضادة تتجاذب، يظل Na^+ و Cl^- مرتبطين في **مركب أيوني Ionic compound**، هو $NaCl$، الذي هو متعادل كهربائيًّا. إن قوة الجذب الكهربائي التي تقيد $NaCl$ معًا، من ناحية ثانية، هي غير موجهة بشكل خاص بين أيونات منفردة من Cl^- و Na^+، ولا تتكون جزيئات كلوريد صوديوم محددة. إنما، توجد القوة بين أيٍّ من الأيونات المجاورة التي لها شحنة متضادة جميعها. تتجمع الأيونات في شبكة بلّورية لها شكل هندسي محدد. هذه التجمعات هي التي نعرفها بالبلّورات الملحية. فعند إضافة ملح كملح الطعام إلى الماء، يفكك الجذب الكهربائي لجزيئات الماء لأسباب سيتم توضيحها لاحقًا في هذا الفصل، القوى التي تمسك الأيونات في شبكتها البلّورية، جاعلة الملح يذوب مكونًا مزيجًا متساويًا تقريبًا من الأيونات الحرّة للصوديوم والكلور.

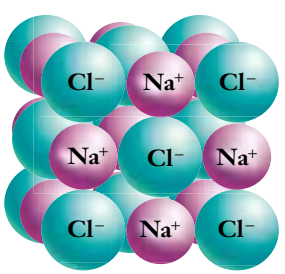
لأن الأنظمة الْحيويّة تشتمل دائمًا على الماء، تكون الأيونات أكثر أهمية من البلّورات الأيونيّة. إن الأيونات المهمة في الأنظمة الْحيويّة تشتمل على Ca^{2+}، الذي يؤدي دورًا مهمًّا في الإشارات الخلوية، K^+ و Na^+ اللذين يُستخدمان في نقل السيالات العصبية.

الجدول 2 - 1

الروابط والتفاعلات		
الاسم	مبدأ التفاعل	القوة
الرابطة التساهمية	مشاركة أزواج إلكترونات	قوية
الرابطة الأيونيّة	تجاذب شحنات متضادة	↕
الرابطة الهيدروجينيّة	مشاركة ذرة H	
تفاعل كاره الماء	تجمع الأجزاء كارهة الماء في الجزيئات معًا في وجود مواد مستقطبة	
قوى جذب فان درفال	قوى جذب ضعيفة بين الذّرّات نتيجة وجود سحابات إلكترونية متضادة الاستقطاب	ضعيفة



أ.



ب. بلّورة كلوريد الصوديوم

الشكل 2-8

تكوين الروابط الأيونيّة عن طريق كلوريد الصوديوم.

أ. عندما تُعطي ذرة الصوديوم إلكترونًا لذرة الكلور، تُصبح ذرة الصوديوم أيون صوديوم موجب الشحنة، وذرة الكلور تُصبح أيون كلور سالب الشحنة.

ب. التجاذب الكهربائي بين الأيونات ذات الشحنات المتضادة يؤدي إلى تكوين شبكة من Na^+ و Cl^-.

الروابط التّساهميّة تبني جزيئات ثابتة

تتكوّن **الروابط المشتركة** عندما تتشارك ذرتان بزوج أو أكثر من إلكترونات المدار الأخير. لنأخذ غاز الهيدروجين (H_2) مثالًا. كلّ ذرة هيدروجين تمتلك إلكترونًا غير مرتبط ومستوى طاقة أخيرًا غير ممتلئ، لهذه الأسباب؛ تكون ذرة الهيدروجين غير مستقرة. ولكن، إذا تلاقت ذرتا هيدروجين، ينجذب إلكترون كلّ ذرة لكلتا النواتين. ونتيجة لذلك، تكون النواتان قادرتين على التشارك بإلكتروناتهما. والنتيجة هي تكوين جزيء غاز الهيدروجين المكون من ذرتين.

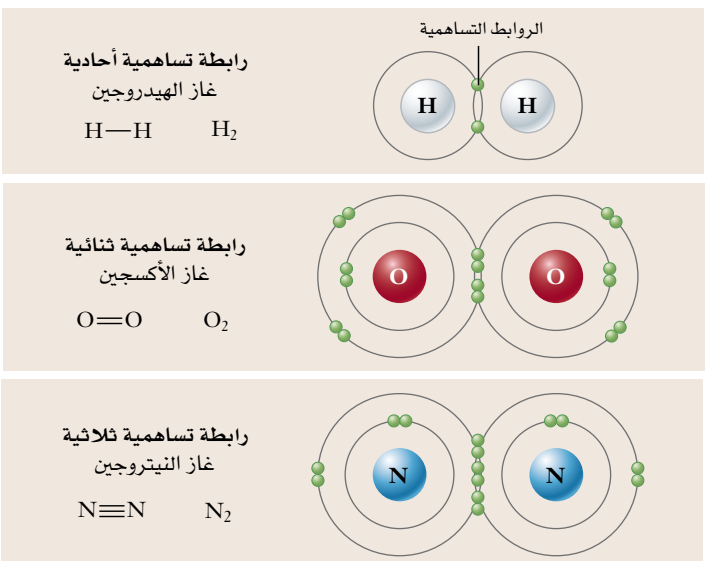
الجزيء الذي تكون من ذرتي الهيدروجين يكون مستقرًّا لأسباب ثلاثة:

1. **لا يحمل شحنة**. هذا الجزيء ذو الذرتين الذي تكوّن نتيجة هذا التشارك في الإلكترونات، لا يحمل شحنة؛ لأنه لا يزال يحتوي على بروتونين وإلكترونين.
2. **تحقيق قانون الثُمانيات**. كلّ من ذرتي الهيدروجين يمكن اعتبارهما أنهما تمتلكان إلكترونين يدوران في مستوى الطاقة الأخير لهما. هذا الوضع يحقق قانون الثُمانيّات؛ لأن كلّ إلكترون مشارك يدور حول كلّ من النواتين، ويُعَدّ ضمن مستوى الطاقة الأخير لكلتا الذرتين.
3. **ليس له إلكترونات غير مرتبطة**. إذ إن الرابطة بين الذرتين كذلك قرنت الإلكترونين الحرّين.

خلافًا للروابط الأيونيّة، تتكون الروابط التساهمية بين ذرتين منفردتين، مؤدية إلى جزيئات حقيقية ومحددة.

قوة الروابط التساهمية

تعتمد قوة الرابطة التساهمية على عدد الإلكترونات المُتشاركة. ولهذا فإنّ **الروابط الثنائية Double bonds**، التي تحقق قانون الثُمانيات بالسماح لذرتين بالمشاركة بزوجين من الإلكترونات، تكون أقوى من **الروابط الفردية Single bonds**، حيث المشاركة بزوج واحد فقط من الإلكترونات. عمليًّا، يتطلب تكسير رابطة ثنائية طاقة أكثر من تكسير رابطة أحادية. الروابط التساهمية الأقوى هي **الروابط الثلاثية Triple bonds**، مثل تلك التي تربط ذرتي النيتروجين في جزيئات غاز النيتروجين (N_2).



يُعبّر عن الروابط المشتركة في الصيغ الكيميائيّة بوصفها خطوطًا تربط رموز الـذّرّات، حيث يُمثل كلّ خط بين ذرتين مرتبطتين مشاركة زوج واحد من الإلكترونات. الصيغ البنائية *Structural formulas* لغازي الهيدروجين والأكسجين هي H-H و O=O، تتابعًا، والصيغ الجزيئية *Molecular formulas* لهما هي H_2 وO_2. والصيغة البنائية لـ N_2 هي N≡N.

جزيئات لها روابط تساهمية عدة

يتكون عدد كبير من المركبات البيولوجية من أكثر من ذرتين. فذرّة تحتاج إلى اثنين، أو ثلاثة، أو أربعة إلكترونات إضافية لملء مستوى الطاقة الأخير فيها بشكل كامل، يمكن أنْ تحصل عليها بمشاركة إلكتروناتها مَعَ ذرتين أو أكثر.

مثال على ذلك، تحتوى ذرة الكربون (C) على ستة إلكترونات، أربعة منها تقع في مستوى الطاقة الأخير، وهي غير مرتبطة. لتحقيق قانون الثمانيات، على ذرة الكربون أن تكون أربع روابط تساهمية. ولأن أربع روابط تساهمية يمكن أن تتكون بطرق عدّة، لذا توجد ذرات الكربون في أنواع مختلفة من الجزيئات. ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، والميثان (CH_4)، والكحول الإيثيلي (C_2H_5OH) هي بعض الأمثلة فقط.

الروابط التساهمية المستقطبة وغير المستقطبة

تختلف الذّرّات في انجذابها للإلكترونات، وهي خاصية تسمى **السالبية الكهربائية Electronegativity**. عمومًا، تزداد السالبية الكهربائية عند الانتقال من اليسار إلى اليمين في صفّ من الجدول الدّوريّ، وتقل نزولًا مَعَ أعمدة الجدول. ولهذا، فإنّ العناصر الموجودة في الزاوية العلوية اليمنى لها السالبية الكهربائية الأعلى.

وبالنسبة إلى الرّوابط التي توجد بين ذرات متماثلة، مثل، H_2 أو O_2، فمن الواضح أنّ انجذاب الإلكترونات نفسه، والتشارك بالإلكترونات متساوٍ. مثل هذة الروابط تسمى **غير مستقطبة Nonpolar**، والمركبات الناتجة يُعبر عنها كذلك بغير المستقطبة.

أما الذّرّات التي تختلف كثيرًا في السالبية الكهربائية، فإنّ التشارك بالإلكترونات يكون غير متساوٍ. الإلكترونات المشتركة يكون احتمال وجودها أكثر بقرب الذّرّة الأكبر من حيث السالبية الكهربائية، ويقل احتمال وجودها بالقرب من الذّرّة الأقل سالبية كهربائية. في هذه الحالة، ومَعَ أنّ الجزيء لا يزال متعادلًا كهربائيًّا (عدد البروتونات هو عدد الإلكترونات نفسه)، لكن توزيع الشحنة يكون غير متماثل. يُنتج هذا التوزيع غير المتساوي مناطق لها شحنة جزئية سالبة بالقرب من الذّرّة الأكثر سالبية كهربائية، ومناطق لها شحنة جزئية موجبة بالقرب من الذّرّة الأقل سالبية كهربائية. مثل هذة الروابط تسمى **روابط تساهمية مستقطبة Polar covalent bonds**، والجزيئات جزيئات مستقطبة. عند رسم جزيئات مستقطبة، يرمز إلى هذه الشحنات الجزئية عادة بالحرف الطباعي الصغير للحرف اليوناني دلتا (δ). وإن الشحنة الجزئية التي تُرى في رابطة تساهمية مستقطبة تكون صغيرة نسبيًّا - أقل بكثير من وحدة شحنة أيون. بالنسبة إلى الجزيئات البيولوجية، يمكن التنبؤ بقطبية الروابط عن طريق معرفة السالبية الكهربائية النسبية لعدد قليل من الـذّرّات المهمة (جدول 2-2). لاحظ أنّه على الرّغم من أنّ C و H يختلفان اختلافًا طفيفًا في السالبية الكهربائية، فإنّ هذا الاختلاف القليل جدير بالإهمال، وروابط C-H تُعدّ غير مستقطبة.

وسيتم التحري عن أهمية الجزيئات المستقطبة وغير المستقطبة لاحقًا؛ إذ إنها ميزة مهمة لكيمياء الماء. الماء (H_2O) جزيء مستقطب له إلكترونات تتركز أكثر حول ذرة الأكسجين.

الجدول 2-2
السالبية الكهربائية النسبية لبعض الذّرّات المهمة

الذّرّة	الكهرسلبية
O	3.5
N	3.0
C	2.5
H	2.1

التفاعلات الكيميائيّة تغير الروابط

إن تكوين روابط كيميائية وتكسيرها - الذي هو جوهر علم الكيمياء - يُعرف بالتفاعل الكيميائي *Chemical reaction*. تتضمن التفاعلات الكيميائيّة جميعها نقل الذّرّات من جزيء أو مركب أيوني إلى آخر، دون حدوث أيّ تغيير في عدد الذّرّات وطبيعتها. ولتسهيل الأمر، نسمي الجزيئات الأصلية قبل بدء التفاعل المواد المتفاعلة *Reactants*، والجزيئات الناتجة عن التفاعل الكيميائي المواد الناتجة *Products*. مثال على ذلك:

$$6H_2O + 6CO_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

المواد الناتجة ⟵ المواد المتفاعلة

يمكنك التعرّف إلى هذا التفاعل بوصفه شكلًا مبسطًا لتفاعل عملية البناء الضّوئيّ، الذي يتحد فيه الماء مَعَ ثاني أكسيد الكربون لينتجا الجلوكوز والأكسجين. تعتمد معظم الحياة الحيوانية بشكل رئيس على هذا التفاعل، الذي يتم في النباتات. (ستتم دراسة تفاعلات عملية البناء الضّوئيّ بالتفصيل في الفصل 8).

مدى حدوث التفاعلات الكيميائيّة يعتمد ويتأثر بثلاثة عوامل مهمة، هي:

1. **درجة الحرارة**. يزيد تسخين المواد المتفاعلة من معدل سرعة التفاعل؛ لأنّ المواد المتفاعلة تصطدم مَعَ بعضها مرّات أكثر. (يرجى الانتباه لعدم ارتفاع درجة الحرارة إلى الحد الذي تدمّر فيه الجزيئات مجتمعة).
2. **تركيز المواد المتفاعلة والمواد الناتجة**. تسير التفاعلات بشكل أسرع إذا توافرت كميات أكبر من المواد المتفاعلة، سامحة بتصادمات أكثر تكرارًا. يؤدي تراكم المواد الناتجة نموذجيًّا إلى تباطوء سرعة التفاعل، وفي التفاعلات القابلة للانعكاس، يمكن أن يسارع التفاعل في الاتجاه العكسي.
3. **العوامل المساعدة (المحفِّزة)**. العامل المحفِّز هو مادة تعمل على زيادة معدل سرعة تفاعل ما. فهو لا يغير اتزان التفاعل بين المواد المتفاعلة والمواد الناتجة، إنما يعمل على تقصير الزمن الذي يحتاج إليه التفاعل ليصل إلى حالة الاتزان، وعادة بشكل مدهش. في الأنظمة الحيويّة، تعمل بروتينات تسمى الأنزيمات على تحفيز كلّ تفاعل كيميائي تقريبًا.

كثير من التفاعلات التي تحصل في الطبيعة تكون قابلة للانعكاس، وهذا يعني أنّ المواد الناتجة قد تكون هي نفسها المواد المتفاعلة، ويسير التفاعل في الاتجاه المعكوس. يمكننا كتابة التفاعل السابق بشكل معكوس:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6H_2O + 6CO_2$$

المواد الناتجة ⟵ المواد المتفاعلة

هذا التفاعلُ شكلٌ مبسطٌ لأكسدة الجلوكوز بالتنفس الخلوي، الذي فيه يتكسر الجلوكوز إلى ماء وثاني أكسيد الكربون بوجود الأكسجين. تقوم المخلوقات جميعها فعليًّا بتنفيذ أشكال من أكسدة الجلوكوز؛ وسيتم تغطية تفاصيل ذلك لاحقًا، في (الفصل الـ 7).

الرابطة الأيونيّة هي تجاذب بين أيونات متضادة الشحنة في مركب أيوني. هذه الروابط تحدث بين أيون والأيونات جميعها التي تحمل شحنات مضادة في محيطه المباشر. أما الرابطة التساهمية فهي رابطة كيميائية مستقرة تتكون عندما تتشارك ذرتان بزوج أو أكثر من الإلكترونات. في الروابط المشتركة المستقطبة، يؤدي تشارك غير متساوٍ للإلكترونات إلى عدم اتزان الشحنة، أو استقطاب، بين الذّرّات المترابطة. التفاعلات الكيميائيّة تكون وتكسر الروابط، جامعة المواد المتفاعلة لتكون المواد الناتجة.

4-2 الماء: مركب حيوي

من بين الجزيئات الموجودة على الأرض جميعها، يوجد الماء فقط بوصفه سائلًا على درجات الحرارة المنخفضة نسبيًّا الشائعة على سطح الأرض. ثلاثة أرباع سطح الأرض مُغطى بالماء (الشكل 2-9). عند نشأة الحياة، وفّر الماء وسطًا تمكنت فيه الجزيئات الأخرى من الحركة والتفاعل، دون الحاجة إلى الثبات في مكانها، عن طريق الروابط المشتركة القوية أو الروابط الأيونيّة. نشأت الحياة في الماء منذ نحو بليوني سنة قبل انتشارها على اليابسة. وحتى في يومنا هذا، فإنّ الحياة مرتبطة بالماء بشكل لا سبيل للخلاص منه. يتكون نحو ثلثي جسم أيّ مخلوق حيّ من الماء، المخلوقات جميعها تحتاج إلى وسط غني بالماء، إمّا داخليًّا أو خارجيًّا، لغرض النمو والتكاثر. إنها ليست مصادفة أنْ تكون الغابات الاستوائية الماطرة تعجّ بالحياة، أما الصحارى الجافة فتبدو خالية من الحياة تقريبًا إلا عندما يتوافر الماء بشكل مؤقت، كما يحدث بعد عاصفة مطرية.

جـ. الحالة الغازية

ب. الحالة السائلة

أ. الحالة الصلبة

الشكل 2-9

يأخذ الماء أشكالًا مختلفة. أ. عندما تنخفض درجة حرارة الماء لأقل من صفر س، يُكون بلّورات جميلة الشكل، شكلها مألوف لدينا بوصفها ثلجًا وجليدًا. ب. يتحول الجليد إلى سائل عندما تكون درجة الحرارة فوق صفر س. جـ. الماء في حالة السيولة يتحول إلى بخار عندما ترتفع درجة الحرارة لأعلى من 100°س، كما يُرى في هذا الينبوع الحار في متنزه يلوستون الوطني بأمريكا.

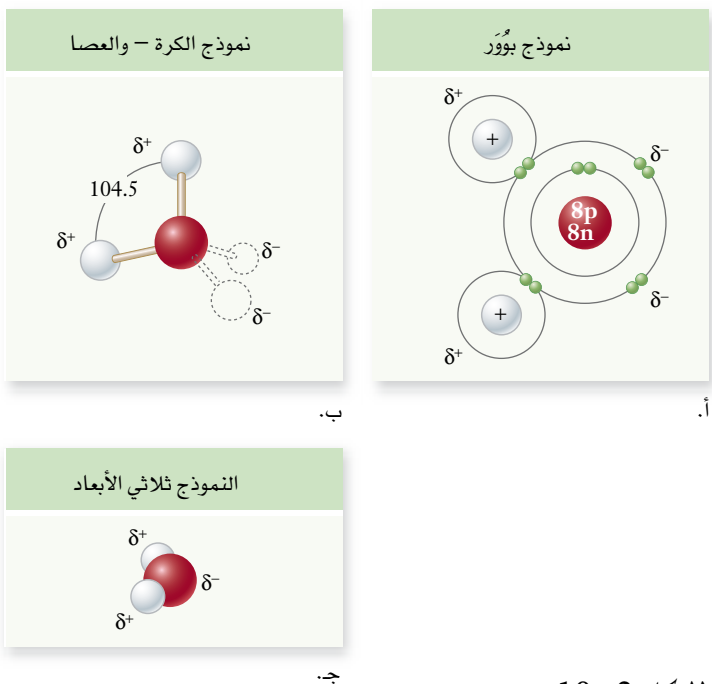
يسهل شكل جزيء الماء حدوث الترابط الهيدروجيني

للماء تركيب جزيئي بسيط، فهو يشتمل على ذرة أكسجين مرتبطة مَعَ ذرتي هيدروجين عن طريق اثنتين من الروابط التساهمية الأحادية (الشكل 2-10). الجزيء الناتج مستقر: يحقق قانون الثمانيات، ولا يملك إلكترونات غير مرتبطة، ولا يحمل مقدارًا صافيًا من الشحنة الكهربائية.

الصفة الكيميائيّة الوحيدة الأكثر وضوحًا للماء هي مقدرته على تكوين روابط كيميائية ضعيفة، تسمى **الروابط الهيدروجينيّة Hydrogen bonds**. تتكون هذه الروابط بين ذرات الأكسجين التي تحمل شحنة سالبة جزئية وذرات الهيدروجين التي تحمل شحنة موجبة جزئية لجزيء ماء. ومع أنّ لهذه الروابط 5% إلى 10% من قوة الروابط التساهمية فقط، لكنها مسؤولة عن الكثير من التنظيم الكيميائي للأنظمة الحيويّة.

السالبية الكهربائية للأكسجين أعلى بكثير من تلك التي للهيدروجين (انظر الجدول 2-2)، ولهذا فالروابط بين هذه الذّرّات تكون مستقطبة. وفي الحقيقة، الماء جزيء عالي الاستقطاب، واستقطاب الماء يشكل الأساس لكلٍّ من كيمياء الماء والحياة.

وإذا أخذنا في الحسبان شكل جزيء الماء، فإننا نستطيع أنْ نرى أنّ الرابطتين التساهميتين لجزيء الماء لهما شحنة جزئية عند كلّ من نهايتيه: δ^- عند نهاية الأكسجين و δ^+ عند نهاية الهيدروجين. والترتيب الأكثر ثباتًا لهذه الشحنات هو الشكل رباعي السطوح *Tetrahedron*، الذي فيه تكون الشحنتان السالبتان والشحنتان الموجبتان متساويتي البعد عن بعضهما تقريبًا. تقع ذرة الأكسجين في مركز هرم رباعي الأضلاع، إذ تحتل ذرتا الهيدروجين اثنين من الرؤوس، في حين تحتل الشحنتان السالبتان الجزئيتان الرأسين الآخرين (الشكل 2-10 ب). زاوية الرابطة بين الرابطتين التساهميتين بين الأكسجين والهيدروجين تساوي $104.5°$. وهذه القيمة أقل بقليل من قيمة زاوية الرابطة لشكل رباعي السطوح منتظم، التي يمكن أنْ تكون $109.5°$. تشغل الشحنات السالبة الجزئية في الماء حيزًا أكبر من ذلك الذي تشغله الشحنات الموجبة الجزئية، ولهذا تكون زاوية رابطة الأكسجين والهيدروجين منضغطة قليلًا.



أ. ب. ج.

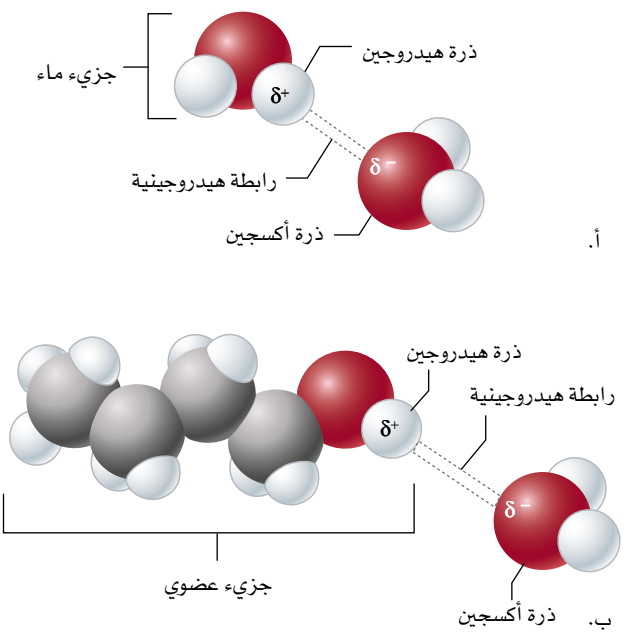
الشكل 2-10

للماء بُنية جزيئية بسيطة. أ. يتكون كل جزيء ماء من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين. تشارك ذرة الأكسجين بإلكترون واحد مَعَ كلّ ذرة هيدروجين. ب. السالبية الكهربائية العالية لذرة الأكسجين تجعل جزيء الماء مستقطبًا: يحمل الماء شحنتين جزيئيتين سالبتين (δ^-) بالقرب من ذرة الأكسجين وشحنتين جزيئيتين موجبتين (δ^+)، واحدة على كلّ ذرة هيدروجين. جـ. النموذج ثلاثي الأبعاد يُظهِر كيف سيبدو الجزيء لو تمكّنا من رؤيته.

جزيئات الماء متماسكة

إن خاصية الاستقطاب لجزيئات الماء تسمح لها بالانجذاب إلى بعضها: وهذا يعني أن الماء **متماسك Cohesive**. كلّ جزيء ماء ينجذب عند النهاية التي فيها الأكسجين، والتي هي δ^-، إلى النهاية التي فيها الهيدروجين، للجزيئات الأخرى، والتي هي δ^+. ينتج التجاذب روابط هيدروجينية بين جزيئات الماء (الشكل 2-11). كلّ رابطة هيدروجينية تكون بمفردها ضعيفة جدًا ومؤقتة، ومعدل بقائها يساوي جزءًا من مئة بليون (10^{-11}) من الثانية تقريبًا. ومَعَ ذلك، فإنّ التأثيرات التراكمية لعدد كبير من هذه الروابط، يمكن أنْ تكون هائلة. يكون الماء كمًّا هائلًا من الروابط الهيدروجينيّة، التي تكون مسؤولة عن الكثير من خصائصه الفيزيائية المهمة (جدول 2-3).

تماسك الماء هو المسؤول عن كونه سائلًا، وليس غازًا، عند درجات الحرارة المعتدلة. وتماسك الماء السائل مسؤول أيضًا عن توتره السطحي. إن الحشرات الصغيرة يمكنها المشي على سطح الماء (الشكل 2-12) لأنّ جزيئات الماء السطحية جميعها ترتبط بروابط هيدروجينية مَعَ جزيئات الماء الواقعة أسفلها عند السطح البيني بين الهواء والماء.



أ. ب.

الشكل 2-11

شكل الرابطة الهيدروجينيّة. أ. رابطة هيدروجينية بين جزيئي ماء. ب. رابطة هيدروجينية بين مركب عضوي (البيوتانول العادي *n-butanol*) وماء. يُكون H في البيوتانول رابطة هيدروجينية مَعَ الأكسجين في الماء. هذا النوع من الرابطة الهيدروجينيّة ممكن حُدوثه في أيّ وقت يكون فيه H مرتبطًا مَعَ ذرة لها سالبية كهربائية أكبر (انظر الجدول 2-2).

الجدول 2-3	خصائص الماء	
الخاصيّة	التفسير	مثال عن فائدته للحياة
التماسك	روابط هيدروجينية تمسك جزيئات الماء مَعَ بعضها.	تسحب أوراق النبات الماء للأعلى من الجذور، تنتفخ البذور وتنبت.
الحرارة النّوعيّة العالية	تمتص الروابط الهيدروجينيّة حرارة عند تكسيرها، وتُطلق حرارة عند تكوينها، مقللة التغيرات في درجة الحرارة.	يحافظ الماء على ثبات درجة حرارة المخلوقات والبيئة.
حرارة التبخر العالية	كثير من الروابط الهيدروجينيّة لا بدّ من تكسيرها؛ ليتمكن الماء من التبخر.	تبخر الماء يبرد سطح الجسم.
كثافة الثلج الأقل	جزيئات الماء في بلّورة الثلج تكون متباعدة عن بعضها مسافة لا بأس بها بسبب الترابط الهيدروجيني.	لأن الثلج أقل كثافة من الماء، لا تتجمد البحيرات إلى حالة الصلابة، سامحة للأسماك ولأنواع أخرى من الأحياء فيها بالبقاء على قيد الحياة خلال فصل الشتاء.
الذائبية	جزيئات الماء المستقطبة تنجذب إلى الأيونات والمركبات المستقطبة، جاعلة إياها ذائبة.	تستطيع أنواع عدة من الجزيئات أن تتحرك بحرية داخل الخلايا، مُتيحة الفرصة لحدوث عدد مُتنوع كبير من التفاعلات الكيميائيّة.

جزيئات الماء متلاصقة

تسمح خاصية استقطاب الماء له بالترابط مَعَ جزيئات مستقطبة أخرى أيضًا. هذا التجاذب مَعَ مواد مستقطبة أخرى يُسمى **التلاصق Adhesion**. الماء قادر على التلاصق مَعَ أيّ مادة يمكن أنْ يرتبط معها بروابط هيدروجينية. تُفسر هذه الميزة لماذا تبتلّ المواد التي تحتوي على جزيئات مستقطبة عندما تُغمر في الماء، في حين لا تبتل المواد المكوّنة من جزيئات غير مستقطبة (كالزيوت).

إن انجذاب الماء للمواد التي تحمل شحنات كهربائية على سطحها هو المسؤول عن الخاصية الشعرية: فإذا أُنزل أنبوب زجاجي شعيري دقيق في دورق يحتوي على ماء، فسيرتفع الماء داخل هذا الأنبوب إلى ارتفاع أعلى من مستوى الماء في الدورق؛ لأنّ تلاصق الماء مَعَ سطح الزجاج، ساحبًا أياه للأعلى، يكون أقوى من قوة الجاذبية الأرضية، التي تعمل على سحبه للأسفل. كلما كان الأنبوب أدق، ازدادت قوى الكهربائية الساكنة بين الماء والزجاج، وزاد ارتفاع الماء في الأنبوب (الشكل 2-13).

كيمياء الحياة هي كيمياء الماء. يستطيع الماء أن يكوّن روابط هيدروجينية مَعَ نفسه ومَعَ جزيئات أخرى مستقطبة بسبب خصائصه المستقطبة. الترابط الهيدروجيني يجعل الماء متماسكًا: تلتصق الجزيئات مَعَ بعضها. طبيعة الماء المتماسكة هي المسؤولة عن توتره السطحي العالي. جزيئات الماء متلاصقة كذلك: تلتصق مَعَ جزيئات أخرى مستقطبة. هذه الصفة مسؤولة عن ظاهرة الخاصية الشعرية.

الشكل 2-12

التماسك. بعض الحشرات، مثل ذارع الماء (الخيتعور) هذا (بق طويل القوائم يمشي بيسر فوق الماء الراكد)، يستطيع في الواقع أن يمشي فوق الماء. في هذه الصورة الفوتوغرافية يمكنك رؤية كيف أن أرجل الحشرة تُحدث ما يشبه الغمازات عندما تندفع بوزنها نحو سطح الماء. ولأن التوتر السطحي للماء أكبر من القوة المطلوبة لحمل قدم الحشرة، فإنّ الخيتعور ينزلق فوق سطح الماء بدلًا من الغوص. إن التوتر السطحي العالي للماء ناشئ عن الترابط الهيدروجيني بين جزيئات الماء.

الشكل 2-13

التلاصق. الفعل الشعرّي يسبب ارتفاع الماء في أنبوب دقيق إلى مستوى أعلى من مستوى الماء المحيط؛ تلاصق الماء مَعَ سطح الزجاج، الذي يرفع الماء إلى أعلى، يعّد أقوى من قوة جاذبية الأرض، التي تميل إلى سحبه إلى أسفل. كلما كان الأنبوب أدق، كانت المساحة المتاحة للتلاصق لحجم معين من الماء أكبر، ومن ثم كان ارتفاع الماء في الأنبوب أعلى.

5-2 خصائص المـاء

يساعد الماء على تلطيف درجة الحرارة من خلال خاصيتين: سعته الحرارية العالية، ودرجة تصعيده العالية. كذلك للماء خاصية غير عادية في كونه أقل كثافة في حالته الصلبة، أي وصفه جليدًا، منه بوصفه ماءً. إضافة إلى ذلك، فإنّ الماء يعمل مُذيبًا للجزيئات المستقطبة، ويمارس تأثيرًا تنظيميًّا على الجزيئات غير المستقطبة. كذلك يقدر الماء أنْ يتفكك ليكون أيونات. هذه الخصائص جميعها تنتج من طبيعته المستقطبة.

السعة الحرارية العالية للماء تساعد في الحفاظ على درجة الحرارة

إن درجة حرارة أيّ مادة هي قياس مدى سرعة حركة جزيئاتها الفردية. وبالنسبة إلى الماء، فإنّ كمية كبيرة من الطاقة الحرارية يجب أنْ تُعطى للماء لتكسير العدد الكبير من الروابط الهيدروجينيّة التي تحدّ من حركة جزيئات الماء الفردية. ولهذا، يقال: إن للماء **سعة حرارية Specific heat** عالية، تُعرف بأنّها كمية الحرارة التي يجب أنْ تكتسب أو تفقد لتغيير درجة حرارة جرام واحد من مادة درجة مئوية واحدة (°س). الحرارة النّوعيّة تقيس مدى مقاومة مادة لتغير درجة حرارتها عند اكتسابها أو فقدانها حرارة، ولأنّ المواد المستقطبة لها الاستعداد لتكوين روابط هيدروجينية، فإنّ سعتها الحرارية تتناسب طرديًّا مَعَ درجة الاستقطاب فيها. الحرارة النّوعيّة للماء (1 كالوري / جرام / درجة سلسيوس) تساوي الضعف بالنسبة إلى معظم مركبات الكربون وتسعة أضعاف تلك التي للحديد. إن الأمونيا فقط، التي هي أكثر استقطابًا من الماء وتكون روابط هيدروجينية قوية جدًا، لها سعة حرارية أعلى من الماء (1.23 كالوري/جرام / درجة سلسيوس). ومَعَ هذا، فإنّ 20% من الروابط الهيدروجينيّة فقط تتكسر عند تسخين الماء من درجة حرارة 0° إلى 100° س.

وبسبب الحرارة النّوعيّة العالية للماء، فإنه يسخن ببطء أكثر بكثير من أيّ مركّب آخر تقريبًا، ويحافظ على درجة حرارته ثابتة مدة أطول حتى بعد توقف تسخينه. تمكن هذه الخاصية المخلوقات الحية، التي تحتوي على نسبة عالية من الماء، أنْ تحتفظ بدرجة حرارتها الداخلية ثابتة تقريبًا. إن الحرارة التي تنتج من التفاعلات الكيميائيّة داخل خلايا ستؤدي حتمًا إلى تدمير هذه الخلايا لولا أنّ الماء الموجود داخلها يعمل على امتصاص هذه الحرارة.

درجة تبخير الماء العالية تعمل على تلطيف درجة الحرارة

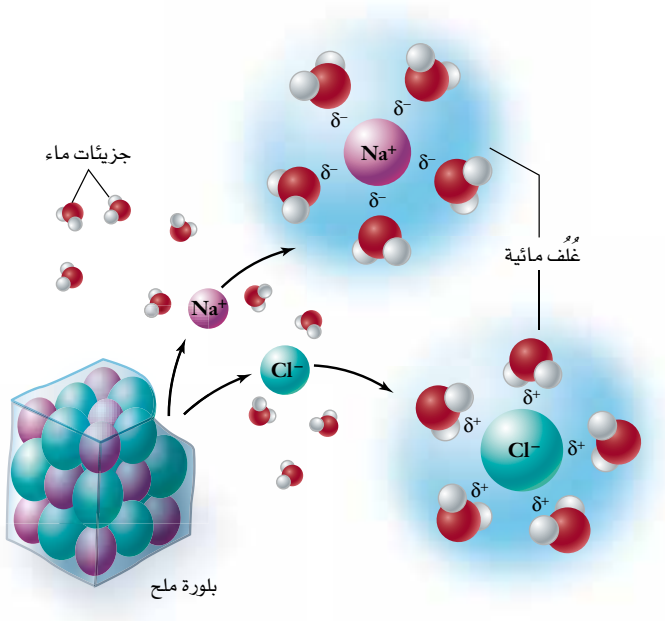
حرارة التبخر Heat of vaporization هي كمية الحرارة اللازمة لتحويل جرام واحد من مادة من سائل إلى غاز. تلزم كمية كبيرة من الطاقة الحرارية (586 كالوري) لتنجز هذا التغير في الماء. ولأن تحول الماء من سائل إلى غاز يتطلب امتصاص طاقة لتكسير روابطه الهيدروجينيّة الكثيرة، فإنّ تبخر الماء من سطح يؤدي إلى تبريد ذلك السطح. تتخلص كثير من المخلوقات الحية من الحرارة الزائدة في أجسامها عن طريق التبريد بالتبخر، ومثال ذلك عملية التعرق في الإنسان والكثير من الفقريات الأخرى.

الماء الصلب أقل كثافة من الماء السائل

عند درجات الحـرارة المنخفضة، تتشابك جزيئات الماء مَـعَ بعضها لتكون شبكة بلّورية من الروابط الهيدروجينيّة، مكونة الجليد (انظر الشكل 2-9). ومن المثير للاهتمام، أنْ نجد أنّ الجليد أقل كثافة من الماء السائل؛ لأن الروابط الهيدروجينيّة فـي الجليد تباعد بين جزيئـات الماء مسافة لا بأس بها. هـذه الميزة غير العادية هـي التي تمكّن الجبال الجليدية مـن الطفو. لو لم تكن للماء تلك الخاصية، لكانت الأجسـام المائية جميعها جليـدًا حتمًا تقريبًا، تاركة فقط طبقـة المياه السطحية الضحلـة لتذوب سنويًّا. طفو الجليد مهمّ بيئيًّا، إذ يعني أنّ الأجسام المائية تتجمد مـن الأعلى إلى الأسفـل، وليس من القاع إلى الأعلى. إن المـاء السائل تحت سطح الجليـد الـذي يغطي معظـم البحيرات فـي الشتاء يسمـح للأسمـاك والحيوانات الأخرى بأن تعيش فصل الشتاء دون أن تتجمد.

خصائص الماء بوصفه مذيبًا مُذيب تُساعد على تحريك الأيونات والجزيئات المستقطبة

تحتشد جزيئات الماء بإحكام حول أيّ مادة تحمل شحنة كهربائية، سواء كانت تلك المادة تحمل شحنة كهربائية كليّة (أيون) أو فصلًا في الشحنة (جزيئات مستقطبة). مثال على ذلك، يتكون السّكّروز (سكر المائدة) من جزيئات تحتوي على مجموعات الهيدروكسيـل (OH) المستقطبة. تذوب بلّورة السكر بسرعة في الماء؛ لأنّ جزيئات الماء تقدر أنْ تكوّن روابط هيدروجينية مَعَ مجموعات هيدروكسل فردية لجزيئات السكروز. لهذا، يُقال: إن السكروز ذوّاب *Soluble* في الماء. يدعى الماء مُذيبًا *Solvent*، ويسمى السكر مُذابًا Solute. كلّ مرّة يتفككك جزيء سكروز، أو ينفصل عن رفاقه، من بلورة سكر صلبة، تُحيط به جزيئات الماء في سحابة، مكونة غلافًا مائيًّا **Hydration shell** يمنعه من الترابط مَعَ جزيئات سكروز أخرى. تتكون الغلف المائية كذلك حول أيونات مثل Na^+ و Cl^- (الشكل 2-14).



الشكل 2-14

لماذا يذوب الملح في الماء. عندما تذوب بلورة من ملح الطعام في الماء، تنفصل أيونات صوديوم وكلور منفردة من شبكة الملح، وتصبح محاطة بجزيئات الماء. تتوجه جزيئات الماء حول أيون الكلور، بحيث تواجه أقطابها التي تحمل شحنة موجبة جزئية أيونات الكلور السالبة الشحنة؛ جزيئات الماء المحيطة بأيونات الصوديوم تتوجه بطريقة عكسية، بحيث تواجه الأقطاب التي تحمل شحنة سالبة جزئية أيونات الصوديوم الموجبة الشحنة. لن تُعاود Na^+ و Cl^- قط دخولها في الشبكة الملحية عندما تكون محاطة بغلف مائية.

يُعطي الماء بنية عضوية للجزيئات غير المستقطبة

تلجأ جزيئات الماء دائمًا لتكوين العدد الأعلى الممكن من الروابط الهيدروجينيّة. عند إضافة جزيئات غير مستقطبة مثل الزيوت، التي لا تكون روابط هيدروجينية، إلى الماء، فإنّ جزيئات الماء تعمل على إبعادها. فتُجبر الجزيئات غير المستقطبة على الارتباط مَعَ بعضها، مقللة بذلك من تفكيكها للترابط الهيدروجيني للماء. وفي الواقع، فإنها ترتد عن الاتصال المباشر مَعَ الماء. ولهذا السبب، فإنه يُشار إليها **بكارهة المـــاء Hydrophobic** (مصدر يوناني "ماء" *hydros*، "يخاف" *phobos*). وبخلاف ذلك، فالجزيئات المستقطبة، التي تُكوّن روابط هيدروجينية بسهولة مَعَ الماء، يُقال: إنها **مُحبّة للماء Hydrophilic**.

ميل الجزيئات غير المستقطبة للتكتل في الماء يدعى **إقصاء كاره الماء Hydrophobic exclusion**. بدفع أجزاء الجزيئات الكارهة للماء معًا، يُرغم الماء هذه الجزيئات على أخذ أشكال محددة. يمكن أنْ تؤثر هذه الخاصية كذلك في تركيب البروتينات، DNA، والأغشية البيولوجية. في الحقيقة، يُعد التفاعل بين الجزيئات غير المستقطبة والماء أمرًا مُهمًّا للأنظمة الحيويّة.

يستطيع الماء أنْ يكوّن أيونات

تتكسر الروابط التساهمية في جزيء ماء تلقائيًّا أحيانًا. في الماء النقي على حرارة 25° س، تحصل هذه العملية لجزيء واحد فقط من كلّ 550 مليون جزيء ماء. وعندما تحصل، فإنّ بروتونًا (نواة ذرة الهيدروجين) ينطلق من الجزيء. ولأن البروتون المنفك يفتقد الإلكترون السالب الشحنة الذي كان يتشارك معه، فإنّ شحنته الموجبة لم يعد هناك ما يوازنها، فيُصبح أيون الهيدروجين، H^+. ما تبقى من جزيء الماء المتفكك، الذي يحتفظ بالإلكترون المشارك من الرابطة التساهمية، يحمل شحنة سالبة، ويُكون أيون الهيدروكسيد، OH^-. وتدعى عملية تكوين الأيون التلقائية هذه التأين *Ionization*:

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

ماء — أيون الهيدروكسيد — أيون الهيدروجين (بروتون)

على درجة حرارة 25° س، يحتوي لتر من الماء على عُشْر مليون (أو 10^{-7}) مول من أيونات H^+. يُعرّف المول (أو الجزيئي) Mole بأنه وزن المادة بالجرامات المطابق للكتل الذرية للذرات جميعها في جزيء من تلك المادة. في حالة H^+، الكتلة الذرية تساوي واحدًا، ومول من أيونات الهيدروجين سوف يزن جرامًا واحدًا. يحتوي مول واحد من أيّ مادة دائمًا على 6.02×10^{23} جزيء من المادة. ولهذا، فإنّ التركيز المولاري Molar concentration لأيونات الهيدروجين في الماء النقي، والممثلة بـ $[H^+]$، هو 10^{-7} مول / لتر. (في الواقع، يرتبط أيون الهيدروجين عادة مَعَ جزيء ماء آخر ليُكون أيون الهيدرونيوم، H_3O^+).

لا يُغير الماء درجة حرارته بسرعة بسبب حرارته النّوعيّة العالية. في الأنظمة الحيويّة، يُحافظ محتوى الماء العالي على درجات حرارة شبه ثابتة. تجيز حرارة تبخير الماء العالية التبريد بالتبخر؛ لأن جزيئات الماء المستقطبة تتماسك مَعَ بعضها، يتطلب فصلها طاقة كبيرة. يلتصق الماء كذلك بجزيئات مستقطبة أخرى، جاعلًا أياها ذائبة في محلول مائي، لكن الماء يعمل على صدّ الجزيئات غير المستقطبة. يتفكك الماء ليكون أيونات. تركيز أيون الهيدروجين للماء النقي يساوي 10^{-7} مول / لتر.

6-2 الأحماض والقواعـد

إن تركيز أيونات الهيدروجين، وفي الوقت نفسه تركيز أيونات الهيدروكسيد، في محلول يُوصف باستعمال مصطلحات الحمضية Acidity والقاعدية Basicity. الماء النقي، له $[H^+]$ يساوي 10^{-7} مول/ ليتر، يُعَدُّ متعادلًا، أي، لا حمضيًّا ولا قاعديًّا. لا بدّ من التذكر أنّ لكلّ أيون هيدروجين يتكون عندما ينحلّ الماء، يتكون مقابله كذلك أيون هيدروكسيد، وهذا يعني أن انحلال الماء يُنتج H^+ و OH^- بكميات متساوية.

مقياس الرقم الهيدروجيني pH يقيس تركيز أيون الهيدروجين

يُعَدُّ مقياس **الرقم الهيدروجيني pH scale** (الشكل 2-15) طريقة مناسبة للتعبير عن تركيز أيون الهيدروجين في محلول ما. هذا المقياس يُعرّف الـ **pH**، التي تعني "هيدروجين جزئي"، بأنه سالب اللوغاريتم لتركيز أيون الهيدروجين في المحلول:

وحيث إن لوغاريتم تركيز أيون الهيدروجين هو ببساطة أس التركيز المولاري لأيون الهيدروجين، فإنّ pH تساوي الأس مضروبًا في (1-). بالنسبة إلى الماء، إذن، فإنّ تركيز (H^+) الذي يساوي 10^{-7} مول /لتر يماثل قيمة pH 7. هذه هي نقطة التعادل - اتزان بين H^+ و OH^- - على مقياس pH. هذا الاتزان يحدث لأنّ انحلال الماء يُنتج كميات متساوية من H^+ و OH^-.

الشكل 2-15

مقياس الرقم الهيدروجيني أو pH. تُشير قيمة الرقم الهيدروجيني لمحلول إلى تركيز أيونات الهيدروجين فيه. المحاليل التي لها pH أقل من 7 تُعد حمضية، أما التي لها pH أكبر من 7 فهي قاعدية. المقياس لوغاريتمي، بحيث إن تغير قيمة pH وحدة واحدة يعني تغيرًا في تركيز أيونات الهيدروجين يساوي عشرة أضعاف. مثلًا، عصير الليمون أكثر حمضية بمئة مرة من عصير البندورة، وماء البحر أكثر قاعدية بعشر مرات من الماء النقي، الذي له pH تساوي 7.

لاحظ أنه، لأن مقياس pH لوغارتميًّا *Logarithmic*، فإنّ الاختلاف في وحدة واحدة على هذا المقياس يُمثل تغيرًا في تركيز أيون الهيدروجين يُعادل عشرة أضعاف. فمحلول له pH تساوي 4 إذن، يحتوي على تركيز أيون هيدروجين عشر مرات أكثر من محلول له pH تساوي 5 ومئة مرة أكثر من محلول له pH تساوي 6.

الأحماض

أيّ مادة تتفكك في الماء لتزيد تركيز أيونات الهيدروجين (وتخفض قيمة pH) تسمى حمضًا. كلما كان الحمض أقوى، أطلق كمية أكبر من H^+ ومن ثم كانت قيمة pH له أقل. فمثلًا، حمض الهيدروكلوريك (HCl)، الذي يوجد بوفرة في المعدة، يتأين بشكل كامل في الماء. ينحل محلول مخفف من HCl تركيزه 10^{-1} مول/لتر ليكون 10^{-1} مول / لتر من أيونات الهيدروجين، معطيًا المحلول pH تساوي 1. إن pH شراب الليمون الذي تتناوله في يوم حار تساوي 2 تقريبًا.

القواعد

المادة التي ترتبط مَعَ أيونات H^+ عندما تذوب في الماء، وبذلك تخفض $[H^+]$، تسمى قاعدة. ولهذا فإنّ المحاليل القاعدية لها قيم pH أعلى من 7. القواعد القوية جدًا، مثل هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، لها قيم pH تساوي 12 أو أكثر. كثير من المواد التي تُستعمل بشكل عام في عملية التنظيف، مثل الأمونيا والمواد المُبيضة، تُنتج عملها بسبب قيم pH العالية لديها.

المحاليل المنظمة (الدارئة) تُحافظ على ثبات قيم pH

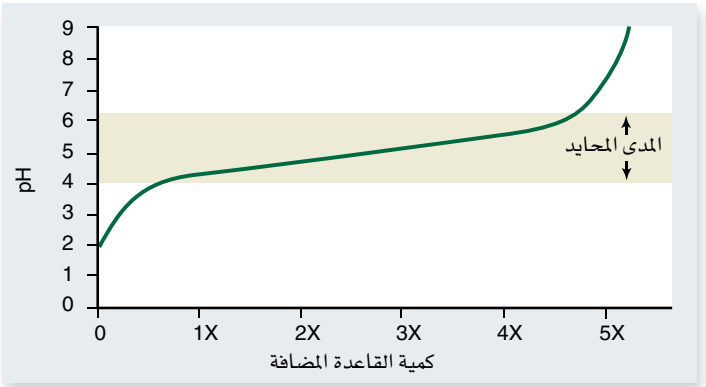
إن قيمة pH داخل معظم الخلايا الحية تقريبًا، وفي السائل المحيط بالخلايا في المخلوقات متعددة الخلايا، إلى حدّ ما قريبة من 7. معظم الأنزيمات في الأنظمة الحيويّة سريعة التأثر بـ pH؛ في أحوال كثيرة، أي تغير صغير في pH سيؤدي إلى تغير في شكلها، ما يُعطل أنشطتها جاعلًا إياها بلا فائدة. ولهذا السبب، فمن الضروري أن تحافظ الخليّة على مستوى ثابت لـ pH.

ولكن التفاعلات الكيميائيّة الحيويّة تنتج باستمرار أحماضًا وقواعد داخل الخلايا. علاوة على ذلك، فإنّ كثيرًا من الحيوانات تتغذى على مواد تكون حمضية أو قاعدية. مشروبات الكولا، على سبيل المثال، هي محاليل حمضية متوسطة القوة (على الرغم من أنها محاليل مخففة). وعلى الرغم من تلك الاختلافات في تراكيز H^+ و OH^-، تبقى قيمة pH في المخلوق الحي ثابتة نسبيًّا بفعل المحاليل المنظمة (الشكل 2-16).

المحلول المنظم Buffer مادة تُقاوم التغيرات في pH. تعمل المحاليل المنظمة بإطلاق أيونات الهيدروجين عند إضافة قاعدة واستحواذ أيونات الهيدروجين عند إضافة حمض، وبالنتيجة الإجمالية، في الحفاظ على تركيز أيونات الهيدروجين ثابتة نسبيًّا.

تتألف معظم المحاليل المنظمة، داخل المخلوقات الحية، من أزواج من المواد، أحدها حمض والآخر قاعدة. وأهم المحاليل المنظمة في دم الإنسان هو المحلول المكون من زوج من الحمض والقاعدة يتألف من حمض الكربونيك (الحمض) والبيكربونات (القاعدة). هاتان المادتان تتفاعلان في زوج من التفاعلات المنعكسة. في البداية، يرتبط ثاني أكسيد الكربون والماء ليكونا حمض الكربونيك، الذي ينحل في تفاعل ثانٍ مُعطيًا أيون البيكربونات والهيدروجين.

ولو أنّ حامضًا أو مادة أخرى يضيف أيونات هيدروجين إلى الدم، فإنّ أيونات البيكربونات تعمل بوصفها قاعدة، وتزيل أيونات الهيدروجين الفائضة بتكوين حمض الكربونيك. وبشكل مماثل، لو أنّ مادة قاعدية تزيل أيونات هيدروجين من



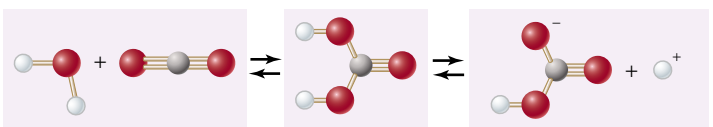
الشكل 2-16

المحاليل المنظمة (الدارئة) تُقلل من التغيرات في pH. إضافة قاعدة إلى محلول تعادل بعضًا من الحمض الموجود فيه، ما يرفع قيمة pH. وهكذا، في حين يتحرك المنحنى يمينًا، مُظهرًا التزايد في قيم القاعدة المضافة، فهو أيضًا يرتفع إلى قيم pH أعلى. يساعد المحلول المُنظم على ارتفاع المنحنى أو هبوطه ببطء شديد على مدى جزء من مقياس pH، يسمى "المدى المحايد أو مدى التنظيم" لذلك المحلول المنظم.

استقصاء

بالنسبة إلى هذا المحلول المنظم، فإنّ إضافة قاعدة ترفع قيمة pH بشكل أسرع عندما تكون قيمة pH أقل من ٤، ممّا لو كانت فوق هذه القيمة. كيف يمكن تعليل هذا السلوك؟

الدم، فإنّ حمض الكربونيك ينحلّ، مطلقًا أيونات هيدروجين في الدم. التفاعلات المنعكسة التي تحوّل بشكل مُتبادل حمض الكربونيك والبيكربونات تعمل بذلك على



ثبات قيمة pH للدم.

فتفاعل ثاني أكسيد الكربون والماء لتكوين حمض الكربونيك يُعدّ أمرًا حاسمًا؛ لأنه يسمح للكربون، الضروري للحياة، بأن يُضاف إلى الماء من الهواء. إن المحيطات على سطح الأرض غنية بالكربون بسبب تفاعل ثاني أكسيد الكربون مَعَ الماء.

في حالة مرضية تُسمى حموضة الدم، تنخفض قيمة pH دم الإنسان، الذي تكون عادة نحو 7.4، إلى نحو 7.1 أو أقل. هذه الحالة تؤدي إلى الوفاة إذا لم تُعالج في الحال. والحالة المضادة لتلك، قلوية الدم، حيث يرتفع الرقم الهيدروجيني للدم بقيمة مماثلة، وهذه كذلك حالة خطيرة جدًا.

الرقم الهيدروجيني، الذي يدعى pH، لمحلول يساوي سالب لوغاريتم تركيز أيونات الهيدروجين في المحلول. ومن ثم، فإنّ قيم pH المنخفضة تدل على تركيز عالٍ للهيدروجين (محاليل حمضية)، وقيم pH العالية تدل على تركيز منخفض للهيدروجين (محاليل قاعدية). حتى التغيرات الصغيرة في قيم pH يمكن أن تكون ضارة للحياة. المحاليل المنظمة في المخلوقات، مثل المحلول المنظم ثاني أكسيد الكربون/ بيكربونات في الإنسان، يُحافظ على قيم pH

ضمن نطاق ضيق.

2-1 طبيعة الذّرّات

المادة كلّها تتكون من ذرات (الشكل 2-2).

- تتكون الذّرّات من نواة تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة، ونيوترونات متعادلة مُحاطة بمدار أو أكثر يحتوي على إلكترونات سالبة الشحنة.
- حتى تكون الذّرّة متعادلة كهربائيًّا، يجب أن تحتوي العدد نفسه من البروتونات والإلكترونات.
- تسمى الذّرّات التي تكسب أو تخسر إلكترونات أيونات.
- إذا خسرت ذرة إلكترونات فسيكون لها شحنة موجبة، وتُسمى أيونًا موجب الشحنة. وإذا اكتسبت الذّرّة إلكترونات فسيكون لها شحنة سالبة، وتُسمى أيونًا سالب الشحنة.
- يُعرف كلّ عنصر عن طريق عدده الذّرّيّ، وهو عدد البروتونات الموجودة في النواة.
- الكتلةُ الذريةُ مجموعُ كتل البروتونات والنيوترونات في ذرة ما.

تسمى الذّرّة النظير إذا فاق عدد النيوترونات عدد البروتونات.

- النظائر أشكال مختلفة للعنصر نفسه، لكن لها أعداد مختلفة من النيوترونات، ولذلك كتل ذرية مختلفة.
- العناصر المُشعة غير مستقرة، وتتفكك لعناصر أصغر عددًا.
- معدل التحلل لأي عنصر مُشع يكون ثابتًا.
- يُعبر عن التفكك بالعمر النصفي، وهو الزمن الضروري لتفكك 50% من الذّرّات.

الإلكترونات تحدد سلوك الذّرّات.

- تزداد الطاقة الكامنة في الإلكترونات كلما زادت المسافة بينها وبين النواة. الإلكترونات المستثارة تستطيع أن تتحرك مؤقتًا لمستوى طاقة أعلى، وتزيد من طاقتها الكامنة.
- يسمى فقدان الإلكترونات من ذرة ما أكسدة.
- يسمى اكتساب الإلكترونات اختزالًا.
- يمكن للإلكترونات الانتقال من ذرة إلى أخرى في تفاعلات اختزال وأكسدة مزدوجة.

(انظر الشكل في العمود الأيسر، صفحة 21).

2-2 العناصر الموجودة في الأنظمة الْحيويّة

يعتمد الجدول الدّوريّ على تفاعلات الإلكترونات في المدار الأخير.

- يوجد 90 عنصرًا بشكل طبيعي في القشرة الأرضية.
- اثنا عشر من هذه العناصر موجود في المخلوقات الحية بكميات أكبر من ضئيلة.
- العناصر التي لها مدارات خارجية ممتلئة بالإلكترونات تكون خاملة. وهذه موجودة في العمود الأخير من الجدول الدّوريّ.

2-3 طبيعة الروابط الكيميائيّة

تحتوي الجزيئات على اثنتين أو أكثر من الذّرّات المتشابهة المرتبطة بروابط كيميائية. تحتوي المركبات على اثنين أو أكثر من العناصر المختلفة.

- تحدث الروابط الأيونيّة عند تجاذب نوعين مختلفين من الأيونات التي تحمل شحنات متضادة. الروابط الأيونيّة يمكن أن تكون قوية، ولكن ليست بقوة الرابطة التساهمية (الشكل 2-8 ب).
- الروابط التساهمية تحدث عند تشارك زوج أو أكثر من الإلكترونات بين ذرتين. يمكن أن تُكوِّن ذرة واحدة روابط تساهمية مَعَ ذرات أخرى عدة.
- الروابط التساهمية هي الأقوى، وهي المسؤولة عن استقرار الجزيئات العضوية.
- السالبية الكهربائية هي ميل الذّرّة لسحب الإلكترونات إليها. فهي تزيد عبر الدورات، وتقل أسفل المجموعات في الجدول الدّوريّ.
- الروابط التساهمية غير المستقطبة تتضمن مشاركة متساوية للإلكترونات بين الذّرّات.
- تتضمن الروابط التساهمية المستقطبة مشاركة غير متساوية للإلكترونات بين الذّرّات. وهذا يحدث بين الذّرّات التي بينها اختلاف كبير في السالبية الكهربائية.
- التفاعلات الكيميائيّة تصنع، أو تكسر، أو تغير الروابط بطرق أخرى. تؤثر درجة الحرارة، والرقم الهيدروجيني، pH، والمحفزات في معدلات التفاعل.

2-4 الماء: مركب حيوي

يمكن فهم الحياة من خلال كيمياء الماء (الشكل 2-11 أ).

- الروابط الهيدروجينيّة هي تفاعلات ضعيفة بين الهيدروجين الحامل لشحنة موجبة جزئية في جزيء والأكسجين الحامل لشحنة سالبة جزئية في جزيء آخر.
- التماسك هو ميل جزيئات الماء للالتصاق ببعضها نتيجة الترابط الهيدروجيني.
- التلاصق يحدث عندما تلتصق جزيئات الماء مَعَ جزيئات مستقطبة أخرى.

2-5 خصائص الماء

للماء خصائص عدّة؛ لأنه مستقطب.

- للماء حرارة نوعية عالية؛ لأنه يحتاج إلى كمية كبيرة من الطاقة لتفكيك الروابط الهيدروجينيّة. كمية الماء الكبيرة في المخلوقات تساعدها في الحفاظ على درجة حرارة الجسم.
- للماء حرارة تبخير عالية، تستعمل للتبريد. يتطلب تكسيرُ عدد كافٍ من الروابط الهيدروجينيّة استعمال كمية كبيرة من الحرارة، لكي يتحول الماء السائل إلى غاز.
- الروابط الهيدروجينيّة بين جزيئات الماء في حالته الصلبة أكثر تباعدًا منها في الحالة السائلة. نتيجة لذلك، فإنّ الجليد يطفو.
- الماء مُذيب جيد للمواد المستقطبة والأيونات. يلجأ الماء إلى صدّ المواد غير المستقطبة.
- الجزيئات أو أجزاء الجزيئات التي تكون مستقطبة هي مُحبة للماء. هذه المواد ستنجذب للماء.
- الجزيئات التي تكون غير مستقطبة هي جزيئات كارهة للماء. هذه المواد يتم صدّها من قبل الماء.
- بسبب هذا الإقصاء للمواد كارهة الماء، فإنّ الجزيئات غير المستقطبة أو مكوناتها تلجأ للتجمع لتكون أشكالًا محددة. وهذا يمكن أنْ يؤثر في شكل الجزيئات العضوية.

2-6 الأحماض والقواعد (الشكل 2-15)

يُكون الماء نوعين من الأيونات عند تكسر الروابط التساهمية.

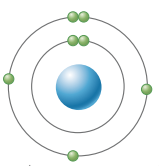
- أيون الهيدروجين (H^+) يحمل شحنة موجبة، وأيون الهيدروكسيل (OH^-) يحمل شحنة سالبة.
- العلاقة بين H^+ وOH^- يُعبر عنها بالرقم الهيدروجيني، أو pH. وهذه تُعرف بأنها سالب لوغاريتم التركيز الأيوني للهيدروجين.
- مقياس pH هو لوغاريتمي، وفرق مقداره واحد على مقياس pH يعني تغيرًا مقداره عشر مرات في تركيز أيون الهيدروجين.
- إذا كان تركيز أيون الهيدروجين أكبر من تركيز أيون الهيدروكسيل، فإن المحلول يكون حمضيًّا، وقيمة pH له أقل من 7 وحدات. وإذا كان تركيز أيون الهيدروجين أقل من تركيز أيون الهيدروكسيل، فسيكون المحلول قاعديًّا، وقيمة pH له أعلى من 7 وحدات.

أسئلة مراجعة

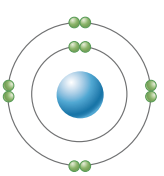
اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. الصفة التي تُميز بين ذرة (الكربون مثلًا) وأخرى (الأكسجين مثلًا) هي عدد:
   أ . الإلكترونات. ب. البروتونات.
   جـ. النيوترونات. د . البروتونات والنيوترونات مجتمعة.
2. إذا كان لذرة إلكترونٌ واحدٌ فقط في مدارها الأخير (مستوى الطاقة الأخير)، فعلى الأغلب أنها ستكوّن:
   أ . رابطة واحدة تساهمية مستقطبة.
   ب. رابطتين تساهميتين غير مستقطبتين.
   جـ. رابطتين تساهميتين.
   د . رابطة أيونية.
3. الذّرّة التي تحمل شحنة موجبة كليّة يجب أن تملك عدد:
   أ . بروتونات أكثر من النيوترونات.
   ب. بروتونات أكثر من الإلكترونات.
   جـ. إلكترونات أكثر من النيوترونات.
   د . إلكترونات أكثر من البروتونات.
4. النظيران C^{12} و C^{14} يختلفان عن بعضهما في عدد:
   أ . النيوترونات. ب. البروتونات.
   جـ. الإلكترونات. د . ب وجـ.
5. الذّرّة التي تملك إلكترونات أكثر من البروتونات تسمى:
   أ . عنصرًا. ب. نظيرًا.
   جـ. أيونًا موجب الشحنة. د . أيونًا سالب الشحنة.
6. واحدٌ مما يأتي لا يُعد صفة للعناصر الأكثر وجودًا في المخلوقات الحية:
   أ . العناصر لها كتلة ذرية منخفضة.
   ب. العناصر لها عدد ذري أقل من 21.
   جـ. العناصر تمتلك ثمانية إلكترونات في مستوى الطاقة الخارجي لها.
   د . تفتقر العناصر لإلكترون أو أكثر من مستوى الطاقة الأخير لديها.
7. واحد مما يأتي يُتوقع أن يكون أيونًا موجب الشحنة:
   أ . الفلورين (F). ب. الهيليوم (He).
   جـ. البوتاسيوم (K). د . البورون (B).
8. ارجع إلى العنصر الظاهر في الصورة. عدد الروابط التساهمية التي يمكن لهذه الذّرّة تكوينها هو:
   أ. اثنتان.
   ب. ثلاث.
   جـ. أربع.
   د . لا شيء.



9. ارجع إلى العنصر الظاهر في الصورة. عدد الروابط التساهمية التي يمكن لهذه الذّرّة تكوينها هو:
   أ. اثنتان.
   ب. ثلاث.
   جـ. أربع.
   د . لا شيء.



10. الرابطة الأيونيّة تتماسك مَعَ بعضها عن طريق:
   أ . تشارك إلكترونات المدار الأخير.
   ب. التجاذبات بين الأيونات التي تحمل الشحنة نفسها.
   جـ. تجاذب الشحنات بين إلكترونات المدار الأخير.
   د . التجاذبات بين أيونات تحمل شحنات متضادة.
11. تختلف الروابط التساهمية المستقطبة عن الروابط التساهمية غير المستقطَبة:
   أ . في الرابطة التساهمية المستقطبة تتشارك الإلكترونات بالتساوي بين الذّرّات.
   ب. في الرابطة التساهمية غير المستقطبة يوجد تجاذب شحنات بين نواتي الذّرّات.
   جـ. هناك فرق كبير في السالبية الكهربائية للذرات في الرابطة غير المستقطَبة.
   د . هناك فرق كبير في السالبية الكهربائية للذرات في الرابطة المستقطَبة.
12. الرابطة الهيدروجينيّة يمكن أن تكون:
   أ . عندما يكون الهيدروجين جزءًا من الرابطة التساهمية المستقطَبة.
   ب. في الماء فقط.
   جـ. بين أي ذرات كبيرة ذات سالبية كهربائية مثل الأكسجين.
   د . عندما تتشارك ذرتا هيدروجين بإلكترون واحد.
13. واحدة من الصفات الآتية للماء لا تُعد نتيجة لمقدرته على تكوين روابط هيدروجينية:
   أ . خاصية التماسك. ب. حرارته النوعية عالية.
   جـ. مقدرته على العمل بوصفه مُذيبًا. د . له pH متعادلة.
14. المادة التي لها تركيز عالٍ من أيونات الهيدروجين:
   أ . تسمى قاعدة. ب. تسمى حمضًا.
   جـ. لها قيمة pH عالية. د . ب و ج.

أسئلة تحدٍّ

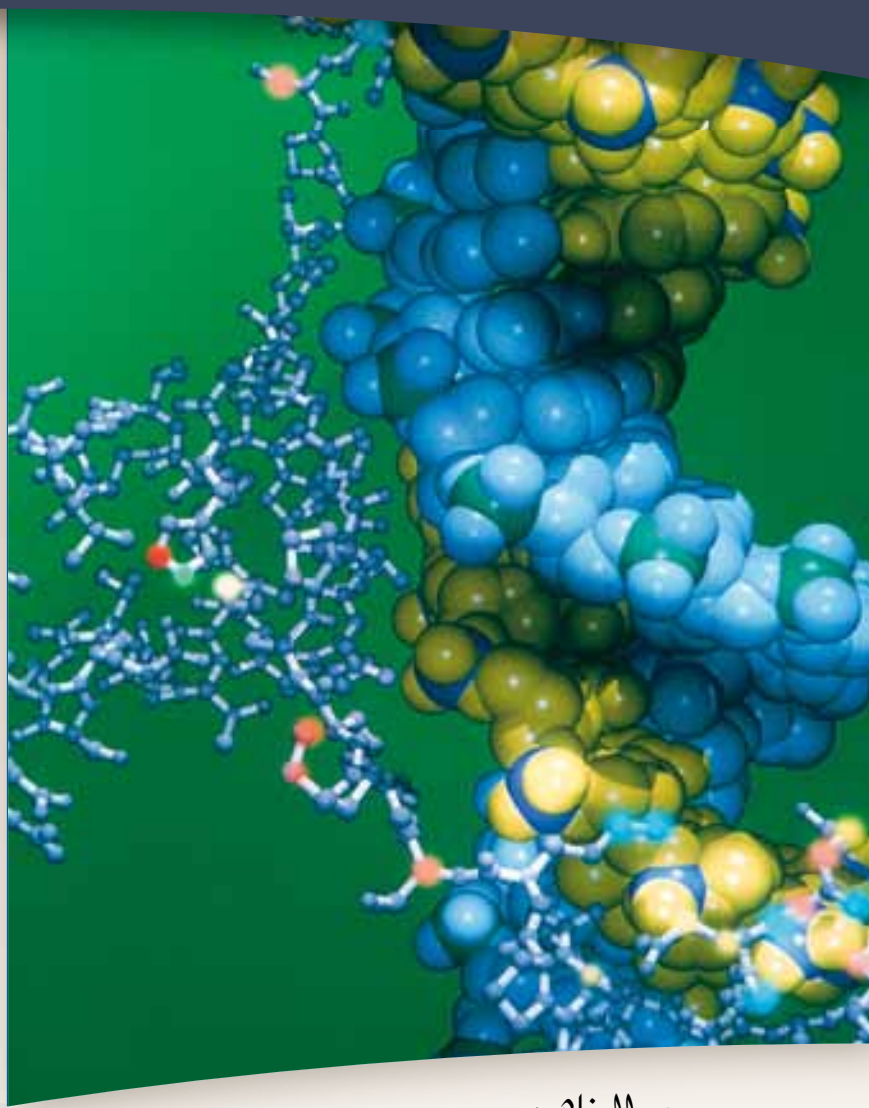
1. العناصر التي تُكون أيونات هي مهمة لسلسة من العمليات البيولوجية. لقد درست عن الأيونات الموجبة الشحنة، الصوديوم (Na^+)، والكالسيوم (Ca^{2-}) والبوتاسيوم (K^+) في هذا الفصل. استعمل معرفتك في تعريف الأيون موجب الشحنة لتُحدد أمثلة أخرى من الجدول الدّوريّ.
2. تدور فكرة رئيسة شائعة في المنشورات التي تتعلق بقصص الخيال العلمي حول وجود أشكال من الحياة تعتمد في أساسها على مادة السيليكون مغيرًا بذلك حياتنا التي تعتمد في أساسها على الكربون. قيّم إمكانية وجود حياة تعتمد في أساسها مادة السيليكون معتمدًا على التركيب الكيميائي واحتمال تكوين الروابط الكيميائيّة لذرة السيليكون.
3. تركّزت الجهود الحديثة لوكالة الفضاء الأمريكية ناسا في البحث عن إشارات أو علامات للحياة على كوكب المريخ على البحث عن دليل لوجود ماء سائل في تاريخ الكوكب، مفضلة ذلك عن البحث مباشرة عن مخلوقات بيولوجية (حيّة أو على شكل أحافير). استعمل معرفتك لتأثير الماء في الحياة على الأرض؛ لتبني حجّة لتبرير هذا التوجه.

هل أنت في حاجة إلى مراجعة إضافية؟ زر الموقع www.ravenbiology.com. لتتدرب على الاختبارات القصيرة، والرسوم المتحركة، والتسجيلات التلفزيونية، وأنشطة مخصصة لمساعدتك على فهم المادة الموجودة في هذا الفصل.

الفصل 3

الوحدات الكيميائيّة البنائيّة للحياة

The Chemical Building Blocks of Life



موجز المفاهيم

3-1 الكربون: يُشكّل بنية الجزيئات الْبيولوجيّة

- *المجموعات الوظيفيّة تُسبّب الاختلافات في الخصائص الْجزيئيّة.*
- *الآيزوميرات مركبات لها صيغ جزيئية مُتشابهة وبنائية مختلفة.*
- *تضم الجزيئات الكبيرة الكربوهيدرات، والأحماض النّوويَّة، والبروتينات، والدُّهون.*

3-2 الكربوهيدرات: جزيئات مُخزِّنة للطَّاقة وجزيئات بنائية

- *السّكّريّات الأحادية هي سكّريّات بسيطة.*
- *الآيزوميرات السّكّريّة تمتلك اختلافات بنائية.*
- *السّكّريّات الثنائية تُستخدم بوصفها جزيئات ناقلة في النبات، وتزوِّد الحيوانات بالغذاء.*
- *عديدة التَّسكُّر تزوِّدنا بتراكيب بنائية ومركبات مُخزِّنة للطّاقة.*

3-3 الأحماض النّوويَّة: جزيئات المعلومات

- *الأحماض النّوويَّة مُبلمراتٌ من النيوكليوتيدات.*
- *يحمل DNA الشّيفرة الْوراثيّة.*
- *RNA هو منسوخ سلسلة DNA.*
- *النيوكليوتيدات الأخرى هي أجزاء مُهمّة في تفاعلات الطاقة.*

مقدّمة

تحتوي كأس من الماء على جزيئات أكثر من عدد النّجوم في السماء. ولكن هناك كثير من الجزيئات أكبر بكثير من جزيئات الماء التي تتكوَّن من الآف الذّرّات، وتتكون من مئات الجزيئات التي ترتبط مع بعضها لتكوِّن سلاسل طويلة. هذه التجمعات الكبيرة، التي تصنعها المخلوقات الحيّة، تُدعى **الجزيئات الكبيرة Macromolecules**. وكما تعلم، فإنَّ الجزيئات الكبيرة تُقسم إلى أربعة أنواع: الكربوهيدرات، والأحماض النّوويَّة، والبروتينات، والدُّهون، وهذه الجزيئات تُشكِّل الوحدات الكيميائية الْبنائيّة الأساسيّة التي تتكون منها المخلوقات الحية جميعها.

تحتوي الجزيئات الكبيرة الْبيولوجيّة جميعها على مركبات تحتوي على الكربون. لهذا؛ سنبدأ حديثنا في هذا الفصل بمُلخص بسيط عن الكربون وكيميائيته. إنَّ دراسة كيمياء الكربون، بسبب أهميته الْبيولوجيّة، تُدعى الكيمياء العضويّة.

3-4 البروتينات: جزيئات لها تراكيب ووظائف متنوعة

- *البروتينات مُبلمرات من الأحماض الأمينيّة.*
- *مستويات البناء (التركيب) البروتيني.*
- *الموتيفات والحقول صفات تركيبية إضافية.*
- *تعتمد عملية انطواء البروتين على بروتينات الشَّبيرون.*
- *بعض الأمراض تنتج من انطواء البروتين بشكل غير صحيح.*
- *التَّمسُّخ يبطل عمل البروتينات.*

3-5 الدُّهون: جزيئات كارهة للماء

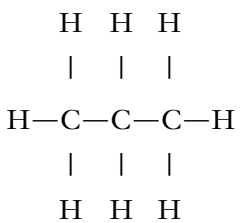
- *تتكوَّن الدُّهون من مُبلمرات معقَّدة من الأحماض الدُّهنية مُرتبطة مع الجليسيرول.*
- *تُشكِّل الدُّهون جزيئات ممتازة لتخزين الطاقة.*
- *تُشكِّل الدُّهون المُفسفرة الأغشية الخلويّة.*

1-3 الكربون: يُشكِّل بنية الجزيئات الْبيولوجيّة

في الفصل الثاني، راجعنا أساسيات الكيمياء. لا يوجد قوانين كيميائية جديدة في الأجهزة الْبيولوجيّة، حيث إنَّ الأجهزة الْبيولوجيّة لا تتعارض مَعَ القوانين الْكيميائيّة. لهذا، فإنَّ الكيمياء تُشكِّل أساس الأجهزة الْبيولوجيّة.

تتكوَّن بنية الجزيئات الْبيولوجيّة بشكل كبير من ذرات الكربون التي ترتبط مع بعضها أو مَعَ ذرات أُخرى مثل الأكسجين، أو النيتروجين، أو الكبريت، أو الهيدروجين. تستطيع الجزيئات التي تحتوي على الكربون تشكيل سلاسل مستقيمة، متشعبة، أو حتى حلقات، كرات، أو ملفات، وذلك بسبب قدرة الكربون على تشكيل أربع روابط تساهمية. تُدعى الجزيئات المكوِّنة من الكربون والهيدروجين **الهيدروكربونات Hydrocarbon**. وحيث إنَّ الروابط التَّساهمية بين الكربون والهيدروجين تُخزِّن مقدارًا جيدًا من الطاقة، فإنَّ الهيدروكربونات تُعَدّ وقودًا جيدًا. فمثلًا البنزين، غني بالهيدروكربونات، وغاز البروبان، هو من الهيدروكربونات، حيث يتكون من سلسلة من ثلاثة كربونات وثماني ذرات هيدروجينية مرتبطة بها. الصيغة الْكيميائيّة لغاز البروبان هي C_3H_8،والصيغة البنائيّة له مُبيَّنة كما يأتي:

الصيغة الْبنائيّة لغاز البروبان



من الناحية النَّظرية، لا يوجد هناك حدود لطول سلسلة مُكوَّنة من ذرات الكربون. كما سنصف فيما تبقى من هذا الفصل، فإنَّ الأنواع الأربعة للجزيئات الْبيولوجيّة في الغالب تتكون من مركبات تحتوي على سلاسل كربونية ضخمة.

المجموعات الوظيفية تُسبِّب اختلافات في الخصائص الْجزيئيّة

تمتلك ذرات الكربون والهيدروجين كهروسالبية مُتشابهة، لهذا فإنَّ الإلكترونات في الرَّابطة C—H و C—C موزعة بالتساوي، ولا يوجد اختلاف معنوي في الشُّحنة على سطح الجزيء. لهذا السبب، فإنَّ الهيدروكربونات تعدّ مُركبات غير مُستقطَبة. مُعظم الجزيئات الْبيولوجيّة التي تصنعها الخلايا، تحتوي ذرات أُخرى. وحيث إنَّ هذه الذّرّات لها كهروسالبية مُختلفة، فإنَّ الجزيئات التي تحتويها تمتلك مناطق مشحونة جزئيًّا بشحنة موجبة أو سالبة، ولهذا فإنَّ هذه الجزيئات مُستقطَبة. إنَّ هذه الجزيئات يمكن أنْ نفكّر فيها كما لو أنّ C—H هو القلب، ويتصل به مجموعات جزيئية، تُسمّى **مجموعات وظيفية Functional groups**، فمثلًا، مجموعة OH— المُتَّصلة هي مجموعة وظيفية تُدعى مجموعة الهيدروكسيل.

المجموعات الوظيفية تمتلك خصائص كيميائية مُحدَّدة تحافظ عليها بغض النظر عن مكان وجود هذه المجموعات. فمثلًا مجموعات الهيدروكسيل والكاربونيل (C=O)، هي مجموعات مُستقطَبة بسبب الكهروسالبية للأكسجين (كما وصف في الفصل الثاني). مجموعات وظيفية أُخرى تضم مجموعات الكاربوكسيل (COOH) والفوسفات (PO_4) الحمضية ومجموعة الأمين (NH_2) القاعدية. إنَّ كثيرًا من هذه المجموعات الوظيفية تستطيع المشاركة في تكوين الروابط الهيدروجينية. إنَّ المانح والمستقبل في الروابط الهيدروجينية يمكن معرفته بناءً على الكهرومغناطيسية المُعطاة سابقًا في (الجدول 2-2). (الشكل 3-1) يوضِّح هذه المجموعات الوظيفية المهمة من الناحية الْبيولوجيّة، ويُبيِّن الجُزيئات الكبيرة الموجودة فيها.

المجموعة الوظيفية	الصيغة البنائية	المثال	موجود في
هيدروكسيل	—OH	إيثانول	الكربوهيدرات والبروتينات والأحماض النووية والدهون
كاربونيل	C=O	أستألدهايد	الكربوهيدرات والأحماض النووية
كاربوكسيل	—COOH	حامض الخليك	البروتينات والدهون
أمين	—NH$_2$	ألانين	البروتينات والأحماض النووية
سلفهيدرل	—SH	سيستين	البروتينات
فوسفات	—OPO$_3^{2-}$	فوسفات الجليسرول	الأحماض النووية
ميثل	—CH$_3$	ألانين	البروتينات

الشكل 3-1

المجموعات الوظيفية الأساسية. تعمل هذه المجموعات بوصفها وحدات خلال التَّفاعلات الْكيميائيّة، وتمنح خصائص كيميائية مُحدَّدة للمركبات التي تملكها. فمثلًا، تقوم مجموعات الأمين بجعل المركب الذي يحتويها قاعديًّا، فيما تقوم مجموعة الكاربوكسيل بجعل المركب حمضيًّا. هذه المجموعات ليست مُقتصرة على الأمثلة المذكورة في عمود "موجود في" لكنّها تتوزع بشكل واسع في الجُزيئات الْبيولوجيّة.

الجدول 3-1

الجزيئات الكبيرة			
الجزيء الكبير	**الوحدة الأساسية**	**الوظيفة**	**مثال**
الكربوهيدرات			
النشا، الجلايكوجين	جلوكوز	تخزين الطاقة	البطاطا
السيليوز	جلوكوز	الجدار الخلوي في الخلايا النباتية	الأوراق؛ خيوط الكرفس
الكايتين	جلوكوز معدّل	تراكيب دعامية	قشرة السرطعون
الأحماض النّوويَّة			
DNA (حمض نووي منقوص الأكسجين)	نيوكليوتيدات	يشكل الرسائل التي تحملها الجينات	الكروموسومات
RNA (حمض نووي رايبوزي)	نيوكليوتيدات	يحتاج إليه التعبير الجيني	RNA الرسول
بروتينات			
وظيفية	الأحماض الأمينية	التحفيز؛ النقل	الهيموجلوبين
بنائية	الأحماض الأمينية	دعامة	الشعر؛ الحرير
الدُّهون			
الشحوم	جليسيرول وثلاثة أحماض دهنية	تخزين الطاقة	زبدة؛ زيت الذرة، الصابون
الدُّهون المفسفرة	جليسيرول، وثلاثة أحماض دهنية، مجموعة فوسفات، ومجموعة R مستقطَبة	الأغشية الخلوية	فوسفوتايدل كولين
البروستاجلاندين	5 حلقات كربونية مع ذيلين غير مُستقطبين	رسائل كيميائية	بروستاجلاندين (E)
ستيرويدات	4 حلقات كربونية مدمجة	الأغشية؛ الهرمونات	كولستيرول؛ إستروجين
تيربينات	سلاسل كربونية طويلة	الصبغات؛ دعامة بنائية	كروتين؛ مطاط

الآيزوميرات مركّبات لها صيغ جزيئية مُتشابهة وبنائية مختلفة

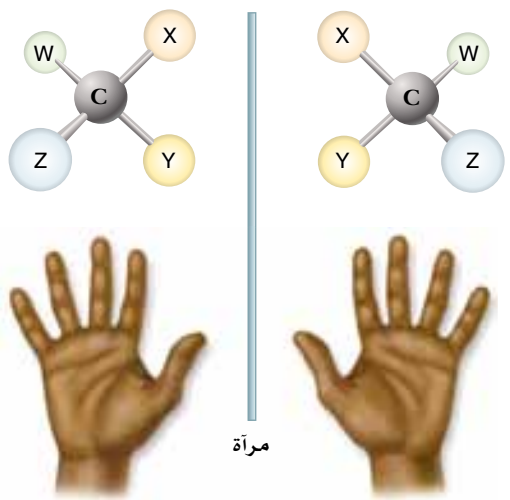
المركبات العضوية التي تمتلك صفات جزيئية مُتشابهة، ويمكن أنْ توجد بأشكال مُختلفة تُدعى **الآيزوميرات Isomers**. إذا وُجدت الاختلافات في البناء الحقيقي للهيكل الكربوني، فإنها تُسمّى الآيزوميرات البنائيّة. فيما بعد سوف نرى أنَّ الجلوكوز والفركتوز هي آيزوميرات بنائية للصيغة الجزئية $C_6H_{12}O_6$. شكل آخر من الآيزوميرات يُسمّى آيزوميرات فراغية، هذه الآيزوميرات لها هيكل كربوني متشابه، لكنها تختلف في كيفية ترتيب المجموعات المرتبطة بهذا الهيكل.

تتعرف الأنزيمات في الأنظمة البيولوجيّة على نوع واحد، مُحدَّد وخاص من الآيزوميرات الفراغية. مجموعة جزئية من الآيزوميرات الفراغية، تُدعى المتضادّات الضوئية *Enantiomers*، وهي في الحقيقة صورة لبعضها في المرآة. الجزيء الذي يمتلك نُسخًا عبارة عن صورة مرآة يُدعى جزيئًا غير متطابق أو **كايرال Chiral**. عندما تكون ذرة الكربون مُرتبطة بأربعة جزيئات مُختلفة، لا يوجد تماثل طبيعي (الشكل 3-2).

تتميز الجزيئات غير المُتطابقة بتأثيرها في الضوء المُستقطب. يوجد للضَّوء المُستقطب مستوى واحد، ويمكن للجزيئات غير المُتطابقة أن تحرف هذا المستوى إمّا إلى اليمين أو إلى اليسار. لذلك، فإنّنا ندعو الشّكلين غير المُتطابقين باليميني D. واليساري L. تميل الأنظمة الحية لإنتاج نوع واحد من نوعي المركبات غير المُتطابقة؛ وعلى سبيل المثال، نجد في معظم المخلوقات الحية سُكّريات يمينية وأحماضًا أمينيّة يساريّة.

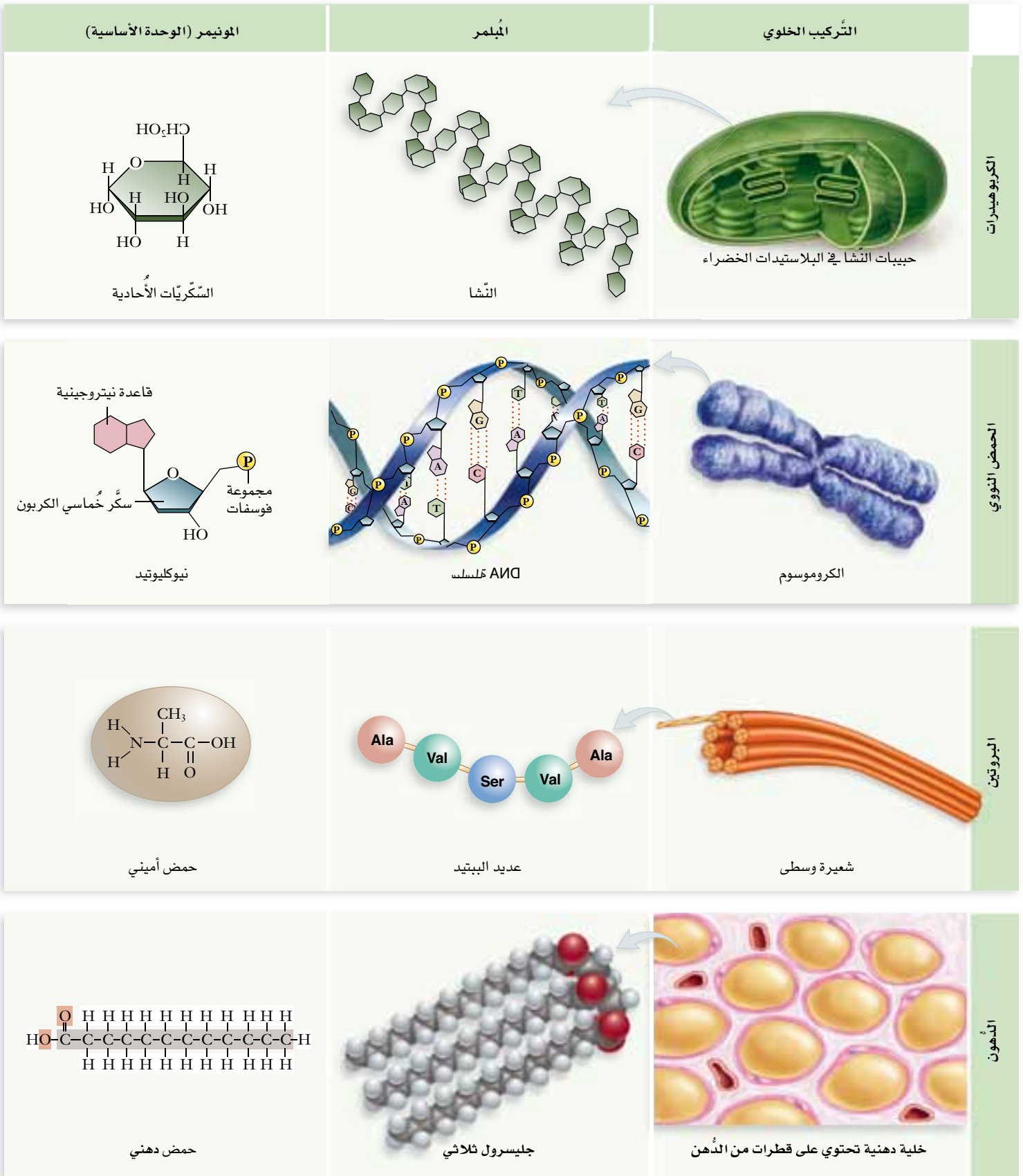
تضم الجزيئات الكبيرة الكربوهيدرات، الأحماض النّوويَّة، والبروتينات، والدُّهون

كما ذُكِرَ في البداية، وُزِّعَت الجُزيئات البيولوجيّة الكبيرة على أربع مجموعات: الكربوهيدرات، والأحماض النّوويَّة، والبروتينات، والدُّهون (جدول 3-1). في معظم الأوقات، تعدّ هذه الجزيئات الكبيرة مبلمرات. **المُبلمر Polymer** هو جزيء طويل تكوَّن عن طريق ربط مجموعة كبيرة من الوحدات الصغيرة، التي تُسمّى **مُونمرات Monomers**، مثل عربات القطار التي ترتبط مع بعضها لتُشكِّل القطار. إنَّ طبيعة المُبلمر تُحدَّد بطبيعة المونمر المُستخدم لبناء المُبلمر. فمثلًا، الكربوهيدرات المُعقَّدة مثل النَّشا تُعَدُّ مُبلمرات من سكر بسيط حلقي، الأحماض النّوويَّة (DNA, RNA) هي مُبلمرات من النيوكلتيدات (الشكل 3-3)؛ البروتينات هي مبلمرات من الأحماض الأمينية، والدُّهون هي مُبلمرات من الأحماض الدُّهنية (انظر الشكل 3-3). تُبنى هذه السلاسل الطويلة من تفاعلات كيميائية تُسمّى تفاعلات نزع الماء، وتُحطَّم عن طريق تفاعلات التحليل المائي.



الشكل 3-2

الجزيئات غير المُتطابقة (الكايرال). عندما ترتبط ذرة الكربون بأربع مجموعات مُختلفة، فإنَّ الجزيء النَّاتج يُسمّى كايرال. يمكن لهذا الجزيء أن يُكوِّن آيزوميرات التي هي صور مرآة. المُركبات الظَّاهرة بالصورة تمتلك المجموعات الأربع نفسها، إلا أنَّها لا تنطبق على بعضها بشكل تام، تمامًا مثل يديك الاثنتين. هذه الأنواع من الآيزوميرات تُدعى "المُتضادات الضّوئيّة".



الشكل 3–3

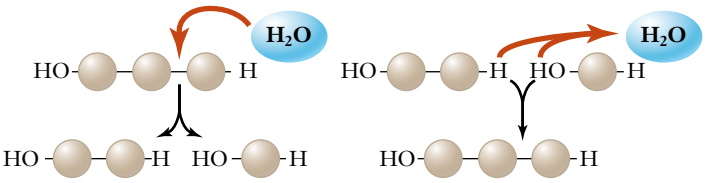
مُبلمرات الجزيئات الكبيرة. الأنواع الأربعة من الجزيئات الكبيرة مُبيَّنة هنا. الكربوهيدرات والأحماض النّوويَّة، والبروتينات جميعها تُشكِّل مُبلرمات مصنوعة من مونمرات مُبيَّنة هنا. الدُّهون لا ينطبق عليها علاقة المُبلمرات والمونمرات، ولكنها مُكوَّنة من جلسيرول وحموض دهنية. الأنواع الأربعة مُبيَّنة هنا بالنسبة إلى أماكن وجودها في الخلية.

تفاعلات نزع الماء

على الرّغم من اختلاف المونميرات بين الجزيئات الكبيرة، إلا أنَّ الأساس الكيميائي لعملية تصنيعها مُتشابه: لتشكيل روابط تساهمية من جزيئين من المُونمرات، يفقد أحد هذه المونِمرات مجموعة OH— والآخر ذرة هيدروجين (H) (الشكل 3-4 أ). مثلًا، هذه الكيمياء البسيطة هي نفسها المُستخدمة لربط الأحماض الأمينية مع بعضها، أو تجميع وحدات الجلوكوز مع بعضها لتكوين النَّشا. هذا التفاعل يُستخدم لربط الأحماض الدُّهنية مع الجليسرول في الدُّهون. يُدعى هذا التفاعل تكاثفًا أو **تفاعل نزع الماء Dehydration reaction**، وذلك كون إزالة H— و OH— تشبه تمامًا إزالة جزيء ماء (H_2O). يُفقد جزيء ماء لكلّ وحدة بنائية تُضاف إلى الجزيء الكبير. تحتاج هذه التفاعلات الكيميائيّة الحيوية وغيرها إلى أنْ تكون المواد المتفاعلة قريبة من بعضها، وأن تُضغط وتُكَسَّر الروابط الكيميائيّة الصحيحة كذلك. هذه العمليات من التَّوضُّع والشَّد، تُدعى التحفيز، وتحدث في الخلية بفعل الأنزيمات.

تفاعلات التَّحلُّل المائيّ

تقوم الخلايا بتفكيك الجزيئات الكبيرة إلى وحداتها البنائيّة بتفاعلات في شكلها الأساسي، وهي مُعاكسة لتفاعلات نزع الماء، حيث يُضاف جزيء من الماء بدل أنْ يُفقد (الشكل 3-4ب). في هذه العملية، التي تُدعى **التَّحلُّل المائيّ Hydrolysis**، ترتبط ذرة هيدروجين مع واحدة من الوحدات البنائيّة، وترتبط مجموعة هيدروكسيل بالوحدة الأخرى، مُحطِّمةً بذلك الرابطة التَّساهمية الخاصة الموجودة في المُركَّب الكبير.



أ. التصنيع بنزع الماء ب. التحلل المائي

الشكل 3-4

تصنيع الجزيئات الكبيرة وتحطيمها.

أ. الجزيئاتُ الكبيرةُ البيولوجيّة مُبلمراتٌ تكوَّنت عن طريق ربط المونمرات مع بعضها عن طريق التَّصنيع بإزالة الماء. هذه العملية تُطلِق جزيء ماء لكلّ رابطة يتم تشكيلها. ب. تحطم الرَّوابط بين الوحدات البنائيّة يتضمن عملية تُدعى التَّحلل المائي، وهي تُرجع جزيء الماء المفقود في تفاعل إزالة الماء.

الأنظمة الحية تُصنَّع من أربعة أنواع رئيسة من الجزيئات الكبيرة. الجزيئات الكبيرة هي مُبلمرات، تتكوَّن من سلاسل طويلة من الوحدات البنائيّة المُتشابهة التي ترتبط مع بعضها عن طريق تفاعلات نزع الماء، وتُحطَّم عن طريق تفاعلات التَّحلُّل المائيّ.

2-3 الكربوهيدرات: جزيئات مُخزِّنة للطّاقة وجزيئات بنائيّة

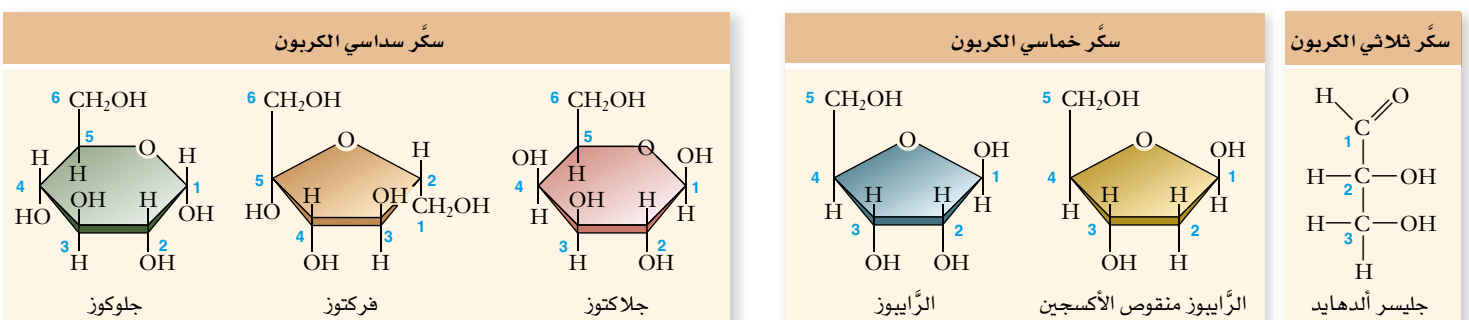
الكربوهيدرات Carbohydrates: مجموعة من الجزيئات التي تحتوي على: الكربون، والهيدروجين، والأكسجين بحسب النسبة المولية 1:2:1. ولها الصِّيغة التَّجريبية (التي تُبيِّن عدد الذّرّات في الجزيء عن طريق رقم سفلي) $(CH_2O)_n$، حيث n هو عدد ذرات الكربون. تُعدّ الكربوهيدرات مخزنًا جيدًا للطاقة، وذلك لأن الكربوهيدرات تحتوي على عدد كبير من الروابط بين الكربون والهيدروجين (C—H)، التي تُطلِق طاقة عند التَّأكسد. تُعَدُّ السّكّريّات من بين أهم الجزيئات المُخزِّنة للطَّاقة، وهي موجودة بأشكال عدة مُختلفة.

السّكّريّات الأُحادية هي سُكَّرياتٌ بسيطةٌ

إنّ أبسط الكربوهيدرات هي السّكّريّات **الأُحادية Monosaccharide** (إغريقيًّا *mono* «أُحادي» ولاتينيًّا *saccharum* تعني «سُكر»). السّكّريّات البسيطة يمكن أنْ تملك ثلاث ذرات من الكربون بالحد الأدنى، ولكن تمتلك السّكّريّات البسيطة التي تؤدي دورًا رئيسًا في تخزين الطاقة ست ذرات من الكربون (الشكل 3-5). الصِّيغة التجريبية للسكريات سداسية الكربون، هي:

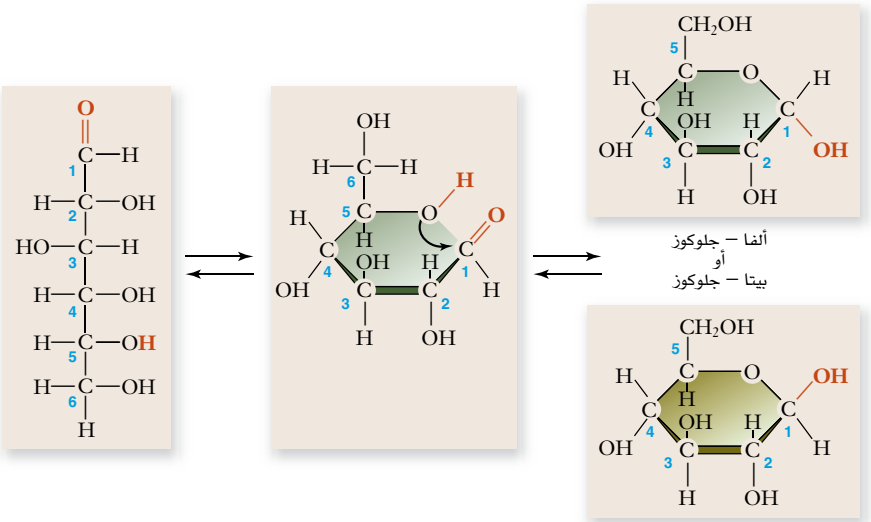
$C_6H_{12}O_6$ أو $(CH_2O)_6$

تأخذ السّكّريّات سداسية الكربون شكل سلاسل مستقيمة، لكن في البيئة المائية عادةً ما تُشكِّل هذه السّكّريّات حلقات.



الشكل 3-5

السّكّريّات الأُحادية. السّكّريّات الأُحادية، أو السّكّريّات البسيطة، تمتلك في حدها الأدنى 3 ذرات من الكربون، وعادةً ما تُستخدم بوصفها وحدات بنائية لتكوين جزيئات كبيرة. السُّكَّرُ الخماسيُّ الرَّايبوزي والرَّايبوز منقوص الأكسجين مُكوناتٌ للأحماض النّوويَّة (انظر الشكل 3-14). الجلوكوزُ سداسيُّ الكربون جزءٌ من الجزيئات الكبيرة المُخزِّنة للطَّاقة. الأرقام باللَّون الأزرق تُشير إلى ذرات الكربون. السّكّريّات الأُحادية تقليديًّا تُرقم من الطَّرف الأكثر أكسدة.



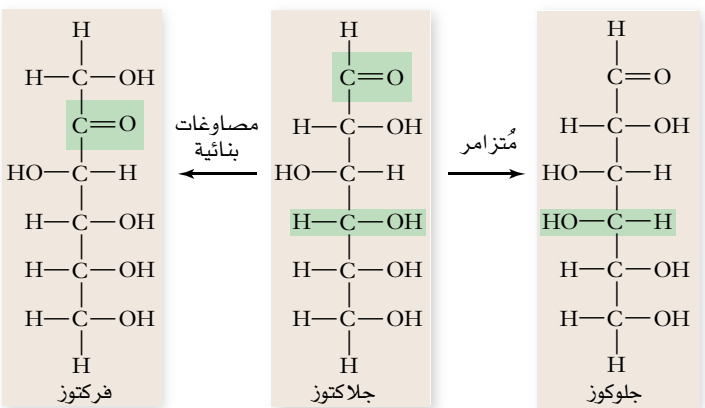
الشكل 3-6

تركيب جزيء الجلوكوز. الجلوكوزُ جزيءٌ خطيٌّ، سداسيُّ الكربون يُشكِّل حلقة سداسية في المحاليل المائية. عندما يُغلق الجلوكوز ليُكوِّن حلقة يَنتُج هناك شكلان: ألفا-جلوكوز وبيتا-جلوكوز. تختلف هذه التَّراكيب فقط في موقع OH المُرتبطة بذرة الكربون رقم 1. يمكن تمثيل تركيب الحلقة بطرق عدة. الشَّكل هنا هو الأكثر شيوعًا، حيث يُرقم الكربون (باللَّون الأزرق) تقليدًا من أجل جعل مُقارنة الأشكال سهلة. الخطوط العريضة تُمثل الأجزاء للجزيء التي تبرز من الصفحة في اتجاهك.

يُعَدُّ الجلوكوز، الذي تطرقنا إليه في الفصل الثاني، من أهم السّكّريّات الأُحادية سداسية الكربون التي تُخزِّن الطّاقة. يمتلك الجلوكوز سبع روابط مُخزِّنة للطاقة C—H (الشكل 3-6). اعتمادًا على اتجاه مجموعة الكربونيل (C=O) عند إغلاق الحلقة، فإنّ جزيء الجلوكوز يوجد بشكلين مختلفين: ألفا (α) أو بيتا (β).

الآيزوميرات السّكّريّة تمتلك اختلافات بنائية

الجلوكوز ليس السكَّر الوحيد الذي يمتلك الصيغة الجزيئيّة $C_6H_{12}O_6$. توجد في الطبيعة آيزوميرات بنائية وآيزوميرات فراغية Stereoisomers لهذا السُّكَّر البسيط سداسي الكربون. الفركتوز هو آيزومير بنائي يختلف عن الجلوكوز في موقع مجموعة الكاربونيل (C=O)؛ الجلاكتوز هو من الآيزوميرات الفراغية، حيث يختلف عن الجلوكوز في موقع OH و H بالنسبة إلى الحلقة (الشكل 3-7). هذه الاختلافات عادةً ما تكون مسؤولة عن اختلافات وظيفية كبيرة بين هذه الآيزوميرات. البراعم التذوقية لديك تستطيع التَّمييز بين هذه الآيزوميرات: يُعَدُّ جزيء الفركتوز ذا مذاق أحلى بكثير من الجلوكوز على الرّغم من أنَّ التَّركيب الكيميائي لهما مُتشابه. تستطيع الأنزيمات أيضًا التَّمييز بين هذه الآيزوميرات البُنائيّة والآيزوميرات الفراغية التي تمتلك هيكلًا سداسيّ الكربون. إنَّ الآيزوميرات المُختلفة للجلوكوز ذات أهمية في تكوين المُبلرات التي تُصنع من جزيء الجلوكوز بوصفها وحدة بنائية، كما سترى لاحقًا في هذا الفصل.



الشكل 3-7

الآيزوميرات والمتزامرات. جلوكوز، فركتوز، وجلاكتوز آيزوميرات ذات صيغة تجريبية $C_6H_{12}O_6$. الآيزومير البنائي للجلوكوز، مثل الفركتوز، يمتلك مجموعات كيميائية مُتشابهة مُرتبطة إلى ذرات كربونية مُختلفة. لاحظ أنّ ذلك يؤدي إلى تكوين حلقة خماسية في المحاليل المائية (انظر الشكل 3-5). الآيزوميرات للجلوكوز، مثل جلاكتوز، تمتلك مجموعات كيميائية مُتماثلة مُرتبطة إلى ذرات كربونية مُتشابهة لكن باتجاهات مُختلفة (OH— على ذرة الكربون رقم 4)

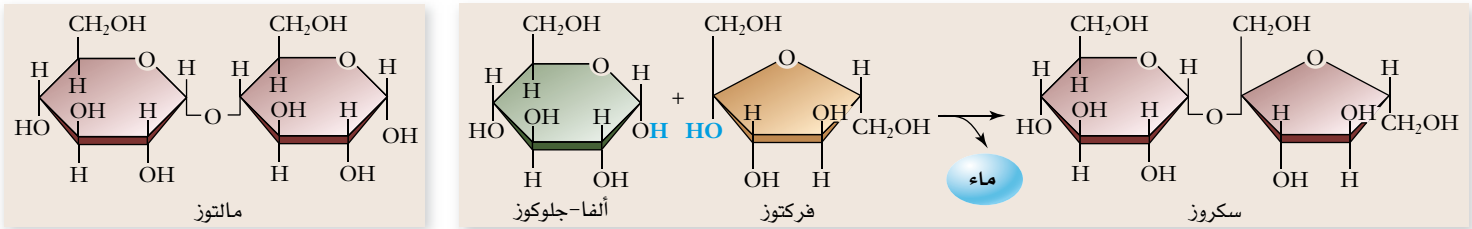
السّكّريّات الثنائية تُستخدم بوصفها جزيئات ناقلة في النَّبات وتُزوِّد الحيوانات بالغذاء

مُعظم المخلوقات الحية تنقل السّكّريّات في داخل أجسامها. في الإنسان ينتقل الجلوكوز في الدَّم بشكله البسيط أُحادي السُّكَّر. في النبات وكثير من المخلوقات الحية، يُحوَّل الجلوكوز إلى شكل آخر قابل للنقل قبل أنْ يتمَّ نقله من مكان إلى آخر داخل المخلوق الحي. هذا الشَّكل، عادةً يكون أقل جاهزية لاستخدامه في عمليات الأيض.

إنَّ هذه الأشكال التي ينتقل بها السُّكَّر عادةً ما تُصنع بربط جزيئين من السّكّريّات الأُحادية مع بعضها لتُكوِّن سكرًا **ثنائي التَّسكُّر Disaccharide** (بالإغريقي *di* "اثنان"). تُشكِّل هذه السّكّريّات الثنائية مستودعًا جيدًا للجلوكوز، حيث لا تستطيع الأنزيمات القادرة على استخدام الجلوكوز بشكله المفرد في المخلوقات الحية تحطيم الرّابطة بين جزيئي أُحادية التَّسكُّر. وتكون الأنزيمات القادرة على فعل ذلك موجودة فقط في النَّسيج الذي يحتاج إلى استخدام الجلوكوز.

يختلف شكل السُّكَّر المنقول اعتمادًا على نوعية السّكّريّات الأُحادية التي ترتبط لتكوِّن السّكّريّات الثنائية. ويستطيع الجلوكوز أن يُشكِّل سُكَّريات ثنائية قابلة للنَّقل، إما بارتباطه مع نفسه، أو مع غيره من السّكّريّات الأُحادية، مثل الفركتوز والجلاكتوز. عندما يرتبط الجلوكوز الأُحادي مع الآيزومير البنائي الفركتوز، فإنّ السُّكَّر الثنائي الناتج هو سكروز، أو سُكَّر المائدة (الشكل 3-8أ). السَّكروز هو الشكل الذي يُستخدم لنقل الجلوكوز في معظم النباتات، وهو أيضًا السُّكَّر الذي يأكله معظم النّاس والحيوانات الأخرى. قصب السُّكَّر وسُكَّر الشمندر غنيان بالسكروز.

عندما يرتبط الجلوكوز مع الجلاكتوز، فإنَّ الناتج هو اللاكتوز، أو سُكَّر الحليب. كثير من الثّدييّات تزوِّد أطفالها الصِّغار بالطَّاقة على شكل سكر اللاكتوز. يكون مستوى الأنزيم المسؤول عن تحطيم اللاكتوز إلى مكوناته من السّكّريّات الأُحادية منخفضًا جدًا عند تلك الثّدييّات، ولهذا هم غير قادرين على معالجته والاستفادة منه بشكل فعّال بعكس أطفالهم الصِّغار. إنَّ مُعظم الطَّاقة الموجودة في اللاكتوز تُعَدُّ طاقة مُخزنة للأجيال. لهذا السبب في الثّدييّات يُعَدُّ اللاكتوز مصدر الطَّاقة الأساسي للأبناء.



أ.

ب.

الشكل 3-8

كيف تتشكل السَكَريّات الثنائية. بعض السّكّريّات الثُّنائية تُستخدم لنقل الجلوكوز من جزء معين من جسم مخلوق إلى جزء آخر؛ أحد هذه الأمثلة هو السكروز (أ)، الموجود في قصب السّكّر. ثنائي التسكر الآخر هو المالتوز (ب)، الموجود في الحبوب، ويُستخدم للتَّخزين.

عديدة التَّسكُّر تزوِّدنا بتراكيب بنائية ومركبات مُخزِّنة للطَّاقة

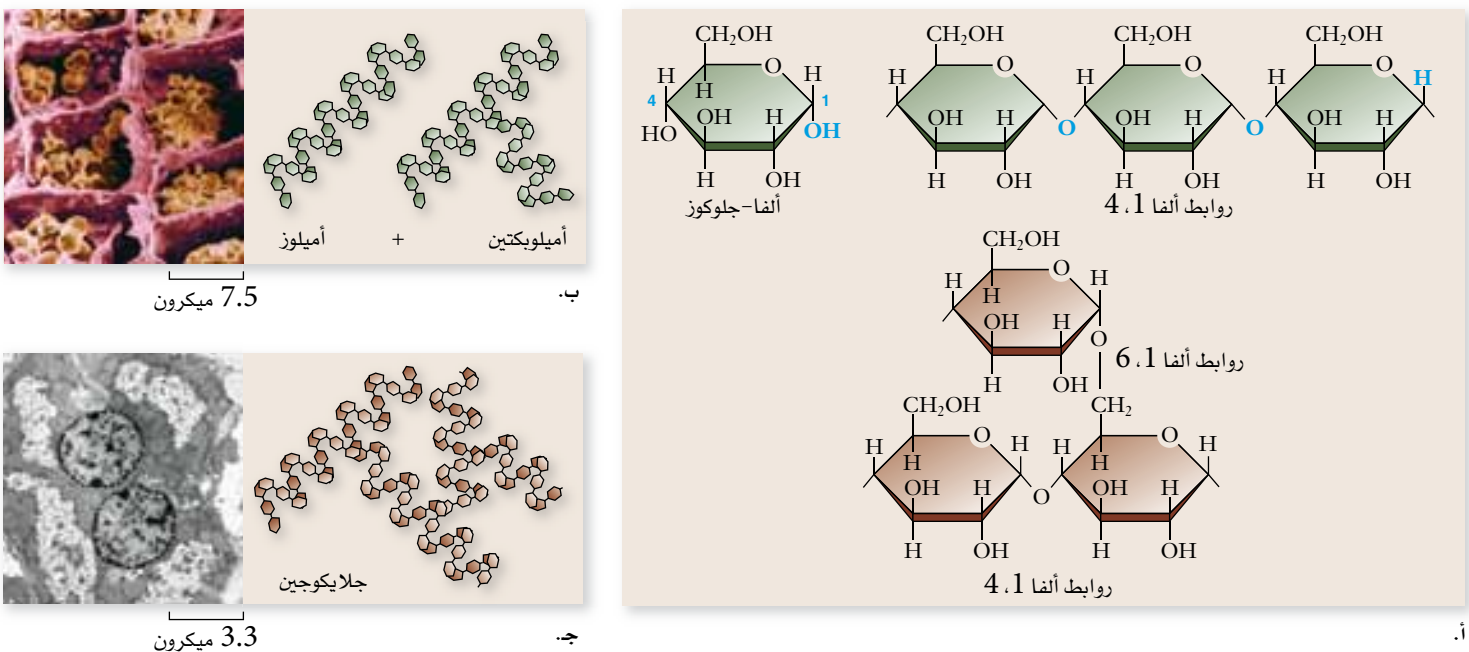
عديدة التَّسكُّر Polysaccharides هي مبلمرات طويلة مصنوعة من سُكَّريات أُحادية ترتبط مع بعضها عن طريق تفاعلات نزع الماء. **النَّشا Starch**، عديد التَّسكُّر مُخزِّن للطَّاقة، يتكون من جزيئات جلوكوز من نوع ألفا (α) مُرتبطة مع بعضها على شكل سلاسل طويلة. **السليلوز Cellulose**، عديد تسكُّر بنائي، يتكون أيضًا من جُزيئات جلوكوز مُرتبطة مع بعضها لتكوِّن سلاسل طويلة. نوع جزيء الجلوكوز في السليلوز من نوع بيتا (β). حيثُ إنَّ النَّشا مُكوَّن من جلوكوز من نوع α تُسمّى الرَّابطة التي تربط من جزيئات الجلوكوز الرّابطة α والسليلوز يمتلك الرّابطة β.

النَّشا والجلايكوجين

تخزِّن المخلوقات الحية الطَّاقة الأيضية الموجودة في السّكّريّات الأُحادية عن طريق تحويلها إلى سُكَّريات ثنائية، مثل المالتوز (الشكل 3-8 ب)، الذي بدوره يرتبط مع غيره ليُشكِّل سُكَّر عديد التَّسكُّر غير ذائب في الماء يُسمّى النّشا. يختلف النّشا بشكل رئيس في طريقة تشعبه.

النَّشا الذي يملك تركيبًا بسيطًا هو الأميلوز، الذي يتكون من مئات عدة من جزيئات الجلوكوز من نوع α التي ترتبط مع بعضها لتُكوِّن سلاسل طويلة، غير مُتشعِّبة. تتكوَّن الرَّابطة بين ذرة الكربون رقم واحد من جزيء من الجلوكوز، وذرة الكربون رقم أربعة من جزيء جلوكوز آخر، تُسمّى الرّابطة الناتجة α– 1، 4 (الشكل 3-9 أ). تلتفّ السَّلاسل الطَّويلة لجزيئات الأميلوز في الماء، هذه الصِّفة جعلت من جزيئات الأميلوز غير ذائبة في الماء. في البطاطا يُشكِّل الأميلوز 20% من النَّشا المُخزَّن (الشكل 3-9 ب).

ما تبقى 80% من النّشا في البطاطا ومعظم نشا النّبات، هو أكثر تعقيدًا من الأميلوز ويُدعى الأميلوبكتين. البكتينات هي سُكَّريات عديدة التَّسكُّر مُتشعِّبة. تحدث التَّشعبات عادةً بسبب الرَّوابط بين ذرة الكربون الأولى من جزيء الجلوكوز وذرة الكربون السادسة من جزيء الجلوكوز الآخر (الرَّابطة من نوع α– 1، 6). هذه الفروع القصيرة، عادةً ما تكون مُكوَّنة من 20-30 جزيئًا من الجلوكوز، وتُسمّى أميلوزات قصيرة (الشكل 3-9 ب).



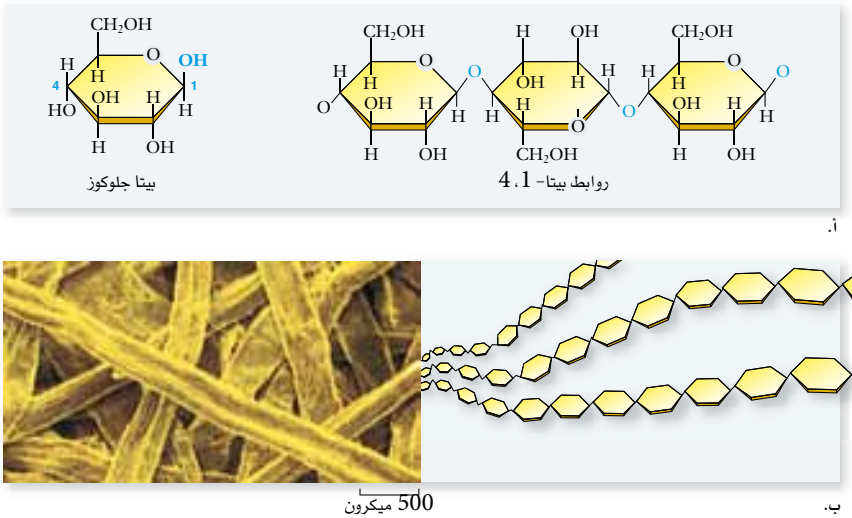
أ.

ب.

جـ.

الشكل 3-9

مُبلمرات الجلوكوز النشا والجلايكوجين. أ. سلاسل النّشا مُكوَّنة من مُبلمرات من ألفا- جلوكوز ترتبط مع بعضها عن طريق روابط ألفا -1، 4 جلايكوسيدك. هذه السلاسل يمكن أنْ تتشعب عن طريق تكوين روابط من نوع ألفا- 1، 6 جلايكوسيدك. هذه المُبلمرات التخزينية تختلف عن بعضها بشكل رئيس في درجة التَّشعب لديها. ب. النَّشا موجود في النَّبات ومُكوَّن من أميلوز وأميلوبكتين، التي هي غير مُتشعبة ومُتشعبة، على التوالي. الشَّكل المُتشعب غير ذائب، ويُشكِّل حبيبات النَّشا في الخلايا النَّباتية. جـ. الجلايكوجين موجود في الخلايا الحيوانية عادةً، وهو متشعب بشكل كبير، وغير ذائب، ويُشكِّل حبيبات الجلايكوجين.



الشكل 3-10

السليلوز مُبلمرات الجلوكوز. سلاسل النّشا مُكوَّنة من وحدات ألفا-جلوكوز، وسلاسل السليلوز مُكوَّنة من بيتا- جلوكوز. أ. لهذا، فإنَّ الرَّوابط بين جزيئات الجلوكوز المُتجاورة في السليلوز هي بيتا 1، 4 جلايكوسيدك. ب. السليلوزُ غيرُ مُتشعِّب، ويُشكل أليافًا طويلة. ألياف السليلوز مُمكن أن تكون قوية جدًا، ومُقاومة للتحطُّم الأيضي، ولهذا السبب، يُعَدُّ الخشب مادة بنائية جيدة.

إنَّ الجزيء المُشابه للنّشا في الحيوانات هو **الجلايكوجين Glycogen**. مثل الأميلوبكتين، الجلايكوجين هو عديد السّكّريّات غير ذائب في الماء، ويحتوي على تشعُّبات مصنوعة من سلاسل الأميلوز. يمتلك الجلايكوجين سلاسل أطول بكثيرمن النّشا النّباتي، وهو أكثرُ تشعبًا أيضًا (الشكل 3-9 جـ).

السّليلوز

على الرّغم من أنَّ بعض سلاسل السّكّريّات تُخزِّن الطّاقة، إلا أنَّ بعضها الآخر يعمل بوصفه مواد بنائية للخلايا. إذا أردنا ربط جزيئين من الجلوكوز ببعضهما، يجب أنْ تكون جزيئات الجلوكوز متشابهة في الشّكل. السّليلوز هو مُبلمر من جزيئات الجلوكوز من نوع (β) (الشكل 3-10). تتكوَّن الرَّابطة بين جزيئات الجلوكوز المُتجاورة بين ذرة الكربون رقم واحد من الجلوكوز الأول وذرة الكربون رقم أربعة من الجلوكوز الثاني. هذه الرَّابطة هي 4 ،1 -β.

تختلف سلسلة مُكوَّنة من جزيئات الجلوكوز من نوع β بشكل كبير عن سلسلة مُكوَّنة من جزيئات الجلوكوز من نوع α كما هو موجود في النّشا. حيث تَصنع السِّلسلة غير المُتشعبة المُكوَّنة من جزيئات الجلوكوز من نوع β أليافًا قاسية. يُعدّ السليلوز التَّركيب الرئيس في الجدار الخلوي النباتي (الشكل 3-10). السليلوز شبيه من النَّاحية الْكيميائيّة بالأميلوز. ولكن، هناك اختلاف واحد: الأنزيمات المُحطِّمة للنّشا الموجودة في معظم المخلوقات الحية لا تستطيع تحطيم الرَّابطة بين جزيئات الجلوكوز من نوع β لأنّها تتعرف إلى الرَّابطة α فقط.

السليلوز مادة بنائية جيدة، وذلك لأنّه لا يتحطَّم عن طريق معظم المخلوقات الحية. تلك الأعداد القليلة من الحيوانات القادرة على تحطيم السّليلوز تجده مصدرًا غنيًّا بالطّاقة. تستطيع بعض الفقاريات، مثل الأبقار، هضم السّليلوز بمساعدة البكتيريا والأوليّات التي تمتلك أنزيمات هاضمة للسليلوز، وتعيش هذه المخلوقات في الممرات الهضمية للفقاريّات.

الكايتن

الكايتن Chitin، هو التّركيب البنائي الموجود في مفصليات الأرجل وعدد كبير من الفطريات، وهو شكل مُعدَّل للسّليلوز، حيث يتم إحلال مجموعة N- أستيل N-acetyl بدلًا من مجموعة الهيدروكسيل في كل وحدة من الجلوكوز. عندما يرتبط الكايتن بالبروتين، فإنَّ الكايتن يكتسب قوة، ويصبح مادة قاسية ومُقاومة تُستخدم في بناء الهياكل الخارجية القوية للحشرات والقشريات (الشكل 3-11؛ انظر الفصل 33). عدد قليل من المخلوقات الحية قادرة على تحطيم الكايتن واستخدامه بوصفه مصدرًا للغذاء؛ كونها تمتلك أنزيم الكايتينيز، الذي يمكن استخدامه للوقاية من الفطريات.

السَكَريّات من بين أهم المركبات المحتوية على الطاقة في المخلوقات الحية. تمتلك السَكَريّات الأُحادية ما بين ثلاث إلى ست ذرات كربونية؛ ويمتلك السُكَّر الأُحادي سداسي الكربون شكلًا حلقيًا. إنَّ الاختلافات البُنائيّة بين الآيزوميرات السَكَريّة تمنح هذه الجزيئات اختلافات وظيفية كبيرة. السَكَريّات الثنائية تتكون عن طريق ربط جزيئين من السَكَريّات الأُحادية. النّشا مبلمر من جزيء الجلوكوز من نوع α. معظم النّشا مُتشعب، ولا يذوب في الماء. الكربوهيدرات البُنائيّة مثل السليلوز في النباتات هي سلاسل من سكَّريات أُحادية مثل جزيء الجلوكوز من نوع β الذي يصعب هضمه.

الشكل 3-11

الكايتن. الكايتن هو العنصرُ البنائي الأساسي في الهياكل الخارجية في كثير من اللافقاريات، مثل جراد البحر الواضح في الصورة.

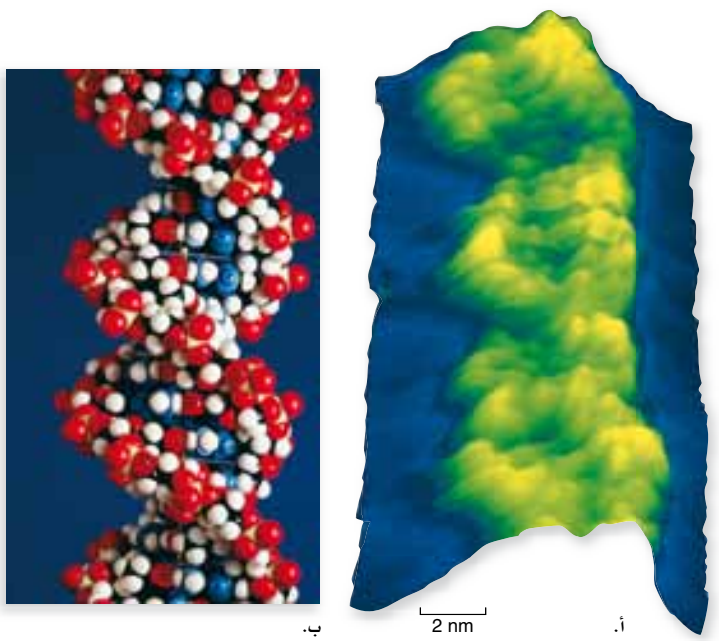
3-3 الأحماض النّوويَّة: جزيئات المعلومات

النَّشاط الكيميائي الحيوي لخلية ما يعتمد على إنتاج عدد كبير من البروتينات، تمتلك كل واحدة منها تسلسلًا خاصًّا. المعلومات التي نحتاج إليها لإنتاج هذه البروتينات تمرّ عبر الأجيال للمخلوقات الحية، ولا تمر جزيئات البروتينات نفسها.

الأحماض النّوويَّة أداةٌ لحمل المعلومات في الخلية، مثلها مثل الأقراص المُمغنطة التي تحمل المعلومات التي يستخدمها جهاز الحاسوب، أو مُخطَّط البناء الذي يستخدمه عُمَّال البناء، ومثل خرائط الطُّرق التي يستخدمها المُسافرون. هناك نوعان من الأحماض النّوويَّة، وهي الحمض النووي منقوص الأكسجين **Deoxyribonucleic acid (DNA)**؛ الشكل 3-12) والحمض النووي الرَّايبوزي **Ribonucleic acid (RNA)**.

إنَّ الطَّريقةَ التي يقوم DNA بتسجيل المعلومات الْوراثيّة المُستخدمة لبناء البروتينات (ستُناقش بشكل أوسع في الفصل 14) مشابهةٌ للطريقة التي تُسجَّل بها المعلومات في هذه الصفحة باستخدام الأحرف. من أهم الخصائص الفريدة التي تتميز بها الأحماض النّوويَّة عن غيرها من الجُزيئات الكبيرة، هي قدرتها على نسخ نفسها بشكل دقيق جدًا. تسمح هذه الصفة للمعلومات الْوراثيّة بأن تُحفَظ خلال عملية الانقسام الخلوي، وخلال تكاثر المخلوقات الحية. يحتوي DNA الموجود بشكل رئيس في المنطقة النّوويَّة للخلايا، على معلومات وراثية ضرورية لبناء المخلوقات الحية.

تحتاج الخلايا إلى جزيء RNA لقراءة المعلومات المُخزَّنة على جزيء DNA وذلك لصناعة البروتينات. يشبه RNA تركيب DNA ويتكوَّن من نسخة منسوخة عن أجزاء من DNA. هذه النُّسخة تُستَخدم مثل مخططات لتحديد التسلسل الصَّحيح والخاص للأحماض الأمينية للبروتينات. هذه العملية سيتم وصفها بشكل أدق في (الفصل الـ 15).



الشكل 3-12

صور DNA. أ. صورة مجهرية بالمجهر الماسح النفقي لجزيء DNA (الألوان كاذبة؛ 2,000,000 مرة) تُبيِّن ثلاث لفات لجزيء DNA الحلزوني المُزدوج تقريبًا. ب. نموذج فراغي، وذلك للمقارنة مع صورة DNA الحقيقية في (أ).

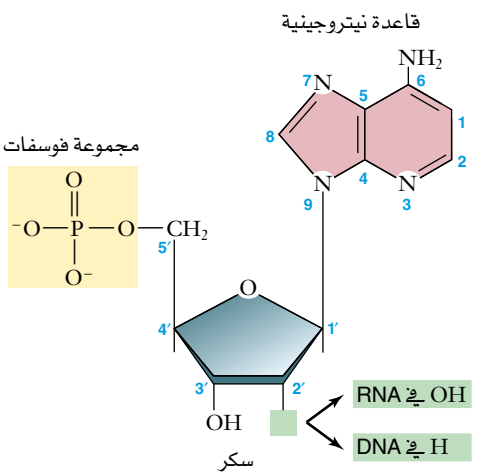
الأحماض النّوويَّة مُبلمراتٌ من النيوكليوتيدات

الأحماض النّوويَّة مُبلمراتٌ طويلةٌ من الوحدات المُتكررة التي تُدعى **نيوكليوتيدات Nucleotides**. يتكون كل نيوكليوتيد من ثلاثة أجزاء: سكر بنتوز أو السّكّر خماسي الكربون (رايبوز في RNA ورايبوز منقوص الأكسجين في DNA)؛ مجموعة فوسفات (PO_4—)؛ وقاعدة نيتروجينية عضوية (تحتوي على النيتروجين) (الشكل 3-13). عندما يتكوَّن مُبلمر الحمض النووي، ترتبط مجموعة الفوسفات في إحدى النيوكليوتيدات مع مجموعة الهيدروكسيل التَّابعة للسُّكر الخماسي من النيوكليوتيد الآخر، مُطلقةً الماء ومُشكلةً رابطة تُسمّى الفوسفودايستر بتفاعل يُعرف بتفاعل نزع الماء. **الأحماض النّوويَّة Nucleic acid** سلسلة من السُّكَّر الخماسيّ مُرتبطة مع بعضها عن طريق روابط الفوسفودايستر، وتَبرُز من هذه السِّلسلة السّكّريّة القواعد النيتروجينية (الشكل 3-14). هذه السلاسل من النيوكليوتيدات، عديد النيوكليوتيدات، لها أطراف مختلفة: مجموعة فوسفات على أحد الأطراف ومجموعة هيدروكسيل تابعة للسُّكَّر مُرتبطة على الطَّرف الآخر. يُشار تقليديًّا إلى هذه الأطراف بـِ 5′ (PO_4— "five-prime,") و3′ (OH— "three-prime,") نسبة إلى أرقام ذرات الكربون للسُّكَّر الخماسي (الشكل 3-14).

يوجد نوعان من القواعد النيتروجينية في النيوكليوتيدات: النوع الأول، البيورينات *Purines*، وهي جزيئات كبيرة، مُكوَّنة من حلقتين ، وموجودة في DNA و RNA. نوعا البيورينات هما الأدنين (A) والجوانين (G). النَّوع الثاني، هو بيرميدينات *Pyrimidines*، هي جزيئات صغيرة، مُكوَّنة من حلقة واحدة، وتتضمن السّايتوسين (C، موجودة في DNA و RNA)، الثايمين (T، موجود فقط في DNA)، اليوراسيل (U، الموجودة فقط في RNA).

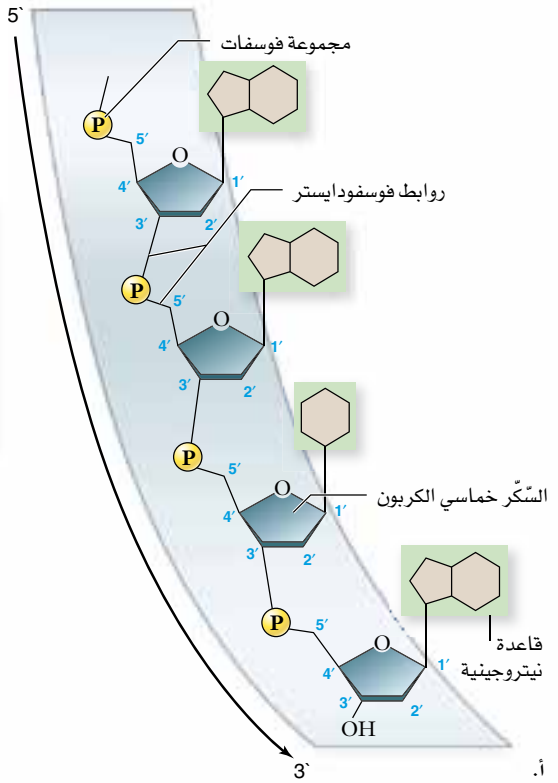
يحمل DNA الشّيفرة الْوراثيّة

تستخدم المخلوقات الحية تسلسل النيوكليوتيدات في DNA لتسجيل المعلومات التي تُحدد تسلسل الأحماض الأمينية في بروتينات تلك المخلوقات. هذه الطريقة

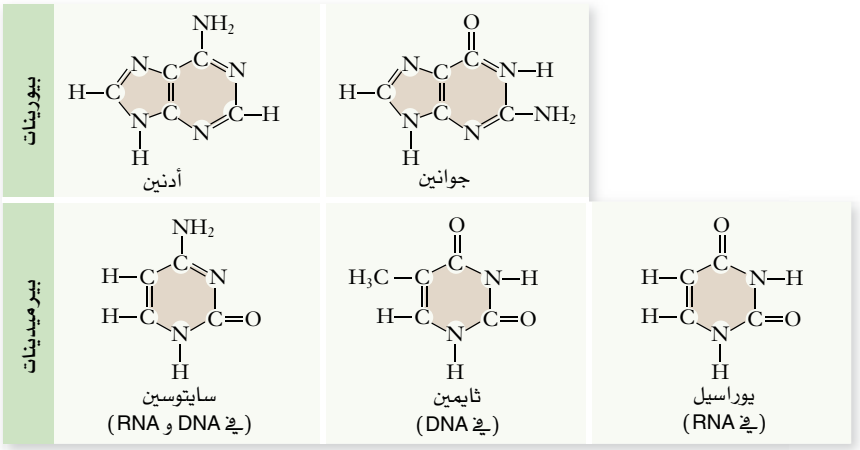


الشكل 3-13

تركيب النيوكليوتيد. تتكون الوحدات الْبنائيّة (النيوكليتدات) في DNA و RNA من ثلاثة عناصر: سُكَّر خُماسي الكربون (رايبوزي أو رايبوزي منقوص الأكسجين)، قاعدة نيتروجينية (الأدنين مُبيَّنة هنا)، ومجموعة فوسفات. لاحظ ترقيم ذرات الكربون(1`، 2`... إلخ) لتمييزها عن ترقيم حلقات القواعد.



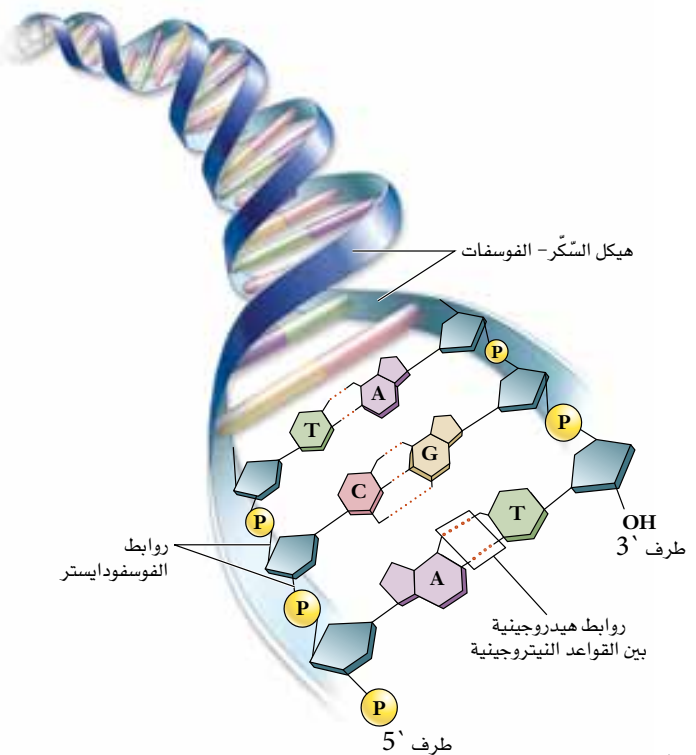
أ.



ب.

الشكل 3-14

تركيب الحمض النَّووي والقواعد العضوية المُحتوية على النيتروجين.
أ. في الحمض النووي، ترتبط القواعد النيتروجينية ببعضها عن طريق روابط فسفودايستر تتشكل بين مجموعة الفوسفات لإحدى النيوكليوتيدات مع السُّكر في النيوكليوتيد اللاحق. يُسمى هذا العمود العمود الفقري الفوسفودايستر، وتبرز منه القواعد العضوية. إنَّ العمود الفقري هذا يحتوي على طرفين مُختلفين: الطرف المُحتوي على مجموعة الفوسفات 5` والطرف الهيدروكسيلي 3` (الأرقام آتية من الأعداد على السُّكر).
ب. القواعد النيتروجينية العضوية مُمكن أن تكون بيورينات وبيرميدينات. القاعدة ثايمين موجودة في DNA، والقاعدة يوراسيل موجودة في (RNA).



الشكل 3-15

تركيب DNA. يتكون DNA من سلسلتين من مُتعدِّد النيوكليتيدات تسيران في اتجاهين مُتعاكسين، وتلتفان حول محور واحد بشكل حلزوني. الرَّابطة الهيدروجينية (الخطوط المتقطعة) بين القواعد العضوية، تُسمَّى ازدواج القواعد، تجعل السِّلسلتين في DNA مُرتبطتين مع بعضهما، وتُشكِّل ثنائيًّا حلزونيًّا.

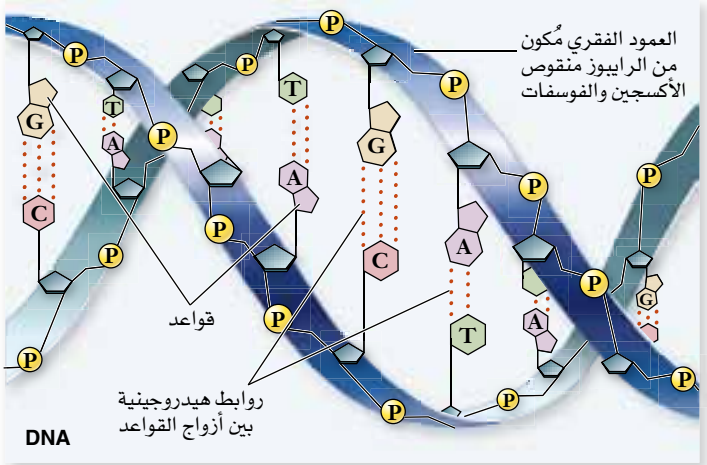
في تسجيل المعلومات تُشبه بشكل كبير الطَّريقة التي تستخدمها الأحرف لتسجيل المعلومات في الجُمَل. تتكوَّن الجُمَل المكتوبة باللُّغة الإنجليزية من تجميع 26 حرفًا ضمن ترتيب مُعين، في حين تتكوَّن الشِّيفرة الْوراثيّة في جزيء DNA من تجمُّعات مُختلفة من 4 أنواع من النيوكليوتيدات تترتب بتسلسل مُعين، مثل CGCTTACG. تُستخدم المعلومات المُسجلة في DNA في عمليات الأيض اليومية في المخلوقات الحية، وتنتقل هذه المعلومات من المخلوقات الحية وكل ما ينحدر من أصولها.

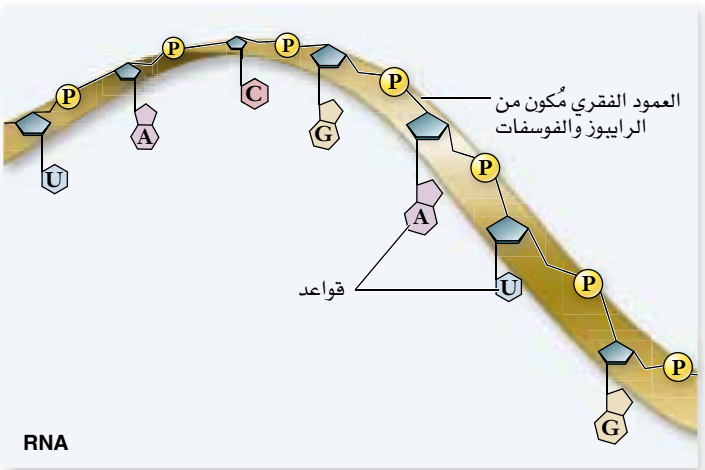
توجد جزيئات DNA في المخلوقات الحية على شكل سلسلتين ملتفتين على بعضهما لتُشكِّل جزيئًا خطيًّا طويلًا، وليس على شكل سلاسل مُنفردة مُلتفة بأشكال مُعقَّدة، مثل البروتينات. تلتف هاتان السِّلسلتان لمُبلمر DNA على بعضهما مثل السِّياج الخارجي والدَّاخلي للدَّرج الحلزوني. يُدعى هذا الشَّكل الحلزوني الشَّكل اللَّولبي، وحيث إنَّه يتكوَّن من سلسلتين، فإنّه يُدعى (**لولبي ثنائي Double helix**). تتكون كل درجة من DNA اللولبي من زوج من القواعد النيتروجينية، حيث تكون إحدى القواعد من السلسلة الأولى مُرتبطة بروابط هيدروجينية مع قاعدة أُخرى في السِّلسلة الأُخرى (الشكل 3-15).

إنَّ قواعد التَّزاوج بين القواعد النيتروجينية صارمة جدًا: الأدنين مُرتبط دائمًا مع الثايمين (في DNA) أو مع اليوراسيل (في RNA) والسايتوسين مُرتبط مع الجوانين فقط. تكون القواعد المُشاركة في الازدواج القاعدي (زوج القواعد النيتروجينية) **مُتمِّمة Complementary** لبعضها. التفاصيل المُتعلِّقة بتركيب DNA وكيف يتفاعل مع RNA لإنتاج البروتين سَتُعرض في (الفصلين 14، 15).

RNA هو منسوخ سلسلة DNA

يُشبه RNA جزيء DNA، إلا أنَّ هناك اختلافات كيميائية كبيرة بينهما: أولًا، تحتوي جزيئات RNA على سكر رايبوزي (خماسي) الذي يرتبط به مجموعة الهيدروكسيل على الكربونة رقم 2. (في DNA هذه المجموعة حلَّ محلها ذرة هيدروجين). ثانيًا، تستخدم جزيئات RNA اليوراسيل بدلًا من الثايمين. يشبه اليوراسيل في تركيبه الثايمين، إلا أنَّ واحدة من كربوناته لا تمتلك مجموعة الميثل ($-CH_3$).

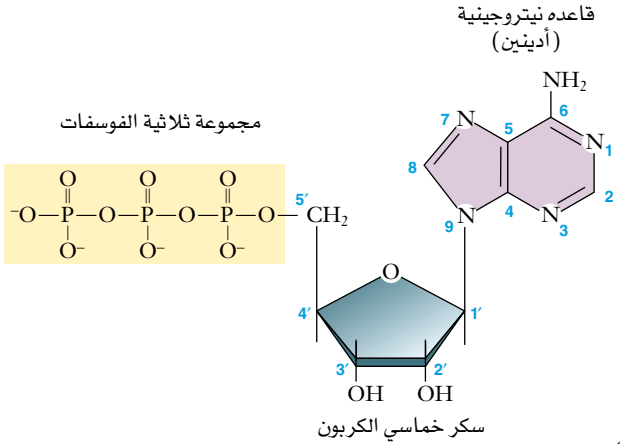




الشكل 3-16

DNA مُقارنة مع RNA. يُشكِّل DNA تركيبًا حلزونيًّا ثنائيًّا، ويستخدم سُكَّر رايبوزي منقوص الأكسجين داخل العمود الفقري المُكوَّن من الفوسفات والسُّكَّر، ويستخدم الثايمين من بين قواعده النيتروجينية. RNA عادةً ما يكون مُكوَّنًا من سلسلة واحدة، ويستخدم سكر الرايبوز داخل عموده الفقري المُكون من الفوسفات والسّكّر، ويستخدم اليوراسيل بدلًا من الثايمين.

إنَّ نسخ رسالة DNA إلى مُركب كيميائي مُختلف مثل RNA يسمح للخلية أن تُخبر أيًّا من هذه الجزيئات هي جزيئات مُخزِّنة للمعلومات وأيًّا منها المنسوخ. يكون جزيء DNA دائمًا ثنائي السَّلاسل (ما عدا بعض جزيئات DNA أُحادية السِّلسلة في الفيروسات)، في حين يكون جزيء RNA المنسوخ من DNA ذا سلسلة واحدة (الشكل 3-16). هذه الاختلافات تَفْصل دور DNA بوصفه مخزنًا للمعلومات الْوراثيّة عن دور RNA الذي يستخدم هذه المعلومات الْوراثيّة لتحديد تسلسُل الأحماض الأمينية في البروتينات.



الشكل 3-17

ATP. الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) يحتوي أدنين، سكر خماسي الكربون، وثلاث مجموعات فوسفات.

النيوكليوتيدات الأُخرى هي أجزاء مُهمّة في تفاعلات الطاقة

إضافة إلى دور النيوكليوتيدات بوصفها وحدات أساسية في تركيب DNA و RNA، تؤدي أدوارًا مُهمة أُخرى في حياة الخلية. فمثلًا، يُعَدّ الأدنين جزءًا مهمًّا في تركيب جزيء **الأدينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine triphosphate** (ATP؛ الشكل 3-17)، عِملة الطَّاقة في الخلية. يُستخدم الأدينوسين ثلاثي الفوسفات لإنجاز التَّفاعلات غير المُحَبَّذة من ناحية الطَّاقة، حيث يزود الخلية بالطَّاقة اللازمة لتقوم بنقل المواد عبر الغشاء، ولتقوم بالحركة؛ بشكل مُختصر، يُعَدُّ ATP أكثر أشكال الطَّاقة شيوعًا في الخلية.

هناك جزيئان مهمّان آخران يحتويان على النيوكليوتيدات، هما: **النيكوتين أميد أدينين ثنائي النيوكليوتيدات Nicotinamide adenine dinucleotide** (**NAD^+**)، **والفلافين أدنين ثنائي النيوكليوتيدات.** (**FAD**) **Flavin adenine dinucleotide** تُستخدم هذه الجُزيئات بوصفها نواقل إلكترونية في كثير من العمليات الحيويَّة. سوف نرى أفعال هذه الجُزيئات عند مناقشتنا للتَّمثيل الضَّوئيّ والتَّنفس الخلوي (الفصول 6 إلى 8).

الحمضُ النَّووي سلسلةٌ طويلةٌ من السَّكريّات خماسية الكربون تَبرُز منها قواعد عضوية. DNA هو حلزوني ثنائي السَّلاسل يُخزِّن المعلومات الْوراثيّة على شكل تسلسل مُعيَّن من القواعد النيوكليوتيدية. RNA جزيءٌ أُحادي السِّلسلة ينسخ المعلومات الْوراثيّة في DNA ليوجِّه تصنيع البروتينات.

4-3 البروتينات: جزيئات لها تراكيب ووظائف مُتنوعة

البروتينات أكثر مجموعة تنوعًا من بين الجزيئات الْبيولوجيّة الكبيرة، من الناحيتين الْكيميائيّة والوظيفية. إنَّ عدد الوظائف التي تقوم بها البروتينات كبير جدًّا، حيث لا يمكننا سردها جميعها هنا. على الرّغم من ذلك سنقوم بجمع هذه الوظائف ضمن سبعة محاور، كما يأتي (الشكل 3-18). هذه القائمة، تُلخِّص المعلومات التي سنتناولها في الفصول اللاحقة.

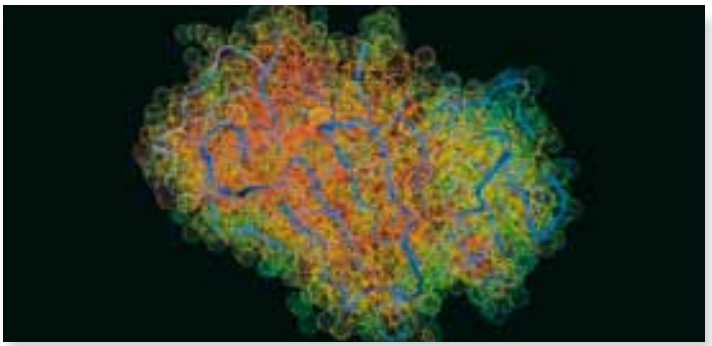
1. **التَّحفيز الأنزيميّ Enzyme catalysis.** الأنزيمات مُحفِّزات بيولوجية تقوم على تسهيل حدوث التَّفاعلات الْكيميائيّة. وبسبب هذه الخاصيَّة، فإن ظهور الأنزيمات من أهمّ الأحداث التي حدثت خلال عملية تطور الحياة. الأنزيماتُ بروتيناتٌ كرويةٌ لها أشكال ثُلاثية الأبعاد تُلائم الجُزيئات التي تعمل عليها، تُسهِّل الأنزيماتُ التَّفاعلاتِ عن طريق الضَّغط على روابط كيميائية مُعيَّنة موجودة في الموادّ المُتفاعلة.

الدعامة: كيراتين

الحركة: الأكتين والميوسين

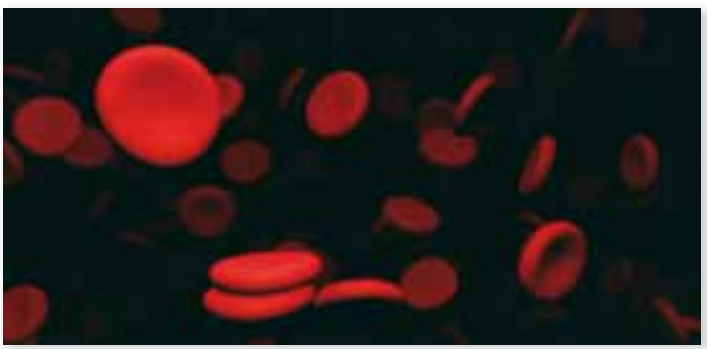
التنظيم: الأنسولين

التخزين: الكالسيوم



تحفيز أنزيمي: نموذج فضائي للأنزيم

الدفاع: السم



النقل: الهيموجلوبين

الشكل 3–18

وظائف البروتينات. تقوم البروتينات بعمل مجموعة مُتنوعة من الأدوار في الأنظمة الحية. هذا يتضمن الأنزيمات، بروتينات الدِّفاع مثل السموم وبروتينات الأكتين والميوسين في العضلات. البروتينات تمتلك أيضًا دورًا بنائيًّا، مثل الكيراتين، ودورًا في نقل الأكسجين،أو تخزين الأيونات المهمة مثل الكالسيوم. تمتلك البروتينات دورًا مُنظِّمًا بوصفها جزيئات مُؤشِّرة (ذات إشارة) مثل الأنسولين أو المُستقبلات.

2. **الدِّفاع Defense**. تستخدم بروتينات كروية أُخرى أشكالها للتَّعرف إلى الأجسام الغريبة، أو الخلايا السَّرطانية. هذه المُستقبلات السَّطح خلوية تُشكِّل أساس عمل الجهاز المناعي وجهاز الغدد الصماء.
3. **النَّقل Transport**. تنقُل أنواع كثيرة من البروتينات الكُروية جزيئات صغيرة وأيونات. فمثلًا ينقل الهيموجلوبين، وهو بروتين ناقل، الأُكسجين في الدَّم. يقوم الميوجلوبين كذلك بنقل الأُكسجين في العضلات، وهو بروتين شبيه بالهيموجلوبين، ينتقل الحديد بالدَّم عن طريق بروتين يُدعى ترانسفيرين.
4. **الدَّعامة. Support** تقوم الألياف البروتينية بأداء دورٍ مهم في البناء. هذه الألياف تضم الكيراتين في الشَّعر، والفايبرين في الجلطات (الخثرات) الدَّموية، والكولاجين الذي يُشكِّل النَّسيج البين خلوي في كلٍّ من الجلد، والروابط، والأوتار، والعظّم. يعدّ الكولاجين أكثر البروتينات شيوعًا في جسم الفقاريات.

5. **الحركة Motion** تنقبض العضّلات عن طريق انـزلاق نوعين من البروتينات الخيطية: الأكتين والميوسين. تؤدي البروتينات الانقباضية دورًا مهمًّا في هيكل الخليّة وفي حركة المواد داخلها.
6. **التَّنظيم Regulation**. تعمل الهرمونات، وهي بروتينات صغيرة، مثل الرُّسل ما بين الخلايا في الحيوانات. وتـؤدي البروتينات دورًا تنظيميًّا في داخل الخلية، حيث تقوم بتنشيط بعض الجينات وتثبيط أُخرى خلال مراحل التَّطور للمخلوق. إضافة إلى ذلك، تقوم البروتينات بالعمل بوصفها مستقبلات سطحية لاستقبال المعلومات.
7. التَّخزين **Storage**. يُخزَّن الحديد والكالسيوم عن طريق ارتباط أيوناتهما بالبروتينات المُخزِّنة.

(الجدول 3-2) يُلخِّص هذه الوظائف، ويضم أمثلة على بروتينات في جسم الإنسان تقوم بهذه الوظائف.

البروتيناتُ مُبلمراتٌ من الأحماض الأمينية

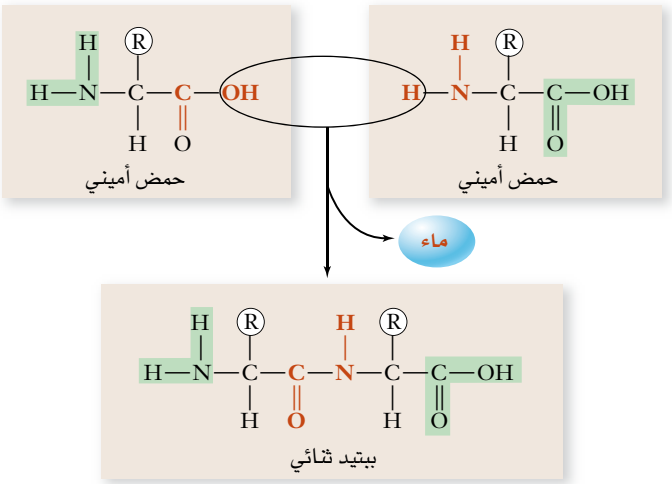
البروتيناتُ مُبلمراتٌ خيطيةٌ مكونةٌ من 20 **حمضًا أمينيًا Amino acids** مُختلفًا. تحتوي الأحماض الأمينيّة كما يدل اسمها، على مجموعة أمين ($—NH_2$) ومجموعة الكاربوكسيل الحمضيّة ($—COOH$). إنَّ ترتيب الأحماض الأمينية في البروتين يُحدِّد تركيبه (بنيته) ووظيفته. يعتقد كثير من العلماء أنَّ هذه الأحماض هي من أول الجزيئات التي تشكَّلت على الأرض. ويمكن القول بشكل كبير: إن المُحيطات التي وُجدت في بداية الحياة احتوت على أنواع واسعة جدًا من الأحماض الأمينيّة.

تركيب الحمض الأميني

إنَّ التَّركيب العام للحمض الأميني يمكن تمثيله على شكل مجموعة أمين ومجموعة كاربوكسيل مرتبطتين بذرة كربون مركزية، إضافة إلى ذرة هيدروجين ومجموعة وظيفية جانبية يُشار إليها بـ R. هذه الأجـزاء تكفي لملء حاجة ذرة الكربون المركزية من الروابط:

الجدول 3-2 الوظائف المتعددة للبروتين

الوظيفة	نوع البروتين	أمثلة	أمثلة على الاستخدام
محفزات أنزيمية	أنزيمات	أنزيمات مُحللة أنزيمات هاضمة للبروتين مبلمرة مفسفرة أو كاينيز	تُحطِّم السُّكريات المُتعدِّدة. تُحطِّم البروتينات. تصنيع الأحماض النووية. إضافة مجموعة الفوسفات إلى السُّكر والبروتينات.
دفاع	بروتينات كروية مناعية سموم مولدات ضد على سطح الخلية	أجسام مضادة سمّ الأفعى بروتين التوافق النسيجي الرّئيس	تقوم بتعليم البروتينات الغريبة للتخلص منها. يوقف عمل الأعصاب. تمييز الذات.
نقل	نواقل متحركة نواقل غشائية	هيموجلوبين ميوجلوبين سيتوكرومات مضخة الصوديوم- البوتاسيوم مضخة البروتونات نواقل الجلوكوز	نقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الدم. نقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في العضلة. نقل الإلكترونات. الأغشية المُتهيجة. النظرية الأسموزية الكيميائية. نقل الجلوكوز إلى داخل الخلية.
دعم	الألياف	كولاجين كيراتين فايبرين	تشكل الغضاريف. تشكل الشعر، الأظافر. تشكل تجلط الدم.
حركة	عضلات	أكتين ميوسين	انقباض الألياف العضلية. انقباض الألياف العضلية.
تنظيم	بروتينات أسموزية منظمات جينية هرمونات	ألبيومين المصل المثبط lac أنسولين هرمون فاسوبريسين (المانع لإدرار البول) أوكسيتوسين	المُحافظة على التراكيز الأسموزية في الدم. تنظيم عملية النسخ. تنظيم مستوى السّكر في الدم. زيادة إعادة امتصاص الماء عن طريق الكلية. تنظيم انقباض الرَّحم وإنتاج الحليب.
تخزين	ارتباط أيوني	فيريتين كاسين كالموديولين	تخزين الحديد، خاصة في الطُّحال. تخزين الحديد في الحليب. الارتباط بالكالسيوم.



الشكل 3–19

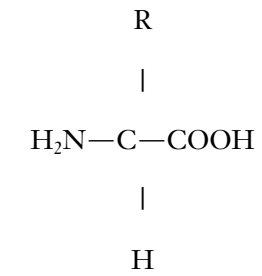
الرابطة الببتيدية. تتكون الرَّابطة الببتيدية عندما يرتبط الطَّرف الأميني لحمض أميني ما مع الطَّرف الكاربوكسيلي لحمض أميني آخر. تفاعُل مجموعات الأمين والكاربوكسيل مُبيَّنة هنا باللَّون الأحمر، والمجموعات غير المُتفاعلة باللَّون الأخضر. لاحظ أنّ الببتيد الثنائي النَّاتج يحمل طرفًا أمينيًّا وطرفًا كاربوكسيليًّا. بسبب طبيعة الرَّابطة الببتيدية الشبيهة بشكل جزئي بالرَّابطة الثنائية، فإنَّ هذه الرَّابطة لا تستطيع الالتفاف بشكل حرّ.

يتكون البروتين من سلسلة واحدة غير مُتشعبة أو أكثر. تُسمّى كل سلسلة **عديد الببتيد Polypeptide** وهي مُكوَّنة من أحماض أمينية مُرتبطة بعضها مع بعض بروابط ببتيدية. يُستَخدم مُصطلح البروتين *Protein* ومصطلح عديد الببتيد *Polypeptide* بشكل فيه نوع من الخلط. يُعَدُّ هذان المُصطلحان مترادفين، إذا كان البروتين مصنوعًا من عديد ببتيد واحد فقط.

إنَّ العمل الرَّائد الذي قام به العالِم فردرك سانجر في بداية الخمسينيّات من هذا القرن زوَّدنا بأدلة تدعم فكرة أنَّ كل نوع من البروتين له تسلسل خاص من الأحماض الأمينية. لقد استطاع هذا العالِمُ أنْ يفصل، ويُعرِّف الأحماض الأمينيَّة المُتعاقبة باستخدام الطُّرق الكيميائيّة، وبذلك نجح في تحديد تسلسل هذه الأحماض في بروتين الأنسولين. لقد استطاع هذا العالِم أنْ يُحدِّد بوضوح أنَّ هذا البروتين يمتلك تسلسلًا خاصًّا به، مُشابهًا لجزيئات الأنسولين جميعها في المحلول. على الرّغم من وجود أنواع كثيرة من الأحماض الأمينية المختلفة في الطبيعة، إلا أنَّ عشرين حمضًا أمينيًّا فقط يوجد في البروتينات. الشكل 3-20 يوضِّح العشرين حمضًا أمينيًّا والمجموعات الجانبية لها.

مستويات البناء (تركيب) البروتيني

يُحدِّد شكلُ البروتين وظيفتَه. إنَّ أحد الطُّرق التي تُستخدم في دراسة شكل شيء صغير جدًا مثل البروتينات هو النظر إليه باستخدام طول موجة قصيرة ذات طاقة عالية. بكلمات أخرى، باستخدام أشعة X. تمر هذه الأشعة من خلال بلورات البروتين لِتُنتِج سلوكًا حيويًّا. هذا السلوك يمكن أن يُحلَّل بعد ذلك عن طريق طريقة مُجهدة تسمح للباحث ببناء صورة ثلاثية الأبعاد لكلّ ذرة من ذرات البروتين. الميوجلوبين أولُ البروتينات التي تمَّ تحليلها، وتَبِعَهُ بعد ذلك بقليل تحليل البروتين القريب منه، وهو الهيموجلوبين.



إنَّ الصِّفات الفريدة لكلّ حمض أميني تُحدِّدها طبيعة المجموعة R. لاحظ أنَّ الأحماض الأمينية ما لم تكن ذرة H، كما في الجلايسين، تكون كايرال، وتوجد بشكلين من المتضَّادات الضّوئيّة: D أو L. يوجد الشكل L فقط في بروتينات المخلوقات الحيَّة، ونادرًا ما يوجد الشكل D.

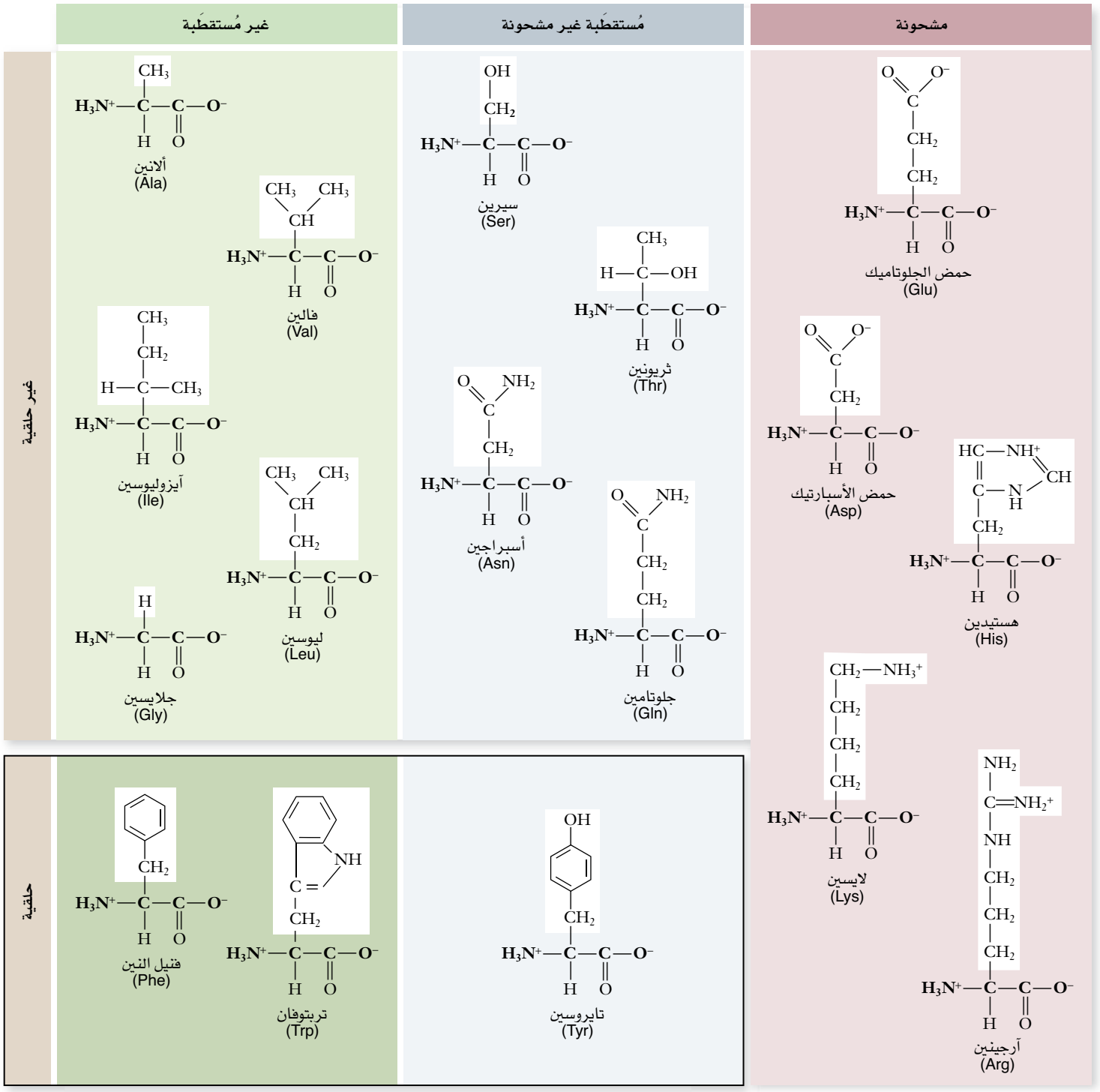
تُحدِّد مجموعة R كيميائية الحمض الأميني. فمثلًا، الحمضُ الأمينيُّ سيرين الذي يحتوي على مجموعة ($-CH_2OH$)، جزيءٌ مُستَقطبٌ. أما حمض الألنين الذي يحتوي على ($-CH_3$) كمجموعة R فهو غير مُستَقطب. يمكن تقسيم العشرين حمضًا أمينيًّا الشَّائعة إلى خمس مجموعات اعتمادًا على مجموعة R:

1. **أحماض أمينية غير مُستَقطبة**، مثل الليوسين، تمتلك هذه الأحماض مجموعات R تحتوي $-CH_2$ أو $-CH_3$.
2. **أحماض أمينية مُستَقطَبة غير مشحونة**، مثل الثريونين، تمتلك هذه الأحماض مجموعات R تحتوي على الأُكسجين (أو $-OH$).
3. **أحماض أمينيّة مشحونة**، مثل حمض الجلوتاميت، تمتلك هذه الأحماض مجموعات R تحتوي على قواعد أو أحماض قادرة على التَّأيُّن.
4. **أحماض أمينيَّة حلقية**، مثل الفنل الآنين، تمتلك هذه الأحماض مجموعات R تحتوي على حلقات عضوية (كربون) أُحادية أو ثنائية الرَّوابط. هذه الأحماض غير مُستقطَبة.
5. **أحماض أمينيَّة ذات وظائف خاصة تمتلك صفات فردية فريدة.** فمثلًا الحمض الأميني مثايونين هو أول حمض أميني في سلسلة الأحماض الأمينية؛ الحمض الأميني برولين يُسبِّب انثناء في السلاسل؛ الحمض الأميني السيستين يربط السّلاسل البروتينية مع بعضها.

يُؤثِّر كل حمض أميني بشكل مُختلف على شكل البروتين، اعتمادًا على الطَّبيعة الكيميائيّة للمجموعة الجانبية (R)، فمثلًا، أجزاء السِّلسلة البروتينية التي تحتوي على مجموعة كبيرة من الأحماض الأمينية غير المُستقطَبة تُحبِّذ الانطواء إلى داخل البروتين عن طريق الإقصاء بدافع كُره الماء.

الرَّوابط الببتيدية

إضافة إلى المجموعة R، يحتوي كل حمض أميني على مجموعة موجبة الشُّحنة تُدعى مجموعة الأمين المُتأينة (NH_3^+) على أحد الأطراف ومجموعة سالبة الشُّحنة تُدعى مجموعة الكاربوكسيل المتأيِّنة (COO^-) على الطرف الآخر. تتفاعل مجموعات الأمين والكاربوكسيل في زوج من الأحماض الأمينيَّة مُشكلةً رابطة تساهمية بعد إزالة الماء. تُدعى هذه الرَّابطة التَّساهمية **الرَّابطة الببتيدية Peptide bond** (الشكل 3-19). لا تمتلك الأحماض الأمينيَّة المُرتبطة بهذه الرَّابطة الحريَّة للالتفاف حول الرَّابطة C—N وذلك كون الرَّابطة الببتيدية تمتلك خصائص جُزيئية تملكها الرَّابطة الثُّنائية، على عكس الروابط C—N و C—C التي ترتبط بذرة الكربون المركزية للحمض الأميني. إنَّ هذه الصِّفة التي تتمتع بها الرَّابطة الببتيدية تُشكِّل أحد العوامل التي تُحدِّد طبيعة تركيب (بناء) الشَّكل الحلزوني وأشكالًا أُخرى تتشكل عن طريق سلاسل الأحماض الأمينية.



الشكل 3–20

الأحماض الأمينية العشرون الشائعة. تمتلك الأحماض الأمينية جميعها هيكلًا متشابهًا، إلا أنها تختلف في المجموعة الجانبية، أو مجموعة R. ستة من الأحماض الأمينية غيرُ مُستقطَبة؛ لأنها تمتلك $-CH_2-$ أو $-CH_3$ في مجموعتها R. اثنان من السِّتة يحتويان تراكيب حلقية تمتلك روابط ثنائية أو أُحادية، وتُسمّى هذه الأحماض الأمينية بالأحماض الحلقية. أحماض أمينية ستة أخرى مُستقطَبةٌ؛ لأنها تملك الأكسجين أو مجموعة الهيدروكسيل في مجموعة R. خمسة أحماض أمينية أخرى قادرة على التأيُّن والتَّحول لأشكال مشحونة. الأحماض الأمينية الثلاثة المُتبقية تمتلك صفات كيميائية تسمح لها بتشكيل روابط بين سلاسل البروتين أو انثناءات في البروتينات.

بعد دراسة عدد كبير من البروتينات، ظهر مبدأ واضح: وهو أنَّ في كل بروتين تمَّت دراسته، تكون معظم الأحماض الأمينيَّة الدَّاخلية هي من النوع غير المُستقطب مثل اللِّيوسين، وفالين، والفنيل الآنين. إنَّ ميل الماء إلى إبعاد الجزيئات غير المُحبة للماء جانبًا (الشكل 3-21) يضع الأجزاء غير المُستقطَبة من سلسلة الأحماض الأمينية داخل البروتين، وقريبة من بعضها ما يجعل الفراغات بينهما قليلة جدًا. أمّا الأحماض الأمينيّة المُستقطَبة والمشحونة فعادةً ما تكون مُقيَّدة للسَّطح الخارجي للبروتين، ما عدا عدد قليل منها الذي يؤدي دورًا وظيفيًّا مهمًّا.

تقليدًا؛ هناك أربعة مستويات لتركيب (بناء) البروتين: الأولي، والثانوي، والثلاثي، والرُّباعي (الشكل 3-23). سنناقش هذه التَّراكيب، ومن ثَمَّ سنناقشها مَعَ ما تمَّ التَّوصل إليه من معلومات حديثة حول تركيب البروتين.

التَّركيب الأولي: تسلسل من الأحماض الأمينية

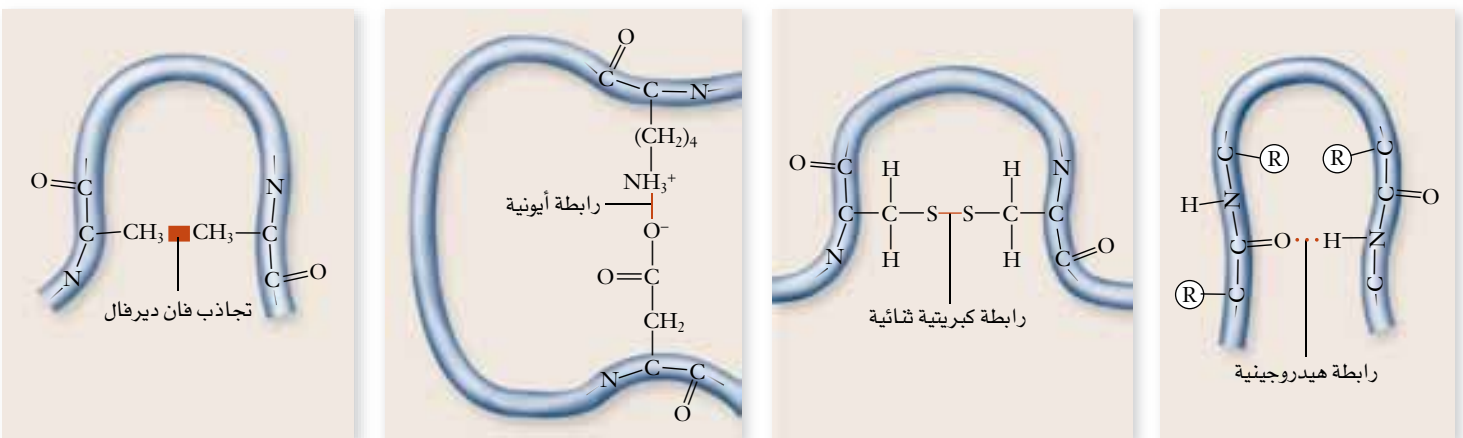
التركيب الأولي Primary structure للبروتين هو تسلسل من الأحماض الأمينية. تستطيع البروتينات أن تتكون من أي تسلسل من الأحماض الأمينية، وذلك كون مجموعة R التي تُميِّز هذه الأحماض لا تؤدي دورًا في العمود الفقري للبروتين. حيث إنّ أي حمض أميني من الأحماض الأمينيّة العشرين المُختلفة يمكن أنْ يظهر في أيّ موقع، فإنَّ البروتين الذي يحتوي على مئة حمض أميني يستطيع أن يُكوِّن 20^{100} تسلسل مُختلِف من الأحماض الأمينية (هذا شبيه بـ10^{130}، أو واحد يتبعه 130 صفرًا - أكثر من عدد الذّرّات المعروفة في الكون). هذه ناحية مهمة للبروتين؛ لأنها تسمح بوجود تنوع حيوي كبير.

خذ في الحسبان بروتين الهيموجلوبين، المُستَخدم في الدَّم لنقل الأكسجين. يتكون الهيموجلوبين من سلستين ببتديتين من نوع α جلوبين، وسلسلتين ببتيديتين من نوع β جلوبين. تختلف سلاسل α جلوبين عن سلاسل β جلوبين في ترتيب الأحماض الأمينية. إضافة إلى أنَّ أيّ تغيير في ترتيب الأحماض الأمينية لأيٍّ من هاتين السلسلتين، حتى لو كان حمضًا أمينيًّا مفردًا، يُمكن أنْ يَنتُج عنه تأثيرات كبيرة في وظيفة البروتين.

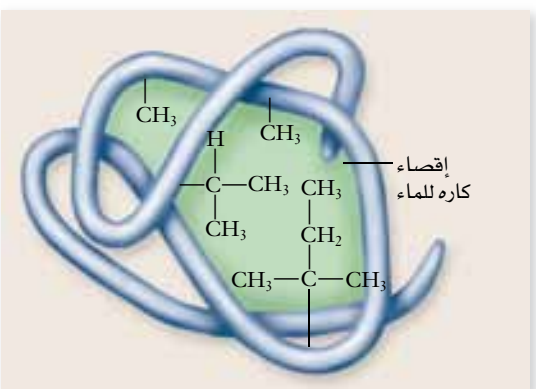
التَّركيب الثانوي: أشكال الربط الهيدروجيني

ليس فقط المجموعات الجانبية للأحماض الأمينية المُكوِّنة للبروتين تكون قادرة على تكوين الرَّوابط الهيدروجينية، المجموعات الببتيدية (الجانبية) للسَّلاسل الببتيدية تستطيع أن تعمل ذلك أيضًا. هذه الرَّوابط الهيدروجينية ممكن أن تكون مع الماء، أو مع مجموعات ببتيدية (جانبية) أُخرى. إذا شكَّلت المجموعاتُ الببتيديةُ عددًا كبيرًا من الرَّوابط الهيدروجينية مع الماء، سوف تُنتِج بروتينًا يمتلك التفافًا عشوائيًّا ولاتُكوِّن التَّراكيب الكروية المشهورة بالبروتينات. اقترح العالِمُ لينس باولينج أنّه إذا التفت السلسلة الببتيدية بشكل حلزوني، فإنَّ المجموعات الببتيدية تستطيع التَّفاعل مع بعضها. سُمِّي هذا الالتفاف الحلزوني **ألفا اللَّولبي helix** α، نحن الآن نُسمِّي هذا النوع من الارتباطات بين المجموعات الببتيدية في العمود الفقري للسلسلة الببتيدية **التَّركيب الثانوي Secondary structure**. الشَّكل الآخر من التَّركيب الثانوي يُمكن أنْ يحدثَ بين مناطق من السِّلسلة الببتيدية التي تصطف بجانب بعضها مُكوِّنة تركيبًا مستويًا (مُسطَّح) يُسمَّى صفائح **بيتا المُثنَّاة Sheet** β. هذه المناطق الببتيدية يمكن أنْ تكون متوازية أو غير متوازية، اعتمادًا على اتجاه المقاطع المُتجاورة من السلسلة الببتيدية بالنِّسبة إلى بعضها.

هذان النوعان من التَّراكيب الثانوية يشكلان مناطق في البروتين تكون أسطوانية (حلزون ألفا) أو مستوية (صفائح بيتا المُثنَّاة). التَّركيب النهائي للبروتين



أ. ب. جـ. د.



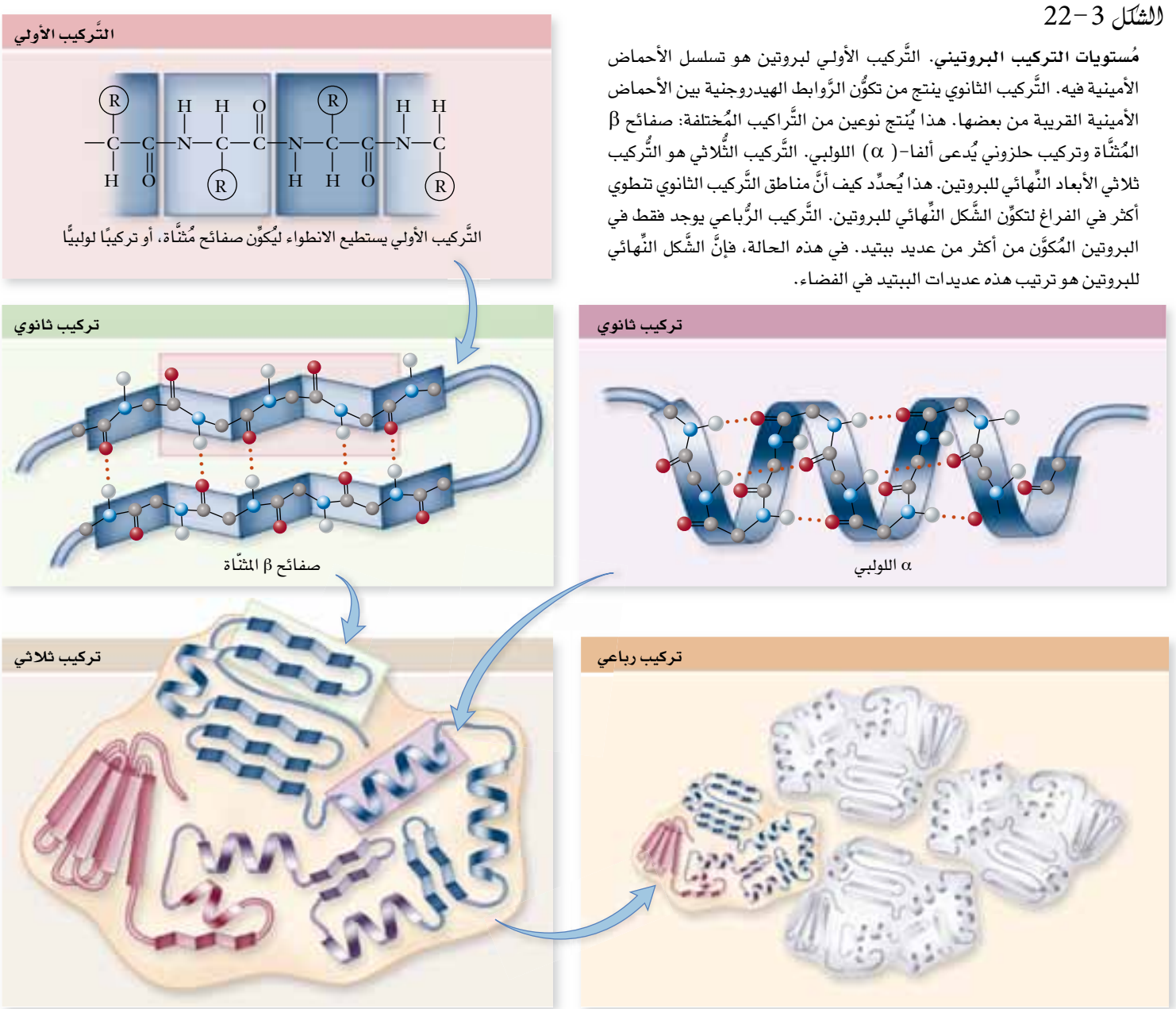
هـ.

الشكل 3-21

الارتباطات التي تُسهم في تكوين شكل البروتين. إضافة إلى الرَّوابط التي تربط الأحماض الأمينية مع بعضها في البروتين، هناك عدد من القوى الضعيفة والارتباطات التي تُحدِّد كيفية انطواء البروتين. أ. الرَّوابط الهيدروجينية تُشكَّل بين الأحماض الأمينية المُختلفة. ب. الرَّابطة الكبريتية الثنائية تُشكَّل بين مجموعتي R لحمضين من السيستين. جـ. الرَّوابط الأيونية تُشكَّل بين مجموعات لها شُحنات مُختلفة. د. تجاذب فان ديرفال يحدث بين الذّرّات، بسبب غيوم من الإلكترونات المُستقطَبة المُختلفة، عادةً ما يكون هذا التجاذب ضعيفًا. هـ. الجزء المُستقطَب من البروتين يحاول التَّجمُّع على سطح البروتين، ويتفاعل مع الماء ، في حين يُقحم الجزء غير المُحب للماء من البروتين، الذي يتضمن الأحماض الأمينية غير المُستقطَبة إلى داخل البروتين.

الشكل 3-22

مُستويات التركيب البروتيني. التَّركيب الأولي لبروتين هو تسلسل الأحماض الأمينية فيه. التَّركيب الثانوي ينتج من تكوُّن الرَّوابط الهيدروجنية بين الأحماض الأمينية القريبة من بعضها. هذا يُنتج نوعين من التَّراكيب المُختلفة: صفائح β المُثنَّاة وتركيب حلزوني يُدعى ألفا-(α) اللولبي. التَّركيب الثُّلاثي هو التُّركيب ثلاثي الأبعاد النِّهائي للبروتين. هذا يُحدِّد كيف أنَّ مناطق التَّركيب الثانوي تنطوي أكثر في الفراغ لتكوِّن الشَّكل النِّهائي للبروتين. التَّركيب الرُّباعي يوجد فقط في البروتين المُكوَّن من أكثر من عديد ببتيد. في هذه الحالة، فإنَّ الشَّكل النِّهائي للبروتين هو ترتيب هذه عديدات الببتيد في الفضاء.



يمكن أن يحتوي على مناطق تمتلك أيّ نوع من التركيب الثانوي. فمثلًا، البروتين المرتبط بـ DNA عادةً يحتوي على مناطق من α الحلزوني التي ترتبط بـ DNA وتتفاعل مباشرة مع القواعد النيتروجينية لـ DNA. بروتينات البورين porin التي تُشكِّل ثقوبًا في الغشاء الخلوي مكونة من صفائح β المنطوية مرتبة لتُشكِّل ثقوبًا في الغشاء. وأخيرًا في بروتين الهيموجلوبين، تمتلك السَّلاسل الببتيدية α وβ جلوبين مناطق تحتوي على التَّركيب الثانوي.

التَّركيب الثُّلاثي: الانطواءات والارتباطات

الشَّكل الملتوي (المنطوي) النهائي للبروتين الكروي يُدعى **التَّركيب الثُّلاثي للبروتين Tertiary structure**. يحتوي التَّركيب الثُّلاثي على مناطق تمتلك التركيب الثانوي الذي يُحدِّد كيف تترتَّب هذه المناطق في الفضاء لإنتاج الشكل النهائي. عادةً ما يندفع البروتين لأخذ التَّركيب الثُّلاثي له بفعل الإقصاء. بحيث تقترب المناطق من بعضها عن طريق الرَّوابط بين المجموعات الجانبية (R) المُتعاكسة، وبفعل الرَّوابط ثنائية الكبريت (الرَّوابط التَّساهمية بين مجموعات (R) للحمضين الأمينيين من السيستين). يُحدَّد الانطواء النِّهائي للبروتين عن طريق تركيبه الأولي بحسب طبيعة المجموعات الجانبية للتَّركيب الأولي (انظر الشكل 3-23). الكثير من البروتينات الصغيرة يمكن أنْ يعادَ فكُّ انثنائها بشكل تام ("مسخ البروتين") ويصبح لها انثناء وطوي من جديد تلقائيًّا إلى شكلها المميز.

تُثبَّت التَّراكيب الثُّلاثية عن طريق مجموعة من القوى تشمل الرَّوابط الهيدروجينية بين مجموعات R للأحماض الأمينية المُختلفة، التجاذب الإلكتروستاتيكي بين مجموعات R التي تمتلك شحنات مُتعاكسة (هذه تُسمّى الرَّوابط الأيونية)، الإقصاء الكاره للماء للمجموعات غير المُستقطَبة، والرَّوابط ثنائية الكبريت التَّساهمية. إنَّ ثبات البروتين، عندما يلتف ليكوِّن التَّركيب الثُّلاثي، يتأثر بشكل قوي في كيفية التَّلاؤم الدَّاخلي للأحماض الأمينية. عندما تقترب سلسلتان غير

مستقطَبتين من بعضهما في الدَّاخل، تتكوَّن روابط فان دير فال Vander waals بين مجموعات R. على الرّغم من أنَّ هذه الرَّابطة ضعيفة، فإن تكوّن أعداد كبيرة منها يصنع ارتباطًا قويًّا بين سلاسل البروتين، مثل جمع قوة مئات من الخطّافات الملتوية في شريط اللفافات ذات الواجهة الخشنة. هذه الرَّوابط لها تأثير فقط لمسافة قصيرة، لهذا لا يوجد تجاويف أو "فراغات" داخل البروتينات. إنَّ وجود تنوع في الأحماض الأمينية غير المُستقطَبة، من ناحية الحجم والشَّكل، ساعد السلاسل غير المُستقطَبة على أنْ تأخذ شكلًا مُلائمًا، وتنسجم بدقة في داخل البروتين.

لهذا، ليس مُستغربًا أنَّ تَغيُّر حمض أميني واحد له تأثير كبير في تركيب البروتين، وكذلك في وظيفته. فمثلًا الهيموجلوبين في الخلايا المنجلية (HbS)، سببه تَغيُّر في حمض أميني واحد، حيث حلّ الحمض الأميني فالين محل الحمض الأميني حمض الجلوتاميت في سلسلة بيتا جلوبين ما يُسبِّب تجمُّع البروتين بشكل كتل. لاحظ أنَّ التَّغيُّر هنا من حمض أميني مشحون إلى حمض أميني غير مُستقطب على سطح البروتين، وهذا يؤدي إلى جعل البروتين دَبقًا ويُشكِّل تجمُّعات. من التَّغيرات الأُخرى على الهيموجلوبين ما يُسمّى HbB، وهو الأكثر شيوعًا بين البشر، سببه التَّغيُّر من الحمض الأميني الجلوتاميت إلى الحمض الأميني سيستين في موقع آخرفي سلسلة بيتا جلوبين. في هذه الحالة، فإنَّ التَّغيُّر في تركيب البروتين ليس كبيرًا، ولكنَّه يُعطِّل الوظيفة، مُسبِّبًا أنواعًا مُتعددة من أمراض فقر الدم والثلاسيما. أكثر من 700 تغيُّر على تركيب الهيموجلوبين معروفة، ويحمل 7% من سكان العالَم هذه التَّغيرات التي لها صلة سريرية (طبية).

التَّركيب الرُّباعي: ترتيب الوحدات الْبنائيّة للبروتين

عندما ترتبط سلسلتان أو أكثر من عديد الببتيد لتشكيل بروتين قادر على القيام بوظيفة ما، يُشار إلى كل سلسلة بالوحدة المُكوِّنة (الوحدة الْبنائيّة). إنَّ ترتيب هذه الوحدات مع بعضها يُنتِج **التَّركيب الرُّباعي للبروتين Quaternary structure**. في البروتينات المُكوَّنة من أكثر من وحدة مُكوِّنة (بنائية) تكون أماكن الاتصال عادةً من النَّوع غير المُستقطَب، وتؤدي دورًا مهمًّا في نقل نشاط الوحدة الواحدة للوحدات المُكوِّنة الأُخرى.

كما ذكرنا سابقًا، فإنَّ بروتين الهيموجلوبين مُكوَّن من وحدتين بنائيتين من نوع ألفا ووحدتين بنائيتين من نوع β. كل واحدة منهما تمتلك تركيبًا أوليًّا عبارة عن تسلسل من الأحماض الأمينية الذي بدوره يأخذ تركيبًا ثنائيًّا مُكونًا من شكلين ألفا الحلزوني وصفائح بيتا المُنطوية، التي بدورها تترتب لتكوِّن التَّركيب الثُّلاثي لكلّ واحدة من هذه الوحدات. أخيرًا، تترتب هذه الوحدات لتُكوِّن التَّركيب الرُّباعي النِّهائي لهذا البروتين. فالبروتينات التي تتكون من سلسلة واحدة من عديد الببتيد، مثل أنزيم اللايسوزايم، يكون التَّركيب الثُّلاثي لها هو التَّركيب النِّهائي.

الموتيفات والحقول صفات تركيبية إضافية.

يُعَدّ تحديد ترتيب الأحماض الأمينية في البروتين مُهمةً صعبة. على الرَّغم من أنَّ العملية أصبحت مُؤتمَتة (آلية)، لكنها بقيت صعبة وبطيئة.

المقدرة على تحديد تسلسل DNA غيَّر هذا الوضع بشكل مفاجئ. كان تحديد تسلسل DNA عمليَّة سهلة، حتى قبل أن تُصبح العمليَّة مُؤَتمَتة (آلية)، فقد ارتفع عدد الجزيئات التي عُرفت وحُدِّد التَّسلسل لها. وبدخول عملية الأَتمَتة، فقد ارتفع عدد الجزيئات التي حُدِّد تسلسلها بشكل حادّ. وفي هذه الأيام، فإنَّ التَّسلسل الكامل لمئات من مُجينات (جينومات) البكتيريا والعشرات من مُجينات الحيوانات، بما فيها الإنسان، قد أصبح معروفًا. وبسبب الارتباط المُباشر بين تسلسل DNA وتسلسل الأحماض الأمينية في البروتين، فإنَّ علماء البيولوجيا أصبح لديهم الآن قاعدة معلومات واسعة عن تسلسل البروتينات لمقارنتها وتحليلها. حفَّزت المعلومات الجديدة التَّفكير في منطقية الشّيفرة الْوراثيّة، وفيما إذا كان لتركيب البروتين أنماط تحتيَّة التَّركيب البروتيني. لقد تطّور تَصوُّرنا للبروتين مع هذه المعلومات الجديدة. ما زال العلماء يُظهِرون المستويات الأربعة الهرمية للتَّركيب على أنها مُهمّة، ولكن هناك تعبيرين جديدين دخلا مُفردات عالم البيولوجيا، وهما: الموتيف والحقل.

الموتيف

عندما اكتشف علماء البيولوجيا التَّركيب ثلاثي الأبعاد للبروتين (وهو عمل شاقّ أكثر من تحديد تسلسل البروتين) لاحظوا أنَّ هناك تشابهات بين البروتينات المُختلفة. وقد سُمِّيت هذه التَّراكيب المُتشابهة **الموتيفات Motifs**، أو في بعض الأحيان "التَّراكيب فوق ثانوية". التَّعبير موتيف، أُخِذَ من الفنون، ويشير إلى عنصر الفكرة الرّئيسة أو عنصر اللَّحن الرّئيس المُتكرر في الموسيقا أو التَّصميم.

من أكثر الموتيفات شيوعًا موتيف بيتا –ألفا– بيتا (β-α-β)، الذي يشكل انطواءً أو تجعُّدًا؛ يُدعى "انطواء روسمان" في قلب مناطق ارتباط النيوكليوتيدات في نوعيات كثيرة من البروتينات. الموتيف الثاني الذي يوجد في الكثير من البروتينات وهو بيتا الأسطواني (β barrel)، وهو عبارة عن صفيحة مطوية على شكل أُنبوب. نوع ثالث من الموتيف، هو لولب – التفاف – لولب، أيْ لولبان يفصل بينهما انحناء. هذا الموتيف مهم جدًا؛ لأنَّ الكثير من البروتينات تستعمله للارتباط مع DNA اللَّولبي المزدوج (الشكل 3-23؛ راجع الفصل الـ 16).

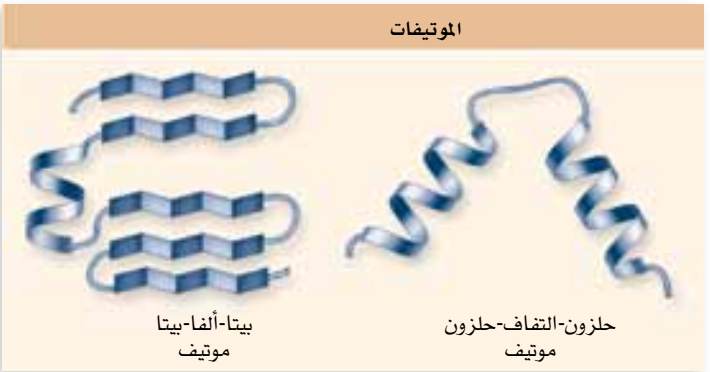
الموتيفات تُشير إلى منطق التَّركيب الذي لم يفهمه العلماء بعد. هل تمثل الموتيفات إعادة استعمال من قبل التَّطور لشيء ما زال يعمل الآن، أم هل تمثل حلًّا لمشكلة، مثل؛ كيف يرتبط النيوكليوتيد؟ إحدى الطرق للتفكير في ذلك هي إذا كانت الأحماض الأمينية أحرفًا في لغة البروتين، فإنَّ الموتيفات تمثل الكلمات المتكررة أو المقاطع. لقد كانت الموتيفات مهمة جدًا في تحليل كيفية تكوين بروتينات معروفة وولادتها. تمَّ الآن الإبقاء على قواعد بيانات لموتيفات البروتين لاستعمالها في البحث في بروتينات مجهولة باستخدام موتيفات معلومة. يمكن لهذه العملية أن تلقي الضّوء على وظيفة بروتين مُعيَّن.

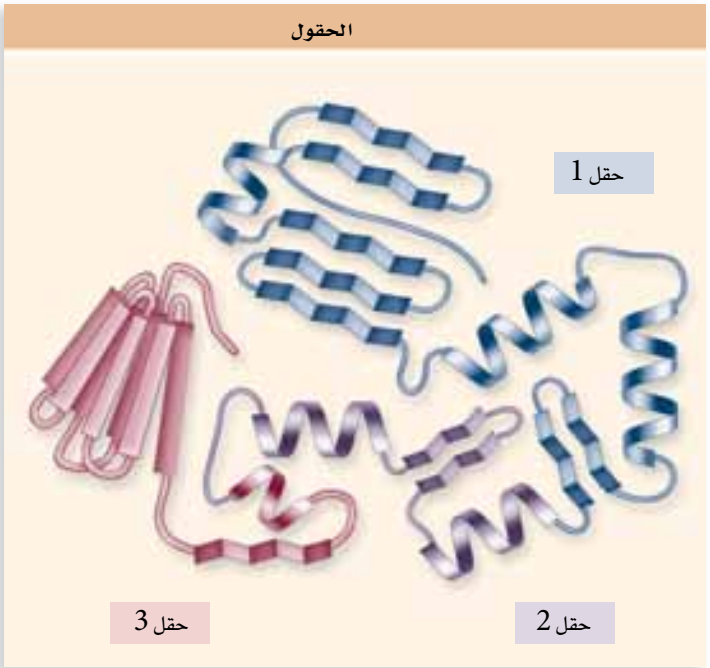
الحقول

حقول البروتينات Domains وحداتٌ وظيفيةٌ داخلَ تركيبٍ أكبر. ويمكن اعتبارها مثل تحت تركيب (تركيب أدنى) داخل التَّركيب الثُّلاثي للبروتين (الشكل 3-23). ولإكمال الصورة: فإن كانت الأحماض الأمينية أحرفًا في لغة البروتين، فإنَّ الموتيفات هي الكلمات والمقاطع، والحقول هي الفقرات.

مُعظم البروتينات مُكوَّنة من عدد من الحقول تُؤدي نواحي مُختلفة من وظيفة البروتين. في حالات كثيرة، تكون الحقول منفصلة فيزيائيًّا (بشكل ملموس). فعلى سبيل المثال، عوامل النَّسخ (ستوضّح في الفصل الـ 16) هي أنزيمات ترتبط بـ DNA وتُحفِّز عملية نسخه. إذا تمَّ استبدال عامل النَّسخ على منطقة الارتباط بـ DNA بآخر مُختلف، وذلك باستخدام تقنيات البيولوجيا الْجزيئيّة، فإنَّ تخصص عامل النسخ لـ DNA يتغيَّر من دون تغيير قدرته على تحفيز النَّسخ. تجارب "استبدال الحقل" كما ذُكر أجريَت باستخدام عوامل نسخ عدة، حيث أشارت هذه التجارب من ضمن أشياء كثيرة، إلى أنَّ حقول الارتباط مع DNA وحقول التَّحفيز منفصلة وظيفيًّا.

هذه الحقول الوظيفية للبروتين يمكن لها أيضًا أنْ تُساعد البروتين على الانطواء إلى الشَّكل المُناسب. عندما تبدأ سلسلة عديد الببتيد في الانطواء، تأخذ الحقول شكلها المناسب، كل منها بشكل أو بآخر، منفصل عن الحقول الأُخرى. هذا الحديث تمَّ توضيحه تجريبيًّا بإنتاج صناعيٍّ لقطع عديد الببتيد التي تُشكِّل حقلًا للبروتين الكامل، وتوضيح أنَّ القطع تنطوي إلى الشَّكل نفسه الذي تكون عليه في





الشكل 3–23

الموتيفات والحقول. تستطيع عناصر التَّركيب الثانوي الاتحاد، الانطواء، أوالتجعُّد لتُكوِّن ما يُسمّى الموتيفات. هذه الموتيفات توجد في بروتينات مُختلفة وتُستخدم لمعرفة وظيفة البروتين أو التنبؤ بها. البروتينات أيضًا تُصنع من حقول كبيرة، والتي هي أجزاء مُميزة وظيفيًا في البروتين. إنَّ ترتيبَ الحقول في الفضاء يُعطي التَّركيبَ الثُّلاثيَّ للبروتين.

البروتين الكامل. عديد ببتيد واحد يربط حقول بروتين واحد، مثل حبل مربوط مع عقد متجاورة عدة.

يُمكن للحقول أنْ تشير أيضًا إلى تركيب الجين المسؤول عن تكوينها. لاحقًا في الفصل 15 سوف نرى أنَّ الجين في حقيقيات النواة يكون على شكل قطع في المجين (الجينوم)، وأنَّ هذه القطع، تُدعى إكسونات، مسؤولة عن ترميز الحقول الفعّالة في البروتين. هذا الاكتشاف قاد إلى فكرة أنَّ التطور عَمِلَ عن طريق بعثرة الحقول المسؤولة عن ترميز البروتين ومزجها.

تعتمد عملية انطواء البروتين على بروتينات الشبيرون

حتى وقت قريب، اعتقد الباحثون أنَّ البروتينات حديثة التكوُّن تنطوي تلقائيًّا، وذلك لأنَّ التَّفاعلات الكارهة للماء تدفع الأحماض الأمينية داخل البروتين. أدركنا الآن أنَّ هذه الفكرة بسيطة جدًا. إنَّ السّلاسل البروتينية تستطيع الانطواء بطرق مُتعددة، بحيث تعتمد على مبدأ المحاولة والخطأ الذي يأخذ وقتًا طويلًا. إضافة إلى هذا، خلال عملية وصول البروتين إلى شكله النهائي، يتعرض الجزء الدَّاخلي للبروتينات للخارج خلال المراحل الوسطية. إذا تمَّ أخذ المراحل الوسطية هذه، وتم وضعها في أنابيب اختبار تحتوي على بيئة مشابهة لها في داخل الخلية، فإنها ترتبط ببعضها مُكونة كتلة مُلتصقة.

كيف تتجنب البروتينات حدوث هذه الكتل المُلتصقة؟ إنَّ أهم إشارة جاءت من دراسة بعض أنواع الطّفرات التي تمنع الفيروسات من التَّضاعف في خلايا البكتيريا- فيما بعد - تبيَّن أنَّ البروتينات التي تُكوِّنها الفيروسات في داخل خلايا البكتيريا لا تستطيع الانطواء بالشَّكل المُناسب. في دراسة أُخرى، تبيَّن أنَّ الخلايا الطبيعية تمتلك بروتينات تُدعى **بروتينات الشبيرون Chaperon proteins**.

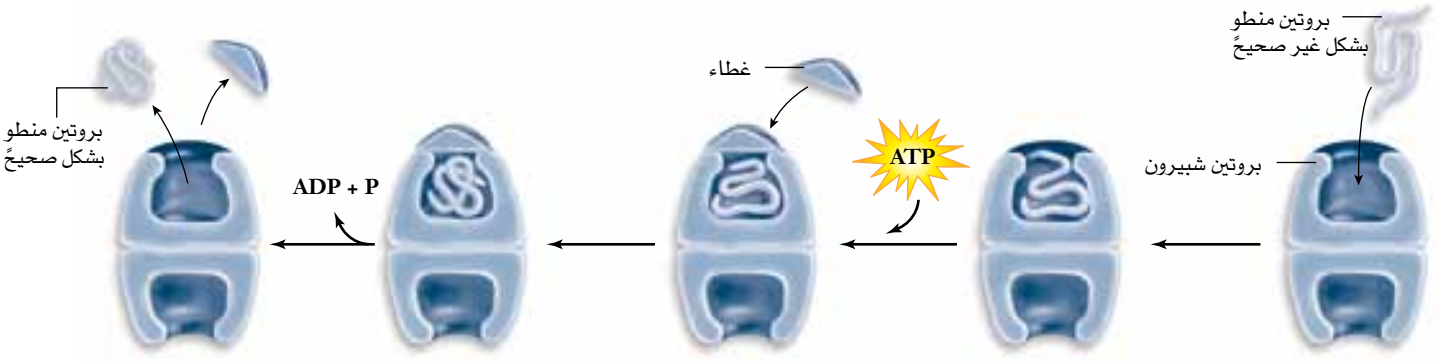
علماء البيولوجيا الْجزيئيّة تعرَّفوا الآن إلى كثير من البروتينات التي تعمل عمل بروتينات الشبيرون. لقد وُجِدَت هذه البروتينات في المخلوقات التي تمت دراستها جميعها، ووجدوا أنَّ هذه البروتينات تُملَك تحت أصناف مُتعدِّدة. إضافة إلى ذلك، تبيَّن أنَّ هذه البروتينات مُهمة جدًا في الحالات جميعها؛ لتمكين هذه الخلايا من الحياة. كثير من هذه البروتينات هي من بروتينات الصَّدمة الحرارية، حيث تُنتَج بكميات كبيرة عندما تتعرض الخلايا لحرارة مُرتفعة؛ حيث يُسبِّب ارتفاع درجة الحرارة تفكُّكَ البروتينات، ومن ثم تُساعد هذه البروتينات المُتفككة على إعادة انطوائها بشكل صحيح.

أحد أصناف هذه البروتينات، وهو بروتينات الشبرونين chaperonins، تمَّت دراسته بشكل كبير. في البكتيريا من نوع إشريشيا كولاي *Escherichia coli* أحد الأمثلة على هذه البروتينات هو الشبرونين من نوع GroE. إنَّ وجود طفرات في هذا البروتين تجعله غير فعَّال، هذا يجعل 30% من بروتينات البكتيريا تفشل في عملية الانطواء بشكل صحيح. تشترك بروتينات الشبرونين مع بعضها لتُشكِّل جزيئًا كبيرًا معقدًا يشبه وعاءً أسطوانيًّا. بحيث تدخل البروتينات المُراد انطواؤها في هذا الوعاء، ويتغير بعد ذلك شكله (الشكل 3-24). لقد أثبتت التَّجارب أنّ البروتينات المنطوية (التي طويت) بشكل غير صحيح تستطيع الدُّخول إلى بروتينات الشبرونين لإعادة انطوائها بشكل صحيح. تفاصيل هذه العملية غير واضحة، لكن يمكن أن تشمل تغيرًا في مقدار الماء داخل الوعاء.

إنَّ مرونة تركيب بروتينات الشبرونين مُدهشة. عادةً ما اعتقدنا أن البروتينات هي ذات طبيعة جامدة، لكن هذا غير صحيح في حالة بروتينات الشبرونين، إنَّ مرونة بروتينات الشبرونين ضرورية جدًا لوظيفتها. لقد تمَّ إثبات أنَّ الحقول البعيدة عن بعضها بشكل كبير في البروتينات الكبيرة ما زالت وظيفيًّا مُتَّصلة مع بعضها. إنَّ عملية الالتفاف داخل بروتينات الشبرونين تستخدم تحليل الأدونيسين ثلاثي الفوسفات (ATP) لإحداث تَغيُّر في تركيب البروتين الضّروري لوظيفة هذا البروتين. تحدث هذه العملية بشكل متتالٍ ومتكرر حتى نصل إلى التَّركيب المُناسب للبروتين. تستخدم الخلايا بروتينات الشبرونين لطيّ البروتين وإعادته إلى شكله الأصلي إذا أصبح له انطواء غير صحيح.

بعض الأمراض تنتج من انطواء البروتين بشكل غير صحيح

إن نقص بروتينات الشبيرون قد يسبب بعض الأمراض التي تنتج من انطواء غير صحيح لبروتينات مُهمّة. المرض الوراثي تليُّف الحويصلات ينتج من طفرة في



فرص البروتين لإعادة الانطواء

الشكل 3-24

كيف يعمل نوع واحد من بروتينات الشبيرون. هذا الشبرونين ذو الشِّكل الأسطواني هو من عائلة (GroE) من بروتينات الشبيرون. يتكون هذا البروتين من حلقتين مُتشابهتين تتكون كل واحدة منهما من سبع وحدات بنائية مُتشابهة، تمتلك كل واحدة ثلاث مُسندات. يدخل البروتين ذو الانطواء غير الصحيح إلى إحدى الغرف في الأسطوانة، ثم تُقفل الغرفة بغطاء من الأعلى. تعمل الطّاقة الناتجة من عملية تحول جزيء الأدينوسين ثلاثي الفوسفات على تغيير شكل الغرفة، وتحويلها من كارهة للماء إلى مُحبة له. هذا التغيُّر يسمح للبروتين بإعادة الانطواء. بعد مدة قصيرة، يُقذف البروتين، منطويًا أو غير منطوٍ، وتعود الدَّورة البدء من جديد.

البروتين الذي يُدخل الأيونات عبر الغشاء الخلوي. على الأقل في بعض الحالات من هذا المرض، يملك هذا البروتين التسلسل الصحيح من الأحماض الأمينية، لكنّه يفشل في الانطواء بشكل صحيح لأخذ شكله النهائي، القادر على أداء وظيفته. يعتقد العلماء أنَّ النَّقص في بروتينات الشبيرون يُسبِّب تجمُّع (تكتُّل) البروتينات في خلايا الدماغ منتجةً ما يُسمّى الصفائح النَّشوية البروتينية التي تميِّز مرضى الخرف.

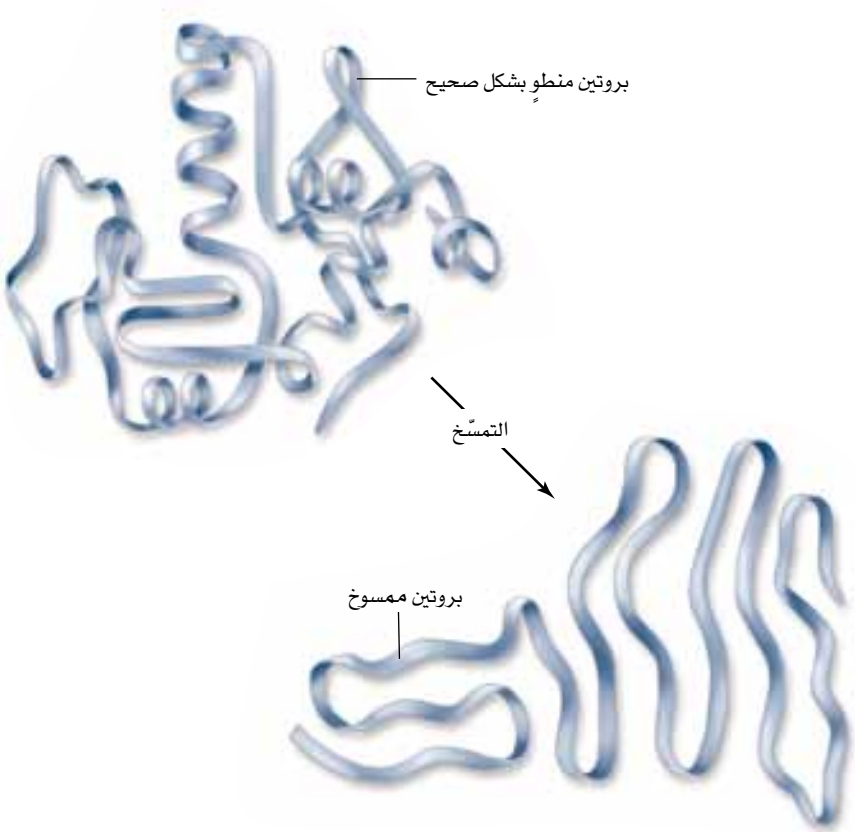
التمسُّخ يبطل عمل البروتينات

إذا تغيرت بيئة البروتين، فإنَّ البروتين يُغيِّر شكله أو حتى ينحلّ (يتفكَّك) بشكل كامل. تُسمّى هذه العملية **التَّمسُّخ Denaturation** (الشكل 3-25). إنَّ التَّمسُّخ يمكن أنْ يحدث عندما تتغير درجة الحموضة، أو درجة الحرارة، أو تركيز الأملاح في المحلول المُحيط بالبروتين.

عندما تتمسخ البروتينات، فإنّها تصبح غير فعّالة من الناحية الْبيولوجيّة. هذا الشيء مهم جدًا في حالة الأنزيمات، حيث إنَّ مُعظَم التَّفاعلات الْكيميائيّة في المخلوقات الحية تتحفز عن طريق أنزيمات خاصة، ومن الضروري أنْ تبقى هذه الأنزيمات عاملة.

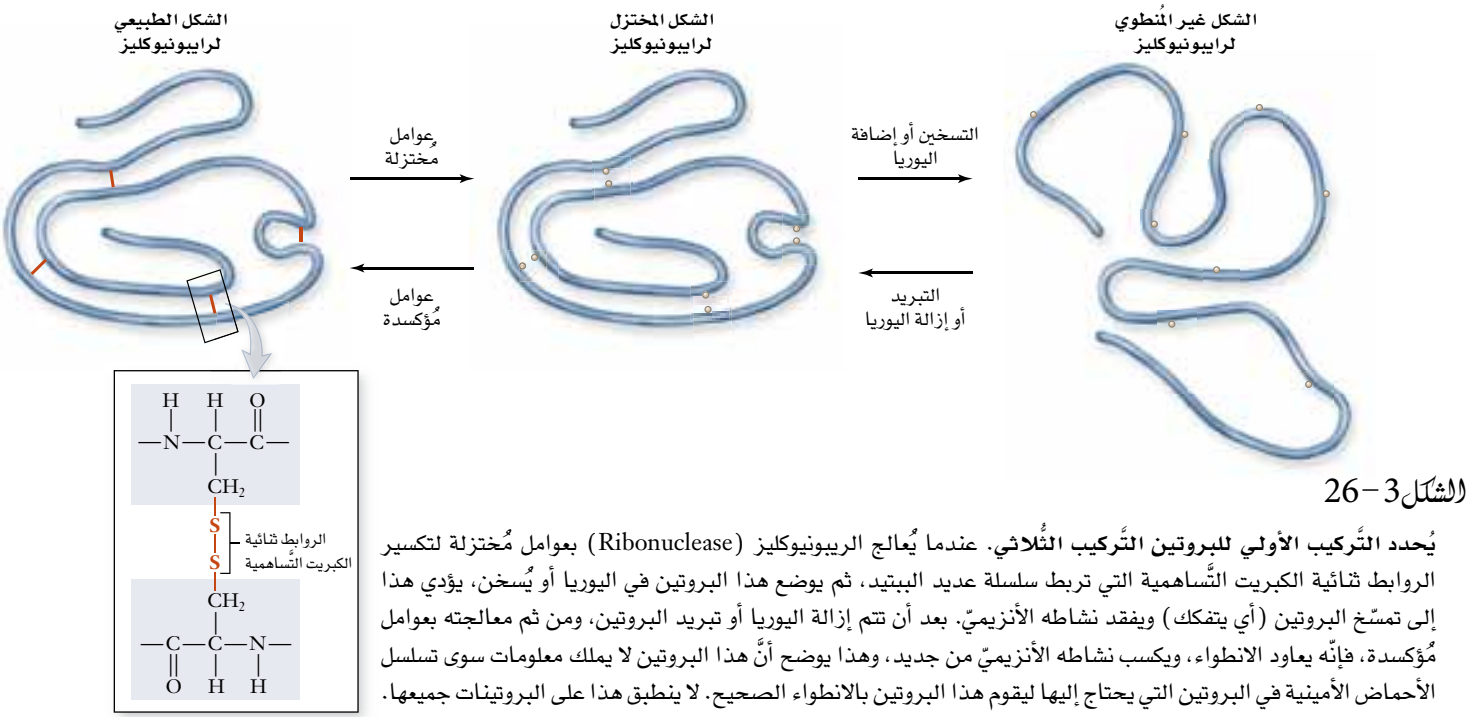
تمَّ استخدام تمسُّخ البروتينات منذ زمن طويل. فقد استُخدِمت الطُّرق التَّقليدية في حفظ الطَّعام كحفظها بالأملاح وبتخليلها: قبل توافر البرادات والمجمِّدات، كانت الطَّريقة الوحيدة لحفظ الطعام ومنع نموّ المخلوقات الدقيقة عليه هي حفظها في محاليل ذات تراكيز عالية من الملح أو الخلّ، التي بدورها تعمل على تمسخ الأنزيمات لهذه المخلوقات ومنعها من النموّ.

إنَّ معظم الأنزيمات تعمل ضمن مدى ضيق للعوامل الفيزيائية. فمثلًا، تعمل الأنزيمات الموجودة في الدَّم في جسم الإنسان على درجة حموضة مقدارها تقريبا 7.4 ولكنّها سرعان ما يصبح لها تمسُّخ إذا وُضِعَتْ في بيئة ذات درجة حموضة عالية مثل المعدة. وعلى عكس ذلك وبشكل مخالف، فإنَّ الأنزيمات التي تعمل على درجة حموضة 2 أو أقل في المعدة يصبح لها تمسُّخ إذا وُضِعَتْ في وسط شبه قاعدي مثل الدَّم. بشكل مُشابه، فإنَّ المخلوقات الحيّة التي تعيش بالقرب من الشقوق الهيدروجينية قريبًا من المحيطات تمتلك أنزيمات تعمل على درجات حرارة عالية (أكثر من 100°س). لا تستطيع هذه المخلوقات الحية أنْ تعيش في المياه الباردة؛ لأن أنزيماتها لا تستطيع العمل بشكل جيد على درجات حرارة مُنخفضة. لأيّ مخلوق حيّ هناك مدى من درجة الحموضة، ودرجة الحرارة، وتركيز الأملاح القادر على تحمُّله. ضمن هذا المدى، تعمل أنزيمات هذا المخلوق بشكل جيد، وتحافظ على شكلها، وتستطيع القيام بوظائفها الْبيولوجيّة.



الشكل 3-25

تمسّخ البروتين. التَّغيُّر في بيئة البروتين، مثل تغيُّر درجة الحرارة أو درجة الحموضة يُسبِّب عدم انطواء (تفكك) البروتين وفقدانه شكله في عملية تُسمّى التمسُّخ. في هذه الحالة من التمسُّخ، فإنَّ البروتين غير فعّال من النَّاحية الْبيولوجيّة.



الشكل 3-26

يُحدد التَّركيب الأولي للبروتين التَّركيب الثُّلاثي. عندما يُعالج الريبونيوكليز (Ribonuclease) بعوامل مُختزلة لتكسير الروابط ثنائية الكبريت التَّساهمية التي تربط سلسلة عديد الببتيد، ثم يوضع هذا البروتين في اليوريا أو يُسخن، يؤدي هذا إلى تمسّخ البروتين (أي يتفكك) ويفقد نشاطه الأنزيميّ. بعد أن تتم إزالة اليوريا أو تبريد البروتين، ومن ثم معالجته بعوامل مُؤكسدة، فإنّه يعاود الانطواء، ويكسب نشاطه الأنزيميّ من جديد، وهذا يوضح أنَّ هذا البروتين لا يملك معلومات سوى تسلسل الأحماض الأمينية في البروتين التي يحتاج إليها ليقوم هذا البروتين بالانطواء الصحيح. لا ينطبق هذا على البروتينات جميعها.

عندما تعود البيئة المحيطة بالبروتين إلى وضعها الطبيعي بعد عملية تمسُّخ البروتين، تقوم البروتينات الصغيرة التي أصبح لها تمسُّخ بعملية إعادة الانطواء، وتعود إلى شكلها الأصلي (قبل التمسُّخ) بشكل تلقائي، مدفوعة بالتَّفاعلات التي تتم بين الأحماض الأمينية غير المُستقطَبة والماء (الشكل 3-26). تُسمّى هذه العملية عملية **إعادة الانطواء Renaturation**. أُثبتت هذه العملية أول مرة لأنزيم يُدعى رايبو نيوكليز (RNase) Ribonuclease. إنَّ إعادة انطواء هذا الأنزيم قاد إلى مبدأ أن التَّركيب الأولي للبروتين يُحدِّد التَّركيب الثُّلاثي له. إنَّ البروتينات الكبيرة نادرًا ما يصبح لها إعادة انطواء تلقائي، بسبب الطَّبيعة المُعقَّدة لتركيبها النهائي. استنادًا إلى هذا، يمكن القول: إن المبدأ البسيط السابق يُعدّ غير كافٍ.

حقيقةُ أنَّ بعض البروتينات تستطيع إعادة الانطواء تلقائيًّا أشارت إلى أنّ التَّركيب الثُّلاثي يتأثر بقوة بالتَّركيب الأولي. من الأمثلة القوية على ذلك، هو تفكيك الرايبوسومات التَّابعة للبكتيريا *E.coli* وإعادة تجميعها تقريبًا. على الرّغم من أنَّ هذه العملية تحتاج إلى تغيُّر في درجة الحرارة وتركيز الأيونات، إلاّ أنها تُشير إلى القُدرة المُدهشة على التَّجمع الذَّاتي للبروتينات. إنَّ تكوين تراكيب مُعقدة عن طريق التَّجمُّع الذَّاتي من أهم الأفكار في دراسة البيولوجيا الحديثة.

من المهم جدًا التَّمييز بين التمسُّخ **والتفكُّك للبروتين Dissociation**. في البروتين ذي التَّركيب الرُّباعي، يُمكن أنْ تتفكَّك الوحدات البِنائيّة عن بعضها دون أنْ تفقد تركيبها الثُّلاثي. فمثلًا، الأربع وحدات الأساسية للهيموجلوبين يمكن أنْ تتفكك إلى أربع جزيئات (اثنان ألفا جلوبين واثنان بيتا جلوبين) دون تمسُّخ بروتينات الجلوبين (الوحدة الأساسية)، وتستطيع (الوحدات البِنائيّة أو بروتينات جلوبين) إعادة التجمع لتكوّن تركيبًا رباعيًّا من جديد.

البروتينات صنفٌ مُتنوعٌ من الجزيئات الكبيرة تقوم بوظائف مُتعدِّدة ومُختلفة. يتكون البروتين من 20 نوعًا مُختلفًا من الأحماض الأمينية. تقع هذه الأحماض في خمسة أصناف كيميائية، يمتلك كل واحد منها صفاتٍ مُختلفة تُحدِّد طبيعة البروتين الناتج منها. يمكن النَّظر إلى التركيب البروتيني على أربعة مستويات: 1. سلسلة من الأحماض الأمينية، أو تركيب أوليّ؛ 2. حلزونيات وصفائح، تُسمّى تركيبًا ثانويًّا؛ 3. شكل ثلاثي الأبعاد، يُسمّى التَّركيب الثّلاثي؛ 4. مجموعة من عديد الببتيدات مُشتركة مع بعضها لتكون التَّركيب الرُّباعي. عادةً، تمتلك البروتينات المُختلفة تركيبًا يُدعى ما تحت التَّركيب ويُسمّى موتيفًا يحتوي على مجموعة من الحقول الوظيفية. يمتلك البروتين مدى ضيقًا من الظُّروف التي ينطوي عندها بشكل ملائم؛ خارج هذا المدى، تحاول البروتينات فكّ هذا الانطواء.

5-3 الدُّهون: جزيئات كارهة للماء

الدُّهونُ Lipids مجموعةٌ من الجزيئات التي تمتلك صفة كيميائية واحدة رئيسة، هي أنّها لا تذوب في الماء. الدُّهونُ المُخزِّنة مثل الدُّهون الحيوانية نوعٌ من أنواع الدّهون. الزيوت مثل زيت الزيتون، وزيت الذُّرة، وزيت جوز الهند هي أيضًا أمثلة على الدُّهون، والشموع مثل شمع النّحل، وشمع الأذن هي أيضًا أمثلة على الدُّهون.

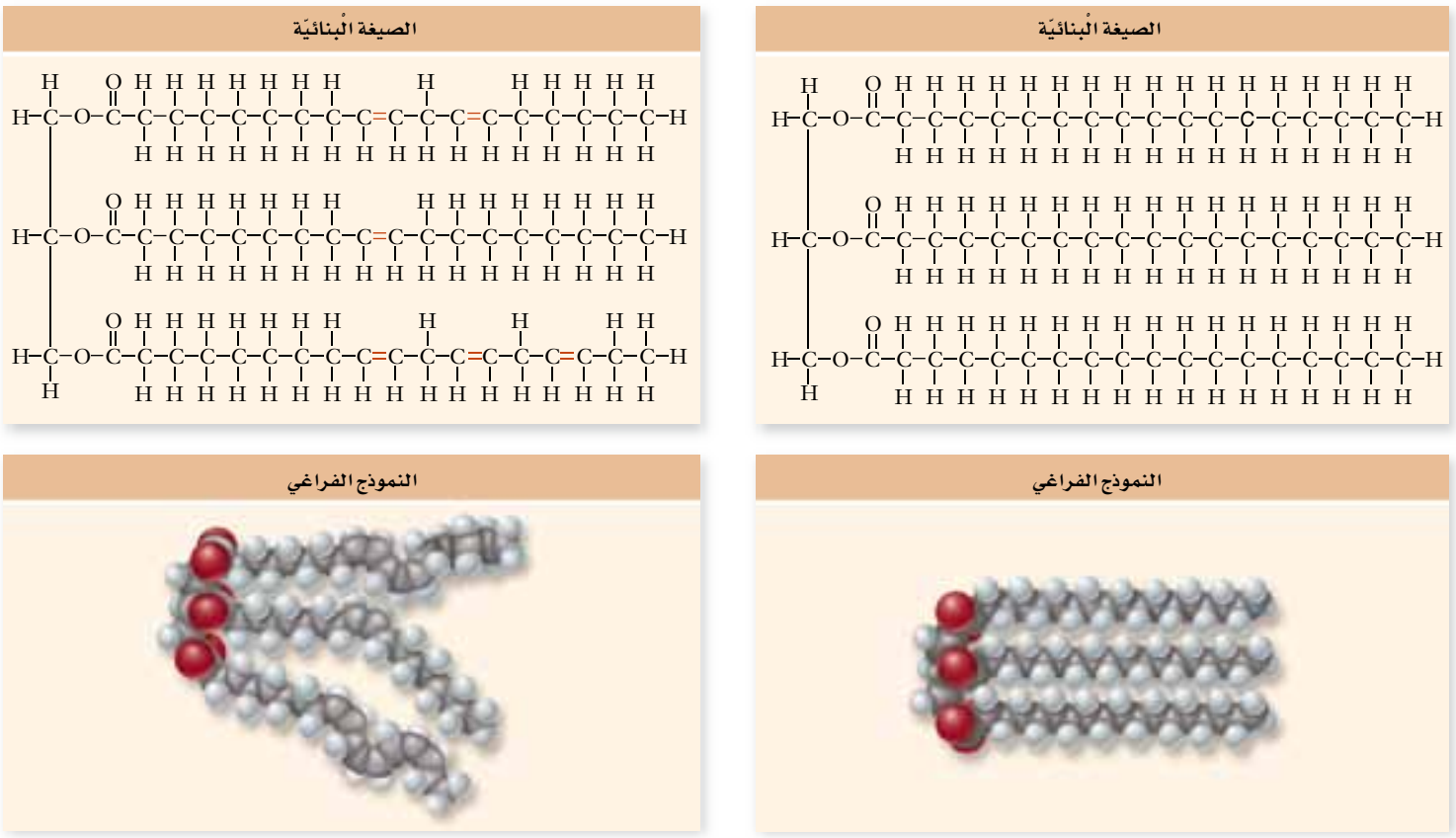
تحتوي الدُّهون على نسبة عالية من الرَّوابط الكربونية الهيدروجينية غير المُستقطَبة (C—H)، ولهذا فإنَّ الدُّهون ذات السلاسل الطويلة لا تستطيع الانطواء على بعضها، مثل البروتينات لعزل الأجزاء غير المُستقطَبة بعيدًا عن البيئة المائية المُحيطة بها. بدلًا من ذلك، عندما توضع الدُّهون في الماء، فإنَّ جزيئات كثيرة منها تتجمع تلقائيًّا مع بعضها محاولةً إظهار ما تحتويه من مجموعات مُستقطَبة للماء المحيط بها، في حين تنعزل الأجزاء غير المُستقطَبة من هذه الجزيئات مع بعضها داخل تجمُّع. ربما تلاحظ ذلك عند إضافة الزّيت إلى مقلاة تحتوي على الماء، حيث تتشكل قطرات متماسكة من الزيت على سطح الماء. هذه التجمُّعات التِّلقائية للدُّهون مُهمّة جدًا للخلية، حيث تُشكِّل أساس تركيب الغشاء الخلوي.

تتكون الدُّهون من مُبلمرات مُعقَّدة من الأحماض الدُّهنية مُرتبطة مع الجليسرول

الكثير من الدُّهون تُصنَّع من هيكل بسيط مصنوع من نوعين من الجزيئات: الأحماض الدُّهنية والجليسيرول. الأحماض الدُّهنية سلسلةٌ هيدروكربونيةٌ طويلةٌ تتصّلُ بها مجموعة كربوكسيل حمضية (COOH) على أحد الأطراف. الجليسيرول هو ثلاثي الكربون مُتعدِّد الكحول (ثلاث مجموعات OH—). كثير من جزيئات الدُّهون مُكوَّنة من جزيء الجليسيرول مع ثلاثة أحماض دهنية، واحد لكلّ ذرة كربون من العمود الفقري للجليسرول. ولأنَّ هذه الدُّهون تحتوي على ثلاثة أحماض دهنية، فإنَّ جزيء الدُّهون عادةً يُعرف **بثلاثي الجليسرول Triglyceride** (الاسم الأدقّ كيميائيًّا هو ثلاثي أسيل الجليسيرول). التَّركيب الأساسي مُشار إليه (بالشكل 3-27). ليس بالضرورة أنْ تكون الأحماض الدُّهنية متشابهة، وعادةً ما تكون هذه الأحماض مُختلفة عن بعضها بشكل كبير. تختلف السلاسل الهيدروكربونية لهذه الأحماض في الطّول؛ إنَّ أكثرها شيوعًا السلاسل ذات الأعداد الزوجية من 14 إلى 20 ذرة كربون. كثرة الروابط C—H في الدُّهون تعمل بوصفها مصدر طاقة طويل الأمد.

إذا كانت ذرات الكربون الدَّاخلية جميعها في سلاسل الأحماض الدُّهنية مُرتبطة على الأقل بذرتين من الهيدروجين، فإنَّه يُمكن القول: إن الحمض الدُّهني **مُشبع Saturated**، وتعني كلمة مشبع أنَّ هذه الأحماض تمتلك ذرات الهيدروجين جميعها التي تستطيع امتلاكها (انظر الشكل 12-3). الأحماض الدُّهنية التي تمتلك روابط ثنائية بين زوج أو أكثر من ذرات الكربون المتعاقبة تُدعى الأحماض **غير المُشبعة unsaturated**. إنَّ الأحماض الدُّهنية التي تمتلك أكثر من رابطة ثنائية تدعى أحماضًا دهنية مُتعدِّدة **غير مُشبعة polyunsaturated**.

إنَّ امتلاك الرَّوابط الثنائية يغيِّر من سلوك الجزيء، حيث إنَّ الرَّابطة الثنائية C=C لا تسمح بحرية الدوران حولها بعكس ما يحصل مع الرابطة الأُحادية C—C. هذه الصفة تؤثر بشكل رئيس في درجة الذوبان: أي هل هذه الأحماض الدُّهنية دهون صلبة أم زيوت سائلة على درجة حرارة الغرفة. تمتلك الدُّهون المُحتوية على أحماض دهنية مُتعدِّدة غير مُشبعة درجة ذوبان منخفضة؛ لأنَّ سلاسل هذه الأحماض تكون مثنية (ملتوية) عند الروابط الثنائية، ما يمنع جزيئات الدُّهون من الاقتراب من بعضها. مُعظمُ الدُّهون المُشبعة، مثل الدُّهن الحيواني أو الدُّهون المُشبعة في الزبدة صلبةٌ على درجة حرارة الغرفة.



أ. ب.

الشكل 3-27

الدُّهون المُشبعة والدُّهون غير المُشبعة. أ. الدُّهون المُشبعة تتكوَّن من ثلاثي الجليسرول الذي يحتوي على ثلاثة أحماض دهنية مُشبعة، لا تمتلك روابط ثنائية، لهذا، يحتوي على أكبر عدد من ذرات الهيدروجين المُرتبطة بالسلسلة الكربونية. مُعظم الدُّهون الحيوانية من النوع المشبع. ب. الدُّهون غير المُشبعة تتكون من ثلاثي الجليسرول، يحتوي على ثلاثة أحماض دهنية غير مشبعة، تمتلك واحدًا أو أكثر من الرَّوابط الثنائية، ولهذا، ارتبط عدد أقل من العدد الأقصى لذرات الهيدروجين بالسلسلة الكربونية. هذا المثال يتضمن حمضًا دهنيًّا وحيدًا غير مُشبع، واثنين من مُتعدد غير مُشبع. مُعظم الدهون النباتية من النوع غير المُشبع. كثرة الالتواءات بسبب الروابط الثنائية تمنع ثلاثي الجليسيرول من أنْ تقترب من بعضها، وهذا يُنتج زيتًا سائلًا على درجة حرارة الغرفة.

إذا وُضِعَتْ جزيئات ثلاثي الجليسرول في الماء، فإن هذه الجزيئات تشترك مع بعضها بشكل تلقائي، مُشكِّلة كُريات من الدُّهون يكون حجمها كبيرًا مقارنةً بحجم جزيئات ثلاثي الجليسيرول. وحيث إنَّ الدُّهون غير ذائبة في الماء، فإنها تستطيع التَّرسب في مواقع مُحدَّدة في المخلوق الحيّ، مثل الحويصلات في الخلية الدُّهنية.

تحتوي الدُّهون على أنواع أخرى (الشكل 3-28). التربينات *Terpenes* وهي دهون ذات سلاسل طويلة تدخل في تركيب صبغات بيولوجية مهمة، مثل الكلوروفيل والصبغة البصرية الشبكية. يُعدّ المطاط أيضًا من التربينات. الستيرويدات *Steroids*، وهي نوع آخر من الدُّهون، وتتكون من أربع حلقات كربونية. تحتوي الأغشية الخلوية في الخلايا الحيوانية على ستيرويد الكوليستيرول. من الستيرويدات الأُخرى، مثل التيستيستيرون والإستروجين، التي تعمل بوصفها هرمونات في الحيوانات مُتعدِّدة الخلايا. البروستاجلانديناتُ *Prostaglandins* مجموعةٌ مما يقارب عشرين جزيئًا من الدُّهون التي هي أحماض دهنية مُعدَّلة، تمتلك "ذيلين" غير مُستقطَبين مُتصلين بحلقة خماسية الكربون. تعمل هذه الجزيئات بوصفها رُسُلًا كيميائية محلية في كثير من أنسجة الفقاريات. في الفصول القادمة، سنتطرق إلى تأثيرات بعض هذه الأحماض الدُّهنية المُعقَّدة.

تُشكِّل الدُّهونُ جزيئاتٍ ممتازةً لتخزين الطَّاقة

تحتوي معظم الدُّهون على أكثر من 40 ذرة كربون. إنَّ نسبة الروابط (C—H) المُخزِّنة للطَّاقة في الدُّهون هي أكثر من ضعف ما هو موجود في الكربوهيدرات (انظر الجزء رقم 2-3)، هذا الشيء يجعل من الدُّهون جزيئات فعّالة أكثر في تخزين الطَّاقة الكيميائية. في المعدل، يزودُنا الدُّهن بما يقرب من 9 كيلو سُعرات (Kcal) من الطَّاقة الكيميائيّة لكلّ جرام، مقارنةً مع 4 كيلو سعرات لجرام من الكربوهيدات.

مُعظَم الدُّهون الحيوانية دهونٌ مُشبعة (ماعدا بعض زيوت الأسماك)، في حين تكون الدُّهونُ النَّباتية غير مُشبعة (انظر الشكل 27-3). ماعدا زيوت النباتات الاستوائية (زيت النخيل وزيت جوز الهند)، التي تُعدّ مُشبعة على الرّغم من أنَّها سائلة على درجة حرارة الغرفة. يمكن تحويل الزيوت السائلة إلى دهون صلبة بإضافة ذرات الهيدروجين إليها كيميائيًّا. فمثلًا تُباع زبدة الفستق في الأسواق على شكلها المُهدرج صناعيًّا، وذلك بجعل دهون الفستق صلبة، ولا تنفصل بوصفها زيتًا سائلًا في أثناء تخزينها ووجودها على رفوف المحال التجارية. إنَّ عملية الهدرجة الصِّناعية للدُّهون غير المُشبعة تُزيل الفوائد الصِّحية التي تملكها مُقارنةً مع الدُّهون المُشبعة. تُنتِج تفاعلات الهدرجة أنواعًا من الأحماض الدُّهنية من نوع ترانس (Trans) التي تعمل على زيادة نسبة الكولسترول. ولهذا، فقد أصبح معروفًا هذه الأيام أن السَّمن المصنوع من زيت الذُّرة عن طريق عملية الهدرجة ليس أفضل صحيًّا من الزبدة الحيوانية.

إنَّ الزيادة في تناول الكربوهيدرات، يجعل المخلوقات الحيّة تُحوِّل هذه الكربوهيدرات إلى نشا أو جلايكوجين، أو دهون تُخزَّن للاستخدام المستقبلي. إنَّ كثيرًا من الأشخاص في الدُّول المُتقدِّمة يزيد وزنهم مع تقدم السِّن؛ لأنَّ كمية الطَّاقة التي يحتاج إليها هؤلاء الأشخاص تقل مع بقاء كمية الطَّعام المتناول ثابتة، ولهذا تتحول الكربوهيدرات الزائدة إلى دهون ما يُسبِّب زيادة في الوزن عندهم.

الأغذيةُ الغنيةُ بالدهون من أحد الأسباب الرَّئيسة المُسبِّبة لأمراض القلب، وخصوصًا تصلُّب الشرايين، تترسب القطع الدهنية المُسماة الكُتل عند المُصابين بهذا المرض على جدران الأوعية الدَّموية، مانعةً تدفُق الدَّم فيها. يمكن أنْ تتحطم هذه الترسبات إلى أجزاء، حيث تقوم هذه الأجزاء بإغلاق شرايين صغيرة في الدِّماغ، مسببةً الجلطة الدِّماغية.

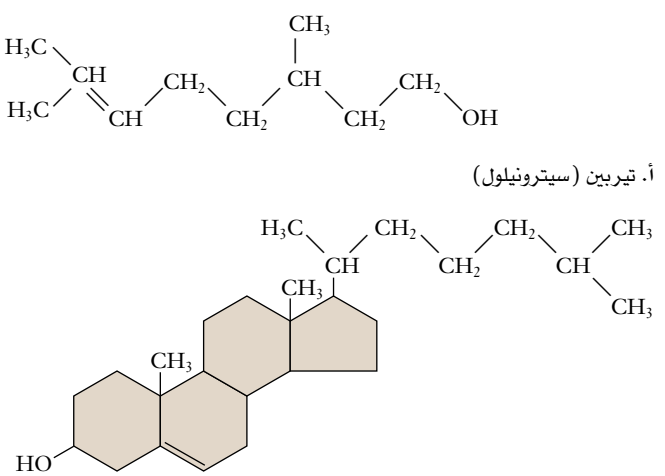
تُشكِّل الدُّهون المُفسفرة الأغشية الخلويّة

الدُّهونُ المُفسفرةُ Phospholipids من أهم الدُّهون المُعقَّدة، حيث تُعدّ من أهم جزيئات الخلية؛ لكونها تُشكِّل الغشاء الخلوي. يمكن التفكير في جزيء الدُّهون المُفسفرة على أنه بديل عن الجلسيرول الثلاثين، حيث حلت مجموعة الفوسفات محل واحد من الأحماض الدُّهنية. يتضمن التَّركيب الأساسي للدُّهون المُفسفرة ثلاثة أنواع من الوحدات:

1. **الجلسرول**: كحولٌ ثلاثيُّ الكربون، تحمل كل كربونة منه مجموعة هيدروكسيل. يُشكِّل الجلسيرول العمود الفقري لجزيء الدُّهون المُفسفرة.
2. **الأحماض الدُّهنية**: سلاسلُ طويلةٌ من مجموعات CH_2— (سلاسل هيدروكربونية) تنتهي بمجموعة كربوكسيل (COOH—). يرتبط زوج من هذه الأحماض عادةً مع جزيء الجلسيرول في جزيء الدُّهون المُفسفرة.
3. **مجموعة فوسفات** (PO_4^{2-}—) مُرتبطة بأحد الأطراف للجلسرول. وعادةً ما تحتوي مجموعة الفوسفات المشحونة على جزيء عضوي مشحون مُرتبط بها، مثل الكولين، إيثانول أمين، أو الحمض الأميني سيرين.

يمكن تصوُّر جزيء الدُّهون المُفسفرة كأنه يمتلك "رأسًا" مُستقطَبًا على أحد الأطراف (مجموعة الفوسفات) و"ذيلين" طويلين، غير مُستقطبين على الطَّرف الآخر (الشكل 3-29). هذا التَّركيب ضروري لوظيفة هذا الجزيء، حتى لو بدا متناقضًا. لماذا نريد جزيئًا ذائبًا في الماء، وأيضًا غير ذائب في الماء؟ إنَّ طبيعة تركيب الغشاء الخلوي يدل على هذه الصفة فريدة التركيب لهذا الجزيء.

في الماء، تقوم الذُّيول غير المُستقطَبة لجزيئات الدُّهون المُفسفرة القريبة من بعضها بالتجمُّع بعيدًا عن الماء، مُشكلةً ما يُسمّى قطيرات كروية *Micelles*، التي تكون بها الذيول مُتجهةً داخليًّا (الشكل 3-30أ). هذا هو مبدأ عمل المنظِّفات الكيميائية في جعل المواد الدُّهنية ذائبة في الماء. حيث تذوب المواد الدُّهنية في الجزء الدَّاخلي

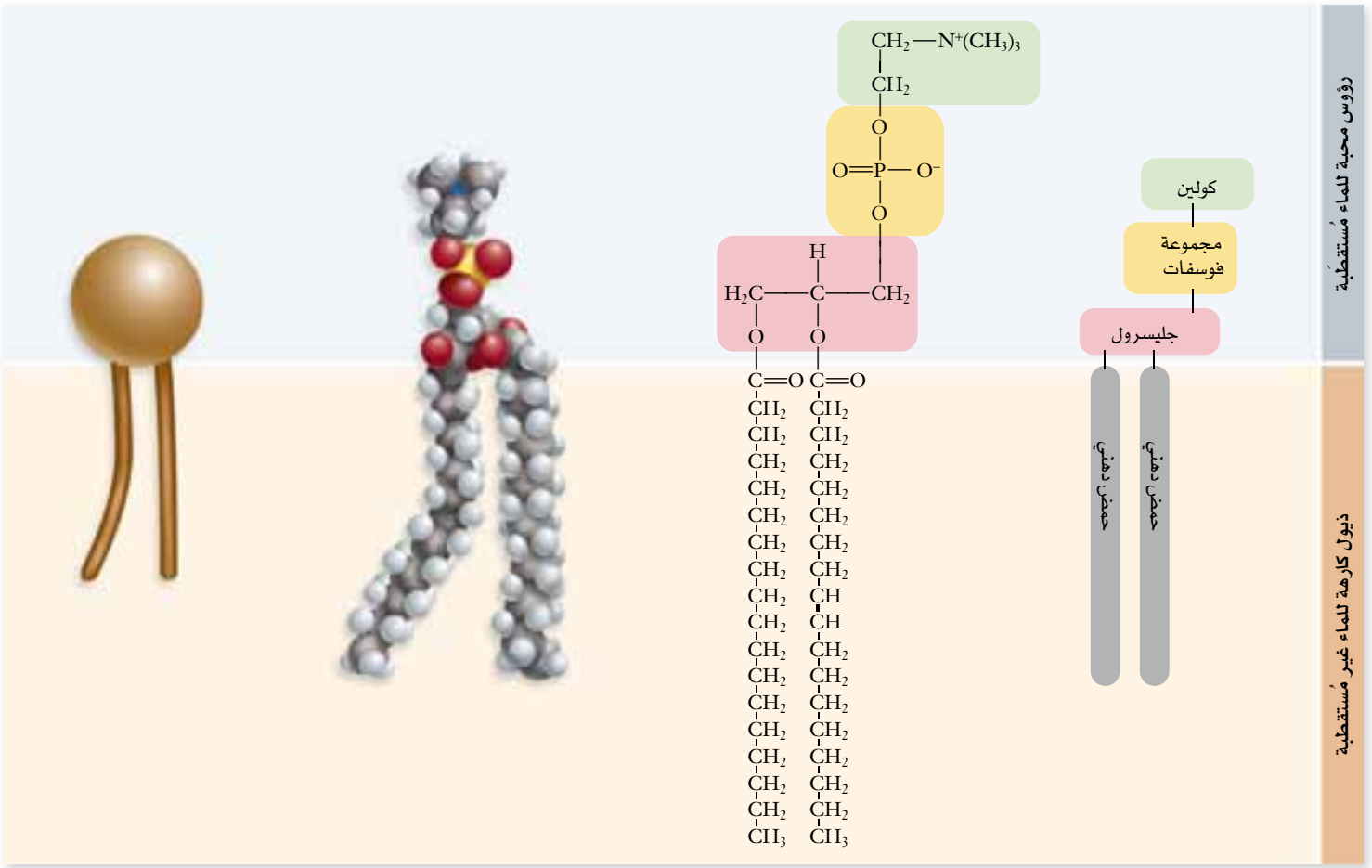


أ. تيربين (سيترونيلول)

ب. ستيرويد (كوليسترول)

الشكل 3-28

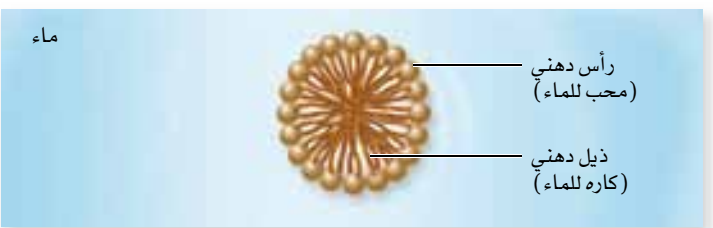
أنواع أخرى من الدهون. أ. توجد التيربينات في الصبغات البيولوجيّة، مثل الكلوروفيل والصبغة الشبكية. ب. الستيرويدات تؤدي دورًا مهمًّا في الأغشية، وتدخل في تركيب نوع من الهرمونات الذي يُستخدم في عمل الإشارات الكيميائيّة.



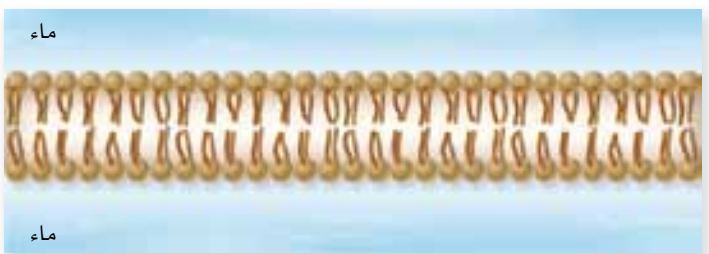
أ. ب. جـ. د.

الشكل 3–29

الدُّهون المُفسفرة. الدُّهن المفسفر، فوسفاتيديل كولين مُبيَّن هنا في (أ) رسم، (ب) صيغة، (جـ) نموذج فضائي، (د) أيقونة تُستخدم في الغشاء البيولوجي.



أ.



ب.

الشكل 3–30

تُشكل الدُّهون تلقائيًّا قطيرات أو طبقة ثنائية من الدُّهون في الماء. في المحلول المائي تترتب الجزيئات الدُّهنية، بحيث تكون الرؤوس المُستقطَبة (المُحبة للماء) في اتجاه الوسط القطبي، والماء، والذيول غير المُستقطَبة (الكارهة للماء) تكون بعيدة عن الماء. أ. حبيبات تُسمّى القطيرات يمكن أنْ تتكون. ب. جزيئات الدُّهون المُفسفرة تستطيع ترتيب نفسها في طبقتين. في هذين التَّركيبين، تكون الرؤوس المُحبة للماء للخارج والذيول الكارهة للماء للداخل، هذا المثال الثاني يُدعى الدُّهون المُفسفرة ثنائية الطبقة.

غير المُستقطب للقطيرة، ويكون السطح الخارجي المستقطب للقطيرة ذائبًا في الماء. تستطيع جزيئات الدُّهون المُفسفرة أن تُكوِّن أشكالًا مُعقَّدة أكثر من القطيرة، حيث تستطيع أنْ تكوِّن طبقتين من الجزيئات فوق بعضها، وتكون الذُّيول غير المُستقطَبة لكلّ طبقة مقابلة لبعضها، أو من الدَّاخل، تاركةً الرؤوس المُستقطَبة للخارج مشكلةً بذلك ما يُسمّى الطَّبقتين (الشكل 3 – 30ب). تُشكِّل الطبقتان الأساسَ البنائيَّ للأغشية البيولوجيّة، سيُناقَش بالتَّفصيل في الفصل الخامس.

ثلاثيات الجلسيرول تُصنَّع من أحماض دهنية وجليسيرول. تحتوي الخلايا أيضًا على دهون متنوعة أخرى تؤدي أدوارًا مُهمة في أيض الخلية. بسبب احتواء الدُّهون على الرَّوابط C—H غير المُستقطَبة، فإنَّ الدُّهون لا تذوب في الماء، وتتجمع مع بعضها. هذا التجمُّع للدُّهون المُفسفرة يشكِّلُ الأغشيةَ الخلويةَ.

مراجعة المفاهيم

3-1 الكربون: يشكّلُ بنيةَ الجزيئات الْبيولوجيّة

يُشكِّل الكربون العمود الفقري للجزيئات الْبيولوجيّة جميعها. يترتب الكربون على شكل سلاسل وحلقات، ويُستخدم مع ذرات أُخرى لتشكيل جزيئات بيولوجية.

- يُكوِّن الكربون أربع روابط تساهمية.
- تتكون الهيدروكربونات من الكربون والهيدروجين، وتُخزِّن الطَّاقة في روابطها.
- تُبنى الجزيئات الْبيولوجيّة باستخدام المجموعات الوظيفية إضافة إلى الكربون والهيدروجين. تمنح هذه المجموعات صفات كيميائية معينة للمُركبات.
- يمتلك الكربون والهيدروجين كهروسالبية متماثلة؛ ولهذا فإنَّ الرَّابطة C—H تكون غير مُستقطَبة.
- يمتلك الأكسجين والنيتروجين كهروسالبية أكثر من الهيدروجين والكربون ما يؤدي إلى تكوين روابط مُستقطَبة.
- الآيزوميرات الْبنائيّة تختلف في التَّركيب، في حين تختلف الآيزوميرات الفراغية في كيفية ارتباط المجموعات الْبنائيّة.
- المُتضاداتُ الضَّوئيةُ آيزوميراتٌ فراغيةٌ، وهي صورة في المرآة لبعضها، ويمكن لهذه الجزيئات أن تحرف مستوى الضّوء المُستقطب.
- المُبلمراتُ سلاسلُ طويلةٌ مُكوَّنةٌ من وحداتٍ كيميائية أو مونمرات مُتشابهة.
- مُعظمُ الجزيئاتِ الكبيرةِ الْبيولوجيّة مبلمراتٌ.
- تتكون المبلمرات الْبيولوجيّة عن طريق نزع الماء، أو ما يُسمّى بتفاعلات نزع الماء.
- يُمكن تحطيم المبلمرات الْبيولوجيّة عن طريق إضافة الماء، أو ما يُسمّى تفاعل تحلُّل الماء.

3-2 الكربوهيدرات: جزيئات مُخزِّنة للطّاقة وجزيئات بنائيّة

الصيغة التجريبية للكربوهيدرات هي $(CH_2O)_n$. تُستخدم الكربوهيدرات لتخزين الطَّاقة وبوصفها جزيئات بنائية.

- السّكّريّات البسيطة تحتوي على ثلاث إلى ستّ ذرات كربون، وتوجد على شكل آيزوميرات؛ بنائية وفراغية.
- تحتوي السّكّريّات الأُحادية على وحدة بنائية واحدة، أما السّكّريّات الثُّنائية فتحتوي على وحدتين، في حين تحتوي مُتعدِّدة التسكُّر على أكثر من اثنتين من الوحدات الْبنائيّة.
- يُستخدم الجلوكوز لتكوين ثلاثة مبلمرات مهمة: النّشا، والجلايكوجين، والسليلوز.
- النّشا والجلايكوجين مبلمراتٌ متشعِّبةٌ من الجلوكوز من نوع ألفا. يُصنَّع النشا في النبات، ويُصنَّع الجلايكوجين في الحيوانات، تُستَخدم هذه الجزيئات لتخزين الطَّاقة.
- السليلوزُ مُبلمرٌ غيرُ مُتشعِّبٍ من الجلوكوز من نوع بيتا، وتصنّعه الخلايا النباتية، ويدخل في صناعة الجدار الخلوي.

3-3 الأحماض النّوويَّة: جزيئات المعلومات

الأحماض النّوويَّة مُبلمراتٌ من النيوكليوتيدات ترتبط مع بعضها بروابط فوسفودايستر. تُستَخدم جزيئات هذه الأحماض لتخزين المعلومات.

- DNA و RNA مُبلمراتٌ مُكوَّنةٌ من وحدات بنائية تُدعى النيوكليوتيدات.
- DNA يستخدم سُكَّر الرَّايبوز منقوص الأُكسجين، و RNA يستخدم سُكَّر الرَّايبوز.
- تحتوي الأحماض النّوويَّة على أربعة أنواع من النيوكليوتيدات. يحتوي DNA على الأدنين، والجوانين، والسايتوسين، والثايمين. أمّا RNA، فيحتوي على اليوراسيل بدلًا من الثايمين.
- يوجد DNA على شكل تركيب حلزوني مزدوج، أما RNA فيوجد على شكل سلسلة مفردة.
- تُحافِظ الرَّوابط الهيدروجينية بين القواعد على شكل تركيب DNA الحلزوني المزدوج. يكون التزاوج القاعدي مُحَدّدًا: الأدنين مع الثايمين والجوانين مع السايتوسين.
- يُسجِّل DNA معلومات تسلسل الأحماض الأمينية في البروتينات باستخدام النيوكليوتيدات الأربع المُختلفة.
- يُنسَخ RNA من DNA ويُستَخدم لصناعة البروتينات.
- الأدينوسينُ ثلاثي الفوسفات (ATP) نيوكليوتيدٌ يُستَخدم لتزويد الخلية بالطَّاقة.
- النيوكلتيدات FAD و NAD^+ تُستَخدم لنقل الإلكترونات في الخلية.

3-4 البروتينات: جزيئات لها تراكيب ووظائف مُتنوعة

البروتيناتُ جزيئاتٌ متنوعةُ التَّراكيبِ مصنوعة من الأحماض الأمينية. تقوم البروتينات بعمل وظائف متنوعة.

- مُعظمُ الأنزيمات بروتيناتٌ تعمل على تحفيز التَّفاعلات الأيضية.
- تُدافع البروتينات عن أجسامنا؛ وتنقل الأيونات والغازات، وتوفر دعامة، وتنقبض وتزودنا بالحركة، وتستقبل معلومات، وتنظم النشاط الحيوي، وتخزن الأيونات المُرتبطة بها.
- البروتيناتُ مبلمراتٌ خطيةٌ مكوَّنةٌ من عشرين حمضًا أمينيًّا مُختلفًا.
- ترتبط الأحماض الأمينية مع بعضها بروابط ببيتيدية لتُكوِّن عديدات الببتيد.
- تختلف الأحماض الأمينية العشرون السَّابقة باختلاف مجموعة R التي تكون مُستقطَبة، أو غير مُستقطَبة، أو مشحونة.
- يتبع تركيب البروتين الترتيب الآتي من المستويات: الأولي، والثانوي، والثلاثي، والرُّباعي.
- التركيبُ الأوليُّ تسلسلٌ من الأحماض الأمينية. التَّركيب الثانوي يعتمد على نمط تكوين الرَّوابط الهيدروجينية التي تُكوِّن إما تركيبًا حلزونيًّا أو صفائح مستوية. التَّركيب الثُّلاثيُّ انطواءٌ ثلاثيُّ الأبعادِ للبروتين، والتَّركيب الرُّباعي يُشكَّل بارتباط اثنين أو أكثر من عديد الببتيد.
- الموتيفاتُ تراكيبُ متشابهةٌ موجودةٌ في بروتيناتٍ غيرِ متشابهةٍ. الحقول وحداتٌ وظيفيةٌ داخلَ التركيبِ الثلاثي.
- تعمل بروتينات الشبرونين على انطواء البروتينات. يُسبِّب نقص هذه البروتينات أمراضًا.
- تمسُّخ البروتيناتِ هو عمليةُ انحلالِ التَّركيب الثُّلاثي. التفكُّك يعود إلى انفصال الوحدات الْبنائيّة (عديدات الببتيد) للتَّركيب الرُّباعي مع عدم تغيُّر التَّركيب الثُّلاثي لهذه الوحدات أو عديدات الببتيد.

3-5 الدُّهون: جزيئات كارهة للماء

تتكون الدُّهون من أحماض دهنية وجليسرول ولا تذوب في الماء. تعدّ الدُّهون جزيئات مُخزِّنة للطّاقة مددًا طويلة من الزمن. تُشكِّل الدُّهونُ المُفسفرة أساسَ الغشاءِ البيولوجيِّ.

- تكون الأحماض الدهنية مُشبعةً أو غيرَ مُشبعةٍ.
- تحتوي الأحماض الدُّهنية المُشبعة على أكبر عدد ذرات من الهيدروجين تستطيع الأحماض الدُّهنية الارتباط بها.
- تحتوي الأحماض الدُّهنية غير المُشبعة على رابطة ثنائية أو أكثر بين ذرات الكربون.
- تحتوي الدُّهونُ المُفسفرة على زوجٍ من الأحماض الدُّهنية ومجموعة فوسفات واحدة مُرتبطة مع جزيء جليسيرول. يكون الرَّأس المُحتوي على الفوسفات ذائبًا في الماء، أما الذيل فهو غير ذائب فيه.
- في الأغشية الخلوية المُكوَّنة من طبقتين من الدُّهون المُفسفرة، تكون الرؤوسُ المُحبَّة للماء لكلّ طبقة مُوجَّهةً إلى الجوانب الخارجية للغشاء، والذيولُ الكارهة للماء مُوجَّهةٌ إلى مركز هاتين الطبقتين.

أسئلة مراجعة

الاختبار الذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. يتشكل المبلمر من وحدات مُتعددة من المونميرات من خلال:
   أ . نمو سلسلة ذرات الكربون.
   ب. إزالة مجموعة OH— وذرة هيدروجين.
   جـ. إضافة مجموعة OH— وذرة هيدروجين.
   د . الرَّوابط الهيدروجينية.

2. الكربوهيدرات مصدرٌ جيدٌ للطّاقة؛ لأنّ:
   أ . الرّوابط C—H الموجودة في الكربوهيدرات تُخزِّن الطّاقة.
   ب. الرَّوابطُ الثنائية بين الكربون والأكسجين قويةٌ جدًا.
   جـ. الكهروسالبية لذرات الأكسجين تعني أنَّ الكربوهيدرات تتكون من كثير من الرَّوابط المُستقطَبة.
   د . الكربوهيدرات تستطيع تشكيل تراكيب حلقية في البيئة المائية للخلية.

3. تُخزِّن الخلايا النباتية الطَّاقة على شكل _____، في حين تخزّن الخلايا الحيوانية الطَّاقة على شكل _____
   أ . فركتوز؛ جلوكوز.
   ب. سكَّريات ثنائية؛ سكَّريات أُحادية.
   جـ. سليلوز؛ كايتن.
   د. نشا؛ جلايكوجين.

4. نوع الكربوهيدرات في تركيب جزيء RNA هو:
   أ . الجلاكتوز.
   ب. الرَّايبوز (سكَّر خُماسي) منقوص الأكسجين.
   جـ. الرَّايبوز (سكَّر خُماسي).
   د . الجلوكوز.

5. السليلوزُ يختلفُ عن النّشا؛ لأن:
   أ . النّشا يُصنَّع في الخلايا النباتية، والسليلوز في الخلايا الحيوانية.
   ب. السليلوز يُشكِّل خيوطًا طويلة، والنّشا ذو تشعبات كبيرة.
   جـ. النّشا غير ذائب في الماء، والسليلوز ذائب في الماء.
   د. جميع ما ذُكر.

6. جُزيءُ DNA أو RNA مبلمرٌ من:
   أ . السّكّريّات الأُحادية.
   ب. نيوكليوتيدات.
   جـ. أحماض أمينية.
   د . أحماض دهنية.

7. الرَّابطة الْكيميائيّة المسؤولة عن ربط الأحماض الأمينية لتكوين البروتينات هي:
   أ . فوسفودايستر.
   ب. رابطة $\beta - 1، 4$.
   جـ. الببتيدية.
   د . الهيدروجينية.

8. يُثبت التَّركيب الثُّنائي الحلزوني لجزيء DNA بـ:
   أ . رابطة الفوسفودايستر.
   ب. الرَّابطة الببتيدية.
   جـ. الحلزوني من نوع ألفا.
   د . الرَّابطة الهيدروجينية.

9. واحدٌ مما يأتي ليس من الفروق بين DNA و RNA:
   أ . سكَّر الرايبوز(خماسي الكربون) منقوص الأكسجين مقابل سُكَّر الرَّايبوز (خماسي الكربون).
   ب. الثايمين مقابل اليوراسيل.
   جـ. سلسلتان مقابل سلسلة واحدة.
   د . روابط الفوسفودايستر مقابل الروابط الهيدروجينية.

10. المونمر المُكوِّن للبروتين هو:
    أ . السّكّريّات الأُحادية.
    ب. النيوكليوتيدات.
    جـ. الأحماض الأمينية.
    د . الأحماض الدُّهنية.

11. واحدةٌ من الأجزاء المُكوِّنة للحمض الأميني لها تأثير كبير في الشَّكل العام للبروتين هي:
    أ . مجموعة الأمين ($-NH_2$).
    ب. مجموعة -R.
    جـ. مجموعة الكاربوكسيل (COOH—).
    د . أ و جـ.

12. تُسبِّب الطَّفرة التي تُغيِّر حمضًا أمينيًّا واحدًا من الأحماض الأمينية المُكوِّنة للبروتين تغيُّرًا في المستوى:
    أ . الأولي لتركيب البروتين.
    ب. الثانوي لتركيب البروتين.
    جـ. الثلاثي لتركيب البروتين.
    د . جميع ما ذكر.

13. العامل الذي يسهم في تنوُّع أشكال البروتين ووظائفه في الخلية هو:
    أ . التَّفاعل الرُّباعي بين السلاسل الببتيدية.
    ب. تُشكِّل التَّركيب الحلزوني – ألفا والصفيحة المنطوية بيتا.
    جـ. التَّسلسل الخطي للأحماض الأمينية التي تُشكِّل المُبلمر.
    د . كل ما ذكر.

14. الصفة الكيميائية التي تجعل من الدُّهون جزيئات غير ذائبة بالماء هي:
    أ . طول السلسلة الكربونية.
    ب. كثرة أعداد الروابط C—H غير المُستقطَبة.
    جـ. تشعبات الأحماض الدُّهنية المُشبعة.
    د . الرَّابطة الثنائية C=C الموجودة في الأحماض الدُّهنية غير االمُشبعة.

15. التَّشكُّل التِّلقائي لطبقتي الدُّهون في البيئة المائية يحدث بسبب:
    أ . مجموعات الرأس المُستقطَبة للدُّهون المُفسفرة التي تستطيع التَّفاعل مع الماء.
    ب. الذيول الطويلة للأحماض الدُّهنية للدُّهون المُفسفرة التي تستطيع التَّفاعل مع الماء.
    جـ. ذيول الأحماض الدُّهنية للدُّهون المُفسفرة غير محبة للماء.
    د . أ و جـ.

أسئلة تحدٍّ

1. تُصنع بيوت العناكب من "الحرير"، الذي هو بروتين ليفي، طويل. إنَّ الخيوط التي تراها في بيت العنكبوت مُكوَّنة من بروتينات كثيرة. إنَّ أهم مُسندة بنائية في هذه البروتينات هي بيتا البلُّوري "β-crystal". وهي مناطق من الألياف البروتينية متراصة فوق بعضها. ما الرَّوابط الْكيميائيّة التي يحتاج إليها تشكيل هذا التركيب بيتا البلوري؟ ما مستوى التَّركيب البنائي المسؤول عن تكوين الحرير في بيوت العنكبوت؟ كيف يؤثر تركيب بيتا البلوري في الصِّفات الفيزيائية للبروتين المُكوِّن للحرير.

2. كيف تختلف الجزيئات الكبيرة الأربعة بعضها عن بعض؟ ارجع إلى رسمة الوحدات الأساسية في الشكل 3-3 ولخِّص أهم "الإشارات" التي استخدمتها لتُميِّز هذه الجزيئات المُهمة.

3. تؤدي الرَّوابط الهيدروجينية دورًا مهمًّا في تثبيت الجزيئات الْبيولوجيّة الكبيرة وتنظيمها. بعد دراستك للأنواع الأربعة من الجزيئات الكبيرة. صِفْ ثلاثة أمثلة تُبيِّن بها كيف أنَّ تكوين الرَّوابط الهيدروجينية يؤثر في شكل الجزيئات الْبيولوجيّة الكبيرة ووظيفتها.

4. خلايا جسمك خلايا مُتميزةٌ على الرّغم من أنها جميعها تحتوي على المعلومات الْوراثيّة نفسها. استخدم المعلومات في الجدول 2-3 لتفسير التَّنوع في التَّراكيب الخلوية المُتخصصة وتنوع وظائفها الموجودة في جسمك.

هل أنت في حاجة إلى مراجعة إضافية ؟ زر الموقع www.ravenbiology.com. لتتدرب على الاختبارات القصيرة، والرسوم المتحركة، والتسجيلات التلفزيونية، وأنشطة مخصصة لمساعدتك على فهم المادة الموجودة في هذا الفصل.