وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

الأحياء

كتاب الطالب

المستوى الحادي عشر

BIOLOGY
STUDENT BOOK

GRADE
11

الفصل الدراسي الأول
FIRST SEMESTER

طبعة 1446 - 2024

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

© وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي في دولة قطر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليف: فريق من الخبراء بقيادة الدكتور توم سو وبالتّعاون مع شركة باسكو العلميّة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

النشيد الوطني

قَسَـمًا بِمَـنْ رَفَـعَ السَّـمَاءْ قَسَـمًا بِمَـنْ نَشَـرَ الضِّـيَاءْ
قَطَـرٌ سَتَبْـقَى حُـرَّةً تَسْمُـو بِـرُوحِ الأَوْفِـيَـاءْ
سِـيرُوا عَـلَى نَـهْـجِ الأُلَـى وَعَـلَى ضِيَـاءِ الأَنْبِـيَاءْ
قَطَـرٌ بِقَـلْـبِي سِـيرَةٌ عِـزٌّ وَأَمْجَـادُ الإِبَـاءْ
قَطَـرُ الرِّجَـالِ الأَوَّلِـين حُمَـاتُنَـا يَـوْمَ النِّـدَاءْ
وَحَمَـائِـمٌ يَـوْمَ السَّـلاَمْ جَـوَارِحٌ يَـوْمَ الفِـدَاءْ

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

خبرات تربويّة وأكاديميّة من المدارس

الإشراف العلميّ والتربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

يعدّ كتاب الطّالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطّلّاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات الّتي يحتاجون إليها للنّجاح في تنمية المهارات الحياتيّة وبعض المهارات في الموادّ الأخرى.

وبما أنّنا نهدف إلى أن يكون طلّابنا مميّزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التّفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثّقة بقدرتهم على اتّباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التّقارير، وإنتاج الرّسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزّملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التّمرّس في التّفكير الإبداعيّ.
- التّمسّك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.

يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التّوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدّراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة الّتي تتوافق مع أعمار الطّلاب، والّتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدّراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطّلّاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) ممّا يجعل أداء الطّلاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتّنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطّالب.

- توزّع المعرفة والأفكار العلميّة المخصّصة لكلّ عام دراسيٍّ ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصمّمة لتحقيق التّنوّع والتّطوّر.
- تعدّد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعًا جديدًا، منطلقًا ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السّابقة.
- إتاحة الفرصة للطّلّاب، في كلِّ درسٍ، للتّحقّق الذّاتيّ من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
- احتواء كلّ وحدة على تقويم للدّرس وتقويم الوحدة الّتي تمكِّن الطّلّاب والأهل والمدرّسين من تتبّع التّعلّم والأداء.

العلوم مجموعة من المعارف الّتي تشمل الحقائق والأشكال والنّظريّات والأفكار. ولكنَّ العالِم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهمّيّة من المعرفة الّتي تحتويها.

سوف يساعد هذا الكتاب الطُّلّاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين وليواجهوا مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنيّة المستقبليّة.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

- الاستقصاء والبحث
- التّعاون والمشاركة
- التّواصل
- التّفكير الإبداعيّ والناقد
- حلّ المشكلات
- الكفاية العددية
- الكفاية اللغويّة

الصّفّ 11

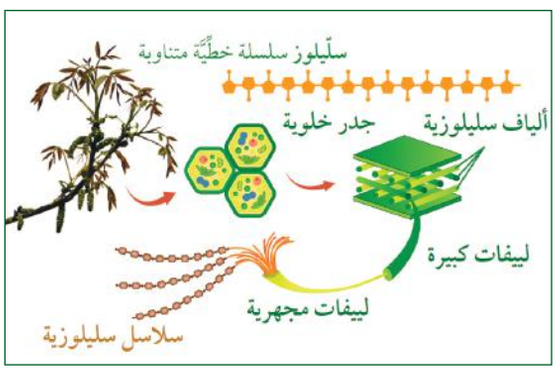
الفصل الدّراسي 1

الأحياء

ماذا ستتعلّم من هذا الكتاب

إنّ فهم عالمنا الحيّ مهمّ لنا جميعًا، فعلينا أن نفهم أجسامنا كي نكون أصحّاء، وعلينا أن نفهم الكائنات الحيّة من حولنا كي نتعايش معًا، كما نحتاج، أيضًا، إلى فهم عمليّات الحياة الكيميائيّة الحيويّة الدّاخليّة، لأنّنا موجودون من خلال هذه العمليّات، ونتشارك بها مع الكائنات الحيّة الأخرى.

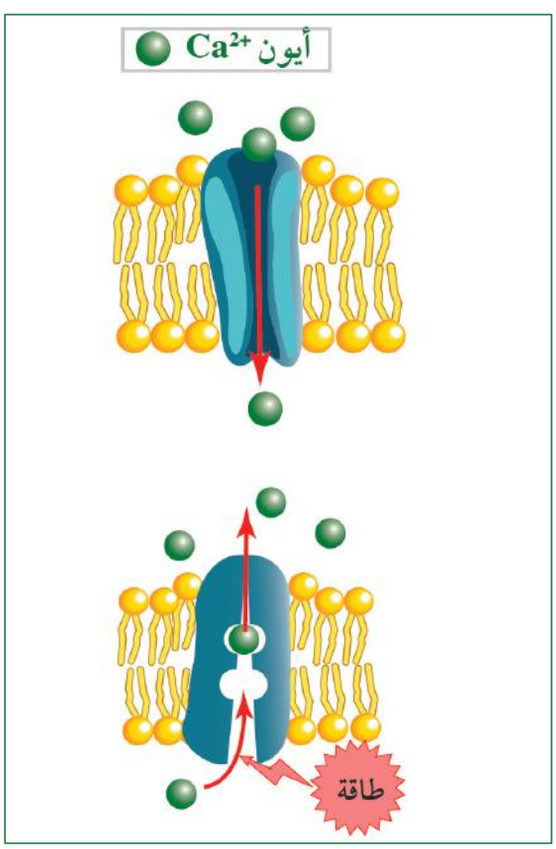
علم الأحياء علم معقّد، سيّما أنّ الحياة تشمل عشرات الآلاف من الموادّ الكيميائيّة، وملايين التّفاعلات الكيميائيّة الحيويّة المترابطة في ما بينها. ويستخدم البناء الضّوئيّ الطّاقة المنبعثة من الشّمس لتحويل موادّ غير عضويّة إلى سكّريّات هي في أساس السّلسلة الغذائيّة، بينما يولّد التّنفّس الطّاقة الّتي تسيّر الوظائف الحيويّة الضّروريّة، كالحركة والنّموّ والتّكاثر.



السّليلوز الموجود في الألياف النباتيّة أكثر مادّة شائعة على كوكب الأرض.

يبدأ الفصل الحاليّ بكيمياء الكائنات الحيّة؛ فالكربوهيدرات واللّيبيدات وهما نوعان أساسيان من الجزيئات الحيويّة، بينما تشكّل البروتينات النّوع الثّالث. تبني البروتينات المركّبة من عشرين حمض أمينيّ الحياة على كوكب الأرض كلّها.

والتّحدّي الثّاني الّذي يواجهنا هو فهم الآليات الّتي تجري داخل الخلايا كي تستطيع تمرير الموادّ الغذائيّة، والماء، والفضلات عبر الغشاء الخلويّ، ثمّ نستقصي الأنزيمات، الّتي هي في الحقيقة محفّزات التّفاعلات الحيويّة، وهي تساعد الخلايا على بناء جزيئات جديدة، وتكسير جزيئات أخرى، كالطّعام.



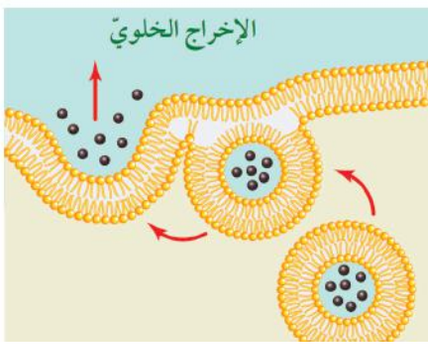
تنقل القنوات البروتينيّة الأيّونات عبر الغشاء الخلويّ بالاتّجاهين.

أمّا الموضوع الأخير في الفصل الأوّل فهو إنتاج الطّاقة في الخلايا من خلال التّنفّس الخلويّ الّذي هو سلسلة من التّفاعلات الّتي تحطّم سكّر الجلوكوز إلى ثاني أكسيد الكربون، والماء مطلقة الطّاقة. وقد تطوّرت العمليّة نفسها لدى النّباتات والحيوانات على حدّ سواء.

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

المفاهيم المهمّة، والبيانات، والأمثلة على كلّ فكرة جديدة، مقدّمة برسوم توضيحيّة مفصّلة وبالكلمات، أيضًا.



أسئلة للمناقشة

أسئلة المناقشة

تتيح الأسئلة للمناقشة الفرصة لصفّك كي يتحدّث الطّلّاب عن المفاهيم والمعلومات الجديدة.

تتيح اسئلة المناقشة الفرصة كي يتحدّث الطّلّاب عن المفاهيم والمعلومات الجديدة

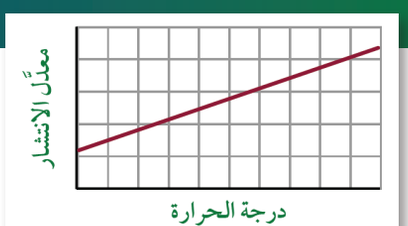
شريط أفكار المهمّة

الكيمياء العضوية هي كيمياء الكربون ومركّباته.

تحدّد الأفكار النّقاط الأساس، وتذكّر بها.

المسائل الرياضيّة

العلاقات الكمّيّة مقدّمة برسوم بيانيّة واضحة مع أمثلة ذات صلة بكلّ مفهوم.

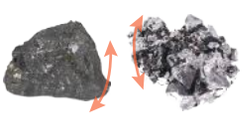


العلم والعلماء

إنّ معرفتنا بالعلوم قد تطوّرت على مدى ما يزيد عن ثلاثة آلاف سنة. توفّر هذه القصص النّظرة الثّاقبة والإلهام من الجانب الإنسانيّ للعلوم والتكنولوجيا.

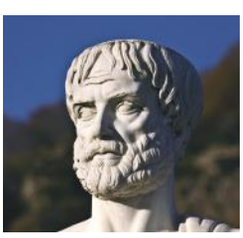
إكتشاف الكيمياء الحيوية

ما الفرق بين المادة المكوّنة للكائنات الحية والمادة غير الحية؟ هذا السؤال مطروح منذ آلاف السنين. عاش طاليس في مدينة ميليتوس التي تقع حاليا في تركيا، وقد اقترح في عام 585 قبل الميلاد نظرية تقول بأن المغنطيس الموجود في الصخر المغنطيسي lodestone هو ميزة الحياة (**الشكل 1-56**). وكان الناس في زمان طاليس يعتقدون أن كل شيء يتحرك بنفسه هو حي.



شكل 1-56 تستطيع الأحجار المغنطيسية أن تجعل بضها تتحرك لكنها ليست حية.

تبدأ الإجابة العلمية عن كيمياء الحياة مع أرسطو Aristotle الذي كان والده المولود في مدينة ستاجيرا اليونانية عام 384 قبل الميلاد طبيب الملك. أُرسل أرسطو الشاب في السابعة عشرة إلى أثينا للدراسة في أكاديمية أفلاطون، وقد بقي هناك طوال عشرين سنة. وعلى جزيرة لسبوس التقى أرسطو الزميل العالم ثيوفراستوس، وأسسا عن طريق العمل معا علم الأحياء، وقد درس أرسطو الحيوانات بينما درس ثيوفراستوس النباتات.



شكل 1-57 تمثال أرسطو في مدينة ستاجيرا اليونانية مسقط رأسه.

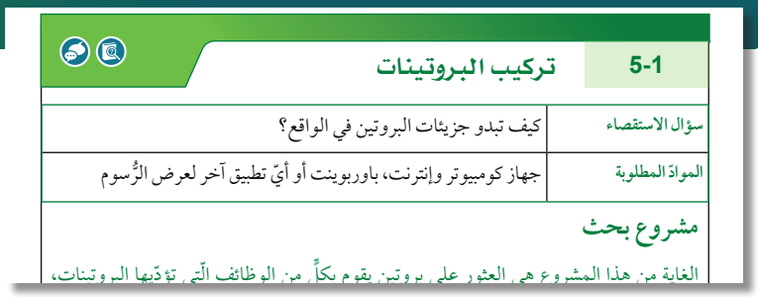
يعتبر أرسطو أبا علم الأحياء، وقد نشرت أعماله العظيمة «تاريخ الحيوانات» و«أجزاء الحيوانات» و«في كون الحيوان» حوالي عام 350 قبل الميلاد، لكنها مفقودة حاليا. ومن حسن الحظ أن تلك الكتب كانت ترجمت إلى العربية وحفظت بوساطة العلماء العرب بعد

الأحياء

الأنشطة ومراجعة التّقويم

الأنشطة

تدريب على العمل المخبريّ، ومشاريع بحثيّة، وأنشطة أخرى تضيف معنى للأفكار الجديدة، وتنمّي القدرة على التطبيق العمليّ.



5-1 تركيب البروتينات

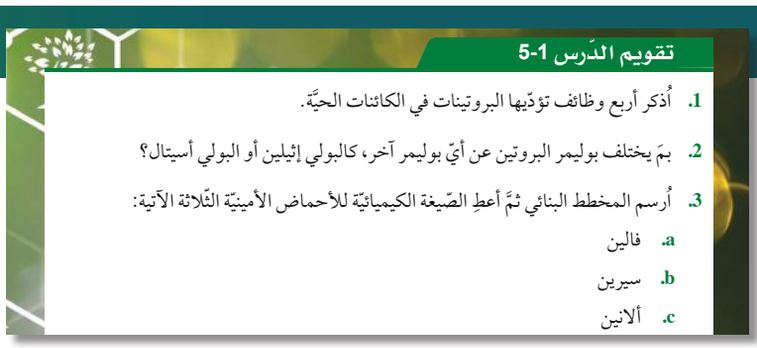
سؤال الاستقصاء	كيف تبدو جزيئات البروتين في الواقع؟
الموادّ المطلوبة	جهاز كومبيوتر وإنترنت، باوربوينت أو أيّ تطبيق آخر لعرض الرُّسوم

مشروع بحث

الغاية من هذا المشروع هي العثور على بروتين يقوم بكلٍّ من الوظائف الّتي تؤدّيها البروتينات،

تقويم الدّرس

يوجد في نهاية كلّ درس تقويم، يحتوي على أسئلة تغطّي مفاهيم الدّرس ومعلوماته.



تقويم الدّرس 5-1

1. أُذكر أربع وظائف تؤدّيها البروتينات في الكائنات الحيَّة.
2. بمَ يختلف بوليمر البروتين عن أيّ بوليمر آخر، كالبولي إثيلين أو البولي أسيتال؟
3. أُرسم المخطط البنائي ثمَّ أعطِ الصّيغة الكيميائيّة للأحماض الأمينيّة الثّلاثة الآتية:
   a. فالين
   b. سيرين
   c. ألانين

مراجعة الوحدة

ملخّص قصير في نهاية كلّ وحدة يوفّر مرجعًا سريعًا للأفكار الرّئيسة والمفردات.

الوحدة 1

مراجعة الوحدة

الدّرس 1-4: الليبيدات

- **الليبيدات lipids** مركّبات حيويّة تضم الدهون والزيوت والشموع والستيرويدات.
- تخزن النّباتات والحيوانات الطاقة في الدهون.
- **الجليسيريدات الثلاثية triglycerides** فئة مهمة من الدّهون وهي تتكوّن من **الجليسيرول glycerol** المرتبط بثلاث سلاسل من **الأحماض الدّهنية fatty acid** بواسطة **روابط أستر ester bonds**.
- تتكسر رابطة الأستر في خلال تفاعل **التحلُّل المائي hydrolysis**

تقويم الوحدة

لكلّ وحدة مجموعة من أسئلة الاختيار من متعدّد، وظيفتها التّحضير لاختبار معياريّ.

تقويم الوحدة

11. أي من الآتي يشمل الدّهون والشّموع والزّيوت والسّتيرويدات؟
    a. البروتين
    b. اللّيبيد
    c. الكربوهيدرات
    d. الأحماض النّوويّة
12. أي من الآتي يستخدم لتخزين الطّاقة، ويتركّب من الجليسيرول وثلاثة أحماض دهنيّة؟
    a. الجليسيريد الثّلاثيّ
    c. الفسفوليبيد

تقويم الوحدة

مسائل نوعيّة ذات إجابات قصيرة، توفّر ثلاثة مستويات من التّحدّي في نهاية كلّ وحدة.

تقويم الوحدة

49. أُرسم مخطّطًا لتفاعل التّكثيف بين جزيئين من الأحماض الأمينيّة. أُرسم الحمضين المتفاعلين والنّاتجين الجديدين. حوّط الذرّات الّتي تترك الجزيئين المتفاعلين لتشكّل الماء، وعيّن الرّابطة الببتيديّة في البوليمر المتشكّل حديثًا.
50. اذكر اختلافين وتشابهين بين اللّيبيدات والكربوهيدرات والبروتينات.
51. استخدم الإنترنت لزيارة قاعدة بيانات للجزيئات الحيويّة وأجب عن الأسئلة الآتية:
    a. ما قاعدة البيانات الّتي استخدمتها لأجل حفظ المعلومات؟

مخطّط المادّة

الوحدة 1

الكيمياء الحيويّة - الجزيئات الحيويّة

ممّ تتركّب الكائنات الحيّة؟ تحتوي الكائنات الحيّة إلى جانب الماء على البروتينات واللّيبيدات والكربوهيدرات.

الوحدة 2

تركيب الخليّة ووظيفتها - الأغشية والنّقل

كيف تعمل الخلايا؟ تأخذ كلّ خلية الموادّ الغذائيّة، وتحفظ اتّزان الماء، وتطرد الفضلات عبر الغشاء الخلويّ.

الوحدة 3

تركيب الخلية ووظيفتها: الإنزيمات

كيف تجري التفاعلات الكيميائية في الكائنات الحيّة؟ تستخدم الكائنات الحيّة محفّزات خاصة تسمى الإنزيمات. تتأثّر الإنزيمات بعوامل خارجية مختلفة، كدرجة الحرارة والرقم الهيدروجيني.

الوحدة 4

الكيمياء الحيوية: التَّنفّس الخلويّ

كيف تستخرج الكائنات الحيّة الطاقة من الغذاء؟ أين تخزّن تلك الطاقة في الخلايا؟ تخزّن الميتوكندريا طاقة الغذاء في جزيء ATP. يجري إنتاج ATP خلال التنفّس الخلوي. التنفّس يمكن أن يكون هوائيًا أو لا هوائيًا.

الأحياء

الصّفّ 11

الفصل الدّراسي 1

جدول المحتويات

الوحدة 1

الكيمياء الحيويّة - الجزيئات الحيويّة 2

الدّرس 1-1 كيمياء الحياة 4

الدّرس 1-2 الماء 10

الدّرس 1-3 الكربوهيدرات 18

الدّرس 1-4 اللّيبيدات 27

الدّرس 1-5 البروتينات والأحماض الأمينيّة 35

الوحدة 2

تركيب الخليّة ووظيفتها - الأغشية والنّقل 60

الدّرس 2-1 الأغشية البلازميّة 62

الدّرس 2-2 النّقل السّلبيّ والنّقل النّشط 74

الدّرس 2-3 التّنظيم الأسموزيّ في خلايا النّباتات والحيوانات 90

الوحدة 3

تركيب الخلية ووظيفتها: الإنزيمات 108

الدّرس 3-1 خصائص الإنزيمات وآلية عملها 110

الدّرس 3-2 نشاط الإنزيمات والعوامل المُؤثِّرة فيه 120

الوحدة 4

الكيمياء الحيوية: التَّنفّس الخلويّ 136

الدّرس 4-1 ATP: عُملة الطاقة 138

الدّرس 4-2 الميتوكندريا وأصولها 144

الدّرس 4-3 التّنفّس الهوائيّ 149

الدّرس 4-4 التّنفّس اللاهوائيّ 163

B1101
B1102
B1103
B1104

الوحدة 1

الكيمياء الحيويّة - الجزيئات الحيويّة

Biochemistry - Biological Molecules

في هذه الوحدة

الدّرس 1-1 : كيمياء الحياة

الدّرس 1-2 : الماء

الدّرس 1-3 : الكربوهيدرات

الدّرس 1-4 : اللّيبيدات

الدّرس 1-5 : البروتينات والأحماض الأمينيّة

الوحدة 1

مقدّمة الوحدة

من خصائص كلّ أشكال الحياة أنّه يجب تبادل الطّاقة والمادة مع البيئة الخارجيّة. فالحيوانات تأكل، والنّباتات تأخذ ضوء الشّمس والماء والمعادن. من دون تغذية من البيئة لن تستطيع النّباتات ولا الحيوانات البقاء حيّة لوقت طويل.

يكمن الفارق الرّئيس بين كيمياء الكائنات الحيّة وكيمياء الأنظمة غير الحيّة في تعقيد الجزيئات والتّفاعلات.

تبدأ هذه الوحدة بكيمياء الكربون والبوليمرات العضويّة الّتي تشكّل الجزيئات الحيويّة العملاقة. ولاحقًا نستكشف كيمياء الماء، ثمّ نصِف الفئات الثّلاث الأكثر أهمّيّة للجزيئات الحيويّة.

1. الكربوهيدرات هي الجزيئات الأساسيّة لنقل الطّاقة الكيميائيّة.
2. اللّيبيدات هي جزيئات تخزين الطّاقة والتّركيب الخلويّ.
3. تشكّل البروتينات الوحدات البنائيّة للكائنات الحيّة.

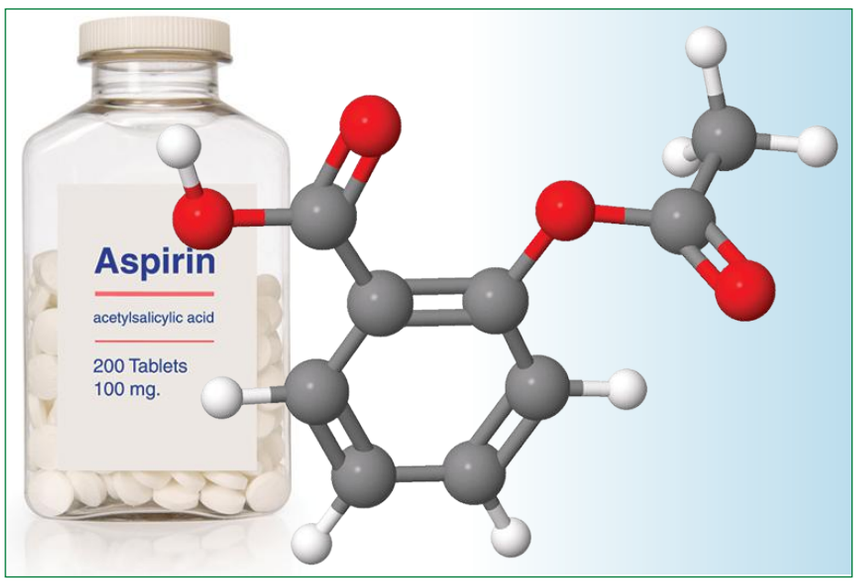
الأنشطة والتّجارب

1-1 تفاعلات البلمرة
2-1 الخاصّيّة الشّعريّة
3-1 الكربوهيدرات
4-1 الكيمياء الحيويّة للطّعام
5-1 تركيب البروتينات

الدّرس 1-1

كيمياء الحياة

The Chemistry of Life



منذ 2000 عام قبل الميلاد، لاحظ بعض حكماء بلاد سومر الواقعة جنوب العراق حاليًّا، أنَّ مضغ لحاء الصّفصاف أو شربه مغليًّا قد يخفّفان الألم. وكان هذا قبل نحو 4000 سنة من عزل المركَّب الكيميائيّ، حمض الأستيل ساليسيليك acetyl-salicylic acid، عن لحاء الصّفصاف. وأصبح هذا المركّب يُعرف، فيما بعد، بالأسبيرين Aspirin، الّذي ربما اضطررنا إلى تناوله مرّة أو أكثر في حياتنا. ويستند عمل الأسبيرين aspirin إلى حمض الساليسيليك salicylic acid الّذي يعيق قدرة الجسم على بناء مادّة البروستاغلاندين prostaglandin. يُطلَق البروستاغلاندين من الخلايا المصابة، ويحفّز الجسم على إرسال السّوائل إلى مكان الإصابة فيؤدي إلى التّورّم. ويشعر الإنسان بالألم عندما ينتقل البروستاغلاندين إلى المستقبلات في دماغك، وكلّما كان البروستاغلاندين منخفضًا قَلَّ الإحساس بالألم.

مخرجات التّعلُّم

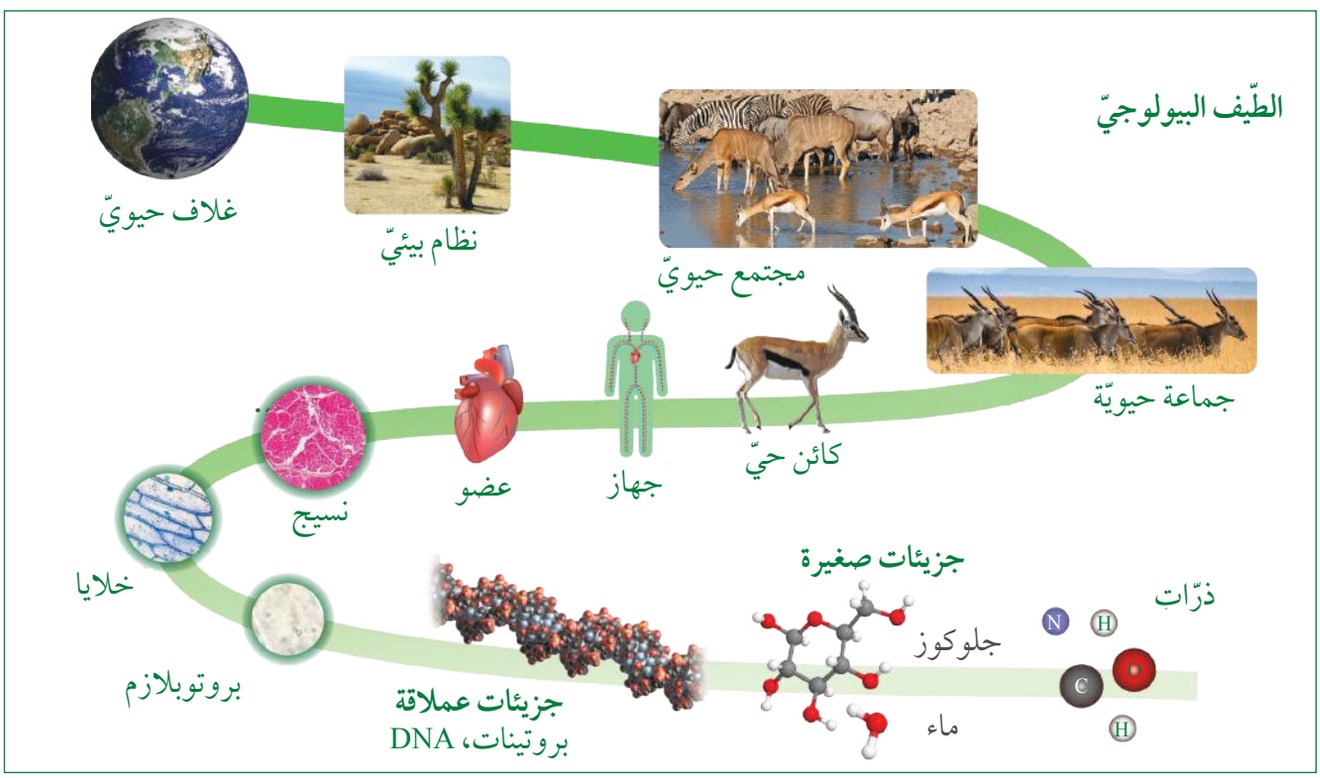
B1102.1 يعرّف المصطلحات: المونومر، والبوليمر، والجزيئات العملاقة، وَيتعرّف إلى تفاعلات التّكثيف والتّحلُّل المائيّ ويعرّفها.

المفردات

hydrolysis	التحلل المائي
Macromolecule	الجزيء العملاق
Biological Spectrum	الطَّيف البيولوجيّ
Organic Chemistry	الكيمياء العضويّة
Hydrocarbon	الهيدروكربون
Polymer	البوليمر
Monomer	المونومر
Polymerization	البلمرة
Condensation Polymerization	بلمرة التّكثيف

كيف تتناسب الكيمياء مع الحياة؟

ما الفارق بين كيمياء الحياة وكيمياء الموادّ غير الحيّة؟ تُبنى الكيمياء كلّها، حيّة كانت أم غير حيّة، على المبادئ نفسها وعلى العناصر نفسها، والفارق بينهما هو في مستوى التّعقيد. فالجزيئات غير الحيّة عادةً ما تكون صغيرةً وتدخل في تفاعلاتٍ بسيطةٍ، بينما تتكوّن الكائنات الحيّة من **جزيئات عملاقة Macromolecules** معقّدة جدًّا، مكوّنة من آلاف الذّرّات أو عشرات الآلاف منها. وتشكّل هذه الجزيئات العملاقة الدّعامة الأوليّة للكيمياء المعقّدة للحياة.



شكل 1-1 الطّيف البيولوجيّ طريقةٌ لتنظيم مستويات التّعقيد من المادّة غير الحيّة للغلاف الحيويّ.

نستطيع فهم الحياة، على مستويات مختلفة، عبر **الطّيف البيولوجيّ Biological spectrum**، كما هو مُبيَّنٌ في **الشّكل 1-1**، حيث يبدأ المستوى الأوّل بذرّات منفردة تنتظم في جزيئات صغيرة، كالماء أو الجلوكوز. وهذه الجزيئات ليست حيّةً، لكنّها تشكّل الأساس الّذي تُبنى عليه الحياة. وأمّا المستوى التّالي، فهو الجزيئات العملاقة، كالبروتينات والحمض النّوويّ الرّيبوزي منقوص الأكسجين(DNA). فالبروتينات والحمض النّوويّ(DNA) جزيئات ضخمة مقارنةً بجزيئات الماء، وتقوم بتفاعلات معقّدة مع غيرها من الجزيئات العملاقة في الأنظمة الحيّة.

إنّ الكيمياء الّتي تدخل فيها الجزيئات العملاقة المعقّدة كالبروتينات والحمض النّوويّ(DNA) هي الأساس للعمليّات الحيوية في الأنظمة الحيّة

تكون المادّة «حيّة» على مستوى الخلايا. فالبروتوبلازم Protoplasm يحتوي على مئات الجزيئات العملاقة الّتي تتفاعل فيما بينها، وتنظم الخلايا التّفاعلات في تراكيب تؤدّي عمليّات الحياة، مثل تنظيم الطّاقة والتّكاثر.

الكربون، والهيدروجين، والأكسجين، والنّيتروجين

يتكوّن نحو 96% من كتلة أيِّ نبات أو حيوان من أربعة عناصر فقط، هي: الهيدروجين (H) والكربون (C) والأكسجين (O) والنّيتروجين (N). وتكوّن هذه العناصر الأربعة الّتي تُختصر أحيانًا بعبارة CHON، معظم الجزيئات الحيويّة، بدءًا من أغشية الخلايا إلى (DNA). وإضافة إلى العناصر المذكورة، يوجد عدد قليل، من العناصر الأخرى، ذو أهمّيّةٍ كبيرة (**الجدول 1-1**)؛ فالكالسيوم يمنح القوّة لعظامك، والحديد يسمح لخلايا الدَّم الحمراء بأن تؤدّي وظيفتها.

الجدول 1-1 العناصر الخمسة عشر الأكثر توافرًا في جسم الإنسان.

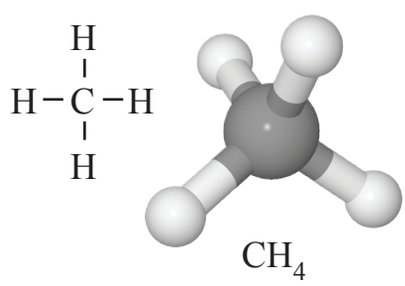
العنصر	% من الكتلة	العنصر	% من الكتلة	العنصر	% من الكتلة
الأكسجين	61 %	الفوسفور	1.1 %	المغنيسيوم	0.027 %
الكربون	23 %	الكبريت	0.20 %	السّيليكون	0.026 %
الهيدروجين	10 %	البوتاسيوم	0.20 %	الحديد	0.0060 %
النّيتروجين	2.6 %	الصّوديوم	0.14 %	الفلور	0.0037 %
الكالسيوم	1.4 %	الكلور	0.12 %	الزّنك	0.0033 %

تتّحد معظم العناصر الموجودة في الكائنات الحيّة لتشكّل مركّبات، كالماء الّذي يشكّل 60% من جسم الإنسان. وتدلّنا الصّيغة الكيميائيّة H_2O على أنَّ الماء مركّب من الهيدروجين والأكسجين بنسبة ذرَّتي هيدروجين إلى ذرَّة أكسجين واحدة.

للكربون فرعه الخاصّ في علم الكيمياء، يسمّى بـ **الكيمياء العضويّة Organic chemistry**. وتعني كلمة «عضويّ» في الكيمياء «من الكربون»، أو «يَحتوي على الكربون»، ولا تشير فقط إلى الكائنات الحيّة. فالجزيئات الحيويّة كلّها عضويّة، لكنّ الجزيئات العضويّة ليست كلّها جزيئات حيويّة.

الكيمياء العضوية هي كيمياء الكربون ومركّباته.

إنَّ أبسط مثال على المركّبات العضويَّة هو المركّبات المكوَّنة من الكربون والهيدروجين، وتُسمّى **الهيدروكربونات Hydrocarbons**. وتشكّل الهيدروكربونات أساس مصادر الطّاقة في العالم، فالغاز الطّبيعيّ هو الميثان (CH_4) الّذي تتكوَّن جزيئاته من ذرّة كربون واحدة مرتبطة بأربع ذرّات من الهيدروجين (**الشكل 1-2**). ويحترق الميثان بوجود الأكسجين، ومثله معظم الهيدروكربونات الأخرى، لإطلاق الطّاقة وماء وثاني اكسيد الكربون.



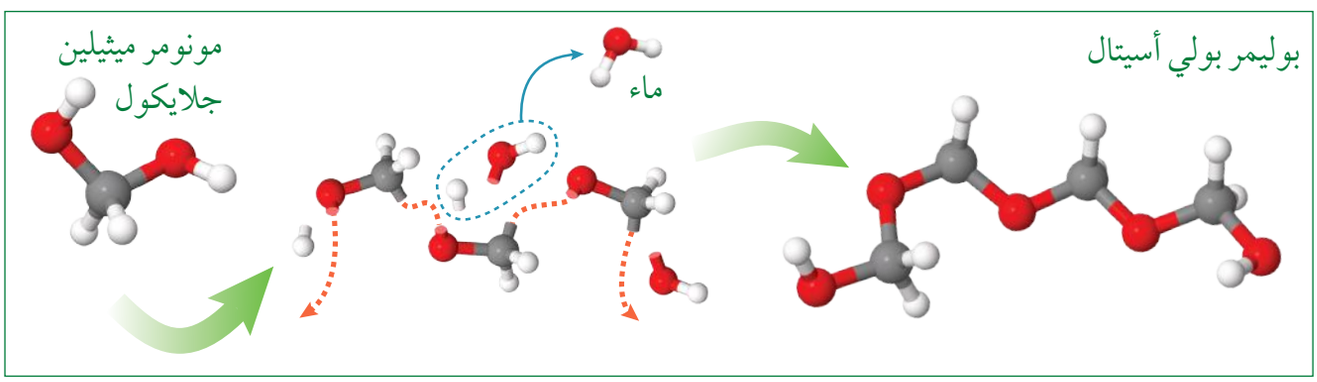
شكل 1-2 الميثان مركّب كربونيّ بسيط.

البوليمرات

تتميّز الأشكال المعقّدة عادة بوجود أنماط تتكرّر فيها تساعدنا على فهم تعقيدها. وأما ما يتعلّق بالجزيئات العملاقة، فيتمثّل النّظام الأساسيّ في كونها سلاسل من وحدات متكرّرة يرتبط بعضها ببعض لتشكّل **بوليمر Polymer**. والبوليمر جزيء ضخم أو عملاق مكوَّن من عدد كبير من الوحدات البنائيَّة الصَّغيرة الَّتي تسمّى **المونومرات Monomers**. فالبوليمر هو إذاً سلسلة من المونومرات المرتبط بعضها ببعض بروابط كيميائيّة عن طريق عملية تسمى **البلمرة polymerization**.

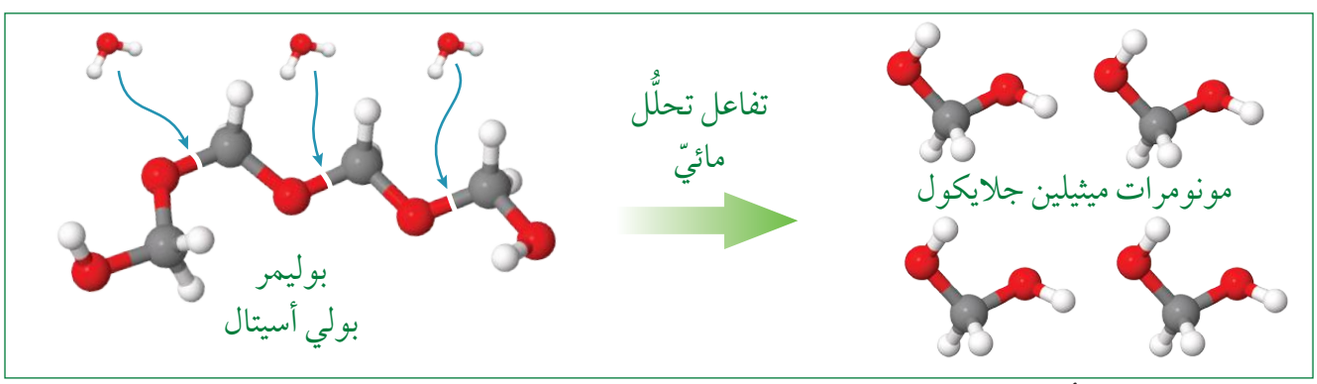
البوليمر جزيء من سلسلة طويلة، مكوّن من الوحدات المتكرّرة الَّتي تُسمّى المونومرات.

تتكوّن بوليمرات كثيرة بواسطة **بلمرة التكثيف condensation** (**الشّكل 1-3**)، حيث يتم إزالة جزيء الماء عند تكوّن كل رابطة بين المونومرات. البولي أسيتال polyacetal بوليمر، وهو مادة بلاستيكية قوية تستخدم في صناعة سحابات الألبسة والأدوات الطبيّة والصمامات. يتكوّن البولي أسيتال من الميثيلين جلايكول بالتكثيف.



شكل 1-3 مثال على بلمرة التّكثيف.

العمليّة المعاكسة للتّكثيف هي **التحلُّل المائي hydrolysis**، حيث يتكسّر البوليمر من خلال إضافة جزيئات الماء. يبيِّن **الشّكل 1-4** كيف يعمل التحلُّل المائي على البولي أسيتال. تتكسّر الثّلاث روابط لتحوّل البوليمر إلى أربع مونومرات أحادية الكربون منفصلة.



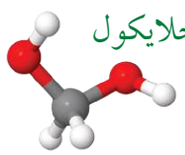
شكل 1-4 يفكّك التحلُّل المائيّ البوليمر عند الرّابطة بين المونومرات المتجاورة.

استقصاء

1-1 تفاعلات البلمرة

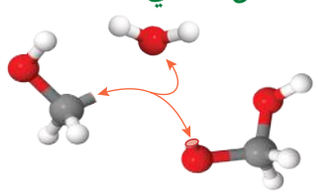
سؤال الاستقصاء	ما هو تفاعل البلمرة؟
الموادّ المطلوبة	مجموعة من نماذج جزيئات

بلمرة التّكثيف

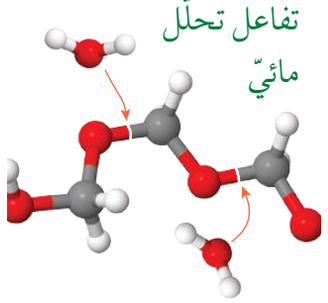

ميثيلين جلايكول

1. بالتعاون مع زملائك في المجموعة، اِبنِ 5 – 4 جزيئات من الميثيلين جلايكول.
2. ابنِ نموذج بولي أسيتال بواسطة تمثيل تفاعل بلمرة التّكثيف.
3. مثّل تفاعل التحلُّل المائيّ عن طريق تكسير البولي أسيتال إلى مونومرات ميثيلين جلايكول. اضف جزيء ماء عند موقع كل رابطة.

تفاعل تكثيفي



تفاعل تحلُّل مائيّ



صمِّم بوليمرًا

1. بالتعاون مع زملائك في المجموعة، صمم جزيء يمكن أن يصير بوليمرًا. علماً أن ميزة الجزيء الأساسيّة هي أن يكون له موقعا ربط لوصل المونومر السّابق بالمونومر اللّاحق.
2. ابحث في البوليمر الَّذي ابتكرته؛ هل هو مركَّب حقيقيّ؟ هل هو موجود في الطَّبيعة؟ وهل يُستخدَم في التّكنولوجيا البشريّة؟

أسئلة

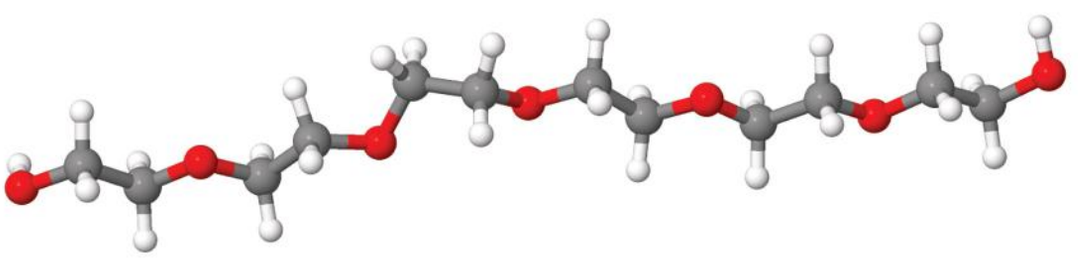
a. صِفْ بوليمرَين، وابحث في تركيبهما، وحدِّد المركّب المونومر في كلٍّ منهما.

b. ليست البوليمرات كلّها سلاسل مستقيمة، فبعضها يمتدّ منه فرع أو أكثر. هل يؤثِّر التّفرّع في خصائص المادّة؟

c. ابحث عن التّفرّع في البولي إيثيلين وعن تأثيره في خصائص البلاستيك.

تقويم الدّرس 1-1

1. ما العناصر الأربعة الّتي تكوّن معظم كتلة الكائنات الحيّة؟
2. هل الكائنات الحيّة هي دائمًا مصدر المركّبات العضويّة؟ وضّح السّبب.
3. اذكر أربعة مركّبات من الهيدروكربونات مع صيغها الكيميائيّة، واذكر، على الأقلّ، تطبيقًا واحدًا لكلٍّ منها. قد يتطلّب هذا الأمر بعض البحث.
4. أيٌّ مما يأتي يتناسب مع تعريف المونومر؟
   a. جزيء يتكوّن من سلسلة منفردة من ذرّات الكربون
   b. جزيء من ذرّة كربون واحدة
   c. الوحدة المتكرّرة في جزيء على شكل سلسلة
   d. جزيء على شكل سلسلة طويلة مكوّنة من وحدات متكرّرة
5. البوليمر في النّموذج الآتي تشكَّلَ بواسطة بلمرة التّكثيف. أَعطِ الصّيغة الجزيئيّة والصيغة البنائية للمونومر الّذي تشكل منه هذا البوليمر.



6. أيٌّ من العبارات الآتية توضِّح أهمّيّة الكربون في كيمياء الكائنات الحيّة؟
   a. الكربون أخفّ عنصر، يمكنه أن يشكّل أربع روابط كيميائيّة.
   b. الكيمياء العضويّة هي كيمياء مركّبات الكربون.
   c. الهيدروكربونات، كالبيوتان والأوكتان octane موادّ وقود مهمّة.
   d. مركّبات الكربون مصدر فعّال للطّاقة الكيميائيّة.
7. كيف يمكن لجسمك أن يتكوّن معظمه من الأكسجين المتواجِد في الهواء على شكل غاز؟ وضّح ذلك بجملة أو جملتين.

الدّرس 1-2
الماء
Water

المحيطات هي الحاضنة الأولى لجميع الكائنات الحيّة على كوكبنا، لأنَّ الماء مادّة كيميائيّة أساسيّة للحياة، وهو سائل على نطاق واسع ضمن مقياس 100 درجة الحرارة المئويّة °C(100 - 0). جزيئات الماء قطبيّة، يمكنها أن تذيب العديد من مختلف الموادّ الكيميائيّة القطبيَّة polar. تبيّن الأدلّة الجيولوجيّة أنّ الحياة على الأرض بدأت منذ مئات ملايين السّنين، وذلك بعد انخفاض حرارة سطح الكوكب حتّى أصبح قادرًا على حفظ الماء السّائل. والسّتروماتولايتات stromatolites هي بقايا أحفوريّة طَرَحَتْها كائنات قديمة أحاديّة الخليّة، وهي من نوع البكتيريا الخضراء المزرقّة. وعلى الرّغم أنّها قد تكون انقرضَتْ، فقد بقيت بعض السّتروماتولايتات تعيشُ، حتّى يومنا هذا، في أماكن نائية، مثال خليج القرش في غرب أستراليا.

ستروماتولايتات معاصرة في خليج القروش، أستراليا

ستروماتولايتات أحفوريّة

مخرجات التّعلُّم

B1101.1 يصف كيمياء الماء ويوضِّح أثرها في خصائص الماء.

B1101.2 يربط خصائص الماء بادواره في حياة الكائنات الحية.

المفردات

Solution	المحلول
Solvent	المذيب
Solute	المذاب
Solubility	الذائبيّة
Intermolecular force	القوّة بين الجزيئات
Polar	قطبيّ
Hydrogen bond	الرّابطة الهيدروجينيّة
Cohesion	التّماسك
Adhesion	التلاصق
Surface tension	التّوتُّر السّطحيّ
Capillary action	الخاصّيَّة الشّعريّة
pH scale	الرقم الهيدروجيني
Acid	الحمض
Base	القاعدة

الماء

سؤال للمناقشة

لماذا تحتاج الكائنات الحيّة جميعُها إلى ماء؟

شكل 1-5 تغطي المياه 71% من سطح الأرض.

جميعُ الكائنات الحيّة المعروفة تعتمد على الماء للبقاء على قيد الحياة، ويشكّل الماء، على الأقلّ، 50% من كتلتها. ويعتقد أنّ وجود الماء السّائل هو أفضل مؤشّر إلى أنّ الكوكب يمكن أن يدعم الحياة (**الشكل 1-5**). المنطقة الصّالحة للحياة في النّظام الشّمسيّ هي المنطقة التي يكون الكوكب ضمنها دافئًا بما يكفي للمحافظة على الماء سائلًا على سطحه.

جميع الكائنات الحيّة تحتاج إلى الماء لتكون حيّة.

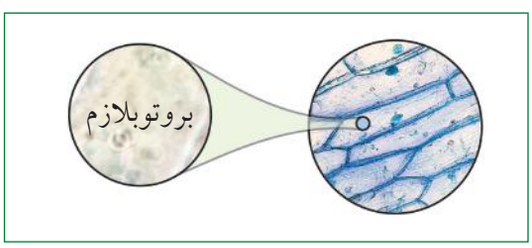
تحدث التّفاعلات الكيميائيّة داخل أجسام الكائنات الحيّة في وسط مائي لسببَيْن:

1. تحدث التّفاعلات الكيميائيّة عندما يصطدم جزَيْئان بعضهما ببعض بزاوية صحيحة وبالطّاقة المناسبة. وهذا لا يمكن أن يحدث إلّا إذا كانت الجزيئات قادرة على أن تتحرّك، كما هي الحال عندما تذوب في الماء.
2. يجب توفر كمية من الطاقة كافية لتكسير الروابط الكيميائية القديمة ليعاد تكوين روابط جديدة.

يحتوي **المحلول Solution** على **مذيب Solvent**، قد يكون الماء، وواحد أو أكثر من الموّادّ المذابَة. **والمذاب Solute** هو مادّة كيميائيّة مذابَة في المحلول. ويمكن للمحاليل أن تتكوّن من أكثر من مذاب، ولكن يوجد مذيب واحد فقط قادر على تذويب الموادّ المذابَة كلّها. يُعَدُّ الماء المذيب الأكثر أهمّيّة في علم الأحياء.

تحدث التّفاعلات الكيميائيّة في المحلول لأنَّ الجزيئات الذّائبة قادرةٌ على التّحرُّك وملامسة بعضها بعضًا.

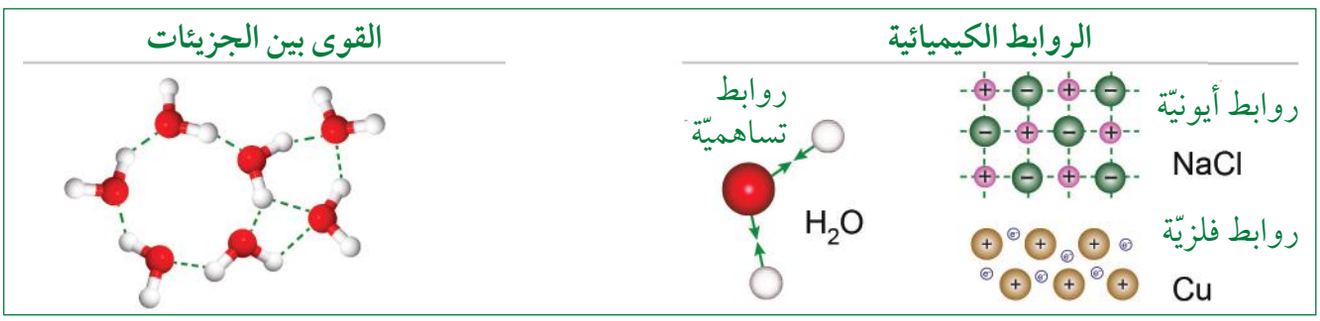
توفّر المحاليل إمكانية للمركّبات لكي تتفاعل معًا (**الشّكل 1-6**) كما توفّر المحاليل المائيّة درجة حرارة ثابتة مع طاقة كافية لحصول التّفاعلات الكيميائيّة. لذا تتواجد المحاليل داخل خلايا الكائنات الحية سواء كانت هذه الكائنات وحيدة الخلية، يتكوّن جسمها من خلية صغيرة مفردة، أو حتى كائنات كبيرة الحجم كالحوت الأزرق.



شكل 1-6 البروتوبلازم في كلّ خليّة يتضمّن محلولًا من آلاف المذابات، بما في ذلك الجلوكوز والأيونات والبروتينات والأحماض الأمينيّة، ومواد مذابة أخرى.

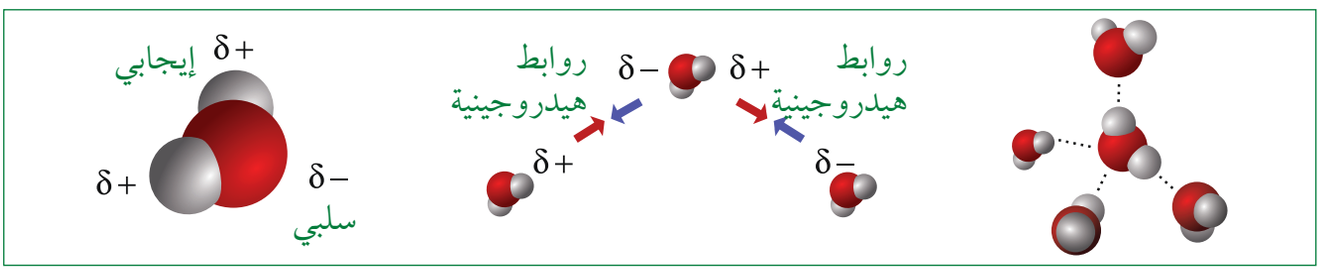
القوى بين الجزيئات والرّابطة الهيدروجينيّة

يمكن أن تكون المادّة صلبة، سائلة، أو غازيّة، عند درجة حرارة معيّنة، اعتمادًا على **القوى بين الجزيئات Intermolecular forces** الّتي تجذب الجزيئات المجاورة. المركّبات الأيونيّة والفلزات صلبة في درجة حرارة الغرفة، لأنّ جسيمات المادّة تتجمّع معًا بواسطة روابط كيميائيّة (**الشّكل 1-7**). والماء سائل في درجة حرارة الغرفة، لأنّ جزيئات الماء تنجذب بعضها إلى بعض من خلال القوى بين الجزيئات الّتي تكون أضعف من الرّوابط الكيميائيّة.



شكل 1-7 تعمل كلّ من الرّوابط الكيميائيّة والقوى بين الجزيئات على الإمساك بجزيئات المادّة معًا؛ الرّوابط الكيميائيّة أقوى.

إنّ جزيء الماء **قطبيّ Polar** لأنّ هناك فرقًا غير متماثل للشّحنة الموجبة والسّالبة. تجذب جزيئات الماء بعضها بعضًا من خلال **روابط هيدروجينية Hydrogen bond**. فالرّابطة الهيدروجينيّة هي عامل الجذب بين الشّحنة الموجبة الجزئيّة على الهيدروجين والشّحنة السّالبة الجزئيّة على الأكسجين أو عناصر أخرى (**الشّكل 1-8**). ويستطيع الجزيء الواحد من الماء تشكيل أربع روابط هيدروجينية.



شكل 1-8 الرّابطة الهيدروجينيّة بين جزيئات الماء. والرّوابط الهيدروجينيّة أضعف من الرّوابط الكيميائيّة، لكنّها أقوى بكثير من القوى بين الجزيئات.

الرّابطة الهيدروجينيّة هي عامل جذب إلكتروستاتيّ electrostatic attraction قويّ بين الهيدروجين والجزيئات القطبيّة المجاوِرة.

تُسمّى قوّة الجذب النّاتجة بين جزيئات الماء **التّماسك Cohesion**. والتّماسك يُمكّن جزيئات الماء من الترابط ببعضها، والصّعود إلى الأعلى في الأنابيب الدّقيقة. كما أنّه السّبب الكامن وراء تجمّع قطرات الماء في كرات، وهو، أيضًا، السّبب الّذي يجعل كائنًا صغيرًا أكثر كثافة من الماء يطفو على سطح الماء في كثير من الأحيان (**الشّكل 1-9**).

شكل 1-9 يجمّع التّماسك قطرات الماء في كرات.

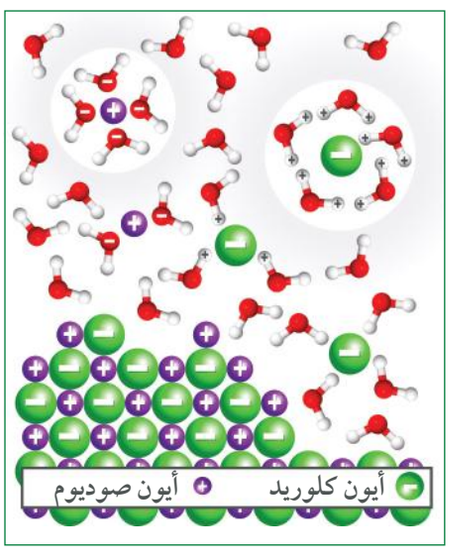
الماء مذيب عامّ للحياة

يمتاز الماء بقدرته العالية على إذابة العديد من الموادّ. فهو يذيب معظم الأملاح والكثير من الحموض والقواعد، بالإضافة لقدرته على إذابة العديد من المواد الأكبر حجماً كالسّكّريات وبعض البروتينات.

هذه القدرة الهائلة جعلت العديد من العلماء يصفون الماء على أنه مذيب عامّ، على الرّغم من أنّ هنالك موادّ أخرى لا تذوب في الماء كالزيوت والدهون والعظام والزجاج. لذلك فمن المناسب وصف الماء بأنه مذيب شبه عامّ (شبه عالميّ).

ويعتبر الماء مذيب شبه عالميّ لعدّة أسباب كيميائيّة. إلّا أنّ عمليّة الذّوبان تعني فصل جزيئات المذاب وتفريقها في المذيب، وبمجرّد فصلها، على الجزيئات الذّائبة أن تبقى مذابَة وألّا تتجمّع مرّةً أخرى.

1. جزيئات الماء صغيرة وتتحرّك بسرعة في درجات الحرارة العاديّة، وتقصف أيّ مادّة غير محلولة، وتحرّر جزيئات المذاب.



شكل 1-10 كيف يذيب الماء الأيونات.

2. جزيئات الماء قطبيّة للغاية، والجاذبيّة الكهروستاتيكيّة تساعد على تكسير جزيئات المذاب الفضفاضة عند الذّوبان. وبمجرّد إذابتها، فإنَّ قطبيّة جزيئات الماء تمكّنه من الإحاطة بجزيئات المذاب القطبيّة (**الشّكل 1-10**).

تَصِف **الذائبية Solubility** الحدّ الأقصى لكمّيّة المذاب الّتي يمكن أن تذوب في المذيب عند درجة حرارة معيّنة. يوضّح **الجدول 1-2** أنّ الذائبية تتراوح بين منخفضة للغاية (الأكسجين) إلى أكثر من كمّيّة المذيب (السّكّروز). لاحظ أنّ الأكسجين المذاب هو ما يحافظ على الأسماك، حتّى عند التّركيز المنخفض 0.00091 g/ 100 mL.

الجدول 1-2 ذائبيّة مركّبات مختارة في الماء عند درجة حرارة 25°C.

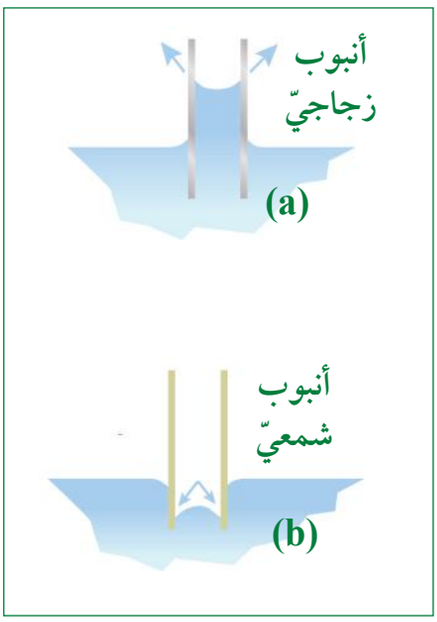
المركّب	الصّيغة	الذائبية mL 100/g	المركّب	الصّيغة	الذائبية mL 100/g
هيدروكسيد الكالسيوم	$Ca(OH)_2$	0.017	ملح	NaCl	36.0
كلوريد البوتاسيوم	KCl	34.2	ثاني أكسيد الكربون	CO_2	0.17
بيكربونات الصّوديوم	$NaHCO_3$	9.6	جلوكوز	$C_6H_{12}O_6$	81.0
أكسجين	O_2	0.00091	سكّروز	$C_{12}H_{22}O_{11}$	230.9

التّوتّر السّطحيّ

شكل 1-11 التوتر السطحي يشكّل القطرات.

تتجاذب جزيئات الماء السائل فيما بينها بفعل الروابط الهيدروجينية، بحيث تتأثر جزيئات الماء الموجودة داخل السائل بقوى شدّ من كل الاتجاهات، فيلغى كل منها الآخر. أما جزيئات الماء على السطح، فتتأثر بالقوى من الأسفل والجوانب، مما يجعل سطح الماء مشدوداً للأسفل، فيظهر على هيئة غشاء متماسك. تعرف هذه الظاهرة باسم **التوتّر السطحيّ Surface tension**.تفسر ظاهرة التوتر السطحي العديد من المشاهدات اليومية مثل، قدرة بعض الحشرات الصغيرة من السير على سطح الماء واتخاذ قطرات الماء شكلاً كروياً (شكل **11-1**).

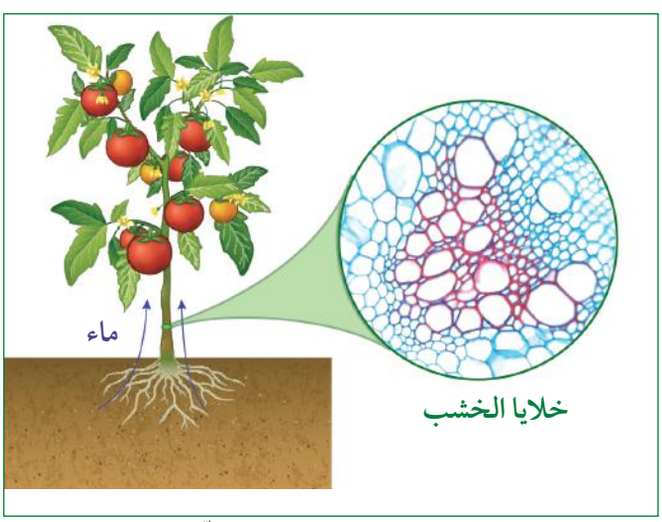
إذا وضعت أحد طرفي أنبوب مفتوح ذي قطر صغير في الماء، فإنّ الماء يرتفع داخل الأنبوب ضدّ الجاذبيّة. وتُسمّى هذه الظّاهرة **الخاصّيّة الشّعريّة Capillary action**، ويسبّبها، جزئيًّا، التّوتّر السّطحيّ.



شكل 1-12 (a) يجعل الالتصاق بسبب الروابط الهيدروجينية الماء يرتفع في الأنبوب الزّجاجيّ الرّفيع. **(b)** التّنافر يجعل الماء في أنبوب من الشّمع ينفر.

تجذب الرّوابط الهيدروجينيّة جزيئات الماء إلى أنواع معيّنة من الأسطح مثال الزّجاج. يميل الماء الملامس للزّجاج إلى الانسياب على طول سطحه، وتسمّى هذه الخاصّيّة **التلاصق Adhesion**. ونظرًا إلى أنّ الماء يمتلك توتّر سطحيّ عالٍ، فإنّ قوة الالتصاق تسحب عمود الماء بأكمله بدلًا من كسر السّطح (**الشّكل a12-1**) أمّا الأنبوب المصنوع من الشمع فهو يتصرّف بطريقة مختلفة لأنّ جزيئات الشّمع لاقطبيّة. تنجذب جزيئات الماء القطبيّة بعضها إلى بعض أكثر ممّا تنجذب إلى جزيئات الشّمع اللّاقطبيّة، ولهذا يضغط الأنبوب الرّفيع سطح الماء إلى الخارج (**الشّكل b12-1**).

إنّ ارتفاع التوتّر السّطحيّ للماء يؤدّي دورًا رئيسًا في انتقال الماء في النّباتات. تمتصّ النّباتات الماء من التربة عبر الجذور وتشكّل خلايا خاصّة في خشب النّباتات xylem أنابيبَ ضيّقةً تربط الجذور بأجزاء النّباتات كلّها. تسحب الخاصّيّة الشّعريّة الماء مع الموادّ الغذائيّة الذّائبة من الجذور عبر الخشب، إلى جميع أجزاء النّباتات إلى مسافة معينة (**شكل 1-13**). وتساعد عملية النتح من الاوراق على سحب الماء للاعلى عبر اوعية الخشب لارتفاعات عالية.



شكل 1-13 التّوتّر السّطحيّ والخاصّيّة الشّعريّة يسحبان الماء من جذور النّبات إلى السّاق عبر الخشب.

2-1 الخاصّيّة الشّعريّة

سؤال الاستقصاء	كيف تنقل النّباتات الماء؟
الموادّ المطلوبة	ملوِّن طعام أحمر وأزرق وأصفر، 5 أكواب بلاستيكيّة شفّافة، 4 مناشف ورقيّة، ماء، كرفس طازج، 5 أكواب ماء أو دوارق، كاميرا ، هاتف محمول.

الخطوات للجزء الأول

1. جهّز التّرتيب الظّاهِر في الصّورة مستخدمًا خمسة أكواب بلاستيكيّة أو دوارق شفّافة، ثلاثة منها بها ماء ملوَّن.
2. اِصنع أربعة «جسور» من المناشف الورقيّة المطويّة.
3. ضع الجسور، وقم بإعداد الكاميرا في وضع الحركة البطيئة لأخذ إطار واحد (صورة) كلّ خمس ثوانٍ.
4. دع التّجربة تجري لمدّة ساعتَيْن واحفظ الفيديو.

الأسئلة

a. صف ما حصل بعد ساعة واحدة ثمّ بعد ساعتين.
b. أعطِ تفسيرًا لما حصل للماء، موضّحًا سبب حصوله.
c. وضح صلة هذه التجربة بحركة الماء في النّباتات.

الخطوات الجزء الثّاني

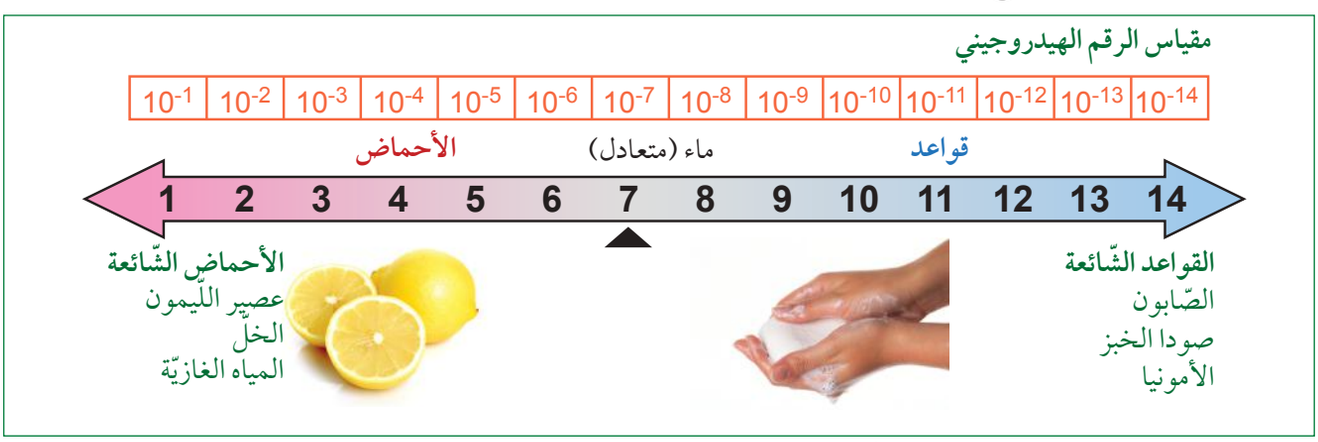
1. اقطع بضعة سيقان من الكرفس بسكّين حادّ. ضع سيقان الكرفس الطّازجة في أكواب الماء الملوَّن؛ كما يمكن استخدام الأزهار النضرة.
2. قمْ بإعداد كاميرا في وضع الحركة البطيئة لأخذ إطار واحد (صورة) كلّ خمس دقائق، وذلك لمدّة 24 ساعة، وقد تستغرق ملاحظة النّتائج وقتًا طويلًا.

الأحماض والقواعد

لا يتكوّن الماء النّقيّ تمامًا من جزيئات H_2O فقط. فنحوَ جزيء واحد من كلّ 550 مليون جزيء ماء ينفصل إلى أيون هيدروجين (H^+) وأيون هيدروكسيد (OH^-) (H_2O ---> $H^+ + OH^-$). يبلغ تركيز H^+ في الماء النقيّ 10^{-7}mol/L وعند أخذ 10^{-7} log- فإنّ القيمة تصبح 7. وعلى مقياس **الرقم الهيدروجيني pH scale** تعتبر هذه القيمة متعادلة، ويعرّف بأنه يحتوي على كميتين متساويتين من H^+ و OH^- (**الشكل 1-14**).

أبسط تعريف **للحمض (acid)** هو أنّه مركّب يذوب في الماء ليصنع محلولًا يحتوي على أيونات H^+ أكثر من الماء النّقيّ. تحتوي معدتك على حمض الهيدروكلوريك (HCl) الّذي يتفكّك في الماء إلى أيونات H^+ و Cl^-. للأحماض رقم هيدروجيني أقلّ من سبعة. ويقع تركيز أيونات H^+ التي فيها على المقياس اللوغاريثمي بين 1×10^0 و 1×10^{-7}.

أبسط تعريف **للقاعدة (base)** أنّها مركّب يذوب في الماء ليصبح محلولًا يحتوي على أيونات OH^- أكثر من الماء النّقيّ. معظم الصّابون ومحاليل التّنظيف قاعديّة. للقواعد رقم هيدروجيني أكبر من سبعة. تركيز أيونات H^+ فيها يقع بين 1×10^{-7} و 1×10^{-14}.



شكل 1-14 للأحماض رقم هيدروجيني أقلّ من سبعة، وللقواعد رقم هيدروجيني أكبر من سبعة على مقياس الرقم الهيدروجيني.

قواعد
للقواعد رقم هيدروجيني أكبر من سبعة.
تسبّب القواعد طعمًا مرًّا.
تتفاعل القواعد مع الأحماض لإنتاج الملح والماء.
للقواعد ملمس زلق، مثال الصّابون.

أحماض
للأحماض رقم هيدروجيني أقلّ من سبعة.
تسبّب الأحماض الطّعم الحامض في الطّعام، مثال اللّيمون.
تتفاعل الأحماض مع القلويّات لإنتاج الملح والماء.

للماء النّقيّ الرقم الهيدروجيني 7، وللأحماض رقم هيدروجيني أقلّ من سبعة، وللقواعد رقم هيدروجيني أكبر من سبعة.

أيون الـ H^+ يتفاعل كيميائيًا، والعديد من العمليّات في جسمك حسّاسة بشدّة إلى الرقم الهيدروجيني. الدّم قاعديّ ضعيف، ورقمه الهيدروجيني الطبيعي 7.45 - 7.35؛ ومياه المحيط قاعديّة ورقمها الهيدروجيني 8.25 - 8.15، بينما يكون الرقم الهيدروجيني في المعدة بين (3.5 - 1.5).

تقويم الدّرس 1-2

1. أعطِ سببين لماذا تحتاج جميع الكائنات الحيّة إلى الماء؟
2. أيّهما أقوى، الرّابطة الأيّونيّة أو الرّابطة الهيدروجينيّة؟
3. أيّ من العبارات الآتية **ليست صحيحة** عند مقارنة خواصّ الماء والميثان؟
   a. للميثان درجة غليان أقلّ لأنّ جزيء CH_4 أخفّ وزنًا.
   b. للماء درجة غليان أعلى لأنّ جزيئات H_2O تلتصق معًا بواسطة الرّوابط الهيدروجينيّة.
4. ما خصائص الماء التي تسمح له بالحركة صعودًا في النّباتات من الجذور إلى السّاق والأوراق.
5. ما المقصود بعبارة «جزيء الماء القطبيّ؟»
6. أيّ غاز يذوب في الماء إلى تركيز أعلى على 25°C: الأكسجين أو ثاني أكسيد الكربون؟
7. أيّ من الملحوظات الآتية يمكن شرحها بشكل أفضل بواسطة مفهوم الخاصّيّة الشّعريّة؟
   a. تميل قطرات الماء إلى تكوين كرات لأنّ للكرة أصغر مساحة سطحية لحجمها.
   b. يقوم الأنبوب الزّجاجيّ الرّفيع بسحب الماء إلى أعلى الأنبوب بعكس قوّة الجاذبيّة.
   c. الرّابطة الهيدروجينيّة بين جزيئات الماء تجعل الجليد أقلّ كثافة من الماء السّائل.
8. صحّ أو خطأ: يمكن أن يكون هناك مذاب واحد في المحلول ولكن أكثر من مذيب.
9. ابحث في العلاقة بين محلول 1M HCl وتركيز أيون H^+ فيه. كوّن جدولًا يبيّن تركيز H^+ بوحدة mol/L وتركيز OH^- بوحدة mol/L والرَّقم الهيدروجيني من 14-1. أضف عمود للمواد الآتية عند الرَّقم الهيدروجيني التقريبي: 1M NaOH، حمض المعدة، مسحوق الغسيل، عصير الحامض، 0.1 M NaOH ، 0.1 M HCl، ماء البحر، الأمونيا المنزلية، سائل المغنيسيا.

الدّرس 1-3
الكربوهيدرات
Carbohydrates

تحتاج جميع الكائنات الحيّة إلى تناول الغذاء. ولكلّ مجتمع على كوكبنا أطباقه التّقليدية، مثال المجبوس المكوَّن من الأرزّ واللّحوم والطّماطم، بالإضافة إلى توابل خاصّة. فالمجبوس هو مثال على الأطعمة الّتي تحتوي فئات الأغذية الكيميائيّة جميعها، بما في ذلك الكربوهيدرات (الأرزّ)، الدّهون (الزّيت)، والبروتينات (اللّحوم).

إنّ للأغذية العديد من الاستخدامات الحيويّة. فالكربوهيدرات، مثال الخبز والسّكّر، توفّر الطّاقة للجسم. والدّهون والزّيوت يخزّنان الطّاقة ويشكّلان الموادّ البنائيّة لأغشية كلّ خليّة في خلايا الجسم. أمّا البروتينات فتدخل في بناء جزيئات مهمّة يحتاج إليها جسمك كالهرمونات والعضلات والإنزيمات.

مخرجات التّعلُّم

B1102.2 يتعرّف تركيبَ الجلوكوز في الكربوهيدرات وخصائصَه.

B1102.3 يصف تكوّن وتكسّر الرّابطة الجلايكوسيدية/ السّكّريّة في الكربوهيدرات.

المفردات

Amylopectin	الأميلوبكتين
Lipid	الليبيد
Protein	البروتين
Carbohydrate	الكربوهيدرات
Glucose	الجلوكوز
Fructose	الفركتوز
Galactose	الجالاكتوز
Sucrose	السّكَّروز
Sugar	السّكَّر
Monosaccharide	السّكر الأحادي
Disaccharide	السّكر الثنائي
Glycosidic bond	الرّابطة الجلايكوسيدية
Polysaccharide	عديد السّكر
Amylose	الأميلوز
Glycogen	الجلايكوجين
Starch	النّشا
Cellulose	السّلّيلوز

الكيمياء الحيويّة للغذاء

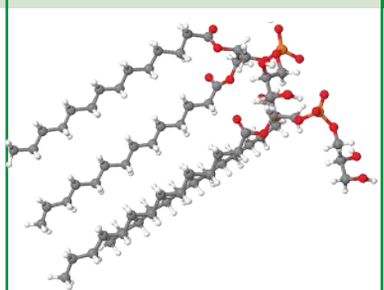
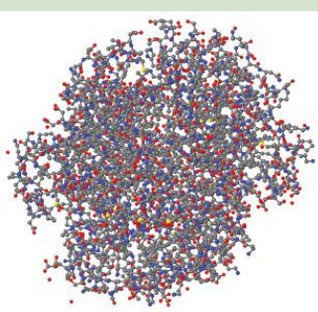
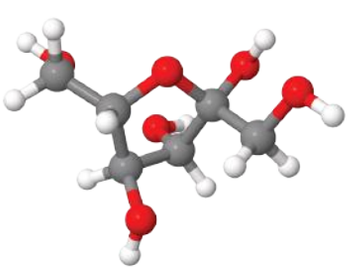
سؤال للمناقشة

ما هو الغذاء؟

يوفِّر الغذاء الذّرّات والجزيئات الّتي يحتاج إليها جسمك لبناء كلّ شيء، بدءًا بخلايا الدّماغ وحتّى أظفار أصابع القدم. ويوفِّر الغذاء، أيضًا، الطّاقةَ للعمليّات الكيميائيّة الّتي تبقي الكائنات الحيّة على قيد الحياة.

نحصل على الطّاقة والمادّة من ثلاث فئات من المركّبات: الدّهون والبروتينات والكربوهيدرات.

1. **الليبيدات Lipids** تُستخدَم لتوفير الطّاقة، وتعمل كإشارات كيميائيّة حيويّة، وتشكّل المكوِّن البنائيّ لأغشية الخلايا.
2. **البروتينات Proteins** توفِّر الجزيئات الأوّليَّة لبناء أنسجة الجسم والهرمونات والإنزيمات، وللنّموّ والتّكاثر.
3. **الكربوهيدرات Carbohydrates** تعتبر المصدر الرئيسي للطاقة في جميع الكائنات الحية، كما تدخل في تكوين بعض الأجزاء والتراكيب فيها.

المحتوى الغذائي	الليبيدات	البروتينات	الكربوهيدرات
التركيب الكيميائي الحيوي	اللّيبدات تحتوي على سلاسل هيدروكربونيّة	بوليمرات حيويّة كبيرة من الأحماض الأمينيّة	السّكّريّات، النّشويّات والسّلّيلوز
أمثلة			
	الدّهون الثّلاثيّة	الهيموجلوبين	الفركتوز

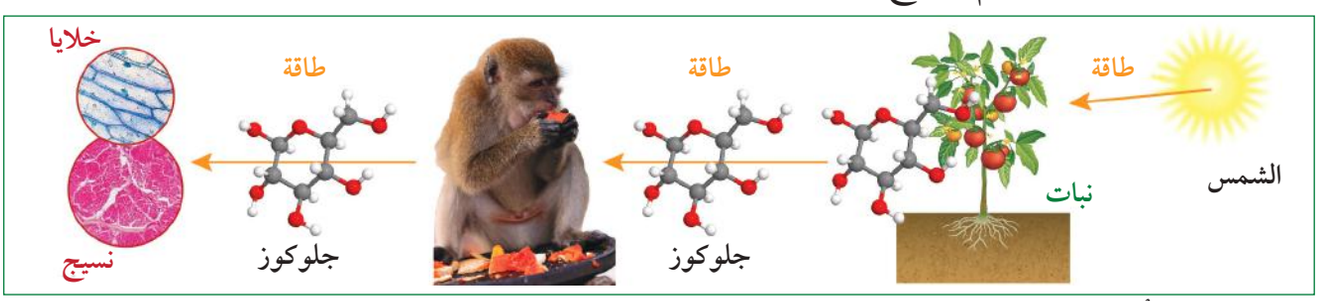
كربون أكسجين هيدروجين نيتروجين كبريت حديد

شكل 1-15 الفئات الرّئيسة الثّلاث للجزيئات الحيويّة.

يصف (**الشّكل 1-15**) الاختلاف بين المعنى التغذوي والبيولوجي والكيميائي الحيوي لكلٍّ منَ الجزيئات الحيويّة الآتية: الدّهون والكربوهيدرات والبروتين. تستخدم كلمة بروتين في حياتنا اليومية للإشارة إلى أنواع معينة من الأغذية كالسمك والبيض واللحم. أما كيميائيا فيعرف البروتين بأنه جزيئات حيوية تتكون من سلاسل طويلة من الأحماض الأمينيّة مثل الأنزيمات والهرمونات والكولاجين والهيموجلوبين. ويحصل الكائن الحي على حاجته من البروتينات من خلال تناوله الأغذية الغنية بالبروتين.

الكربوهيدرات والطّاقة

تحصل الكائنات الحيّة جميعها على الطّاقة من بيئتها، وتستخدمها في العمليّات الحيويّة. يُشكِّل سكّر الجلوكوز الجزيء الأساسيّ لتبادل الطّاقة بين الخلايا، لدى غالبيّة الكائنات الحيَّة (**الشّكل 1-16**). وسكّر الجلوكوز من السكريات البسيطة؛ فالنّباتات تأخذ الطّاقة من الشّمس وتصنع الجلوكوز الّذي يعدُّ النّاتج الأساسيّ لعمليّة البناء الضّوئيّ، ثمَّ تأكل الحيواناتُ النّباتاتِ وتستخدم الجلوكوز، إمّا بشكلٍ مباشر لتأمين الطّاقة، أو أن تهضم النّشويّات والزّيوت والدّهون الموجودة في النّباتات لإطلاق الجلوكوز أو إنتاج سكّريّات بسيطة وإعادة استخدامها داخل الجسم. يمتص الدم سكر الجلوكوز من الجهاز الهضمي ويوزعه على خلايا الجسم لأنتاج الطاقة.



شكل 1-16 تدفُّق الطّاقة بين الكائنات الحيّة وداخلَها من خلال الجلوكوز.

السّكّريّات هي أساس نقل الطّاقة في داخل الكائنات الحيّة وبينها.

السّكّر Sugar موجودٌ بشكلٍ طبيعيٍّ في النّظام الغذائيّ الصّحّيّ أي في الخضار والفاكهة والحبوب. يوضّح **الجدول 1-3** أدناه محتوى السّكّر في بعض الفاكهة وغيرها من الأغذية، الفركتوز هو سكر الفاكهة الشائع. يحتوي التُّفاح على 13.3% من وزنه سكَّريّات، في حين يحتوي اللّيمون الحامض على 0.4% فقط من السّكَّريّات. تحتوي معظم الأغذية الطّبيعيّة مزيج من السّكَّريّات، كالجلوكوز والفركتوز والسَّكَّروز وغيرها. فالأطعمة المصنَّعة تحتوي على السَّكّروز وهو سكَّر المائدة، والشّوكولا يتشكّل نصف وزنها من السّكّروز تقريبًا، والعسل يحتوي على 81.9% من السّكّر، والفواكه المجفَّفة مثال التّمور والزّبيب يتكوّن ثلثاها 2/3 من السّكّر. وزيادة استهلاك السّكّر يمكن أن يؤدّي إلى أمراض خطيرة مثل مرض السّكّريّ وزيادة الوزن.

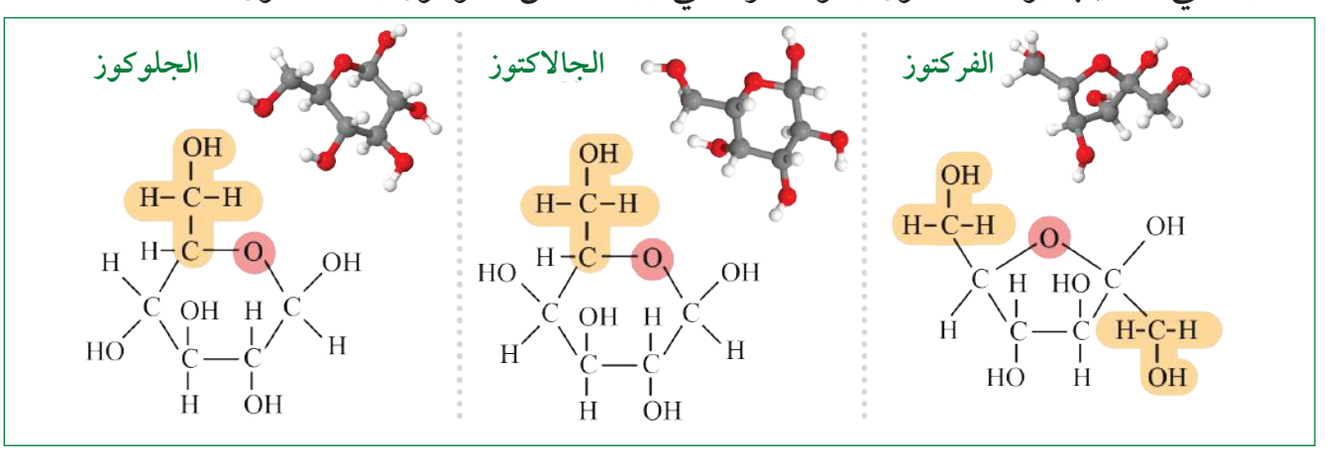
الجدول 1-3 محتوى السّكّر في أغذية مختلفة.

	السّكّر الكلّيّ	الجلوكوز	الفركتوز	السّكّروز
التّفاح	13.3 %	2.3 %	7.6 %	3.3 %
الموز	15.6 %	4.2 %	2.7 %	6.5 %
الحامض	2.5 %	1.0 %	0.8 %	0.6 %
اللّيمون الحامض	0.4 %	0.2 %	0.2 %	-
الطّماطم	2.8 %	1.1 %	1.4 %	-
التّمور	64.2 %	-	-	44.6 %
التّين المجفّف	62.3 %	26.9 %	24.4 %	6.1 %
الزّبيب	65.0 %	31.2 %	33.8 %	-
العسل	81.9 %	33.8 %	42.4 %	1.5 %
الشّوكولا	51.0 %	-	-	45.0 %

السّكَّريّات الأحادية

تُسمّى السّكَّريّات بأسماء تنتهي بـ«وز» (*ose*) مثال الجلوكوز glucose والفركتوز fructose والسّكَّروز sucrose. والسّكَّريّات هي فئة من المركّبات التّساهميّة المؤلّفة من الكربون والهيدروجين والأكسجين. وتصنَّف السّكَّريّات حسب عدد ذرّات الكربون؛ فالسّكَّريّات الّتي تحتوي على ثلاث ذرّات كربون هي سكَّريّات ثلاثيّة الكربون trioses، والّتي تحتوي على خمس ذرّات كربون هي خماسية الكربون pentoses، أمّا السّكَّريّات الّتي تحتوي على 6 ذرّات كربون فهي السّكَّريّات سداسية الكربون (hexoses)، تذوب في الماء، ولها طعم حلو.

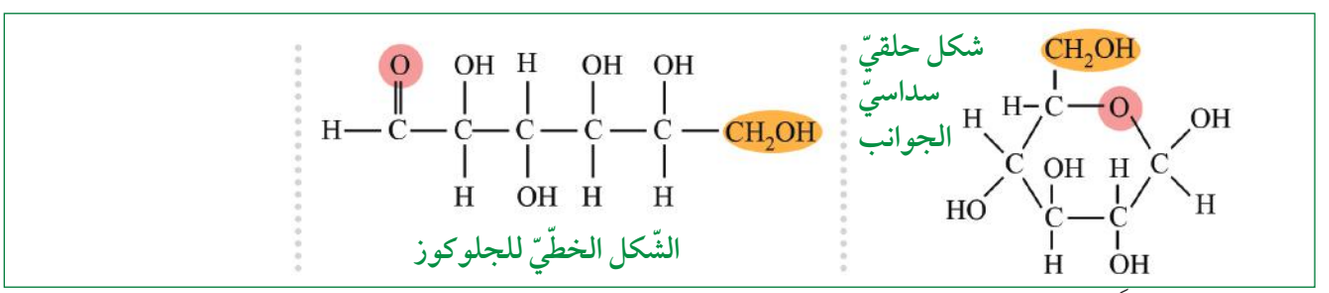
السكر الأحادي Monosaccharide أبسط أنواع السّكَّر وله الصّيغة الكيميائيّة العامّة $(CH_2O)n$ حيث أنّ n هو عدد صغير صحيح. وتُعدّ أبسط أهم ثلاثة سكريات أحادية من النّاحية الحيويّة **الجلوكوز Glucose** و**الفركتوز Fructose** و**الجالاكتوز Galactose** (**الشّكل 1-17**). ويعدّ الجلوكوز المصدر الأساسيّ للطّاقة في الخلايا، ويتواجد الفركتوز في الفاكهة، وهو أكثر أنواع السكريات الأحادية حلاوةً، في الحليب يوجد لاكتوز وهو سكر ثنائي ويتألّف من جلوكوز و جالاكتوز.



شكل 1-17 السكريات الأحادية سداسية الكربون الثّلاثة الشّائعة.

وللسّكَّريّات الثّلاثة المذكورة أعلاه الصّيغة الكيميائيّة نفسها $C_6H_{12}O_6$، ولكنّ لها بنًى تركيبيّة مختلفة قليلًا، وتوصف بأنها المتشاكلات (isomers).

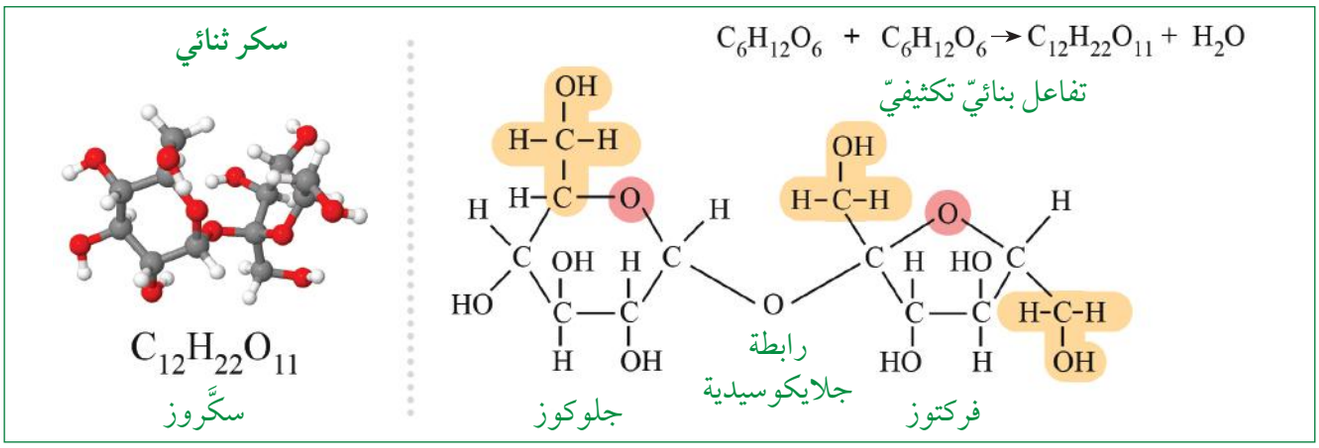
للسكريات الأحادية بنًى متعدِّدة. ويوضح (**الشّكل1-18**) الصّيغة الخطّيّة المستقرّة لبنية الجلوكوز، والّتي من الممكن أن يكون لها أيضًا شكل سداسيّ الجوانب. وهذا الجلوكوز، سواءٌ أكانت بنيته خطّيّة أم حلقيّة، يتحوّل بسرعة بين بنية وأخرى في أيّ محلول عاديّ.



شكل 1-18 للسّكَّريّات الأحاديّة هياكل مختلفة.

الرابطة الجلايكوسيدية وعديدات التّسكُّر

السّكَّروز **Sucrose** أو «سكر المائدة» $C_{12}H_{22}O_{11}$ هو **سكّر ثنائيّ Disaccharide** يتكون من ارتباط جزيئي جلوكوز وفركتوز معاً برابطة تساهمية تعرف **بالرّابطة الجلايكوسيدية Glycosidic Bond** (**الشّكل 1-19**). المالتوز (maltose سكّر الشّعير) واللّاكتوز (lactose سكّر الحليب) هما سكّران ثنائيّان أيضًا ولهما الصيغة الكيميائية نفسها مثل جزيءالسكروز ، ويتكوّن كلٌّ منهما من اتّحاد سكَّرَيْن أحاديَّيْن، جزيئي جلوكوز في المالتوز، وجلوكوز وجالاكتوز في اللّاكتوز.

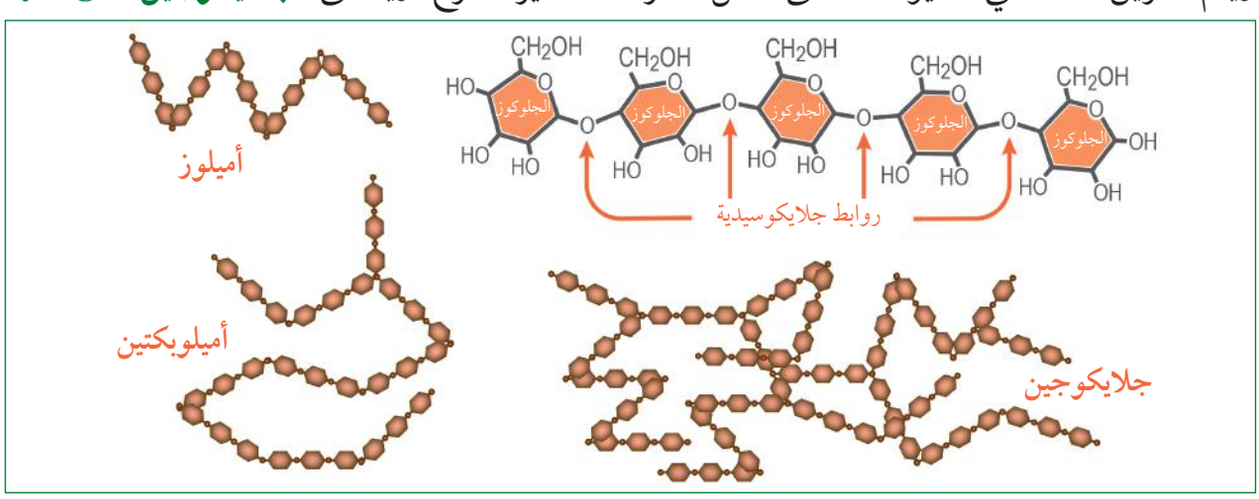


شكل 1-19 الرّابطة الجلايكوسيدية تربط بين حلقات السّكَّر.

عديدات التّسكّر

إن **عديد التّسكُّر Polysaccharide** هو بوليمر مكوَّن من مونومرات من السكريات الأحادية مرتبطة معاً بواسطة روابط جلايكوسيدية لتشكل سلاسل إما مستقيمة أو متفرعة. تشكّل عديدات التّسكُّر الكربوهيدرات المعقّدة الّتي تُستخدَم في الكائنات الحيّة كمصادر للطّاقة المخزَّنة أو الجزيئات البنائيّة، و**النّشا Starch** هو من عديدات التّسكُّر المهمّة المؤلّفة من مونومرات الجلوكوز (**الشّكل 1-20**). إنَّ النَّشا هو جزيء الطّاقة المخزَّنة الرَّئيس في الأرزّ والبطاطس والذّرة والقمح.

النشا الموجود في البطاطس هو خليط من مركبي **الأميلوز Amylose** و**الأميلوبكتين Amylopectin**. في حين يمتلك الأميلوز شكلاً خطياً ونسبته 20% في النشا، لجزيء الأميلوبكتين سلاسل متفرعة ونسبته 80%. ويتمّ تخزين الطّاقة في الحيوانات على شكل سكر معقد كثير التّفرّع، ويُسمّى **الجلايكوجين Glycogen**.



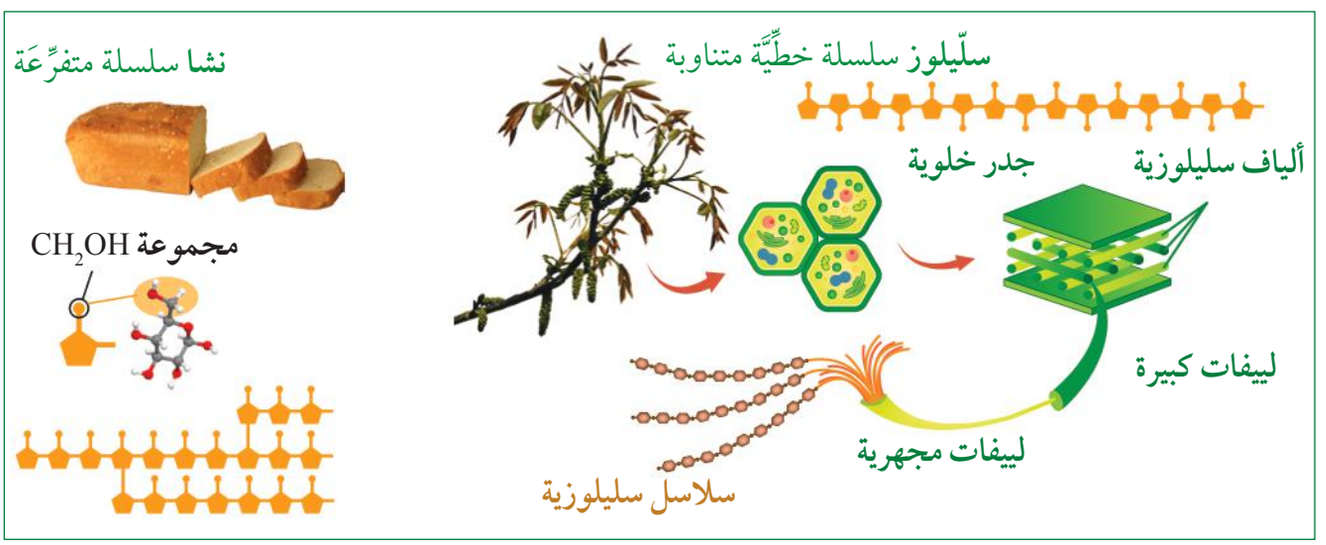
شكل 1-20 النّشا هو بوليمر من مونومرات الجلوكوز.

خصائص الكربوهيدرات المعقّدة

تشمل الكربوهيدرات المعقّدة النّشا والسّلّيلوز، وليس لهذه المركّبات طعم حلو، وهي تتواجد في الحبوب والخضار والأغذية النّشويّة مثل المعكرونة والبطاطس، وتتشكّل في الغالب في النّباتات.ويتمّ هضم الكربوهيدرات المعقّدة بشكل أبطأ مقارنة بالسّكّريّات البسيطة، ومعدّل الهضم البطيء هذا يجعل هذه المركّبات شكلًا من أشكال تخزين الطّاقة، بحيث يتمّ تكسيرها إلى جلوكوز بسهولة عند الحاجة إلى طاقة.

الكربوهيدرات المعقّدة مثال النّشا والسّلّيلوز هي بوليمرات من السّكّريّات.

النّشا هو الشّكل الأكثر شيوعًا من الكربوهيدرات المعقّدة في النّظم الغذائيّة البشريّة، وهو عديد التّسكُّر بحيث يتراوح عدد المونومرات فيه بين بضع مونومرات إلى مئاتٍ أو آلاف منها .والنّشا عبارة عن سلاسل خطّيّة أو متفرّعة من جزيئات الجلوكوز، مرتبطة بعضها ببعض (**الشكل 1-21**).



شكل 1-21 النّشا هو بوليمرات متفرّعة مع مجموعات CH_2OH. وجزيئات السّلّيلوز هي سلاسل خطّيّة مع مجموعات CH_2OH متناوِبة.

السّليلوز Cellulose هو سلسلة خطّيّة من مونومرات الجلوكوز مع مجموعات CH_2OH متناوِبة من جانب إلى جانب آخر في السّلسلة. وهذا التّناوب في السّلسلة الخطّيّة يسمح لجزيئات السّلّيلوز بالاصطفاف، وبإقامة الرّوابط الهيدروجينيّة بعضها مع بعض، ما يخلق قوّة كبيرة للخشب أو لغيره من أجزاء النّباتات البنائيّة المصنوعة من السّلّيلوز. إنّ السّلّيلوز هو المركّب العضويّ الأكثر وفرة على الأرض، بحيث يشكّل نسبة كبيرة من كتلة النّباتات جميعها.

ويستطيع البشر ومعظم الحيوانات هضم النّشا وتكسيره إلى الجلوكوز، إلّا أنّ هضم السّلّيلوز غير ممكن إلّا لعدد قليل من الكائنات. فالحشرات كالنّمل الأبيض وكذلك الأبقار والأغنام تأكل السّلّيلوز من الخشب، وتعتمد جميعها على البكتيريا الموجودة في جهازها الهضميّ لتكسيره.

الكربوهيدرات في نظامك الغذائيّ

من الضّروريّ لنظامٍ غذائيّ صحّيّ تناول النّوع الصّحيح من الكربوهيدرات؛ ففي الفواكه والخضار نسبة عالية من الكربوهيدرات المعقّدة والألياف مثل السّلّيلوز، وهذه الأغذية تشعرك بالشّبع لوقت أطول، ذلك لأنّ الألياف السّلّيلوزيّة لا يتمّ هضمها. هذا الشّعور الكامل بالشّبع يحول دون الإفراط في تناول الطّعام.

إذا تناولْتَ كمّيّة من الكربوهيدرات تفوق قدرة جسمك على استخدامها بشكل فوريّ، فإنّ الجسم يخزّن الطّاقة المتبقّية على شكل جلايكوجين في أنسجة العضلات والكبد. ولكن، لسوء الحظّ، لا يمكن للعضلات ولخلايا الكبد تخزين كمّيّات كبيرة من الجلايكوجين، لهذا تتحوّل الكمّيّات الزّائدة الّتي لا يتمّ تخزينها في العضلات وخلايا الكبد إلى دهون تخزّن في الخلايا الدّهنيّة في جسمك. لهذا السّبب، فإن تناول كمّيّات كبيرة من الكربوهيدرات تزيد الدّهون في الجسم.

إنّ الأغذية الحلوة الطّعم كالبقلاوة (**الشكل 1-22**) تحتوي على نسبة عالية من الكربوهيدرات البسيطة مثال السّكّروز والفركتوز. وعلى عكس ألياف السّلّيلوز، يتمّ هضم هذه الجزيئات الصّغيرة بسرعة وتحويلها إلى جلوكوز، ويذهب الجلوكوز مباشرة إلى دمك، ممّا يسبّب ارتفاعًا سريعًا في تركيز السّكّر في الدّم.

شكل 1-22 تحتوي الحلويات على نسبة كبيرة من الدّهون والسّكّر.

يحتوي دم الشخص السليم على 5-6 g من الجلوكوز المُذاب في خمسة ليترات من الدّم (متوسّط حجم الدّم). وإنّ تناول قطعة واحدة من البقلاوة يصبّ 3 أضعاف هذه الكمّيّة في دمك بسرعة. والأسوأ من ذلك، المشروبات الغازيّة الّتي تحتوي على أكثر من 100 g من السّكّر. ويؤدّي ارتفاع نسبة سكّر الدّم إلى تطوير مقاومةِ الجسمِ لهرمون الأنسولين الّذي يعطي إشارات للخلايا كي تمتص الجلوكوز.

إذًا، يؤدّي الإفراط في تناول السّكّر إلى مقاومة الجسم للأنسولين، وهو السّبب الأساسيّ لمرض السّكّري، الّذي يعدّ خطيرًا بل قاتلًا. إلّا أنّ معدّل الإصابة بداء السّكّري في ارتفاع، ذلك بسبب نمط الغذاء غير الصحي المعتمد بشكل رئيس على الأطعمة السّكّريّة (**الشكل 1-23**).

التأثير الصحي	الكربوهيدرات البسيطة	الكربوهيدرات المعقّدة
صحّي	• العسل • الفاكهة • الألبان (الحليب واللّبن) • الخضار الجذرية	• الخضراوات • الخبز الأسمر • الأرزّ البنّي
أقلّ صحّة	• كيك وبسكويت • سكّر المائدة، الحلوى • بوظة	• الحبوب المُصنّعة مثل الخبز والمعكرونة المصنوعة من الطّحين الأبيض. • الأرزّ الأبيض

شكل 1-23 التّأثير الصّحّيّ للكربوهيدرات البسيطة والكربوهيدرات المعقّدة.

3-1 الكربوهيدرات

سؤال الاستقصاء	ما هي السكريات الاحادية وعديدات التسكر؟
الموادّ المطلوبة	مجموعة من نماذج جزيئات، سكّر (السّكَّروز)، محلول بندكت، أنزيم سكَّريز (الغذائيّ)، حمّام مائي ساخن، أنابيب اختبار، حامل أنابيب اختبار.

الخطوات

1. ذوِّب 10 g من السكروز في 50 mL من الماء السّاخن.
2. أضف 5 mL من محلول السكروز إلى أنبوب 1 و2و3، و5 mL من محلول بندكت إلى كلّ من الأنبوبين2 و3.
3. أضف 5 mL من محلول السّكَّريز إلى الأنبوب رقم 3.
4. اغمر كل أنابيب الاختبار في الحمّام المائي السّاخن وحرّكها دائريًا لمدّة 3 دقائق.

أسئلة حول الجزء الأوّل:

a. كيف يتفاعل محلول بندكت مع السّكَّروز والسكريات الأحادية (الجلوكوز والفركتوز)؟
b. ضَعْ فرضيّة تُفسِّر ملحوظاتك المتعلّقة بالأنابيب الثلاثة.

خطوات الجزء الثّاني

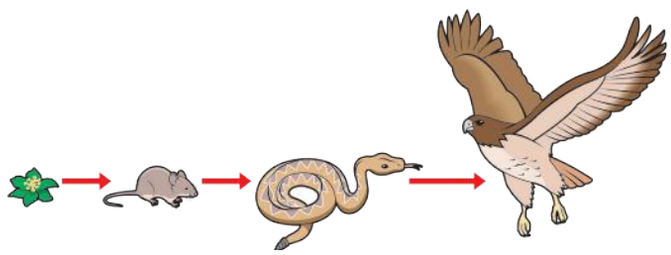
1. قُمْ ببناء النّموذج الجزيئيّ لكلٍّ من الجلوكوز والفركتوز.
2. قُمْ بإزالة اثنتَيْنِ من ذرّات الهيدروجين وذرّة من الأكسجين لتكوين رابطة جلايكوسيدية ولتكوين السّكَّروز.
3. قُمْ بإضافة جزيء من الماء لتكسير الرّابطة الجلايكوسيدية وتحويل السّكَّروز إلى فركتوز وجلوكوز.

أسئلة حول الجزء الثّاني

1. كيف يدعم النّموذج فرضيّتك في الجزء الأوّل؟
2. صِف التّفاعل النّاجم عن إضافة السّكَّريز.

تقويم الدّرس 1-3

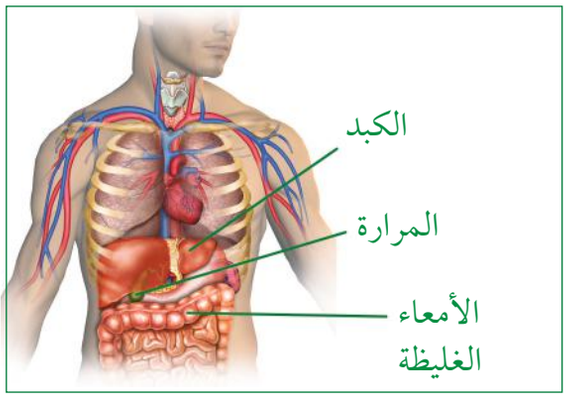
1. كيف يختلف المحتوى الغذائيّ للبروتين عن تركيبه الكيميائي الحيوي؟
2. اشرح لماذا يُسّمى مخطَّط الآتي تدفُّق الطّاقة.



3. ما هو المصدر الأساسيّ للطّاقة الّتي يتمّ تخزينها في النّباتات، والّتي تحصل عليها الحيوانات عبر أكلِ هذه النّباتات؟ كيف تبرّر ذلك؟
4. أيّ نوع من السّكّر ينتمي إليه سكّر المائدة العاديّ: سكّر أحاديّ، أم سكّر ثنائيّ أم عديد التّسكُّر. برّر إجابتك.
5. اشرح سبب تسمية تفاعل الإضافة الّذي يربط اثنين من جزيئات السّكّر بتفاعل البناء التّكثيفيّ.
6. وضّح أوجه التّشابه والاختلاف بين النّشاء والسّلّيلوز.
7. يشمل النّظام الغذائيّ الصّحّيّ نوعَيْ الكربوهيدرات البسيطة والمعقّدة؛ أيٌّ من العبارات الآتية صحيحة:
   a. يجب أن يتضمّن نظامك الغذائيّ كمّيّات أقلّ من الكربوهيدرات المعقَّدة، وكمّيّات أكثر من الكربوهيدرات البسيطة الّتي يسهل هضمها.
   b. يجب أن يتضمّن نظامك الغذائيّ كمّيّات أقلّ من الكربوهيدرات البسيطة، وكمّيّات أكبر من الكربوهيدرات المعقَّدة الّتي يصعب هضمها.
8. ابحث على الأقلّ في أربعة أسباب لاختيارك إجابتك عن السّؤال رقم 7 أعلاه.
9. ابحث على الأقلّ عن أربعة مصادر جيّدة للكربوهيدرات المعقّدة في النّظام الغذائيّ؟ ما هي أنواع الأغذية الّتي تحتوي على نسبة عالية من الكربوهيدرات المعقَّدة؟
10. يُقال إنّ مركَّبًا كيميائيًّا معيَّن يمثّل أكثر من نصف كتلة الكائنات الحيَّة على الأرض. أيُّ مركَّب هو؟ ولِمَ هو كثير الشّيوع؟

الدّرس 1-4
اللّيبيدات
Lipids

تُنْتِج الدّهون 9 سعرات حراريّة للغرام الواحد، وكمّيّة الطّاقة هذه أكثر من ضعف ما تنتجه الكربوهيدرات أي 4 سعرات حراريّة للغرام الواحد. وما لم تكن قادرًا على استهلاك تلك الطّاقة كلّها، فإنّ جسمك يقوم بتخزينها على شكل دهن إضافيّ. فأسفل كبدك تمامًا، عضوٌ صغير يسمّى المرارة gallbladder يقوم بتركيز العُصارة الصّفراء bile الّتي يُنتِجها كبدك نفسه. تفتّتُ تلك العصارة الدّهون كيميائيًّا إلى جسيمات صغيرة جدًّا، كي يتمّ هضمها بواسطة أنزيم اللّيبيز إلى جليسريدات ثلاثيّة تدخل إلى مجرى الدّم. يتحوّل لون دمك، بعد وجبة غنيّة بالدّهون، إلى لونٍ أبيض قشديّ من فرط الجليسريدات الثلاثيّة. بعدها، تُخزَّن الجليسريدات الفائضة في النّسيج الدّهنيّ، وتُشَكِّل دهون الجسم.



مخرجات التّعلُّم

B1103.1 يتعرّف إلى تركيب وخصائص الجليسيرول والأحماض الدّهنيّة في اللّيبيدات.

B1103.2 يصف تكوّن وتكسّر رابطة استر في اللّيبيدات، بما في ذلك تكوين الدّهون المشبَعة وغير المشبَعة.

المفردات

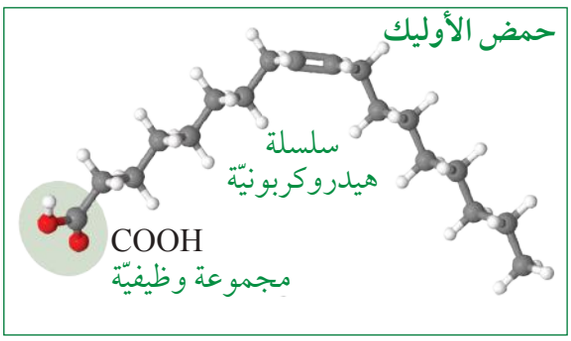
Lipid	اللّيبيد
Fatty acid	الحمض الدّهنيّ
Saturated fat	الدّهن المشبَع
Unsaturated fat	الدّهن غير المشبَع
Triglyceride	الجليسريد الثّلاثيّ
Glycerol	الجليسيرول
Lipoprotein	البروتين الدّهنيّ
Ester bond	رابطة استر
Hydrolysis	التّحلّل المائيّ
Hydrophobic	كارِه للماء
Hydrophilic	محِبّ للماء
Phospholipid	الفسفوليبيد
Micelle	المايسيلي
Cell membrane	الغشاء الخلويّ

اللّيبيدات

سؤال للمناقشة

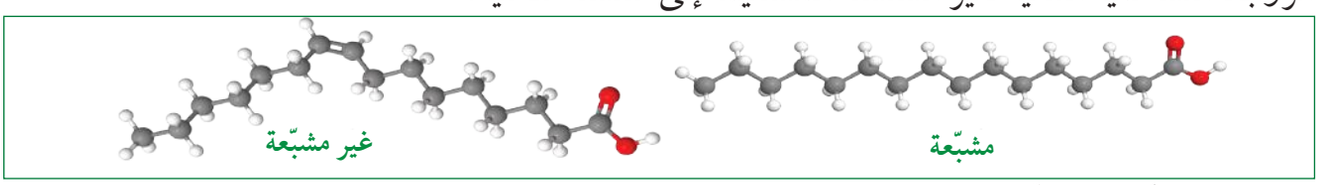
ما هي اللّيبيدات؟

تشتمل **اللّيبيدات Lipids** مجموعة متنوعة من المركبات العضوية تشترك جميعها بعدم ذائبيتها بالماء، بالإضافة لاحتوائها على العناصر C, H, O لكن بنسب مختلفة عن الكربوهيدرات.
وتشتمل اللّيبيدات على المجموعات التالية: دهن Fat أو شمع Waxes أو زيت Oil أو ستيرويد.
تنتج كلّ من النّباتات والحيوانات اللّيبيدات؛ فالحيوانات تصنع الحليب، وهو خليط مائيّ تتشتّت فيه جزيئات الدّهن، والنّباتات، كشجرة الزّيتون، تنتج زيت الزّيتون.



شكل 1-24 تركيب الحمض الدّهني.

وتعدّ **الأحماض الدّهنيّة Fatty acids** أبسط اللّيبيدات، وتتكوّن هذه الأحماض من سلسلة هيدروكربونيّة طويلة، في أحد طرفَيْها مجموعة وظيفيّة COOH–. علمًا أن المجموعة COOH– موجودة في جميع الأحماض العضويّة. فعلى سبيل المثال يعدّ حمض الأوليك oleic acid حمضًا دهنيًّا شائعًا موجودًا في العديد من الدّهون والزّيوت النّباتيّة والحيوانيّة (**الشّكل 1-24**).
وتحتوي **الأحماض الدّهنيّة المشبَعة Saturated fatty acids** على روابط تساهميّة «جميعها أحادية» بين ذرات الكربون. وعادةً ما تكون هذه الأحماض صلبة في درجة حرارة الغرفة (**الشّكل 1-25**)؛ كما أنّ تكسير الأحماض الدّهنيّة المشبَعة في سبيل توفير الطّاقة ليس سهلًا. في حين تحتوي **الأحماض الدّهنيّة غير المشبَعة Unsaturated fatty acids** على رابطة تساهميّة ثنائيّة C = C واحدة على الأقلّ بين ذرّات الكربون ممّا يجعل هضم هذه الأحماض أسهل من الفئة السّابقة، لأنّ الرّوابط التّساهميّة الثّنائيّة تغيّر السّلسلة المستقيمة إلى سلسلة منحنية.



شكل 1-25 الأحماض الدّهنيّة المشبّعة وغير المشبّعة.

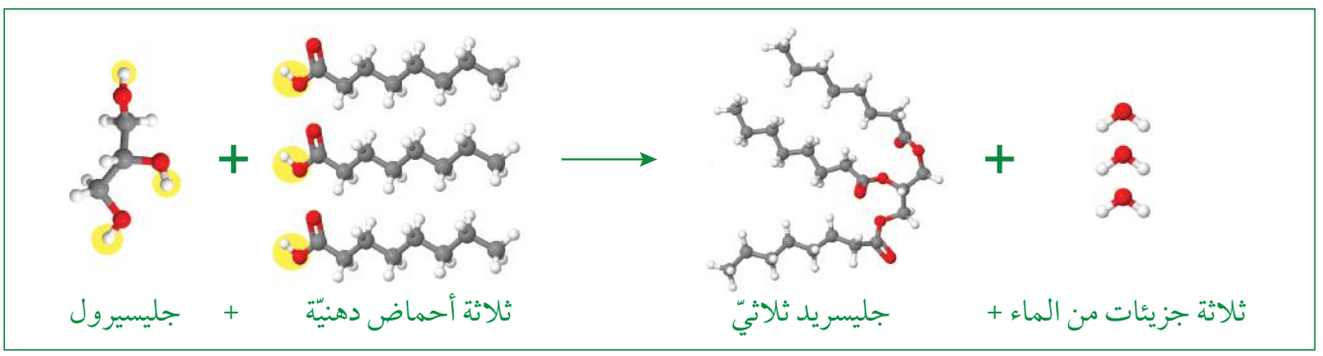
لا تحتوي سلاسل الكربون على روابط تساهميّة ثنائيّة في الدّهون المشبَعة، بينما تحتوي الدّهون غير المشبَعة على رابطة تساهميّة ثنائية أو أكثر.

تكون الدّهون صلبة في درجة حرارة الغرفة، في حين تكون الزّيوت سائلة (**الشّكل 1-26**).
ويختلف الدّهن عن الزّيت، بشكلٍ رئيسٍ، في طول سلسلة الكربون وعدد روابط كربون – كربون المشبَعة. فالجزيئات الّتي تحتوي على عدد أكبر من الرّوابط التّساهميّة الثّنائيّة تكون أقلّ إشباعًا، ومن المرجّح أن تكون سائلة في درجة حرارة الغرفة.

شكل 1-26 غالبًا ما تحتوي الزّيوت على الدّهون غير المشبَعة، لذا تكون سائلة في درجة حرارة الغرفة. أمّا الدّهون المشبَعة فتكون صلبة في درجة حرارة الغرفة.

التّركيب الجزيئيّ للدّهون

تتميّز الدّهون الشّائعة الّتي يحتوي عليها جسمك ونظامك الغذائيّ بتركيب ثلاثيّ السّلاسل يُسمّى **الجليسريد الثّلاثيّ Triglyceride**. ينتج جزيء الجلسريد الثلاثي من ارتباط ثلاث جزيئات أحماض دهنية مع جزيء **جليسيرول Glycerol** واحد لتُنتِج جزيئًا من الدّهن وثلاثة جزيئات من الماء. بالتّالي، إنّ هذا التّفاعل هو تفاعل تكثيفٍ لأنّه يُنتِج الماء (**شكل 1-27**).



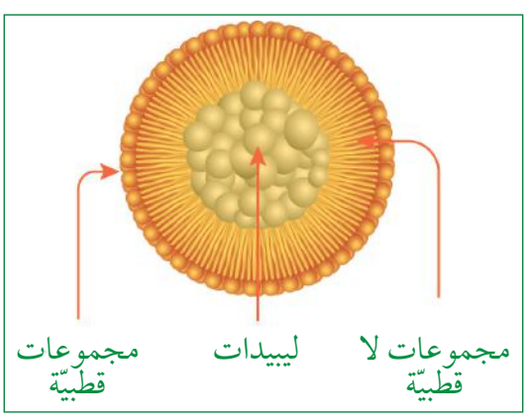
شكل 1-27 تحتوي الدّهون ثلاثيّة الجليسريد على جليسيرول وثلاثة سلاسل من الأحماض الدّهنيّة.

تتوزّع الدّهون في مجموعات متنوّعة تختلف بحسب بنية جزيئات الأحماض الدّهنيّة. وقد تكون الأحماض الدّهنيّة الثّلاثة جميعها من نوع الجزيء نفسه، أو قد تكون أنواعًا مختلفة في إشباعها أو في طولها. ويتراوح طول جزيء الحمض الدّهنيّ بين 4 ذرّات كربون و24 ذرّة كربون، إلّا أنّ الجزيئات الّتي يتراوح طولها بين 16 ذرّة كربون و18 ذرّة هي الأكثر شيوعًا في جسم الإنسان. وهذه السّلاسل من الأحماض الدّهنيّة قد تكون مشبَعة أو غير مشبَعة.

الدّهون الحيويّة جليسريدات ثلاثيّة تتكوّن من جليسيرول مركزيّ متّصِل بثلاث سلاسل من الأحماض الدّهنيّة.

تذوب الدّهون في المذيبات غير القطبيّة، كالبنزين والزّيوت النّباتيّة، لكن، بما أنّ دمنا وسوائل جسمنا مكوّنٌ معظمُها من الماء، لا يمكن للجزيء الدّهنيّ اللّاقطبيّ أن يذوب في الماء إلّا إذا كانت فيه مناطق قطبية أو مشحونة (أيونية).

تستخدم أجسامنا **البروتينات الدّهنيّة Lipoproteins** لحمل جزيئات الدّهون في مجرى الدّم. والبروتينات الدّهنيّة (**الشكل 1-28**) عبارة عن كرات جوفاء عليها مجموعات قطبيّة من الخارج، ومجموعات لاقطبيّة من الدّاخل، فيتيح الجزء الخارجي القطبيّ للجزيء الذّوبان في الدّم، بينما تسمح البطانة الدّاخليّة بحمل الدّهن في داخل البروتين اللّيبيديّ. وهكذا يتم نقل الجزيئات القابلة للذّوبان في الدّهون، مثل الفيتامين د، عبر مجرى الدّم في داخل البروتينات اللّيبيديّة.

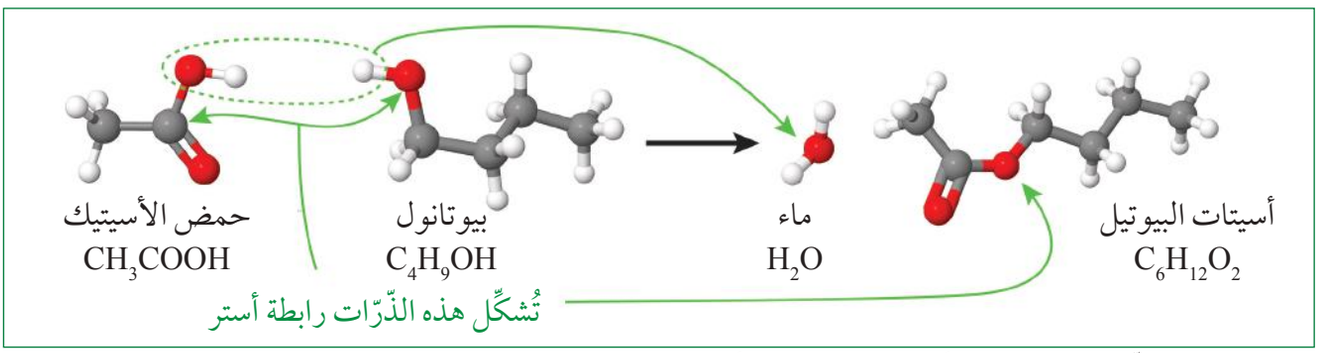


شكل 1-28 تنقل البروتينات الدّهنيّة الدّهون في داخل الجسم.

روابط استر وتفاعلات التّحلّل المائيّ

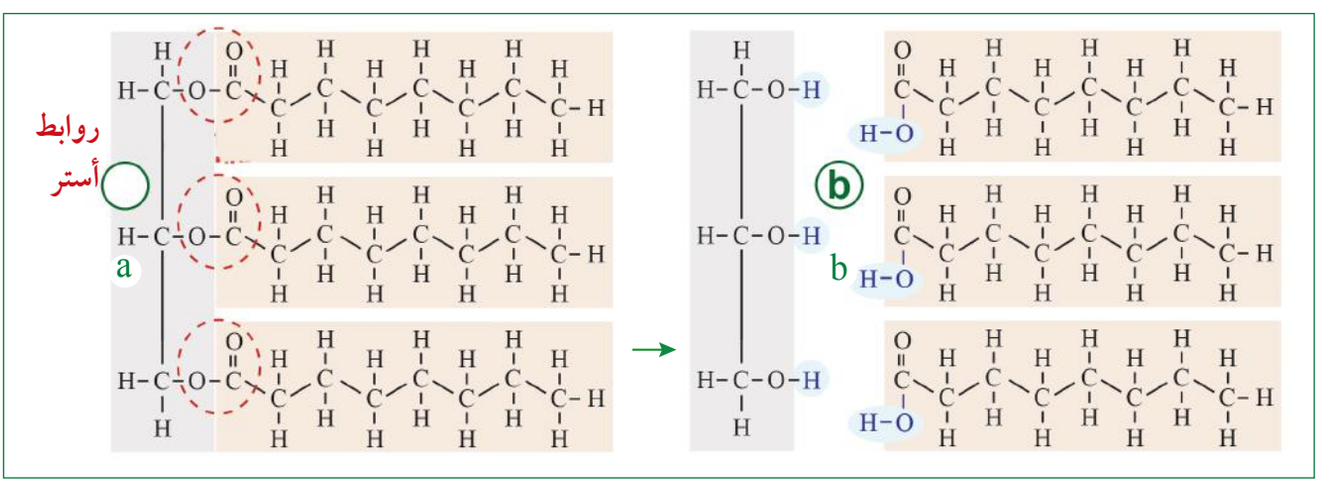
تُسمّى الرّابطة بين الجليسيرول والحمض الدّهنيّ بـ **رابطة استر Ester bond**. وتتكوّن الرّابطة عندما يتنازل الحمض عن مجموعة (OH)، وتتنازل سلسلة الكربون عن ذرّة هيدروجين. لذا يُعدّ تشكّل رابطة استر عبارة عن تفاعل بناء تكثيفيّ، لأنّه يطلق جزيء ماء.

يظهر (**الشّكل 1-29**) رابطة استر تشكّلَتْ من تفاعل بين البيوتانول butonal (C_4H_9OH) وحمض الأسيتيك acetic acid (CH_3COOH) لينتج الأستر أسيتات البيوتيل butyl acetate ($C_6H_{12}O_2$). يتوافر أسيتات البيوتيل في الطّبيعة، فهو جزء من رائحة الموز ونكهة التّفّاح، كما يُستخدم هذا المركّب كنكهة اصطناعيّة في مأكولات كثيرة.



شكل 1-29 تشكّل رابطة استر في أسيتات البيوتيل في أثناء تفاعل تكثيفيّ.

يهضم الجسم الدّهون عن طريق عكس التّفاعل التّكثيفيّ. إنّ **التّحلّل المائيّ Hydrolysis** هو التّفاعل الّذي يحصل عند إضافة جزيئات من الماء لكسر رابطة استر (**الشّكل 1-30**). يحلّل أنزيم اللّيبيز الّذي يفرزه البنكرياس الدّهن ثّلاثيّ الجليسريد إلى جليسيرول وثلاث أحماض دهنيّة عبر إضافة جزيئات من الماء.

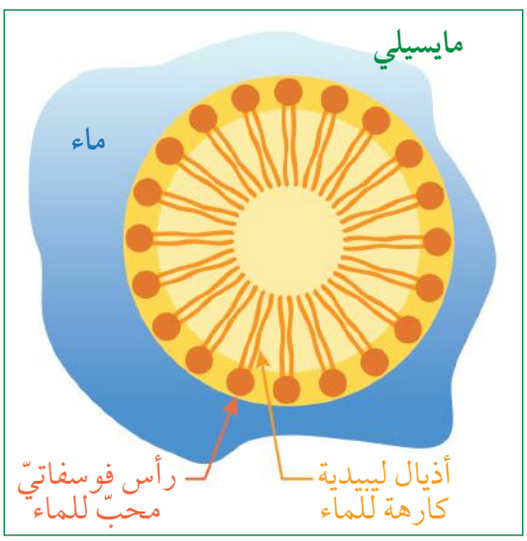


شكل 1-30 يكسر تفاعل التّحلّل المائيّ روابط أستر في الجليسيريد الثّلاثيّ (a) من خلال تفاعلات مع ثلاثة جزيئات ماء لإنتاج جزيء جليسيرول وثلاثة أحماض دهنيّة (b).

الأغشية الخلويّة

تحتاج الكائنات الحيّة كلّها إلى حدود تفصل بيئتها الدّاخليّة عن بيئتها الخارجيّة، وهذه الحاجة ضروريّة أيضًا حتّى على مستوى الخليّة الواحدة. وإنّ حقيقة أنَّ جزيئات الماء قطبيّة هي مفتاح فهمِنا **الأغشية الخلويّة Cell membranes**.

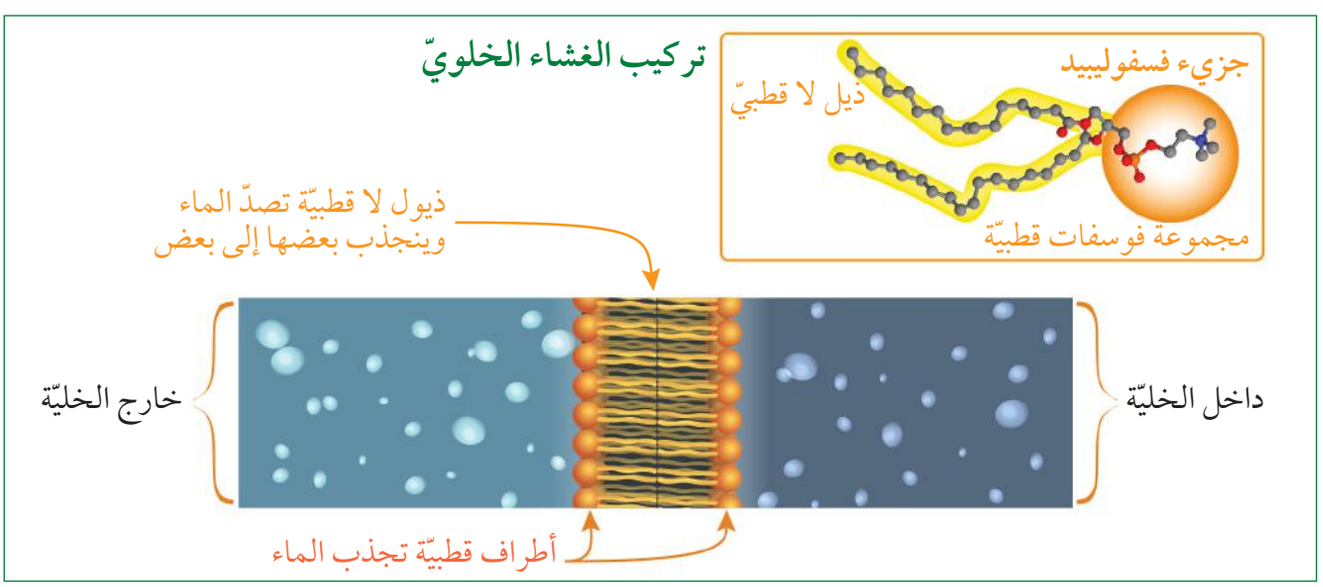
إنّ **الفسفوليبيد Phospholipid** هو الجزء الأساسي في أغشية كلّ خليّة من خلايا الكائنات الحيّة جميعًا. يتكوّن الفسفوليبيد من «رأس» هو مجموعة جليسيرول مرتبطة بها مجموعة فوسفات قطبيّة، و«ذيل» مؤلَّف من سلسلتَيْنِ هيدروكربونيّتَيْنِ لاقطبيّتَيْنِ. إنّ هذا الفارق في القطبيّة هو الّذي يحدّد طريقة ترتيب تلك الجزيئات في الماء؛ فالرّأس الفوسفاتيّ القطبيّ **محبّ للماء Hydrophilic**، فيما الذّيل اللّاقطبيّ **كاره للماء hydrophobic**، ويتنافر معه. ويظهر في (**الشّكل 1-31**) كيف تتجمّع اللّيبيدات المفَسْفَرة معًا وتشكّل **مايسيليات Micelles** في الماء.



شكل 1-31 تشكّل الفسفوليبيدات مايسيليات في الماء.

تتكوّن الأغشية الخلويّة في الكائنات الحيّة من طبقة مزدوجة من جزيئات الفسفوليبيد.

تتكوّن الأغشية الخلويّة من طبقة مزدوجة من جزيئات الفسفوليبيد (**الشّكل 1-32**). وتتّجه الذيول غير القطبيّة إلى الجهة الدّاخليّة للغشاء لأنّ بعضها ينجذب إلى بعض، فيما تتّجه الأطراف القطبيّة إلى الجهة الخارجيّة للغشاء لأنّها تنجذب إلى جزيئات الماء.



شكل 1-32 يتكوّن الغشاء الخلويّ من طبقة مزدوجة من الفسفوليبيدات.

4-1 الكيمياء الحيويّة للطعام

سؤال الاستقصاء	ما مقدار السّكّر والدّهون والبروتين المتوافر في الطعام؟
الموادّ المطلوبة	طعام، محلول بندكت، محلول بيوريت، صبغ سودان III، قطّارات، محلول اليود، أوراق بنية، أنابيب اختبار، حامل أنابيب اختبار، ماء مقطَّر، حمّام ماء ساخن 55°C – 65°C.

الخطوات

1. احضر 1g من الطعام الذي تريد اختبار الكربوهيدرات فيه، واقطع منه قطعة بحجم حبة البازلاء وضعها في أنبوب اختبار. ثمّ أضف إليها قطرتين من محلول اليود لتختبر وجود النشا. سجل نتائجك.
2. ضع كمية الطعام الباقية مع 10 mL من الماء المقطر و20 mL محلول بندكت في أنبوب اختبار، وضع 10 mL من الماء المقطر مع 20 mL من محلول بندكت في أنبوب ثان، ثمَّ سخّن الأنبوبَيْنِ في حمّام الماء لمدّة 5 دقائق، ولاحظ ما يحصل وأنت تحرّكها دائريًا بلطف. سجّل النّتائج.
3. أضف قطعة طعام صلب بحجم حبّة بازلّاء تعتقد أنها تحتوي على بروتين في أنبوب الاختبار. كرّر الخطوة مستخدمًا أنبوبًا ثانيًا واضعًا الماء المقطَّر بدلًا من قطعة طّعام، واستخدم هذا الأنبوب كضابط للتّجربة. رُجَّ الأنبوبَيْنِ بلطف كي تختلط المكوّنات، ثمّ لاحظ تغيُّر اللّون. سجّل النّتائج.
4. أضف كمّية 1 g من طعام تظن أنه يحتوي على دهون إلى أنبوب مع كمّية مساوية من الماء المقطّر حتّى منتصَفه. جهِّزْ ضابطًا للتّجربة، بالحجم نفسه، من الماء المقطَّر في أنبوب ثانٍ. أضفْ ثلاث قطرات من صبغ سودان III إلى كلٍّ من الأنبوبَيْنِ، وهزَّهما بلطف. سجّل النّتائج.

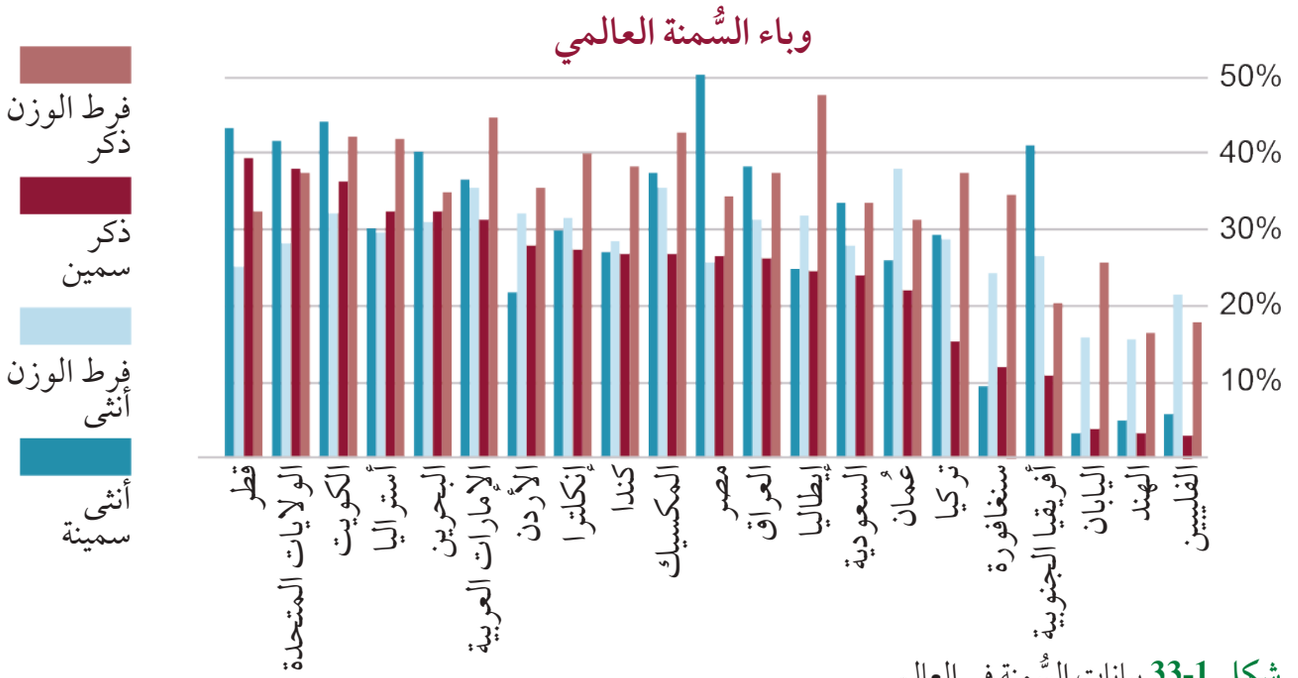
صمِّم تجاربك

a. ما الغاية من أنابيب الاختبار الضّابطة للتّجربة؟
b. اُكتبْ اسئلة عمّا تحتويه أنواع مختلفة من الأطعمة من الدّهون، أو البروتين، أو السّكّر.
c. صمِّمْ تجربة توفِّر لك بيانات قد تجيب عن أسئلتك، وتأكَّد من تصميم عيِّناتك الضّابطة للتّجربة بعناية.
d. نَفِّذِ التّجربة ودوّن استنتاجاتك بعد تحليل البيانات المجمَّعة.
e. هل احتوى أيّ طعام على كمّيّة من البروتين، أو من الدّهون، أو من السّكّر، أكثر ممّا توقَّعْتَ؟

العلم وحياتي

السّمنة

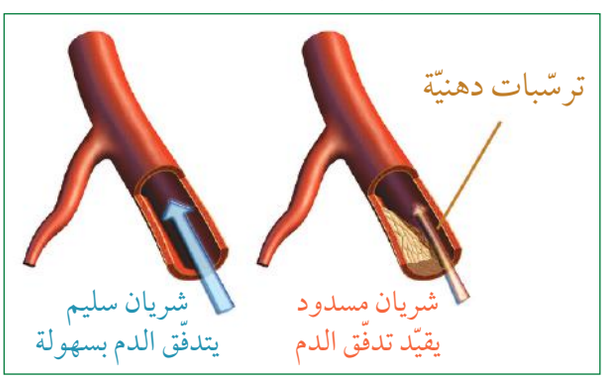
باتَتْ الأطعمة الغنيّة بالسّكّر والدّهون في متناول جميع النّاس حول العالم، في أيّامنا هذه. وقد تطوّرَتْ أجسامنا عبر الزّمن لنأكل ونخزّن كمّيّة احتياطيّة تنفعنا عندما يندر وجود الطّعام. إلّا أنّ لهذه الغريزة، في عصرنا، انعكاساتها السّلبيّة، فنحن نأكل أكثر ممّا نحتاج. وكما ترى، فإنّ أكثر من 25% من سكّان العالم النّامي يعانون السُّمنة، ويشمل ذلك الرّجال والنّساء معًا. ويظهر أنَّ دولة قطر تملك معدّلات سمنة عالية بين البلدان الّتي تناولها الاستبيان (**الشكل 1-33**).



شكل 1-33 بيانات السُّمنة في العالم.

ماذا يفعل جسمك بالأطعمة الدّهنيّة، كالبطاطا المقليّة؟ تطلق الدّهون 9 سعرات حراريّة للجرام الواحد، وهذه الطّاقة أكثر من ضعفَيْ ما تنتجه الكربوهيدرات، أي 4 سعرات حراريّة للجرام الواحد. تتحوّل كمّيّة معيّنة من الدّهون إلى طاقة يتمّ استخدامها في الجسم، أمّا الفائض فيطفو في الدّم إلى أن يجري تخزينه في النّسيج الدّهنيّ (دهن الجسم).

يمكن للدّهون الفائضة أن تترسّب على الجدران الدّاخليّة لشرايينك فتسبّب تصلّب الشّرايين atherosclerosis (**الشّكل 1-34**). يضيّق هذا المرض الخطير مجرى الدّم ويرفع ضغطه. وهو يُعَدُّ سببًا رئيسًا للنّوبات القلبيّة والسّكتات الدّماغيّة.



شكل 1-34 تسبّب التّرسّبات الدّهنيّة مرض تصلّب الشّرايين.

تقويم الدّرس 1-4

1. أيّ من المركّبات الحيويّة الثّلاثة يوفّر أكبر كمّيّة من الطّاقة عند استهلاكه؟
   a. الكربوهيدرات
   b. اللّيبيدات
   c. البروتينات

2. صِف التّركيب الكيميائيّ لجزيءٍ من الدّهون.

3. ما الفارق بين الدّهون المشبَعة والدّهون غير المشبَعة؟

4. في رأيك، واستنادًا إلى شكل الجزيئات، ما السّبب الّذي يجعل الدّهون غير المشبَعة سائلة في درجة حرارة الغرفة، بينما تبقى الدّهون المشبَعة صلبة؟

5. ما المجموعة الوظيفيّة الّتي تجعل سلسلة هيدروكربونيّة حمضًا دهنيًّا؟

6. تشكّل جزيئات _____ طبقة مزدوجة في كلّ الأغشية الخلويّة لدى الكائنات الحيّة.

7. يتفاعل حمض الأسيتيك مع الإيثانول ethanol لينتج استر بواسطة تفاعل تكثيف بنائيّ.
   a. ابحث في تركيب حمض الأسيتيك والإيثانول.
   b. حدّد تركيب الإستر الّذي يتكوّن.
   c. ابحث في اسم الاستر الّذي يتكوّن.
   d. هل يتوافر هذا المركّب في الطّبيعة، وهل يُستخدَم في المجالات التّكنولوجيّة؟

8. ماذا تعني عبارة «محبّ للماء» وعبارة «كاره للماء»؟ كيف تتوافق هاتان الكلمتان مع فهمنا للّيبيدات الموجودة في الجسم؟

الدّرس 1-5

البروتينات والأحماض الأمينيّة

Proteins and Amino Acids

تستطيع أن ترى الشّكل الأساسيّ لأيِّ بناء من مسافة بعيدة، لكنّك كلّما اقتربْتَ، لاحظْتَ أنّ البناء مصنوع من وحدات متكرِّرة مثال ألواح الزّجاج وقطع الطّوب.

تحتوي جزيئات البروتينات على 10,000 ذرّة أو أكثر، وهي تتكوّن، أيضًا، من وحدات متكرِّرة. تتألّف ملايين البروتينات الموجودة في الكائنات الحيّة على سطح الأرض من عشرين نوعًا من «قطع الطّوب» الكيميائيّة، وتُسَمّى الأحماض الأمينيّة. ويُعدُّ شكل البروتين المعقَّد، الّذي يحدِّد وظيفة البروتين نفسه، ناجمًا عن تسلسل أحماضه الأمينيّة وعن كيفيّة التفافها في شكل ثلاثيّ الأبعاد.

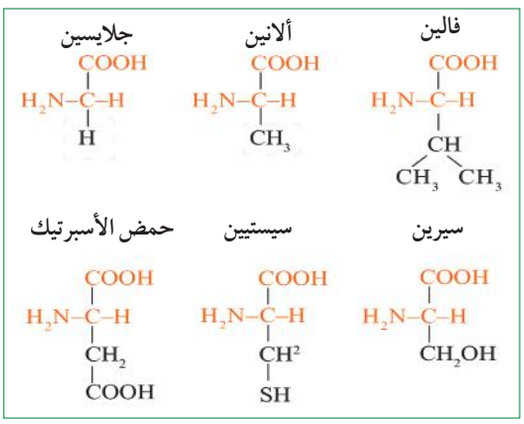
مخرجات التّعلُّم

B1104.1 يتعرّف إلى تركيب وخصائص الأحماض الأمينيّة في البروتينات.

B1104.2 يصف تكوُّن وتكسُّر الرّابطة الببتيديّة في البروتينات.

B1104.3 يشرح التّركيب الأوّليّ والثّانويّ والثّالثيّ والرّابعيّ للبروتينات.

B1104.4 يصف أنواع الرّوابط الّتي تحافظ على شكل جزيئات البروتين.



المفردات

البروتينات الدّفاعيّة	Defensive proteins
المستقبلات البروتينية	Receptor proteins
البروتينات الهيكليّة	Structural proteins
البروتينات النّاقلة	Transport proteins
المنظِّمات الوراثيّة	Genetic regulators
البروتين	Protein
رابطة ببتيديّة	Peptide bond
عديد الببتيد	Polypeptide
الحمض الأمينيّ	Amino acid
البروتيوم	Proteome
الأنزيم	Enzyme
الهرمون	Hormone
جزيء الرّكيزة	Substrate molecule
التّركيب الأوّليّ	Primary structure
لولب ألفا	Alpha helix
صفائح بيتا	Beta pleated sheet
التّركيب الثّانويّ	Secondary structure
التّركيب الثّالثيّ	Tertiary structure
التّركيب الرّابعيّ	Quaternary structure
الموقع النَّشِط	active site
التّكثيف	Condensation

البروتينات

سؤال للمناقشة

ما هو البروتين؟

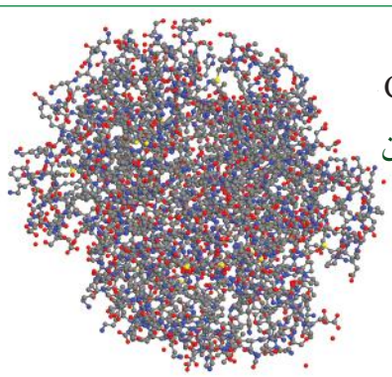
البروتين Protein جزيء حيويّ كبير مكوّن من **عديد ببتيد Polypeptide** واحد أو أكثر، وكل عديد ببتيد يتشكَّل من مونومرات تُسمّى **الأحماض الأمينيّة Amino acids** مرتبطة معا بروابط ببتيدية. وتؤدّي البروتينات وظائف عديدة في الكائنات الحيَّة، فهي تشارك في العديد من العمليّات الحيويّة في الخلايا؛ وكمثالٍ على ذلك الهيموجلوبين، وهو البروتين الّذي ينقل الأكسجين في الدّم (الشكل **1-35**).

المحتوى الغذائيّ

التركيب الكيميائي الحيوي

$C_{2952}\ H_{4664}\ O_{832}\ N_{812}\ S_8\ Fe_4$

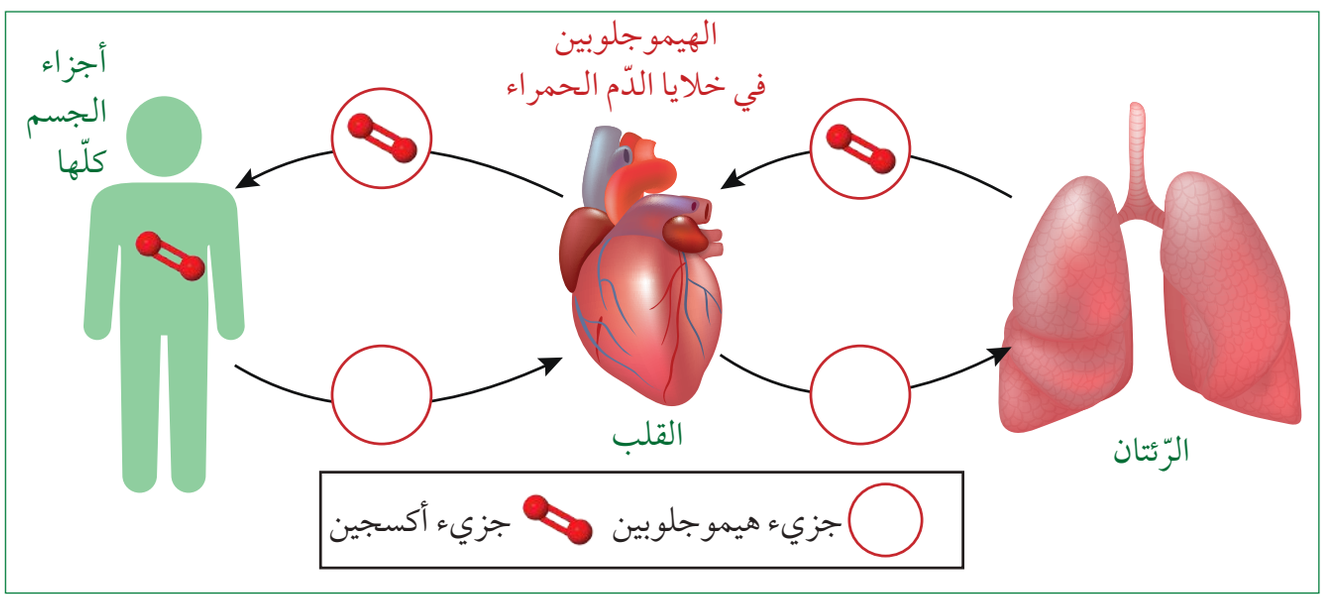
جزيء الهيموجلوبين هو بروتين



شكل 1-35 البروتينات الحيويّة فئة من الجزيئات العملاقة، كالهيموجلوبين.

إنّ البروتينات جزيئات كبيرة للغاية؛ فعلى سبيل المثال، تحتوي الصّيغة الكيميائيّة للهيموجلوبين على 9,272 ذرّة في الجزيء الواحد مقارنةً بجزيء الجلوكوز الّذي يحتوي على 24 ذرّة.

والهيموجلوبين بروتين ناقل، يشكِّل معظم كتلة خلايا الدّم الحمراء. فعندما تمرّ هذه الخلايا في داخل الرّئتَيْنِ (**الشّكل 1-36**)، يلتقط الهيموجلوبين الأكسجين، ينقله عبر الجسم، ويطلقه إلى الخلايا، ثمّ يكمل دورته ليعودَ ثانيةً إلى الرّئتَيْنِ حيث يحمل مجدَّدًا الأكسجين.



شكل 1-36 الهيموجلوبين هو بروتين ينقل الأكسجين في الدّم.

أنواع البروتينات

تُسمّى البروتينات «الوحدات البنائيّة للحياة»، إذ تؤدّي جزيئاتها وظائف حيوية عديدة (**الشّكل 1-37**). وفي عصرنا الحاليّ، تجري أبحاث مكثّفةٌ لتصنيف البروتينات المختلِفة في جسم الإنسان، بحيث يعتقد العلماء أنَّ هناك، على الأقلّ، 20,000 بروتين فريد في الخليّة. تُسمّى دراسة البروتينات علوم البروتيوميات proteomics، فيما تُسمّى قائمة البروتينات الكاملة في الكائن الحيّ **البروتيوم Proteome**.

الأنزيمات Enzymes، وهي محفِّزاتٌ تَقومُ بتسريع التّفاعلات الكيميائيّة الحيويّة؛ فالسّكَّريز أنزيمٌ يحلّل السّكَّروز إلى جلوكوز وفركتوز.

البروتينات الدّفاعيّة Defensive proteins، تضمّ الأجسام المضادّة الّتي تتعرّف إلى الخلايا أو إلى الأجسام الغريبة في داخل الجسم وتستجيب لها.

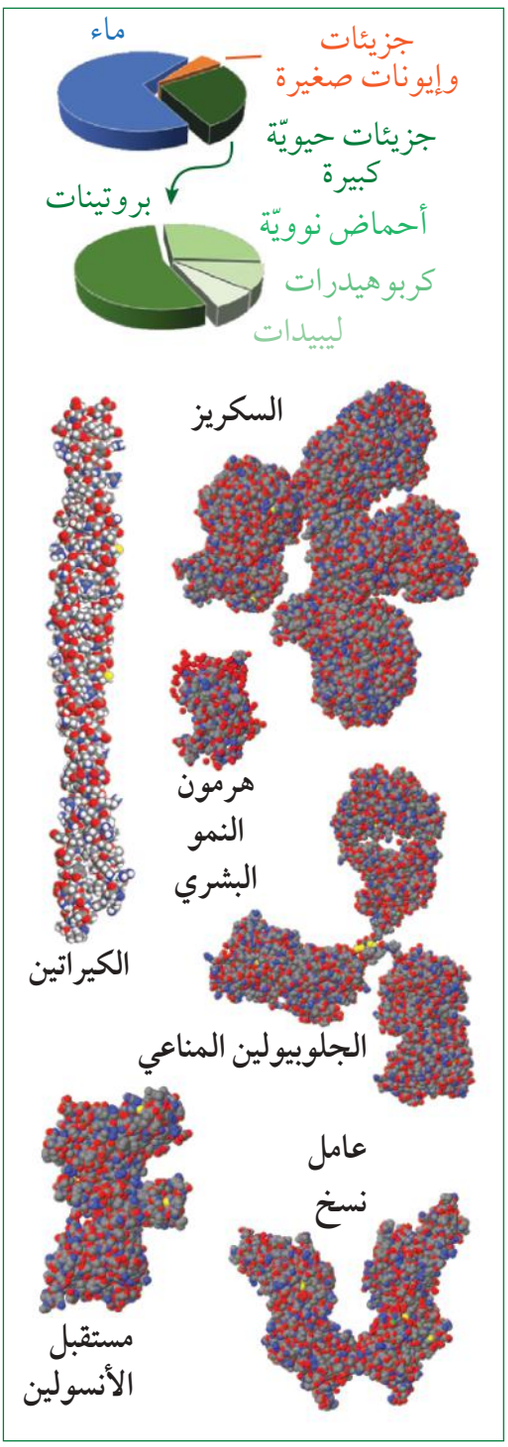
الهرمونات Hormones وهي بروتينات يجري إفرازها في داخل الجسم لتنظِّم العمليّات الحيويّة فيه. يُعَدُّ هرمون النّموّ البشريّ مثالٌ على الهرمونات، وهو يحفز نموّ الخلايا.

المستقبلات البروتينية Receptor proteins تستجيب للإشارات الكيميائيّة في داخل الجسم وخارجه؛ فعلى سبيل المثال، يستجيب مستقبل الأنسولين لهرمون الأنسولين.

البروتينات الهيكليّة Structural proteins تدخل في التّراكيب الّتي تتحمّل القوى في الجسم، كالأوتار والأربطة، ويُعدُّ الكيراتين keratin الموجود في الشّعر والأظفار وريش الطّيور مثالًا على هذه البروتينات.

البروتينات النّاقلة Transport proteins تنقل المواد من مكان إلى آخر داخل الجسم، والهيموجلوبين الذي ينقل الأكسجين مثال عليها.

المنظِّمات الوراثيّة Genetic regulators وهي بروتينات تُعْرَفُ بعوامل النّسخ الّتي تتحكّم بمتى وكيف وإلى أيّ مدى يتمّ التّعبير عن جينٍ ما.



شكل 1-37 الوظائف المختلفة للبروتينات في الكائنات الحيّة.

الأحماض الأمينيّة

سؤال للمناقشة

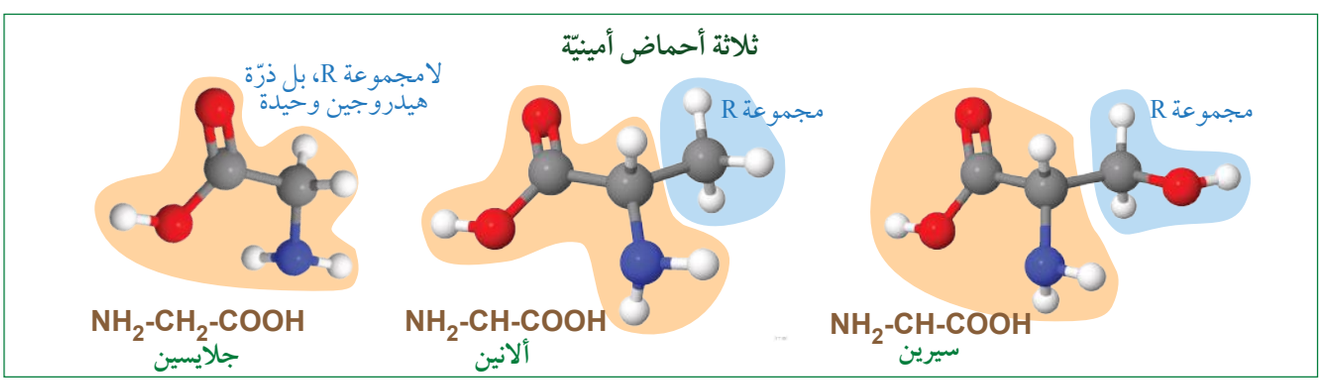
بماذا تختلف البروتينات فيما بينها؟

ما هو الحمض الأمينيّ؟

البروتين جزيء حيويّ كبير يتكوّن من ارتباط عدد من الوحدات الصغيرة الّتي تُسمّى **الأحماض الأمينيّة Amino acids**. تُعدّ البروتينات من البوليمرات، وتملك أحماضًا أمينيّة كمونومرات. وخلافًا للنّشا والسّليولوز، لا تَكونُ مونومرات البروتين كلّها متماثلةً، إذْ يتكوّن كلّ بروتين من تسلسلٍ فريدٍ من الأحماض الأمينيّة الّتي لا تتجاوز العشرينَ نوعًا.

وتُعدّ الأحماض الأمينيّة جزيئات صغيرة، في كلٍّ منها مجموعة أمين ($-NH_2$) ومجموعة كربوكسيل ($-COOH$) تتّصلان بذرّة كربون مركزيّة. لذا، تختلف الأحماض الأمينيّة فيما بينها، في التّفرُّع الباقي المتّصِل بذرّة الكربون المركزيّة، وتُسمّى تلك التّفرّعات المختلِفة السّلسلة الجانبيّة، أو مجموعة R-. ويحتوي كلّ حمض أمينيّ على مجموعة R مختلِفة عن الاحماض الامينية الاخرى ومتّصِلة بالتّركيب نفسه $NH_2\text{-}C\text{-}COOH$.

يظهر الشّكل الآتي الأحماض الأمينيّة ، الجلايسين glycine، والألانين alanine، والسّيرين serine. هل تستطيع أن تلاحظ كلًّا من الجزء المشترك والجزء المختلف في كلّ جزيء من الجزيئات الثّلاثة (الشّكل 1-38)؟



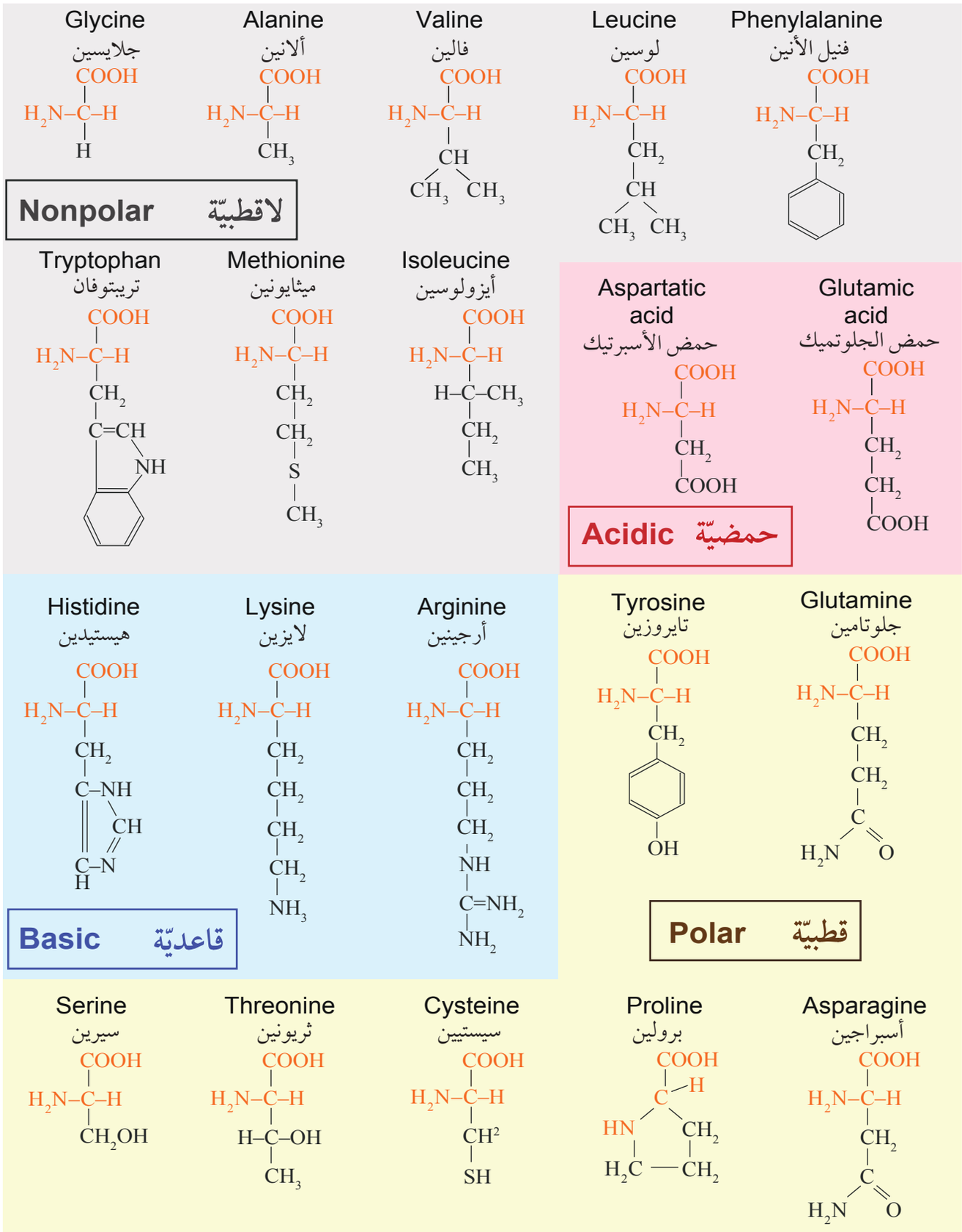
شكل 1-38 تضمُّ الأحماض الأمينيّة كلّها التّركيب $NH_2\text{-}C\text{-}COOH$ المركزيّ نفسه، ومجموعات R مختلفة.

تشكّل الأحماض الأمينيّة الوحدات البنائيّة للبروتينات، وتتشارك جميع الكائنات الحيّة على الأرض في 20 حمضًا أمينيًّا.

ينتجُ من الاتحادات بين الأحماض الأمينيّة العشرين الموجودة في الطّبيعة تنوّعٌ ضخم في الجزيئات الحيويّة. وكما تتشكّل معاني الكلمات من اختلاف ترتيب أحرفها، تختلف البروتينات باختلاف ترتيب أحماضها الأمينيّة.

الأحماض الأمينيّة العشرون في الحياة على الأرض

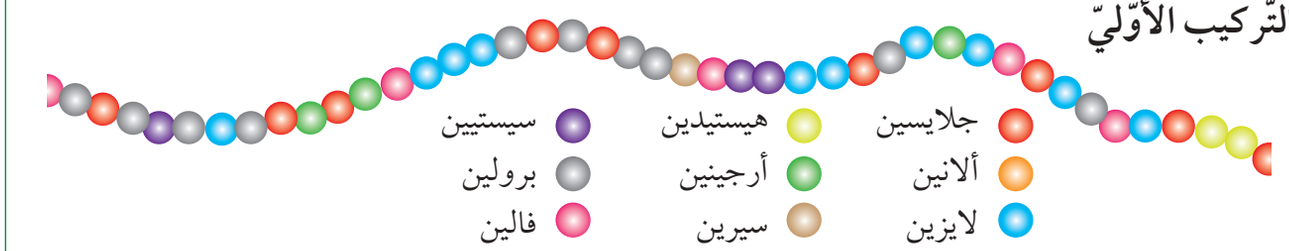
تظهر، في الجدول الآتي، الأحماض الأمينيّة العشرون الموجودة في جميع الكائنات الحيّة على الأرض، وتصنَّف في أربع فئات: الحمضيّة، القاعديّة، القطبيّة، اللّاقطبيّة. تؤثر هذه الفئات الأربع في طريقة التفاف البروتين ليعطيَ شكله الثّلاثيّ الأبعاد، هذا الشّكل الّذي يحدِّد كيف يؤدّي البروتين وظيفته في الجسم.



التّركيب الأوّليّ للبروتينات (بوليمرات)

يحدّد التّسلسلُ الدّقيق للأحماض الأمينيّة وعددُها هويّةَ البروتين، بحيثُ تختلف أنواع البروتينات مع تغيُّر عدد الأحماض الأمينيّة وترتيبها.

تُسَمّى سلسلة الأحماض الأمينيّة في البروتين **التّركيب الأوّليّ Primary structure**. وتحتوي معظم البروتينات على سلسلة تتضمّن مئة حمض أمينيّ على الأقلّ، في حين تحتوي البروتينات الضّخمة على آلاف الأحماض الأمينيّة. يظهر في **(الشّكل1-39)** جزء قصير من التّركيب الأوّليّ لأحد البروتينات.

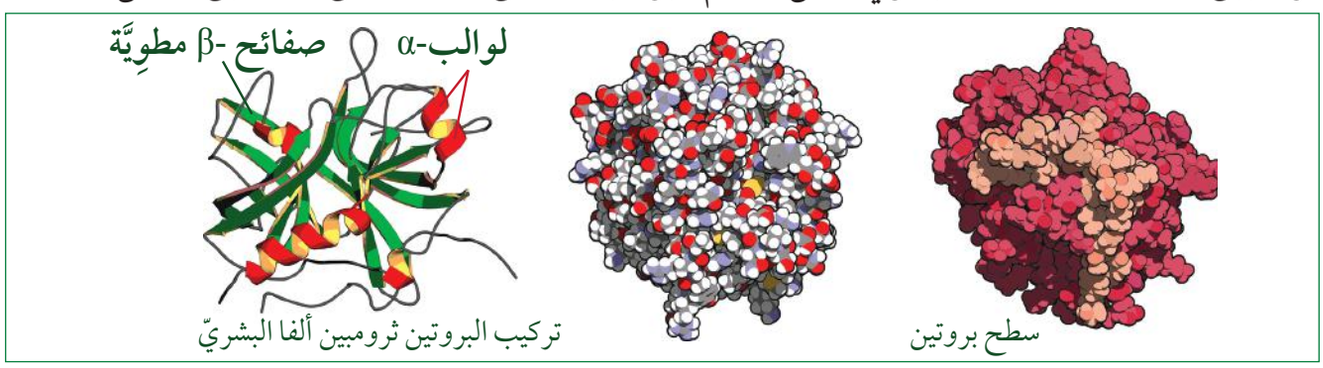


شكل 1-39 يتمثّل التّركيب الأوّليّ للبروتين في تسلسل الأحماض الأمينيّة فيه.

التّركيب الثّانوي للبروتين

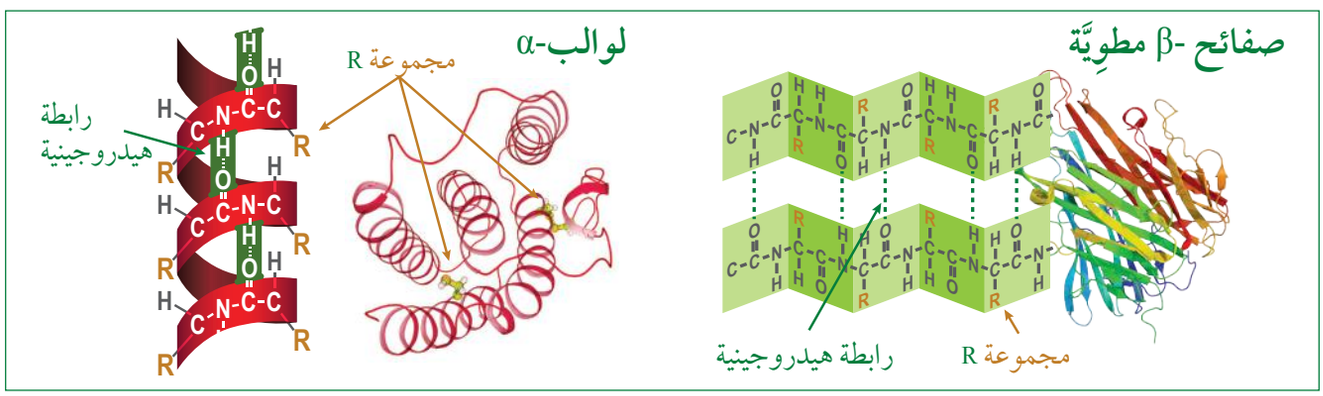
إنَّ شكل سطح البروتين هو الّذي يحدِّد كيف يؤدّي البروتين وظائفه، ويعتمد هذا الشّكل على طريقة التفاف التّركيب الأوّليّ على نفسه.

التّركيب الثّانويّ Secondary structure للبروتين يَصِفُ شكلَ سلسلة الأحماض الأمينيّة. وهناك شكلان شائعان هما **لولب α Alpha helix**، **وصفيحة β مطويّة (beta pleated sheet)**. يشبه لولب-α الزّنبرك، أمّا صفيحة -β المطوية فهي تشبه قُصاصة ورق طويلة مطوِيَّة. يتشكّل البروتين ثرومبين alpha-thrombin البشريّ، مثل معظم البروتينات، من اتّحاد هذَيْن الشَّكلَيْن(**شكل 1-40**).



شكل 1-40 التّركيب الثّلاثي الأبعاد للبروتين البشريّ ثرومبين ألفا.

يتشكل ويلتف لولب ألفا عند تكون روابط هيدروجينية بين مجموعة أمين ($-NH_2$)، وبين الأكسجين في مجموعة كربونيل (C = O) على السّلسلة نفسها (**الشّكل 1-41**)؛ يتميز لولب ألفا بمرونته حيث أنه يستطيع أن يتمدد كما يفعل الزنبرك، وتمنح هذه الخاصية البروتين إمكانية تغير شكله كما يحصل أثناء حركة الخلايا وانقسامها. كما تتّجه مجموعات R المتبقّية نحو الخارج، حيث تتفاعل مع البيئة المحيطة بها. تتميّزُ الألياف الطبيعيّة، كالصّوف والشَّعر والأوتار والعضلات، بشكل لولب-α.

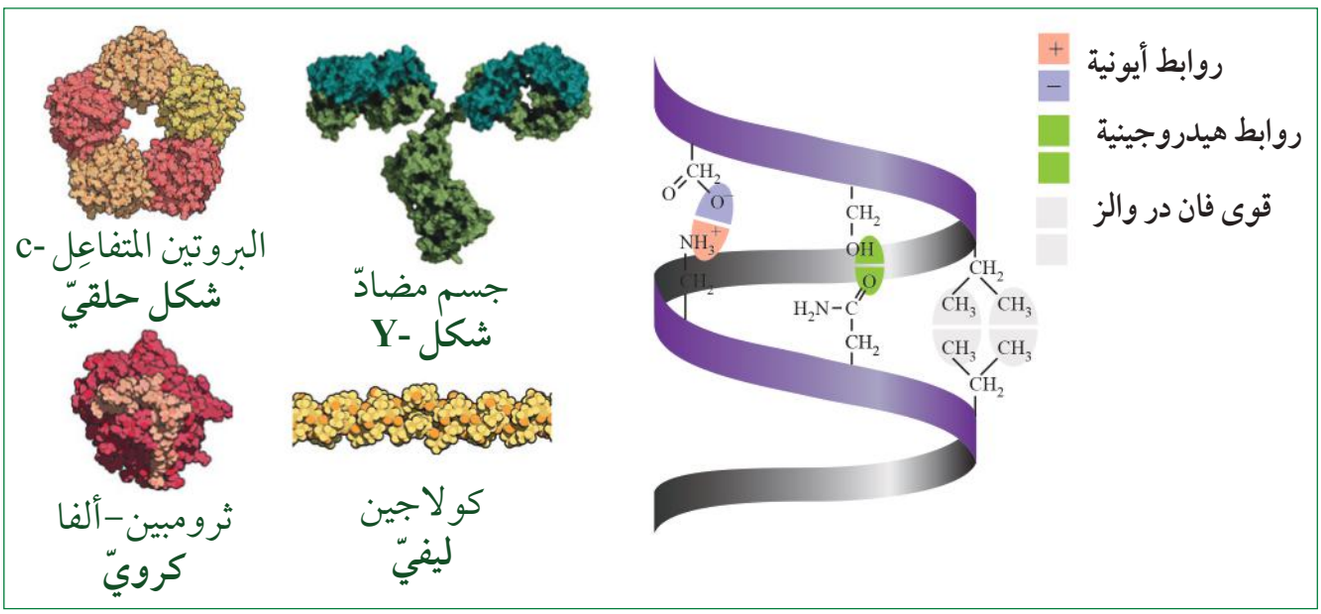


شكل 1-41 الرّوابط الهيدروجينيّة في لوالب-α وصفائح -β المطوِيَّة.

من جهة أخرى، تتميّز الأحماض الأمينيّة الكبيرة، كالتّايروزين tyrosine والتّريبتوفان tryptophan، بسلاسل جانبيّة ضخمة لا تناسب لولب-α، فتشكِّل، بدلًا من ذلك، صفائح -β مطويّة. لكي تَسْتَطيعَ إدراك شكل الصّفائح المطويَّة هذه، تخيَّل أنَّك ترسم سلسلة بوليمرعلى امتداد الهامشَيْنِ الأيمن والأيسر لصفحةٍ من ورق، ثمّ تطويها بشكلٍ متعرّجٍ كالأكورديون. تتألَّف الصفيحة بيتا المطوية من سلسلتَيْنِ جانبيَّتَيْنِ أو أكثر، جنبًا إلى جنب، مع روابط هيدروجينيّة بينها.

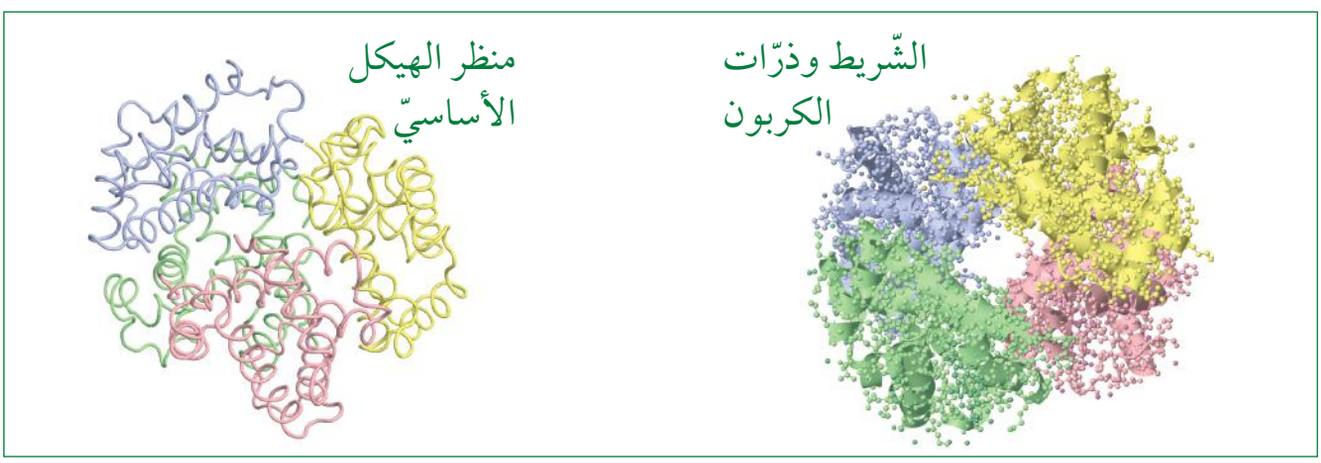
التّركيب الثّالثيّ والتّركيب الرّابعيّ

يُسَمّى الشّكل العامّ الثّلاثيّ الأبعاد للبروتين **التّركيبَ الثّالثيّ Tertiary structure**. لابدّ من أن تفكّر في كلّ ما تعلَّمْتَهُ عن الرّوابط والقوى الجاذبة، كالرّوابط الهيدروجينيّة والأيونيّة والتساهميّة بين الجسور الكبريتيّة، والتّجاذبات بين الجزيئات المشحونة أو القطبيَّة، وكذلك التّفاعلات المتبادَلة بين ما هو محبّ للماء وما هو كاره للماء؛ كلّ هذه المفاهيم تتحكَّمُ بحدوث التّفاعلات الّتي تجعل تراكيب اللّولب-α والصفيحة بيتا المطويّة تلتفّ أو تنحني لتشكّل التّركيب الثّالثيّ. يمكن للبروتينات أن تأخذ أشكالًا مختلفة ومتعدّدة (**الشّكل 1-42**).



شكل 1-42 التّركيب الثّالثيّ لبعض البروتينات.

يُعَدُّ بروتين الهيموجلوبين البشريّ مثالًا جيّدًا على **التّركيب الرّابعيّ Quaternary structure** للبروتين (**الشّكل 1-43**). يصف التّركيب الرّابعيّ كيفيّة تشكيل البروتينات الكبيرة بوِساطة انضمام بضعة بروتينات صغيرة إلى بعضها؛ فالهيموجلوبين مثلًا يضمُّ أربع سلاسل منفصلة من البروتينات.



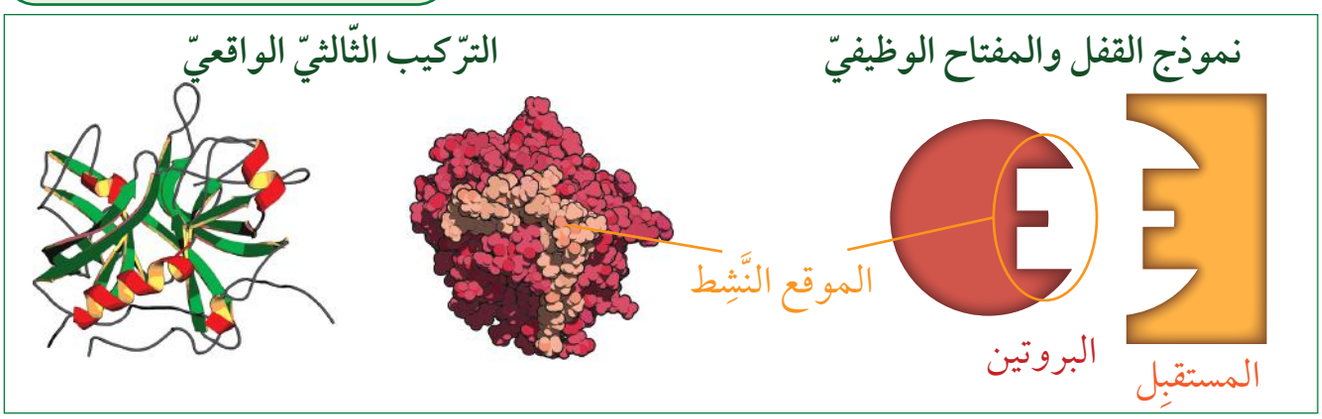
شكل 1-43 يظهر تركيب الهيموجلوبين الرّابعيّ أنَّ الجزيء يضمُّ أربع سلاسل منفصِلَة متشابِكَة في ما بينها.

نموذج وظيفيّ للبروتينات

سؤال للمناقشة

كيف تعمل البروتينات في الجسم؟

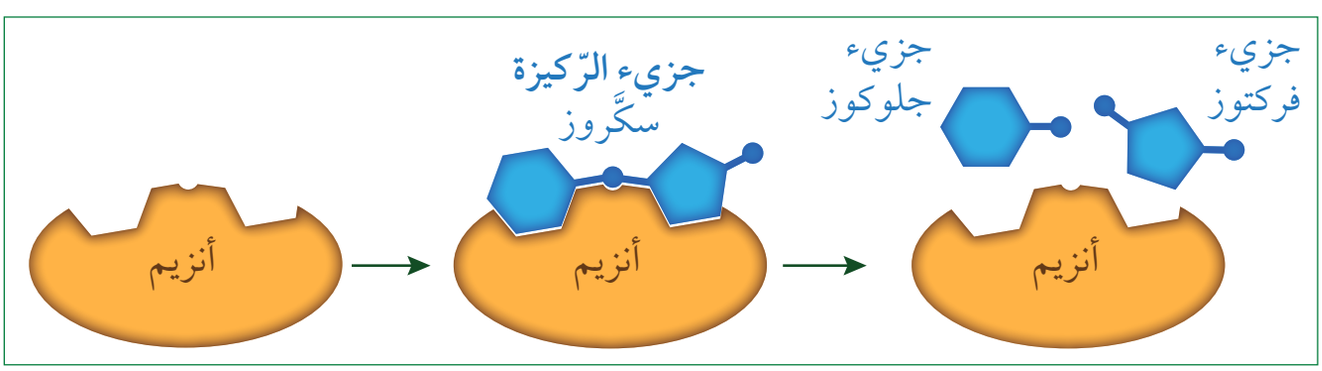
يظهر (**الشّكل1-44**) نموذج «القفل والمفتاح» للمساعدة على فهم طريقة عمل البروتينات في الجسم. فلِلبروتين شكل يتكامل مع شكل بروتين آخر، قد يكون مستقبِلًا، فيكون عمل البروتين الارتباط بالمستقبِل، فيسبّب فعلًا كيميائيًّا.



شكل 1-44 أشكال البروتينات تحدِّد وظائفها.

وتعدّ الأنزيمات بروتينات كبيرة تعمل كمحفِّزات حيويَّة للتَّفاعلات الكيميائيَّة في الكائنات الحيَّة. إنَّها ترتبط **بجزيئات الرّكيزة Substrate molecule** عبر منطقة صغيرة على الأنزيم تُسَمّى **الموقع النَّشِط active site**. يتكامل شكل جزيء الرَّكيزة مع شكل الموقع النَّشِط فيستقرّ في موقع ملائم للتّفاعل الكيميائيّ. ويحدِّد التّركيب الثّالثيّ للبروتين شكل الموقع النَّشِط. إذًا، تعمل آلاف الأنواع من الأنزيمات في داخل جسم الإنسان، حيث يحفِّز كلٌّ منها تفاعلًا خاصًّا به.

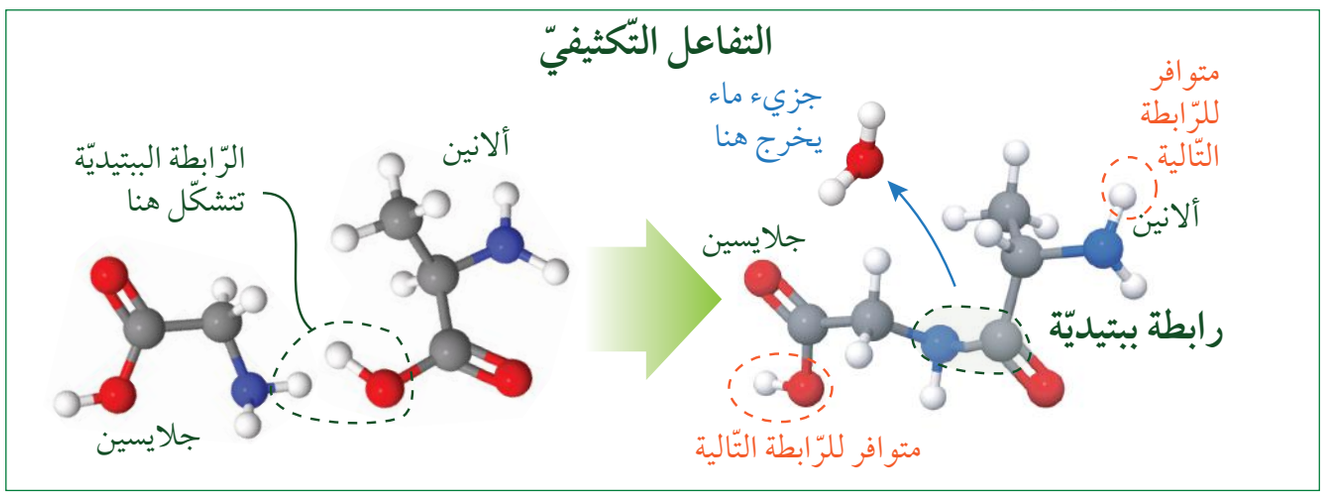
وتمامًا كمطابقة القفل لمفتاحه الخاصّ، يأخذ كلّ أنزيم ركيزةً كمفتاحٍ ذي شكلٍ خاصّ به لبدء التّفاعل. إذًا، يملك الأنزيم ركيزة محدَّدة؛ فأنزيم السكريز sucrase الَّذي يقسم السّكَّروز إلى جلوكوز وفركتوز لن يعمل على أيِّ جزيء آخر غير السّكَّروز. وبشكل عامّ، يختصّ كلّ موقع نشِط بتفاعل كيميائيّ واحد، فتقوم بعض الأنزيمات بتكسير الجزيئات كما في مثال السّكَّروز، بينما تقوم أنزيمات أخرى بجمع الجزيئات مع بعضها كما يحصل عند بناء البروتينات(**شكل 1-45**).



شكل 1-45 ترتبط الأنزيمات بجزيئات الرَّكيزة في الموضع الأفضل لحصول التَّفاعل الكيميائيّ.

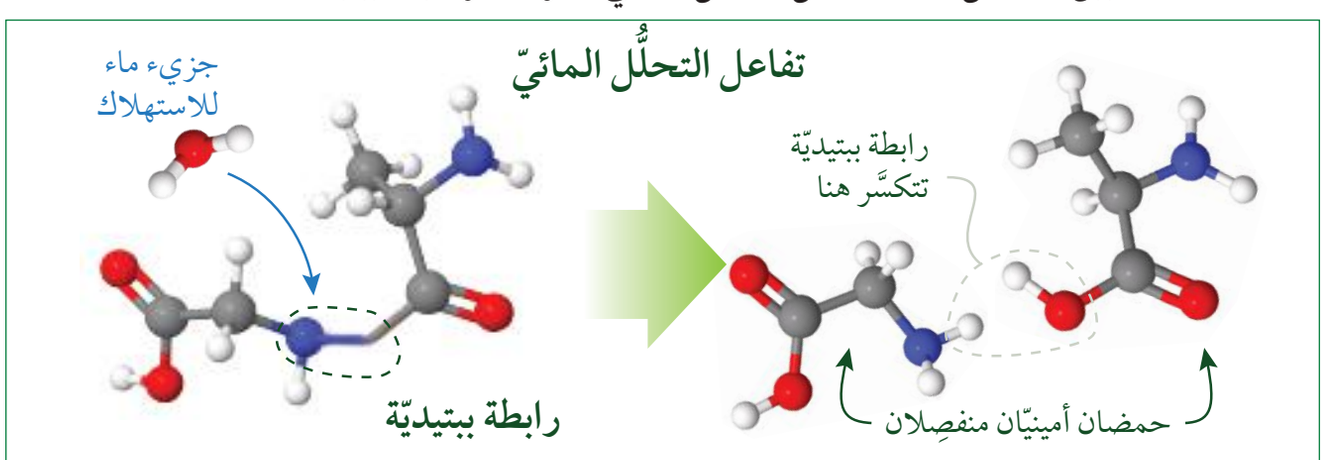
التفاعل التّكثيفيّ والتّحلُّل المائيّ

ترتبط الأحماض الأمينيّة معًا لتشكِّل البروتينات بوِساطة تفاعل يُسمّى **التّكثيف Condensation**، وهو يحصل عندما تتشكَّل **رابطة ببتيديّة Peptide bond** بين مونومرَيْنِ من الأحماض الأمينيّة. لدى كلّ حمض من الأحماض الأمينيّة العشرين المهمّة للحياة مجموعتا الكربوكسيل والأمين ذاتهما، وهما اللّتان تشكِّلان الرّابطة الببتيديّة. تعمل مجموعتا الكربوكسيل والأمين تمامًا كحلقة الوصل الّتي تربط عربتَي قطارٍ معًا. تتّحد مجموعة الكربوكسيل التّابعة لحمض أمينيّ مع مجموعة الأمين التّابعة للحمض الأمينيّ التّالي.



شكل 1-46 تفاعل البناء التّكثيفيّ للأحماض الأمينيّة.

يبيِّن (**الشّكل 1-46**) تكوّن الرّابطة الببتيديَّة بين الحمضَيْن الأمينيَّيْن جلايسين وألانين. يُسمّى هذا التّفاعل التكثيف، لأنّ جزيء ماء يتكثَّف، أي يخرج تاركًا مجموعة أمين ومجموعة كربوكسيل جاهزتَيْن كي يتشكّل ثنائي ببتيد dipeptide أو يرتبط الحمض الأميني بأحماض أمينية أخرى. بالمقابل، فإنَّ البروتينات تتفكَّك أيضًا في الكائنات الحيّة. فالبروتين الّذي تأكله لن يُستخدَم بالشّكل نفسه الّذي تم أكله، بل إنّه يتفكَّك إلى أحماض أمينيّة منفرِدة في خلال عمليّة الهضم. عندها، تستخدم كلّ خليَّة في جسمك الأحماض الأمينيّة لتعيد تركيبها على شكل بروتينات تحتاج إليها الخليَّة. يُسمّى التَّفاعل الّذي يفكِّك البروتين **التّحلُّل المائيّ Hydrolysis**. يبيِّن (**الشّكل 1-47**) تفاعل التّحلُّل المائيّ وهو يكسر رابطة ببتيديّة.



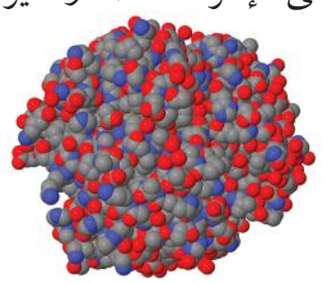
شكل 1-47 يكسر تفاعل التّحلُّل المائيّ الرّابطة الببتيديّة.

5-1 تركيب البروتينات

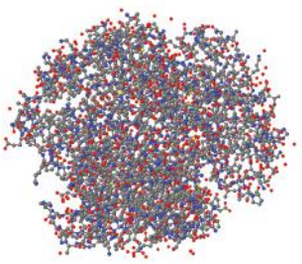
سؤال الاستقصاء	كيف تبدو جزيئات البروتين في الواقع؟
الموادّ المطلوبة	جهاز كومبيوتر وإنترنت، باوربوينت أو أيّ تطبيق آخر لعرض الرُّسوم

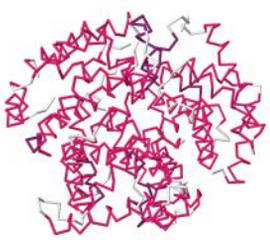
مشروع بحث

الغاية من هذا المشروع هي العثور على بروتين لكل من الوظائف الّتي تؤدّيها البروتينات، إلى جانب رسم صورة لذلك البروتين، مع إعطاء بعض المعلومات الأساسيّة عنه. مع الإشارة إلى أنّ في الإنترنت مصادر كثيرة توفِّر مشاهِد جزيئيّة وقواعد بيانات لتركيب البروتينات.


نمط ملء الفراغ

نمط الشّريط


نمط الكرة والعصا


نمط الهيكل الأساسيّ

بالنّسبة إلى كلّ بروتين:

a. ما اسم البروتين؟

b. اِبحث عن نموذج ثلاثيّ الأبعاد للبروتين، واحفظ لقطةً أو أكثر للشّاشة لتضمّنها في عرضك. حاول الحصول على أشكال عديدة، كالشّريط، والكرة والعصا، والنّماذج السّطحيّة، بحيثُ يبيّن كلّ شكل تفاصيلَ معيَّنة في التّركيب، أفضل ممّا تفعله الأشكال الأخرى.

c. ما وظيفة البروتين في الجسم؟

d. هل تستطيع أن تحدِّد الصّيغة الكيميائيَّة أو الوزن الجزيئيّ للبروتين؟

وظائف البروتين

- أنزيم
- بروتين دفاعيّ
- هرمون
- مستقبل بروتيني
- بروتين تركيبيّ
- بروتين ناقل
- بروتين منظّم وراثيّ

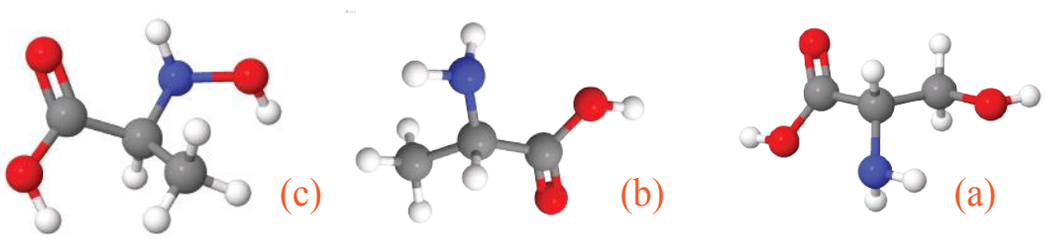
تقويم الدّرس 1-5

1. أُذكر أربع وظائف تؤدّيها البروتينات في الكائنات الحيَّة.

2. بمَ يختلف بوليمر البروتين عن أيّ بوليمر آخر، كالبولي إثيلين أو البولي أسيتال؟

3. أُرسم المخطط البنائي ثمَّ أعطِ الصّيغة الكيميائيّة للأحماض الأمينيّة الثّلاثة الآتية:
   a. فالين
   b. سيرين
   c. ألانين

4. أحد الأشكال الآتية ليس شكلًا لحمض أمينيّ. أيُّها ليس حمضًا أمينيًّا؟ أَجِبْ موضِّحًا كيف عرفْتَ؟



5. أيٌّ من الآتي يصف التّركيب الأوّليَّ للبروتين بالشّكل الأفضل؟
   a. ترتيب الأحماض الأمينيّة في السِّلسلة.
   b. شكل السِّلسلة كصفيحة مطويَّة أو لولب.
   c. الشّكل الثّلاثيّ الأبعاد لسطح البروتين.

6. صح أم خطأ: إذا كان بروتينان يتألَّفان من تسلسل الأحماض الأمينيّة نفسه، لكن من نمطَي التفافٍ مختلفَيْن، فإنَّهما سيؤدّيان وظائف حيويّة مختلفة.

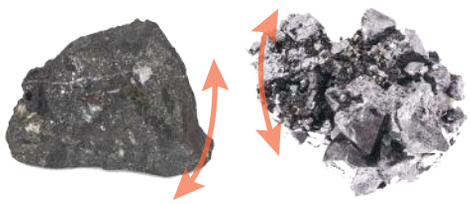
7. تُضاف الأحماض الأمينيّة إلى سلسلة بروتينيّة بوِساطة تفاعل _____.

8. أُذكرْ برهانًا علميًّا يدعم فكرة أنّ أشكال الحياة على الأرض مرتبطةٌ حيويًّا بعضها ببعض. يجب أن يستند برهانك إلى الأفكار الَّتي يتضمَّنها هذا الدّرس.

9. ما الوظيفة الَّتي يتمّ فيها الاستعانة بنموذج «القفل والمفتاح» لأجل فهمها؟
   a. ترتبط البروتينات بجزيئات ركائز خاصَّة بها.
   b. تثبّت الرّوابط الهيدروجينيّة سلسلة البروتين في شكل لولب أو صفيحة مطويَّة.
   c. تتكامل سلاسل الأحماض الأمينيّة في التّركيب الثّالثيّ للبروتين.

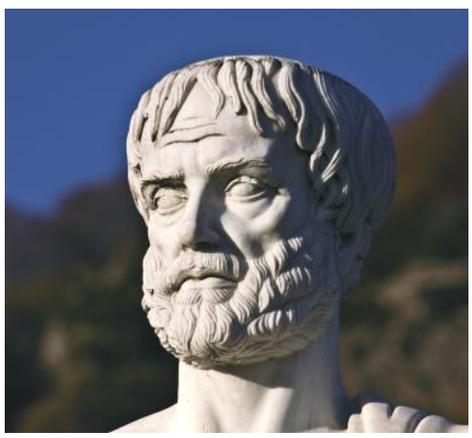
إكتشاف الكيمياء الحيوية

ما الفرق بين المادة المكوّنة للكائنات الحية والمادة غير الحية؟ هذا السؤال مطروح منذ آلاف السنين. عاش طاليس في مدينة ميليتوس التي تقع حاليا في تركيا، وقد اقترح في عام 585 قبل الميلاد نظرية تقول بأن المغنطيس الموجود في الصخر المغنطيسي lodestone هو ميزة الحياة (**الشكل 1-48**). وكان الناس في زمان طاليس يعتقدون أن كل شيء يتحرك بنفسه هو حي.



شكل 1-48 تستطيع الأحجار المغنطيسية أن تجعل بضها تتحرك لكنها ليست حية.

بدأت كيمياء الحياة مع أرسطو Aristotle الذي كان والده المولود في مدينة ستاجيرا اليونانية عام 384 قبل الميلاد طبيب الملك (**شكل 1-49**). أُرسل أرسطو الشاب في السابعة عشرة إلى أثينا للدراسة في أكاديمية أفلاطون، وقد بقي هناك طوال عشرين سنة. وعلى جزيرة لسبوس التقى أرسطو الزميل العالم ثيوفراستوس، وأسسا عن طريق العمل معا علم الأحياء، وقد درس أرسطو الحيوانات بينما درس ثيوفراستوس النباتات.



شكل 1-49 تمثال أرسطو في مدينة ستاجيرا اليونانية مسقط رأسه.

يعتبر أرسطو أبا علم الأحياء، وقد نشرت أعماله العظيمة «تاريخ الحيوانات» و«أجزاء الحيوانات» و«في كون الحيوان» حوالي عام 350 قبل الميلاد، لكنها مفقودة حاليا. ومن حسن الحظ أن تلك الكتب كانت ترجمت إلى العربية وحفظت بوساطة العلماء العرب بعد تهاوي اليونان. وقد قام ارسطو أيضا بالبحث عن الفرق بين الحي وغير الحي، وعن معنى أن يكون الكائن حيا كتب أربعة مظاهر في مؤلفه «التاريخ الطبيعي Parva naturalia»:

«يمكن تلخيص أكثرها أهمية في أربعة أزواج: الاستيقاظ والنوم، الشباب والهرم، الشهيق والزفير، الحياة والموت. يجب أن نحاول الوصول إلى تصور علمي لهذه الأمور، وتحديد طبيعتها، وأسباب حصولها.»

لم تكن الأسباب الكيميائية الحيوية للعمليات الحيوية لتكتشف لألفي سنة تالية، فقد كان يجب أن يسبقها اكتشاف علم الكيمياء أولا وبعده اكتشاف الذرات.

الوحدة 1

مراجعة الوحدة

الدّرس 1-1: كيمياء الحياة

- تمتلك الكائنات الحيّة **جزيئات عملاقة Macromolecules** كالليبيدات والكربوهيدرات والبروتينات من أجل دعم التّفاعلات الكيميائية المعقدة.
- يبدأ **الطيف البيولوجي Biological spectrum** عندما تنتظم الجزيئات غير الحيّة في أنظمة حيّة تتدرج في تعقيدها من الكائنات الحيّة إلى الأنظمة البيئيّة والغلاف الحيوي.
- **الهيدروكربونات Hydrocarbons** مركّبات من الهيدروجين والكربون.
- **الكيمياء العضويّة Organic chemistry** هي كيمياء الكربون ومركّباته.
- إن معظم الجزيئات العملاقة **بوليمرات Polymers** عضويّة ذات هياكل من ذرّات الكربون الّتي تكوّن سلاسل طويلة أو سلاسل متفرّعة أو حلقات.
- **التّكثيف Condensation** هو **بلمرة Polymerization** تجمع الجزيئات عبر إزالة جزيئات الماء، و**التحلّل المائي Hydrolysis** يفكّك البوليمرات عبر إضافة الماء.

الدّرس 1-2: الماء

- يشكل الماء **المذيب Solvent** الشامل في كيمياء الكائنات الحيّة.
- إنّ الماء **قطبيّ Polar** ويمكنه إذابة المواد القطبية بسهولة.
- تمنح **الرابطة الهيدروجينية Hydrogen bonding** الماء ميزات حيويّة نافعة وهي: كونه سائلًا ضمن نطاق واسع من درجات الحرارة، **التوتّر السّطحي Surface tension**، **التّماسك Cohesion**، **الخاصيّة الشّعرية Capillary action**.
- إن الرقم الهيدروجيني pH للأحماض acids أقل من سبعة، والرقم الهيدروجيني للقواعد أكبر من سبعة.

الدّرس 1-3: الكربوهيدرات

- تشكل **الكربوهيدرات Carbohydrates** الوسائل الأولية لنقل الطاقة الكيميائية بين الكائنات الحيّة وفي داخلها.
- إنّ الكربوهيدرات البسيطة هي **سكريات** أحادية monosaccharides، **كالجلوكوز Glucose** و**الفركتوز Fructose** و**الجالاكتوز Galactose**.
- **السكّريّات الثنائيّة Disaccharides**، كالسكروز **Sucrose** تحتوي على سكّريَنْ أحاديَّين.
- الكربوهيدرات المعقّدة كالنشا **Starch** والسليلوز **Cellulose** والجلايكوجين **Glycogen** عديدة التسكّر **Polysaccharides**.
- إن أكل المزيد من الكربوهيدرات أو النوع الخطأ منه يمكن أن يؤدّي إلى السُّمنة وهي أحد أسباب السكّر.

الوحدة 1

مراجعة الوحدة

الدّرس 1-4: الليبيدات

- **الليبيدات Lipids** مركّبات حيويّة تضم الدهون والزيوت والشموع والستيرويدات.
- تخزن النّباتات والحيوانات الطاقة في الدهون.
- **الجليسيريدات الثلاثية Triglycerides** فئة مهمة من الدّهون وهي تتكوّن من **الجليسيرول Glycerol** المرتبط بثلاث سلاسل من **الأحماض الدّهنية Fatty acid** بواسطة **روابط أستر Ester bonds**.
- تنكسر رابطة الأستر في خلال تفاعل **التحلُّل المائي hydrolysis**.
- تحتوي **الدهون المشبعة Saturated fats** على أقصى عدد ممكن من ذرات الهيدروجين دون أية روابط تساهمية ثنائية في سلاسل الأحماض الدهنية.
- تمتلك **الدهون غير المشبعة Unsaturated fats** رابطة تساهمية ثنائية C = C واحدة أو أكثر ضمن سلسلة حمض دهني أو أكثر.
- تدخل **الفسفوليبيدات Phospholipids** في تكوين جميع الأغشية الخلوية، ولديها طرف **كاره للماء Hydrophobic** وآخر **محب للماء Hydrophilic**. تتكتّل الفسفوليبيدات في الماء مكوّنة **مايسيليات Micelles**.
- تنقل **البروتينات اللّيبيديّة Lipoproteins** الدّهون في الدم.

الدّرس 1-5: البروتينات والأحماض الأمينيّة

- البروتينات بوليمرات حيويّة مكوّنة من مونومرات تسمّى **الأحماض الأمينيّة Amino acids** التي تتصل ببعضها لتكوّن سلاسل عديدة **البيتيدات Polypeptide**. تتكوّن بروتينات جميع الكائنات الحيّة على كوكب الأرض من الأحماض الأمينيّة العشرين نفسها.
- **البروتيوم Proteome** هو مجموع البروتينات كلّها في كائن حي، وهي تشمل **الأنزيمات Enzymes** و**الهرمونات Hormones** وأنواع أخرى.
- يتمثل **التركيب الأولي Primary structure** للبروتين في تسلسل الأحماض الأمينيّة.
- يصف **التركيب الثانوي Secondary structure** الطريقة التي تلتف بها سلاسل الأحماض الأمينيّة لتشكّل لوالب أو صفائح مطوية.
- يصف **التركيب الثّالث Tertiary structure** الشكل الثلاثي الأبعاد للبروتين.
- يصف **التركيب الرابعي Qaternary structure** كيفية ارتباط السلاسل المتعددة معا في البروتينات المكونة من أكثر من سلسلة واحدة من الأحماض الأمينيّة.
- تستهدف الأنزيمات، كالسكريز، **جزيئات ركائز Substrate molecules** خاصة، كالسكروز.
- تتركّب البروتينات بواسطة تفاعلات **التّكثيف Condensation** وتتفكّك بواسطة تفاعلات **التحلُّل المائي Hydrolysis**.

اختيار من متعدِّد

1. أيّ من الآتي **ليس** جزءًا من الطّيف الحيويّ؟
   - a. بكتيريا
   - b. صدفة السّرطان
   - c. طبقة من العشب الميت
   - d. ماء المحيط

2. أي رمز **ليس** واحدًا من أكثر العناصر توفّرًا في الإنسان؟
   - a. Na
   - b. K
   - c. Mn
   - d. Zn

3. أي من الآتي خطأ؟
   - a. الميثان هيدروكربون بسيط.
   - b. صيغة الميثان هي CH_4.
   - c. الميثان حمض أميني مهم.
   - d. يحترق الميثان بوجود الأكسجين ليطلق الطّاقة.

4. أي خاصيّة للماء هي الأكثر أهمّيّة لكل الحياة على الأرض؟
   - a. جزيئات الماء ثنائيّة الذّرات.
   - b. تحتوي جزيئات الماء على الهيدروجين.
   - c. ارتباط الكربون بالماء ممكن الحصول.
   - d. يستطيع الماء تذويب تنوُّع كبير من المركّبات.

5. أي من الآتي هيدروكربون؟
   - a. القالين
   - b. البنزين
   - c. البولي أسيتال
   - d. الميثيلين جلايكول

6. أيٌّ من هذه العبارات المتعلّقة بالرّابطة الهيدروجينيّة **صحيحة**؟

a. الرّوابط الهيدروجينيّة أضعف من الرّوابط الأيّونيّة أو الفلزيّة.

b. الرّوابط الهيدروجينيّة تنشأ عندما تذوب المواد غير القطبية في الماء.

c. تصل الرّوابط الهيدروجينيّة ذرّات الهيدروجين والأكسجين في جزيء الماء.

d. الرّوابط الهيدروجينيّة هي روابط تساهميّة تربط ذرّات الهيدروجين بعضها ببعض.

7. الجلوكوز:

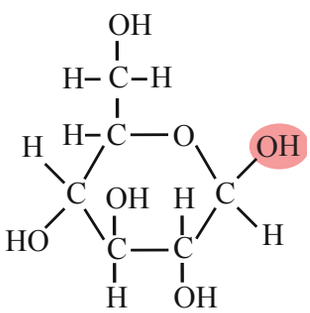
a. موجود في بعض السكّريّات الثنائيّة.

b. يحتوي على الكربون والهيدروجين والنّيتروجين.

c. هيدروكربون

d. كل ما سبق صحيح.

8. المجموعة الملوّنة في الجزيء المقابل هي:



a. مجموعة كربوكسيل

b. مجموعة هيدروكسيل

c. مجموعة ميثيل

d. مجموعة أمين

9. أكثر الكربوهيدرات توفّرًا في الطّبيعة هو:

a. الفركتوز

b. السكروز

c. السليلوز

d. المالتوز

10. الكربوهيدرات التي لا يمكن تحلّلها بالماء إلى كربوهيدرات أبسط هي:

a. محدودة التسكّر

b. عديدات التسكّر

c. السكّريّات الثنائيّة

d. السكّريّات الأحادية

11. أي من الآتي يشمل الدّهون والشّموع والزّيوت والسّتيرويدات؟

a. البروتين
b. اللّيبيد
c. الكربوهيدرات
d. الأحماض النّوويّة

12. أي من الآتي يستخدم لتخزين الطّاقة، ويتركّب من الجليسيرول وثلاثة أحماض دهنيّة؟

a. الجليسيريد الثّلاثيّ
b. الكربوهيدرات المعقّد
c. الفسفوليبيد
d. الجلايكوجين

13. ما عدد سعرات الدّهون الحراريّة المنطلقة من الطّعام أدناه؟

a. 10 g دهون في بيضتين = 80 Cal
b. 360 g دهون في البطاطا المقليّة = 40 Cal
c. 39 g دهون في وجبة سريعة = 351 Cal
d. 23 g دهون في أفوكادو = 105 Cal

14. ما المرض الّذي يرتبط كثيرًا بالسّمنة؟

a. الإيدز
b. السّكّري
c. الكوليرا
d. اللوكيميا

15. الأنزيمات هي في الأساس:

a. دهون
b. كربوهيدرات
c. بروتين
d. معادن

16. أيّ من الآتي ليس إحدى وظائف البروتينات؟

a. نقل الجزيئات عبر الجسم.
b. محفّز للتّفاعلات الكيميائيّة في الجسم.
c. تشكيل عناصر بنيويّة كالأوتار والأربطة.
d. يعمل كجزيء ناقل أوّليّ للطّاقة بين الخلايا.

17. في أي جزيء حيوي تتكوّن الرّابطة الببتيديّة؟

a. الهيدروكربون
b. الكربوهيدرات
c. اللّيبيد
d. البروتين

18. يحدّد تسلسل الأحماض الأمينيّة في البروتين:

a. التّركيب الأوّليّ.
b. التّركيب الثّانويّ.
c. التّركيب الثّالثيّ.
d. التّركيب الرابعيّ.

19. ماذا يحصل من خلال التحلُّل المائيّ؟

a. تتّصل الأحماض الأمينيّة لتكوّن سلسلة عديد الببتيد.
b. يتفكّك البروتين إلى الأحماض الأمينيّة المكوّنة له.
c. تصبح الأحماض الدّهنية مشبّعة من خلال تكسير رابطة C = C التّساهميّة المزدوجة.
d. تصبح الأحماض الدّهنية غير مشبّعة من خلال إضافة رابطة C = C تساهميّة مزدوجة.

20. أي من الآتي أحماض أمينيّة قطبيّة؟

a. جلايسين، آلانين، فالين.
b. أرجينين، هيستيدين، لايزين.
c. سيستيين، برولين، تايروزين.
d. حمض الأسبرتيك وحمض الجلوتاميك.

أسئلة إجابات قصيرة وتفكير ناقد

الدّرس 1-1: كيمياء الحياة

21. ما الكلمة التي تصف جزيء بشكل سلسلة مركّبة من وحدات كيميائيّة مكرّرة.

22. الكيمياء العضويّة هي كيمياء الكائنات الحيّة. ناقش كيف أنّ هذا الكلام صحّ وخطأ في آن واحد.

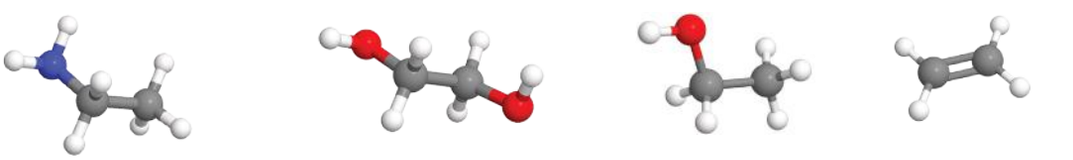
23. ارسم هيدروكربون خماسيّ الكربون مشبّع.

24. أُنظر إلى رسوم الجزيئات في الأسفل.

a. أيّ جزيئين منها يمكن أن يشكّلا بوليمر بواسطة تفاعل تكثيفيّ؟

b. أُرسم تفاعلًا واحدًا، على الأقلّ، يُشكّل بوساطته كلّ جزيء منها بوليمر.

c. اِبحث في اسم البوليمر المتشكّل في الجزء (b). هل هو موجود في الواقع؟ هل يستخدم في التّكنولوجيا، أو هل هو متوافر في الطّبيعة؟



(a) إثيلين (b) إيثانول (c) إثيلين جلايكول (d) إيثيل أمين

الدّرس 1-2: الماء

25. ما أفضليّة المحاليل المائيّة على الهواء بالنّسبة للتفاعلات الكيميائيّة نفسها الّتي تحصل في كليهما؟

26. لماذا يعتقد العلماء أن الماء أفضل مؤشِّر على إمكانيّة وجود الحياة على كواكب أخرى؟

27. رتِّب القوى الآتية من الأضعف إلى الأقوى: القوى بين الجزيئات، الرّوابط الكيميائيّة، الرّوابط الهيدروجينيّة.

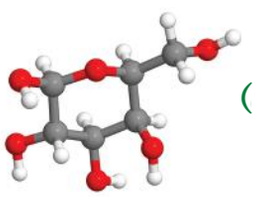
28. الماء جزيء _____ (قطبيّ/ غير قطبيّ) بسبب الشّحنات _____ (المتساوية/ غير المتساوية) ويمكنه تكوين _____ (2 /4) روابط هيدروجينيّة مع جزيئات الماء الأخرى.

29. الحرارة النوعيّة للماء وكثافته ميزتان مهمّتان للكائنات الحيّة. ابحث لماذا واذكر مثالًا على كلٍّ منهما.

الدّرس 1-3: الكربوهيدرات

30. أيّ جزء من جزيء الجلوكوز يتمّ تغييره في أثناء تفاعل البناء التّكثيفيّ؟ ما هو المركّب الّذي يتكوّن كمنتَج ثانويّ بعد تغيير الجزيء؟

31. أيّ من الجزيئين الآتيين هو سكّر؟ ولماذا؟

(a)  (b)

32. صنّف المالتوز كسكر أحادي، أو سكر ثنائي، أو عديد التّسكّر. وأعطِ صيغته الكيميائيّة.

33. ماذا تفعل النّباتات بالسّلّيلوز الّذي تنتجه؟

34. الكربوهيدرات مهمّة للصّحّة العامّة؛ لذا، يُنصح بتناول مجموعة متنوّعة منها لضمان حصولنا على الموادّ الغذائيّة المناسبة.

a. ما هي أبرزُ الأمثلة على الكربوهيدرات البسيطة الّتي تعدُّ صحّيّة؟

b. ما هي أبرزُ الأمثلة على الكربوهيدرات المعقّدة الّتي تعدُّ صحّيّة؟

35. تشمل أمثلة الكربوهيدرات المعقّدة الشّائعة جزيئات النّشا والسّلّيلوز الكبيرة.

a. ما هو الاسم الشّائع للسّلّيلوز الّذي ستراه مطبوعًا على ملصقات التّغذية؟

b. لماذا تعدّ الكربوهيدرات المعقّدة، كالسّلّيلوز، مهمّة لنظامنا الغذائيّ؟

c. ما مقدار الكربوهيدرات الّذي يوصي به اختصاصيو التّغذية في النّظام الغذائيّ اليوميّ؟

36. أُكتب تفاعلًا كيميائيًّا لتحويل جزيء من النّشا مكوّن من 12 مونومرًا من الجلوكوز إلى جزيئات جلوكوز أحادية.

37. ما الإنزيم الموجود في اللُّعاب الّذي يكسر نشا الخبز ويخلق طعمًا حلوًا؟

38. لو لم تكن هناك طريقة لتكسير السّلّيلوز، لكان كوكبنا قد غطّته النّباتات الميتة منذ فترة طويلة. كيف تتخلّص الأرض من السّلّيلوز؟ يجب أن تتوافر في إجابتك ثلاث آليّات مختلفة على الأقلّ، وتحديد الكائن الحيّ أو العمليّة الكيميائيّة المسؤولة. حدّد مصدر السّلّيلوز المُستخدَم لكلّ كائن حيّ أو لكلّ عمليّة كيميائيّة.

الدّرس 1-4: الليبيدات

39. صِف الاختلاف بين جزيئات الدّهن وجزيئات الزّيت.

40. لماذا تتشكّل أغشية الخلايا من طبقتين من الفسفوليبيدات بدلًا من طبقة واحدة فقط؟ يفترض بك أن تستخدم في إجابتك خاصّتَي المحبّ للماء، والكاره للماء لدى جزيئات الليبيدات.

41. صف نتيجة التحلُّل المائيّ لأحد اللّيبيدات.

42. في أي أطعمة غير اللّحوم تجد الدّهون. اذكر ثلاثة منها.

43. ابحث في الجليسيريدات الثلاثيّة.

a. ما أهمّيّة مراقبتها في الدم؟

b. كيف يقيسها الأطبّاء؟

c. هل توجد دهون صحيّة لنأكلها؟ اذكر مصادرها إذا كانت موجودة.

d. ناقش أيُّها أسوأ للصحّة، نظام غذائي غنيّ بالدّهون المشبّعة أو نظام غذائيّ غنيّ بالسّكّر. ادعم مناقشتك بأمثلة.

الدّرس 1-5: البروتينات والأحماض الأمينيّة

44. ما المشترك بين البوليثيلين والسليلوز والبروتينات؟

45. ما خاصّيّة الأحماض الأمينيّة الّتي تجعل من الممكن أن يكون أيّ نبات، أو حيوان غذاءً لأيّ حيوان آخر؟

46. صِف العلاقة بين البروتينات والأحماض الأمينيّة.

47. أُرسم مخطّطًا لتفاعل التّكثيف بين جزيئين من الأحماض الأمينيّة. أُرسم الحمضين المتفاعلين والنّاتجين الجديدين. حوّط الذرّات الّتي تترك الجزيئين المتفاعلين لتشكّل الماء، وعيّن الرّابطة الببتيديّة في البوليمر المتشكّل حديثًا.

48. اذكر اختلافين وتشابهين بين اللّيبيدات والكربوهيدرات والبروتينات.

49. استخدم الإنترنت لزيارة قاعدة بيانات للجزيئات الحيويّة وأجب عن الأسئلة الآتية:

a. ما اسم قاعدة البيانات الّتي وجدتها وأين تحفظ السّجلّات؟

b. ما الهدف منها ومن مستودعات الجزيئات الحيويّة الأخرى عبر الإنترنت؟

50. أكمل المعلومات في الجدول وأجب عن الأسئلة أدناه.

الطّعام (10 g)	السّعرات	% كربوهيدرات	% دهون	% بروتين
تفّاح				
مشروب غازي				
تمر				
رقائق البطاطس				
أرز				

a. أي طعام له أعلى نسبة مئويّة من الكربوهيدرات؟

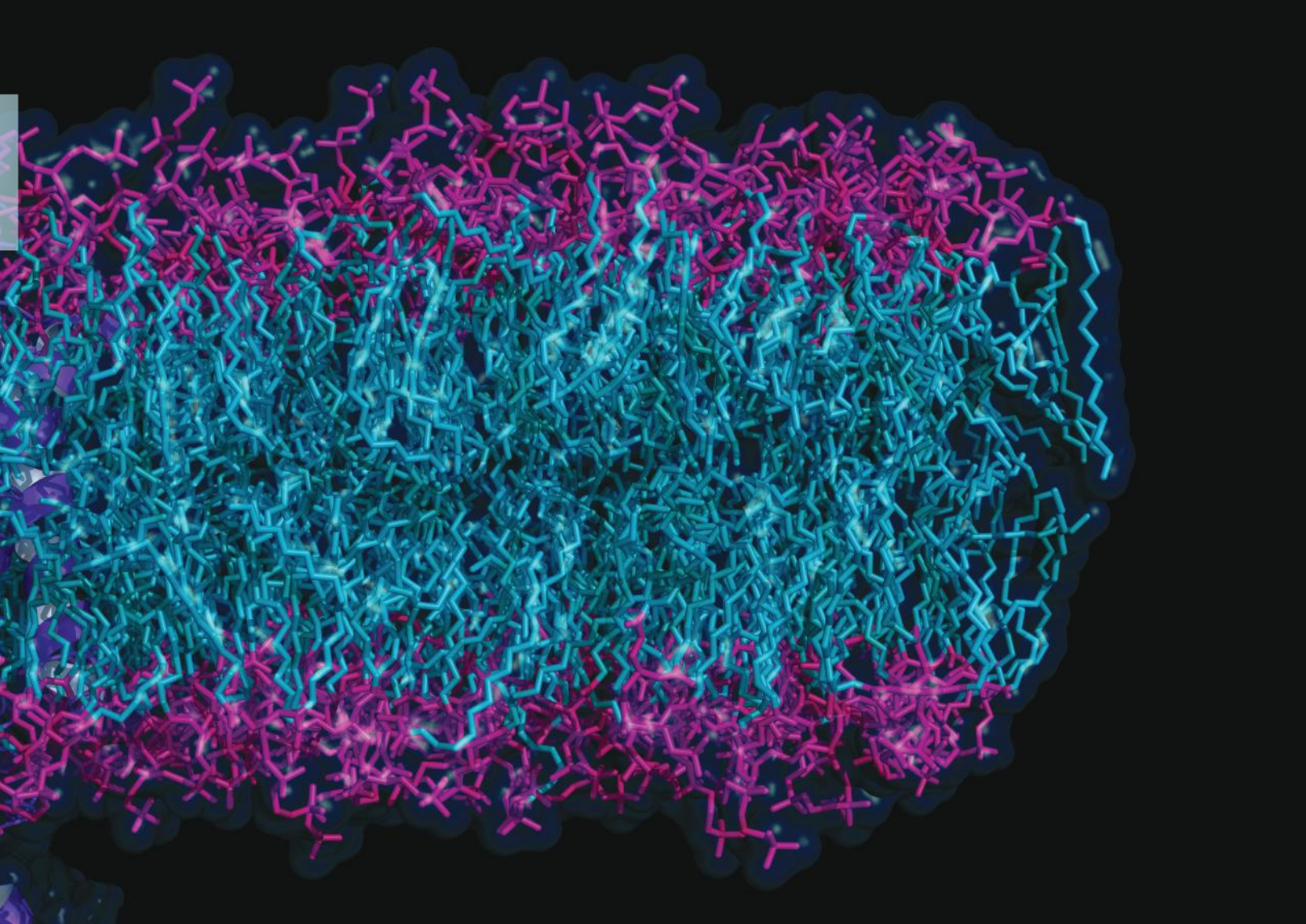
b. أي طعام له أعلى كمّيّة سعرات حراريّة في حصّة من 10 g؟

c. كيف تتشابه جميع هذه الأطعمة فيما يخص تركيبها الجزيئيّ الحيويّ؟

الاستقصاء والبحث

إنّ ذائبية مادة معيّنة هي الكمّيّة القصوى الّتي يمكن أن تذوب في مذيب، ووحدتها النموذجيّة هي g/mL 100. يحتوي المحلول المشبّع على الكمّيّة القصوى من المذاب الذّائب في أيّة درجة حرارة معطاة. تحتوي المحاليل الحيويّة، غالبًا، على مذابات كثيرة ذائبة في آن معًا.

1. صمّم تجربة مضبوطة لقياس ما إذا كان الملح الذّائب يؤثّر في ذائبية السّكر عند 25°C، ونفّذها.
2. صِغ فرضيّة عن تأثير الملح في ذائبية السكر.
3. اُكتب الخطوات الّتي تصف كيف تصنع محلولًا مشبّعًا.
4. صِف كيف تدعم نتائجك فرضيّتك أو تنقضها، واكتب، على الأقلّ، سؤالًا تجريبيًّا واحدًا انطلاقًا من بياناتك.



الوحدة 2

تركيب الخليّة ووظيفتها – الأغشية والنّقل

Cell Structure and Function - Membranes and Transport

في هذه الوحدة

الدّرس 2-1: الأغشية البلازميّة

الدّرس 2-2: النّقل السّلبيّ والنّقل النّشط

الدّرس 2-3: التّنظيم الأسموزيّ في خلايا النّباتات والحيوانات

الوحدة 2

مقدّمة الوحدة

يستند علماء الأحياء إلى الاختلافات في تركيب الأغشية وتكوينها كإحدى الطّرق الّتي تمكّنهم من تحديد هويّة الخلايا وتصنيف الكائنات الحيّة. فبينما تمتلك الكائنات الحقيقيّة النّواة غشاءً خلويًّا يحيط بالخليّة وأغشية إضافيّة تحيط بكلّ عضيّة داخلها، يلاحظ أنّ للكائنات البدائيّة النّواة غشاءً خلويًّا منفردًا يحيط بخلاياها الّتي لا عُضيّات حقيقيّة في داخلها ولا أغشية إضافيّة. يعتقد العلماء أنّ الخلايا بدائيّة النّواة ظهرت أوّلًا، وأنّ الخلايا الحقيقيّة النّواة تطوّرت لاحقًا، وإنّ دليلًا يستند إلى DNA يدعم هذه النّظريّة.

تتكوّن الأغشية الخلويّة من جزيئات حيويّة كثيرة فريدة من نوعها، حيث تعمل البروتينات واللّيبيدات معًا لتلبية حاجات الخليّة حتّى تتمكّن من التّفاعل مع محيطها الخارجيّ. كما يتيح التّنظيم التّركيبيّ للّيبيدات والبروتينات إمكانيّة نقل الموادّ إلى داخل الخليّة وخارجها عبر نوعَي النّقل السّلبيّ والنّشط. تتخذ الخلايا طرائق عديدة للمحافظة على توازن الماء والمحافظة على التّركيز المناسب للموادّ المهمّة القابلة وغير القابلة للذّوبان منها.

B1112
B1113
B1114

الأنشطة والتّجارب

1-2 (a)	خطّ زمنيّ للأغشية الخلويّة
1-2 (b)	ابنِ نموذجًا فسيفسائيًّا مائعًا
2-2 (a)	الانتشار في الموادّ الصّلبة والسّوائل والغازات
2-2 (b)	بناء نموذج للخاصّيّة الأسموزيّة
2-2 (c)	درجة الحرارة والأسموزيّة في جذر البنجر
3-2	فرق جهد الماء في نسيج البصل الأحمر

الدّرس 2-1

الأغشية البلازميّة
Plasma Membranes

تبدو التّصميمات الهندسيّة القديمة الّتي نلاحظها على الفسيفساء الإسلاميّة وكأنّها اتّحادات بين مربّعات ودوائر تتداخل فيما بينها لتشكّل أنماطًا معقّدة، وبالتّالي فإنّ أجود أنواع الفسيفساء لا تصمّمُ من تكرار الوحدات إنّما تكون لوحات فنّيّة متقنة الصّنع. يُسمّى النّموذج الرّاهن للغشاء الخلويّ النّموذج الفسيفسائيّ المائع، ليس فقط بسبب أنماطه المعقّدة، وإنّما بسبب تراكيبه الفريدة الّتي تؤدّي وظائف مختلفة في الكائنات الحيّة.

مخرجات التّعلُّم

B1112.1 يصف النّموذج الفسيفسائيّ المائع لغشاء الخليّة، ويحدّد الجزيئات الحيويّة الّتي تدخل في تكوينه بما في ذلك الفسفوليبيدات والكولسترول، واللّيبيدات السّكريّة، والبروتينات، والبروتينات السّكريّة.

B1112.2 يشرح أدوار المكوّنات الجزيئيّة الحيويّة في غشاء الخليّة، بما في ذلك الفسفوليبيدات، والكولسترول، واللّيبيدات السّكّريّة، والبروتينات، والبروتينات السّكّريّة.

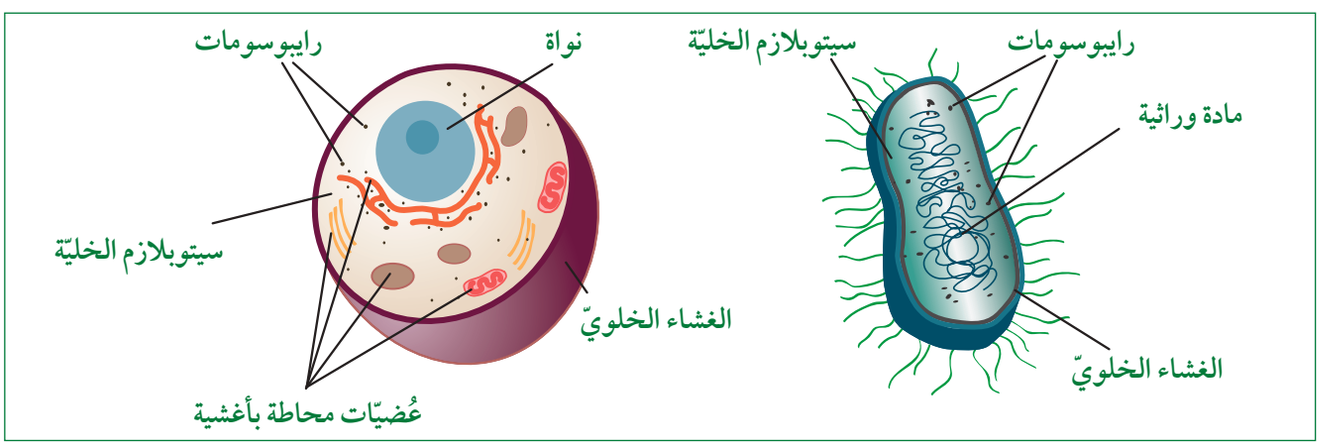
B1112.3 يذكر الوظيفة الأساسيّة للأغشية على سطح الخلايا وداخلها.

المفردات

Endomembrane	الغشاء الدّاخليّ
Lipid bilayer	طبقة الدّهون المزدوجة
Plasma membrane	الغشاء البلازميّ
Plastid	البلاستيدة
Glycoprotein	البروتين السّكّريّ
Fluid mosaic model	النّموذج الفسيفسائيّ المائع
Integral protein	البروتين الغائر
Peripheral protein	البروتين الطّرفيّ
Receptor protein	المستقبل البروتينيّ
Lysis	التّحلّل
Glycolipid	اللّيبيد السّكّريّ
Cholesterol	الكولسترول

الخلايا والأغشية البلازميّة

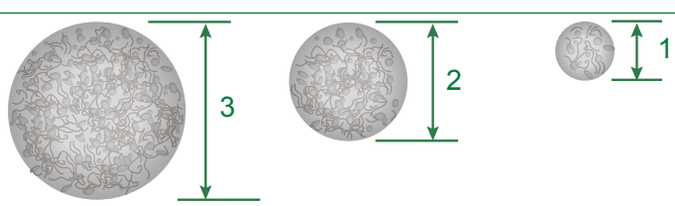
الغشاء البلازميّ Plasma membrane تركيب رقيق ومرن، وهو يتكوّنُ عادةً من طبقة مزدوجة من جزيئات الفسفوليبيدات الّتي تكون متّصلة ببروتينات وجزيئات أخرى. ويسمّى الغشاء البلازميّ الغشاء الخلويّ عندما يقوم بتكوين السّطح الخارجيّ للخليّة. تتكون خلايا الكائنات الحيَّة بنوعيها بدائيَّة النَّواة prokaryotes وحقيقيّة النّواة eukaryotes من سيتوبلازم cytoplasm مغلَّف بغشاء خلويّ. وتتميّز خلايا حقيقيّات النّواة بأنّها تحتوي على أغشية بلازميّة إضافيّة تحيط بالعُضيّات المتخصِّصة (**الشّكل 2-1**). وقد كان ظهور العُضيّات المتخصّصة يمثّل التجديد الحيويّ الّذي أتاح للكائنات الحيّة أن تتطوّر إلى أبعد من الخلايا المنفردة.



شكل 2-1 خليّة بدائيّة النّواة (يمين) وخليّة حقيقيّة النّواة (يسار).

وتكون الخلايا صغيرة الحجم لأنّ هناك حدودًا لمدى سرعة انتشار الجزيئات الّتي تعبر الغشاء الخلويّ إلى داخل الخليّة، ولطول المسافة الّتي تقطعها. لنفترض ان الخلية كروية الشكل، فكلّما كبرت الخليّة (**الشّكل 2-2**) تزداد مساحتها السّطحيّة بمقدار مربّع قطرها، بينما يزداد حجمها بمقدار مكعّب قطرها. تستخدم الخليّة الغذاء وتنتج الفضلات بالتّناسب مع حجمها، غير أنَّها لا تستطيع تبادل الغذاء والفضلات مع بيئتها الخارجيّة إلّا عبر مساحتها السّطحيّة. وعندما تبلغ الخليّة حجمًا معيّنًا، فإنّها تفقد القدرة على الاستمرار بتبادل كمّيّات كافية من الموادّ الخام أو الفضلات عبر مساحتها السّطحيّة بالسّرعة اللّازمة، وذلك لانتشار الجزيئات عبر حجم الخليّة كلّها.

تعدّ المادّة «حيّة» على مستوى الخلايا. فالبروتوبلازم يحتوي على مئات الجزيئات العملاقة الَّتي تتفاعل فيما بينها، وتنظّم الخلايا التَّفاعلات في تراكيب تؤدّي عمليّات حيوية، مثل تنظيم عمليات الطّاقة والتّكاثر.

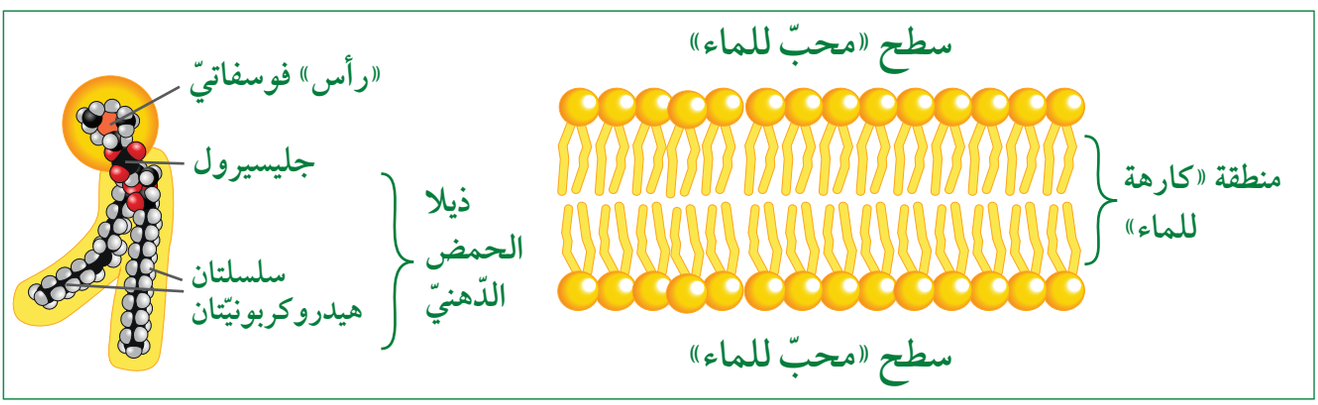


المساحة السّطحيّة	3	13	28
الحجم	0.52	4.2	14
المساحة السّطحيّة / الحجم	**6**	**3**	**2**

شكل 2-2 نسبة المساحة السّطحيّة إلى الحجم لثلاثة أحجام خلويّة مختلفة.

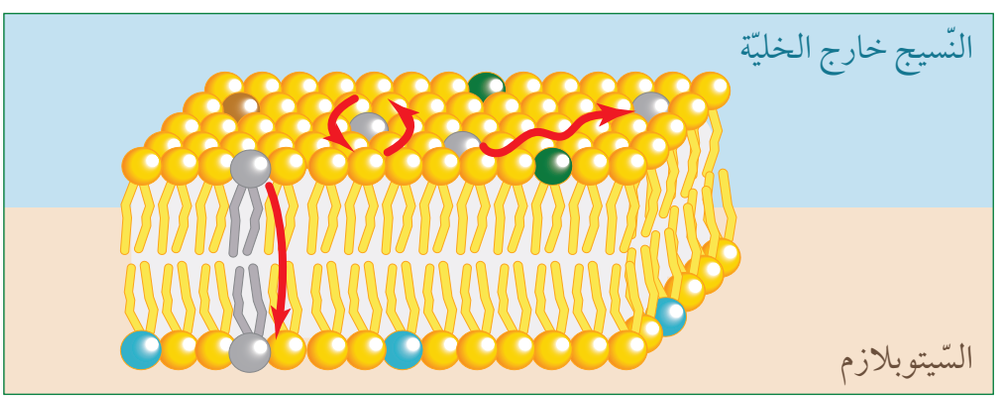
طبيعة الأغشية البلازميّة

تتركّب الأغشية البلازميّة كلّها، ما عدا بعض الاستثناءات، من جزيئات فسفوليبيدات. تعلّمت من الوحدة الأولى أنّ ثلاثيّ الجليسيرايد يتشكّل عن طريق تفاعل التّكثيف بين ثلاثة أحماض دهنيّة والجليسيرول ويتضمّن ذلك نزع ثلاثة جزيئات ماء، كم تعلّمت أنّ الفسفوليبيد مكوّن أساسيّ للغشاء الخلويّ. ويتكوّن الفسفوليبيد من رأس قطبيّ محبّ للماء وذيلين لاقطبيّين كارهين للماء. وتعزى قطبيّة الرّأس إلى وجود مجموعة فوسفات سالبة الشّحنة (PO_3^-) تحلّ محل أحد الأحماض الدّهنيّة المرتبطة بالجليسيرول، والجليسيرول هو مركّب كحوليّ سائل لزج لا لون له ولا رائحة وهو حلو المذاق. أمّا الذّيل الكاره للماء فيتكوّن من اثنين من الأحماض الدّهنيّة. والحمض الدّهنيّ يتشكّل من سلسلة طويلة من الهيدروكربون. تشكّل الطّبقات المكوّنة من هذه الجزيئات حاجزًا طبيعيًّا بين بيئتَيْنِ مائيّتَيْنِ مستقلّتَيْنِ (**الشّكل 2-3**).



شكل 2-3 الغشاء البلازميّ الفسفوليبيدي.

إنّ الأغشية البلازميّة تراكيب مائعة لا صلبة، ويمكن تشبيهها بصفحة مطّاطيّة كالبالون. يمكن لجزيئات الفسفوليبيدات المنفردة أن تدور، أو تتحرّك جانبيًّا، أو تنقلب إلى السّطح المقابل بحركة عرَضيّة (**الشّكل 2-4**). فكّر في الطّبقة المائعة الرّقيقة حول فقّاعة الصّابون، وسترتسم في ذهنك فكرة أفضل عن الغشاء الخلويّ.

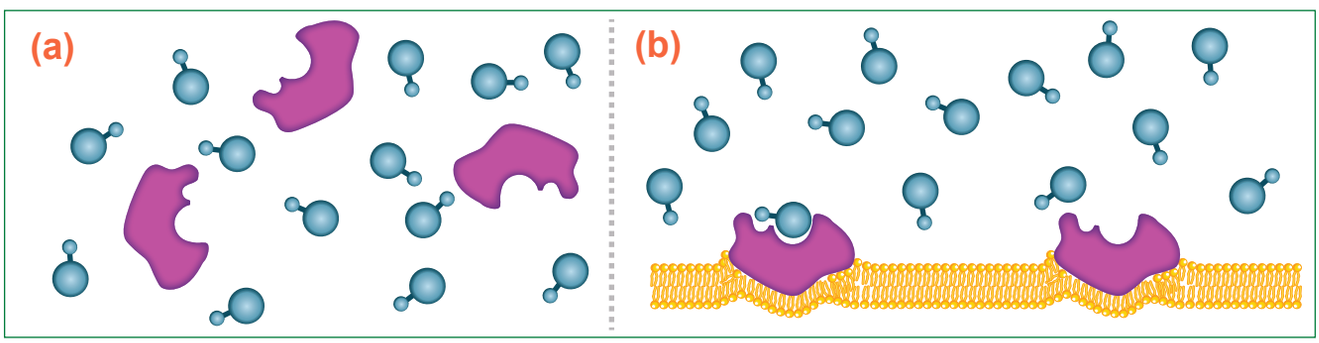


شكل 2-4 جزيئات الفسفوليبيدات يمكن أن تنقلب، أو تدور، أو تتحرّك جانبيًّا في داخل الأغشية.

لكلّ الأغشية البلازميّة سطحان مختلفان، سطح داخليّ وسطح خارجيّ (**الشّكل 2-4**). يحتوي السّطح المواجِه للوسط خارج الخليّة على بروتينات وجزيئات تتفاعل مع البيئة الخارجيّة للخليّة، أمّا الجانب الّذي يواجه الدّاخل فهو يحتوي على بروتينات مختلفة وتراكيب تتفاعل مع السّيتوبلازم.

وظائف أغشية العُضيّات

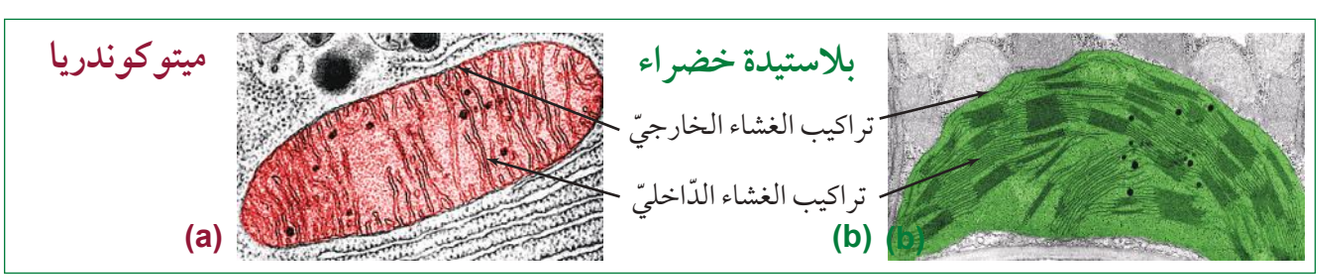
يعدّ **الغشاء الدّاخليّ Endomembrane** جزءًا من معظم عُضيّات الخلايا الحقيقيّة النّواة، وعلى امتداد هذه الأغشية الدّاخليّة تحصل التّفاعلات الكيميائيّة. يظهر **الشّكل 2-5 (a)** جزيئَيْن مختلفَيْن يتحرّكان عشوائيًّا يملكان فرصة ضئيلة ليصطدم أحدهما بالآخر بالاتّجاه المناسب ليتمّ التّفاعل بينهما، في حين تكون فرصة التّفاعل أكبر بكثير في حالة إمساك غشاء بلازميّ بأحد الجزيئَيْن بالاتّجاه الصّحيح، كما هو مبيَّن في **الشّكل 2-5 (b)**.



شكل 2-5 (a) للجزيئات العشوائيّة فرصة ضئيلة للاصطدام على الزّاوية المناسبة للتّفاعل.
(b) الفرصة أكبر بكثير عندما يمسك الغشاء بأحد الجزيئات في الاتّجاه الصّحيح.

تشكّل الأغشية في داخل الخليّة أسطحًا منظّمة للتّفاعلات الكيميائيّة.

تظهر في داخل العُضيّات، مثل الميتوكندريا mitochondria والبلاستيدات الخضراء chloroplasts، تراكيب غشائيّة معقّدة وظيفتها توفير مواقع لحصول التّفاعلات الكيميائيّة عليها. وتحتوي الأغشية الدّاخليّة في الميتوكندريا (**الشّكل 2-6a**) على أكثر من 150 بروتين متخصِّص يشارك في عمليّة تحويل الجلوكوز إلى جزيء طاقة يسمّى أدينوسين ثلاثيّ الفوسفات (ATP). إنّ نسبة البروتينات إلى اللّيبيدات في تلك الأغشية هي بروتين واحد لكلّ 15 ليبيد، أي أعلى بكثير من متوسّط النّسبة في الغشاء الخلويّ الّتي هي بروتين واحد لكلّ 45 ليبيد. كما تظهر في داخل الغشاء الدّاخليّ للميتوكندريا أنزيمات تسهم في حدوث تفاعلات التّنفّس الخلويّ، إلى جانب DNA الخاصّ بالميتوكندريا.



شكل 2-6 الغشاء البلازميّ والأغشية الدّاخليّة كما تُرى في الميتوكندريا (a) والبلاستيدة الخضراء (b)

كذلك، تظهر في **الشّكل 2-6b** تراكيب الطّبقات المرصوصة للأغشية الثّيلاكويديّة الخاصّة thylakoid في بلاستيدة خضراء. وكما في الميتوكندريا، فإنّ نسبة البروتينات إلى اللّيبيدات عالية في اغشية البلاستيدة الخضراء الّتي تكوّن المواقع حيث تتمّ تفاعلات البناء الضّوئيّ photosynthesis.

1-2 (a) خطّ زمنيّ للأغشية الخلويّة

سؤال الاستقصاء	كيف طوّر العلماء نموذجًا للأغشية الخلويّة؟
الموادّ المطلوبة	دليل بحث، جهاز كومبيوتر متّصل بالإنترنت، طابعة، مقصّ وصمغ وشريط لاصق.

البحث في الشّبكة العنكبوتيّة العالميّة

1. يوفّر لك معلّمك دليل بحث يحتوي على إستراتيجيّات وتوقّعات مهمّة لهذا المشروع وغيره من المشاريع الّتي ستنفّذها.
2. اقرأ دليل البحث وناقش تساؤلاتك مع زميلك أو مجموعتك قبل البدء بالعمل. اطلب المساعدة من معلّمك اذا لزم الأمر.

الأسئلة والاعتبارات

1. ما سؤالك الأساسيّ؟ وما الأسئلة الخاصّة بمجموعتك؟
2. اكتب قائمة بالكلمات المفتاحيّة وضمّنها كلمات من أسئلتك لتضيفها إلى بحثك.
3. اكتب كلمات ربط منطقيّة، وابحث عن إستراتيجيّات بناء الجُمل الّتي يمكن أن تستخدمها مجموعتك. لايجاد المعلومات بسرعة؛ ومن المهمّ، أيضًا، أن تكون نتائجك أكثر فرادة ودقّة علميّة من المعلومات الواردة في طليعة نتائج أيّ محرّك بحث.
4. خذ بالحسبان المتطلّبات الدّنيا الّتي يحتاج إليها فريقك لتصميم المنتج أو العرض النّهائيّ. إذا كان معلّمك قد زوّدك بمؤشّرات تقويم الأداء، ناقش مع زملائك الطّرق الّتي يمكنكم من خلالها تجاوز المتطلّبات الدّنيا ليكون المنتَج مثيرًا للإعجاب، أو جذّابًا ومسلّيًا، مع الحرص على دقّته وشموليّته.

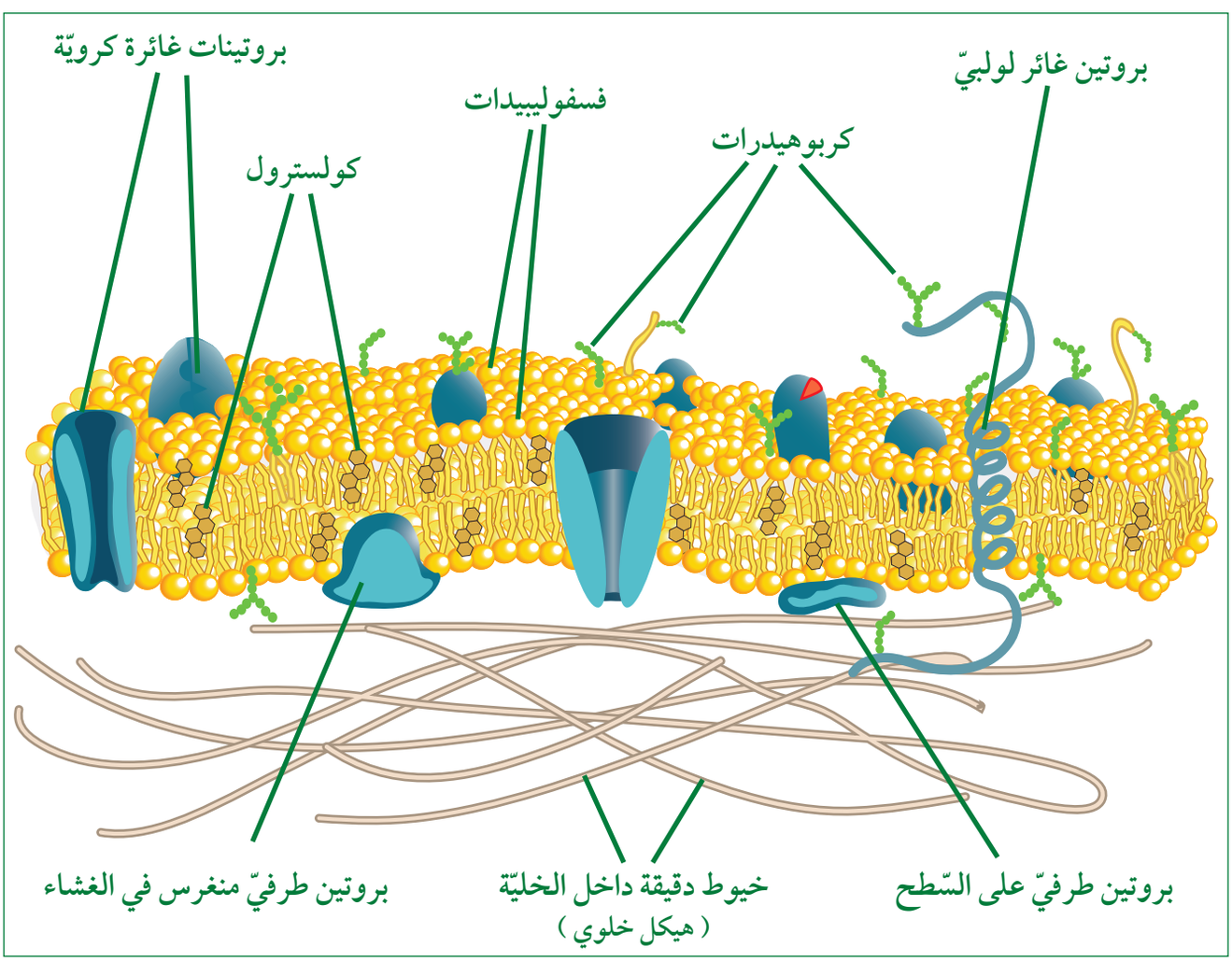
الخطوات

1. سوف تقوم مجموعتك بإنتاج خطّ زمنيّ للأحداث بدءًا من اكتشاف الخليّة وصولًا إلى الاكتشافات الحديثة المتعلّقة بالأغشية البلازميّة. استخدم الإستراتيجيّات والأدلّة لمساعدتك على إجراء بحثك على الإنترنت.
2. قرّر مع مجموعتك، كيفيّة تقسيم الأعمال في أثناء البحث وتنفيذ المشروع لكي يتمّ انجازه في الوقت المناسب.
3. اعرض منتج مجموعتك النهائي.

النّموذج الفسيفسائيّ المائع في الأغشية الخلويّة

تنظّم الأغشية الخلويّة مرور كلّ ما يدخل الخليّة وكلّ ما يخرج منها. وهي تسمح بمرور بعض الموادّ، وتمنع مرور أخرى، وتطرح الفضلات. والنّموذج المقبول حاليًّا لكيفيّة أداء الأغشية الخلويّة لوظيفتها يُسمّى **النّموذج الفسيفسائيّ المائع Fluid mosaic model**. تشير كلمة المائع في اسم النّموذج إلى حركته وإلى تراكيب فريدة من نوعها مرتّبة كالبلاط في الفسيفساء لكن خلافًا للفسيفساء المادّيّة، تكون الأغشية الخلويّة وكلّ أجزائها في حركة مستمرّة، إذ يمكن لكلّ عنصر في الغشاء الخلويّ أن يسيل أو يغيّر موقعه.

تصنَّف بروتينات الغشاء إلى **بروتينات طرفيّة Peripheral proteins** و**بروتينات غائرة Integral proteins** (**الشّكل 2-7**). تخترق البروتينات الغائرة طبقتَي الغشاء، بينما تكون البروتينات الطّرفيّة ملتصقة إلى أحد سطحَي الغشاء.



شكل 2-7 مكوّنات النّموذج الفسيفسائيّ المائع في غشاء خلويّ.

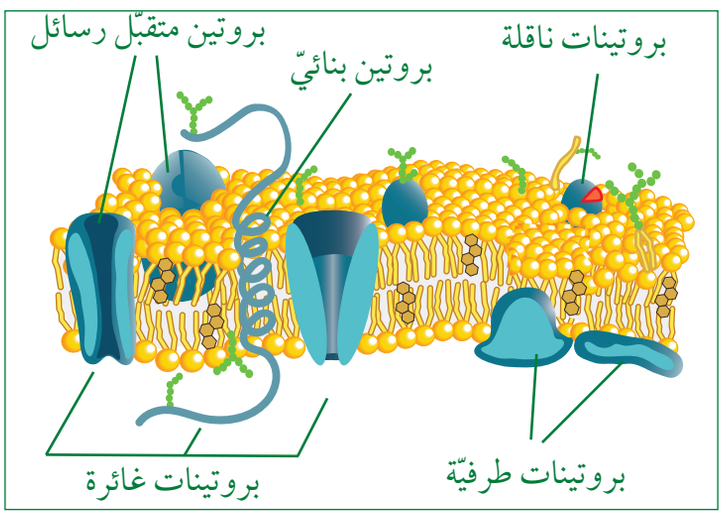
تنقل البروتينات الكرويّة globular proteins أو البروتينات اللّولبيّة helical proteins الموادّ، وتكون وسيطًا لنقل المعلومات الكيميائيّة. وتتضمّن هذه الوظائف التّفاعل مع جزيئات وبروتينات تكون إمّا منغرسة في داخل الغشاء الخلويّ وإمّا على سطحه.

المكونات البروتينية في الأغشية الخلويّة

تؤدّي البروتينات والجزيئات الحيويّة المنغرسة في الأغشية وظائف مهمّة كثيرة، كما تتواصل البروتينات مع المكوّنات الكيميائيّة والفيزيائيّة للوسطَيْن في داخل الخليّة وخارجها. وتحصل تفاعلات كيميائيّة وكهروكيميائيّة معقّدة بين البروتينات وبعض الأيونات والجزيئات الأخرى عبر الأغشية للتّحكُّم في تبرعم budding وانقسام الخلايا في أثناء التّكاثر، واتزان سوائلها، وتعرّف خليّة إلى أخرى، والاستقبال الكيميائيّ، وإعطاء الإشارات إلى الخلايا cell signaling، واندماجها، وموتها.

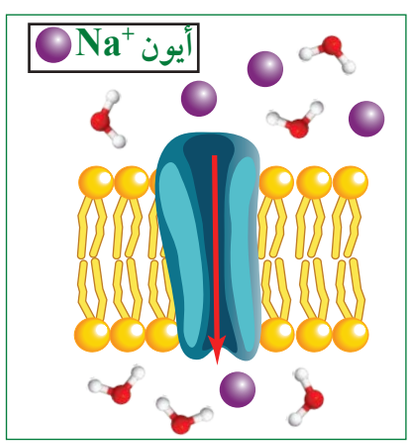
تتواصل بروتينات الغشاء مع المكوّنات الفيزيائيّة والكيميائيّة للوسطين في داخل الخليّة وخارجها.

تتّصل البروتينات الطّرفيّة الملتصِقَة إلى السّطح الخارجيّ أو إلى السّطح الدّاخليّ للغشاء بالبروتينات الغائرة أو بالفسفوليبيدات. يمكن للبروتينات اللّولبيّة أن تربط 20–30 حمضًا أمينيًّا بعضها ببعضٍ، لتمتدّ كالأشرطة عبر طبقة اللّيبيدات المزدوِجَة. كما توفِّر كلٌّ من البروتينات الغائرة والطّرفيّة دعمًا بنيويًّا، وارتباطًا واستقرارًا للغشاء الشكل (8-2).



شكل 2-8 البروتينات الغائرة والبروتينات الطّرفيّة ووظائفهما العامّة.

وبعض البروتينات الغائرة مصمَّمة للنّقل في اتّجاه واحد، أي إلى الدّاخل، وهي تمتدّ على عرض الغشاء لتساعد على نقل الماء أو الأيونات، مثل أيون الصّوديوم (Na^+)، الّتي لا يمكنها عبور الطّبقات الكارهة للماء (**الشّكل 2-9**). وتتميّز تلك البروتينات بانتقائيّتها العالية، ما يعني أنّها تتعرَّف جسَيْمات معيّنة فقط وتنقلها من دون أن تنقل جسَيْمات أخرى. وقد تكون البروتينات مستقبلات كيميائيّة ووسيطًا لنقل الرّسائل إلى بروتينات أخرى.



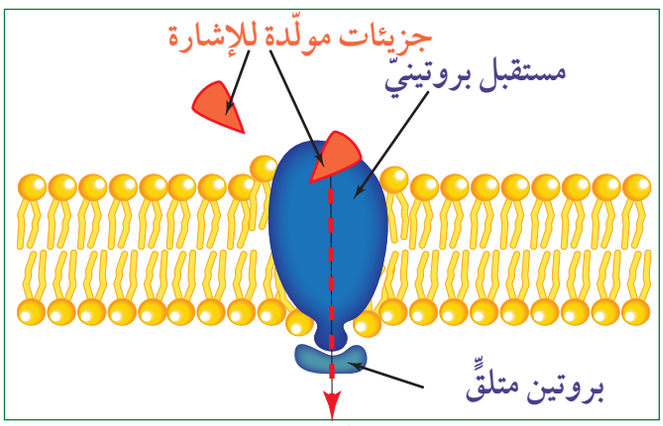
شكل 2-9 قناة بروتينيّة لأيون الصّوديوم (Na^+).

وبروتينات النّقل هذه نفسها لا تعمل بشكلٍ جيّد لدى مرضى **التّليُّف الكيسيّ Cystic fibrosis** الوراثيّ نتيجة خلل جينيّ يطال قنواتها البروتينيّة channel proteins، لذا لا تنتج الأغشية المخاطيّة المخاط الزّلق اللّازم لتشحيم وحماية البطانة الخلويّة للرّئتين ولأنسجة أخرى بشكلٍ طبيعيّ.

بروتينات الغشاء والتّواصل

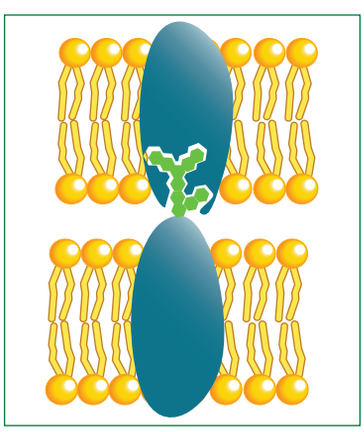
كيف يميّز الغشاء الخلويّ الجزيء الحيويّ الضّروريّ من الجزيء الضّار؟ استغرق فهم العلماء كيفيّة تعرّف الخلايا إلى خلايا أخرى عقودًا طويلة حتّى تمكّنوا من الوصول إلى نموذج لما يحصل؛ وما يزال فهم الموضوع غير كاملٍ، ويقتضي المزيد من البحث لاكتماله.

يظهر في **الشّكل 2-10** طريقة تواصل شائعة بين الكائنات الحيّة الأحاديّة الخليّة. عندما يلامس جزيء خاصّ موقعًا معيّنًا على سطح بروتين، يلتصق بالموقع ويؤشّر إلى **مستقبل بروتيني Protein receptor** ليغيّر شكله، فيطلق رسالة إلى بروتين آخر في داخل حشوة الخليّة، إمّا «ليقبل» الجزيء مولّد الإشارة أو «يرفضه».



شكل 2-10 يرتبط جزيء مولّد للإشارة بمستقبل بروتينيّ فيغيّر الأخير شكله ليتواصل مع بروتين ثانٍ.

تستطيع بعض الخلايا في الكائنات الحيّة المتطورة تمييز «الخلايا الذّاتيّة» self من «غير الذّاتيّة» non-self، وبخاصّة إذا كان لديها جهاز مناعيّ. إنّ تعرّف خليّةٍ إلى خليّةٍ أخرى يتضمّن تفاعلات بين بروتينات على غشاءَيْن مختلفَيْن، ويُظهر أحد النّماذج جزيء التّطابق البروتينيّ على أحد الأغشية يمتلك مجموعة كيميائيّة تمنحه هويّة مميّزة وتمكّنه من الارتباط بالبروتين المماثل له على سطح الغشاء لخليّة أخرى. وفي هذه الحالة يكون كلا البروتينين غائرين ويدوم ارتباطهما لوقت قصير لأنّ التّغيّر النّاتج في موقع الارتباط من الجزيء المحدّد للهويّة يكون موقّتًا (شكل 2-11).

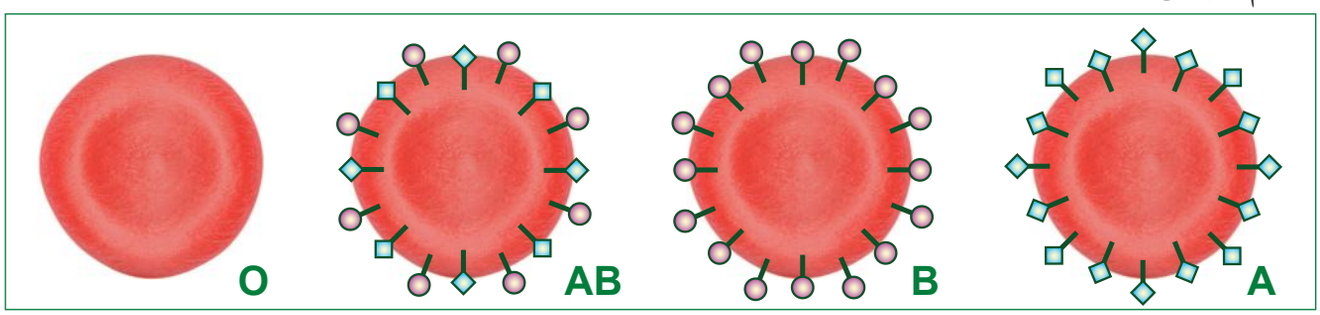


شكل 2-11 نموذج تعرّف خليّة إلى خليّة.

ويعتمد دفاع الخليّة والأجهزة المناعيّة المتطوّرة لدى الفقاريّات على كشف الأجسام الغريبة، كالبكتيريا والفيروسات. لذا، تطوّرت بعض الفيروسات لتستفيد من مقدرة الخلايا على التعرف والارتباط ببعضها. ففيروس نقص المناعة البشرية HIV يمتلك على سطحه بروتينات خاصة تمكّنه من التعرف والارتباط بمستقبلات بروتينية تسمى تجمعات التمايز 4 (CD4 cluster of differentiation 4) تتواجد على خلايا الجهاز المناعيّ البشريّ، وما إن يحصل الارتباط، يغزو فيروس نقص المناعة البشرية HIV الخليّة ويتضاعف بسرعة، ثمّ تفجّر جسيمات الفيروس الغشاء فتقضي على الخليّة المناعيّة فورًا بعمليّة تُسمّى **التّحلّل Lysis**. عندما ينفجر الغشاء، ينطلق المزيد من فيروس نقص المناعة البشرية HIV ليصيب خلايا جديدة، وبهذا ينجح الفيروس في استهداف جهاز المناعة. وقد أطلق العلماء حديثًا تجارب للّقاح، أي بعد أكثر من 35 عامًا على تحديد هويّة فيروس نقص المناعة البشرية HIV في العام 1981.

البروتين السّكّريّ واللّيبيدات السّكّريّة والكولسترول

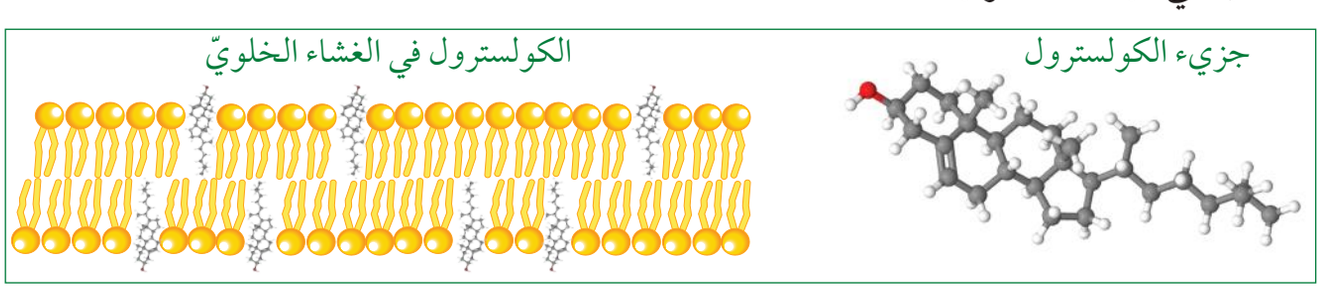
تعمل الكربوهيدرات في الأغشية كمحدّدات سطحيّة markers تساعد على تعرّف خلايا إلى خلايا أخرى، وقد تكون ملتصقة بمفردها بالسّطح الخارجيّ، أو متّحدة مع بروتينات لتكوّن **البروتينات السّكّريّة Glycoproteins**. وتتباين هذه الكربوهيدرات الخاصّة كثيرًا في الكائنات الحيّة من نوع إلى آخر، وحتّى من خليّة إلى أخرى. أمّا بوليمراتها فهي قصيرة، ونادرًا ما تتكوّن من أكثر من 15 سكّرًا. وتحتوي أغشية خلايا الدّم الحمراء لأيّ إنسان على نوع واحد على الأقلّ من أصل نوعين من البروتينات السّكّريّة، وقد يملك الانسان بروتينات سكّريّة A، أو بروتينات سكّريّة B، أو كليهما، أو ربّما قد لا يملك أيًّا منهما (**الشّكل 2-12**). ويُقال عن الأفراد الّذين لا يملكون بروتينات سكرية على سطح خلايا الدّم الحمراء إنّ دمهم هو من الفصيلة O.



شكل 2-12 محددات سطحية بروتينيّة سكّريّة على خلايا الدّم الحمراء البشريّة.

اللّيبيد السّكّريّ Glycolipid هو كربوهيدرات يحمل ليبيدًا يتفاعل، مثلما تفعل البروتينات السّكّريّة، مع بروتينات أخرى بوِساطة التّمدّد من الغشاء إلى الخارج. وعندما تتفاعل اللّيبيدات السّكّريّة مع المستقبلات البروتينيّة، فهي، إمّا تسرّع نموّ الخليّة، أو تكبحه، أو تمكّن الخلايا المتماثلة من تشكيل طبقات. إنّ تنظيم الخلايا بحسب نوعها أمر مهم لنموّ الأنسجة والأعضاء في الأجنّة.

الكولسترول Cholesterol هو نوع من اللّيبيدات موجود في الأغشية الخلويّة الحيوانيّة. وتظهر في (**الشّكل 2-13**) جزيئات الكولسترول وكيفيّة تموضعها بين أذيال الفسفوليبيدات في الطّبقة المزدوجة، حيث تتّجه مجموعة OH القطبيّة دائمًا إلى الخارج. يساعد الكولسترول الاغشية على المحافظة على شكلها في درجة حرارة الجسم من خلال كبح حركة الفسفوليبيدات، كما يمنع الكولسترول تصلّب الأغشية في درجات الحرارة المنخفضة.



شكل 2-13 جزيء الكولسترول وموضعه في الغشاء الخلويّ.

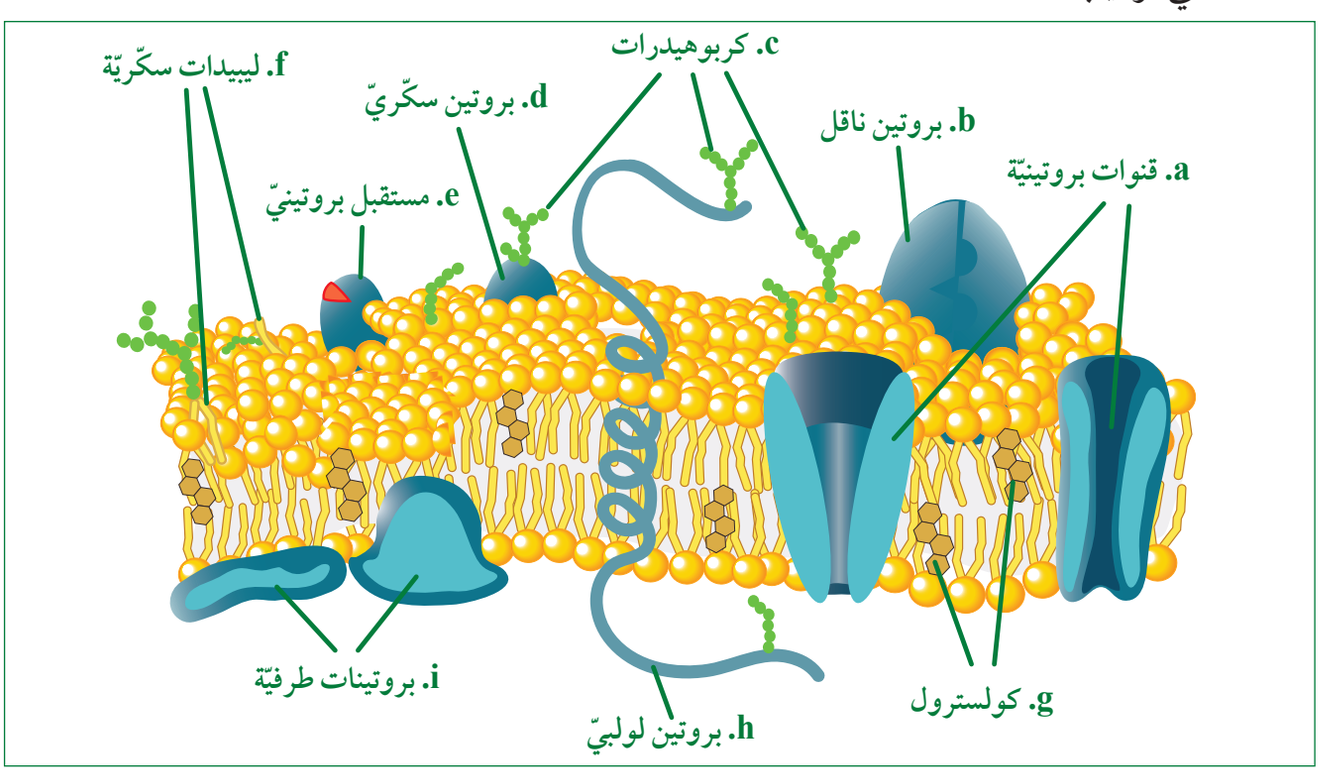
يوجد الكولسترول بكمّيّات كبيرة في البيض والأطعمة الدّهنيّة أو المقليّة، ويشكّل تناول الكثير من الوجبات الغنيّة بالكولسترول خطرًا جدّيًّا على الصّحّة.

وظائف الأغشية المتعدّدة

يعدُّ الجلد أكبر عضو في جسمك، ويمكن استخدامه كنظير وظيفيّ ليساعدنا على فهم الأغشية الخلويّة بشكل أفضل. تتفاعل خلايا الجلد، في كلّ ثانية مع ملايين الجسيمات غير المرئيّة، كحبوب اللّقاح والغبار والأكسجين والماء تمامًا كما تفعل الأغشية الخلويّة. والجلد مرن يسهل الحركة، ويعمل من جهة ثانية، كحاجز بين داخل جسمك وخارجه، كما يساعد على تثبيت درجة حرارة الجسم وتوازن الماء. كما أنّه يشكّل خطّ الدّفاع الأوّل ضدّ الفيروسات والبكتيريا الغازية.

تؤدّي الأغشية دورًا في الحركة والفصل والنّموّ وإعادة البناء والتّبادل وتوازن الماء والحماية.

تستطيع البروتينات والليبيدات والجزيئات الحيويّة الأخرى في الغشاء الخلويّ أن تؤدّي وظائف مختلفة. يلخّص **(الشّكل 2-14)** بعض الأدوار الّتي تؤدّيها الأنواع الكثيرة من الجزيئات الحيويّة الدّاخلة في تركيب الغشاء.



شكل 2-14

(a) تنقل القنوات البروتينيّة سلبيًّا الأيونات والماء والجزيئات القطبيّة الصّغيرة.
(b) تدعم البروتينات الناقلة النّقل النّشط.
(c) تشكّل الكربوهيدرات محدِّدات سطحيّة تحدّد هويّة الخليّة.
(d) تساعد البروتينات السّكّريّة على تعرّف الخلايا بعضها بعضًا.
(e) تستقبل المستقبلات البروتينيّة الإشارات الكيميائيّة وتنقلها عبر الأغشية.
(f) تثبط اللّيبيدات السّكّريّة نموّ الخلايا وتمكّنها من تشكيل طبقات.
(g) يساعد الكولسترول على المحافظة على ميوعة الغشاء الخلويّ إزاء التّغيُّر في درجات الحرارة.
(h) تؤدّي البروتينات اللّولبيّة دورًا في دعم تركيب الغشاء وثباته واستقراره وترابطه.
(i) تثبت البروتينات الطّرفيّة الغشاء وتوفّر لبنيته دعمًا.

1-2 (b) ابنِ نموذجًا فسيفسائيًّا مائعًا

سؤال الاستقصاء	كيف نبني نموذجًا فسيفسائيًّا مائعًا ذا طبقة ليبيدية مزدوجة؟
الموادّ المطلوبة	مماسح قطنيّة، أوراق ملوَّنة، لبّاد، منظّفات أنابيب، صمغ، شريط لاصق، رباطات مطّاطيّة، مقص.

الغشاء الخلويّ الفسيفسائيّ المائع

1. سوف يعرض معلّمك نموذجًا فسيفسائيًّا مائعًا أمام الصّفّ.
2. ارسم النّموذج، واكتب اسم المكوّن الغشائيّ الّذي يمثّله كلّ مكوِّن في النّموذج.
3. لاحظ التّفاعلات الّتي تحصل بين الأجسام المتحرّكة في النّموذج ودوّن ملاحظاتك بالتّفصيل.

ابنِ نموذجًا لطبقة الليبيدات المزدوجة مع المكوّنات الجزيئيّة

1. سوف يوفّر معلّمك لمجموعتك مؤشّرات تقويم الأداء، وتوقعات بنائك نموذجًا للغشاء الخلويّ.
2. حدِّد، بوساطة العصف الذّهنيّ واستخدام صورة النّموذج الفسيفسائيّ المائع في الدّرس، الموادّ الّتي تستطيع مجموعتك استخدامها لتمثيل كلّ مكوّن في الغشاء. اطلب الإذن قبل تجميع نموذجك.
3. اكتب على ورقةٍ قائمةً بالمكوّنات محدّدًا وظيفة كلّ منها، وابتكر مفتاحًا لتحديد المكوّن الغشائيّ الّذي تمثّله كلّ مادّة.

صمِّم نموذج الغشاء الخاصّ بمجموعتك، ثمّ اعرضه.

1. أكملْ، معَ مجموعتك، نموذجًا ثلاثيّ الأبعاد يمثّل النّموذج الفسيفسائيّ المائع بأفضل طريقة، وخلال الوقت المتاح، مستخدمًا الموادّ الّتي تمّ تزويدك بها، وموادّك الخاصّة. قسّم المهمّات إذا لزم الأمر.
2. اعرض نموذجك وقارنه بالنّماذج الّتي بنتها المجموعات الأخرى. سجّل الموادّ أو الأفكار الّتي لم تأخذها بالحسبان. أيّ نموذج شكّل الطّريقة الأفضل لتمثيل كلِّ مكوِّن؟

الأسئلة

a. حدّد اثنين منَ المعوّقات الّتي صادفتك مع مجموعتك في أثناء بناء نموذج الغشاء الخلويّ.

b. لو أتيح لمجموعتك وقت أطول، ما الذّي كنتم ستضيفونه أو تحذفونه؟

c. ابحث في تطوّر النّموذج الفسيفسائيّ المائع، وإسهامات العلماء المعنيّين. ثمّ ارسم خطًّا زمنيًّا يظهر، على الأقلّ، أربعة اكتشافات مفصليّة. هل ثمّة المزيد لتتعلّمه عن الأغشية الخلويّة؟ وضّح ذلك.

تقويم الدّرس 2-1

1. ارسم مخطَّط فن Venn diagram تظهر فيه نقاط التّشابه والاختلاف بين الخليّة حقيقيّة النّواة والخليّة بدائيّة النّواة.
2. تبلغ مساحة سطح الخليّة الكلّيّة 96 وحدة، ويبلغ حجمها 64 وحدة. ما نسبة مساحة السّطح إلى الحجم؟
3. عندما تكبر الخليّة، ماذا يحصل لمساحة سطحها بالنّسبة إلى حجمها؟
4. اِحسبْ مساحة سطح نموذج خليّة بالنّسبة إلى حجمها، علمًا أنّ طول ضلعها كان 0.05 mm، ثمّ كبر حتّى بلغ طول الضّلع على كلّ جانب 0.5 mm.
5. قارن بين الغشاء البلازميّ والغشاء الدّاخليّ والغشاء الخلويّ.
6. صف طبقة الفسفوليبيد المزدوجة ودورها في إبقاء بيئة الخليّة الدّاخليّة منفصلة عن بيئتها الخارجيّة.
7. برأيك، هل تعدُّ عبارة «النّموذج الفسيفسائيّ المائع» اسمًا مناسِبًا لنموذج الغشاء الخلويّ الرّاهن؟ دعّم موقفك في فقرة قصيرة، على أن تقترح اسمًا بديلًا للنّموذج في حالةِ كانت التسمية غير مناسبة.
8. ارسم خارطة مفاهيم تحت عنوان «بروتينات الغشاء» تبيّن فيها العلاقة بين المصطلحات الآتية: البروتين الكرويّ، البروتين السّكّريّ، البروتين اللّولبيّ، البروتين الغائر، البروتين الطّرفيّ، المستقبل البروتيني، البروتين النّاقل. صِلِ المفاهيم على الخارطة بعضها ببعضٍ، بطريقة منطقيّة، لتكمل الخارطة.
9. ارسم التّراكيب الأساسيّة للمكوّنات الغشائية الآتية وسمِّها وصف وظائفها:
   a. الكولسترول
   b. اللّيبيدات السّكّريّة
   c. البروتينات السّكّريّة
   d. الفسفوليبيدات
10. اكتب قائمة بالوظائف الأساسيّة للأغشية الخلويّة، واسم التّركيب المسؤول عن القيام بها.

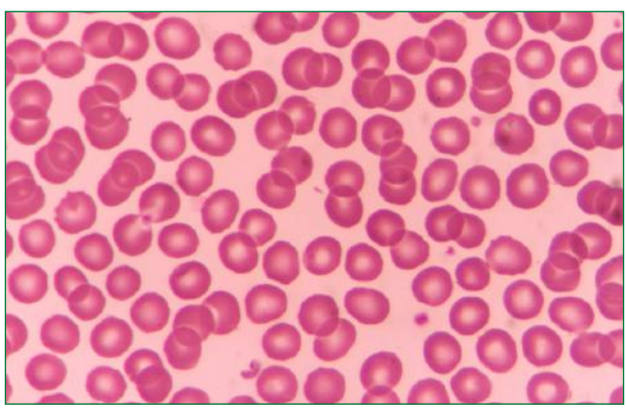
الدّرس 2-2

النّقل السّلبيّ والنّقل النّشط

Passive Transport and Active Transport

منذ أكثر من 100 سنة، اقترح إرنست أوفرتون بعض الأفكار الأوّليّة عن الغشاء الخلويّ. فقد لاحظ أوفرتون وآخرون أنّ هناك ثلاثة أحداث تحصل في جميع الخلايا. لاحظوا أولًا وجود دليل على حركة الماء والموادّ الغذائيّة والفضلات بالاتّجاهَيْن، إلى داخل الخليّة وخارجها. ووجدوا ثانيًا أنّ إمكانيّة دخول الموادّ تعتمد على مدى ذوبانها في الزّيوت. ولاحظوا أخيرًا أنّه عندما كانت أسطح الخلايا تثقب، كانت تنفجر وتطلق محتوياتها كافّة.

ركّزت الدّراسات الأوّليّة للأغشية على خلايا الدّم الحمراء للفقاريّات **الشّكل (2-15)**، إذ تتحمّل التّجارب ويسهل الحصول عليها وفصلها؛ فهيَ فريدة من نوعها لأنّها خسرت النّواة والعُضيّات الأخرى، وبالتّالي هي أبسط للدِّراسة. كما أنّ شكلها الدّائريّ يسمح بتقدير حجمها ومساحة سطحها رياضيًّا بسهولة.



شكل 2-15 خلايا الدم الحمراء.

مخرجات التّعلُّم

B1113.1 يصف عمليّات الانتشار البسيط، والخاصّيّة الأسموزيّة، والنّقل النّشط، والإدخال الخلويّ، والإخراج الخلويّ عبر الغشاء الخلويّ .

B1113.2 يناقش العوامل الّتي تؤثّر في حركة الموادّ المختلفة عبر الغشاء الخلويّ .

المفردات

غشاء شبه منفّذ	Semipermeable membrane
الانتشار البسيط	Simple diffusion
النّقل السّلبيّ	Passive transport
منحدر التّركيز	Concentration gradient
الخاصّيّة الأسموزيّة	Osmosis
الانتشار المسهّل	Facilitated diffusion
البروتين النّاقل	Carrier protein
ناقل الجلوكوز-1	Glucose transporter 1 (GLUT 1)
قناة بروتينيّة	Protein channel
قناة الماء	Aquaporin
النّقل النّشط	Active transport
النّقل بالحويصلات	Bulk transport
الإدخال الخلويّ	Endocytosis
الشرب الخلويّ	Pinocytosis
البلعمة	Phagocytosis
الإخراج الخلويّ	Exocytosis

خصائص الغشاء الخلويّ والنّقل

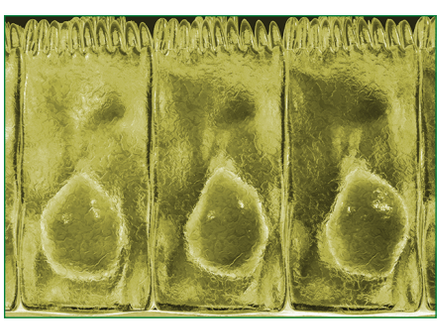
يصف النّقل حركة الماء والجزيئات عبر غشاء. ويجب نقل مجموعة واسعة جدًّا من الموادّ تتراوح في الحجم، من أيونات مفردة مثل أيون الصوديوم Na^+ إلى بروتينات كبيرة مثل الهرمونات.

لكل غشاء خلويّ وظائف نقل مختلفة سواء إلى داخل الخليّة أو إلى خارجها. أمّا المنطقتان المختلفتان، المحبَّة للماء والكارهة للماء في الأغشية ذات الطّبقات المزدوجة، فتسمحان لبعض الموادّ بالمرور بسهولة، لكنَّهما تُبطئان حركة الموادّ الأخرى أو توقفاها. ولأنّ بعض الموادّ يمكن أن تعبر وأخرى لا يمكنها العبور، فإنّ الغشاء الخلويّ يعدّ **غشاءً شبه منفّذ Semipermeable membrane.**

شكل 2-16 الزّيت والماء لا يختلطان.

تعتمد نفاذيّة المواد عبر الغشاء الخلوي على العديد من العوامل كالحجم والشّحنة (القطبيّة) وتركيز المادّة في داخل الخليّة وخارجها. يوضح **الشكل (2-16)** عدم اختلاط الزيت بالماء وذلك لأنّ الماء مركّب قطبيّ والزّيت لا قطبيّ ولذلك فإنه يصعب أو يتعذّر على المركّبات القطبيّة كالماء المرور من خلال الفسفوليبيد ويتحتّم على الخليّة تطوير آليات أخرى لنقل مثل هذه الموادّ عبر غشائها.

ثمّةَ عامل آخر يحدّد معدّل النّقل وهو مقدار مساحة سطح الغشاء الخلويّ. عدد قليل من الخلايا يكون كرويًّا أو مكعّبًا كما يظهر في الكتب، لكن للخلايا الحقيقيّة أشكال مختلفة جدًّا تناسب وظائفها المختلفة. **الخملات الدّقيقة Microvilli**، مثلًا، هي امتدادات طويلة من الأغشية الخلويّة المعويَّة، تزيد بشكل كبير من المساحة السّطحيّة لتسريع امتصاص الموادّ الغذائيّة في أمعاء الحيوان. **(الشّكل 2-17).**



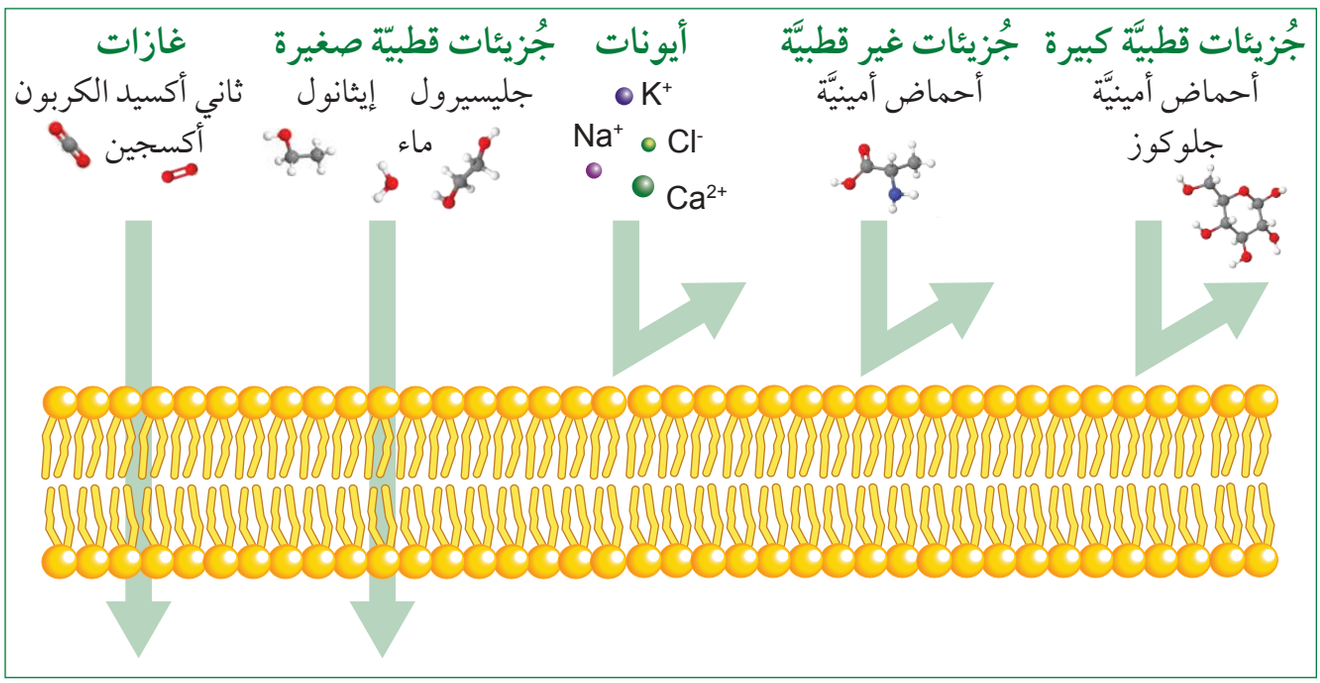
شكل 2-17 الخملات الدّقيقة على بطانة الأمعاء.

الأغشية الخلويّة شبه منفّذة وانتقائيّة.

أمّا العامل الأكبر في النّقل فهو البروتينات المتخصِّصة وجزيئات حيويّة أخرى. تعمل البروتينات النّاقلة كمضخّات لنقل جزيئات محدَّدة عبر الغشاء. فمثلاً يوجد بروتين ناقل متخصص في حركة أيون الكالسيوم Ca^{2+} الضروري لإصدار الإشارات العصبيّة. تشكّل البروتينات النّاقلة الأخرى قنوات في الغشاء تعبر من خلالها الجزيئات المستهدفة ، كما يتدفق الماء عبر الغشاء الخلويّ من خلال قناة بروتينيّة خاصّة أيضًا. إنّ الغشاء الخلويّ قادرٌ، بحدّ ذاته، أن يغيّر شكله ليبتلع الجسَيْمات إلى داخل الخليّة أو يطردها إلى الخارج.

النقل عبر طبقة الليبيدات المزدوجة

تحتاج الخلايا للبقاء على قيد الحياة إلى تبادل مواد مختلفة كالماء والأكسجين والجلوكوز وثاني أكسيد الكربون والأيونات. تختلف طبيعة هذه المواد في ما بينها (**الشّكل 2-18**). فمنها ما كان حجمه صغيرًا وقطبيًّا أو غير قطبي، ومنها ما كان حجمه كبيرًا كالجلوكوز.



شكل 2-18 تفاعلات الغشاء مع الجسيمات الشائعة.

طوّرت الخلية آليات مختلفة تضمن سلاسة مرور المواد عبر الغشاء الخلوي من والى الخلية. تنقسم هذه الآليات إلى الأنواع الرئيسة الآتية: النقل السلبي والنقل النشط، والأسموزية، والنقل بالحُوَيصلات.

النقل السلبي Passive transport يصف حركة الغازات والأيونات وجُزيئات كثيرة، كالجلوكوز مثلًا. ولا يحتاج هذا النقل إلى الطاقة من الخلية.

النقل النشط Active transport يستهلك الطاقة كي يحرِّك أيونات الكالسيوم وجُسيمات أخرى عكس فرق التركيز.

الخاصّية الأسموزية Osmosis تصف حركة الماء من والى الخلية عبر الغشاء الخلوي.

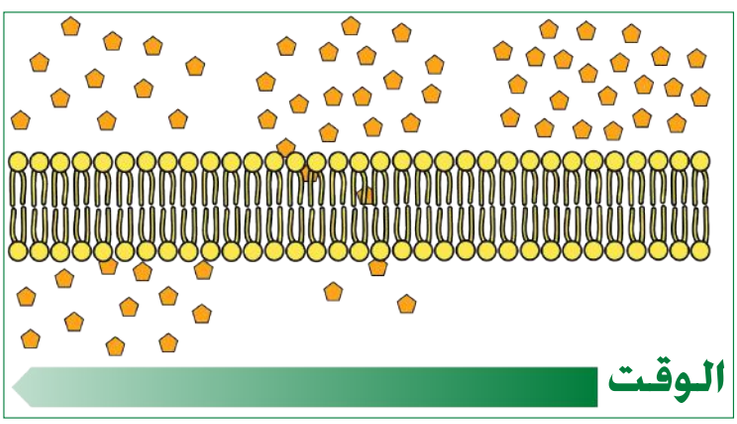
النقل بالحُوَيصلات Bulk transport يحدث عندما يُدخِل الغشاء الخلوي الجُسيمات أو يُخرِجها، عن طريق امتصاص أو تكوين كرات صغيرة من الأغشية ذات الطبقات المزدوجة، تُسمّى الحُوَيصلات.

الانتشار البسيط

الانتشار البسيط Simple diffusion هو حركة الجسيمات عبر الطبقة الدّهنية للغشاء الخلوي مع فرق التركيز، أي من التركيز العالي إلى المنخفض. وحتى تتمّ عملية الانتشار البسيط لابد من توافر الشرطين الآتيين :

1. يكونُ الغشاء مُنفذًا للجُسيمات المنتشرة.
2. يكونُ هناك فارق في تركيز الجُسيمات على جانبَي الغشاء.

تنتقل الجسيمات دائمًا، في أثناء الانتشار، من التركيز العالي إلى التّركيز الأدنى (**الشّكل 2-19**). إذا كان التركيز خارج الخليّة أعلى، فإنّ الجسيمات تنتشر إلى داخل الخليّة، والعكس صحيح أيضًا؛ أي إذا كان التّركيز داخل الخليّة أعلى، فإنّ الانتشار ينقل الجسيمات إلى الخارج، ولا تحتاج عمليّة الانتشار إلى طاقة.



شكل 2-19 يحدث انتشار الجُسيمات عندما يكون توزيع الجسيمات من النّوع نفسه غير متساوٍ على جانبَي الغشاء. تتحرّك الجسيمات من منطقة التّركيز العالي إلى منطقة التّركيز الأدنى، مع مرور الوقت.

الانتشار البسيط لا يتطلّب طاقة، وينقل الجسيمات من تركيز أعلى إلى تركيز أدنى.

يصف **فرق التركيز Concentration gradient** الاختلاف في تركيز الجُسيمات من منطقة إلى أخرى. وفي الخلايا يكون فرق التركيز غالبًا عبر غشاء. يحدث الانتشار دائمًا مع اتجاه فرق التّركيز: من التّركيز الأعلى إلى الأدنى. يستمرّ الانتشار حتّى تصل الجزيئات إلى التركيز نفسه على جانبَي الغشاء. يمكنك النّظر إلى فرق التركيز كشكل من طاقة الوضع. وكلّما كان فارق التركيز أكبر، انتقلَت الجُزيئات بسرعة أكبر. تتبدّد الطّاقة، عندما يصل تركيز الجُزيئات إلى التوازن مع مرور الوقت.

يشمل الانتشار البسيط في العادة جُزيئات صغيرة، مثل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون. ويعدّ تبادل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون بين خلايا الدم والهواء في رئتيك مثالًا مهمًّا على النقل السلبيّ من خلال الانتشار البسيط.

تُصنع الأدوية وأقراص الفيتامينات اللّاقطبيَّة والقابلة للذّوبان بالدّهون عن قصد، ليكون نقلها في الدم وعبر الأغشية الخلويّةِ على نحو أكثر كفاءة.

2-2 (a) الانتشار في المواد الصّلبة والسائلة والغازية

سؤال الاستقصاء	كيف يمكننا بناء نموذج للانتشار؟
الموادّ المطلوبة	أقلام تلوين، (6) قطّارات 1 mL، وعاء سعة 100 mL، ماء، ملوّن طعام، كاميرا رقميّة، وعاء سعة 50 mL، زيوت معدنيّة، أداة التحريك، فانيلا أو مستخلص النّعناع الفلفليّ، بالون.

الخطوات

1. اِملأ 2/3 من وعاء الـ 100 mL بالماء النّظيف. استخدم قطّارة الـ 1 mL لإضافة 10 قطرات من ملوّن الطّعام إلى الماء. التقط بالكاميرا الرّقميّة فيديو لمدّة 60 ثانية عن سلوك ملوِّن الطّعام، ثمّ ارسم مخطّطًا يوضح حركة المادّتَيْن المختلفتَيْن. قمْ بمراجعة الفيديو إذا لزم الأمر. بعدَها، اغسل الوعاء وأعِدْ ملء 2/3 منه بالماء النّظيف.
2. اِملأ وعاء الـ 50 mL بنحو 20 mL من الزّيوت المعدنيّة. شغّل الكاميرا، ثمَّ أضف قطرتَيْنِ من ملوّن الطّعام إلى الزّيت بالقطّارة واخلط السّائلَيْن بواسطة أداة التحريك. أوقف الكاميرا وارسم مخطّطًا للسَّوائل المتفاعلة قبل التّحريك وبعده، ثمَّ شغِّل الكاميرا واسكب خليط الزّيت ببطء في وعاء الـ 100 mL من الماء. عند الانتهاء، ارسم السّلوك النّاتج.
3. انفخ البالون جزئيًّا بنسبة 60%. أغلق بيدك فتحة البالون، واملأ قطّارة بمستخلص النعناع الفلفلي. أدخل القطّارة بعناية في فتحة البالون وادفع السّائل بعناية إلى الدّاخل. انفخ المزيد من الهواء في البالون لشدّ السّطح الخارجيّ، ثمّ اربطه لتغلقه. لاحظ حركة الجسيمات وارسمها.

المناقشة والاستنتاجات

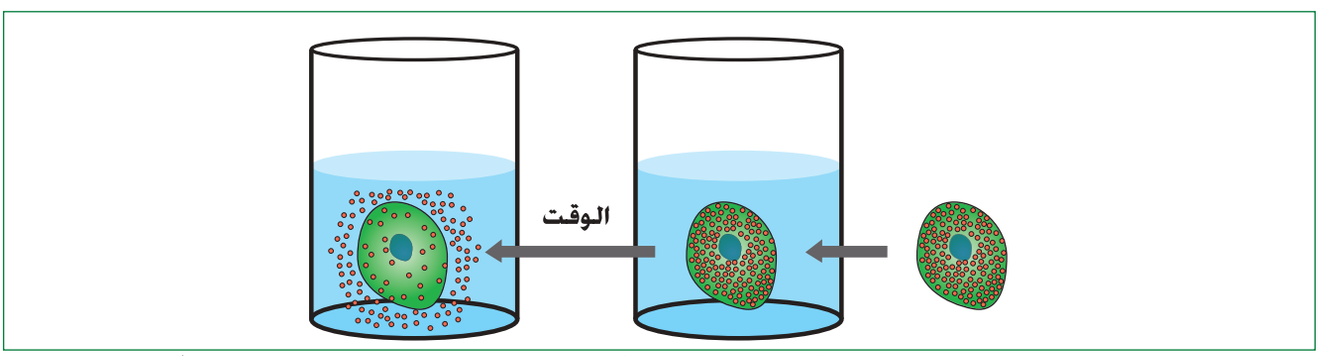
a. بعد مناقشة الصّفّ الأنشطة، أعِد رسم أيّ مخطّط يحتاج إلى تعديل أو تصحيح متأكّدًا من وضع تسميات على كلّ من المخطّطات.

b. استنتج ثلاثة أمور حول حركة الجسيمات في المواد الصّلبة والسائلة والغازية مدعّمًا بالأدلّة.

انتشار المذابات عبر الأغشية

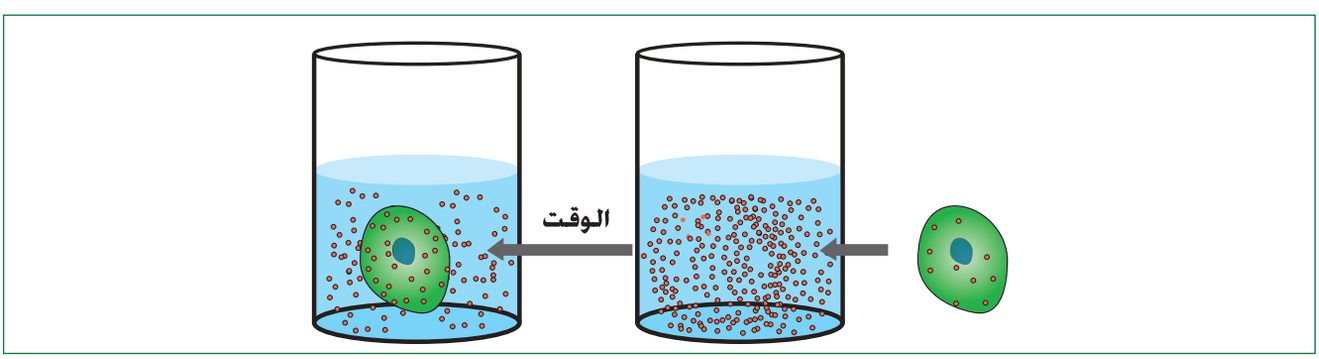
لكلّ نوع من الجسيمات فرق تركيز خاصّ به؛ فمثلًا، يمكن أن يكون فرق تركيز غاز الأكسجين عبر الغشاء الخلويّ مختلفًا عن فرق تركيز الجلوكوز. إنّ انتشار كلّ مادّة يحدث وفقًا لفرق تركيزها الخاصّ. وفي داخل نظام معيّن، ثمّة معدّلات انتشار مختلفة لكلّ نوع من الجسيمات الموجودة.

افترض أنّ خليّة تمّ وضعها في الماء النّقيّ؛ إحدى الموادّ المذابة في سيتوبلازم الخليّة هي الجليسيرول الّذي ينتشر بسهولة عبر الغشاء الخلويّ، لان تركيزه عالي في داخل الخليّة ومعدوم في خارجها. يشير اتجاه فرق التّركيز إلى الانتشار خارج الخليّة، ومع مرور الوقت، ستنتشر جزيئات الجليسيرول إلى الماء خارج الخليّة (**الشّكل 2-20**)، وسينتشر الماء في الاتّجاه المعاكس. يبدأ جهد الماء في الخارج بـ 100%، بينما يكون الجهد في الخليّة أقلّ من 100%، لذلك ينتقل الماء إلى الخليّة.



شكل 2-20 تنتشر جزيئات الجليسيرول من التّركيز العالي إلى التّركيز المنخفض – من الخليّة إلى الماء النّقيّ.

يحدث الانتشار بالاتّجاه المعاكس إذا تمّ وضع الخليّة في محلول بتركيز عالٍ من الجليسيرول. مع مرور الوقت، ينتشر الجليسيرول من المحلول إلى الخليّة، ويستمر الانتشار حتّى يصبح تركيز الجليسيرول في داخل الخليّة مساويًا لتركيز الجليسيرول خارجها (**الشّكل 2-21**). ينتشر الماء إلى خارج الخليّة في الاتّجاه المعاكس للجليسيرول.



شكل 2-21 تركيز الجليسيرول العالي في المحلول يمكن أن يسبِّب انتشار الجليسيرول إلى داخل الخليّة حتى يصل التّركيز إلى التّوازن.

الخاصّيّة الأسموزيّة هي انتشار الماء

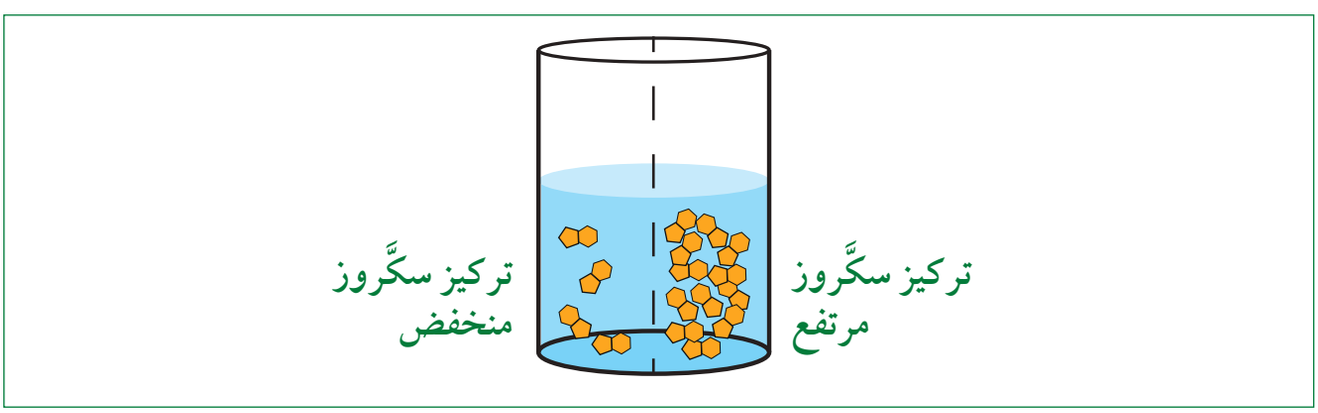
تعدّ حركة الماء مهمّة جدًّا بحيث يُعطى الانتشار البسيط للمياه اسمًا خاصًّا وهو **الخاصّيّة الأسموزيّة Osmosis** الّتي تعني الانتشار البسيط للماء من خلال الغشاء شبه المنفّذ.

الخاصّيّة الأسموزيّة تتأثر بعوامل عدة.

1. جهد الماء نفسه والذي يتأثر بجميع الموادّ المُذابة.
2. وجود بعض المواد المذابة التي لا تستطيع عبور الغشاء الخلويّ، وبالتّالي يمكن تقليل منحدر التّركيز بحركة الماء فقط لا بالمذاب.

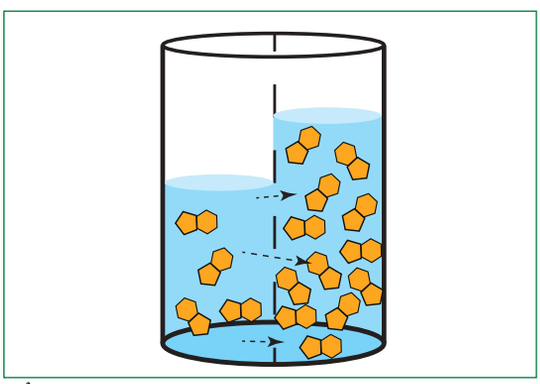
الخاصّيّة الأسموزيّة هي انتشار بسيط للمياه عبر الغشاء شبه المنفّذ.

تخيّل وعاءً مقسومًا بغشاء يسمح بمرور المياه ويمنع مرور السّكّروز (سكّر المائدة). يظهر في **(الشّكل 2-22)** محلولان بتركيزين مختلفين من السّكّروز، كلّ محلول على جانب من الغشاء.



شكل 2-22 تركيز السّكَّروز في الجانب الأيمن من الغشاء أعلى مقارنة بالجانب الأيسر.

الفارق في التّركيز يخلق فارقًا في الطّاقة، ما يدفع بالماء إلى عبور الغشاء. يتحرك الماء بالأسموزية من الجانب الّذي يكون فيه جهد الماء أكبر إلى الجانب الّذي يكون فيه جهد الماء أقلّ، وهذا عكس اتجاه فرق تركيز السّكروز، إلا أن السّكروز لا يستطيع العبور. وهذا ما يفسر انخفاض مستوى الماء في الجانب الأيسر وارتفاعه في الأيمن **(الشّكل 2-23)**. إنّ زيادة جهد الماء داخل الخليّة يولّد ضغطًا على غشائها تنتج منه تأثيرات متباينة في الكائنات الحيّة كما سندرس لاحقًا.



شكل 2-23 تؤدّي الخاصّيّة الأسموزيّة إلى تدفُّق الماء عبر الغشاء شبه المنفّذ من اليسار إلى اليمين، ما يخلق الفارق بالضّغط عبر الغشاء شبه المنفّذ.

2-2 (b) بناء نموذج للخاصّيّة الأسموزيّة

سؤال الاستقصاء	كيف يمكننا بناء نموذجًا للخاصّيّة الأسموزيّة؟
الموادّ المطلوبة	دورق سعة 250 mL عدد (6)، 8 اكياس غشائية شريطية شبه منفذة مقصوصة بطول 30 cm، ماء مقطَّر، مخبار مدرج، مجموعة من محاليل السّكّروز مختلفة التراكيز. ميزان شعاعيّ أو ميزان رقميّ (0.01g)، قلم، مناديل ورقيّة.

الخطوات

1. يكون معلّمك أنجز بعض التّحضيرات في اليوم السّابق. وزِّع المهمّات أدناه على أعضاء مجموعتك.
2. جهز دوارق بعدد محاليل السكروز المختلفة وسجل على كلّ دورق تركيز السّكَّروز.
3. احصل على كيس غشائي معلّم من دورق الماء المقطَّر، اربط أحد طرفيه ثم أضف 25 mL من محلول السّكَّروز الأوَّل.
4. انزع الهواء الزّائد عن طريق سحب الكيس بأصابع رطبة. اربط الكيس بالقرب من النّهاية تاركًا حجمًا إضافيًّا صغيرًا.
5. جفِّف السّوائل الزّائدة بمحارم ورقيّة. قم بقياس الكتلة وسجّلها وضع الكيس في الدّورق الفارغ المطابق لتركيز محلول السكروز الاول.
6. كرِّر الخطوات من 5-3 لجميع محاليل السكروز مختلفة التراكيز.
7. اِملأ 3/2 من كلّ دورق بماء مقطَّر.
8. بعد مرور 30 دقيقة، قم بإزالة الاكياس الغشائية وجففها، ثمّ قم بقياس الكتلة النّهائيّة وتسجيلها. وأخيرًا، نظِّف المكان.

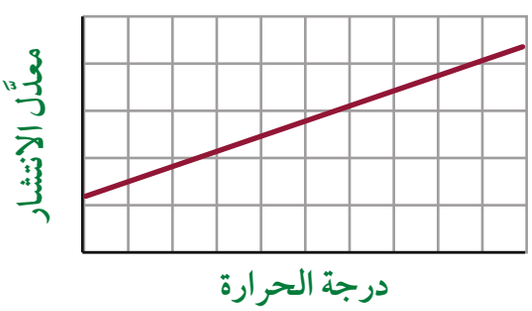
المناقشات والاستنتاجات

a. قارن كتل الاكياس الغشائية قبل وبعد 30 دقيقة من الغمر بالماء المقطَّر؟
b. ارسم رسمًا بيانيًّا للنّسبة المئويّة للتّغيُّر في كتلة كل كيس مقابل كلّ تركيز سكّروز.
c. اقترح شرحًا لنتائجك على أن تتناول فيه التّركيزات المختلفة.
d. سلِّم تقريرك النّهائيّ.
e. ما التّجارب الأخرى الّتي يمكن القيام بها بهذه التّقنيّة؟ صمّم تجربة جديدة ونفِّذها بعد عزل متغيّر واحد.

العوامل الّتي تؤثّر في الانتشار في حشوة الخليّة

الجزيئات في حالة حركة عشوائيّة دائمة، إذ تتحرَّك ذهابًا وإيابًا عبر الغشاء، حتّى عندما يكون المحلول في توازن. هذا يعني أنّ معدّل الجزيئات الّتي تمرّ عبر الغشاء هو نفسه معدّل الجزيئات الّتي تمر في الاتّجاه المعاكس بحالة التّوازن. فأيّ عامل يؤثِّر في معدَّل الجزيئات الّتي تتحرّك على جانبي الغشاء سيؤثّر في معدّل الانتشار. وفيما يأتي بعض من العوامل الّتي تؤثّر في معدّل حركة الجزيئات ومعدّل انتشار الموادّ:

1. يحدث الانتشار في الخليّة الّتي تملك مساحة سطح أكبر بطريقة أسرع من الخليّة الّتي تملك مساحة سطح أقلّ.
2. تؤثّر سماكة الغشاء الخلويّ على الانتشار، حيث أنّ الغشاء السّميك يبطئ سرعة عبور الموادّ.
3. يحدث انتشار الجسيمات الأكبر حجمًا بطريقة أبطأ، بشكلٍ عامّ، لأنّ حركتها بطيئة قياسًا بحركة الجسيمات الأصغر.
4. يطول وقت انتشار الجسيمات كلّما ابتعدت.
5. ينخفض معدَّل الانتشار مع زيادة كثافة حشوة الخليّة. ففي الحشوة الكثيفة، يحدث انتشار الجزيئات ببطء أكبر لأنَّها تمرّ بصعوبة اكبر.
6. بسبب ترتيب الفسفوليبيدات، تمرّ الموادّ غير القطبيَّة، والّتي تذوب في الدّهن، من خلال الغشاء الخلويّ بسهولة أكبر من الموادّ القطبيّة، وهذا ما يؤدّي إلى ارتفاع سرعة الانتشار.
7. درجة الحرارة هي مقياس لمتوسّط طاقة حركة الجسيمات. بحيث تعني زيادة درجة الحرارة أنَّ للجسيمات طاقة حركة أكبر، وتتحرّك بشكل أسرع، وتنتشر بسرعة أكبر. بشكل عامٍّ، يزيد ارتفاع درجة الحرارة من معدَّل الانتشار (**الشّكل 2-24**).



شكل 2-24 يعتمد معدَّل انتشار الجسيمات على درجة الحرارة.

2-2 (c) درجة الحرارة والأسموزيّة في جذر البنجر

سؤال الاستقصاء	كيف يمكن ملاحظة الخاصّيّة الأسموزيّة في أنسجة البنجر؟
الموادّ المطلوبة	دورقان سعة 500 mL، ميزان حرارة، صفيحة ساخنة أو غلّاية شاي، ثلج مسحوق، قفّازات حرارية، إبرة خشبيّة، (6) قطع من لبّ جذور البنجر، (6) أنابيب اختبار، حامل أنابيب الاختبار، ملقط، ماء مقطَّر، مخبار مدرج، قلم تعليم، كاميرا رقميَّة، ساعة منبِّه، مقياس الألوان.

الخطوات

1. يقوم المعلم بتعيين درجة حرارة الماء لمجموعتك لإجراء الاختبار. اِبدأ بتسخين الماء في دورق، وحافظ على درجة الحرارة المطلوبة طوال مدّة الاختبار. عن طريق اضافة الثلج او بالتسخين حسب الحاجة.
2. احصل على 6 قطع من لبّ جذور البنجر معدَّة مسبقًا، وإن لم تكن جاهزة في أنابيب الاختبار، استخدم إبرة خشبيَّة لنقلها بعناية إلى الأنابيب. أضف 15 mL من الماء المقطَّر لكلِّ أنبوب، وإذا لزم الأمر، اضبط الحجم بشكل مماثل لتغطية جميع قطع اللّبّ.
3. حدِّد درجة الحرارة الّتي سيختبر وفقها كلّ أنبوب، وقم بتصوير قطع اللّبّ على خلفيّة بيضاء. ضع أنابيب الاختبار الستة في حوض الماء لمدّة 30 دقيقة عندما تصل درجة حرارتها إلى الدّرجة المحدَّدة. في أثناء انتظار النّتائج، احصل على معلوماتٍ حول درجات حرارة المجموعات الأخرى، وشاركهم الصّور.
4. بعد 30 دقيقة، رجّ أنابيب الاختبار بلطف للتّأكُّد من توزيع الصّبغ، وضع جميع الأنابيب على الحامل الخاصّ بك.
5. إذا كان مقياس الألوان متوافرًا، انتظر دور مجموعتك لاختبار قطع اللّبّ الستة، وسجّل نتائج كلٍّ منها، مستخدمًا جدول البيانات المتوافر لديك.
6. تقوم كل مجموعة بتوزيع خمسة من أنابيب مجموعتها على المجموعات الأخرى. عند الانتهاء، رتّب الانابيب الستة لمجموعتك حسب درجات الحرارة المختبَرة، وصوّر النّتائج. شارك بياناتك ونتائجك إذا طُلِب إليك ذلك.

المناقشات والاستنتاجات:

a. صف الألوان الّتي تنتجها قطع اللّبّ المتطابقة الخاصَّة بمجموعتك. هل كانت شدّة الألوان متطابقة لقطع اللّبّ السّتّ؟ فسّر النّتيجة.

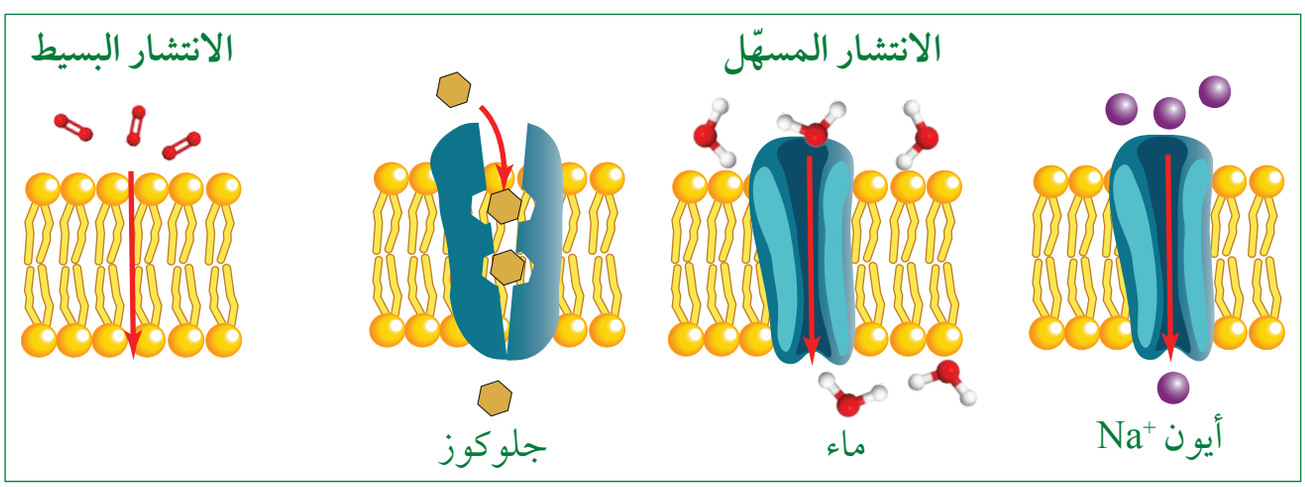
b. صفِ النّتائج الّتي لاحظتها بعد تبادل القطع بين المجموعات. هل كانت ألوانها متطابقة؟ اِشرح.

c. ارسم بيانيًّا نتائج الألوان الأساسيّة النّهائيّة لمجموعتك في مخطط الانتشار scatter plot. استخدم لونًا ثانيًا لرسم البيانات من قطع اللّبّ جميعها (36 قطعة).

الانتشار المسهّل

عندما تكون الموادّ قطبيّة أو كبيرة بحيث لا يمكنها الانتشار عبر الأغشية الخلويّة، يجب أن تتمّ عمليّات أخرى على سطح الخلايا. خلال **الانتشار المسهّل Facilitated diffusion** يحدث انتشار الموادّ عبر الأغشية البلازميّة بمساعدة بروتينات ناقلة؛ ومثل غيرها من أشكال الانتشار السّلبيّ، تكون حركة الجزيئات، بشكلٍ دائمٍ مع فرق التّركيز.

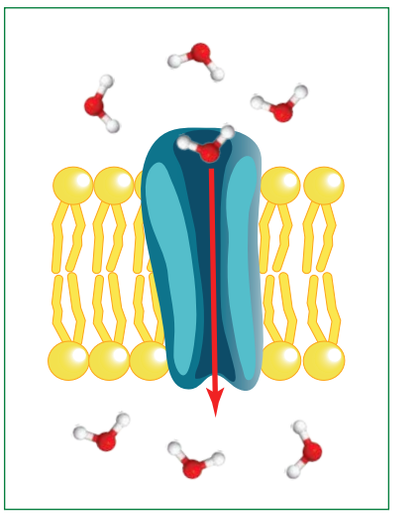
البروتين النّاقل Carrier protein هو نوع من البروتينات الغائرة، يفتح على سطح واحد فقط من الغشاء الخلويّ في الوقت ذاته. ترتبط البروتينات النّاقلة بجزيئات محدَّدة ويُعتقد أنّها تخضع لتغييرات طفيفة في شكلها الهيكليّ للسّماح للجزيئات المستهدفة بالالتصاق بها، وبالمرور عبرها لإطلاقها في داخل الخلايا. البروتينات النّاقلة مسؤولة عن النّقل المسهّل للسّكّريّات البسيطة مثل الجلوكوز والأحماض الأمينيّة ومكوّنات الأحماض النّوويّة عبر الأغشية (**الشّكل 2-25**)، وبعضها قادر على تسخير الطّاقة لنقل جزيئات كبيرة أو كمّيّات كبيرة من الموادّ.



شكل 2-25 أربعة نماذج من النّقل السّلبيّ. البروتين النّاقل يسهّل انتشار جزيئات الجلوكوز.

يعدّ الجلوكوز مصدرًا رئيسًا للطّاقة الخلويّة، ويُعدّ نقله أحد أهمّ وظائف النّقل الّتي تحدث عبر الأغشية الخلويّة. فالبروتين النّاقل للجلوكوز يساعد على نقل الجلوكوز إلى خلايا محتاجة إلى الطّاقة بالكمّيّات الكبيرة المطلوبة. ويعد بروتين **ناقل الجلوكوز 1 Glucose transporter 1** (GLUT1) أول بروتين مُراد استنساخه. تمّ العثور على بروتين ناقل الجلوكوز 1 في خلايا الدّم الحمراء وأنسجة المخّ، وهو يستخدم النّقل المسهّل. تُظهر مقارنات DNA أنّ جين هذا البروتين متماثل بنحو 97% بين البشر والفئران والخنازير والأرانب. ان بروتين ناقل الجلوكوز 1 هو موضع اهتمام الباحثين باعتباره ضرورة؛ فالأطفال الحديثو الولادة الّذين يعانون نقصًا في نقل الجلوكوز قد يُصابون بتشنّجات شديدة وقد تتوقّف أدمغتهم عن التّطوّر بشكل طبيعيّ.

القنوات البروتينيّة تستخدم النّقل السّلبيّ



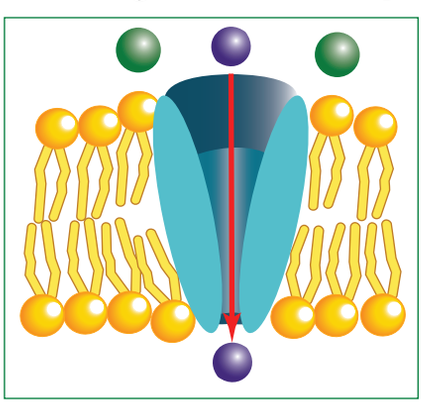
شكل 2-26 نموذج من أكوابورين.

القناة البروتينيّة Channel protein هي بروتين انتقائيّ ينقل الماء أو مادّة مذابة محدّدة. على غرار البروتينات الغائرة الأخرى، تشكّل القنوات البروتينيّة جسرًا بين كلتا طبقتي الدّهن في الغشاء، وهي تسمح للماء أو الأيونات الصّغيرة بالانتشار بسرعة كبيرة. تسمّى القناة البروتينيّة للماء **أكوابورين Aquaporin** (**الشّكل 2-26**) التي تمّ اكتشافها حديثًا في الفجوات المتقبضة. تحتاج الأنسجة في الكلى إلى انتشار كمّيّات هائلة من الماء لاستعادته من البول، لذا طوّرت خلايا الكلى عددًا كبيرًا من الأكوابورين لتلبية هذه المهمّة. بدون أكوابورين، سيحتاج البشر إلى شرب أكثر من 175 L من الماء، وإفراز الكمّيّة نفسها كلّ يوم، لمنع الجفاف عن أجسادهم.

تقوم القنوات البروتينيّة الممرّرة للأيونات بإنشاء «أنفاق» تجذب أيونات ذات خصائص محدَّدة مثل الحجم والشّحنة وتنقلها. تعبر الأيونات الغشاء الدّهنيّ عن طريق الانتشار السّلبيّ من خلال القنوات البروتينيّة. إنّ حجم الفتحة في القناة البروتينيّة للأيونات ضيّق للغاية، وعادة ما تكون بحجم ذرّة واحدة أو اثنتين. بعض القنوات قادرة على انتقاء الأيونات الصّغيرة جدًّا.

إنّ المحافظة على توازن مناسب للأيونات في داخل الخلايا وخارجها أمر مهمّ للمحافظة على التّوازن الأسموزيّ، كما أنّه مهمّ داخل العضيّات وخارجها مثال الميتوكندريا والبلاستيدات الخضراء لإنتاج الطّاقة.

لا تزال الآليّات الدّقيقة الّتي تحدث في بروتين النّقل المسهّل قيد الدّراسة المكثّفة، لكنّ النّماذج تشير إلى أنّ للقنوات الأيونيّة «بوّابات» gates تفتح وتغلق استجابة لمنبّه كهربائيّ electrical stimulus أو جزيء مولّد لإشارة signaling molecule. يمكن أن يؤدّي المنبّه إلى فتح البوّابة للسّماح بتدفّق سريع من أيونات معيّنة، مثل قناة أيون البوتاسيوم (K^+) (**الشّكل 2-27**).



شكل 2-27 نموذج من قناة أيونيّة.

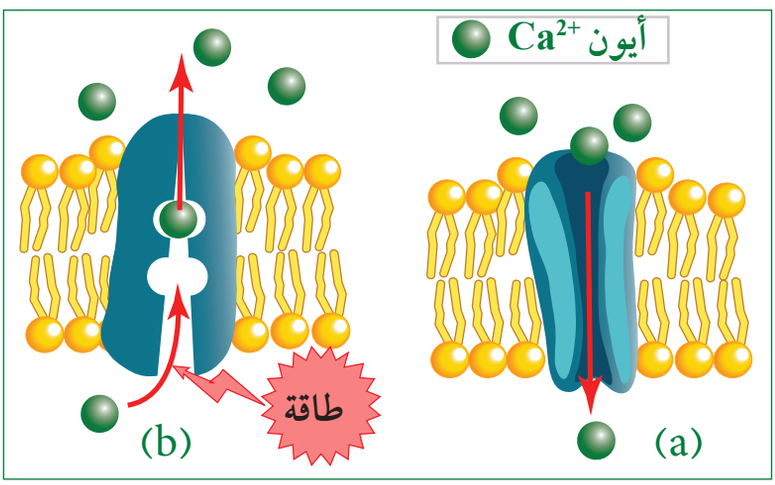
تنتشر قنوات أيونات البوتاسيوم (K^+) البروتينيّة، على نطاق واسع، على الأغشية، وتوجد في جميع الكائنات الحيّة تقريبًا. البوّابات ذات القنوات مصمّمة للسّماح بتدفُّق أيونات معيَّنة عبر الغشاء، لكنّها تمنع تدفُّق أيونات أخرى. حاليًّا لنحو 80 قناة مختلفة لأيونات البوتاسيوم (K^+) علاقة بأمراض خطيرة، مثل عدم انتظام ضربات القلب arrhythmia، الصّرع epilepsy، والتّصلّب المتعدّد multiple sclerosis.

الأيونات تتحرّك من خلال النّقل السّلبيّ أو النّقل النّشط

النّقل النّشط Active transport هو حركة الجزيئات ضدّ اتجاه فرق التّركيز بمساعدة البروتين. يمكن للنّقل النّشط أن ينقل أيونات، جزيئات أو حتّى خلايا كاملة، ويحدث عندما يقوم البروتين بعمله باستخدام الطّاقة المتولّدة في الخليّة. هذه الطّاقة تأتي من جزيئات مثل ATP الّتي يتمّ إنتاجها من خلال الأيض الخلويّ cell metabolism.

من المعروف أنّ أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) تتحرّك بشكل سلبيّ ونشط. ثمّة حاجة إلى أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) لنشاط الإنزيم، وانقباض العضلات، وتكوين العظام بشكل صحيح. عند تحريك أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) ضدّ اتجاه فرق التّركيز (من تركيز أدنى إلى تركيز أعلى) فإن الطاقة تُستهلك.

يزيد فتح قنوات الكالسيوم تركيزَ الكالسيوم، وهذا يؤدّي إلى استجابة سريعة، تتمثّل في انقباض العضلات أو إعطاء الخليّة إشارة أخرى. بعد توليد الاستجابة، يتمّ ضخّ الكالسيوم إلى خارج الخليّة، وفي كثير من الأحيان، يكون هذا الضّخ ضدّ فرق التّركيز باستخدام البروتينات النّاقلة **(الشّكل 2-28)**.



شكل 2-28 أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) تتحرّك عن طريق (a) النّقل السّلبيّ أو (b) النّقل النّشط.

مثبطات البروتين Protein inhibitors تُسمّى السّموم الّتي تمنع بروتينات الغشاء من نقل الجزيئات لأنّها تمنع البروتين عن العمل. في بعض الأحيان، يتمّ تدمير البروتينات، وفي أحيان أخرى، تتوقّف قنواتها عن العمل. طوّرت العديد من الحيوانات سمًّا venom يشلّ الفريسة أو يقتلها. فسمّ العقرب، مثلًا، يحتوي على سموم عصبيّة neurotoxins قويّة تلتصق بالقنوات الأيونيّة وتمنع تدفّق الأيونات.

شكل 2-29 العقرب العربيّ ذو الذّيل السّمين، Androctonus crassicauda.

يعدّ العقرب العربيّ ذو الذّيل السّمين الموجود في قطر قاتلًا للبشر، بخاصّةٍ لأولئك الّذين يعانون مشاكل صحّيّة **(الشّكل 2-29)**. فالسّموم العصبيّة الّتي تحقنها إبرة اللّسع لدى العقرب تعمل بسرعة كبيرة في جسم الإنسان للهجوم على الجهاز العصبيّ المركزيّ، ممّا يسبّب الشّلل والفشل التّنفّسيّ.

تعمل البروتينات النّاقلة كمضخّات بالنّقل النّشط

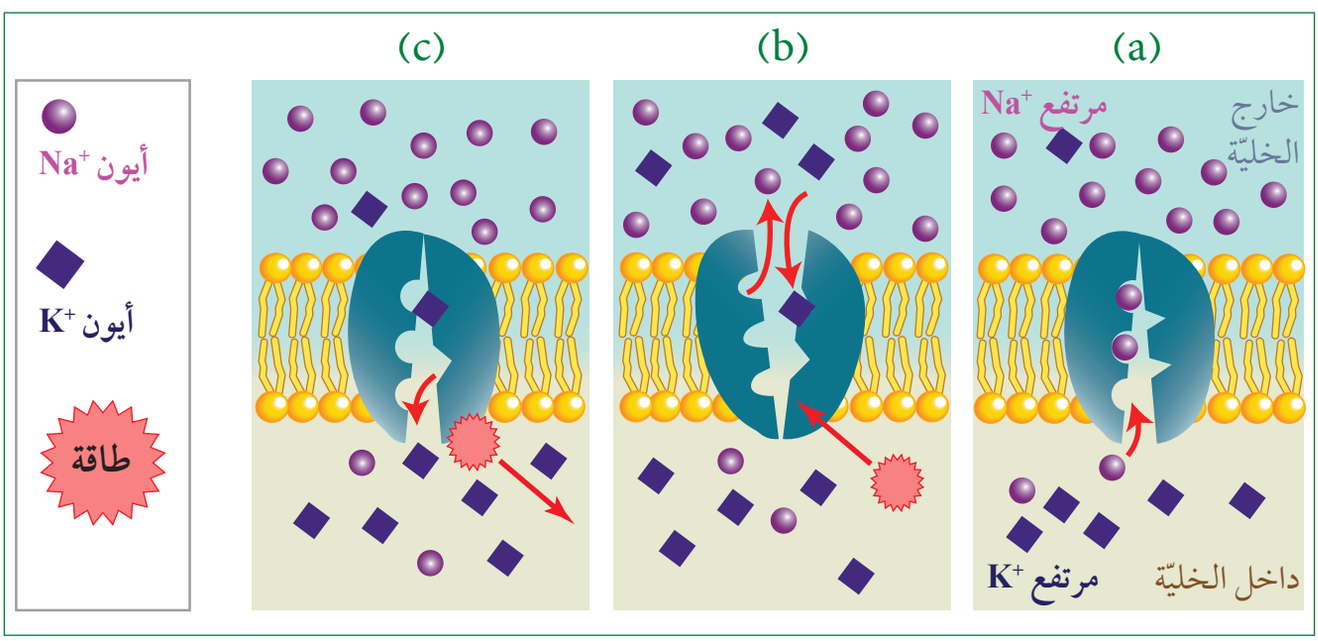
تحافظ الخلايا الحيوانيّة على فرق لتركيز أيونات Na^+ و K^+ عبر أغشيتها الخلوية، وهذا له أهمية خاصة في بعض العمليات الحيوية مثل التحكم في حجم الخلية أو استثارة الخلايا العصبية أو انقباض العضلات. عادةً ما يكون تركيز أيونات البوتاسيوم (K^+) الدّاخليّ للخلايا الحيوانيّة أعلى من تركيزه في بيئتها الخارجيّة، وتركيز أيونات الصّوديوم (Na^+) الدّاخلي أقلّ من تركيزه في البيئة الخارجيّة. للمحافظة على هذا اللّاتوازن، على الخلايا دفع أيونات الصّوديوم (Na^+) وأيونات البوتاسيوم (K^+) في الاتّجاهَيْن المتعاكسَيْن عبر الغشاء الخلويّ، وضدّ فرق التّركيز. عندما تكون الحيوانات في حالة راحة، تستهلك أكثر من 30% من الطّاقة لنقل هذَيْن الأيونيَّيْن فقط.

يعمل النّقل النّشط بشكل مشابه للمضخّة الّتي تدفع الجسَيْمات ضدّ فرق التّركيز. يوضح **الشّكل 2-30** نموذجًا لعمل البروتين الّذي يعمل على ضخّ الصّوديوم للخروج من الخليّة، والبوتاسيوم للدّخول اليها كما يلي:

a. يفتح البروتين من الدّاخل، وعليه مواقع نشطة تجذب أيونات الصّوديوم من داخل الخليّة.

b. يرتبط جزيء حامل للطاقة بالبروتين ويغيّر شكله. يطرد الشّكل الجديد أيونات الصّوديوم (Na^+) ويكشف مواقع نشطة تجذب أيونات البوتاسيوم.

c. يؤدّي ارتباط أيونات البوتاسيوم (K^+) إلى انفصال الجزيء وعودة البروتين إلى شكله الأصليّ الّذي يفتح إلى الدّاخل. تنطلق أيونات البوتاسيوم إلى داخل الخليّة وتتكرّر الدّورة من جديد.

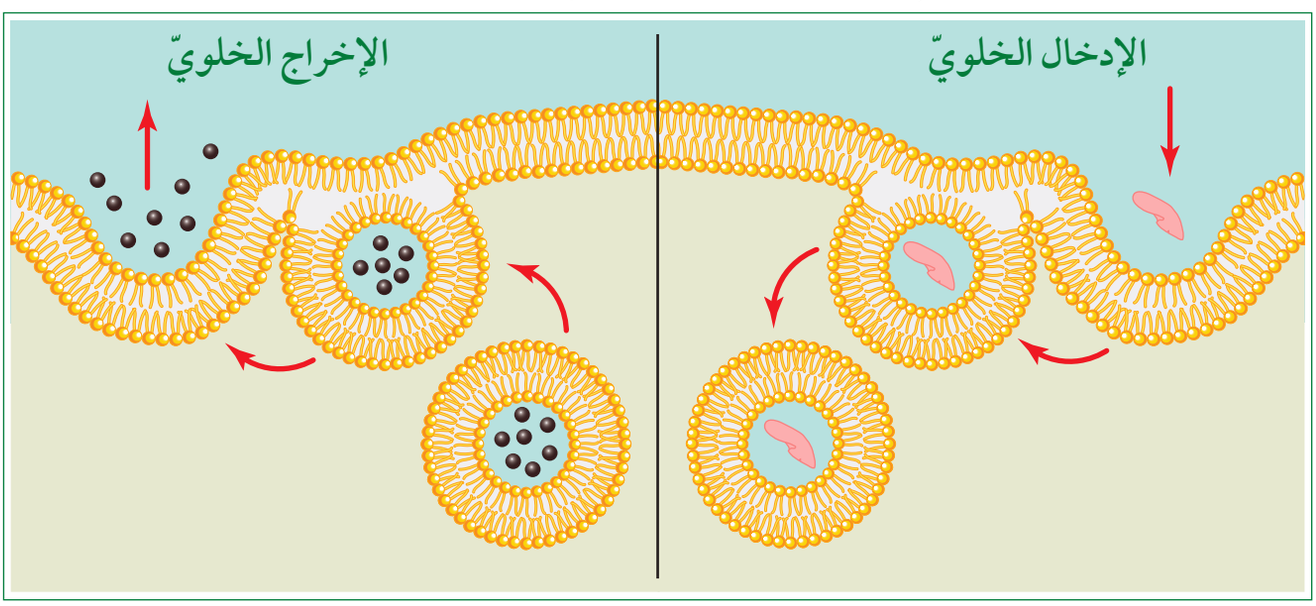


شكل 2-30 نموذج مضخّة الصّوديوم – البوتاسيوم يوضح أن البروتين النّاقل يحتاج إلى الطّاقة ليسهّل نقل أيونات الصّوديوم إلى خارج الخليّة (a إلى b) وأيونات البوتاسيوم إلى داخل الخليّة (b إلى c).

النقل بالحويصلات يحرّك الموادّ الكبيرة

حركة الجزيئات الكبيرة أو الكمّيّات الكبيرة من الجزيئات الحيويّة من الخلايا أو إليها تُسمّى **النقل بالحويصلات Bulk transport**. ثمّة نوعان رئيسانِ من النقل بالحويصلات هما الادخال الخلوي والاخراج الخلوي، وكلاهما يتطلّب طاقة. النقل بالحويصلات يحصل الى داخل الخلايا أو إلى خارجها.

الإدخال الخلويّ Endocytosis هو نوع من النّقل النّشط الّذي ينقل الجزيئات الكبيرة، وأجزاء من الخلايا، وحتّى الخلايا بأكملها، إلى خليّة أخرى. هناك تباينات بين أنواع الإدخال الخلويّ، لكن في جميع هذه الأنواع، يشكّل الغشاء الخلويّ جيبًا حول المادّة المستهدفة. يتقعّر الجيب إلى الدّاخل، ممّا يؤدّي إلى تكوين حويصلة جديدة تتشكّل من الغشاء الخلويّ حول المادّة. قبل فهم كيفيّة عمل الخاصّيّة الأسموزيّة، كان يطلق على أخذ الماء اسم **الشرب الخلوي Pinocytosis**. نحن نعلم اليوم أنّ الخلايا تأخذ الماء بالخاصّيّة الأسموزيّة. في أثناء **البلعمة Phagocytosis**، أو «الأكل الخلويّ»، يمكن أن تحيط الأميبا amoeba بمصدر غذائيّ وتبتلعه. خلايا الدّم البيضاء في جسم الإنسان قادرة على الإحاطة بالبكتيريا المهاجِمة بالطّريقة نفسها (**الشّكل 2-31**).

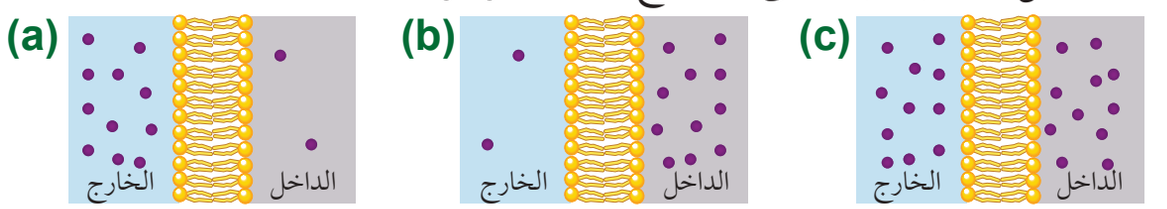


شكل 2-31 الإدخال الخلويّ endocytosis والإخراج الخلويّ exocytosis.

تستخدم الخلايا **الإخراج الخلويّ Exocytosis** لتصدير الجزيئات الّتي لا يمكنها الخروج عن طريق الأغشية الخلويّة. تذكّر أنّه، في خلال تكوين الغشاء بواسطة جهاز جولجي Golgi apparatus، تتحرك الحويصلات المحاطة بأغشية إلى الغشاء الخلويّ، وتندمج معه، ثم تُجبَر الموادّ القابلة للذوبان في الماء على الخروج. في أثناء الإخراج الخلويّ، يمكن للخلايا أيضًا إدخال بروتينات جديدة، ودهون، ومكوّنات أخرى مباشرة في الغشاء عندما تندمج الحويصلة مع الغشاء الموجود. في الكائنات وحيدة الخليّة، مثال الأميبا أو الباراميسيوم، تُطلق الحويصلات الفضلات فقط. وقد طوّرت بعض الكائنات أحاديّة الخليّة تراكيب متخصّصة لضخّ الماء الزائد بسرعة، مثال الأميبا بروتيوس *Amoeba proteus* ويوجلينا جراسيليس *Euglena gracilis*.

تقويم الدّرس 2-2

1. اشرح لماذا توصف الأغشية الخلويّة بأنّها «انتقائيّة» أو «شبه منفذة». أعطِ أمثلة تدعمُ شرحك.
2. استخدم أقلام التلوين لرسم طبقة الفسفوليبيد المزدوجة. أضف الجسيمات الآتية إلى رسمك: غاز ثاني أكسيد الكربون، الجلوكوز، الجلايكول Glycol، غاز الأكسجين، أيونات البوتاسيوم، أيونات الصوديوم، الماء. ارسم ولوِّن، ثمّ عيّن الأسهم لإظهار الجسيمات التي تعبر الغشاء من خلال الانتشار البسيط simple diffusion، الخاصّيّة الأسموزيّة Osmosis، الانتشار المسهّلfacilitated diffusion، النقل النشط active transport.
3. ما الجمل الصحيحة بناء على الأوضاع الثلاثة المرسومة أدناه؟



   a. سوف يتحرك الماء من الداخل إلى الخارج في (الوضع a).
   b. سوف يتحرك الماء من الخارج إلى الداخل في (الوضع a).
   c. سوف يتحرك المذاب من الخارج إلى الداخل في (الوضع b).
   d. سوف يتحرك المذاب من الخارج إلى الداخل في (الوضع c).
4. عدِّد سبعة عوامل تؤثِّر في معدَّلات الانتشار.
5. فيمَ يختلف الانتشار البسيط عن الانتشار المسهّل؟
6. اذكُر اختلافيَن بين قناة النقل البروتينية والبروتين الناقل.
7. متى توفِّر الخليّة الطّاقة للمساعدة على النقل؟ اشرح ذلك.
8. اشرح الاختلاف بين المفردتين في كل من:
   a. الانتشار البسيط والخاصّيّة الأسموزيّة
   b. النقل السلبيّ والنقل النّشط
   c. فرق تركيز أيونات الصّوديوم والبوتاسيوم في نموذج البروتين النّاقل
   d. الإدخال الخلويّ والإخراج الخلويّ
9. ارسُم خارطة مفاهيم تتضمَّن المصطلحات: الأكوابورين، النّقل النّشط، النقل بالحويصلات، الإدخال الخلويّ، أيون الكالسيوم، النّقل السّلبيّ، فرق تركيز أيون البوتاسيوم (K^+) أيون الصّوديوم(Na^+)، غاز الأكسجين، الخاصّيّة الأسموزيّة، الجلوكوز، الانتشار المسهّل، الإخراج الخلويّ. يجب أن تكون الفكرة الرئيسة في الجزء العلويّ من الصّفحة. تأكّد من إيصال جميع المفاهيم بعبارات قصيرة. قد تتّصل بعض المفاهيم بأكثر من فكرة. تداولِ الخرائط مع طالب آخر وناقشْ أيّ إضافات أو تصحيحات، أكملا النّسخة النّهائيّة من الخارطة معًا.

الدّرس 2-3 التّنظيم الأسموزيّ في خلايا النّباتات والحيوانات

Osmoregulation in Plant and Animal Cells

عادةً ما يوصي الأطبّاء بشرب ثمانية إلى عشرة أكواب من الماء يوميًّا، وتعدُّ هذه الكمّيّة ضروريّة لتحقيق التّوازن الصّحيح للإلكتروليتات electrolytes في جسم الإنسان. وتشكّل الأملاح المعدنيّة والسّكّريّات المذابات الرّئيسة في سوائل الجسم. يتمّ المحافظة على توازن الماء بعناية، على مستوى الخلايا و الكائن الحي، بالرّغم من تأثير العوامل الخارجيّة، مثل درجة الحرارة والنّظام الغذائيّ وأحوال الطّقس.

تكون أعضاء الجسم وأنسجته محاطة بسوائل في ظروف وعوامل ثابتة مثل درجة الحرارة و pH وتركيز المذاب، والّتي يسهم كلّ منها في المحافظة على توازن السّوائل في الجسم. تتأثّر الخلايا باستمرار بتغيرات كثيرة تحدث على المستوى الكيميائيّ. لكن كيف تنظّم الخلايا البسيطة جميع الموادّ الّتي نحتاج إليها بكمّيّات مضبوطة؟

مخرجات التّعلُّم

B1114.1 يستقصي حركة الماء بين الخلايا النّموذجيّة والمحاليل ذات الجهود المائيّة المختلفة، ويفسّر ملاحظاته بدلالة الخاصّيّة الأسموزيّة.

B1114.2 يوضح التّأثيرات المختلفة للخاصّيّة الأسموزيّة في الخلايا الحيوانيّة والنّباتيّة.

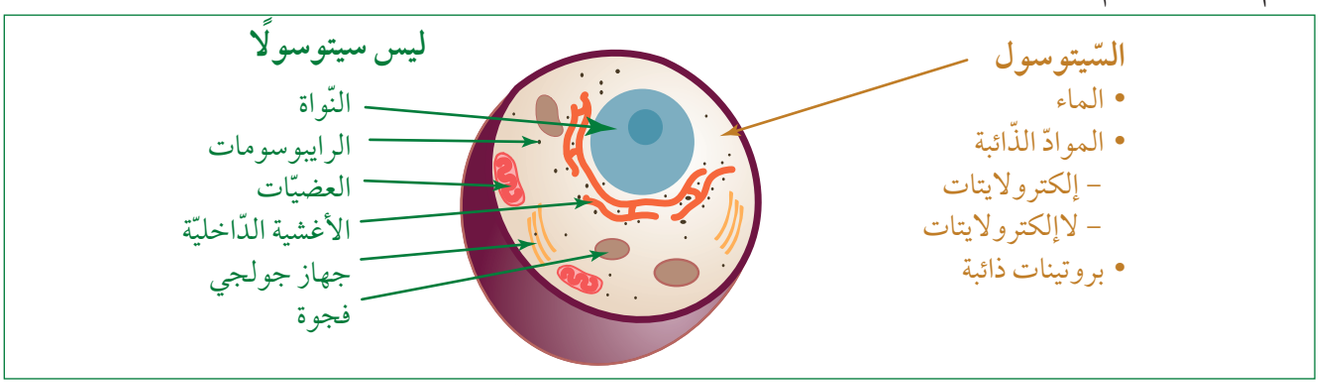
المفردات

Cytosol	السّيتوسول
Osmoregulation	التّنظيم الأسموزيّ
Electrolyte	إلكتروليت
Non-electrolyte	اللّاإلكتروليت
Water potential	جهد الماء
Plasmolysis	البلزمة
Hypotonic Solution	محلول منخفض التّركيز
Isotonic solution	محلول متساوي التّركيز
Hypertonic solution	محلول عالي التّركيز
Tonicity	فرق جهد الماء
Turgor	الامتلاء

التّنظيم الأسموزيّ في الخلايا

التّنظيم الأسموزيّ Osmoregulation هو مجموع العمليّات الحيويّة الّتي تستخدمها الخلايا للمحافظة على توازن الماء والمذابات في السّيتوسول، وهي تشمل الخاصّيّة الأسموزيّة، والانتشار البسيط، والانتشار المسهّل، والعديد من وسائل النّقل النّشط. ولجميع الخلايا طرق عديدة للتّنظيم الأسموزيّ.

لدراسة التّنظيم الأسموزيّ، تمّ تقسيم بيئة الخليّة الدّاخليّة الى قسمَيْن. القسم الأوّل هو **السّيتوسول Cytosol** الّذي يشتمل على الماء وعلى كلّ ما يذوب فيه، مثال الأيونات والبروتينات القابلة للذّوبان (**الشّكل 2-32**). أمّا القسم الثّاني فليس جزءًا من السّيتوسول، وهو يشمل الموادّ والتّراكيب غير القابلة للذّوبان مثل العضيّات والرّايبوسومات. ويطلق على مجموع الموادّ غير القابلة للذّوبان والسيتوسول اسم السّيتوبلازم.



شكل 2-32 يشمل السّيتوسول الماء والموادّ الذّائبة، لكنّه لا يشمل الأشياء الّتي لا تذوب مثال العضيّات.

على الخليّة أن توازن بين نوعَيْنِ من الموادّ الذّائبة في الماء؛ الأوّل يسمّى **الإلكتروليت Electro-lyte**، وهو اسم آخر للأيونات الذّائبة الّتي تنفصل في الماء، ومنها الصّوديوم والكلوريد والكالسيوم والبوتاسيوم والفوسفات، الّتي تعدّ مهمّة لكيمياء الخليّة، ولتوليد الإشارات البروتينيّة الخلويّة كونها موصل جيّد للكهرباء.

لا تنفذ الإلكتروليتات عبر الغشاء الخلويّ إلّا من خلال بروتينات نقل متخصّصة. ففرق تركيز الإلكتروليتات يدفع الماء بدلًا منها، ولهذا السّبب، تمتصّ خلايا الدّم الحمراء الماء الزّائد إذا كانت محاطة بالماء المقطّر، ثمّ تتحلّل وتموت.

التّنظيم الأسموزيّ (توازن الماء) يضبط الإلكتروليتات واللّاإلكتروليتات في الخلايا أو في الكائنات الحيّة.

فالجلوكوز المُذاب في السّيتوسول عبارة عن **اللاإلكتروليت Non-electrolyte** غالبًا يكون موصلًا ضعيفًا للكهرباء، وهو لا ينحلّ بسهولة إلى أيونات عندما يكون في المحلول. إنّ الفركتوز واليوريا والكحوليّات كالجلايكول والإيثانول هي مثال على اللّاإلكتروليتات.

فرق جهد الماء والخلايا الحيوانيّة

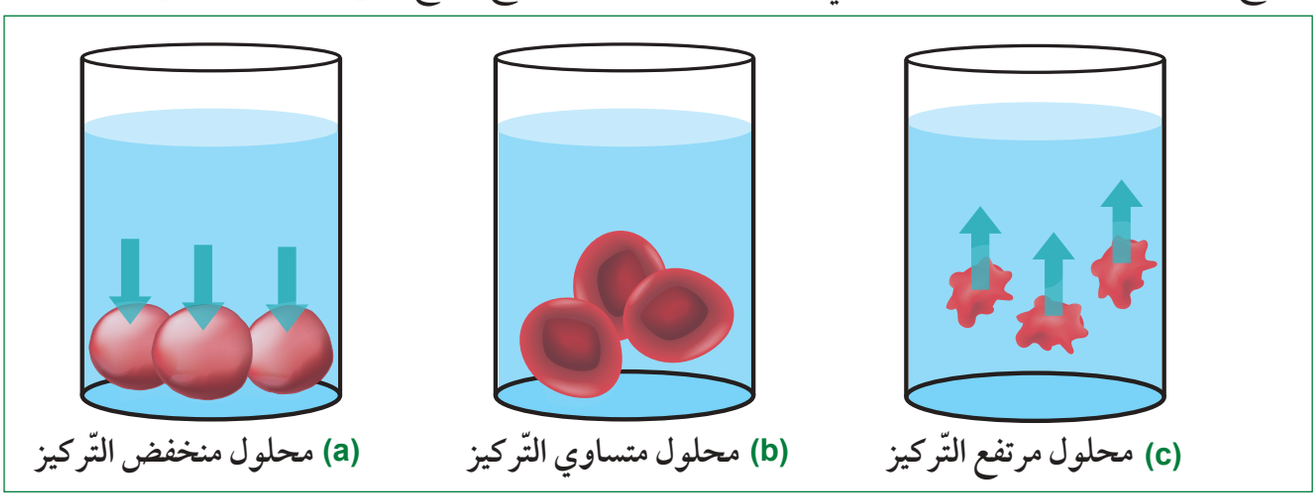
يقاس مَيْل الماء إلى الحركة بجهد الماء **Water potential** (ψ). يتدفق الماء من منطقة ذات جهد ماء عال إلى منطقة ذات جهد ماء أدنى، لاحظ العلماء أنّ خلايا الدّم الحمراء ازداد حجمها وانفجرت عند وضعها في المياه النّقية، والسّبب هو اختلاف جهد الماء بسبب تركيز الملح الأعلى في داخل الخليّة. يتدفّق الماء المقطَّر إلى الخليّة في اتّجاه الوسط ذي التّركيز الملحيّ الأعلى إلى أن تنفجر الخليّة. تحتاج خلايا الدّم الحمراء تحديدًا إلى 0.85% من محلول كلوريد الصّوديوم للمحافظة على على حجمها الطّبيعيّ وشكلها القرصيّ.

فرق جهد الماء Tonicity ينشأ من الاختلاف في تراكيز المحاليل على جانبي غشائها شبه المنفذ. وهو لا يتأثر إلّا بالمذابات الّتي لا يمكنها عبور الغشاء، مثال الملح بالنّسبة إلى غشاء خلايا الدّم الحمراء، أمّا الموادّ المذابة الّتي يمكنها أن تعبر الغشاء فلا تؤثّر في فرق جهد الماء لأنّ هذه الموادّ المذابَة تتحرّك بسرعة مع الماء حتّى يصبح تركيزها متساويًا، على جانبي الغشاء.

يستخدم العلماء ثلاثة مصطلحات لوصف فرق جهد الماء بين تركيز المادّة المُذابَة في داخل الخليّة وتركيز السّائل المحيط. **للمحلول المنخفض التّركيز Hypotonic solution** تركيز أدنى من التّركيز داخل الخليّة (**الشّكل 2-35 a**)، لهذا السّبب تنتفخ خلايا الدّم الحمراء في المياه المقطّرة لأنّ الماء يتدفّق إلى داخل الخلايا وقد تنفجر.

للمحلول المتساوي التّركيز Isotonic solution التّركيز نفسه الموجود في داخل الخليّة. بالنّسبة إلى خلايا الدّم الحمراء، هو محلول يحتوي على ملح بنسبة 0.85% (**الشّكل 2-35 b**).

المحلول العالي التّركيز Hypertonic solution تركيزه أعلى من التّركيز في داخل الخليّة (**الشّكل 2-35 c**). تنكمش خلايا الدّم الحمراء الموضوعة في محلول ملح تركيزه 5% لأنّ الماء يتدفّق خارج الخلايا، وكلّما زاد الاختلاف في التّركيز، كان التّأثير أوضح وأبلغ على الخليّة (**الشّكل 2-35**).

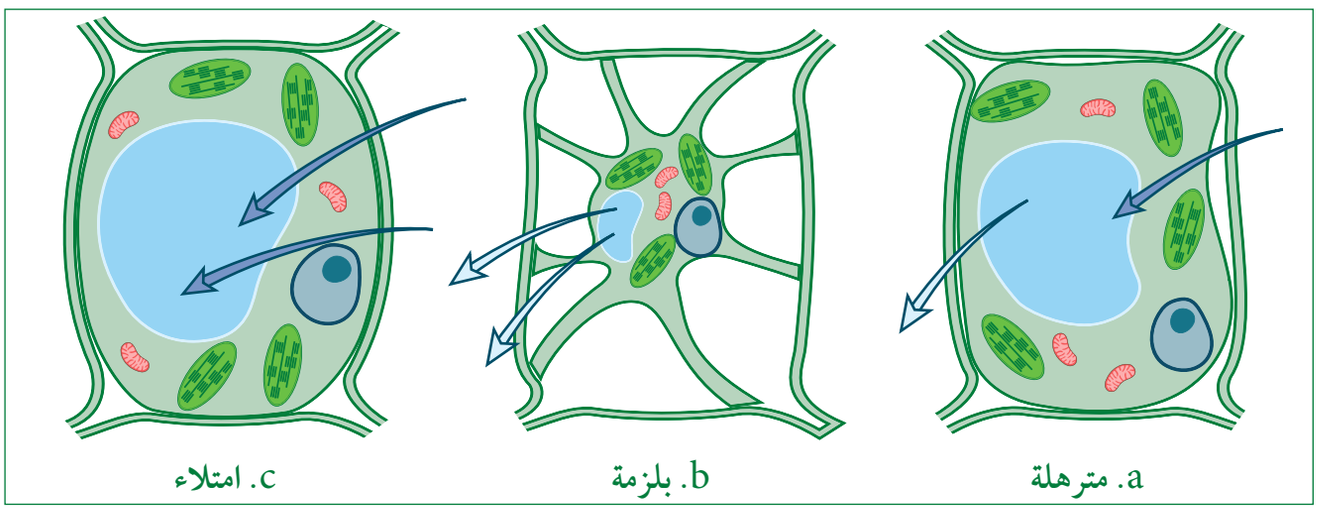


شكل 2- 35 سلوك خلايا الدّم الحمراء في ثلاثة محاليل ملح مختلفة.

تركيز الملح في مياه البحر يقارب 3.5%، فهو محلول عالي التّركيز بالنّسبة إلى خلايا الدّم الحمراء حيث التّركيز الدّاخليّ للملح بنسبة 0.85%. وهذا ما يسبب تجفيف الجسم عن طريق سحب المياه من الخلايا. لذا يؤدّي شرب مياه البحر إلى استنزاف سوائل الجسم، وتشنّج العضلات، وجفاف الفم، والعطش.

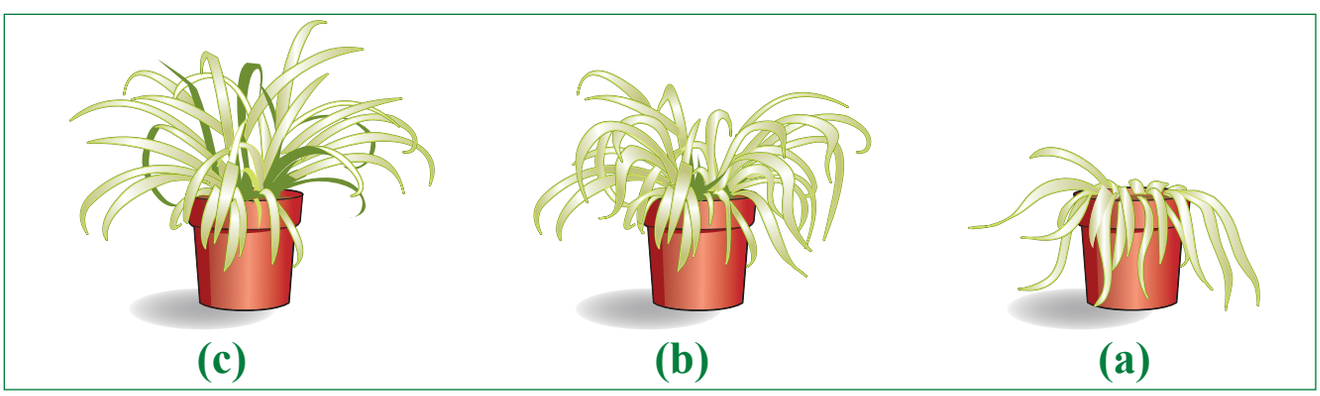
فرق جهد الماء في الخلايا النّباتيّة

تعيش النّباتات البرّيّة في بيئة جافّة. تُحاطُ معظم الخلايا النّباتية بكمّيّة محدودة من المياه، وبالتّالي فإنّ السّيتوبلازم في الخلايا النّباتيّة يكون تركيزه أعلى قليلًا وتكون الخلايا مترهلة Flac-cid. (**الشّكل 2-36 a**). إذا وضعت الخليّة النّباتيّة في محلول تركيزه أعلى، فستخسر الخليّة المياه، وتنكمش أو تمرّ بحالة **البلزمة Plasmolysis** الشّديدة، وفي هذه الحالة ينفصل الغشاء البلازميّ عن جدار الخليّة ويتقلص بسبب فقدان المياه من خلال الأسموزيّة (**الشّكل 2-36 b**) فيذبل النّبات وتصبح الأنسجة ذابلة.



شكل 2-36 فرق جهد الماء في النّبات (a) متساوي التّركيز، مترهّلة طبيعيّة (b) عالي التّركيز، البلزمة (c) منخفض التّركيز، امتلاء.

واذا وضعت الخلية النباتية في محلول منخفض التّركيز، تمتصّ الخليّة النّباتيّة المياه بواسطة الخاصّيّة الأسموزيّة. وإنّ الزّيادة النّاتجة في حجم المياه داخل الخليّة تزيد الضّغط فيها، ما يدفع بالسّيتوبلازم باتّجاه جدار الخليّة، وتُعرَف هذه الحالة باسم **الامتلاء Turgor** (**الشّكل 2-36 c**)، ويعرف الضغط الّذي يقوم به الماء في هذه الحالة على جدار الخلية بضغط الامتلاء. يساعد امتلاء الخلايا النّباتيّة على دفعها باتّجاه بعضها بعضًا. فالصّلابة النّاجمة عن هذا الامتلاء هي الّتي تساعد النّباتات الّتي لا سيقان خشبيّة لها على الانتصاب بشكل مستقيم؛ وبدون هذه الصّلابة، يمكن للنّباتات أن تهوي متأثّرة بثقلها. إنّ العودة إلى الحالة الطّبيعيّة من الامتلاء تقف وراء انتصاب النّبات المزروع في أصيصٍ بعد ريّه (**الشّكل 2-37**).



شكل 2-37 ريّ النّبات الذّابل (a) يعيد حالة الامتلاء (c).

3-2 فرق جهد الماء في نسيج البصل الأحمر

سؤال الاستقصاء	كيف يمكن تمثيل التّنظيم الأسموزيّ في خلايا البصل؟
الموادّ المطلوبة	مجهر، شرائح، أغطية شرائح، مناديل مربّعة، ملاقط، مياه صنبور، ماء مقطّر، محلول NaCl تركيز 6%، (3) قطّارات، بشرة بصل أحمر، قلم للكتابة على الزّجاج. محلول جلوكوز تركيزه 6% (اختياري)، كاميرا فيديو رقميّة.

الخطوات

1. قم بتحضير شريحتك الخاصّة لبشرة البصل الدّاخليّة مستخدمًا مياه الصّنبور، ومتّبعًا إرشادات المعلّم. قد تحتاج مجموعتك إلى العديد من الشّرائح المعدَّة.
2. افحص تحت قوّة تكبير (4x أو10x)، وركِّز على عدد قليل من الخلايا في الوسط، ثمّ انتقل إلى التّكبير الأعلى (100x).
3. ارسم مظهر الخلايا الأصليّ مع كلّ التّفاصيل الّتي تشاهدها، وحدِّد قوّة التّكبير، وضع عنوانًا للرّسم.
4. في أثناء مشاهدة الخليّة، أضف 3-2 قطرات من محلول الملح على طرف غطاء الشّريحة من جهة واحدة، على أن تضع قطعة صغيرة من المنديل المربّع على الطّرف المقابل لغطاء الشّريحة. من المفترض أن يسحب المنديل محلول الملح عبر الشّريحة. هذا العمل يتطلّب جهدًا منسَّقًا، لذلك كن مستعدًّا للمحاولة مرّة أخرى.
5. راقب آثار محلول الملح على كلّ خليّة من خلايا البصل.
6. ارسم مظهر الخلايا، وعيِّن عليه الأجزاء، وضع له عنوانًا جديدًا. علّم الشّريحة، وضعها جانبًا، وانتظر عشر دقائق.
7. حضِّر شريحة جديدة من بشرة البصل الدّاخليّة مستخدمًا مياه الصّنبور. كرّر الخطوة 4، ولكن، في أثناء المشاهدة، أضف الماء المقطّر بدلًا من الملح، واستخدم تقنيّة المنديل.
8. انتظر نحو 5 دقائق قبل الرّسم، ثمّ ارسم شكلًا ثالثًا.
9. استعد الشّريحة الّتي علّمتها مسبقًا مع محلول الملح. شاهد هذه الشّريحة مرّة أخرى مدوّنًا التّغييرات الّتي تلاحظها. أضف 5-4 قطرات من الماء المقطّر في أثناء المشاهدة.
10. ارسم مخطّطًا نهائيًّا لملاحظاتك.

المناقشات والاستنتاجات

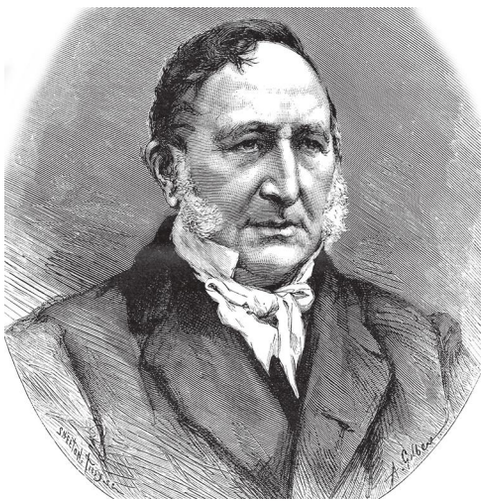
a. شارك الرّسومات أو الصّور الّتي جمعتها وناقشها.
b. ما الميزات الّتي يمكن تعرّفها في الرّسم الأول.
c. وضِّح ما لاحظته عند إضافة المحلول المالح إلى الشّريحة.
d. في أيّ اتّجاه تحرّكت جزيئات الماء في الخطوة رقم 5 وفي الخطوة رقم 8؟

تقويم الدّرس 2-3

1. وضّح الفارق بين السّيتوبلازم والسّيتوسول على مخطّط قِن Venn.
2. أعطِ مثالًا على إلكترولايت ولاإلكترولايت موجودين في الخلايا. ما الفارق بينهما؟
3. كيف يختلف الانتشار البسيط عن الانتشار المسهّل؟
4. متى يجب توفير الطّاقة للخليّة للمساعدة على النّقل؟ اشرح ذلك.
5. ما المشكلة الّتي تتطلّب تكيّف الحيوانات عديدة الخلايا للبقاء في المياه العذبة؟
   a. المياه المالحة وحدها تسبّب المشاكل للحيوانات الّتي تعيش فيها.
   b. تميل الخلايا والأنسجة الحيوانيّة إلى امتصاص الكثير من المياه.
   c. ليس للخلايا والأنسجة الحيوانيّة طريقة لتنظيم فرق جهد الماء.
   d. تميل الخلايا والأنسجة الحيوانيّة إلى فقدان الكثير من الماء إلى بيئة المياه العذبة.
6. هل يزداد جهد الماء أو يقلّ في الخليّة عند زيادة تركيز الموادّ المذابة؟
7. ما المصطلح المستخدم لوصف محلول يحتوي على خلايا دم حمراء، ونسبة تركيز الملح فيه 2%؟ ماذا يحدث للخليّة؟

ضوء على العلماء

يعتبر العالم الهولندي جيراردوس يوهان مولدر Gerardus Johannes Mulder أول من بيّن أن جزيئات الحيوانات احتوت على ذرات كثيرة وأنها في معظمها مركبة من الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين مع الكبريت والفوسفور. وتظهر في **الجدول 2-1** البيانات الأصلية التي نشرها مولدر.



شكل 2-38 الدكتور ج. ي. مولدر مكتشف البروتينات.

سمّى مولدر المركبات الجديدة في مقالته التي كتبها عام 1839 بالبروتينات وفق ما اقترحه الكيميائي السويدي جونز جاكوب برزليوس Jons Jacob Berzelius عام 1838.

«كنت مشغولا لبعض الوقت بدراسة المواد اكثر المواد أساسية في مملكة الحيوانات ... المواد العضوية الموجودة في كل مكونات جسم الحيوان، ... يمكن تسميتها بالبروتين اشتقاقا من كلمة بروتيوس اليونانية ...»

جدول 2-1 بيانات مولدر الأصليّة.

العنصر	الذرات	الكتلة الكلية	% من الكتلة
الكربون	400	30,574.80	54.9%
الهيدروجين	620	3,868.68	6.95%
النيتروجين	100	8,851.80	15.9%
الأكسجين	120	12,000.00	21.6%
الفوسفور	1	196.16	0.35%
الكبريت	1	201.17	0.36%
المجموع		55,692.61	100%

وقد أصبح واضحا من عمل دكتور مولدر أن الجزيئات التي تدعم الحياة كبيرة جدا ومعقدة جدا. تحتوي جزيئات الماء على ثلاث ذرات، بينما يصل عدد الذرات معظم المركبات الكيميائية الأخرى حتى عشرين ذرة أو قريبا منها. يحتوي جزيء البروتين الواحد على آلاف الذرات، كما أن تعقيد جزيئات البروتين هذا هو الذي يقف خلف حصول التفاعلات الحيوية المعقدة.

ولد جيراردوس مولدر عام 1802 في مدينة اوترخت الهولندية، وكان مهتما بالطب. وقد اكتسب درجة طبية من جامعة اوترخت ومارس الطب في مدينة امستردام ثم في مدينة روتردام. إثر مساعدته في تأسيس المدرسة الطبية الجديدة عام 1828، وكان عمره 26 سنة، أصبح الدكتور مولدر الشاب أستاذا محاضرا في علم النبات والكيمياء والرياضيات والصيدلة. وأصبح أخيرا أستاذ الكيمياء في جامعة اوترخت حيث كان أول من وصفوا التركيب الكيميائي للبروتين.

الوحدة2

مراجعة الوحدة

الدّرس 2-1: الأغشية البلازميّة

- تحيط بالخلايا بدائيّة النّواة والخلايا الحقيقيّة النّواة أغشية بلازميّة مكوَّنة من **طبقة مزدوجة من الليبيدات Lipid bilayer**.
- تطوّرت الخلايا الحقيقيّة النّواة باتّجاه تكوين **أغشية داخليّة Endomembranes** إضافيّة حول العُضيّات وفي داخلها.
- يصف **النّموذج الفسيفسائيّ المائع Fluid mosaic model** الأجزاء الوظيفيّة الكثيرة في الغشاء الخلويّ، ومن ضمنها **البروتينات الغائرة Integral proteins** الّتي تمتدّ عبر الغشاء، و**البروتينات الطّرفيّة Peripheral proteins** الّتي تكون في أحد جانبي الغشاء.
- تنقل **المستقبلات البروتينيّة Receptor proteins** الإشارات الكيميائيّة إلى بروتينات أخرى.
- **البروتينات السّكّريّة Glycoproteins** محدّدات سطحيّة تساعد على التّعارف بين الخلايا.
- بعض **اللّيبيدات السّكّريّة Glycolipids**، وهي اتّحادات بين الكربوهيدرات واللّيبيدات تحفّز نمو الخلايا أو تثبطه.
- **الكولسترول Cholesterol** نوع من اللّيبيدات الّتي تساعد على استقرار الأغشية البلازميّة إزاء التغير في درجة الحرارة.

الدّرس 2-2: النّقل السّلبيّ والنّقل النّشط

- **الانتشار البسيط Simple diffusion** هو عمليّة نقل سلبيّ تنتقل من خلالها الجسيمات من تركيز مرتفع إلى تركيز منخفض.
- الخاصّيّة **الأسموزيّة Osmosis** هي الانتشار البسيط والسّلبي للمياه عبر غشاء شبه منفذ.
- تضمّ العوامل التي تؤثّر في معدّل الانتشار المساحة السّطحيّة للأغشية الخلويّة وسماكتها، وحجم وقطبيّة الجسيمات المتحرّكة، وكثافة السيتوبلازم، ودرجة الحرارة.
- **الانتشار المسهّل Facilitated diffusion** يحدث عندما تتحرّك الجزيئات من خلال القنوات البروتينيّة **كالأكوابورين Aquaporins** الّتي تسمح لجزيئات الماء بعبور الغشاء الخلويّ.
- **النّقل النّشط Active transport** يحدث عندما تنقل بروتينات ناقلة متخصّصة الجزيئات بعكس فرق التّركيز باستخدام الطّاقة (ATP).

- **الإدخال والإخراج الخلويّ Endocytosis and exocytosis** عبارة عن آليّات نقل بالجملة للموادّ من الخلايا وإليها عن طريق اندماج أو انفصال الحويصلات عن الغشاء الخلويّ وبالتّالي إعادة تشكيله.
- **البلعمة Phagocytosis** و**شرب الخلايا Pinocytosis** طريقتان لوصف الإدخال الخلويّ.

الدّرس 2-3: التّنظيم الأسموزيّ في خلايا النّباتات والحيوانات

- يصف **التّنظيم الأسموزيّ Osmoregulation** الآليّات الّتي تنظّم من خلالها الكائنات الحيّة حركة المياه عبر الأغشية الخلويّة.
- **الإلكتروليتات Electrolytes** مذابات تشكّل أيونات في المحاليل، كأيونات الصّوديوم (Na^+) أو البوتاسيوم (K^+).
- **اللّاإلكتروليتات Non-electrolytes** لا تشكّل أيونات في المحاليل.
- طوّرت الخلايا النّباتيّة جدرًا خلويّة لتتكيّف على الحياة على اليابسة ولتمنع **البلزمة Plasmolysis**.
- يتدفّق الماء إلى داخل الخلايا أو إلى خارجها استجابةً لاختلافات جهد الماء.
- يصف **فرق جهد الماء Tonicity** الفارق النّسبيّ في تركيز المحاليل بين داخل الخليّة وخارجها.
- يقارن تركيز المحلول داخل الخلايا وخارجها بالعبارات الثّلاث الآتية: **منخفض التّركيز Hypo-tonic**، **متساوي التّركيز Isotonic**، **عالي التّركيز Hypertonic**.

اختيار من متعدِّد

1. أي من التّراكيب الآتية موجود في الخلايا بدائيّة النّواة؟
   - a. النّواة
   - b. الشبكة الأندوبلازمية
   - c. DNA
   - d. البلاستيدات الخضراء

2. ماذا يحدِّد الحجم الّذي يمكن أن تبلغه الخلايا في أثناء نموّها؟
   - a. سماكة جدر الخلايا.
   - b. التّركيب الكيميائيّ للأغشيّة الخلويّة.
   - c. معدّل انتشار الجسيمات.
   - d. سرعة إنتاج الفضلات.

3. الأيونات
   - a. تنتشر من التّركيز الأقلّ إلى التّركيز الأعلى.
   - b. تنتشر من التّركيز الأعلى إلى التّركيز الأقلّ.
   - c. يمكن أن تتحرّك من تركيز منخفض إلى تركيز عالٍ أو من تركيز عالٍ إلى تركيز منخفض.
   - d. لا تعبر الأغشية.

4. يجري تبادل الموادّ الغذائيّة والفضلات عبر:
   - a. الجدر الخلويّة.
   - b. الأغشية الخلويّة.
   - c. السّيتوبلازم
   - d. (a) و (b).

5. مضخّة الصّوديوم–البوتاسيوم (Na^+/K^+) نوع من:
   - a. البروتين النّاقل.
   - b. الفسفوليبيد
   - c. القناة البروتينيّة.
   - d. الانتشار

6. يوصف فرق التركيز بأنه
   - a. دخول الماء بالأسموزية إلى الخلية.
   - b. التراكم التدريجي للايونات في المحلول.
   - c. الفرق بين محلول منخفض التركيز ومحلول عالي التركيز.
   - d. الفرق في التركيز على الجانبين المتقابلين لغشاء.

7. أيّ من الآتي افضل وصف لخلايا الدّم في محلول ملحيّ ذي تركيز أعلى ممّا هو داخل الخلايا؟
   a. خلايا الدّم عالية التّركيز بالنّسبة إلى بيئتها.
   b. خلايا الدّم متساوية التّركيز بالنّسبة إلى بيئتها.
   c. خلايا الدّم منخفضة التّركيز بالنّسبة إلى بيئتها.
   d. لا يمكن وصف فرق جهد الماء بالنّسبة إلى خلايا الدّم.

8. ما الّذي يجعل جزيء الفسفوليبيد مناسبًا تمامًا لأن يكون المكوّن البنائيّ الأوّل للأغشيّة البلازميّة؟
   a. لا تذوب الفسفوليبيدات في الماء أبدًا.
   b. تشكّل الفسفوليبيدات تركيبًا انتقائيّ النّفاذيّة.
   c. تكوّن الفسفوليبيدات روابط كيميائيّة قويّة بين الجزيئات فتشكّل تركيبًا مستقرًّا.
   d. تكوّن الفسفوليبيدات روابط كيميائيّة مع بروتينات الأغشية ممّا يحفظ البروتينات داخل الغشاء.

9. تُسمّى حركة أيونات الصّوديوم من منطقة تركيز عالٍ إلى منطقة تركيز منخفض _____.
   a. النّقل النَّشط.
   b. الخاصّيّة الأسموزيّة.
   c. الانتشار المسهّل
   d. البلعمة

10. ماذا يحصل لخليّة اذا وضعت في ماء مقطّر؟
   a. تنكمش
   b. تنتفخ
   c. تخسر الماء.
   d. لا تحصل أيّ حركة صافية للماء.

11. أي من الآتي يتطلّب بناء غشاء؟
   a. البلعمة
   b. الإخراج الخلويّ.
   c. الإدخال الخلويّ.
   d. كلّ ما سبق صحيح.

12. أي من الجزيئات الحيويّة الآتية ليس موجودًا في الأغشية البلازميّة؟
   a. الكربوهيدرات
   b. اللّيبيدات
   c. البروتينات
   d. الأحماض النّوويّة.

13. أيّ من الآتي يمثّل النّسبة الصّحيحة للمساحة السّطحيّة إلى الحجم بالنّسبة إلى خليّة كرويّة قطرها وحدتان؟

a. 1/2 **c.** 3

b. 3/2 **d.** 6

14. أيٌّ من الآتي إلكترولايت؟

a. الجلوكوز **c.** كلوريد الصّوديوم.

b. الإيثانول **d.** DNA

15. أي من الآتي ليس من وظائف الغشاء الخلوي؟

a. تبادل المواد الغذائيّة. **c.** إطلاق الانقسام الميتوزي.

b. تبادل الفضلات. **d.** استقبال رسائل الهرمونات.

16. التهام البكتيريا بواسطة خلايا الدّم البيضاء يُسمّى:

a. البلعمة **c.** الإخراج الخلويّ.

b. الشرب الخلوي. **d.** الإدخال الخلويّ.

17. تزداد ميوعة الغشاء البلازميّ بواسطة:

a. امتلاكه الكولسترول.

b. الاصطفاف المتماسك للفسفوليبيدات.

c. امتلاكه عددًا كبيرًا من البروتينات الغشائيّة.

d. الرّوابط التّساهميّة الثّنائيّة بين ذرّات الكربون في ذيول الحمض الدّهنيّ.

18. ما الحالة الّتي تصف خلايا نباتيّة ملأى بالماء حيث تقوم أغشيتها الخلويّة بالضّغط على الجدر الخلويّة لدعم النّبات؟

a. فرق جهد الماء. **c.** التّحلّل

b. البلزمة **d.** الامتلاء

19. أي من الآتي موصل للكهرباء؟

a. الجلوكوز

b. الإيثانول

c. كلوريد الصّوديوم.

d. DNA

أسئلة إجابات قصيرة وتفكير ناقد

الدّرس 1.2: الأغشية البلازميّة

20. لمَ على الخليّة العاملة أن تبقى صغيرة الحجم؟ هل من أدلّة تدعم إجابتك؟ وهل ثمّة أيّ استثناءات؟

21. ما فصائل الدّم البشريّ الأربع، وكيف تدخل البروتينات السّكّريّة في فهمنا فصائل دم الإنسان؟

22. ما الفارق بين الغشاء البلازميّ والغشاء الخلويّ؟

23. كيف تنتظم جزيئات الفسفوليبيدات في الماء؟

24. أُرسم طبقة الفسفوليبيد المزدوجة في الغشاء الخلويّ، وعيّن على الرّسم المكوّنات الآتية: الرّأس الفوسفاتيّ، ذيل الحمض الدّهنيّ، الجليسيرول، سلسلة الهيدروكربون، المنطقة الكارهة للماء، المنطقة المحبّة للماء.

25. عدِّد الوظائف الأساسيّة لكلّ من الجزيئات الآتية في الغشاء:

a. الفسفوليبيد

b. البروتين الغائر.

c. البروتين الطّرفيّ.

d. البروتين الناقل.

e. المستقبل بروتينيّ.

26. أعطِ مثالًا على كيفيّة تواصل البروتينات كيميائيًّا في داخل الخلايا وخارجها. توخَّ الدّقّة في إجابتك.

27. أُرسم خارطة مفاهيم توضح ارتباط العبارات والمفردات الآتية بعضها ببعض وعلى قمّتها الفكرة الرّئيسة «الغشاء الخلويّ والنّقل»: قطبيّ، غير قطبيّ، فسفوليبيد، بروتين غائر، بروتين طرفيّ، بروتين ناقل، قناة بروتينيّة، أيونات، غاز الأكسجين، الماء، داخل الخليّة، خارج الخليّة، الأسموزيّة، الانتشار، النّقل النّشط، النقل بالحويصلات، منحدر التّركيز.

الدّرس 2.2: النّقل السّلبيّ والنّقل النّشط

28. لماذا تعتمد نفاذيّة الموادّ عبر الغشاء الخلويّ على قطبيّة المادّة أو عدم قطبيّتها؟

29. رتِّب هذه الجزيئات من الأكثر نفاذًا إلى الأقلّ نفاذًا، من خلال طبقة الفسفوليبيد المزدوجة: الجلوكوز، بروتين قابل للذَّوبان، أيون الصّوديوم، الماء، غاز الأكسجين، الجليسيرول.

30. اذكر طريقتَيْن تنتقل بهما المياه عبر الغشاء الخلويّ.

31. كيف يختلف المحلول المائيّ الموجود في نظام حيويّ (مثل الخليّة) عن الماء العاديّ (كما في كوب زجاجيّ أو في البركة)؟

32. ناقش سبب تأثير كلّ ممّا يأتي في معدَّل الانتشار: حجم الجسَيْمات ودرجة الحرارة وكثافة السّيتوبلازم.

33. كيف تؤثّر درجة الحرارة في معدّل الخاصّيّة الأسموزيّة في البنجر؟ اِشرح.

34. كيف يختلف النّقل المسهّل عن الانتشار؟

35. صف حالتَيْن يتحرّك فيهما الجسَيْم من خلال الغشاء الخلويّ بوِساطة النّقل النّشط بدلًا من الانتشار.

36. ارسمْ شكلًا تخطيطيًّا لبروتين توضح فيه نقل كلّ من:

a. الماء
b. الجلوكوز
c. أيونات الصّوديوم.
d. أيونات الكالسيوم.

37. اشرح عمليّة الإدخال الخلويّ في الأميبا وارفق الشّرح برسم الخطوات ورقّمها بالتّرتيب.

38. استخدم الإنترنت أو مصادر أخرى للبحث عن الإدخال الخلويّ endocytosis والإخراج الخلويّ exocytosis عند الطلائعيات protists والأميبا ameoba. كيف تختلف عمليّتاهما وتراكيبهما وكيف تتشابهان؟

الدّرس 3.2: التّنظيم الأسموزيّ في خلايا النّباتات والحيوانات

39. ما التّنظيم الأسموزيّ؟ وما أهمّيّته للخلايا جميعها؟

40. لماذا تعدُّ الإلكترولايتات أكثرَ أهمّيّةً للتّنظيمِ الأسموزيِّ من اللّاإلكترولايتات؟

41. ما أهمّيّة الغشاء الخلويّ في المسائل الطّبيّة الآتية؟

a. فصيلة الدّم.
b. التّليّف الكيسيّ.
c. الكولسترول المرتفع
d. فيروس HIV

42. ينتج من الكوليرا الّتي تسبّبها بكتيريا فيبريو كوليرا *Vibrio cholerae* إسهال حادّ يؤدّي إلى جفاف الجسم. فالسّمّ الّذي تفرزه البكتيريا يسبّب إطلاق أيونات الكلوريد (Cl^-) من الخلايا المبطّنة للأمعاء الدّقيقة ويثبط امتصاص الخلايا لأيونات الصّوديوم (Na^+). وضّح كيف يتسبّب اختلال توازن تركيز الأيونات الجفاف الشّديد أو حتّى الموت إذا لم تتمّ معالجته.

43. لماذا نشير أحيانًا إلى جهد الماء بالضّغط الأسموزيّ؟

44. قارن فرق جهد الماء في الخلايا الحيوانيّة والخلايا النّباتيّة مستخدمًا المصطلحات الآتية: محلول منخفض التّركيز، محلول متساوي التّركيز، محلول عالي التّركيز، الامتلاء، الضّغط الأسموزيّ، البلزمة. أضف أشكالًا تخطيطيّة إذا رغبت في ذلك.

45. لخِّص أهمّيّة خلايا الدّم الحمراء في فهمنا الرّاهن لكيفيّة عمل الأغشية. ما الدّور الّذي قد تؤدّيه الضّرورة الطّبّيّة في السّعي إلى الحصول على إجابات؟

الربط مع الثقافة العلميّة

إنَّ قنفذ البحر الحفّار إكينومترا ماثاي *Echinometra Mathaei* حيوان شائع في بحر العرب، وهو ينتمي إلى مجموعة قديمة من الحيوانات اللّافقاريّة الشّوكية الّتي تُسمّى الشّوكيّات echinoderms. بعض أفراد هذه المجموعة قادر على تجديد الأجزاء الّتي يفقدها. في عام 1940، طوّرت إيثل براون هارفي طريقةً استطاعت من خلالها فصل الخلايا من أجنّة قنفذ البحر. بدايةً، حصلت هارفي على بويضات قنفذ البحر المخصَّبة، وبعد الانقسام الخلويّ الجنينيّ الأوّل، قامت بعزل أزواج الخلايا ووضعتها في محلول عالي التّركيز يحتوي على ضعف كمّيّة الملح الذّائب في ماء البحر. انفصلت خليّتا كلّ زوج وابتعدت كلٌّ منهما عن الأخرى بدلًا من استمرار النّموّ الجنينيّ الطّبيعيّ. بعد الانفصال مباشرةً، أعادت هارفي كلّ خليّة إلى ماء البحر، حيث نمت كلّ خليّة توأم إلى خلايا طبيعيّة إنّما أصغر حجمًا. واليوم، يستخدم علماء أجنّة كثيرون تقنيّة هارفي لدراسة الإخصاب والنّموّ.

46. برأيك، لمَ وضعت هارفي أزواج خلايا قنفذ البحر في محلولٍ عالي التّركيز؟
47. لماذا أعادت هارفي الخلايا إلى ماء البحر بعد انفصالها؟
48. ماذا أظهرت تجربة هارفي بشأن خلايا جنين قنفذ البحر؟
49. ماذا أظهرت تجربة هارفي بخصوص تأثير الخاصّيّة الأسموزيّة؟
50. كلا المحلولَيْن الوريديَّيْن الاعتياديين اللّذَيْن يتمّ حقنهما في العلاج الطّبّيّ يستخدمان محلول رينجر ملحيّ أو لاكتيّ saline or lactated Ringer's solution طبيعيّ يحتوي على الإلكتروليتات، وكلا المحلولَيْن متساويا التّركيز مع الدّم. ما أهمّيّة هذا الإجراء؟

الربط مع الرّياضيّات

كان أحد الفيزيولوجيّين يقوم بدراسة خلايا الدّم الحمراء، وقاس تركيز أيونات البوتاسيوم والصّوديوم، ثمّ كرّر التّجربة بعد ساعتين. تفحّص النّتائج، ثمَّ أجب عن الأسئلة التّالية:

تجربة 1

الأيون	التّركيز داخل الخليّة	التّركيز خارج الخليّة
بوتاسيوم	6.0 mM	2.5 mM
صوديوم	1.3 mM	9.7 mM

تجربة 2

الأيون	التّركيز داخل الخليّة	التّركيز خارج الخليّة
بوتاسيوم	7.2 mM	2.9 mM
صوديوم	0.8 mM	10.2 mM

51. من بيانات التّجربتين يمكن استنتاج:

a. زيادة في تركيز كلا الأيونين داخل الخليّة.

b. نقص في تركيز كلا الأيونين داخل الخليّة.

c. زيادة في أيونات البوتاسيوم (K^+) في داخل الخليّة، ونقص في أيونات الصّوديوم (Na^+) في داخل الخليّة أيضًا.

d. نقص في أيونات البوتاسيوم (K^+) في داخل الخليّة، وزيادة في أيونات الصّوديوم (Na^+) في داخل الخليّة أيضًا.

52. تحرّكت الأيونات في أثناء التّجربة عن طريق:

a. النّقل النّشط.

b. الانتشار السّلبيّ.

c. الأسموزيّة

d. الانتشار المسهّل.

الاستقصاء والبحث

تؤدّي السّموم العصبيّة دورًا كبيرًا في الأبحاث الطّبّيّة والصّيدلة، وفي المعالجة الطّبّيّة.

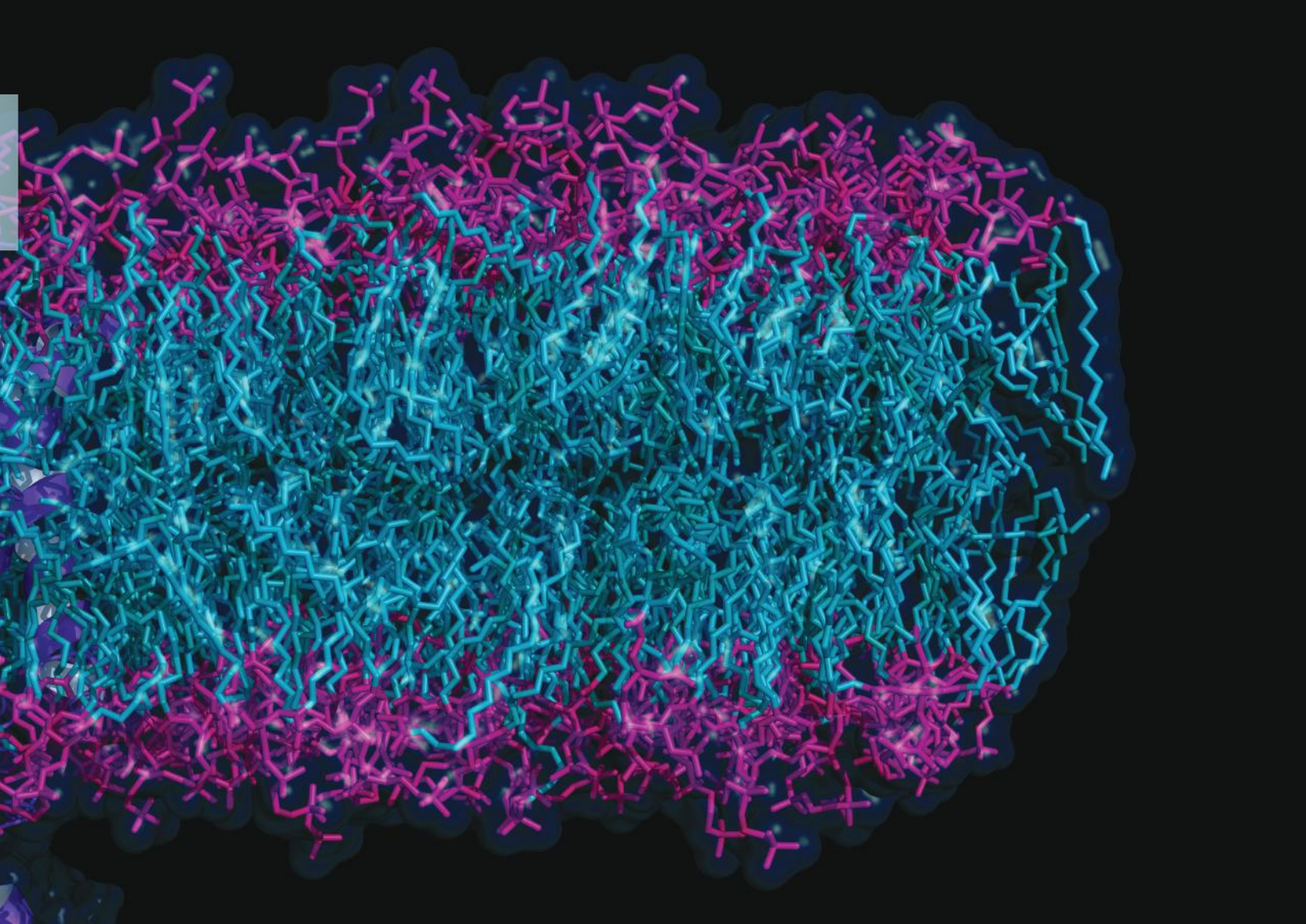
1. اختر كائنًا سامًّا لتستقصي حوله، ولتجد إجابات عن الأسئلة الآتية وتضمّنها في ورقة بحث رسميّة، أو عرض تقديميّ، وفق طلب معلّمك.

2. صف آليّة نقل السّمّ الّتي يتبعها الكائن الّذي اخترتَهُ.

3. ما السّمّ الّذي ينتقل، وما تأثيراته الكيميائيّة على مستوى الخليّة؟

4. كيف يؤثّر هذا الكائن السّامّ في البشر؟ اذكر بدقّةٍ تفاصيل إحصائيّة، مثل التّكاليف والوفيّات والمعالجات.

5. ضمّن منتجك النّهائيّ رسمًا توضيحيًّا أو مخطّطًا واحدًا على الأقلّ يكون من ابتكارك.



الوحدة 3

تركيب الخلية ووظيفتها: الإنزيمات

Cell Structure and Function: Enzymes

في هذه الوحدة

الدّرس 3-1: خصائص الإنزيمات وآلية عملها

الدّرس 3-2: نشاط الإنزيمات والعوامل المُؤثِّرة فيه

الوحدة 3

مقدّمة الوحدة

فكِّر في تجميع آلة مثل السيارة أو في تفكيكها، سوف تجد أن لكل خطوة في العملية الأداة المناسبة. فعلى سبيل المثال، يرخي مفتاح الربط 16 mm، براغي 16 mm أو يشدّها. يتطلَّب بناء سيارة كثير من الأدوات المختلفة، حيث تناسب كل أداة وظيفة مُحدَّدة. والكائن الحي يعمل بالطريقة نفسها، إلّا أنّ الأجزاء هي الجُزيئات، والأدوات هي الإنزيمات. الإنزيمات أدوات كيميائية حيوية تستخدمها الكائنات الحية لبناء الجزيئات أو تفكيكها. غالبًا ما يكون دور الإنزيمات خافيًا؛ لكنه ضروري لجميع العمليات الخلوية الحيويّة. تأخذ جميع الكائنات الحية الغذاء من البيئة لتوفير الطاقة والمواد اللازمة للنمو. ويجري تقسيم جُزيئات الغذاء بواسطة آلاف الإنزيمات. ويُعاد تجميع المواد الخام من الغذاء المهضوم في جُزيئات جديدة، تُعيده آلاف أخرى من الإنزيمات المختلفة. وكما أن لكل حجم من البراغي مفتاحًا خاصًّا به، كذلك يكون لكل تفاعل كيميائي إنزيم مختلف. تدور هذه الوحدة حول كيفية عمل الإنزيمات وكيفية تنظيمها في الكائنات الحية.

الأنشطة والتّجارب

B1115
B1116

1-3 بناء نموذج للتفاعلات المُحفّزة

2-3 (a) نشاط الإنزيم ودرجة الحرارة

2-3 (b) نشاط الإنزيم والرقم الهيدروجيني

2-3 (c) نشاط الإنزيم وتركيز الركيزة

الدّرس 3-1

خصائص الإنزيمات وآلية عملها

Enzyme Properties and How It Works

الشكل 3-1 حلوى بروتينات الهلام بنكهة الكرز.

ربما تناولت من قبل حلوى الهلام (الجيلاتين) كتلك المبينة في (**الشكل 3-1**). يمكنك تحضير الهلام مع الكرز والتوت والشوكولاته والفانيليا. لكن الأناناس الطازج والمانجو والتين وفاكهة الكيوي تمنع الخليط من التحوُّل إلى هلام جامد. السبب الذي يجعل الفاكهة تدمِّر الهلام، هو موضوع هذا الدرس، أي الإنزيمات.

الهلام (الجيلاتين) بروتين يُسمّى الكولاجين. وهو يتكوّن عندما تتشابك جُزئيات الكولاجين الرقيقة والطويلة معًا. يحتوي الأناناس على مادة كيميائية هي البروميلين bromelain، التي تحتوي على إنزيمات تُسمّى البروتييز proteases، هي المسؤولة عن هضم البروتينات. عند إضافة الأناناس الطازج إلى الجيلاتين، تقوم الإنزيمات بتفكيك البروتينات؛ وبالتالي لا يتشكَّل الهلام. يؤدي تسخين الفاكهة إلى 70°C إلى تغيير طبيعة الإنزيمات، والتي هي أيضًا من البروتينات. إذا كنت تريد حقًّا هلام الأناناس، يجب عليك استخدام الأناناس المُعلّب، لأن الأناناس يسخّن أثناء التعليب إلى أعلى من 70°C.

مخرجات التّعلُّم

B1115.1 يعرّف الإ نزيمات بأنها بروتينات كروية تعمل كمحفّزات حيوية.

B1115.2 يشرح آلية عمل الإنزيمات من حيث الموقع النشط، ومعقد إنزيم – الركيزة، وخفض طاقة التنشيط، وتخصص الإنزيم باستخدام فرضية القفل والمفتاح، وفرضية التلاؤم المستحث.

المفردات

معقد الإنزيم–الركيزة Enzyme-substrate complex	
Endergonic	ماصّ للطاقة
Exergonic	طارد للطاقة
Activation energy	طاقة التنشيط
Enzyme	الإنزيمات
active site	موقع نشط
substrate	الركيزة
catalyst	المحفّز
lock and key model	نموذج القُفْل والمفتاح
induced fit model	نموذج التّلاؤم المستحثّ

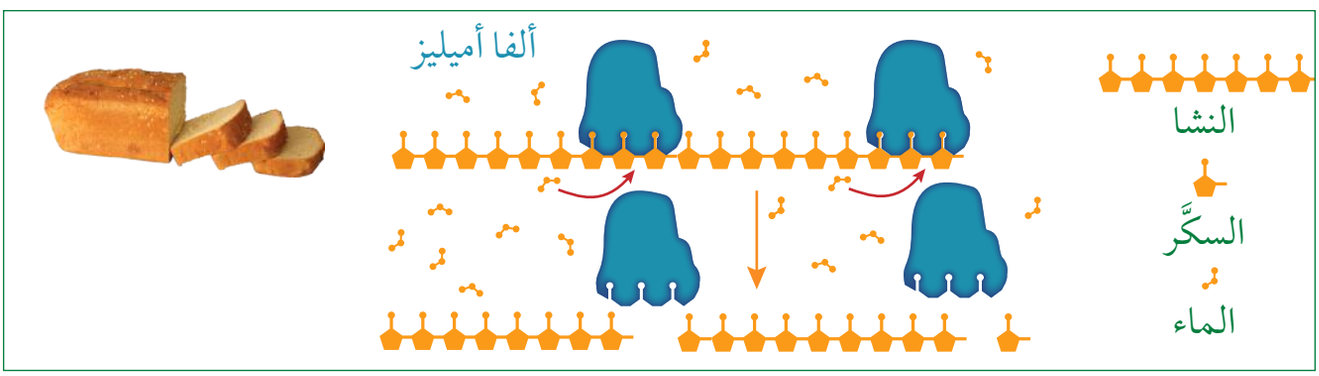
وظيفة الإنزيمات

سؤال للمناقشة

ماذا تفعل الإنزيمات؟

إذا قمت بمضغ الخبز الأبيض لمدة دقيقة أو أكثر، سوف تبدأ بتذوُّق طعم حلو. ومردُّ ذلك أن الخبز الأبيض مصنوع من الدقيق المُكرَّر الذي يحتوي على أكثر من 80 % نشا. يحتوي لعابك على إنزيم يسمى الفا أميليز الذي يكسر النشا إلى السكَّر.

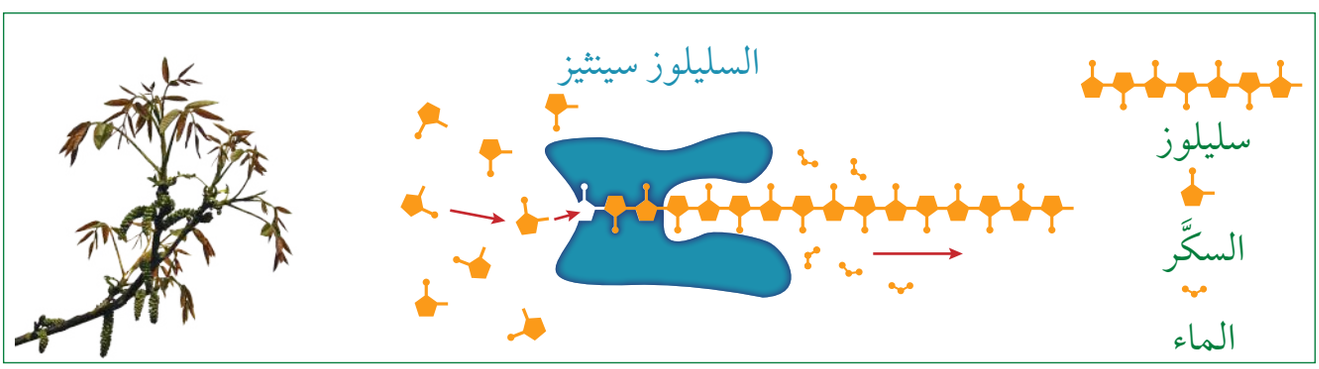
الإنزيمات Enzyme أدوات بيولوجية تستخدمها الخلايا في العمل على الجُزيئات. تُجمّع بعض الإنزيمات الجُزيئات في جزيئات أكبر، بينما تحوّل إنزيمات أخرى الجُزيئات الكبيرة إلى جزيئات أصغر.



الشكل 3-2 تُحفّز بعض الإنزيمات التفاعلات التي تفكك الجزيئات الكبيرة.

إنزيم الألفا أميليز alpha amylase سكّين كيميائي متخصِّص للغاية يرتبط بجُزيئات النشا. فهو يجذب جُزيئات الماء لكسر النشا إلى قطع أصغر (التحلُّل المائي) (**الشكل 3-2**). من دون هذا الإنزيم، يبقى نشا الأميلوز في الخبز جزيئًا طويل السلسلة. لا يمكننا هضم السليلوز، لأن أجسامنا لا تنتج إنزيمًا يكسر السليلوز.

السليلوز سينثيز cellulose synthase إنزيم موجود في النباتات، وظيفته عكس وظيفة الألفا أميليز. يربط هذا الإنزيم جزيئات الجلوكوز معاً في سلسلة طويلة من السليولوز وذلك بإزالة جزيئات الماء (تفاعل تكثيف) (**الشكل 3-3**). وكآلة جُزيئيّة، يأخذ إنزيم السليلوز سينثيز الجلوكوز على أحد طرفيه، ويخرج السليلوز والماء من الطرف المقابل.



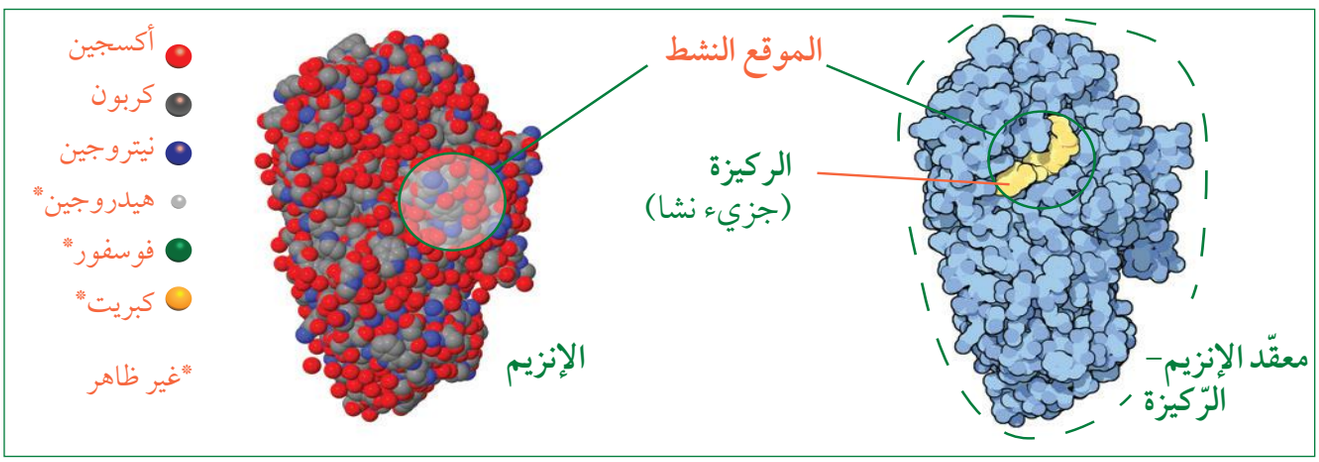
الشكل 3-3 تُحفّز بعض الإنزيمات التفاعلات التي تصنع جزيئات أكبر.

التَّركيب الجُزيئيّ للإنزيم

سؤال للمناقشة

كيف يعمل الإنزيم؟

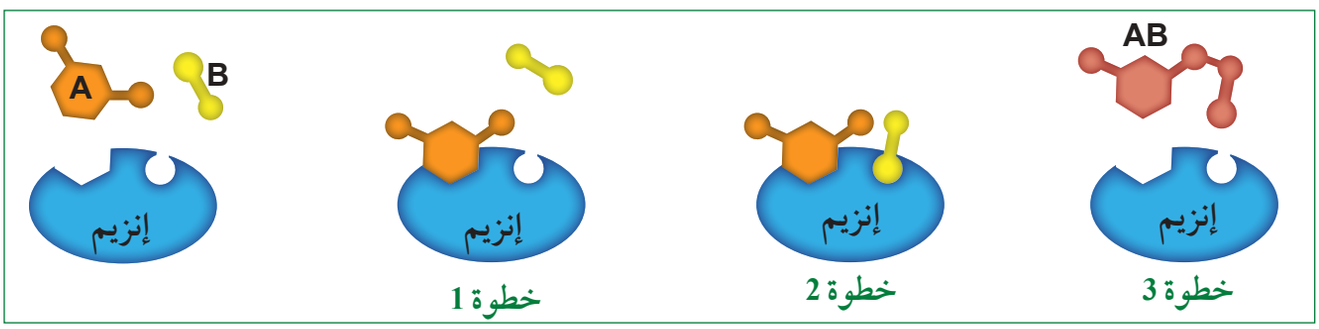
الإنزيمات بروتينات كرويّة كبيرة تحتوي عمومًا على عدّة آلاف من الذَّرّات. يوضّح **(الشَّكل 3-4)** إنزيم ألفا أميليز الذي يحفّز تكسير النشا إلى جلوكوز أثناء عمليّة الهضم. يحتوي الألفا أميليز على 3,965 ذرّة.



الشكل 3-4 يكسّر إنزيم الألفا أميليز النشا إلى جلوكوز.

يوجد في الإنزيمات **موقع نشط Active site** وهو جزء البروتين الذي يرتبط بجُزيء الركيزة. **والركيزة Substrate** هي الجُزيء الهدف الذي يعمل عليه الإنزيم، وهو في هذا المثال جزيء نشا. يرتبط الإنزيم والركيزة معًا ليشكّلا **معقد الإنزيم – الرَّكيزة Enzyme-substrate complex**، الذي يثبّت جُزيء الرَّكيزة في مكانه، لبدء التَّفاعل الكيميائيّ.

يحتوي تركيب كل إنزيم على موقع نشط يتوافق مع تركيب جُزيء الركيزة. **في الشكل 3-5** يثبّت إنزيم بيروفيت كربوكسليز جُزيء البيروفيت (A)، ويضيف إليه بيكربونات (B) لتكوين حمض الأوكزالوأستيك (AB). تجري عملية البناء $A + B \rightarrow AB$ في خطوات عدّة، تمثّل كلّ خطوة منها تفاعلًا ثنائيّ الجُسيمات.



الشكل 3-5 تفاعل بنائي محفّز إنزيميًّا.

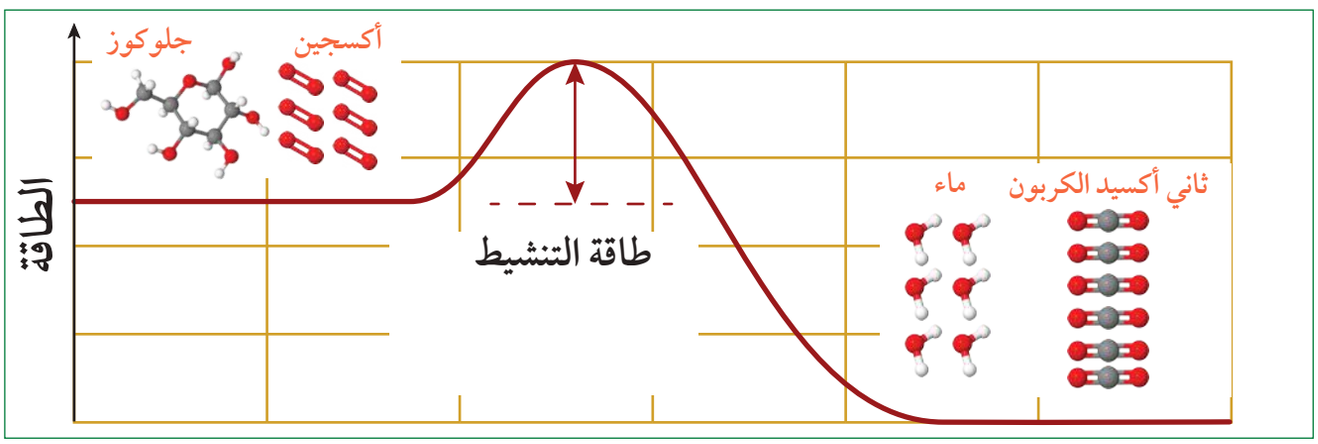
1. يرتبط الانزيم والجُزيء A ويشكلان معقد الانزيم – الرَّكيزة.
2. يجذب معقد الإنزيم – الرَّكيزة الجُزيء B، ويربطه.
3. يتفاعل الجُزيئان A و B ليشكّلا جُزيء AB.

طاقة التنشيط

سؤال للمناقشة

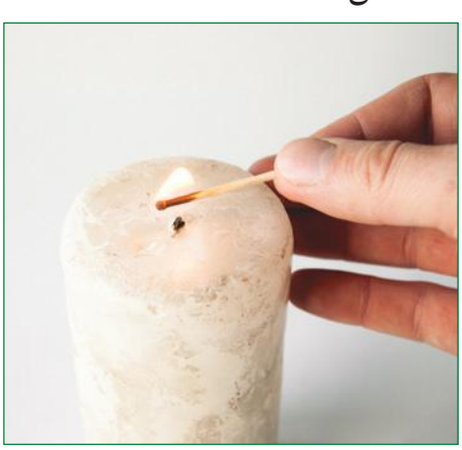
ما الذي يمنع حدوث تفاعلات كيميائية خارج الجسم بطريقة تلقائية؟

لا يتفكّك الجلوكوز عند درجة حرارة الغرفة؛ لأن الروابط الكيميائية فيه يجب أن تنكسر قبل أن تتمكّن الذرّات من إعادة ترتيب نفسها. والطاقة التي تُستخدم في تكسير الروابط الكيميائية الأولية، تُسمى **طاقة التنشيط Activation energy** (**الشكل 3-6**).



الشكل 3-6 طاقة التنشيط.

الإنزيمات ضرورية، لأنها تُخفض طاقة التنشيط اللازمة لبدء حدوث التفاعلات الكيميائية. تُحرِّر التفاعلات **الطاردة للطاقة Exergonic reactions** طاقة عن طريق إعادة ترتيب الذرّات في جُزيئات جديدة تحتوي على طاقة كلّية أقلّ من الجُزيئات الأولية. تمتصّ التفاعلات **الماصّة للطاقة Endergonic reactions** طاقة لإعادة ترتيب الذرّات في جُزيئات جديدة تحتوي على طاقة كلّية أعلى. كلا النوعين يحدثان بفعل الإنزيمات في الكائنات الحيّة.فكّر مثلًا في إشعال شمعة. يُعدُّ إشعالها تفاعلًا طاردًا للطاقة. ولكن لا بُدّ من أن تشعل الشمعة لبدء التفاعل (**الشكل 3-7**). توفِّر شعلة عود الثقاب عند طرفه طاقة التنشيط التي ستستخدم في الفصل بين ذرّات الكربون والهيدروجين والأكسجين لبدء التفاعل. وتوفِّر الحرارة المنبعثة من التفاعلات الأولية طاقة تنشيط لبدء التفاعل في الجُزيئات المجاورة من الشمعة، كي تستمر في الاحتراق من تلقاء نفسها، بعد بدء الاشتعال.



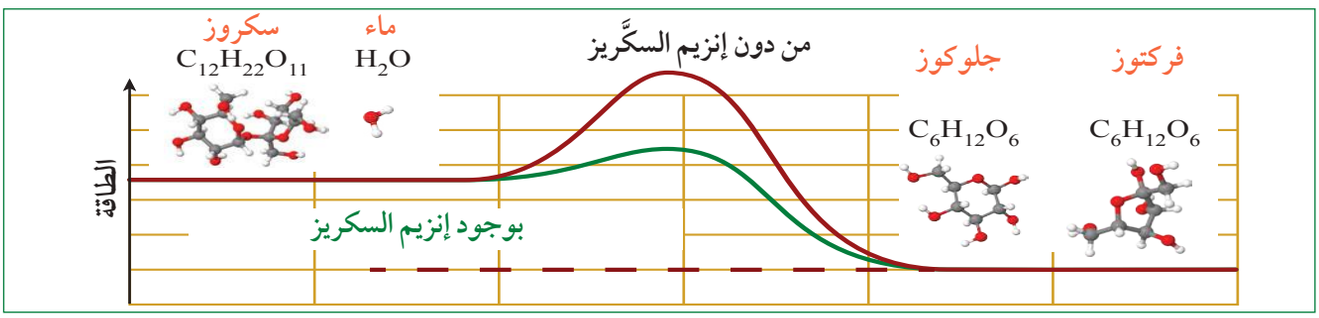
الشكل 3-7 يوفر عود الثقاب طاقة تنشيط.

لا يتضمّن النظام الحيوي شرارة، كما في عود الثقاب. ومع ذلك، فإن الذرّات والجُزيئات لها طاقة حرارية تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة. وإذا كانت طاقة التنشيط كافية، فإن الطاقة الحرارية تكفي لبدء التفاعل. لذا، طوّرت الكائنات الحية مسارات تفاعل معقّدة، تعتمد على الإنزيمات، لخفض طاقة التنشيط لكل خطوة من خطوات التفاعل.

الإنزيمات محفّزات حيويّة

المحفّز Catalyst مادة كيميائية تشارك في التفاعل، ولكنها لا تتغيَّر جرّاء هذا التفاعل. ويؤدي المحفّز وظيفتين مهمتين، هما:

1. **خفض طاقة التنشيط للتفاعل**. وهذا يسمح للتفاعل أن يحدث بسرعة تفوق مليون مرة سرعة التفاعل غير المحفّز.

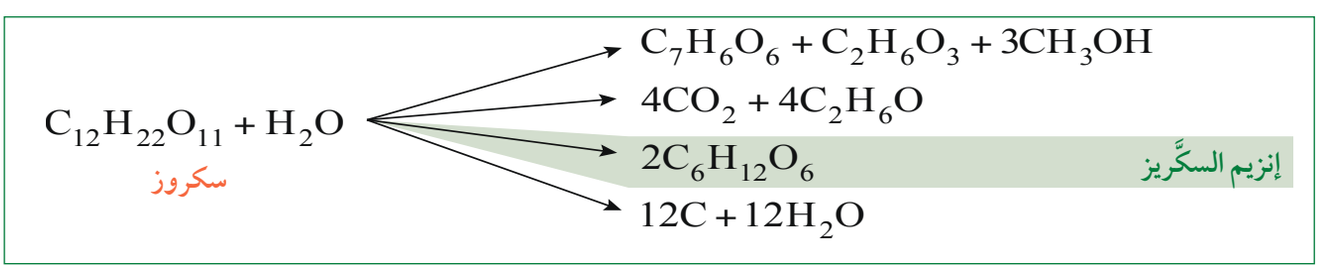


الشكل 3-8 مخطط مسار طاقة.

يظهر **الشكل 3-8** مخطط مسار الطاقة للتفاعل الذي يفكِّك السكروز إلى جلوكوز وفركتوز، بوجود إنزيم السكريز وغيابه. السكريز هو المحفِّز الذي يخفض طاقة التنشيط لجعل التفاعل ينطلق.

2. خفض طاقة التنشيط الخاصة بمسار محدَّد واحد للتفاعل، واختيار هذا المسار دون سواه من المسارات الممكنة الأخرى جميعها (**الشكل 3-9**).

يخفِّض المحفّز طاقة التنشيط الخاصة بالتفاعل، ويختار مسار تفاعل واحدًا بكفاءة عالية.



الشكل 3-9 يختار الإنزيم المحفز مسار التفاعل.

تتمثَّل الوظيفة الثانية المهمّة جدًّا للمُحفّز الحيوي في توجيه التفاعل الكيميائي على طول مسار محدّد. ولفهم أهمية ذلك، فكّر في تسخين السكّر (السكروز) والماء، مع طاقة كافية للتغلُّب على طاقة التنشيط. سوف تحدث تفاعلات مختلفة. يحرق أحد هذه التفاعلات السكَّر، فيحوّله إلى كربون نقي يحوّل أواني الطهي إلى اللون الأسود. يقوم إنزيم السكريز بخفض طاقة التنشيط للتفاعل كما يُوجّه التفاعل نحو مسار محدد دون غيره، وهو تحلّل السكروز إلى جلوكوز وفركتوز.

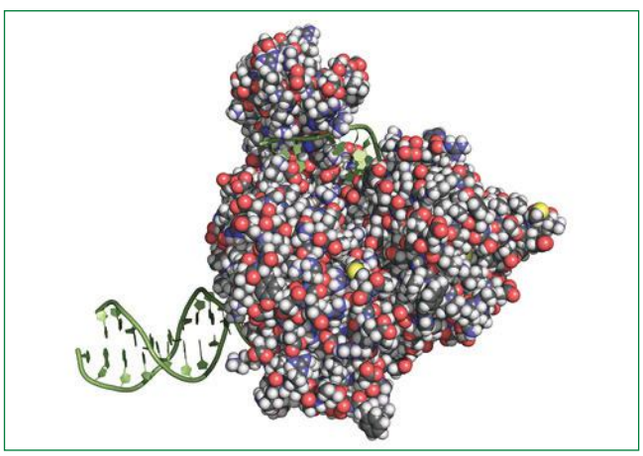
التّخصّصيّة في عمل الإنزيمات

الإنزيمات متخصّصة جدًّا في عملها ففي العادة، يحفّز إنزيم معيّن تفاعلًا كيميائيًّا محدّدًا، أو مجموعة من التّفاعلات الوثيقة الصّلة. ويعتقد علماء الأحياء بوجود أكثر من 1300 نوع من الإنزيمات في الخليّة البشريّة الواحدة. وتشتمل القائمة التالية أمثلة على أشهر انواع الأنزيمات:

- **الليبيز Lipase** يساعد على هضم الدهون في الأمعاء وتحويلها إلى جليسيرول وأحماض دهنيّة.
- **الأميليز Amylase** يساعد على تحويل النشويّات إلى سكّريّات بسيطة.
- **المالتيز Maltase** يكسّر سكّر المالتوز إلى جُزيئات جلوكوز.
- **التربسين Trypsin** يكسّر البروتينات إلى أحماض أمينيّة.
- **اللاكتيز Lactase** يكسّر سكّر الحليب اللاكتوز إلى جلوكوز وجالاكتوز.
- **الأستيل كولينستيريز Acetylcholinesterase** يكسّر الناقل العصبيّ الأستيل كولين في الأعصاب والعضلات.
- **الهليكيز Helicase** يفصل سلسلتي DNA (**الشكل 3-10**).
- **DNA البوليمريز Polymerase** يبني DNA من النيوكليوتيدات الريبوزيّة المنقوصة الأكسجين.

تأتي خصوصية الإنزيم من شكل الأحماض الأمينيّة التي تشكّل الموقع النَّشط وتسلسُلها. ويمكن أن تكون الفروق بين الإنزيمات من حيث كونها:

- حمضيّة أو قاعديّة ضعيفة.
- محبّة للماء، أو كارهة للماء.
- ذات شحنة موجبة أو سالبة، أو متعادلة الشحنة.



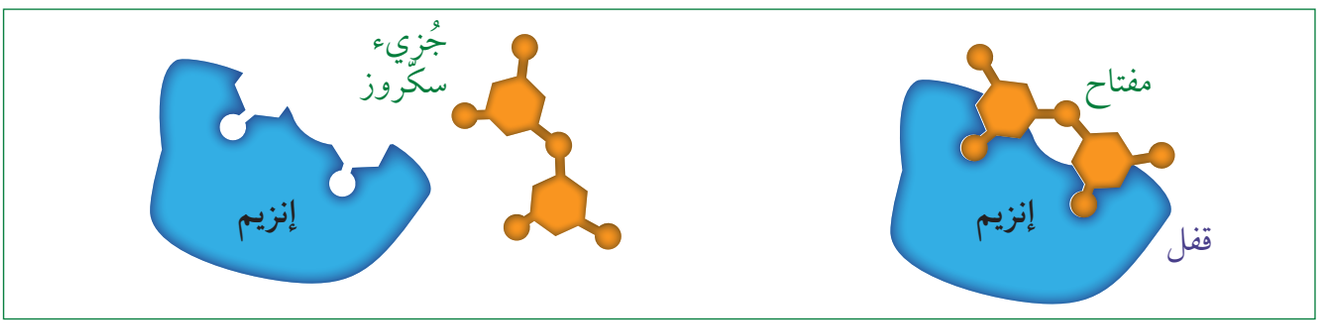
الشكل 3-10 DNA الهليكيز.

تنطبق الخصوصية على كلّ جُزيء ركيزة يتفاعل الإنزيم معه. في بعض التَّفاعلات، تتكسّر ركيزة متفاعلة مفردة إلى نواتج عدّة. وفي تفاعلات أخرى، قد يجتمع جُزيئا ركيزتين لتكوين جُزيء واحد أكبر. وقد ترتبط مادّتان متفاعلتان بالإنزيم أثناء التّفاعل؛ فيجري تعديل كل منهما، ويغادران الإنزيم كمادّتين ناتجتين. وقد تعمل ركيزة ثالثة منبِّهًا لتنشيط الإنزيم، أو لتزويد التَّفاعل بالطاقة.

ولقد تمكن العلماء من تقديم نموذجين لتفسير تخصص عمل الانزيمات، هما: نموذج القفل والمفتاح، ونموذج التلاؤم المستحث.

نموذج القُفْل والمفتاح للإنزيمات

الشَّكل الثلاثيّ الأبعاد للإنزيمات مهمٌّ جدًّا. إذ يوفر الإنزيم لجزيئات الركائز قالبًا ترتبط به مؤقتًا ليحدث التفاعل الكيميائيّ. تُسمّى الطريقة المباشرة لتوضيح هذا المفهوم، **نموذج القُفْل والمفتاح Lock and key model**. في هذا النموذج، يكون شكل الموقع النَّشط على الإنزيم هو نفسه شكل جزء من جُزيء الرَّكيزة الهدف.



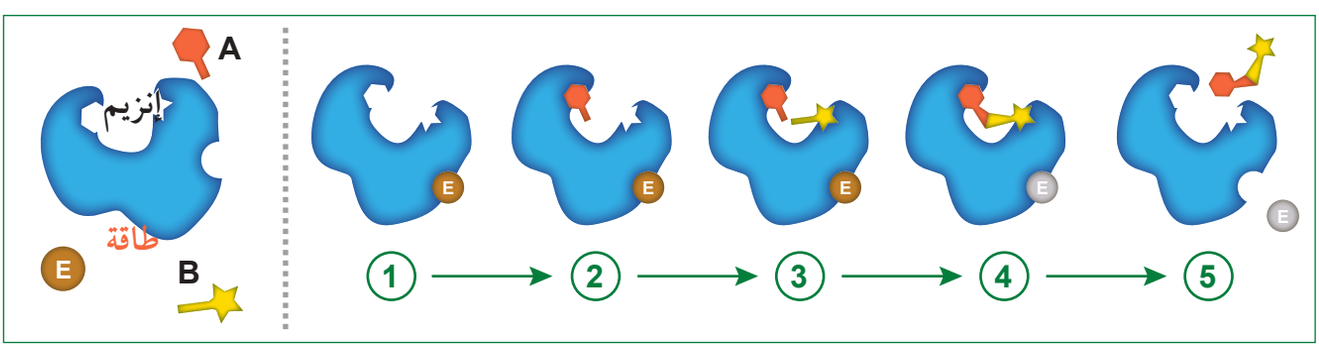
الشكل 3-11 نموذج القُفْل والمفتاح.

الموقع النَّشط للإنزيم مُخصَّص بدقَّة لجُزيء الرَّكيزة (**الشَّكل 3-11**)، بما يماثل ملاءمة القُفْل لشكل واحد من المفاتيح. وغالبًا ما توجد أحماض أمينيّة قطبيّة في الموقع النَّشط، أو بقربه، تجذب جُزيء الرَّكيزة، وتوجِّهه بما يُسهِّل تكوّن معقد الإنزيم – الرَّكيزة.

تقول فرضيَّة القُفْل والمفتاح إنّ الرَّكيزة تناسب الموقع النَّشط للإنزيم كما يُناسب المفتاح القُفْل.

حين يحدث ارتباط جُزيء الرَّكيزة بالموقع النَّشط لانزيم الهدم، يتحول جزيء الركيزة إلى نواتج التَّفاعل، التي تنفصل بعد ذلك عن الإنزيم.

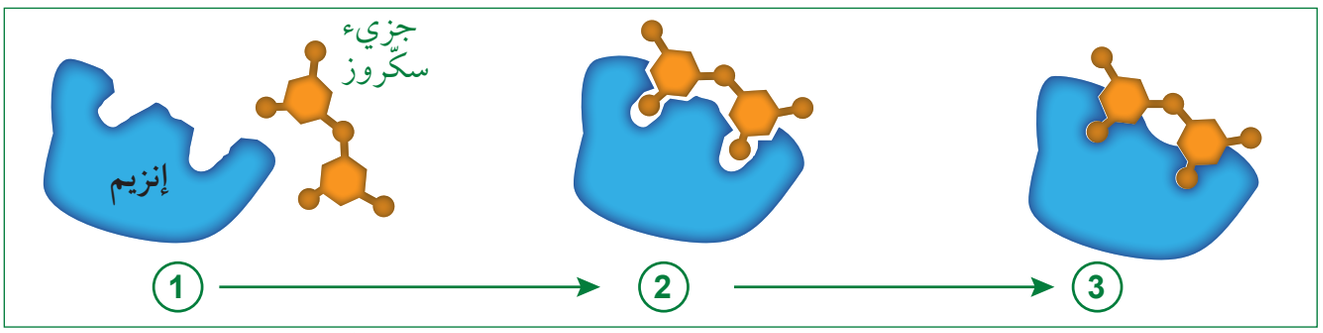
لكل إنزيم من إنزيمات البناء موقعان نشطان أو أكثر، يستهدف كلّ منهما جُزيءَ ركيزة مختلفًا. وفي بعض الإنزيمات، قد يرتبط موقع نشط ثالث بجزيء ناقل للطّاقة مثل ATP. وهذا ضروريّ للتفاعلات الماصّة للطّاقة، مثل بناء البروتينات من الأحماض الأمينيّة (**الشَّكل 3-12**).



الشكل 3-12 نموذج القُفْل والمفتاح لتفاعل بنائي ماصّ للطّاقة.

نموذج التَّلاؤم المستحثّ للإنزيمات

تشير البحوث الحاليّة إلى أنّ نموذج القُفْل والمفتاح لا يكفي لشرح وظيفة الإنزيم. تذكّر أنّ الذرّات والجُزيئات تكونان دائمًا في حركة مستمرّة. في **نموذج التَّلاؤم المستحثّ Induced fit model**، يغيّر الإنزيم شكل الموقع النَّشط وشكل جزيء الركيزة أيضًا، أثناء عمليّة الارتباط به (**الشَّكل 3-13**).

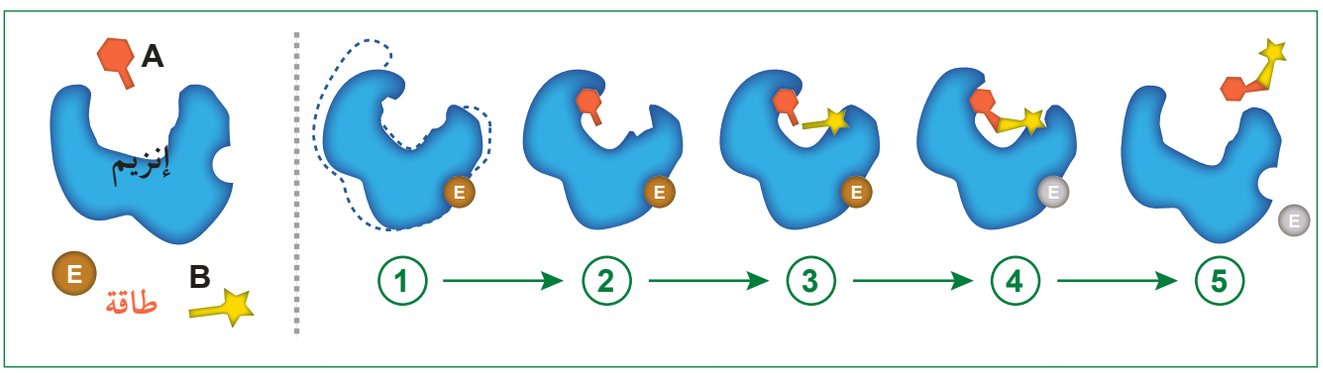


الشكل 3-13 يغيّر الإنزيم كلًا من شكل الموقع النشط وشكل جزيء الركيزة في نموذج التَّلاؤم المستحثّ.

يُعدُّ تمدُّد الرّوابط الناجم عن تشوُّه جُزيء الرَّكيزة جزءًا من طريقة حثّ الإنزيم للتَّفاعل الكيميائيّ. تخيّل أنّ الموقع النَّشط في السّكّريز قد يسبِّب تمدُّد الرّابطة الجلايكوسيديّة في جُزيء السكّروز، فيجعلها عُرضة للكسر وجذب جُزيء ماء. ويكون مُعقّد الإنزيم – الرَّكيزة مستقرًّا بربط مُحكَم بين الركيزة والإنزيم.

يقول نموذج التَّلاؤم المستحثّ إنّ الرّكيزة والإنزيم يتغيّر شكلهما عندما ترتبط الركيزة بالموقع النَّشط.

في نموذج التَّلاؤم المستحثّ، يغيّر الإنزيم شكله عند ارتباطه بجُزيء الرَّكيزة. ويسهم تغيُّر الشَّكل في إعداد الإنزيم غالبًا للخطوة اللاحقة في التَّفاعل المُتعدّد الخطوات. ويشكِّل ارتباط جُزيء مزوّد للطّاقة مثل ATP مثالًا جيِّدًا على ذلك. ينشّط ATP الإنزيم إلى الشَّكل (1)، الذي يجتذب جُزيء الرَّكيزة، ويربطه (**الشَّكل 3-14**). وعندما يكتمل التَّفاعل، يتحوّل الشَّكل ثانية ليحرّر ناتج التَّفاعل (4و 5). وتبدو فكرة (تنشيط) الإنزيم بجُزيء الرَّكيزة مهمّة لمفهوم التَّنظيم الإنزيميّ.



الشكل 3-14 يشرح نموذج التَّلاؤم المستحثّ كيفيّة تغيُّر شكل الإنزيم بعد ارتباطه بكلّ جزيء ركيزة.

1-3 بناء نموذج للتفاعلات المحفِّزة

سؤال الاستقصاء	لِمَ تحتاج التفاعلات الكيميائية الحيوية إلى المُحفِّزات؟
الموادّ المطلوبة	قلم تعليم، 3 أكياس لحفظ الشطائر بزمام، مخبار مُدرَّج سعة 100 mL، شرائط لقياس الرقم الهيدروجيني، 100 mL مشروبًا غازيًّا غير مُلوِّن، 150 mL ماء مُقطَّرًا، بسكوت، منديل ورقي.

الخطوات

1. حضّر الأكياس بوضع علامات (a) و (b) و (c) عليها، ثم أضف معلومات عن مجموعتك، لئلا تختلط بأكياس المجموعات الأخرى.
2. ضع قطعة كاملة من البسكوت في كل كيس من الأكياس الثلاثة.
3. استخدم شريط قياس pH لاختبار كل سائل، وسجِّل النتائج قبل إضافة السوائل أو غلق كل كيس، وأضف إلى الأكياس المعلَّمة المواد الآتية:
   a. 100 mL ماءً مقطرًا.
   b. 50 mL ماءً مقطرًا + 50 mL مشروبًا غازيًا.
   c. 50 mL ماءً ساخنًا + 50 mL مشروبًا غازيًا.
4. تخلّص من الهواء في الأكياس، وضعْها في منطقة محدَّدة، بحسب إرشاد معلِّمك طوال الليل.
5. توقَّع ما سيحدث للبسكوت في كل كيس وسجل توقعك.
6. لاحظ الأكياس في اليوم التالي، قبل أن تفتحها.
7. افتح الأكياس، وأعد قياس الرقم الهيدروجيني للمحلول في كل كيس، ثم نظّف مكان التجربة، بحسب توجيهات مُعلِّمك.

الأسئلة

a. قارن pH المحاليل قبل التجربة وبعدها.

b. هل كان هناك فرق واضح بين قطع البسكوت في كل كيس؟ إذا كانت الإجابة نعم، صِف الاختلافات التي لاحظتها.

c. هل كان توقُّعك الذي سجَّلته صحيحًا؟ لماذا؟

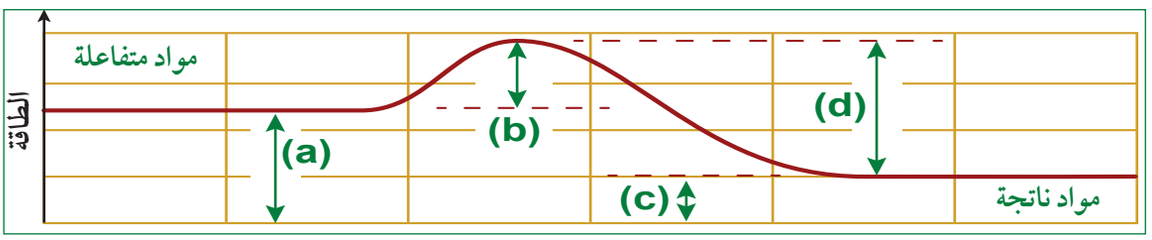
عرض/مناقشة

1. اتبع توجيهات المعلم في تقديم العروض.
2. بعد تقديم العرض، ستكون هناك فرصة لمناقشة النموذج الخاصّ بك.

تقويم الدّرس 3-1

1. ما الفرق بين التفاعل الكيميائي الماصّ للطاقة والتفاعل الكيميائي الطارد للطاقة؟

2. أيّ الرموز الآتية في الرسم البياني تمثّل طاقة التنشيط لتفاعل كيميائي؟



3. وضّح لماذا يمكن تسمية الإنزيمات «أدوات» حيوية.

4. عرّف المصطلحات الآتية في ضوء دراستك لموضوع الإنزيمات:
   a. الموقع النشط
   b. الركيزة
   c. معقد الإنزيم–الركيزة
   d. نموذج القفل والمفتاح

5. يمثّل الرسم الآتي ثلاثة إنزيمات وأربعة جُزيئات. استخدم نموذج القفل والمفتاح لتحدد تسلسل التفاعلات التي ستُنتِج في النهاية الجُزيء ABC من الجزيئات A و B وC.

6. أيٌّ من الجمل الآتية صحيحة بخصوص عمل الإنزيمات؟ (قد يكون هناك أكثر من جملة واحدة) إنزيم 1 إنزيم 2 إنزيم 3
   a. تُحفِّز معظم الإنزيمات تفاعلات مختلفة كثيرة.
   b. معظم الإنزيمات متخصِّصة بتفاعل كيميائي واحد لكل منها.
   c. يتشكّل مُعقّد الإنزيم–الركيزة أثناء المسارات الهدمية والمسارات البنائية على حد سواء.
   d. يتشكّل معقد الإنزيم–الركيزة فقط في المسارات البنائية، وليس في المسارات الهدمية.

الدّرس 3-2

نشاط الإنزيمات والعوامل المؤثرة فيه

Enzyme Activity and Factors Affectings It

يصف الأطبّاء لكثير ممَّن يعانون ارتفاع ضغط الدّم أدوية ستاتينات Statins. تعمل فئة الأدوية هذه على تثبيط إنزيم HMG CoA reductase الذي تستخدمه الكبد لصنع الكولسترول، حيث يقلِّل تثبيط الإنزيم من إنتاج الكولسترول. يعرض هذا الدَّرس كيفيّة عمل الإنزيمات، وكيفيّة تحكُّم الجسم بها.

المفردات

Cofactor	عامل مساعد
Coenzyme	مرافق الإنزيم
Competitive inhibitor	مثبِّط تنافسيّ
Noncompetitive inhibitor	مثبِّط غير تنافسيّ

مخرجات التّعلُّم

B1115.3 يستقصي تأثير درجة الحرارة والرّقم الهيدروجينيّ (pH) وتركيز معقد إنزيم – الرَّكيزة في سرعة عمل الإنزيم، ويشرح هذه التّأثيرات.

B1116.1 يصف أدوار العوامل المساعدة (بما في ذلك أيونات الكلوريد في الأميليز) والمرافقات الإنزيميّة (بما في ذلك الفيتامينات B3 في NAD و B5 في مرافق الإنزيم A) في عمل الإنزيم.

B1116.2 يميّز بين التَّثبيط التَّنافسيّ والتَّثبيط غير التَّنافسيّ في آليّة عمل الإنزيم.

B1116.3 يشرح أهميّة التَّثبيط التَّنافسيّ لآليّة عمل الإنزيم في مسارات الكيمياء الحيويّة، بما في ذلك التّحكّم في معدّل التّحلّل السّكّريّ عن طريق تثبيط القدرة التَّنافسيّة لإنزيم الفسفوفركتوكينيز.

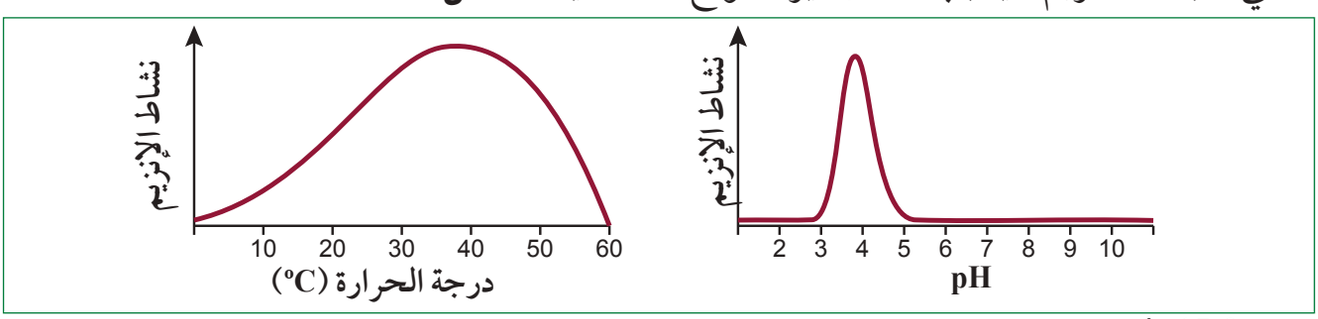
B1116.4 يصف آليّة عمل السّيانيد كمثبِّط غير تنافسيّ لإنزيم السّيتوكروم أكسيديز في سلسلة نقل الإلكترون، وتسبّبه بالموت.

العوامل المُؤثِّرة في نشاط الإنزيم

تتكيَّف المواقع النَّشطة تمامًا في ظروف بيئيّة مُحدَّدة. تعني هذه الحقيقة أيضًا أنّ تلك الإنزيمات حسّاسة جدًّا لمحيطها. ذلك أن عوامل، مثل درجة الحرارة، وpH، والملوحة، وتركيز الرَّكيزة، ووجود الأيونات الذّائبة والجُزيئات المساعدة، تؤثّر جميعها في نشاط كلّ إنزيم.

نشاط الإنزيم حسّاس للرّقم الهيدروجينيّ، ودرجة الحرارة، والملوحة، وتركيز الجُزيئات المساعدة.

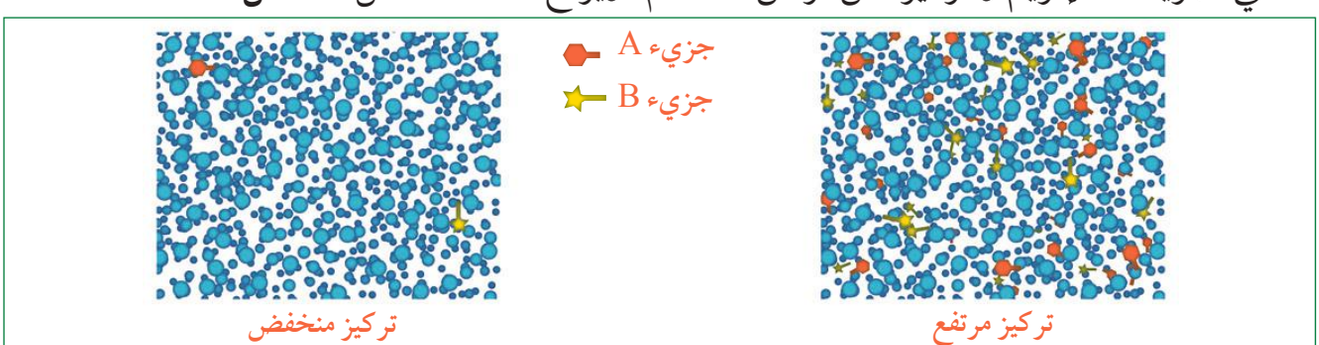
أولاً : درجة الحرارة: يزداد معدّل التفاعلات الكيميائية بشكل عامّ مع ازدياد درجة الحرارة إلى أن تصل إلى درجة الحرارة المثلى «التي يكون عندها معدّل نشاط الإنزيم أعلى ما يمكن». على الرغم من أن درجة الحرارة المثلى لمعظم الإنزيمات التي تعمل داخل أجسامنا تكون قريبة من 37 درجة مئوية إلا أن بعض الإنزيمات قد تمتلك درجات حرارة مثلى أعلى من هذه القيم أو أقل منها. عند زيادة درجة الحرارة عن الدرجة المثلى يقلّ معدّل نشاط الإنزيم وذلك لأن ارتفاع درجة الحرارة يؤثّر على الشكل ثلاثي الأبعاد للانزيم، فيسبّب تلفه وتغيّر الموقع النشط فيه (**الشَّكل 3-15**).



الشكل 3-15 تأثير pH ودرجة الحرارة في نشاط الإنزيم.

ثانيًا : درجة الحموضة: يُعدُّ وجود الأحماض الأمينيّة الحمضيّة أو القاعديّة في الموقع النَّشط أمرًا مهمًّا جدًّا لوظيفة كثير من الإنزيمات، ما يعني أنّ pH الوسط المحيط يؤثّر في وظيفة الإنزيم (**الشَّكل 3-15**). وقد تكيّفت الإنزيمات لتعمل على النحو الأفضل ضمن نطاق pH محدّد، حيث يمكن أنّ تسبّبَ قِيَمُ pH المتطرّفة (حمضيّة أو قاعديّة) تغيير طبيعة الإنزيمات.

ثالثًا : التّركيز: تحدث التفاعلات الكيميائية عندما يتصادم جُسَيمان متفاعلان عشوائيًا. يزيد التركيز العالي لجزيئات الإنزيم والركيزة من فرص التصادم، ويرفع مُعدَّل التفاعل (**الشَّكل 3-16**).



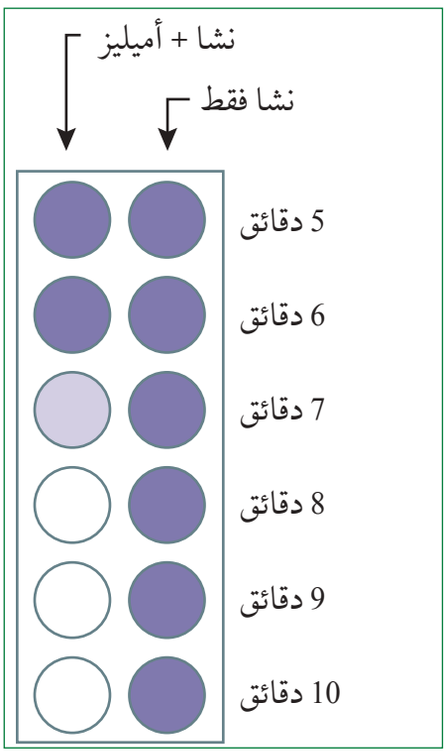
الشكل 3-16 التركيز العالي والتركيز المنخفض.

تعتمد إنزيمات كثيرة على جُزيء منظّم. وينتج الكائن الحيّ الجزيء المنظّم بمعدّل يطابق الحاجة إلى نواتج التَّفاعل. فعلى سبيل المثال، يحتاج الأميليز إلى أيون الكلوريد Cl^-. ويُعدّ تركيز أيونات الكلوريد هو واحدة من طرائق التحكُّم بمُعدَّل التفاعل.

2-3 (a) نشاط الإنزيم ودرجة الحرارة

سؤال الاستقصاء	كيف تؤثّر درجة الحرارة في معدّل نشاط الإنزيم؟
الموادّ المطلوبة	أميليز، محلول نشا 2 %، محلول أيوديد البوتاسيوم، مُسجِّل بيانات مع مقياس درجة الحرارة، ساق تحريك، أنبوب اختبار، ماصّتان.

الخطوات



1. سَمِّ بقلم تعليم أنبوبي اختبار وماصّتين 1 و 2.
2. أضف 1 mL من محلول الأميليز إلى الأنبوب 1.
3. أضف 5 mL من محلول النّشا 2 % إلى كلّ من الأنبوبين، ثمّ حرّك بساق التحريك لخلط المحتويات.
4. سَمِّ لوحتي التجاويف لديك كما في ورقة العمل. وضع في كل واحد من تجاويفها قطرة من محلول أيوديد البوتاسيوم.
5. ضع كلًّا من أنبوبي الاختبار في حمّام مائيّ ساخن مدّة 3 دقائق.
6. بعد 3 دقائق، سجّل درجة حرارة كلّ أنبوب، وشغّل ساعة التوقيت.
7. استخدم الماصّة المناسبة، وضع مع زميلك 5 قطرات من عيّنة الأنبوب الصّحيح في الصفّ 1 في التجويفَيْن المُرقَّمين على اللوحتين المختلفتين. أعد السائل الزائد إلى أنبوب الاختبار الصحيح في الحمّام.
8. أضف محلولًا إلى الصفوف اللاحقة في فواصل زمنيّة من دقيقة واحدة. كرّر العملية إلى أن تتوقّف تجاويف لوحة النشا عن إظهار أيّ تغيُّر في اللون.

الأسئلة

a. صف الاختبار الموجب للنشا.

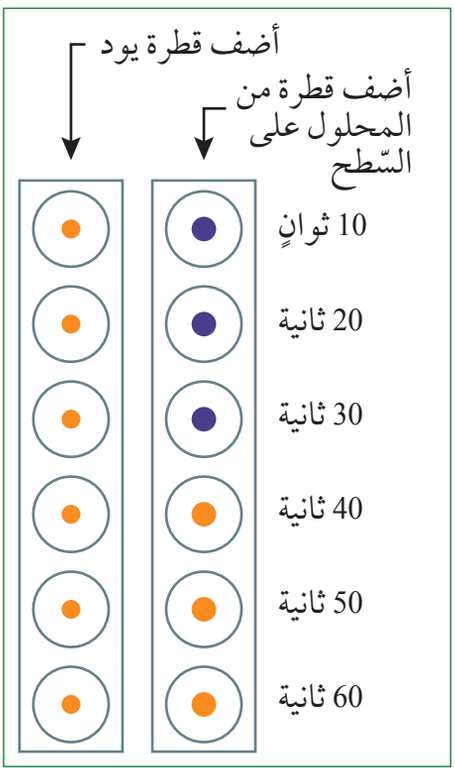
b. ما الذي يخبرك به الاختبار الموجب للنشا عن محتويات أنبوب الاختبار؟

c. متى لم يعد اختبار النشا موجبًا؟ ولماذا؟

2-3 (b) نشاط الإنزيم والرّقم الهيدروجيني

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثّر الرّقم الهيدروجينيّ pH في معدّل نشاط الإنزيم؟
الموادّ المطلوبة	أميليز، محلول نشا، محاليل منظِّمة للرقم الهيدروجيني، محلول أيوديد البوتاسيوم، مسجّل بيانات مع مِجَسّ pH، أنابيب اختبار.

الخطوات



1. اتبع ورقة العمل، وأضف قطرة من محلول أيوديد البوتاسيوم إلى كلّ تجويف في لوحتك.
2. استخدم حقنة النشا لتضع بدقة 2 mL أميليز، مع 1 mL من المحلول المنظِّم في أنبوب الاختبار الأول، وشغّل ساعة التوقيت على الفور.
3. بعد 10 ثوانٍ، حرّك المحلول بماصّته، وضع قطرة واحدة منه على أول قطرة من أيوديد البوتاسيوم. سجِّل ملاحظاتك. أعد ما تبقّى من السائل في الماصّة إلى أنبوب الاختبار.
4. أضف قطرة جديدة من المحلول إلى الصفّ اللاحق، كلّ 10 ثوانٍ.
5. كرّر الخطوة 4 إلى أن يبقى محلول اليود والأميليز/ المنظم/ النّشا، باللون نفسه (ربما البرتقاليّ)، ثمّ أوقف السّاعة.
6. كرّر الخطوات مع منظّم pH مختلف، أو شارك نتائجك مع زملائك في الصفّ.

أسئلة وتحليل

a. كيف تعرف متى يجري هضم النشا؟

b. أنشئ رسمًا بيانيًّا يوضّح كيف أنّ الزمن الذي يستغرقه تكسّر النشا يتغيّر تبعًا للرقم الهيدروجينيّ.

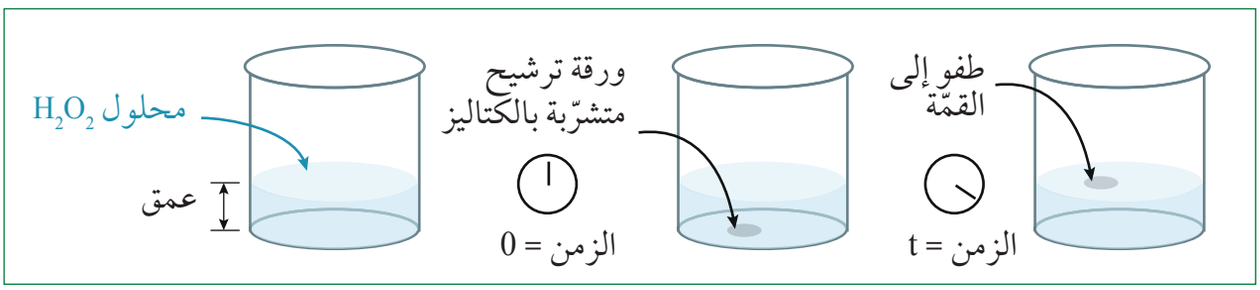
c. احسب معدّل التَّفاعل بقسمة 1 على الزمن.

d. أنشئ رسمًا بيانيًّا لمُعدّل التَّفاعل مقابل pH.

e. ما الرقم الهيدروجينيّ الأمثل لهذا التَّفاعل؟

2-3 (c) نشاط الإنزيم وتركيز الركيزة

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثّر تركيز الرَّكيزة في نشاط الإنزيم؟
الموادّ المطلوبة	كتاليز البطاطس، محاليل بيروكسيد الهيدروجين، مسجّل بيانات مع مِجَسّ O_2.



الإعداد

1. حضّر محاليل من بيروكسيد الهيدروجين بتركيز 3%، 1.5%، 0.9%، 0.6%، 0%.
2. ضع 200 mL من الثلج المسحوق، أو مُكعَّبات الثلج، في دورق سعته 250 mL، مع كمّيّة قليلة من الماء. ضع 15 mL من الكتاليز في دورق سعته 50 mL، وضعه في حمّام الثلج.
3. حدّد عمق 50 mL من بيروكسيد الهيدروجين على دورق الاختبار. هذه هي «المسافة المقطوعة».

الخطوات

1. اغمس قرص ورقة الترشيح في الكتاليز. انقع الوجهين.
2. جفّف الفائض بلمس منديل ورقي، ثمّ أسقط القرص مباشرة في H_2O_2.
3. احسب الوقت الذي يستغرقه ارتفاع ورقة الترشيح إلى الأعلى.
4. كرّر مع التراكيز المختلفة من محاليل H_2O_2.
5. سجّل نتائجك، ثمّ أنشئ رسمًا بيانيًّا للسرعة مقابل تركيز الرَّكيزة.

أسئلة

a. ما تأثير تركيز الرَّكيزة في نشاط الإنزيم؟

b. كيف يتغيّر نشاط الإنزيم مع تناقص تركيز الرَّكيزة؟ وضّح ملاحظاتك من خلال مناقشة هذا التَّفاعل على المستوى الجُزيئيّ.

التَّنظيم الإنزيميّ

يحتاج كلّ كائن حيّ إلى تنظيم معدّل حدوث التَّفاعل الكيميائيّ الواحد، من أجل الحفاظ على استقرار عمليّات الأيض. غالبًا ما يجري ذلك عن طريق السيطرة على عمل الإنزيمات. يستغرق صنع المزيد من الإنزيمات، أو تحلُّلها، وقتًا طويلًا، ويحتاج إلى طاقة كبيرة. لذا، تمتلك معظم الخلايا مجموعة كاملة من الإنزيمات طوال الوقت. وهناك العديد من الجُزيئات الكيميائيّة التي تؤثِّر في نشاط الإنزيم، وتشمل:

1. جزيئات التَّثبيط التي تغلق الموقع النَّشط.
2. مرافقات الإنزيم، وهي جُزيئات مُساعِدة تُنشّط الإنزيم.
3. العوامل المساعدة، وهي أيونات، أو أنواع ذائبة أخرى، تشارك في التَّفاعل المحفَّز بالإنزيم.

المثبِّط التَّنافسيّ Competitive inhibitor مشابه نوعًا ما لجُزيء الرَّكيزة المستهدف من الإنزيم؛ بحيث يمكن للجُزيء المثبِّط أن يرتبط بالموقع النَّشط. وهذا يمنع الرَّكيزة من الارتباط به ما دام المثبِّط موجودًا. يتنافس جُزيء المثبِّط مع الرَّكيزة للارتباط بالموقع النَّشط (**الشَّكل 3-17**).

المثبِّط غير التَّنافسيّ Noncompetitive inhibitor يرتبط بالإنزيم في مكان آخر غير الموقع النَّشط. وقد يمنع المُثبِّط ارتباط الرَّكيزة المستهدفة، أو يغيّر من شكل الإنزيم، ليُبطل فاعليَّة الموقع النَّشط.

الشكل 3-17 المُثبِّط التنافسي والمُثبِّط غير التنافسي للإنزيم.

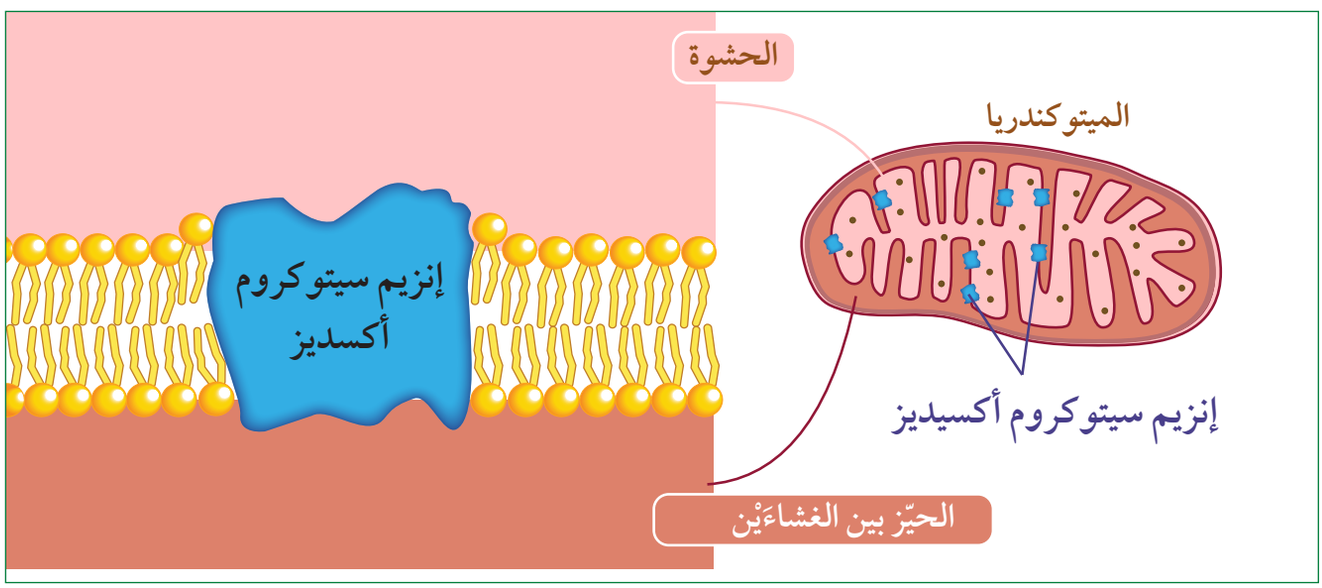
المثبِّطات جُزيئات تمنع عمل الإنزيم.

- التحلُّل السّكّريّ هو مسار الأيض الذي يُحوّل الجلوكوز إلى البيروفيت، محرّرًا الطاقة.
- يحدث التحلّل السكّريّ في السيتوسول، ويتضمّن عشرة تفاعلات مُحفَّزة إنزيميًّا.
- إحدى هذه الخطوات تستخدم إنزيم الفسفوفركتوكينيز (PFK).
- يرتبط جزيء الادينوسين ثلاثي الفوسفات ATP بالموقع النشط لفسفوفركتوكينيز، وينقص معدل التحلل السكري.
- يُستخدَم جُزيء ATP لتنظيم عملية التحلُّل السكَّري.

أمثلة على المثبّطات الإنزيميّة: السيانيد والسيتوكروم أكسيديز

يُعدُّ التأثير السامّ للسيانيد مثالًا جيّدًا على التَّثبيط غير التَّنافسيّ لتفاعل إنزيمي رئيس. السيانيدات تُنتِجها بعض البكتيريا، والفطريّات، والطحالب، وهي توجد في بذور اللوز المُرّ، والمُشمش، والتفّاح، والخوخ.

ويُعدّ السيانيد مُثبِّطًا لإنزيم السيتوكروم c أكسيديز في الغشاء الداخليّ للميتوكندريا (**الشَّكل 3-18**). يمنع السيانيد الخليّة من إنتاج ATP هوائيًّا، للحصول على الطاقة. وتتأثر الأنسجة التي تعتمد كثيرًا على التنفُّس الهوائيّ، مثل الجهاز العصبيّ المركزيّ والقلب، تأثرًا بالغًا.



الشكل 3-18 إنزيم CcOX جزء من المسار الكيميائي الذي ينتج ATP في الميتوكندريا.

أمثلة على تثبيط الإنزيم

بما أن الانزيمات هي المفتاح لكثير من عمليات الجسم، فهي أيضاً محور الكثير من البحوث الطبية. العديد من الأدوية الشائعة، وبعض أنواع علاجات السرطان المحتملة، تعمل من خلال تثبيط الإنزيم. وهناك أيضًا العديد من المُركَّبات السامّة التي تعمل أيضًا من خلال تثبيط الانزيم.

الإيبوبروفين Ibuprofen: إنزيم السيكلوأكسيجينيز (COX) مسؤول عن تكوين مُركّبات تُسمّى البروستاجلاندينات. تدفع هذه المُركَّبات الجسم لتجميع السوائل في المناطق المُصابة في الجسم وتُحدِث الالتهاب، ممّا يؤدّي إلى الإحساس بالألم. الإيبوبروفين دواء شائع مضاد للالتهابات ومزيل للألم من خلال تثبيط إنزيم COX.

علاجات السرطان: الأدوية الجديدة للسرطان لا تزال في طور الاختبار، تشمل مُثبِّطات إنزيم SIRT2 المرتبط بمعدَّل نموّ العديد من أنواع السرطان.

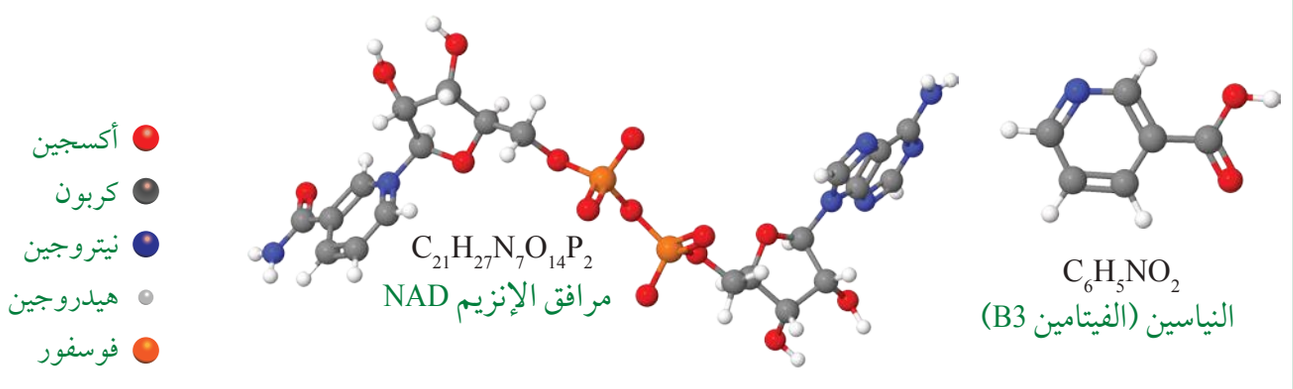
الأدوية المُضادّة للفيروسات: تعمل العديد من الأدوية المضادة للفيروسات والمُستخدَمة في علاج مرض الإيدز من خلال تثبيط إنزيمات ضرورية لبناء نسخ من الفيروس.

العوامل المساعدة ومُرافِقات الإنزيم

يوجد نوعان من الجُسيمات المساعدة للإنزيم (الجُزيئات أو الأيونات) يشتركان في تفاعلات الأيض. ويسبِّب الارتباط بأيّ نوع منهما تغيّرًا في شكل الإنزيم أو نشاطه، مما يعزّز أو يسمح بارتباط جزيء الرَّكيزة المستهدف وتفاعله. **العوامل المُساعِدة Cofactors** هي أيونات غير عضويّة، مثل الحديد (Fe^{++}) والمغنيسيوم (Mg^{++}). وهناك مثال على إنزيم يتطلّب أيونًا معدنيًّا كعامل مساعد، هو الإنزيم الذي يبني جُزيئات DNA وDNA البوليميريز، الذي يتطلب ارتباط أيون الزنك (Zn^{++}) ليعمل. وتُعدُّ المعادن الغذائيّة الّتي نأكلها مصدر العوامل المُساعِدة، مثل الزنك والمغنيسيوم.

تشارك كثير من الجُزيئات العضويّة في أنواع مُحدَّدة من التفاعلات الإنزيمية. تسمّى تلك الجُزيئات **مرافقات الإنزيم Coenzymes**، لأنّها تعمل جنبًا إلى جنب مع الإنزيمات، لزيادة معدّلات التَّفاعل. وعلى النقيض من الركائز، لا تُستهلك مُرافِقات الإنزيم، أو تُعدَّل بوساطة التفاعل الإنزيمي. وبدلًا من ذلك، يُعاد تدويرها، ويمكن أن تشارك في تفاعلات عدّة. تُسمّى مُرافِقات الإنزيم أحيانًا جُزيئات حاملة، لأنّها غالبًا ما تحمل شيئًا يحتاج إليه الإنزيم للتفاعل.

مرافقات الإنزيم جُزيئات صغيرة تعمل مع الإنزيمات.
العوامل المُساعِدة أيونات غير عضويّة تدعم الإنزيمات.



الشكل 3-19 الفيتامين B3 ومرافق الإنزيم NAD.

تُعدُّ الفيتامينات الغذائيّة أكثر مرافقات الإنزيم شيوعًا. وتكون بعض الفيتامينات مولّدات لمرافقات الإنزيم، فيما تعمل فيتامينات أخرى مباشرة كمرافقات إنزيم.فالفيتامين C مرافق إنزيم لإنزيمات عدّة تشارك في بناء بروتين الكولاجين. ويُعدُّ الفيتامين B3 (النّياسين) مولّدًا لمُرافِق الإنزيم NAD (**الشَّكل 3-19**). يتحوّل مساعد الإنزيم NAD إلى NAD^+ في كثير من التَّفاعلات الّتي تنقل الإلكترونات أثناء اختزال NAD^+ إلى NADH. أما NADH، فهو مرافق إنزيم في تفاعل تحوّل البيروفيت إلى حمض اللاكتيك.

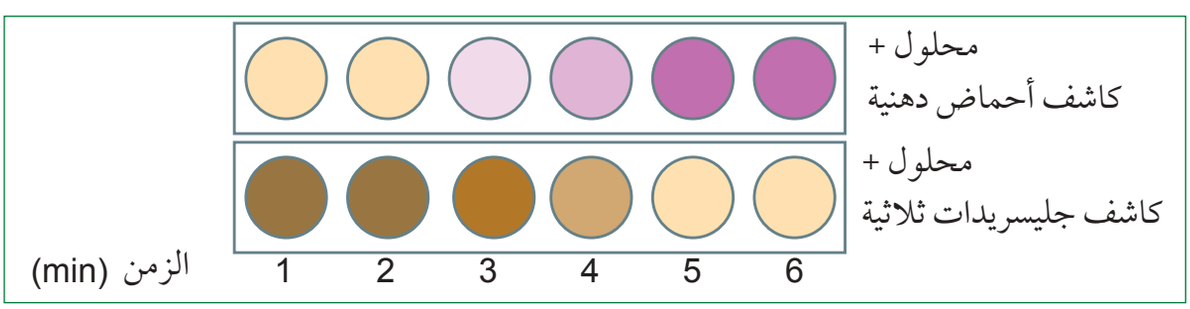
الفيتامين B5 مولّد لمرافق الإنزيم CoA، الذي ينقل مجموعات الأستيل (C_2H_3O) التي تستخدمها الإنزيمات المختلفة لتكوين جُزيئات أكبر. يُستخدم CoA في كثير من التَّفاعلات المختلفة.

تقويم الدّرس 3-2

1. اذكر على الأقل سببًا واحدًا لما يأتي:
   a. يؤثّر تغيير pH في نشاط الإنزيم.
   b. قد يوثّر تغيير درجة الحرارة في نشاط الإنزيم.
2. المادتان الكيميائيتان A وB ذائبتان في محلول، ويمكن أن تتفاعلا لتنتجا المادة C. في أي من الحالات المبيّنة في الجدول سيحدث التفاعل بأعلى معدَّل؟

	تركيز A	تركيز B
(a)	5	5
(b)	50	5
(c)	50	50
(d)	100	5

3. صِف الفرق بين المُثبِّط التَّنافسيّ والمُثبِّط غير التَّنافسيّ.
4. اذكر أربعة عوامل تؤثّر على نشاط الإنزيم.
5. ابحثْ، وَصِفْ دواءً يعمل من خلال تثبيط إنزيم.
6. اذكر ثلاث خصائص للأحماض الأمينيّة، تسهم في جعل الإنزيم يجذب جُزيئات ركيزة خاصة معيّنة فقط.
7. وضّح لماذا يكون لتثبيط إنزيم ما تأثير جيد في الجسم. اذكر على الأقل مثالًا واحدًا.
8. وضّح لماذا يكون لتثبيط إنزيم آخر تأثير سيّيء في الجسم. اذكر على الأقل مثالًا واحدًا.
9. في تجربة معيّنة، وُضِع إنزيم يكسّر الجليسريدات الثلاثية إلى أحماض دهنية، في أنبوب اختبار يحتوي على جليسريدات ثلاثية. كانت تؤخذ منه كل دقيقة قطرتان، وتوضع كل منهما في أحد التجويفين على مستوى واحد. تحتوي تجاويف السلسلة الأولى على كاشف للأحماض الدهنية، وتحتوي تجاويف السلسلة الثانية على كاشف للجليسريد الثلاثي. اشرح نتائج التجربة.



العلم والعلماء

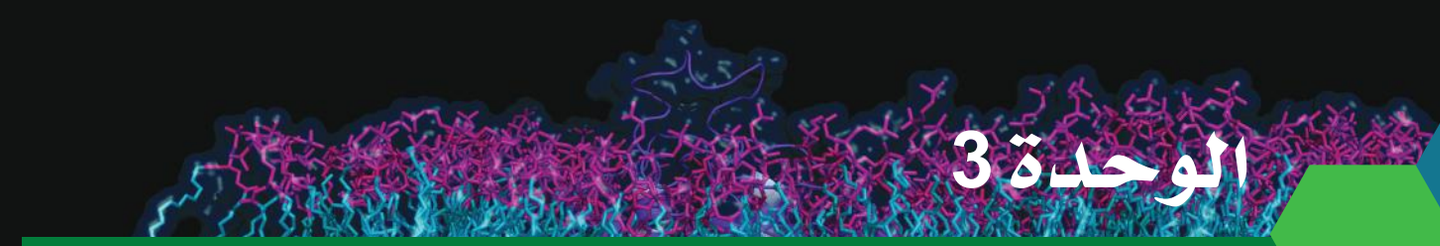
الشكل 3-20 الكيمائيّ أنسيلمي باين.

أنسيلمي باين *Anselme payen* (1795-1871) كيميائيّ فرنسيّ، حقّق تقدُّمًا في دراسة الكربوهيدرات والإنزيمات. طوّر باين مرشّحاً من الفحم يُستخدم لتبييض السكّر. اكتشف إنزيم الدياستيز، وهو مُحفّز عضويّ يحوّل النشا إلى سُكّر، وكان أوّل إنزيم يُنتج على شكل مركّز. ويعزى إلى باين أنّه أوّل من عزل السليلوز من جدر خلايا النباتات، ووجد أنّه يشبه النَّشا. واقتداءً به سُمِّيت الإنزيمات جميعها، حيث تنتهي بِـ «ase» مثل السّكّريز، والمالتيز، في حين تنتهي مركّبات الكربوهيدرات بِـ «ose» مثل السليلوز والسكّروز.

رُقِّي أنسيلمي إلى مدير مصنع إنتاج البوراكس الذي يملكه أبوه في سنّ الثالثة والعشرين. وكان قد بدأ دراسة الكيمياء، حين كان عمره 13 عامًا، واكتشف طريقة لصنع البوراكس من حمض البوريك المتوافر بثمن زهيد. كان البوراكس، ولا يزال، يُستخدم في الصابون. ومن الجدير بالذكر أن البوراكس كان آنذاك مُتاحًا فقط من خلال مصدر هولنديّ باهظ الثمن.

في العام 1820، بدأ باين بالبحث في إنتاج السكّر من البنجر. وقد طوّر عمليّة لاستخدام الفحم لإزالة اللون من سُكّر البنجر. ولا تزال المُرشِّحات الفحمية تُستخدم في كثير من التطبيقات حتى الآن. واصل باين بحثه؛ وفي العام 1833، طوّر محفّزًا عضويًّا من خلاصة الشعير، أسهم بدور كبير في تحويل النَّشا إلى سكّر، أطلق عليه اسمًا جديدًا هو مُحفِّز الدياستيز diastase، الذي كان أوّل إنزيم يُعزَل ويُنْتَج بشكّل مركّز. تنتهي أسماء الإنزيمات بِـ «ase»، لأنّ هذا هو النمط الذي بدأ به باين.

عام 1835، شغلَ أنسيلمي باين منصب أستاذ الكيمياء الصناعيّة والزراعيّة في المدرسة المركزيّة للفنون والمصنوعات في باريس. وواصل بحثه حتّى العام 1871، حين قُتِل في الحرب الفرنسيّة-البروسيّة. وكان من مساهماته المتعدِّدة في العلوم، مواصلته دراسة الكربوهيدرات، واكتشاف البكتين والدكسترين. ومعروف أن البكتين مركّب طبيعيّ عديد التسكر، موجود في الفاكهة، ويُستخدم لتكثيف قوام المُربّى والهلام. أمّا الدّكسترين، فهو مركّب عديد التسكُّر، ذو وزن جُزيئي، يقع بين السكّريات والنشا.



الوحدة 3

مراجعة الوحدة

الدّرس 3-1: خصائص الإنزيمات وآلية عملها

- الإنزيم بروتين كبير يؤدّي وظيفته كمحفِّز حيوي عن طريق تخفيض **طاقة التّنشيط Activation energy** اللازمة لحدوث تفاعلات كيميائيّة خاصة.
- **التّفاعلات الماصّة للطاقة Endergonic** تفاعلات كيميائيّة تمتصّ الطاقة، **والتفاعلات الطّاردة للطّاقة Exergonic** تفاعلات كيميائيّة تحرّر الطاقة.
- **الركيزة Substrate** جُزيء يستهدفه إنزيم.
- **معقّد الإنزيم- الرّكيزة Enzyme-substrate complex** مُركَّب وسيط أثناء تفاعل كيميائيّ يجمع الإنزيم والركيزة معًا.
- **الموقع النشط Activation site** موقع على الإنزيم حيث يرتبط جُزيء الركيزة.
- **نموذج القُفْل والمفتاح Lock and key model** يتمثَّل في تَناسُب الركائز مع الموقع النشط للإنزيم، مثل المفتاح الّذي يناسب القُفْل.
- **نموذج التلاؤم المُستَحثّ Induced fit model** يوضح أنّ شكل الركيزة، وشكل الإنزيم يتغيّران أثناء عملية تكوُّن معقّد الإنزيم-الركيزة.

الدّرس 3-2: نشاط الإنزيمات والعوامل المؤثِّرة فيه

- يعتمد مُعدَّل التفاعلات المُحفِّزة على عوامل بيئيّة، كدرجة الحرارة، وpH، والتركيز، والجُزيئات المُساعِدة.
- تُعمل الإنزيمات جيِّدًا في نطاق ضيّق من درجات الحرارة وpH. لدى الكائنات الحيّة وسائل عدَّة لتنظيم مُعدَّل التفاعلات الإنزيمية.
- **العامل المُساعِد Cofactor** أيون غير عضويّ، يشارك في التفاعل الإنزيمي.
- **مُرافِق الإنزيم Coenzyme** جُزيء عضويّ صغير، يشارك في التفاعل الإنزيمي.
- **مُثبِّط تنافسيّ Competitive inhibitor** يحجب الموقع النشط للإنزيم.
- **مُثبِّط غير تنافسيّ Noncompetitive inhibitor** يوقف عمل الإنزيم، من دون الارتباط بالموقع النشط.

تحضير للاختبار

1. التّفاعل الكيميائيّ الذي يمتصّ الطاقة من البيئة المحيطة، هو:

a. طارد للطّاقة.
b. ماصّ للطّاقة.
c. بنائي
d. هدمي

2. أيّ من الخصائص الآتية يجب أن تكون لدى التفاعل الكيميائيّ الذي يبدأ من تلقاء نفسه، بمجرّد أن تجتمع الموادّ المتفاعلة؟

a. لديه طاقة تنشيط أدنى من الطاقة الحراريّة لدرجة حرارة الغرفة، ويكون طاردًا للطّاقة.
b. لديه طاقة تنشيط أدنى من الطاقة الحراريّة لدرجة حرارة الغرفة، ويكون ماصًّا للطّاقة.
c. لديه طاقة تنشيط أعلى من الطاقة الحراريّة لدرجة حرارة الغرفة، ويكون طاردًا للطّاقة.
d. لديه طاقة تنشيط أعلى من الطاقة الحراريّة لدرجة حرارة الغرفة، ويكون ماصًّا للطّاقة.

3. أيّ وظيفتين من الوظائف الآتية هما أساس عمل الإنزيم؟

a. خفض طاقة التنشيط للتفاعل.
b. اختيار مسار واحد من مسارات كيميائيّة كثيرة ممكنة.
c. تحويل التفاعل الماصّ للطاقة إلى تفاعل طارد للطاقة.
d. جعل احتمال تصادم ثلاثة جُسيمات أكبر.

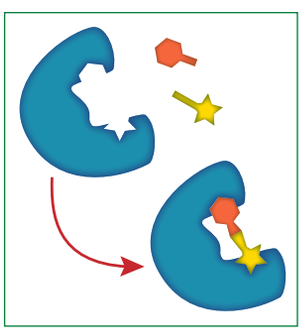
4. يشارك إنزيم في تفاعل يجمع الجُزيئين A و B في الجزيء AB. أيّ ممّا يأتي سيزيد معدّل حدوث التفاعل أكثر من سواه.

a. زيادة تركيز كلٍ من B و A.
b. تقليل تركيز كلٍّ من A و B.
c. زيادة تركيز A وتقليل تركيز B.
d. زيادة تركيز B وتقليل تركيز A.

5. أيّ من العبارات الآتية صحيحة؟

a. كل إنزيم مختص بنوع محدَّد من التفاعل.
b. تحتاج كل الإنزيمات إلى عوامل مُساعِدة ومُرافِقات إنزيمات كي تعمل.
c. يضيف كل مُرافِق إنزيم إضافي تفاعلًا إضافيًّا يمكن أن يحفِّزه الإنزيم.
d. تؤدّي الإنزيمات نفسها عادة وظائف كيميائيّة مختلفة كثيرة.

6. أي نموذج لعمل الإنزيم يمثّله الشكل المقابل؟



a. نموذج التثبيط التنافسي.
b. نموذج التثبيط غير التنافسي.
c. نموذج القفل والمفتاح.
d. نموذج التلاؤم المُستحَث.

7. أيّ من العبارات الآتية صحيحة؟

a. توجد بعض الإنزيمات في عضيّات خلويّة معيّنة فقط.
b. توجد الإنزيمات في الأجسام المحلّلة وليس في الميتوكندريا.
c. توجد الإنزيمات في الميتوكندريا والأجسام المحلّلة، وليس في البلاستيدات الخضراء.
d. توجد الإنزيمات الحيوانيّة في الميتوكندريا فقط، فيما توجد الإنزيمات النباتيّة في البلاستيدات الخضراء فقط.

أسئلة إجابات قصيرة وتفكير ناقد

الدرس 3-1: خصائص الإنزيمات وآلية عملها

8. عرّف بأسلوبك مصطلح «طاقة التّنشيط».

9. اذكر مثالًا على تفاعل كيميائيّ ماصّ للطّاقة.

10. اذكر مثالًا على تفاعل كيميائيّ طارد للطّاقة.

11. صِفْ وظيفتين مهمّتين لمُحفّز في تفاعلات كيميائيّة حيويّة.

12. صِفْ ضرورة استخدام عود الثقاب لإشعال شمعة، علمًا أن الشمعة تبقى تحترق حتى بعد انطفاء عود الثقاب.

13. يعطي احتراق الميثان بوجود الأكسجين طاقة. هل يعني هذا أن خليطًا من الميثان والأكسجين سوف يبدأ بالاحتراق ذاتيًّا؟ علِّلْ ذلك.

14. صِفِ العلاقة بين الطاقة، والنّظام، والمحيط، في سياق كلّ من التفاعلات الماصّة للطّاقة والتفاعلات الطّاردة للطّاقة.

15. لوحظ أن التفاعل الكيميائي $A + B \rightarrow C$ يحدث عند درجة الحرارة 128°C. ولوحظ أيضًا أن إضافة المادة الكيميائيّة X إلى محلول A و B سمحت للتفاعل بالحدوث عند 37°C. وضّح لماذا حدث هذا الأمر.

16. وضِّح العلاقة بين الإنزيمات والأحماض الأمينيّة.

17. عرّف مصطلح «معقد الإنزيم- الرّكيزة».

18. قارن بين نموذج القُفْل والمفتاح، ونموذج التلاؤم المُستحَثّ لعمل الإنزيم.

19. ابحث في ثلاثة إنزيمات، وحدّد الركيزة التي تعمل عليها.

20. اشرح كيف تتدفّق الطاقة في تفاعل البناء الضوئيّ من خلال استخدام مصطلحي التفاعلات الماصّة للطاقة والتفاعلات الطّاردة للطّاقة.

21. اذكر اثنين من الإنزيمات التي توجد فقط في عُضيّات خلويَّة محدّدة، وَسَمِّ العضيّة التي يوجد فيها كلّ إنزيم منهما.

22. حدِّد إنزيمًا، ووضِّح الفائدة التي يجنيها الكائن الحي من حصر هذا الإنزيم في عضيّة خلويّة خاصة.

23. وضِّح لماذا يؤثِّر تركيز الإنزيم وجُزيئات ركيزته في نشاط الإنزيم عمومًا.

الدرس 3-2: نشاط الإنزيمات والعوامل المُؤثِّرة فيه

24. صِفِ الفرق بين مُرافِق الإنزيم والعامل المُساعِد، وأعطِ مثالًا على كلّ منهما.

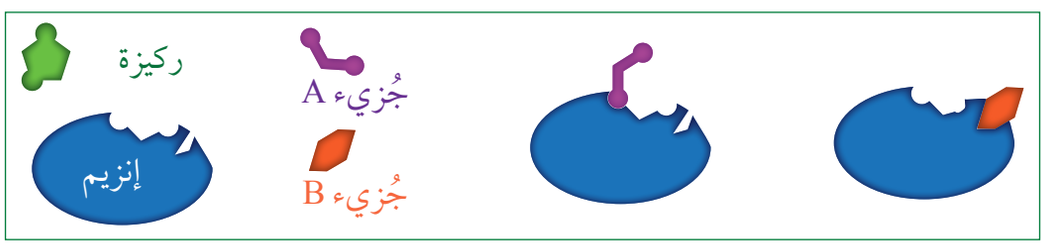
25. لا يعمل الإنزيم على نحوٍ جيّد، عندما يكون البرد شديدًا؛ وكذلك عندما يكون الحرّ شديدًا. اذكر سببًا لكلٍّ من الحالتين.

26. ارسم منحنى نموذجيًّا لنشاط الإنزيم عندما يرتفع pH من واحد إلى عشرة. لا تحتاج إلى الحصول على رقم هيدروجينيّ خاص صحيح؛ ارسم الشكل العامّ للمنحنى فقط.

27. ارسم منحنًى نموذجيًّا لنشاط إنزيم يعمل داخل الجسم البشري، إزاء ارتفاع درجة الحرارة من 0°C إلى 70°C. لا ضرورة لأن يكون الشكل صحيحًا تمامًا، ارسم الشكل العام فقط.

28. وضِّح الآلية التي يُغيِّر بها pH وظيفة الإنزيم.

29. حدّد أيٌّ من المُخطَّطات أدناه يمثّل التَّثبيط التَّنافسيّ، وأيّ منها يمثّل التَّثبيط غير التَّنافسيّ لعمل الإنزيم. وضّح اختيارك باستخدام تعريفات كِلا النوعين من التَّثبيط.



30. يُنْتَجُ هرمون النموّ البشريّ في الغُدّة النخاميّة من خلال عمل عدد من الإنزيمات المختلفة. تُسبِّب الزيادة في إفراز هرمون النموّ كثيرًا من الأمراض الخطيرة، مثل أورام الغدّة النخاميّة. اقترح طريقة لتطوير دواء من شأنه علاج الأمراض الناجمة عن زيادة إفراز هرمون النموّ.

31. في تجربة معينة، وضع محلول الاميليز والنشأ في انبوب اختبار، لُوحِظ أنّ اختبار اليود للنشا في البداية كان موجبًا، في حين كان اختبار البندكت للسكّريّات الأحاديّة سالبًا. لكن عندما وُضع أنبوب الاختبار المُستخدم في التجربة في حمّام درجة حرارته دافئة لفترة من الزمن، انعكست تلك النّتائج؛ حيث أصبحت نتيجة اختبارُ البندكت للسكّريّات الأحاديّة إيجابيّة، ونتيجة اختبار اليود للنشا سلبيّة. ما سبب انعكاس نتائج الاختبار بمرور الوقت؟

32. ابحث في وظيفة مُرافِق الإنزيم CoA ، واذكر تفاعلًا واحدًا، على الأقلّ، يشارك فيه مُرافِق الإنزيم.

33. ابحث حول مرض يسبِّبه إخفاق الجسم في تنظيم إنزيم ما.

a. ما اسم المرض؟

b. ما الإنزيم المرتبط بالمرض؟

c. حدِّد الأدوية أو العلاجات المستخدمة في مكافحة المرض.

d. ماذا يفعل الدواء لمُكافحة المرض؟

B1105
B1106
B1107
B1108

الوحدة 4

الكيمياء الحيوية: التَّنَفُّس الخلويّ

Biochemistry: Cellular Respiration

في هذه الوحدة

الدّرس 4-1: ATP: عُملة الطاقة

الدّرس 4-2: الميتوكندريا

الدّرس 4-3: التنفُّس الهوائيّ

الدّرس 4-4: التنفُّس اللاهوائيّ

الوحدة 4

مقدّمة الوحدة

الطاقة واحد من أهم المفاهيم في العلوم جميعها؛ ولا بُدَّ في علم الأحياء من فهم تدفُّق الطاقة لفهم أنظمة الكائن الحيّ، بما في ذلك الهضم، والدَّوران، والمناعة، والحركة. أضف إلى ذلك أن فهم الطاقة على المستوى الخلويّ يساعد الأطبّاء، ومدرِّبي الحيوانات، وعلماء الحيوان، وعلماء الحياة البرّيّة، على فهم سلوك الإنسان، والحيوان، والنبات؛ الأمر الذي يوفّر مفاتيح فهم كلّ من الصحّة والمرض.

في هذه الوحدة نتتبّع المسارات الكيميائية التفصيلية المنتجة للطَّاقة في الكائنات الحيّة. وسوف تلاحظ من خلال هذه الوحدة أن جزيئين أساسيّين يؤدِّيان دورًا رئيسًا وهما ATP، والجلوكوز. وقد تطوّرت معظم الكائنات الحيّة على الأرض من الأسلاف الكيميائية نفسها. لهذا السبب، تكون مسارات الطاقة الكيميائية الحيويّة متشابهة جدًّا في كل النباتات والحيوانات. إن كل كائن حيّ متعدد الخلايا يعالج الطاقة اعتمادًا على كيمياء الجلوكوز و ATP.

الأنشطة والتّجارب

4-1 بناء نموذج لتَحلُّل ATP المائيّ

4-2 نموذج ميتوكندريا ثلاثي الأبعاد

4-3 (a) دراسة دورة كربس

4-3 (b) التَّنفُّس الهوائيّ

4-4 الإعياء والتمارين

الدّرس 4-1

ATP: عُملة الطاقة

ATP: Energy Currency

الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات (ATP) هو الجُزيء الذي يوفّر الطاقة لأنشطة الخلايا في كل الكائنات الحية، من أصغر بكتيريا إلى الغزال الذي يركض في الصحراء. يستخدم الغزال في قفزته الألياف العضليّة التي تعمل بالطاقة المستمدة من تحلُّل ATP المائيّ (**الشكل 4-1**). كما يحصل الجهاز الهضمي على الطاقة اللازمة لتكسير جُزيئات الغذاء من ATP أيضًا.

النباتات أيضًا تعتمد على ATP، لأن الطاقة التي تستخدمها لا تأتي كلّها من الشمس مباشرة. تنقل النباتات الطاقة داخل الخلايا بواسطة ATP وتستخدمه في عملياتها الخلوية، كالنمو، وحتى في البناء الضوئي كذلك.

الشكل 4-1 تستخدم النباتات والحيوانات ATP بوصفه عملة الطاقة في الخلايا.

مخرجات التّعلُّم

B1105.1 يصف تركيب الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات (ATP) كعملة طاقة مُتداولة في جميع الكائنات الحيّة.

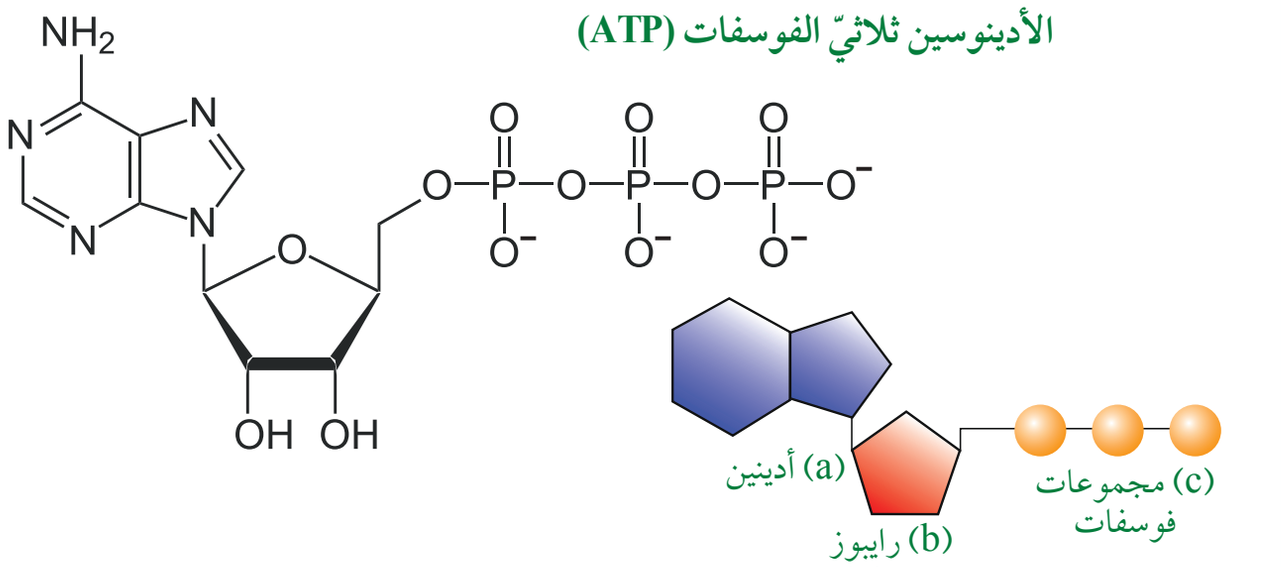
B1105.2 يشرح أهمّية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات.

المفردات

الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات (ATP)	Adenosine triphosphate (ATP)
الأدينوسين	Adenosine
الرايبوز	Ribose
الأدينين	Adenine
الأدينوسين ثنائيّ الفوسفات	Adenosine diphosphate
فوسفات غير عضويّ	Inorganic phosphate (P_i)

ATP عملة الطاقة المُتداوَلة في الخلايا

يتولّى **الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات Adenosine triphosphate (ATP)** مسؤولية نقل الطاقة، كي تُستخدَم في كلّ عمليّات الأيض التي تتمّ في مختلف أنحاء الخليّة. يتكوّن ATP من جُزيء **أدينوسين Adenosine** مرتبط بسلسلة من ثلاثة جُزيئات فوسفات (**الشَّكل 4-2**). والأدينوسين نفسه يتكوّن من جزيئين صغيرين مرتبطان معًا. الجُزيء الأول هو **الأدينين Adenine** (**الشَّكل 4-2a**). أمّا الجُزيء الثّاني في الأدينوسين، فهو سُكَّر أحادي خماسيّ الكربون، ويسمّى **الرايبوز Ribose**. سوف نلاحظ أن إضافة مجموعات الفوسفات وإزالتها هي الوسيلة التي يخزّن فيها ATP الطاقة الكيميائية ويطلقها.



الشكل 4-2 تركيب الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات ATP.

يُطلق على ATP غالبًا اسم (عملة الطاقة في الخلايا)، وهو تشبيه لعمليّة بناء ATP، ثمّ إنفاقه من جانب الخلايا، تمامًا كما يحدث في المعاملات التجاريّة، التي تتضمّن النّقود. فكّر في الخليّة كمركز تسوق تجاريّ، نحصل على النقود من الصرّاف الآلي (ATM) وننفقها لشراء ما نحتاج إليه. لكنّ المال لا يتوقّف عند صاحب المتجر، بل ينتقل إلى شخص آخر، أو عمليّة أخرى. ATP هو العملة المتداولة للحفاظ على استمراريّة أعمال الخليّة. وهو يربط بين التفاعلات المُنتِجة للطاقة والمُستهلِكة لها.

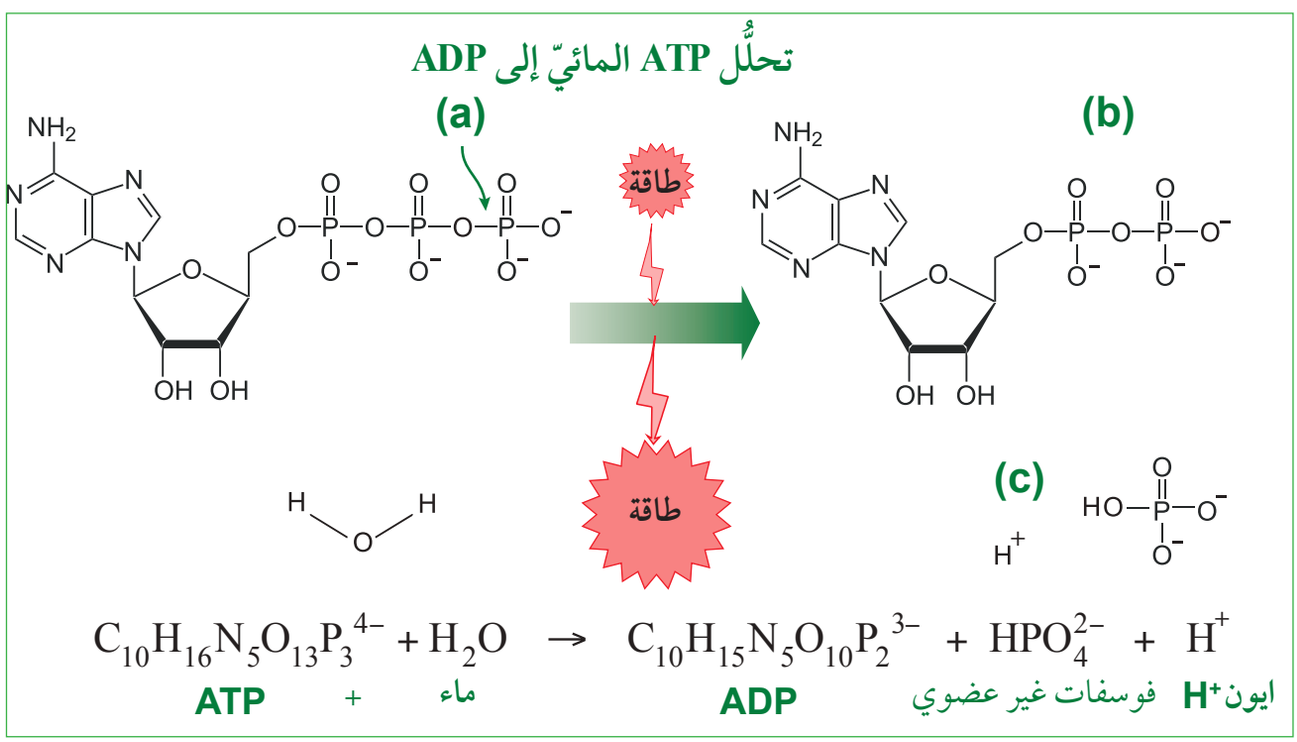
الطاقة وتركيب ATP

سؤال للمناقشة

كيف يخزّن ATP الطاقة؟

يبيّن تركيب جُزيء ATP كيف تنطلق الطاقة أثناء التحلُّل المائي. عندما يتعرض ATP للتَّحلُّل المائيّ:

1. تتكسّر رابطة فوسفات – أكسجين (P–O) بين مجموعتَي الفوسفات الثانية والثالثة (**الشكل a3-4**).
2. يختزل جُزيء ATP إلى جُزيء **أدينوسين ثنائيّ الفوسفات (ADP)** **Adenosine diphosphate** (**الشَّكل b3-4**) ويطلق 7.3 Kcal من الطاقة لكل مول ATP .
3. ينتج فوسفات غير عضوي (HPO_4^{-2}) وأيّون هيدروجين (H^+) (**الشكل c3-4**). لاحظ الشحنات السالبة على كلّ مجموعة فوسفات، والتي تميل طبيعيًّا إلى التنافر. تنطلق طاقة هذا التنافر عندما تتكسّر الرّابطة P–O.



الشكل 3-4 إضافة الماء إلى ATP تكسِّر رابطة فوسفات – أكسجين، وتنتج ADP وفوسفات غير عضويّ (P_i)، وتطلق الطاقة.

إن تفاعل ATP → ADP هو المصدر الرئيس للطاقة المُستخدَمة في معظم العمليات الخلويّة. وفيما يأتي عدد قليل من آلاف الأمثلة على هذه العمليات:

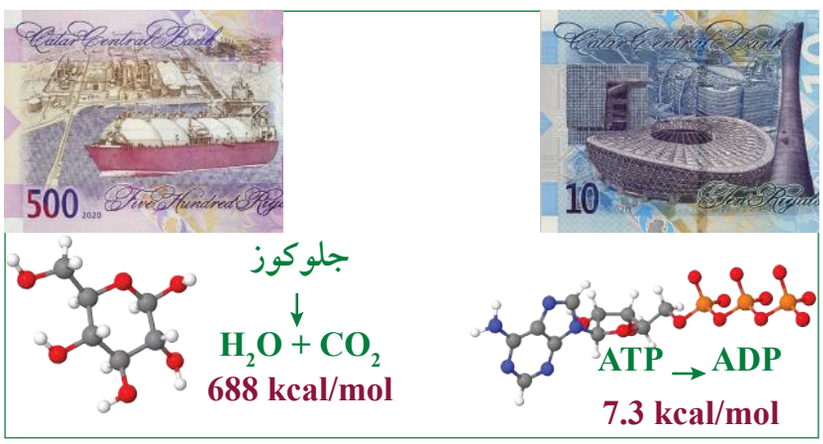
- يوفِّر تحلُّل ATP المائيّ، مثلاً،الطاقة للنقل النشط، الذي يضخّ الأيونات عبر الأغشية.
- خلال النقل النشط في ألياف العضلة، يغيّر ATP تركيب القنوات البروتينية الموجودة على الأغشية، مغيّرًا تراكيز أيونات الكالسيوم (Ca^{2+})، فتنقبض الخليّة مؤدِّية شغلًا ميكانيكيًّا، يُفضي إلى انقباض العضلة.
- يوفر ATP الطاقة لبناء البروتينات بواسطة الرايبوسومات.

ATP وإطلاق الطاقة

يخزن الجلوكوز طاقة أكبر من ATP لكل مول. وعندما يتفاعل 1mol جلوكوز (180g) مع الأكسجين تحت ظروف المختبر يطلق 688 Kcal من الطاقة. في حين أن الطاقة التي يطلقها 1mol ATP أقلّ كثيرًا وهي حوالي 7.3 Kcal .

يطلق التَّحلُّل المائيّ لِلـ ATP إلى ADP في الخلايا 7.3 Kcal من الطاقة لكلّ مول في ظروف مخبرية.

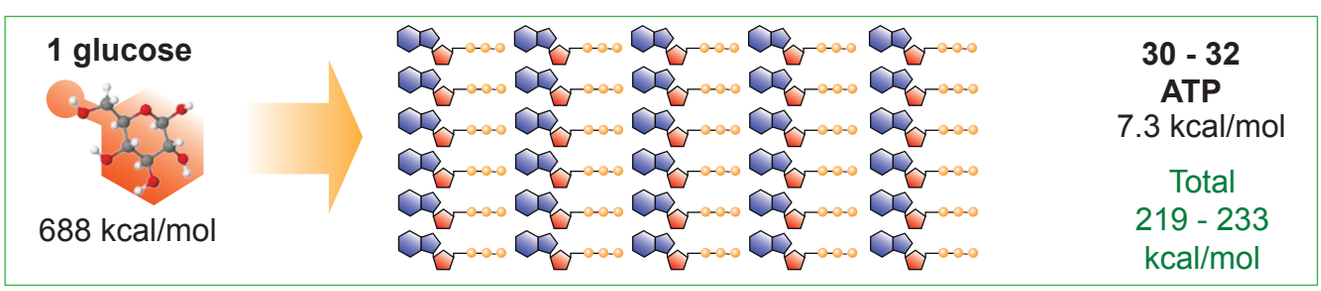
تحتاج الخلايا إلى ATP، لأن الطاقة المخزّنة في جُزيء جلوكوز واحد كبيرة جدًّا قياسًا على تفاعل مفرد. لِنعد إلى مثال العملة في مركز التسوّق. هل تحتاج إلى ورقة نقود من فئة 500 ريال قطريّ لشراء كوب من القهوة، أم تستخدم ورقة 10 ريالات؟ (**الشكل 4-4**).



الشكل 4-4 يطلق مول الجلوكوز طاقة أكبر مما يطلقه مول ATP.

تحتاج معظم المشتريات إلى وحدة أصغر كثيرًا من 500 ريال. كذلك، يحتوي جُزيء ATP على كمّيّة صغيرة من الطاقة، تكون أكثر فائدة لعمليّات الخليّة المفردة. وفي حين يُستخدم الجلوكوز لنقل كمّيّات كبيرة من الطاقة، يستخدم ATP (لإنفاق) كميّات أقلّ من الطاقة على العمليّات الخلويّة.

تستطيع تفاعلات التنفُّس الخلوي أن تنتج نظريًّا 38 ATP لكل جلوكوز. إلا أن الخسائر تجعل الرقم الحقيقي يتراوح بين 30 ATP و 32 ATP لكل جلوكوز. وعليه تكون كفاءة الطاقة الكلية حوالي 33 % (**الشكل 4-5**).



الشكل 4-5 ينتج الجلوكوز الواحد 32 ATP – 30.

1-4 بناء نموذج لتحلُّل ATP المائيّ

سؤال الاستقصاء	كيف نبني نموذجًا لتَّحلُّل ATP المائيّ؟
الموادّ المطلوبة	قوالب جُزيئات، أقلام ملوّنة، مِقصّ، إصبع غراء أو شريط لاصق.

الخطوات

1. احصل من معلِّمك على نسخة مُصوَّرة لهذا النشاط.
2. ابتكرْ مفتاحًا يمثّل كلّ مكون من المكونات التالية، واكتب قائمة بالألوان التي ستستخدمها في نموذجك:
   - a. أدينوسين
   - b. رايبوز
   - c. فوسفات
   - d. ماء
3. حدِّد موقع كلّ مكوّن وفقًا لمفتاحك، وعَنْوِنْهُ، ولَوِّنه، قبل قصّ أيّ قطع. قصّ على امتداد الخطوط المتّصلة فقط، لفصل كلّ نموذج جُزيء.
4. سجِّل الصِّيغة الكيميائيّة، والصِّيغة البنائية، لكلّ قطعة.
5. مثِّل تفاعل تكثيف بالقصّ على امتداد الخطوط المُنقَّطة بين الأدينين والرّايبوز. إذا أخطأت في القصّ، فألصق الأجزاء معًا، وحاول مرّة أخرى. حدّد المساحة على ورقة العمل، ورتّب الجُزيء الوسيط. لكن لا تلصق، أو ترمي أيّ قطعة قَصَصْتها. عَنْوِنْ هذا الجُزيء بِأدينوسين أحاديّ الفوسفات (AMP).
6. مثِّل تكثيفًا بين الجُزيء الوسيط والفوسفات غير العضويّ (P_i). سجّل اسم هذا الجُزيء.
7. كثِّف الفوسفات الثاني. سمِّ الجُزيء. ألصق هذا الجُزيء بالغراء أو الشريط اللاصق، وجمّع أيّ قطع متبقِّية أزلتها.
8. كثِّف الفوسفات الثالث. سمِّ الجُزيء النهائيّ المُتكوِّن.
9. مثِّل الآن تحلُّلًا مائيًّا للجُزيء في الخطوة 8، وتأكّد من إكمال كلّ قسم في ورقة العمل قبل تسليمها إلى معلّمك.

أسئلة تلخيص

a. سَمِّ مُنتجَين تشكّلا. ما الذي انطلق في كلّ تحلُّل مائيّ خضع له ATP؟

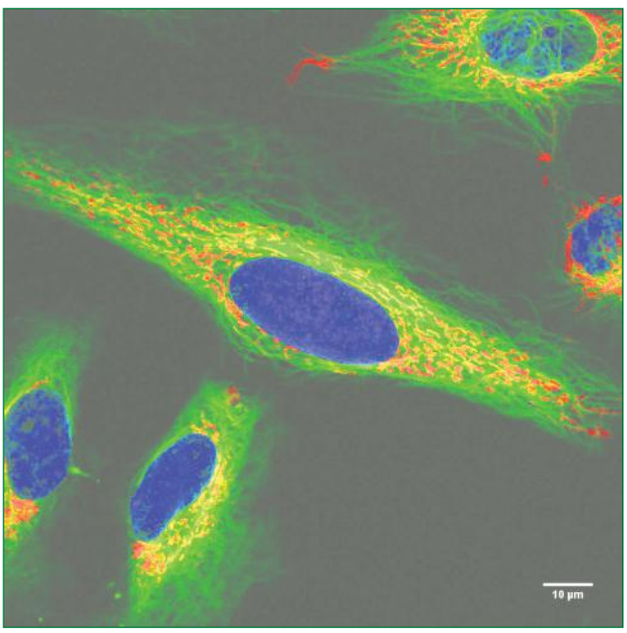
b. بعد التَّحلُّل المائيّ، من أين تأتي الطاقة لاعادة بناء ATP؟

تقويم الدّرس 4-1

1. صِفْ وظيفة ATP في الخلايا.
2. اكتب الصِّيغ الكيميائيّة للجُزيئات الثلاثة التي يتكوّن منها ATP.
3. ما الفرق بين الأدينين والأدينوسين؟
4. هل الكائنات الحيّة كفوءة 100 % في استخدام الطاقة؟ وضّح إجابتك سواء كانت بالإيجاب أو النفي.
5. الصيغة الكيميائيّة لـ ATP هي $C_{10}\ H_{16}\ N_5\ O_{13}\ P_3$، في حين أن صيغة ADP هي $C_{10}\ H_{15}\ N_5\ O_{10}\ P_2$. في أثناء التحلُّل المائي يضاف جُزيء ماء (H_2O) إلى جُزيء ATP لينتج جُزيء ADP. ما عدد الذرّات، التي تنتج من التفاعل، إلى جانب ADP؟ ومن أي عناصر تنتج؟
6. ينفق الشخص العاديّ نحو 2000 Kcal في اليوم ليبقى حيًّا. احسب عدد جرامات ATP التي يجب هدمها إلى ADP لتساوي تلك الكمّيّة من الطاقة. كتلة ATP هي 507g/mol.
7. اذكر سببين يجعلان الكائنات الحيّة تستخدم الجلوكوز لنقل الطاقة وتخزينها، وتستخدم ATP لتوفير الطاقة للعمليّات الخلويّة.
8. غيّر الكلمات المكتوبة بخط سميك أدناه لجعل كلّ جملة من الجُمَل الآتية صحيحة:
   a. يختزن ATP طاقة **ميكانكيّة** في روابطه.
   b. تُختَزن الطاقة في ATP في **روابط كربون – هيدروجين**.
   c. يرتبط **الفالين بالجلوكوز** في جُزيء ATP.
9. تستخدم البكتيريا والخميرة دائمًا مسارات الطاقة نفسها التي تستخدمها النَباتات والحيوانات. صح أم خطأ؟ وضّح إجابتك.

الدّرس 4-2
الميتوكندريا
Mitochondria

تُسمّى الميتوكندريا مَعامل انتاج الطاقة في الخليَّة. وقدّ تطوَّرت هذه العُضّيات الدقيقة لتوفِّر حاجات الخلايا من الطاقة. ومع تعلّم المزيد عن DNA، توافر لدى العلماء أدلّة أكثر على كيفيّة تطوّر الميتوكندريا أيضًا. كان حسابُ عدد الميتوكندريا المُفردَة في الخلايا استراتيجيةً قديمة لقياس الاختلاف في النشاط الأيضيّ بين الحيوانات. حاليًّا، تُستخدَم المركّبات الكيميائيّة المُشعّة (Fluorescent) الحديثة لجعل التراكيب الخلويّة تتوهّج عندما تثير أطوال الموجات الضوئية إلكتروناتها. كشفت هذه التقنية، مع تقنيات المجهر الإلكتروني، أنّ الميتوكندريا تتحرّك في الخليَّة، وتغيّر شكلها على نحو روتينيّ. يمكننا العثور على الميتوكندريا حتى في الأنيبيبات الدقيقة في الخلايا السرطانيّة (**الشَّكل 4-6**).



الشكل 4-6 صورة ملتقطة بالمجهر الفلوري (fluorescent microscope) متعدّدة الألوان لخلايا سرطانيّة تبدو فيها الميتوكندريا باللّون الأحمر، والأنيبيبات الدقيقة باللون الأخضر.

المفردات

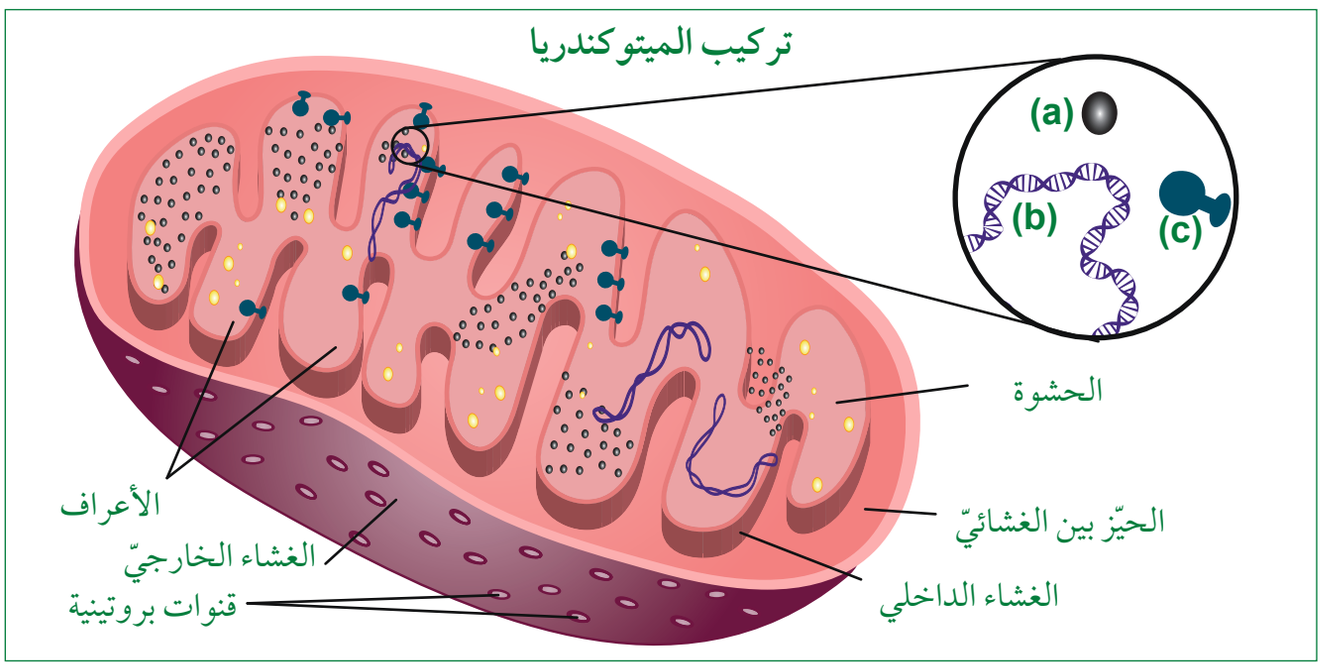
DNA الميتوكندريا	Mitochondrial DNA
القناة البروتينيَّة الغشائيّة	Porin
الحيّز بين غشائيّ	Intermembrane space
الأعراف	Cristae
الحشوة	Matrix
إنزيم بناء ATP	ATP synthase

مخرجات التّعلُّم

B1106.1 يصف تركيب الميتوكندريا، ويربط ذلك بتفاعلات التَّنفُّس الهوائي.

تركيب الميتوكندريا

تتميّز الميتوكندريا بتركيب معقَّد (**الشكل 4-7**)، حيث يقسم غشاءان متخصِّصان الميتوكندريا إلى حيِّز بين الغشائي ضيق وحشوة داخلية أكبر كثيرًا. يؤدي كل واحد من الحَيِّزَين وظيفة مختلفة.



الشكل 4-7 ميتوكندريا على شكل حبة الفول مع (a) رايبوسومات، (b) mtDNA الميتوكندريا، (c) انزيم بناء ATP على الغشاء الداخليّ المحيط بالحشوة.

الغشاء الخارجي: يحتوي الغشاء الخارجي للميتوكندريا على **قنوات بروتينية كثيرة Porins** تمكّن البروتينات الأصغر والأيّونات ومركبات الكربون مثل ATP وADP من عبورها.

الغشاء الداخلي: تحتوي الميتوكندريا أيضًا على غشاء داخلي كثير التعرّجات مُشكِّلًا انثناءات تُسمّى **الأعراف Cristae**، التي تزيد المساحة السطحية للغشاء الداخلي، حيث يوجد **إنزيم بناء ATP Synthase ATP**. يمتاز الغشاء الداخلي بنفاذية انتقائية، فهو يسمح للأكسجين وثاني أكسيد الكربون والماء بعبوره، ولكنه غير نفاذ للأيونات. وفيه قنوات بروتينية خاصة تنقل جُزيئات خاصة، ومن ضمنها ATP وADP، وأيونات فوسفات غير عضوية.

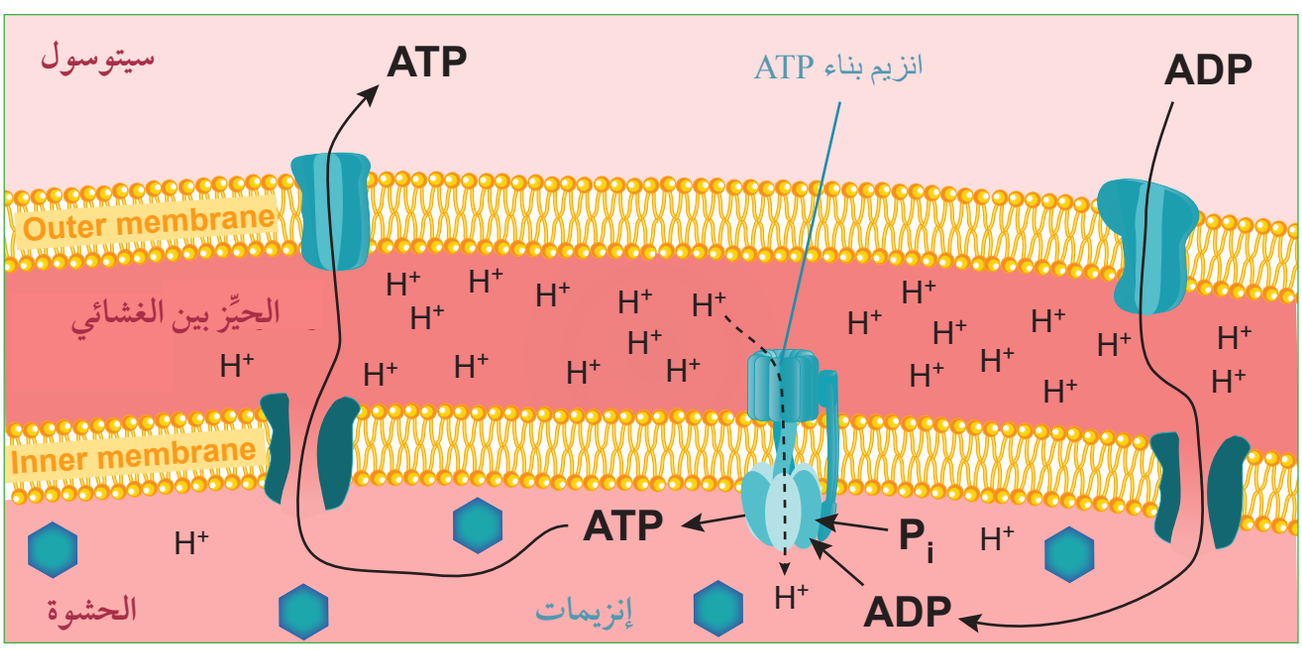
الحيِّز بين الغشائي Intermembrane space: وهو يقع بين الغشاء الخارجي والغشاء الداخلي. يحتوي هذا السائل على بروتينات صغيرة وأيونات، كأيون الكالسيوم، Ca^{2+}. تعمل الميتوكندريا أيضًا كمواقع تخزين لأيونات الكالسيوم في الخلية.

الحشوة Matrix: وهي تقع داخل الغشاء الداخلي للميتوكندريا، وتحتوي على DNA الميتوكندريا، ورايبوسومات وبروتينات خاصة كثيرة، تساهم في بناء ATP.

إنتاج ATP في الميتوكندريا

يؤدّي تركيب الميتوكندريا دورًا محوريًّا في عملية إنتاج ATP. يعتمد بناء ATP على الفصل بين الأيونات والجزيئات بواسطة الغشاء الداخلي **(الشكل 4-8)**.

1. تحتوي الحشوة على تركيز عالٍ من الإنزيمات، تشارك في دورة ATP. يثبّت الغشاء الداخلي التركيز العالي، عن طريق منع تلك الإنزيمات من الانتشار إلى الخلية، عبر القنوات البروتينية الموجودة في الغشاء الخارجي.
2. تحرر عمليات التنفُّس الهوائي فائضًا من أيونات H^+ في الحيِّز بين الغشائي. وهذا يُكسبه شحنة موجبة خفيفة بالمقارنة مع الحشوة. يمنع الغشاء الداخلي أيونات H^+ من العودة نحو الحشوة.
3. تنتشر ايونات H^+ من الحيز بين الغشائين الى الحشوة عبر انزيم بناء ATP، فتحول معقدات انزيم بناء ATP الموجودة على الغشاء الداخلي الفوسفات غير العضوي، P_i، وADP إلى ATP، عن طريق استخدام الطاقة التي يوفِّرها فرق تركيز أيونات H^+.



الشكل 4-8 إنتاج ATP في الميتوكندريا.

يؤدّي فرق الطاقة بين تركيز أيونات H^+ العالي في الحيِّز بين الغشائي، وتركيزها المنخفض في الحشوة إلى تسيير بناء ATP. لاحظ أن **الشكل 4-8** لا يُظهِر أن الماء والأكسجين وثاني أكسيد الكربون جزء من التفاعلات التي تحدث في الحشوة. تعبر هذه المواد الغشاء الداخلي والغشاء الخارجي إلى السيتوسول.

2-4 نموذج ميتوكندريا ثلاثيّ الأبعاد

سؤال الاستقصاء	كيف تبدو الميتوكندريا فعلًا؟
الموادّ المطلوبة	انترنت، والكمبيوتر المحمول، طابعة، قلم، ورقة، مِقَصّ، لوازم فنيّة، شريط لاصق، غراء.

الخطوات

1. اعمل ضمن فريق أو مجموعة. وسوف يزوّدك المعلم بنسخة تتضمّن التعليمات اللازمة، ونسخة تتضمّن توجيهات إضافيّة.
2. أوّلًا، اعمل مع زميل لك، أو ضمن مجموعة، على ابتكار مفتاح لتمثيل كلّ تركيب في الميتوكندريا، يلزم للنموذج الثلاثيّ الأبعاد.
3. ارسم بقلم رصاص رسمًا ثنائيّ الأبعاد، ثمّ اكتب اسم كلّ تركيب، ولوّنه وفقًا لمفتاحك.
4. استخدم الإنترنت، أو الصورة المتوفرة، لجمع معلومات عن متوسّط حجم كلّ مما يأتي:
   a. الميتوكندريا في العضلات الهيكليّة للإنسان.
   b. الميتوكندريا الشبكيّة في الجُرذ الكنغريّ (Kangaroo rats).
   c. الميتوكندريا في عضلة قلب البقر.
5. لا تنسَ ذكر مصدر المعلومات التي تجمعها، وفق النسق الذي طلبه مُعلِّمك.
6. اختر كائنًا حيًّا لتبني نموذجًا للميتوكندريا فيه، وحدّد الموادّ التي ستستخدمها لبناء النموذج. يجب على النموذج:
   a. أن يكون ثلاثيّ الأبعاد.
   b. أن يعرض، ويتضمّن مقياسًا (أو مقاييس عدّة).
   c. أن يتضمّن مفتاحًا لكل المظاهر في نسخة التوجيهات المعطاة.

الأسئلة

a. لمَ يصعب كثيرًا تحديد حجم كلّ ميتوكندريا مفردة؟ وضّح ذلك.

b. هل حجم ميتوكوندريا النباتات مماثل لحجم ميتوكندريا الحيوانات؟

c. ما التحدّيات التي واجهَتْها مجموعتك في تحديد المقياس الذي استخدمته في نموذجك النهائيّ؟

d. كيف حلّ فريقك، أو مجموعتك، تلك التحديات؟

تقويم الدّرس 4-2

1. وظيفة الميتوكندريا الرئيسة هي:

a. تهضم البروتينات إلى أحماض أمينية.

b. تصنع ATP من ADP وفوسفات.

c. تبني DNA من نيوكليوتيدات مفردة.

d. تركّز الإنزيمات التي تضرّ بالتراكيب الخلوية الأخرى.

2. أي من الآتي يعتمد على فصل حشوة الميتوكندريا عن الحيّز بين الغشائي بواسطة الغشاء الداخلي للميتوكندريا؟

a. قذف CO_2 الناتج من بناء ATP.

b. بناء الإنزيمات بواسطة الرايبوسومات في الحشوة.

c. تثبيت فرق تركيز الأيونات H^+.

d. انتشار جُزيئات الماء للمُحافَظة على حجم ثابت.

3. يوجد انزيم بناء ATP على:

a. رايبوسومات الميتوكندريا.

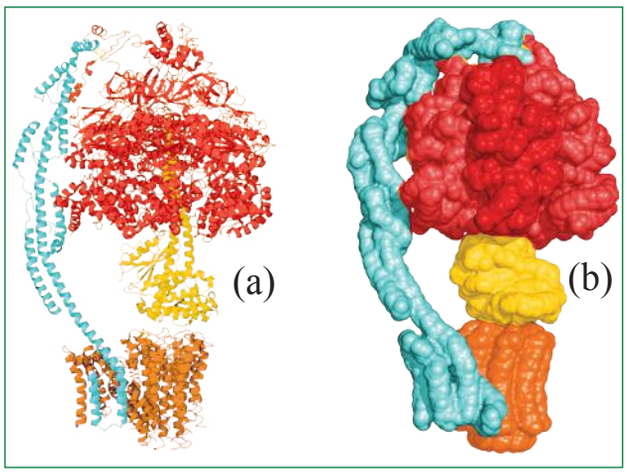
b. غشاء الميتوكندريا الخارجي.

c. غشاء الميتوكندريا الداخلي.

d. تراكيب صغيرة حرّة الحركة موزَّعة داخل الحيِّز بين الغشائي.

5. ارسم تركيب ميتوكندريا نموذجيّة، واكتب أسماء أجزائها.

الدّرس 3-4
التنفُّس الهوائيّ
Aerobic Respiration



الشكل 4-9 تبيّن نماذج انزيم بناء ATP (a) التفاف البروتين (b) الأسطح الثلاثية الأبعاد.

أتاح استخدام أحدث تقنيات التصوير التي تجمع الخصائص الكيميائيّة للبروتينات، والكمبيوترات، والطابعات الثلاثيّة الأبعاد، تكوين نماذج جديدة. يستطيع الباحثون إظهار كيف يمكن أن تبدو أربعة بروتينات لولبيّة بالأبعاد الثلاثة (**الشّكل 4-9**).

إن هذه الجُزيئات المُذهلة هي المسؤولة عن إنتاج ATP في ميتوكندريا خلايا عضلة القلب.

المفردات

Aerobic respiration	التنفُّس الهوائيّ
Anaerobic respiration	التنفُّس اللاهوائيّ
Cellular respiration	التنفُّس الخلويّ
Glycolysis	التحلُّل السكّريّ
Pyruvate	البيروفيت
Glycerate 3-phosphate (G3P)	الجليسرات 3– فوسفات
Phosphofructokinase -1 (PFK-1)	الفسفوفركتوكينيز –1
Nicotinamide adenine dinucleotide	ثنائيّ نيوكليوتيد الأدينين وأميد النّيكوتين
Pyruvate oxidation	أكسدة البيروفيت
Krebs cycle	دورة كربس
Oxidative phosphorylation	الفسفرة التأكسديّة
Acetyl-coenzyme A (acetyl-coA)	أستيل – مرافق إنزيم A
Citrate	السيترات
Oxaloacetate	الأوكزالوأستات
Flavin adenine dinucleotide	ثنائيّ نيوكليوتيد الفلافين والأدينين
ATP synthase	انزيم بناء ATP
Electron transport chain (ETC)	سلسلة نقل الإلكترون
Chemiosmosis	الأسموزيّة الكيميائيّة

مخرجات التّعلُّم

B1107.1 يصف تفاعلات التَّحلُّل السُّكَّريّ كما تحدث في سيتوبلازم الخليَّة.

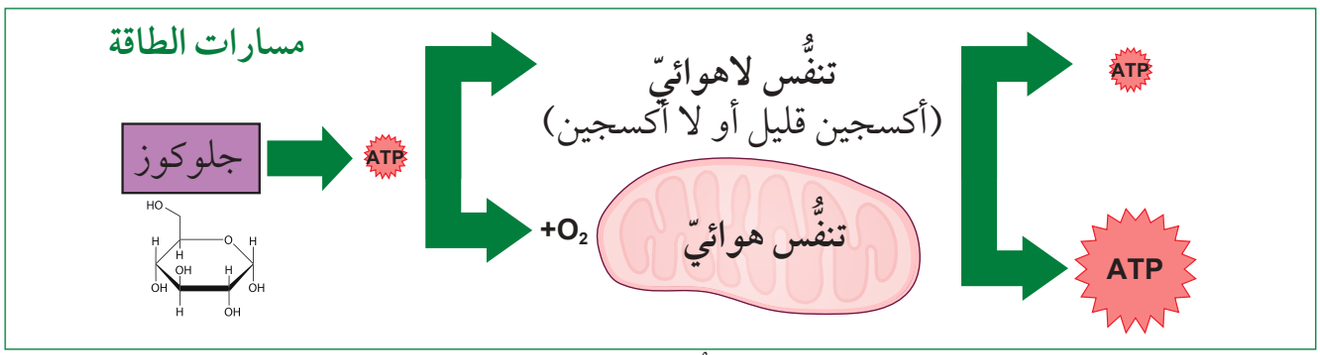
B1107.2 يصف تفاعلات دورة كربس التي تحدث في حشوة الميتوكندريا، كأكسدة كاملة للبيروفيت.

B1107.3 يصف دور سلسلة نقل الإلكترون على غشاء الميتوكندريا الدّاخليّ في تكوين الأدينوسين ثلاثيّ الفوسفات (ATP) بوساطة الفسفرة التأكسديّة، بما في ذلك دور الأكسجين بصفته مُستقبِلًا نهائيًّا للإلكترون.

مسارات الطاقة

تحصل الخلايا على الطاقة اللازمة لعملياتها الحيوية من خلال عملية التنفس الخلوي، ويتم خلال هذه العملية تكسير جزيئات الطعام العضوية «كالجلوكوز مثلاً» إلى مواد بسيطة لتحرير الطاقة الكامنة فيها. وتتم عملية تكسير الجلوكوز لتحرير الطاقة بواحد من مسارين، بالاعتماد على كمية الأكسجين المتوافرة، وهما :

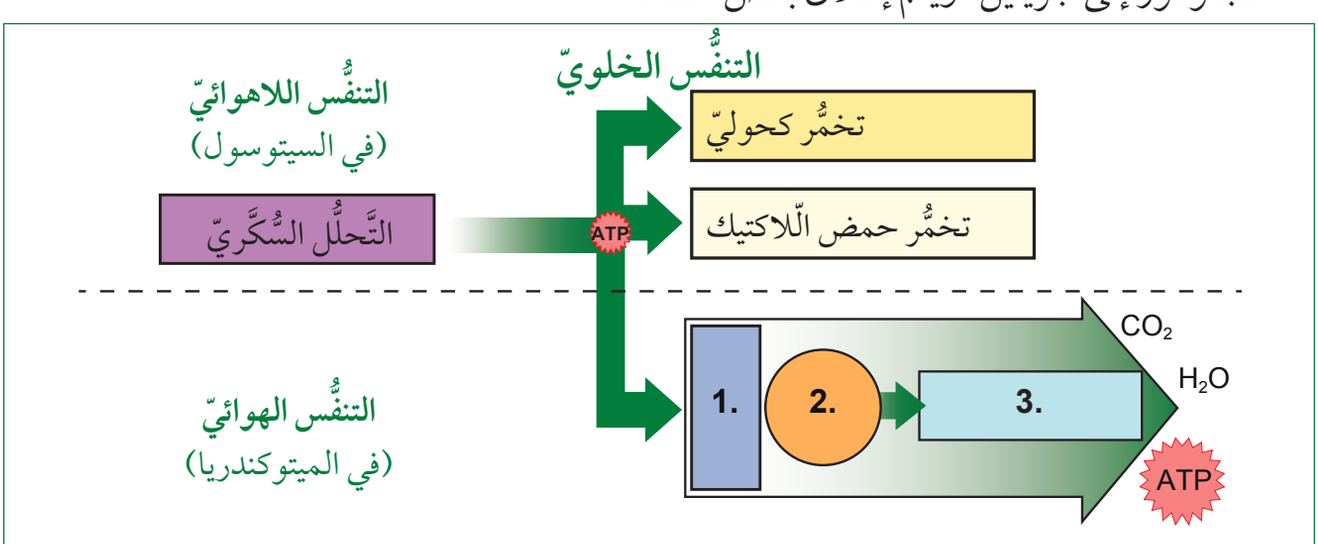
1. **التنفُّس الهوائيّ Aerobic respiration** : يحدث بوجود الأكسجين.
2. **التنفُّس اللاهوائيّ Anaerobic respiration** : يحدث بغياب أو نقص الأكسجين.



الشكل 4-10 تعتمد كمّيّات ATP على الأكسجين والتَّنفُّس الهوائيّ.

التنفُّس الخلويّ Cellular respiration هو العمليّة التي تُحوَّلُ من خلالها الطاقة المخزَّنة في الغذاء إلى شكل يمكن للخليَّة استخدامه (**الشكل 4-11**). ويتكوّن التَّنفُّس الخلويّ في الخلايا الحقيقيّة النواة من كِلا المسارَيْن، الهوائيّ، واللّاهوائيّ.

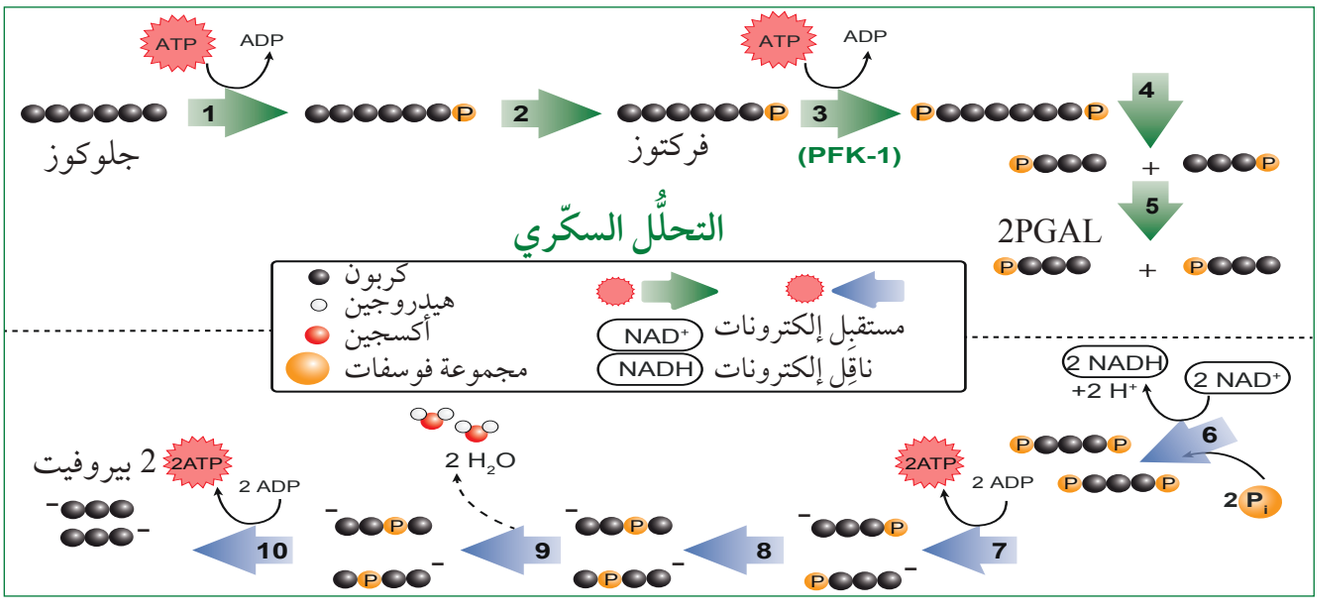
1. يحدث التنفُّس اللاهوائيّ أوّلًا من خلال التخمُّر في سيتوسول الخلايا. وهذا موضوع سنناقشه بالتّفصيل لاحقًا.
2. يحدث التنفُّس الهوائيّ في الميتوكندريا، وينتج ATP أكثر مما ينتجه التنفُّس اللاهوائيّ.
3. يبدأ التنفس الهوائي واللاهوائي في السّيتوسول **بالتَحلُّل السُّكَّريّ Glycolysis**، الذي يتكسّر فيه الجلوكوز إلى جُزيئَين، ويتمّ إطلاق بعض الطاقة.



الشكل 4-11 يتضمّن التنفُّس الهوائيّ ثلاث مراحل كيميائيّة حيويّة.

مرحلتا التحلُّل السُّكَّريّ (Glycolysis)

يُعتبَر التحلُّل السُّكَّريّ الخطوة الأولى في التنفُّس، ويحدث في السيتوسول. مدخل التحلُّل السكَّري هو الجلوكوز، وناتجه البيروفيت. البيروفيت أيون سالب عضوي CH^3 CO COO ، وهو مادة وسيطة في تفاعلات كثيرة. يُنتجُ التحلُّل السكَّري جُزيئَين من **البيروفيت Pyruvate**، مع نتيجة نهائية من جُزيئَي ATP و2NADH و$2H^+$. (**الشَّكل 4-12**).



الشكل 4-12 ملخّص للتحلُّل السُّكَّريّ مع مرحلتَي استهلاك الطاقة، وانتاجها.

الإنزيم المُسمّى PFK-1، وهي صيغة مختصرة لِـ **فسفوفركتوكينيز 1–Phosphofructokinase**، يُعرف بإنزيم ضبط السرعة، لأنه يتحكّم في تقدم عمليّة التحلُّل السُّكَّريّ. ويعمل مُرافِق إنزيم متخصّص آخر هو **ثنائيّ نيوكليوتيد الأدينين وأميد النّيكوتين Nicotinamide adenine dinucleotide** (NADH) ناقلًا للإلكترونات، خلال عملية التَّنفُّس الخلويّ.

مرحلة استهلاك الطاقة: تستخدم (2) ATP.

المرحلة (1،2): يتحوَّل الجلوكوز إلى جلوكوز–6–فوسفات باستهلاك ATP. ثم يتحوَّل جلوكوز –6–فوسفات إلى فركتوز –6–فوسفات.

المراحل (3،4): يتحوَّل فركتوز–6–فوسفات إلى فركتوز ثنائي الفوسفات باستهلاك ATP. ينقسم هذا الجُزيء إلى إيزومرين من فوسفات السكَّر ثلاثي الكربون يتحولان إلى إيزومر واحد، هو جليسر ألدهايد–3–فوسفات (PGAL).

مرحلة انتاج الطاقة: تنتج أربعة (4) ATP

المرحلة (5): التأكسد: يتأكسد جُزيئا PGAL، ويختزل $2NAD^+$ لينتجا 2NADH عن طريق إضافة فوسفات إلى كل جُزيء PGAL.

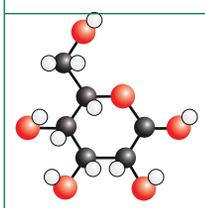
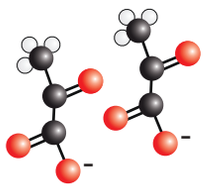
المراحل (6،9) الفسفرة: تزال 4 مجموعات فوسفات من PGAL لترتبط مع 4ADP مكوِّنة 4ATP ومُنتِجة جزيئين بيروفيت.

التحلُّل السُّكَّريّ ومراحل التنفُّس الهوائيّ اللاحقة

يبيّن **الجدول 4-1** نواتج التحلُّل السُّكَّريّ ومدخلاته.

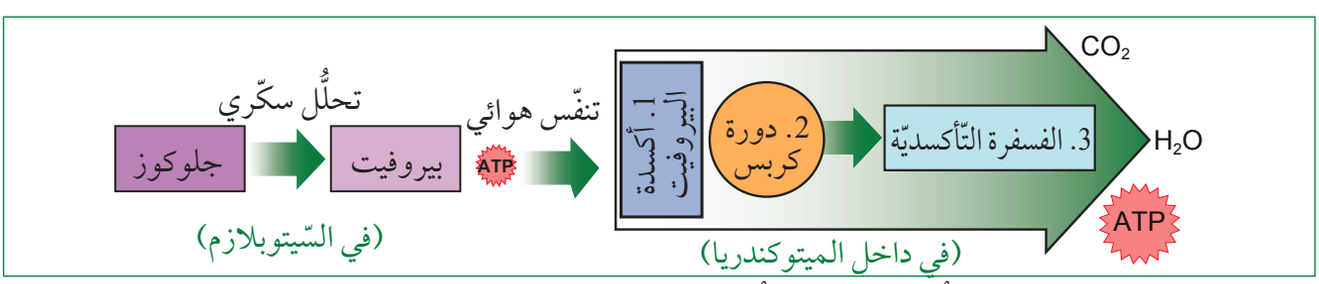
- لاحظ أن التحلُّل السُّكَّريّ لا يحتاج إلى الأكسجين.
- يستخدم التحلُّل السُّكَّريّ جزيئَيْ ATP نتجا من عمليات خلوية أخرى عن طريق استخدام ATP.
- ينتج التحلُّل السُّكَّريّ بشكل نهائي لـ 2ATP لكل جُزيء جلوكوز.
- منتجات التحلُّل السُّكَّريّ: البيروفيت، NADH، و H^+ تُستخدَم في مداخل المراحل التالية من التنفُّس الخلوي.

الجدول 4-1 ملخّص لمدخلات التَّحلُّل السُّكَّريّ ونواتجه.

مدخلات			النواتج			
جلوكوز 1	2 ATP	فوسفات 2	بيروفيت 2	4 ATP	2 NADH	2 H+
	ATP ATP	P_i P_i		ATP ATP ATP ATP	NADH NADH	H^+ H^+

عند توافر الأكسجين بكمية كافية في الخلية ينتقل البيروفيت لداخل الميتوكندريا وتحدث المراحل الآتية: **(الشَّكل 4-13)**

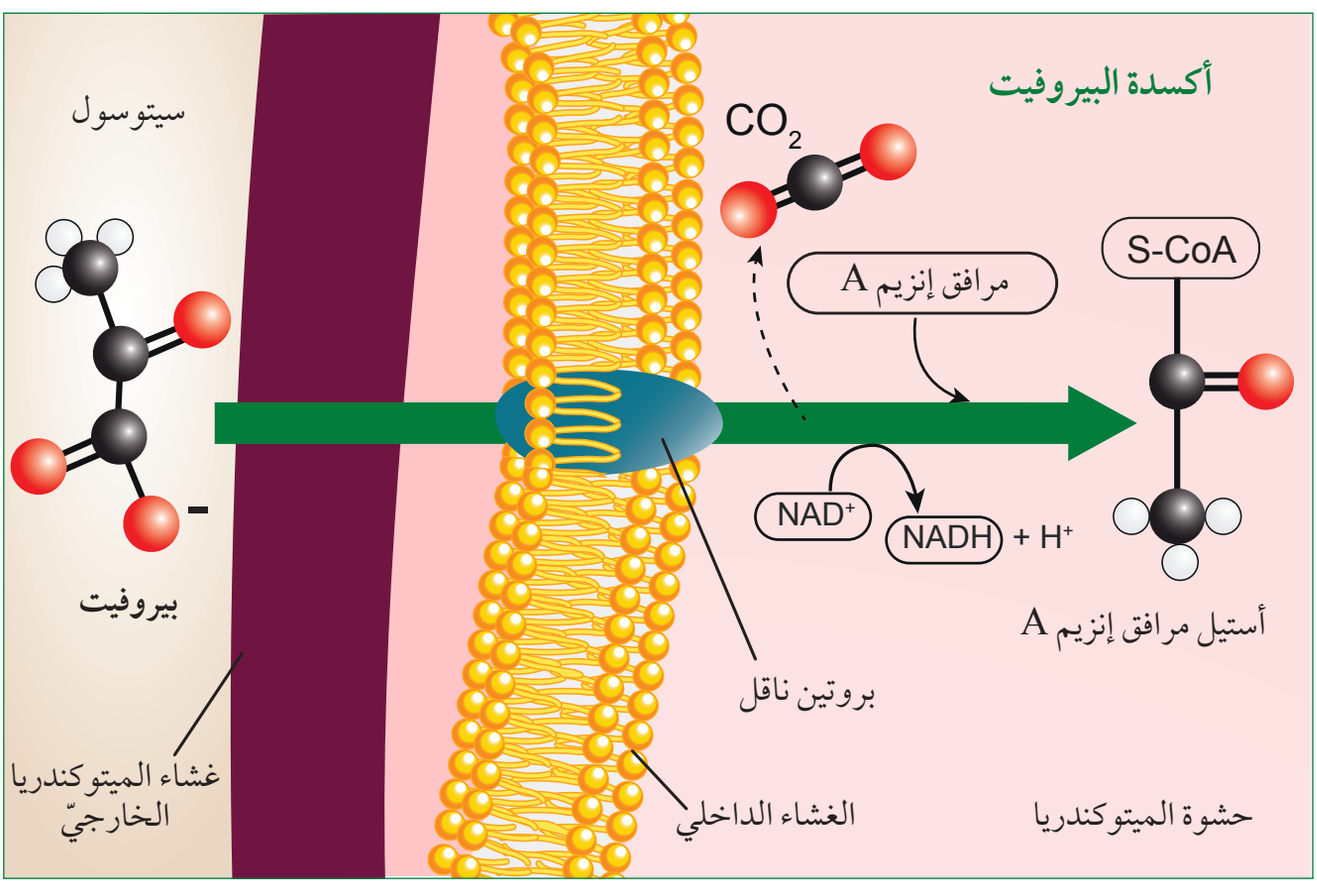
1. **أكسدة البيروفيت Pyruvate oxidation**، يتأكسد جزيء البيروفيت داخل الميتوكندريا ويتحوّل إلى أسيتيل مرافق نزيم – A.
2. **دورة كربس Krebs cycle**، تتمّ عمليات أكسدة وإزالة كربون متناوبة للمركّب الكربوني ينطلق خلالها المزيد من الطاقة.
3. **الفسفرة التأكسديّة Oxidative phosphorylation**، يتم خلالها إنتاج المزيد من مركّبات الطاقة ATP باستخدام الطاقة المختزنة في النواقل الهيدروجينية NADH، و$FADH_2$.



الشكل 4-13 مخطط تدفقي للتحلُّل السُّكَّريّ والتنفُّس الهوائيّ في الخلايا الحقيقيّة النواة.

المرحلة 1: أكسدة البيروفيت

في حال توافر الأكسجين، تنتقل جزيئات البيروفيت الناتجة عن التحلّل السكري إلى حشوة الميتوكندريا «عبر بروتين ناقل في الغشاء الداخلي» وتحدث التغيرات التالية: تُزال منه مجموعة كربونيل بانطلاق CO_2. يحدث هذا عن طريق إزالة الهيدروجين Dehydrogenation واختزال NAD^+ إلى NADH. أما مجموعة أستيل ($CH_3\ CO$) الباقية فترتبط بمرافق الإنزيم A، لتكوّن جُزيء من **أستيل - مرافق الإنزيم A (Acetyl - coenzyme A)** (**الشّكل 4-14**). وبما أن كل جلوكوز ينتج جُزيئَين من البيروفيت، فإن هذا التفاعل ينتج 2NADH و $2CO_2$ و2 أستيل مرافق الإنزيم A.



الشكل 4-14 يظهر جُزيء مفرد من البيروفيت يدخل حشوة الميتوكندريا لإنتاج أستيل – مرافق إنزيم A و NADH، وتُطلِق العمليّة CO_2.

يمكن للخلايا استخدام أستيل – مرافق إنزيم A بطرائق عدّة. لكنّ وظيفته الرّئيسة هي تسليم مجموعة أستيل إلى الخطوة اللاحقة من التنفُّس الخلوي. إذا كانت مستويات الكربوهيدرات منخفضة، فإنّ إنتاج أستيل – مرافق إنزيم A يرتبط بدلًا من ذلك بأكسدة الأحماض الدهنيّة أو الأحماض الأمينيّة. وهذا هو واحد من الأسباب في أنّ تقليل الكربوهيدرات في غذائك يساعدك على فقدان الوزن، ولا سيّما الدهون الزّائدة.

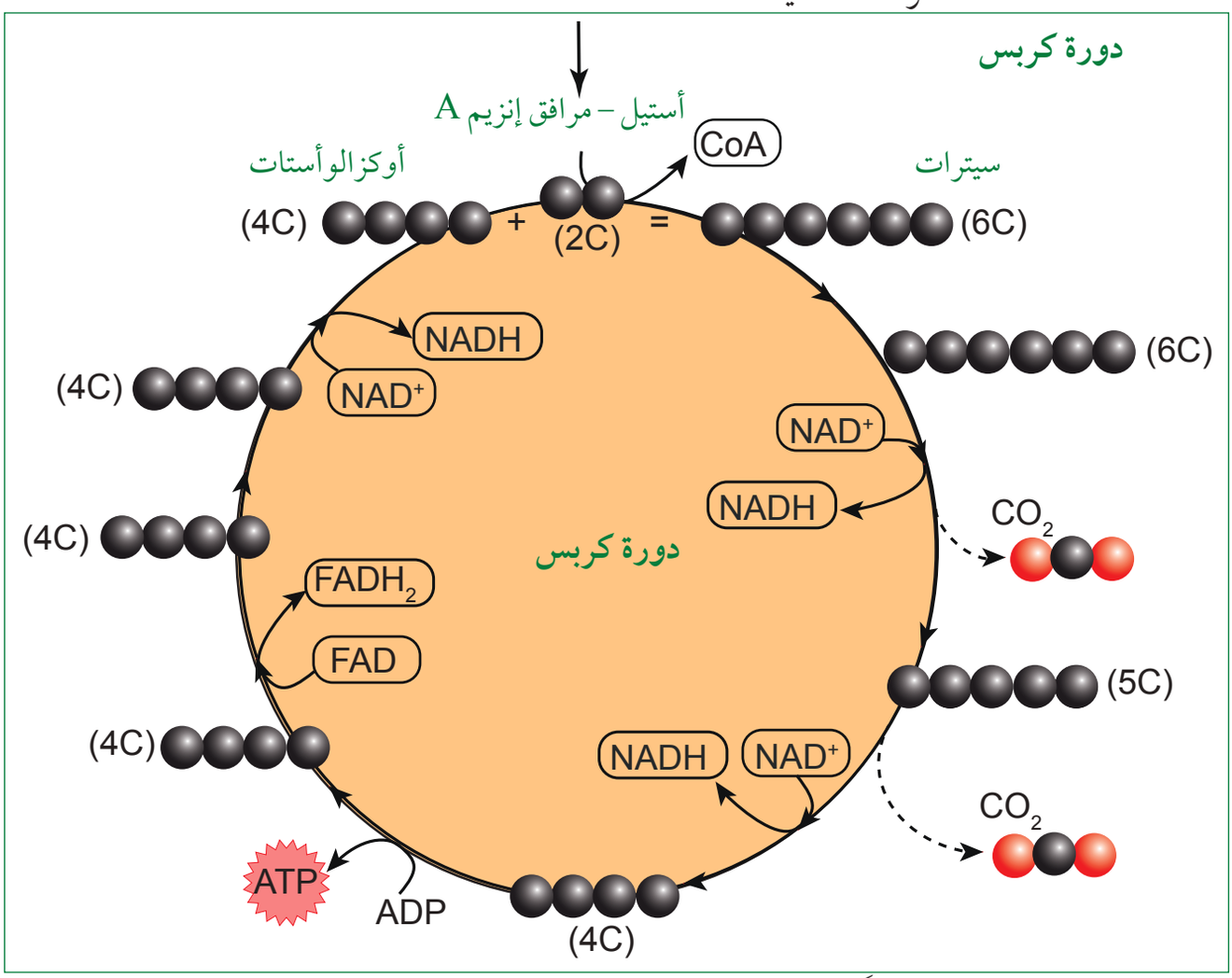
المرحلة 2: دورة كربس

تتكوّن دورة كربس (نسبةً إلى هانس كربس) من ثمانية تفاعلات يتحوّل فيها أستيل – مرافق إنزيم A إلى **سيترات Citrate** تتكسّر إلى **أوكزالوأستات Oxaloacetate**. وعلى العكس من التحلُّل السُّكَّريّ، فإن مفتاح فهم دورة كربس هو أنّها حلقة مُغلقة. في كل مرّة تتكرّر فيها الدورة، ترتبط ذرّتا كربون جديدتان من أستيل – مرافق إنزيم A، مع **أوكزالوأستات Oxaloacetate** في الدورة، وتغادران الدورة على شكل جُزيئين من ثاني أكسيد الكربون. في دورة كربس، هناك مرافقا إنزيم اثنان مُحتملان، هما: ثنائيّ نيوكليوتيد الأدينين وأميد النّيكوتين NAD، و**ثنائيّ نيوكليوتيد الفلافين والأدينين (FAD)**. في الواقع، تتكرّر الدورة مرّتين، لانه يَنتج اثنان من البيروفيت لكلّ انقسام في جُزيء الجلوكوز (**الشكل 4-15**). وتعيد الخطوة الأخيرة من المسار تكوين المرُكّب المُستخدم في الخطوة الأولى. والنواتج هي:

a. جُزيء واحد ATP لكل دورة (المجموع 2).

b. جُزيئان من ثاني أكسيد الكربون لكل دورة (المجموع 4).

c. 3NADH، و $FADH_2$ 1، لكل دورة (المجموع 8 جُزيئات ناقلة) تنقل الطاقة بعدها إلى المرحلة الثالثة، المُسمّاة الفسفرة التأكسديّة.



الشكل 4-15 تدوّر دورة كربس مُركّبات الكربون مرّتين، لتطلق $4\ CO_2$، 2 ATP، 6 NADH و $2\ FADH_2$

a3-4 دراسة دورة كربس

سؤال الاستقصاء	ما أفضل طريقة لدراسة العمليّات المُعقّدة؟
الموادّ المطلوبة	قلم رصاص، أقلام ملوّنة، بطاقات مراجعة ورقيّة A6 أو قوالب رقميّة.

الخطوات

1. مراعاة للقيود الزمنيّة للحصّة الصفّيّة، سيحدّد معلّمك إن كان عليك استخدام ورقة، أو بطاقة مراجعة رقميّة، لإكمال مشروع بطاقة مراجعة دورة كربس.
2. ستساعدك الإرشادات الثّمانية الآتية على تحقيق أفضل النتائج في كلّ من التعلّم، والنقاط الممنوحة للمشروع:
   a. بطاقات المراجعة شخصيّة تمامًا، وبخاصة إذا عالج الطلّاب المعلومات بطرائق فريدة. لذا فإنّ المشروع ليس عمل فريق أو مجموعة.
   b. استخدم كلًّا من الصور والكلمات من أجل أفضل استذكار. يمكن أن تكون الصّور مرسومة باليد أو منسوخَة ومُلصَقة.
   c. أضف تقنيات الاستذكار، وهي عبارات بسيطة وفرديّة، واختصارات خاصّة بك، لتكوين ذكريات ترابطيّة.
   d. يُخصّص سؤال أو مفهوم واحد لكلّ بطاقة لبناء التعرّف والاستذكار.
   e. كن عميقًا، لكن لا تجمع المصطلحات أو المفاهيم التي توهمك بالكفاءة. فإما تتذكّرها أو لا تتذكّرها.
   f. راجع في كلّ جلسة دراسة وجهًا واحدًا للبطاقات جميعها. ثم اقلبها وادرس الوجه الثاني لها جميعًا. اخلط البطاقات، وادرسها للمرّة الثالثة؛ التكرار هو المفتاح.
   g. في أثناء دراستك، قل الإجابات المسموح بها جميعها.
   h. دع شخصًا آخر يختبرك.
3. بعد الانتهاء، حاول تبادل البطاقات مع زميل، أو طالبٍ من صف آخر. قد تتعلم حقيقة جديدة أو تجد شيئًا قد فقدته.

أسئلة تلخيص

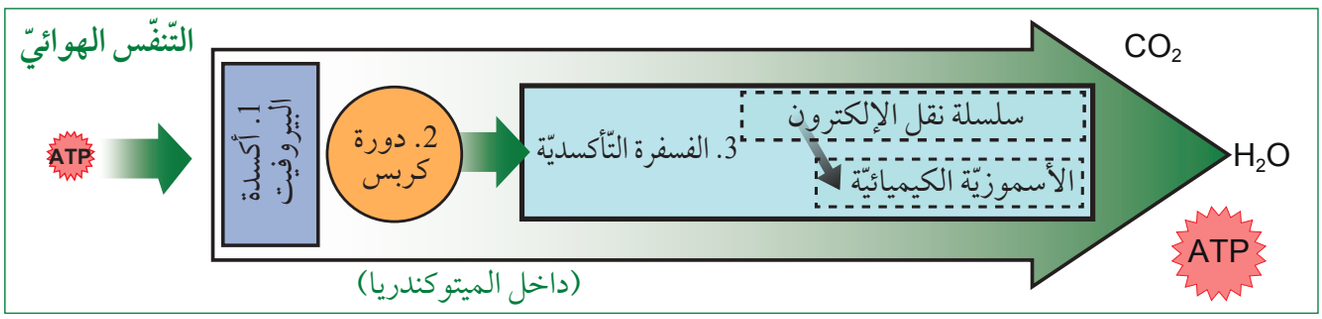
a. هل دورة كربس هي دورة حمض الستريك نفسها، أم أنّهما مختلفتان؟ استخدم الإنترنت وأمثلة لتوضّح إجابتك.

b. أين تحدث تفاعلات دورة كربس؟

c. أنشئ جدولًا بالموادّ الأوّليّة، ومُرافِقات الإنزيم المهمّة، والموادّ المنطلقة، والنواتج النهائيّة لهذه الدورة.

المرحلة 3: الفسفرة التأكسديّة

الفسفرة التأكسديّة Oxidative phosphorylation هي العملية النهائية في تكوين ATP من ADP والفوسفات. تتحرَّر الطاقة اللازمة من أكسدة NADH و$FADH_2$ على الغشاء الداخلي للميتوكندريا. تضخ تلك الطاقة أيونات H^+ إلى الحيِّز بين الغشائي، لتعود تلك الأيونات عبر انزيم بناء ATP وتسيّر بناء ATP (**الشكل 4-16**).

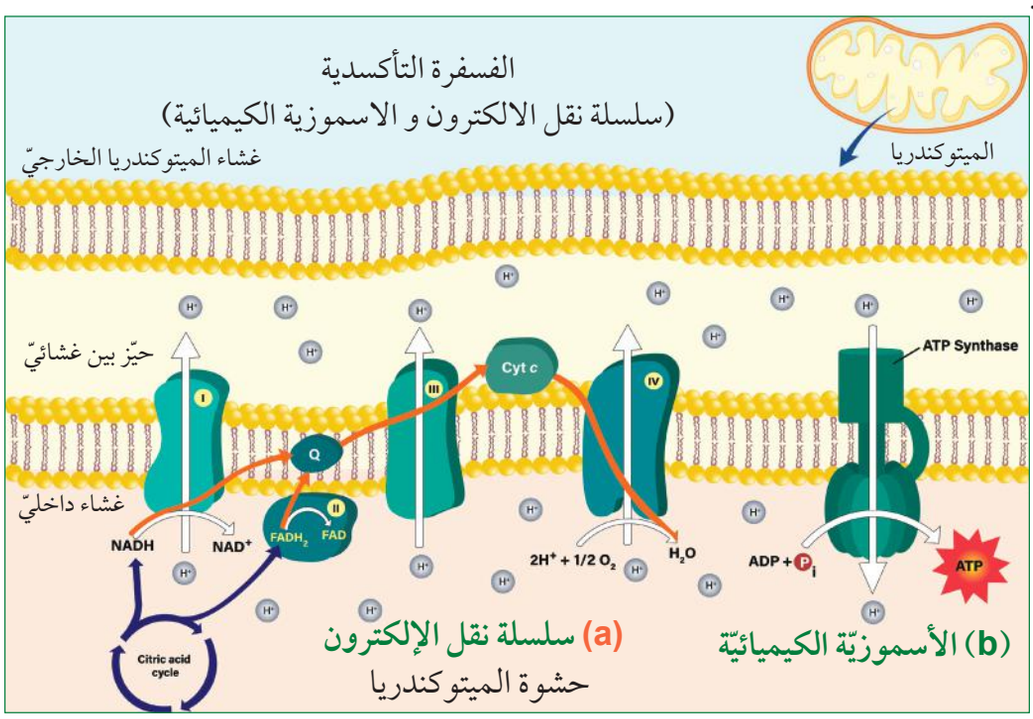


الشكل 4-16 تتكوّن المرحلة الثالثة للتنفُّس الهوائيّ من سلسلة نقل الإلكترون والأسموزيّة الكيميائيّة التي تتبعها.

تحدث الفسفرة التأكسدية في خطوتين:

الخطوة الأولى هي **سلسلة نقل الإلكترون Electron transport chain** حيث تتفاعل ناقلات الهيدروجين NADH و$FADH_2$ مع عدة بروتينات، لتضخّ أيونات الهيدروجين من الحشوة إلى الحيِّز بين الغشائي. يجعل هذا الضخ الحيِّز بين الغشائي حمضيًا، ويُنشىء فرق تركيز لأيونات H^+ عبر الغشاء الداخلي.

الخطوة الثانية هي **الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis** التي ترجع بها أيونات H^+ عبر معقد انزيم بناء ATP. تستخدم الطاقة المتولِّدة من حركة أيونات H^+ في ربط ADP بفوسفات لتكوين ATP (**الشكل 4-17**).



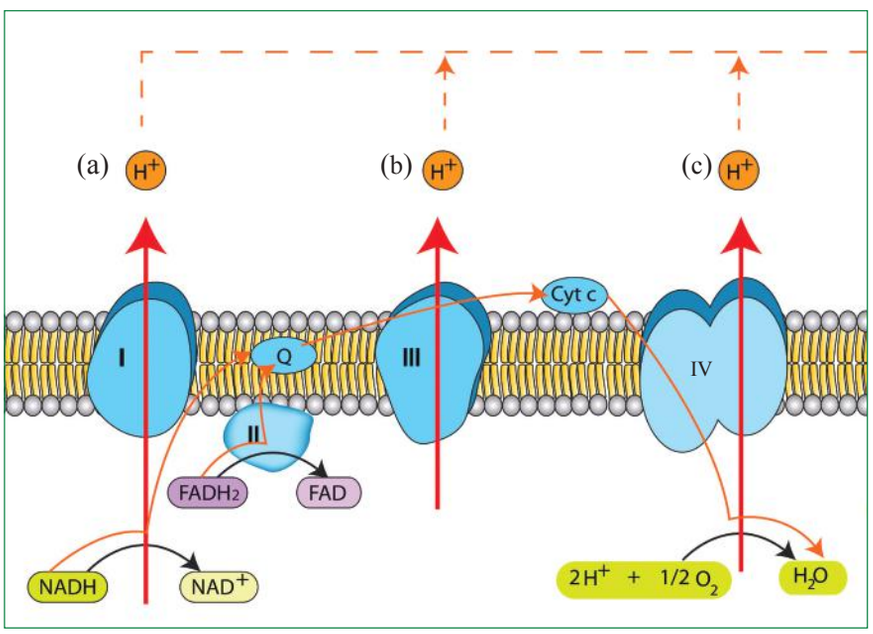
الشكل 4-17 موقع (a) سلسلة نقل الإلكترون، و(b) الأسموزيّة الكيميائيّة.

سلسلة نقل الإلكترون

تستخدم سلسلة نقل الإلكترون نواقل إلكترونات سلسلة من أربعة بروتينات متخصّصة على الغشاء الداخلي للميتوكندريا، كي تكوِّن الماء من الأكسجين الجُزيئي. يدخل NADH و$FADH_2$ الناتجان من التحلُّل السكَّري ودورة كربس، ثم يعودان إلى الحشوة بشكل NAD^+ و FAD^+ . أما النواتج الرئيسة لسلسلة نقل الالكترون فتكون على النحو الآتي:

1. تنتقل أيونات (H^+) بشكل نشط عبر الغشاء الداخلي مُنشِئة فرق تركيز (**الشكل 4-18**).
2. تنتقل الإلكترونات عبر الغشاء بواسطة نواقل تذوب في الدهون، لتدمج $2H^+$ مع أكسجين جُزيئي فتنتج الماء، وتطلق الطاقة التي تسيّر النقل النشط.

تتقدّم سلسلة نقل الإلكترون عبر أربعة مُعقَّدات من الإنزيمات الخاصة (I, II, III, IV) موجودة في الغشاء الداخلي، وإنزيم خامس سيتوكروم متصل قليلًا في الحيِّز بين الغشائي (**الشكل 4-18**).



الشكل 4-18 سلسلة نقل الإلكترون مع مرافقات إنزيم ناقلة.

a. يؤكسد مُعقَّد إنزيم NADH I إلى NAD^+، ويرسل H^+ إلى الحيِّز بين الغشائي، وإلكترونين على النواقل (Q) التي تذوب في الدهون.

b. يقوم مُعقَّدا الإنزيم II و III بالتوازي بأكسدة $FADH_2$ إلى FAD^+، وإرسال H^+ إلى الحيِّز بين الغشائي، وإضافة إلكترونات إلى تلك التي على النواقل (Q) التي تذوب في الدهون.

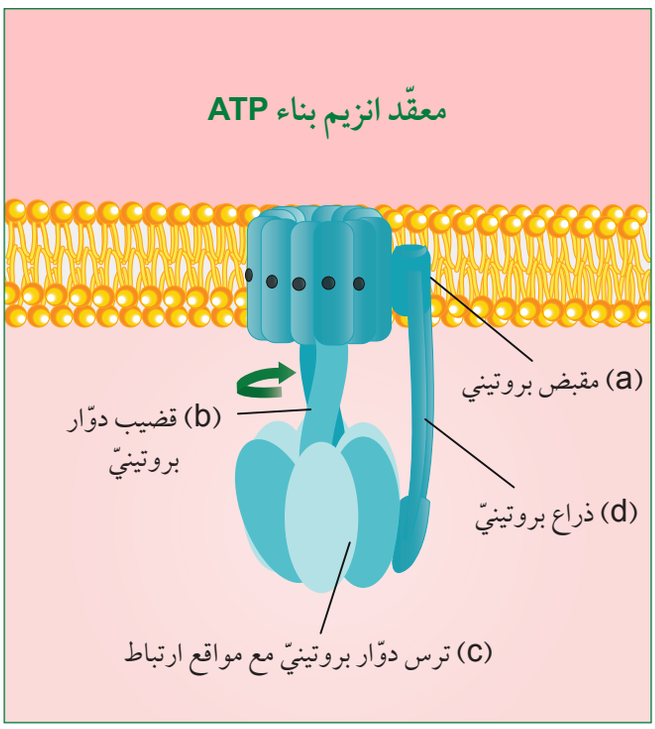
c. يقبل مُعقَّد الإنزيم IV الالكترونات في سيتوكروم، ليدمج H^+ مع أكسجين كي ينتج الماء ويحرِّر الطاقة. ويجري نقل المزيد من H^+ بشكل نشط إلى الحيِّز بين الغشائي.

الأسموزيّة الكيميائيّة

تنقل الأسموزيّة الكيميائيّة أيونات الهيدروجين (H^+) عبر أغشية شبه مُنفِذة خلال معقّد بروتينيّ خاصّ. تذكّر من رسم الميتوكوندريا أنّ معقد انزيم بناء ATP منغرس في طيّات الأعراف، وأنّ ADP يُعيد تكوين ATP على أغشية الميتوكوندريا الداخليّة.

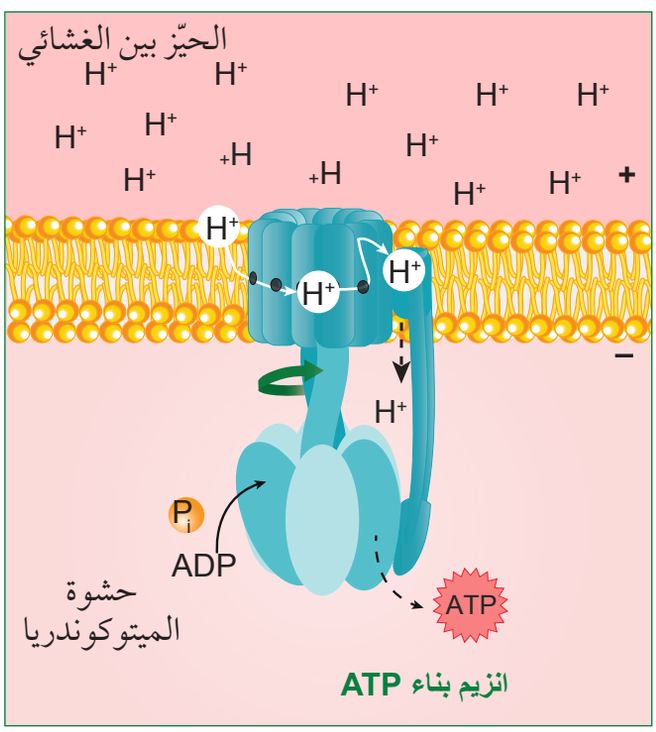
على عكس البروتينات الغشائيّة الأخرى، لا تشكّل معقدات انزيم بناء ATP قنوات بروتينية أو ناقلة. بل يستخدم انزيم بناء ATP كلا العملَين الكيميائيّ والميكانيكيّ معًا، لتحويل طاقة البروتونات (H^+) مرّة أخرى إلى روابط فوسفات – أكسجين في جُزيئات ATP. يحتوي انزيم بناء ATP على جزء دوّار، يعمل تمامًا مثل آلة على نطاق جُزيئيّ (**الشَّكل 4-19**).

تتضمّن معقدات انزيم بناء ATP أربعة بوليمرات بروتينيّة مختلفة، تحرّك ماديًّا تدفّقًا من البروتونات، عبر أجزاء تبدو مثل مقبض الباب (**الشَّكل 4-19a**)، تدور حول قضيب دوّار (**الشَّكل 4-19b**)، متّصل بتُرْس دوّار (**الشَّكل 4-19c**)، وجميعها مُتَّصلة بذراع ثابت (**الشَّكل 4-19d**).



الشكل 4-19 انزيم بناء ATP

يكفي تحرُّك ثلاثة بروتونات، أو أربعة، خلال معقّد بناء ATP، لتحويل جُزيء واحد من ADP، وفوسفات غير عضويّ (P_i) إلى جُزيء واحد من ATP. أما مصدر البروتونات، فهو الجُزيئات الناقلة للإلكترونات NADH، و$FADH_2$، وهي مُرافِقات إنزيم خاصّة في سلسلة نقل الالكترون (**شكل 4-20**).

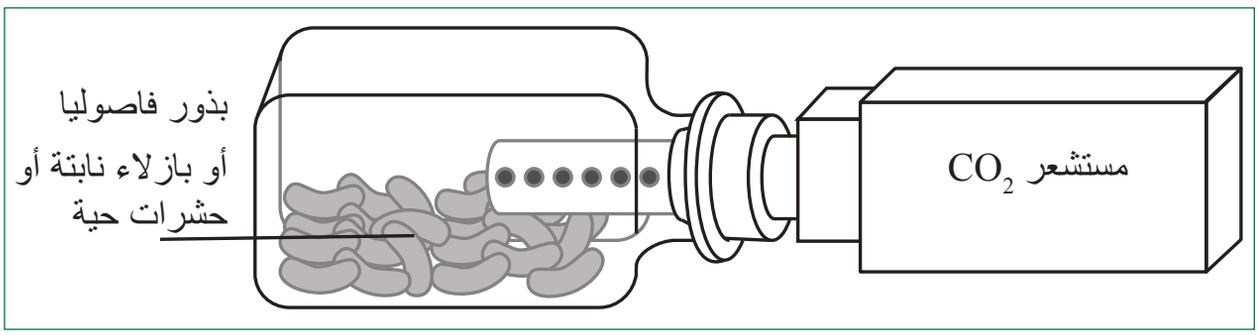


الشكل 4-20 يستخدم انزيم بناء ATP فرق التركيز الكهروكيميائي ليخزّن الطاقة الكيميائيّة في روابط الفوسفات.

b3-4 التنفُّس الهوائيّ

سؤال الاستقصاء	كيف نستطيع ملاحظة التنفُّس في الحيوانات والنباتات؟
الموادّ المطلوبة	مستشعر غاز ثاني أكسيد الكربون و/ أو مستشعر غاز الأكسجين، مسجِّل بيانات، ميزان (0.01g)، قارورة سعة 250mL، حبوب فاصوليا أو فول، بذور فاصوليا أو بازلّاء نابتة (50)، حشرات حية من متجر حشرات.

الخطوات



1. انتقِ 50 بذرة نابتة. جفِّفها بمنديل ورقي وسجِّل وزنها.
2. ضع البذور في القارورة العيّنة مع المستشعر، ومدِّدها أفقيًّا على الطاولة، كما هو مبيّن.
3. أعدّ جامع البيانات ليقيس CO_2 ppm كل 15 ثانية. انتظر دقيقة، ثم ابدأ بجمع البيانات، سجِّل البيانات كل 5 دقائق.
4. كرّر التجربة على بذور جافة في سبات. وإذا توفّر لديك الوقت يمكنك تكرار التجربة مستخدمًا حشرات حية.
5. وإذا توافرت التجهيزات اللازمة، يمكنك تكرار التجارب نفسها مع مستشعر غاز الأكسجين.

أسئلة تلخيص

a. وضّح الفرق في البيانات بين البذور النابتة والبذور السابقة. وضّح أية فروق مع الحشرات الحية.

b. لخّص كيفية إنتاج ATP، وصف أهميّته للبذور النابتة.

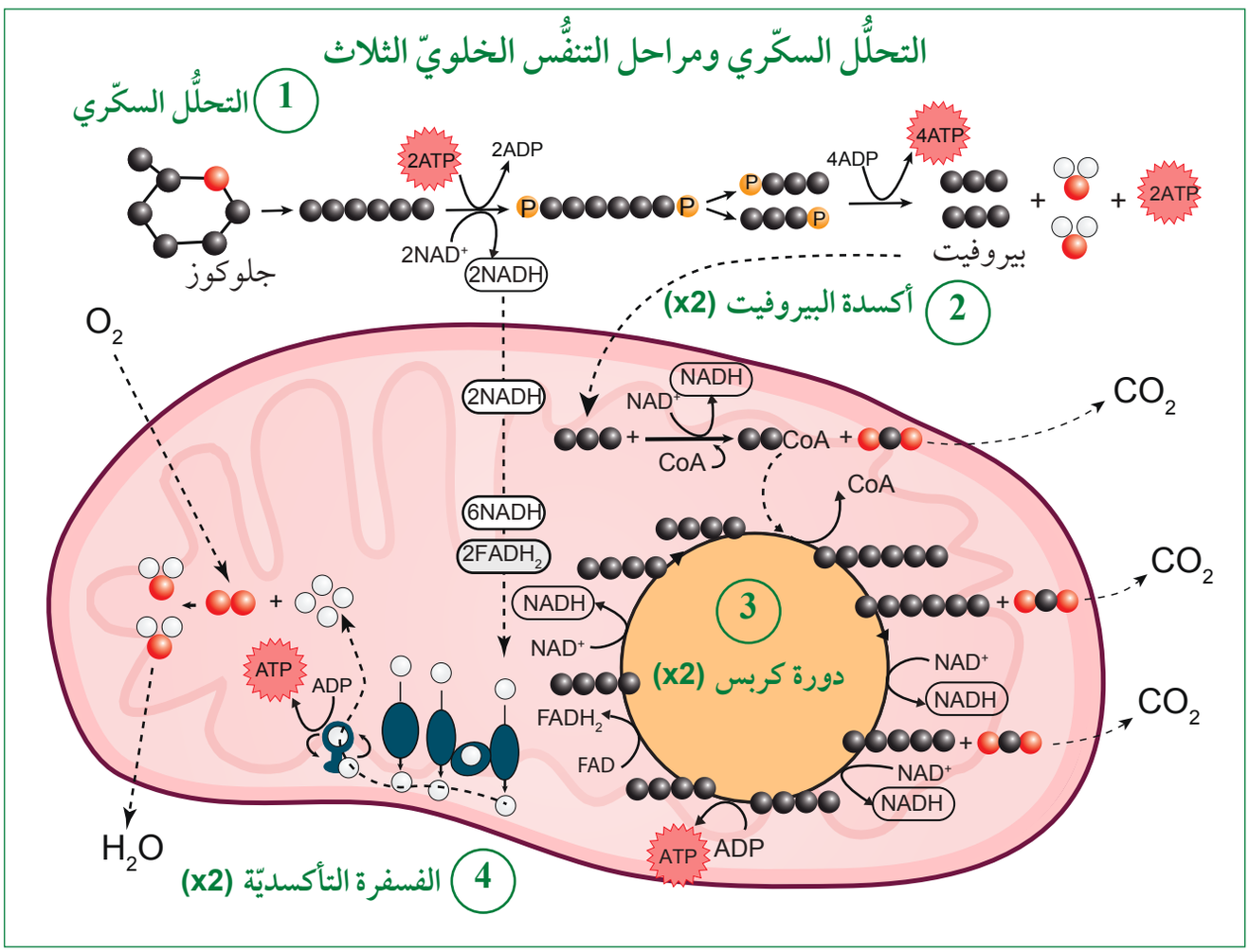
c. وضّح لماذا يتم إنتاج CO_2 أثناء التنفُّس الخلوي.

d. سمِّ المراحل التي تطلق جُزيئات ثاني أكسيد الكربون، وحدّد عددها.

e. قارن بيانات CO_2 و O_2 في أوقات متشابهة.

تلخيص التحلُّل السُّكَّريّ والتنفُّس الهوائيّ

ركَّزنا في هذا الدَّرس على التحلُّل السُّكَّريّ والتنفُّس الهوائيّ. يمثِّل النّموذج أدناه (**الشكل 4-21**) العمليّة الكاملة. تبيّن الخطوط المنقّطة أين تُضاف الموادّ على امتداد المسار، وأين تُطلق.



الشكل 4-21 ملخّص عمليات التنفُّس الخلوي.

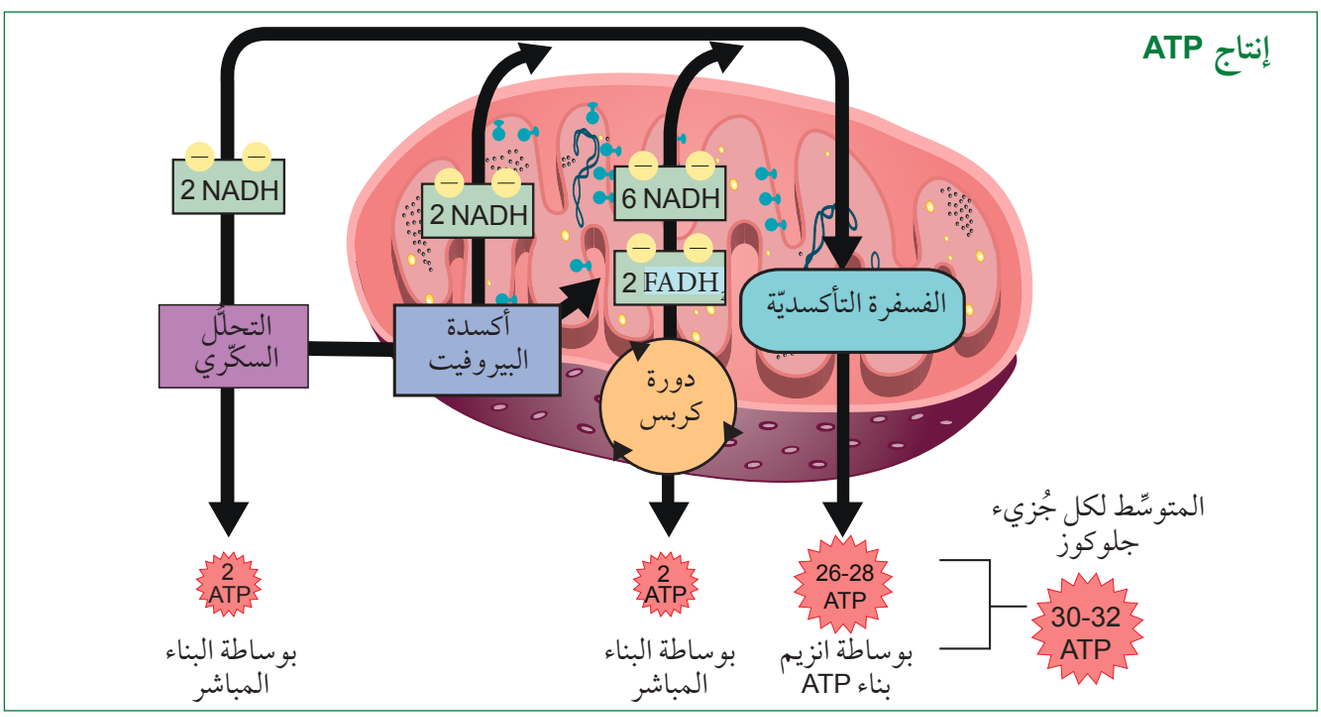
1. يحدث التحلُّل السكَّري في السيتوسول، فينتج 2ATP، وينتج أيضًا جزيئين (2) من البيروفيت و 2NADH التي تعبر إلى داخل الميتوكندريا للاشتراك في المراحل الثلاث التالية للتنفُّس الخلوي.
2. تجري أكسدة البيروفيت إلى أستيل مرافق الإنزيم A (Acetyl CoA).
3. ينقل Acetyl CoA مجموعة الأستيل إلى الأوكزالوأستات Oxaloacetate في دورة كربس، فتطلق $2CO_2$ و1ATP وناقلات الإلكترونات 3NADH و$FADH_2$ لكل دورة
4. تستخدِم الفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation NADH و $FADH_2$ سلسلة نقل الالكترون Electron transport chain (ETC)؛ فتنتج الماء من الأكسجين وH^+ . يبني معقّد انزيم بناء ATP من ADP وفوسفات بواسطة الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis .

موازنة معادلة التَّنفُّس الخلويّ

تعتمد كمّيّة ATP الدقيقة الناتجة لكل جلوكوز على عدّة عوامل. يحدث تسرّب بعض NADH الذي لا يدخل الميتوكندريا من التحلُّل السكَّري. NADH و $FADH_2$ لهما معدلات إنتاج ATP مختلفة، ويعمل المعدَّل الكلي لإنتاج ATP على الموازنة بين الاثنين. يظهر **الشكل 4-22 والجدول 4-2** النواتج والمواد المتفاعلة الرئيسة في كل مرحلة. ومع أن الماء لا يظهر فيهما، إلا أنه ناتج أو متفاعل في كل المراحل الأربع.

الجدول 4-2 ملخّص نواتج التنفُّس الهوائيّ.

	ATP	NADH	$FADH_2$	CO_2
التحلُّل السكّري	2	2		
أكسدة البيروفيت		2		2
دورة كربس	2	6	2	4
الفسفرة التأكسدية	26 - 28			



الشكل 4-22 كمية ATP لكلّ جُزيء من الجلوكوز في أثناء التنفُّس الهوائيّ.

سوف تكون الكمية النظرية المنتجة 38ATP لكل جلوكوز. إذا لم تحدث أي خسارة خلال العملية. لكن كيف نعلِّل نقص ATP 8-6؟ لقد بيّنت مقارناتنا السابقة توفر 688Kcal/mol من الطاقة من كل جلوكوز و 219-233 Kcal /mol من الطاقة المخزنة في ATP. ليست كفاءة الكائنات الحية 100%. ذلك أن كثيرًا من العمليات الخلوية المعقَّدة تتضمّن مراحل يحدث فيها تشتّت كمّيات صغيرة من الطاقة.

تقويم الدّرس 4-3

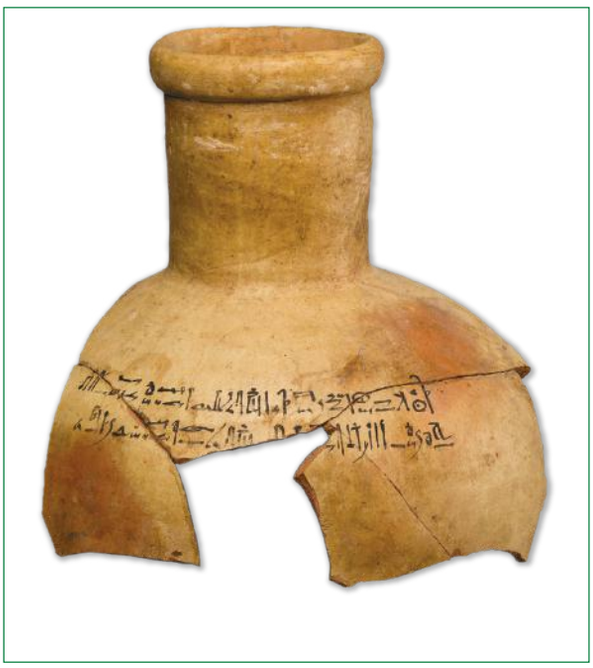
1. اذكر تكيّفين يجب أن تمتلكهما الخليَّة للقيام بالتنفُّس الهوائيّ.
2. استخدم التعريفات للتمييز بين المفاهيم الآتية:
   a. التنفُّس الهوائيّ، والتنفُّس اللاهوائيّ.
   b. التنفُّس الخلويّ، والتنفس الخارجي.
   c. أكسدة البروفيت، والفسفرة التأكسديّة.
   d. البناء الكيميائيّ، والأسموزيّة الكيميائيّة.
3. رَتِّب الأحداث الآتية ترتيبًا صحيحًا، واكتب جُزيء البداية، والموقع الدقيق الذي يتمّ فيه كلّ حدث:
   a. أكسدة البيروفيت.
   b. التحلُّل السُّكَّريّ.
   c. دورة كربس.
4. لِمَ تتكرّر دورة كربس مرّتين لكلّ جُزيء جلوكوز؟
5. كيف نعرف ان انزيم بناء ATP يتكوّن من بروتينات مختلفة؟ لمعرفة ذلك، ابحث في الإنترنت.
6. استعن بمقدّمة الدرس وأشكاله لرسم انزيم بناء ATP، ووضّح وظيفته.
7. اختر من الجمل **1-9** ما يناسب كل عملية من العمليات الأربع الآتية:
   a. التحلُّل السُّكَّريّ.
   b. أكسدة البيروفيت.
   c. دورة كربس.
   d. الفسفرة التّأكسديّة.

1- يربط أيونات الهيدروجين (H^+) بالأكسجين.
2- حيث يطلق ثاني أكسيد الكربون.
3- يحدث في الميتوكندريا.
4- انزيم بناء ATP.
5- يحفّز PFK-1 التفاعل.
6- يكسر مركّبات الكربون.
7- يتحوّل FAD إلى $FADH_2$.
8- يرسل NADH إلى سلسلة نقل الإلكترون.
9- يُطلِق جُزيئات ماء.

الدّرس 4-4
التّنفّس اللاهوائيّ
Anaerobic Respiration

يتفق معظم الناس على أن مذاق الخبز الطازج ورائحته أفضل من الخبز المعبّأ بأكياس! تطلق خميرة الخبز فقاقيع غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) التي تعطي الخبز قوامه. وتُعزى رائحة الخبز إلى تبخُّر الإيثانول الناتج من الخميرة. أما أصل التخمّر فيعود إلى حضارة مصر القديمة. ولا تزال الجرار التي اكتُشفت تحتوي على أغذية وسوائل جرى تخمّرها أوحفظها. (**الشكل 4-23**).

يُعدّ الخبز نعمة إلهية في العديد من تقاليد الشعوب وتراثها. وهناك بالتحديد تقليد لا يزال يلاحظ، هو الآتي: أنه عند سقوط قطعة خبز سهوًا على الأرض، تُلتقط وتُقبّل قبل تناولها. ويُعدّ خَبْز الخُبز الطازج في المنزل تقليدًا آخر يقدّره أفراد العائلة.



الشكل 4-23 جرّة مصرية قديمة عليها أسماء محتوياتها .

مخرجات التّعلُّم

B1108.1 يشرح كيف تختلف النواتج والطاقة الناتجة من التنفس اللاهوائي عن تلك الناتجة من التنفس الهوائي.

B1108.2 يصف العوز الأكسجيني نتيجة تراكم حمض اللاكتيك في العضلات أثناء التنفس اللاهوائي، ويفسر لماذا يجب إزالة حمض اللاكتيك بمجرد انتهاء التمرين.

المفردات

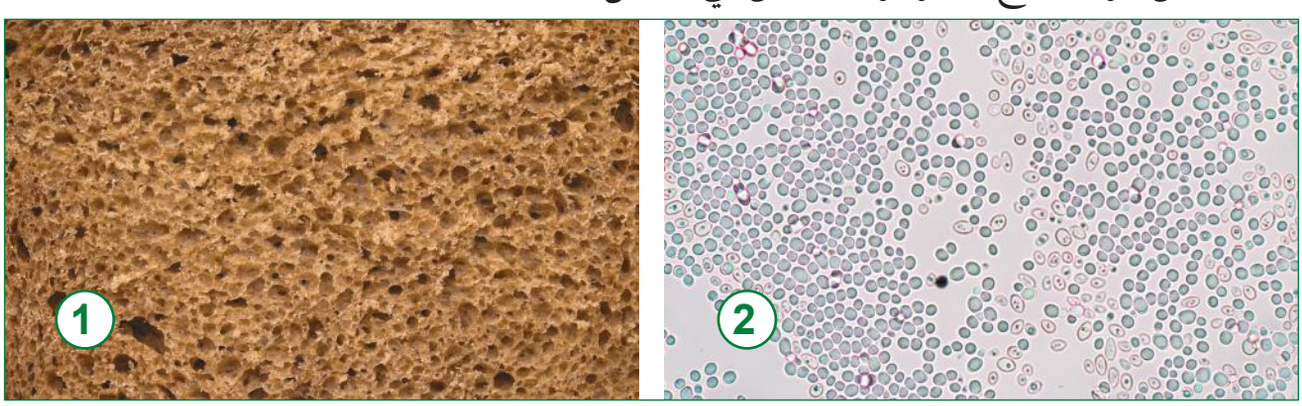
Anaerobe	لا هوائي التنفُّس
Facultative anaerobe	كائن لا هوائي التنفُّس اختياري
Lactate	اللاكتات
Lactic acid	حمض اللاكتيك
Gluconeogenesis	استحداث الجلوكوز

التنفس اللاهوائي الخلوي

يتضمّن التنفس اللاهوائي سلسلة من التفاعلات التي تُنتج ATP من دون الحاجة إلى أكسجين من مصدر خارجي. والتخمّر نوع واحد من التنفس اللاهوائي. هناك كائنات حية بسيطة تُسمّى **لاهوائية التنفُّس Anaerobes**، تستخدم التخمّر لتوفير كل احتياجاتها من الطاقة لعمليات الأيض.تستخدم بعض أنواع البكتيريا والبكتيريا القديمة، كالبكتيريا المنتجة للميثان والبكتيريا المحبّة للحرارة، شكلًا آخر من أشكال التنفُّس اللاهوائي، يُسمّى البناء الكيميائي.

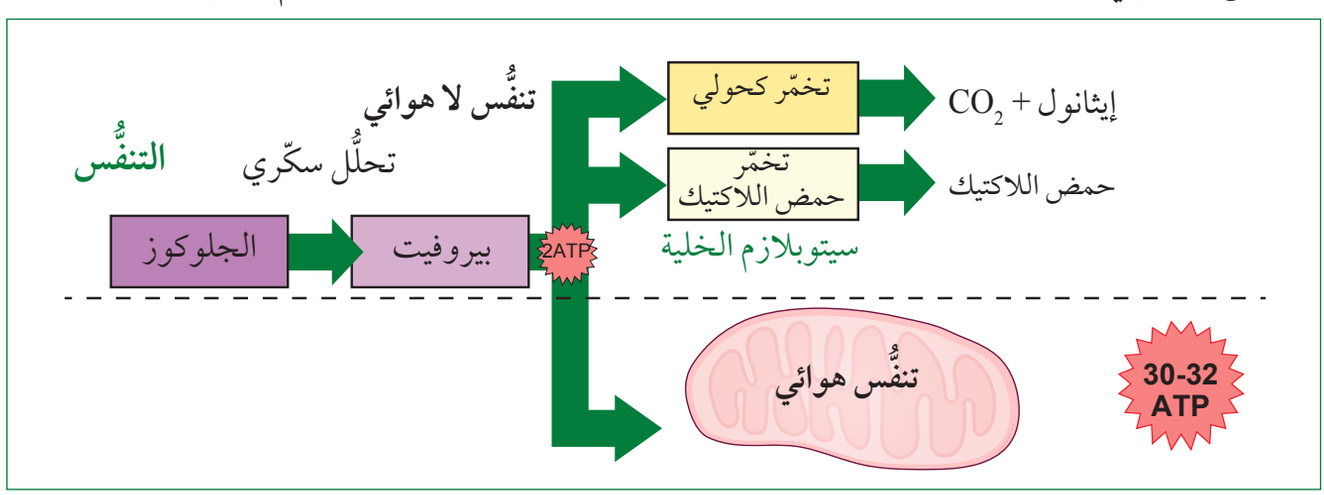
استخدام الخميرة في الخبز استخدام شائع للتخمّر.والخميرة نوع من الفطريات. وهناك أنواع كثيرة **لا هوائية اختيارية Facultive anaerobes** تستطيع أن تعيش بوجود الأكسجين أو بغيابه.

تُعتبر خميرة الخبز Saccharomyces crevisiae مثالًا جيدًا على تلك الكائنات، وهي تضاعف أعدادها كل 90 دقيقة عند درجة الحرارة 30-53 °C. ويسهم الحجم الكبير لغاز CO_2 المنطلق أثناءالتنفُّس هو ما يمنح الخبز قوامه المبيّن في **الشكل 4-24** .



الشكل 4-24 (1) قوام الخبز، (2) خميرة الخبز

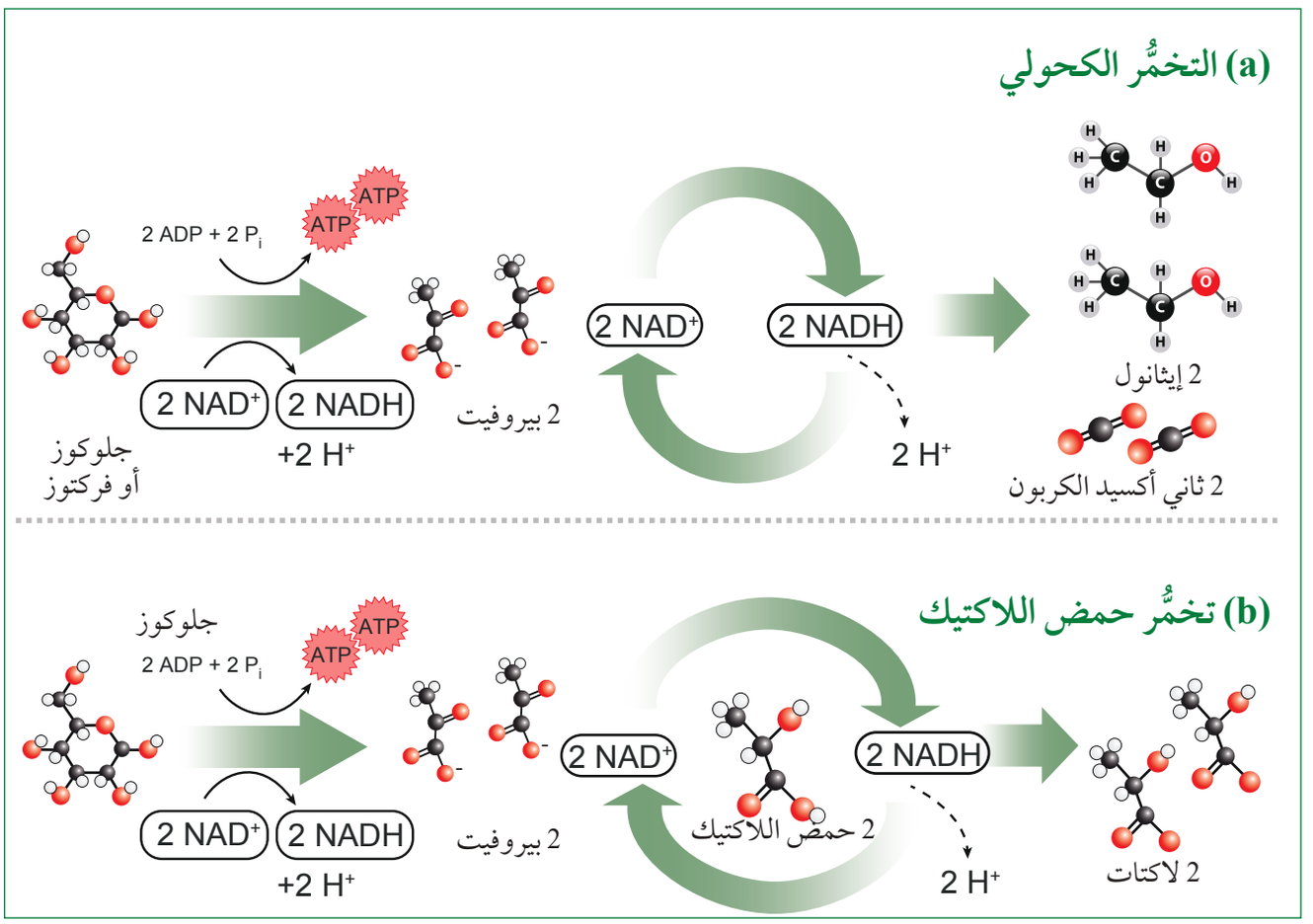
تستخدم الكائنات الحية الحقيقية النواة التنفُّس الهوائي؛ لأنه يُنتج كمية كبيرة من ATP (**الشكل 4-25**). وعند توفر القليل من الأكسجين في البيئة المحيطة، يمكن للخلايا الحقيقية النواة استخدام التنفس اللاهوائي. ولا ينتج التنفُّس اللاهوائي ATP إضافيًّا، بل يعيد تجديد مُرافِقات الإنزيم اللازمة للتحلُّل السكّري أو لدورة كربس. وهذه وظيفة يمكن أن يؤدّيها التخمُّر عند عدم توفر الأكسجين.



الشكل 4-25 مسارات إنتاج ATP، هي إما هوائية وإما لاهوائية

التخمُّر في البكتيريا والخميرة

تهدف عملية **التخمر Fermentation** إلى استمرار التحلُّل السكّري في الكائنات الحية التي لا يتوفّر لها أكسجين كافٍ، وإلى تجديد الجُزيئات الناقلة للإلكترونات. تذكّر أن عملية التخمُّر تتكوّن من خطوة واحدة، ويمكن أن تنتج منتجاً واحدًا من منتجين، هما الإيثانول، أو**اللاكتات Lactate** (**الشكل 4-26**).



الشكل 4-26 تستخدم البكتيريا والخمائر التخمُّر بوجه عام، لإنتاج (a) الإيثانول وثاني أكسيد الكربون، أو (b) حمض اللاكتيك.

1. ينتج كلا نوعي التخمُّر 2ATP و 2NADH وجُزيئي بيروفيت.
2. يتم إختزال NAD^+ الى $NADH.H^+$ في كلا نوعي التخمر.
3. يحوّل التخمُّر الكحولي جُزيئي البيروفيت إلى جُزيئين من الإيثانول وجُزيئين CO_2 لكل جُزيء جلوكوز.
4. يحوّل تخمّر حمض اللاكتيك جُزيئي البيروفيت إلى جُزيئين من اللاكتات. وينتج تخمّر حمض اللاكتيك أيضًا مادة وسيطة تُسمّى حمض اللاكتيك، ثم يتقدّم التفاعل في اتجاهات مختلفة، بما فيها إعادة انتاج الجلوكوز. التخمُّر الكحولي تفاعل غير معكوس.

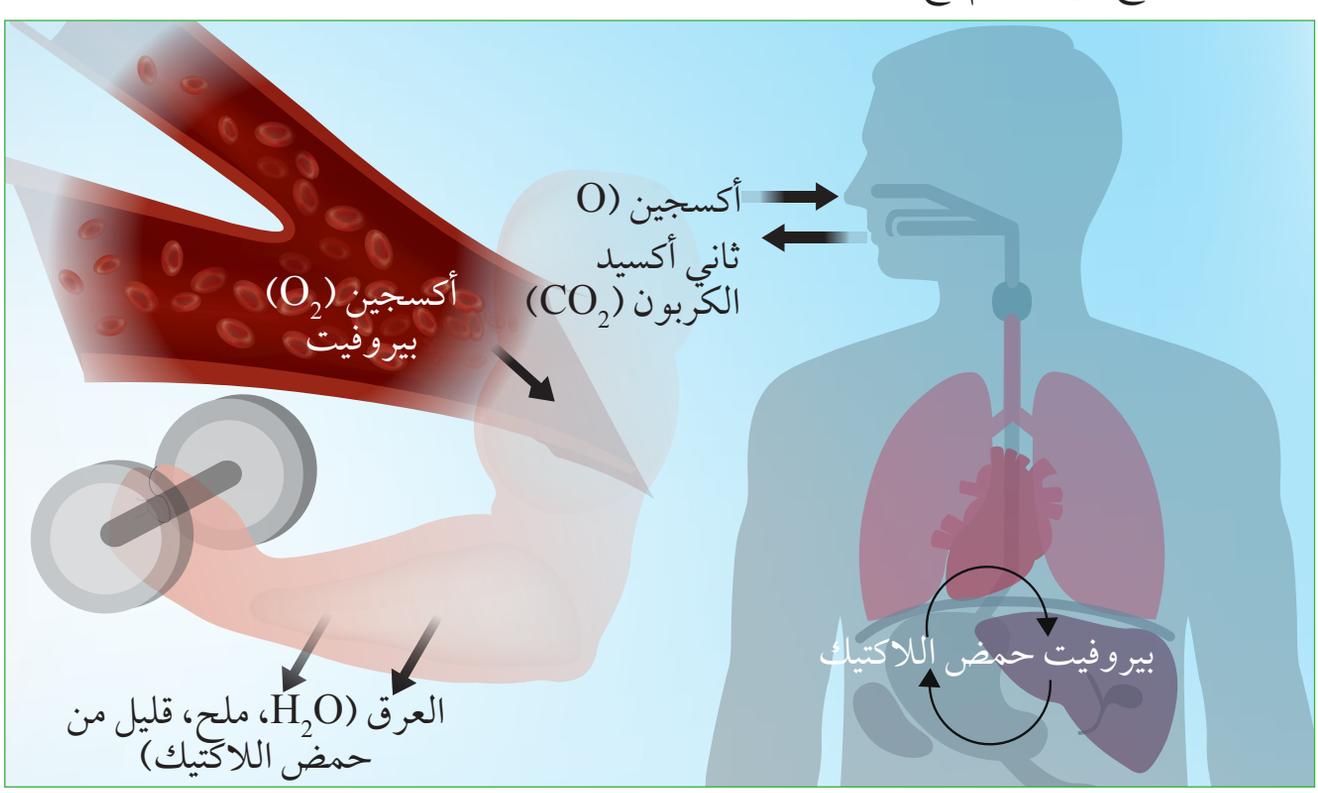
يحدث التخمر الكحولي في الخميرة، بينما يحدث تخمُّر حمض اللاكتيك في خلايا العضلات أثناء التمارين الشاقة وخلايا الدم الحمراء. لا تحتوي خلايا الدم الحمراء على ميتوكندريا، بل تنتج ATP من تخمُّر حمض اللاكتيك.

التخلُّص من حمض اللاكتيك الزائد

في الإنسان، يمكن قياس تراكم حمض اللاكتيك المؤقّت في خلايا العضلات، عن طريق قياس كميته في الدم بعد تمرين شاق، مثل الجري أو تكرار رفع الأثقال. وتقوم خلايا العضلات، عندما ينخفض تركيز الأكسجين، بتحويل الجلوكوز إلى حمض اللاكتيك، عن طريق عملية التخمّر. وتستهلك العضلات الأكسجين المتوفّر كله أولاً؛ تسلك بعد ذلك طريق حمض اللاكتيك.

وبعد أن نتوقّف عن ممارسة الرياضة، نتنفّس بشدّة لعدة دقائق. ويؤدي التنفُّس المتزايد إلى استعادة مخزوننا من الأكسجين في الدم، وتتحوَّل الميتوكندريا إلى استخدام التنفس الهوائي. وفي أثناء استرجاع تركيز الأكسجين في الدم إلى وضعه الطبيعي، يجب إزالة حمض اللاكتيك الزائد الناتج من عملية التخمُّر عن طريق الجهاز الدوري (**الشكل 4-27**). لذا ينقل الدم حمض اللاكتيك إلى الكبد لمزيد من الأيض. وبمجرد إبطاء نشاطك أو توقّفه ، يحوّل جسمك حمض اللاكتيك إلى بيروفيت.

وعند استعادة مستويات الأكسجين في مجرى الدم تمامًا، وإزالة حمض اللاكتيك من الأنسجة، تفتح الطريق أمام استرجاع البيروفيت إلى مستوياته الطبيعية، واستمرار التنفّس الهوائي. لكن تبقى بعض اللاكتات منتشرة في الدم؛ مكوِّنة مستوى لاكتات «الراحة»، وتنتقل كمية صغيرة منها من الدم إلى الجلد، وتخرج من الجسم مع العرق.



الشكل 4-27 ينقل حمض اللاكتيك الذي لا يُحوَّل في العضلات إلى بيروفيت، من العضلات إلى الكبد كي يحوّل إلى جلوكوز.

وهناك اعتقاد آخرغير صحيح، هو أن تراكم حمض اللاكتيك يسبّب ألم العضلات بعد التمرينات الشاقة. وهذا ليس صحيحًا من الجهة الكيميائية الحيوية. فما إن يستعاد الأكسجين حتى يتحوّل حمض اللاكتيك إلى بيروفيت، يعاد إلى دورة التنفُّس الهوائي في الميتوكندريا. وقد يكون الإحساس بالحرقة الذي ينتاب العضلات المفرطة النشاط ناتجًا عن تمزّقات دقيقة في أليافها، أو بسبب التهاب. ويمثّل هذا استجابة لنظام المناعة لدينا. إن سبب آلام العضلات هو الالتهاب، وليس تراكم حمض اللاكتيك.

4-4 الإعياء والتمارين

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثر الإعياء في التمارين؟
الموادّ المطلوبة	ساعة توقيت رقمية أو منبّه، أربطة تمارين رياضية أو أوزان للرفع، موادّ أخرى معتمدة

الخطوات

1. سيصمّم فريقك أو مجموعتك تجربة لاختبار آثار الإعياء في ممارسة التمارين الرياضية. وسيوفر معلِّمك ورقة عمل لتكمل تعبئتها في أثناء تخطيط تجربتك الخاصة.
2. تأكد من الاجابة عن كل الأسئلة، وأخذ موافقة معلِّمك على خطّتك، قبل إجراء هذا الاستقصاء.

التخطيط

1. سوف تصمّم تجربة لاختبار كيفية تأثير اعياء العضلات في أداء التمرين الرياضي.
2. أكمل الخطوات في ورقة العمل، و:

a. استخدم ما تعلّمته في هذه الوحدة وبحثك الخاص، عن كلٍّ من العضلات وحمض اللاكتيك والتمارين الرياضية، لفهم كيفية اختلاف التمرين الرياضي لدى الأفراد لجهة أنواع العضلات المختلفة، وحدود القوة العضلية، والتحمُّل العضلي، وأيّ أفكار أخرى لديك.

b. حدّد المتغيِّرات التي ستضبطها، والمتغيِّر الذي ستتعامل معه (المتغيِّر المستقل)، ومخرج الاستقصاء الذي ستقيسه (المتغيِّر التابع).

c. استخدم المتغيِّرات التجريبية الخاصة بك في صياغة فرضية صحيحة.

d. عدّد الموادّ التي ستحتاج إليها، وصمّم الخطوات، وخطط للملاحظات، وجهز مسوَّدة جداول البيانات، لتسجيل القياسات التي ستجريها.

e. من المتوقَع أن تقوم مجموعتك بإنشاء رسم بياني واحد أو أكثر؛ لإظهار مقدار التمرينات التي تقوم بها مجموعة محدَّدة من العضلات.

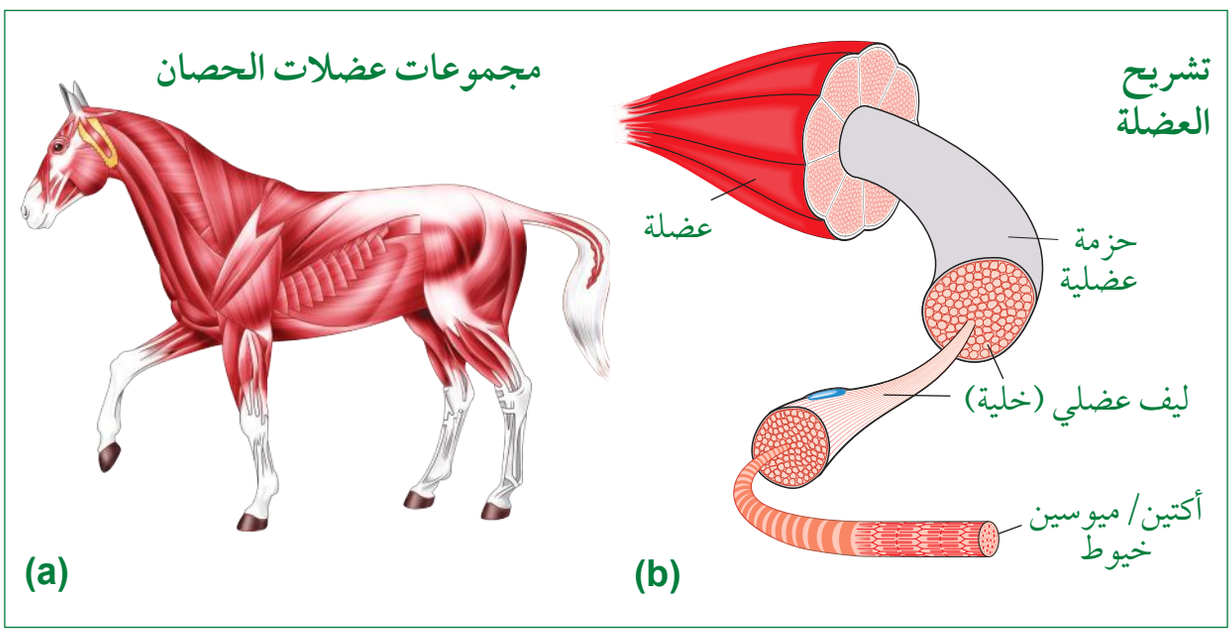
الاستنتاج

a. ما الذي تعلّمته عن العلاقة بينك وبين التمرين الرياضي في هذا النشاط؟

b. سينظّم معلِّمك مناقشة بعد تنفيذ الاستقصاءات جميعها من قبل الصف. وسيطلب إليك تقديم تقرير رسمي عن المنتج النهائي لمجموعتك، أو عرضه.

عضلات الحصان وحركته

العضلات واحد من أهم المُكوّنات في الحيوانات ذوات الحوافر، ومنها الحصان. ولا تكون من دونها، قادرة على السير أو العدو أو الأكل، أو حتى تحريك الذيل تحريكاً خفيفًا. وتشكِّل العضلات أكبر الأنسجة في جسم الحصان، من حيث كتلته (**الشكل 4-28a**). فانقباض عضلات الحصان البالغ عددها نحو 700 عضلة هو عملية معقّدة إلى حدّ بعيد. وتتكوّن عضلة الحصان الواحدة من العديد من الحزمات العضلية، كلٌّ منها يتكون من ألياف عضلية (**الشكل 4-28b**). وتلي انقباض العضلات، فترة انبساط لكل أليافها. وعلى المستوى الخلوي، يُستخدم ATP في كلٍّ من الاتصالات العصبية لإطلاق أيونات الكالسيوم، والحث على فترة انقباض نوعين من الخيوط البروتينية وتنسيقها.



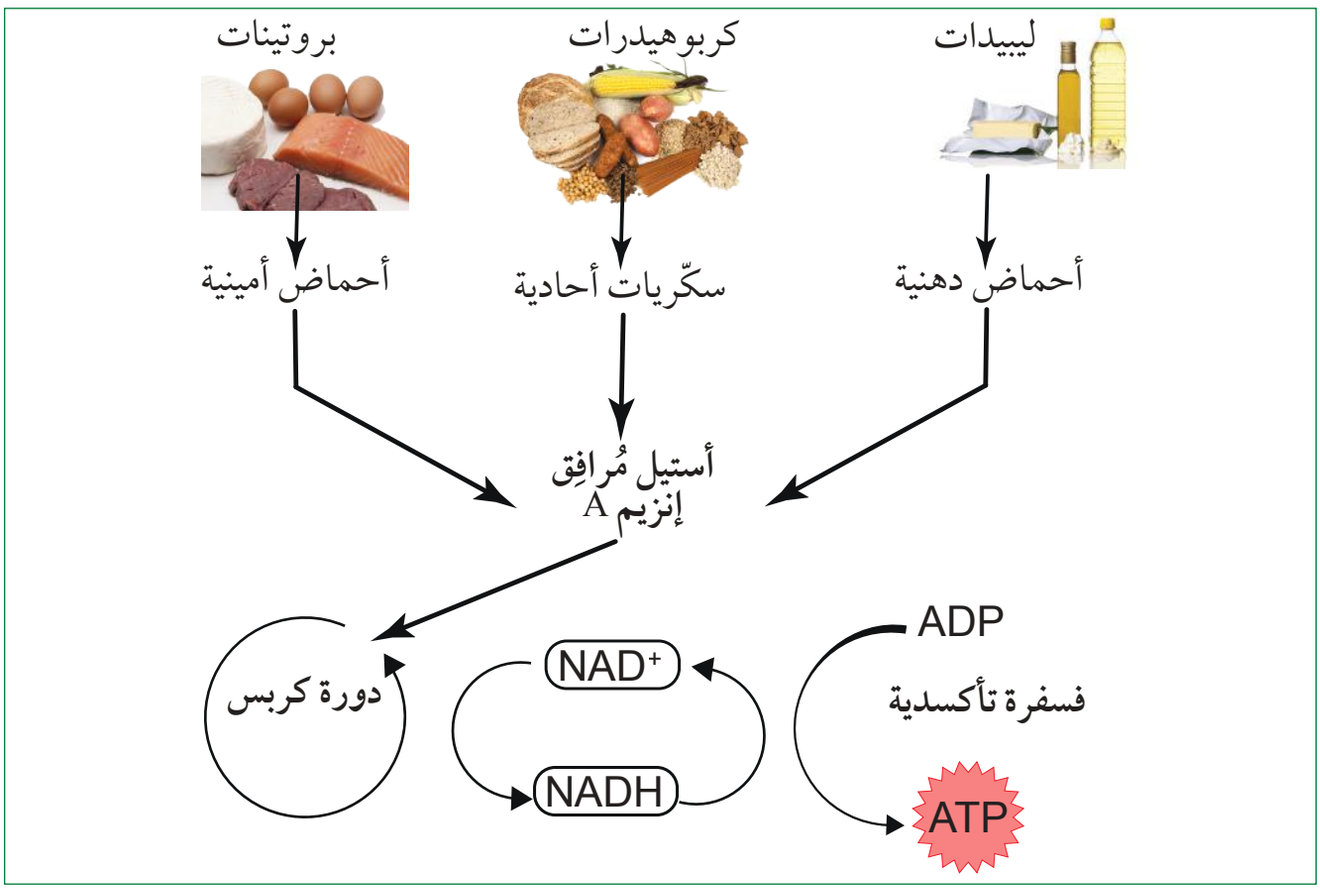
الشكل 4-28 (a) عضلات الحصان التي تسهم في الحركة. (b) تشريح مجموعة عضلات تحتوي على ألياف عضلية مكوّنة من خيوط بروتينية.

أظهرت صور المجهر الإلكتروني حديثًا أن هناك أربعة أنواع على الأقل، وليس اثنين من الألياف العضلية المميزة، هي: نوع واحد بطيء الانقباض، وما يصل إلى ثلاثة أنواع مختلفة سريعة الانقباض. وبوجه عام، تُستخدم الألياف البطيئة الانقباض في الخيول، عند حركتها غير الشاقة، في حين تستعمل خيول الرياضة، كالخيول العربية، الألياف السريعة الانقباض غالبًا عند حركتها الشاقة. ويوجد لدى سلالات الخيول العربية نحو 75 % من الألياف السريعة الانقباض.

تستطيع الخيول السريعة أن تستنفد بسرعة عالية كلاً من الأكسجين اللازم للتنفُّس الهوائي، أو الماء اللازم لتحلُّل ATP المائي. وتتدرّب الخيول لتحسين المسارات الكيميائية عن طريق بناء ألياف عضلية خاصة غنية بالميتوكندريا وبروتين تخزين الأكسجين.

هدم البروتينات والليبيدات

كيف يجري أيض بروتينات ودهون الأغذية في الجسم؟ ماذا يحدث لدى تقليل السكَّريات والنشويات، أو إزالتها من نظامك الغذائي؟ توجد مسارات أيض لكل من البروتينات والدهون، توجِّه الجُزيئات الصغرى إلى مسار التحلُّل السكّري، ثم التنفُّس الهوائي (**الشكل 4-29**). وإذا تم تقليل مجموعة غذائية واحدة في طعامك، فإن أيضك يتكيَّف ويستخدم مصادر أخرى، ولا سيما الاحتياطيات المخزّنة في جسمك، كالدهون. وهناك مسارات أيضية لا كربوهيدراتية كثيرة تنتج أستيل مرافق إنزيم A، الذي يدخل دورة كربس مباشرة.



الشكل 4-29 تجري عمليات الهدم لأنواع الغذاء كلّها في المسار الأساسي نفسه.

تكون مسارات الأيض في معظم الكائنات الحية متعدّدة الاستخدامات. ولكن في الإنسان، تتّحد بعض المواد خلال مسارات كيميائية معيّنة، فيما تنفصل مواد أخرى خلال مسارات أخرى. والأنظمة الأيضية ليست مغلقة، بل تسهم في أنظمة أو في أنظمة فرعية أخرى. ويمكن أن تكون العديد من المنتجات في سلسلة تفاعلات كيميائية حيوية معينة منتجات وسيطة، بل موادّ متفاعلة في عمليات كيميائية حيويّة أخرى.

تتمكّن الكبد، تحت ظروف الصيام أو الجوع، من إنتاج الجلوكوز. وباستخدام مسار عكسي يُسمّى **استحداث الجلوكوز Gluconeogenesis**، يمكن إنتاج الجلوكوز من اللاكتات أو من حمض اللاكتيك. ومن خلال أحد عشر تفاعلًا محفَّزًا تتناول البيروفيت، والأوكزالواستات، والجليسرول المتحرر من الدهون، يُنتج ما يكفي من الجلوكوز للحفاظ على استمرار نشاط الدماغ.

تقويم الدّرس 4-4

1. أي طريقة من البناء الكيميائي تستخدم غاز النيتروجين (N_2) بوصفه مستقبلًا للإلكترونات؟ وما الكائنات الحية التي تستخدم هذه العملية؟
2. وضّح الفرق بين الكائنات التي تتنفَّس لاهوائيًا والكائنات التي تتنفَّس لاهوائيًا اختياريًّا.
3. التخمّر لا ينتج ATP، فلماذا تستخدمه الخلايا؟
4. ما المُشترَك بين التخمّر الكحولي وتخمّر حمض اللاكتيك؟
5. اللاكتات وحمض اللاكتيك ليسا المركّب نفسه. وضّح الفرق بينهما، وارسم الصيغة البنائية لكل منهما.
6. اذكر مجموعتين من الكائنات الحية تستخدمان التخمّر للحصول على الطاقة. ما أهميتهما الاقتصادية؟
7. لماذا اعتقد العلماء الأوائل أن حمض اللاكتيك يسبّب ألم العضلات؟
8. استخدم الإنترنت لتعرف كيف يمكن تحسين أحد المتغيّرات التي تؤثر في توزيع الأكسجين على العضلات بواسطة التدريب، موثّقاً المواقع الإلكترونية التي استخدمتها.
9. غيّر المصطلح المكتوب بخط سميك في كل جملة لجعلها صحيحة:
   a. عندما ينخفض الأكسجين، تتحوّل الخلايا إلى **التنفُّس الخلوي** لإنتاج جُزيئات ناقل الإلكترونات وتجديدها .
   b. أثناء التخمّر يتم تحويل **اللاكتات** إلى حمض اللاكتيك.
   c. يمكن للكبد أن تقوم بعمليات أيض تتناول حمض **الأستيك**.
   d. بمجرّد استعادة مستويات **ثاني أكسيد الكربون** في الدم، يتحوَّل الجلوكوز إلى البيروفيت في الأنسجة العضلية مرة أخرى.
10. اذكر اسم العملية التي تنتج كل مادة أدناه، ثم حدّد إن كانت الخلايا بدائية النواة أو حقيقية النواة هي التي تنتجها، أو كلتاهما معًا.
    a. البيروفيت
    b. الجلوكوز
    c. اللاكتات
    d. الإيثانول

العلم والعلماء: هانس كربس

الشكل 4-30 هانس كربس طبيب وعالم حاصل على جائزة نوبل

ربما استلهم هانز كربس مهنة والده بوصفه جرّاحًا، عندما التحق بجامعة جوتنجن بألمانيا عام 1918. وبحلول العام 1923، كان هانز قد نشر أول بحث علمي له في سن 32 عامًا. وحصل خلال عامين على شهادة الطب وأصبح طبيبًا (**الشكل 4-30**).

وفي العام 1926، أصبح كربس باحثًا مساعدًا في برلين بإشراف أوتو هاينريش واربرج، وبحلول العام 1930، ارتقى إلى موقع أبحاثه الخاص في جامعة فرايبورغ. وبالاشتراك مع الطالب كيرت هنسيليت، نشر كربس دورة كربس-هنسيليت، ووصفا اكتشافهما في بناء اليوريا عبر تحويل الأمونيا السامة التي في بول الحيوانات.

في العام 1933، غادر كربس ألمانيا إلى جامعة شيفيلد في إنجلترا. لكن سُمح له أن يحتفظ بجهاز بحثه، جهاز قياس الضغط الذي طوّره معلمه واربورغ. تقيس هذه الأداة التغيُّرات في ضغط الغاز، وسمحت له بمواصلة دراسة استخدام الأكسجين في أنسجة الطيور. وكانت نظريته أنه باستخدام مقياس الضغط ، سيكون ممكنًا اكتشاف استهلاك الأكسجين في عملية أيض الجلوكوز. وفي جامعة شيفيلد، تابع النظرية التي رفضها واربورغ. وأثبت الجهاز نجاحه آخر المطاف في قياس زيادة استهلاك الأكسجين في اختبارات عضلات الصدر.

وبالتعاون مع وليام أ. جونسون، كان كربس قادرًا على إنشاء تسلسل الدورة الكيميائية التي تنتج فيها التفاعلات الأيضية السيترات من الأوكزالوأستات. وأُجبر كربس على تقديم مقالتهما عام 1937 إلى مجلة *Enzymologia* في هولندا، عندما رفض محرّرو مجلة Nature المقالة؛ بسبب تراكم الأعمال. وكان الانتقام المثالي لرفض ورقتة العلمية حصوله على جائزة نوبل للعام 1953!

مُنح كربس رتبة فارس عام 1958، وانتُخب زميلًا فخريًّا لكلية بيرتون بجامعة كامبريدج عام 1979. وواصل جهوده العلمية حتى وفاته عام 1981. وبعد سبع سنوات، نشر محرّر مجهول رسالة في مجلة Nature تصف المجلة رفض المقالة «بالخطأ الفظيع» الذي وقعت فيه المجلة. وفي العام 2017، بيعت جائزة نوبل التي حصل عليها، بأكثر من 1,300,000 ريال قطري وخصّص الثمن لإنشاء «صندوق سير هانز كربس».

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدّرس 4-1: ATP : عُملة الطاقة

- يشتمل تركيب **الأدينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine triphosphate (ATP)** على **الأدينوسين Adenosine**، وهو جُزيء **الأدينين Adenine** المُرتبط بسكّر الرايبوز؛ وعلى ثلاث مجموعات فوسفاتية.
- يخزّن ATP طاقة كامنة في روابط الفوسفات، وينقلها لتستعمل في النقل النشط والأعمال الميكانيكية.
- عندما يتحلُّل ATP بالماء، فإنه يتحوّل إلى **أدينوسين ثنائي الفوسفات Adenosine diphosphate (ADP)**، ويُطلق الطاقة، وتنفصل منه **فوسفات غير عضوية Inorganic phosphate (P_i)**.
- تُستخدم الطاقة المُستمدّة من الجلوكوز أثناء الهدم في إعادة شحن ADP إلى ATP، الذي يعمل كعملة الطاقة في الخلايا.
- في أثناء عملية الهدم، تنتج الطاقة المتحرِّرة من مول واحد من الجلوكوز ما يصل إلى 786 Kcal طاقة من 36 ATP تقريبًا، معظمها يُفقَد بشكل حرارة.
- البناء الضوئي والتنفُّس الخلوي تفاعلان مُزدوِجان يعملان على إعادة تدوير الطاقة المُخزَّنة في الجلوكوز والطاقة المتحرِّرة منه، وثاني أكسيد الكربون، والأكسجين، والماء، والطاقة عبر الأنظمة البيئية.

الدرس 4-2: الميتوكندريا

- الميتوكوندريا عُضيّات تُسمّى «معمل إنتاج الطاقة» للخلية؛ لأن الخلايا تستخدمها لإنتاج الطاقة.
- تتكوّن الميتوكندريا من أغشية وحجرات تشكِّلها تراكيب تشبه الأصابع تسُمّى **الأعراف cristae**، وهي تفصل حيِّزًا بين غشائي **Intermembrane space** عن **الحشوة Matrix**، وتنغرس في الأعراف مُعقَّدات بروتينية تُسمّى **انزيم بناء ATP، ATP synthase** .

الدرس 4-3: التنفُّس الهوائي

- **التنفُّس الهوائي Aerobic respiration** و**التنفُّس اللاهوائي Anaerobic Respiration** مساران لإنتاج الطاقة التي يمكن أن تحصل الخلايا عليها.
- **التنفُّس الخلوي Cellular respiration** عملية تتحوّل من خلالها الطاقة إلى شكل تستخدمه الخلايا.
- **التحلُّل السكّري Glycolysis** يعني «تكسير السكر»، وهو عملية انقسام الجلوكوز إلى جُزيئين

من البيروفيت، وإطلاق 2ATP .

- في مرحلة تزويد الطاقة للتحلُّل السكَّري، يُختزَل الجلوكوز سداسي الكربون ببطء إلى الفركتوز عن طريق **فسفوفركتوكينيز-1 (Phosphofructokinase-1)** لتحفيزالتفاعل الذي ينتج **جزيئين (2) من الجليسرات-ثلاثي فوسفات glycerate 3-phosphate**، ولكنّ التفاعل يتطلب أيضاً الحصول على طاقة 2ATP ليحدث .
- خلال مرحلة إطلاق الطاقة بوصفها منتجًا من التحلُّل السكَّري، يُحرَّر كلّ جُزيء من الجليسرات –ثلاثي فوسفات إلكترونين ليرتبطا بمرافق إنزيم ناقل يُسمّى ثنائي نيوكليوتيد الأدينين وأميد النيكوتين **Nicotinamide adenine dinucleotide (NADH)**، وتنتقل الإلكترونات بعد ذلك إلى **سلسلة نقل الإلكترون Electron transport chain**.
- **أكسدة البيروفيت Pyruvate oxidation** هي المرحلة رقم 1، وهي أقصر مرحلة في التنفُّس الهوائي، حيث تدخل جُزيئات البيروفيت الناتجة من التحلُّل السكَّري حشوة الميتوكندريا؛ وينقل كل بيروفيت إلكترونًا إلى NADH لينتج **أستيل مرافق الإنزيم A (acetyl-coenzyme A (acetyl-coA)** الذي يطلق فيما بعد جُزيء CO_2.
- في المرحلة رقم 2 من التنفُّس الهوائي، **دورة كربس Krebs cycle** (المُسمّاة باسم العالم هانز كربس)، يتّحد أستيل – مرافق الإنزيم A مع **أوكزالواسيتات Oxaloacetate**، لينتج سيترات Citrate؛ تتأكسد فيما بعد، وتختزل مركّبات الكربون بالتناوب، منتجةً 2 ATP وجُزيئين من ثاني أكسيد الكربون، محرِّرة الإلكترونات لخمسة جُزيئات إضافية حاملة للإلكترونات، هي 3 NADH، وجُزيء من **ثُنائي نيوكليوتيد الفلافين والأدينين Flavin adenine dinucleotide (FADH2)**، وهذا ما تتطلّبه المرحلة الأخيرة.
- في المرحلة رقم 3 من التنفُّس الهوائي، أو **الفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation** تحدث عمليتان مهمتان، هما **سلسلة نقل الإلكترون والأسموزيّة الكيميائيّة Chemiosmosis**.
- تستخدم أربعة بروتينات في سلسلة نقل الإلكترون ناقلات إلكترونات لإنشاء منحدر كهروكيميائي عبر الغشاء الداخلي للميتوكندريا، لإعادة توفير مرافقات الإنزيمات اللازمة، وإطلاق الماء.
- تستخدم الأسموزيّة الكيميائيّة أيونات الهيدروجين (H^+) في مواقع ربط على معقَّد خاص يُسمّى **انزيم بناء ATP ، ATP Synthase**؛ لربط الفوسفات غير العضوي (P_i) بـ ADP، الذي يعيد تكوين جُزيء واحد من ATP لكل أربعة بروتونات تُنقل عبر الغشاء الداخلي.
- ينتج من التنفُّس الهوائي لمول واحد من الجلوكوز 30-32 ATP، إضافة إلى إطلاق ستة جُزيئات من ثاني أكسيد الكربون، وستة جُزيئات من الماء.
- عند إضافة الحد الأقصى، وهو 32 ATP من التنفُّس الهوائي، إلى 2 ATP من التحلُّل السكَّري، فإن ما ينتجه مول واحد من الجلوكوز يصل إلى 34 ATP.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 4-4: التنفُّس اللاهوائي

- **التنفُّس اللاهوائي Anaerobic respiration** يحدث في سيتوسول الخلايا، ويعيد توفير مرافقي الإنزيم الناقلة اللازمة لاستمرار عملية التحلُّل السكَّري وذلك لضمان استمرار إنتاج 2 ATP، عندما لا يتوفّر الأكسجين.
- **البناء الكيميائي** نوع من التنفُّس اللاهوائي تستخدمه البكتيريا، أو البكتيريا الخضراء المزرقّة، وتُستخدَم فيه عناصر مثل الحديد أو الكبريت أو النيتروجين أو الأمونيا، بوصفها مستقبلات نهائية للإلكترونات.
- التخمّر نوع من التنفُّس اللاهوائي الذي يجدّد مرافقي الإنزيم الناقلة من أجل التحلُّل السكّري.
- يمكن أن تقوم البكتيريا أو الخميرة **بالتخمّر الكحولي Alcoholic fermentation**، وإطلاق الإيثانول وثاني أكسيد الكربون، في حين ينتج عن **تخمّر حمض اللاكتيك Lactic acid fermentation** مادة وسيطة هي حمض اللاكتيك الذي يُدوَّر إلى مركّب يُسمى **اللاكتات Lactate**.
- في أثناء ممارسة تمرين شاق، وعندما يُستنفد الأكسجين، تتحوّل خلايا عضلات الفقاريات إلى عملية تخمّر حمض اللاكتيك لإنتاج مرافقات الإنزيمات اللازمة للتحلُّل السكَّري، واستمرار وظائف الخلايا.
- بعد تجديد الأكسجين أو توقّف التمرين، تجري إزالة حمض اللاكتيك بواسطة الدم من الأنسجة العضلية، ويُحوَّل حمض اللاكتيك الزائد الإضافي إلى الكبد.
- تتبع عملية هدم البروتينات والدهون المسار الأساسي نفسه للجلوكوز، حيث تتكسَّر عن طريق التحلُّل المائي، وتُحوَّل إلى acetyl-coA، وتدخل مسارات التنفس الهوائية.

تحضير للاختبار

1. أيّ من الآتي يمثّل جزءاً من جُزيء ATP؟
   a. السكَّر الخماسي.
   b. الفوسفوليبيد
   c. الحمض الأميني.
   d. الهيدروكربون

2. ما العنصر الذي يوجد في الأدينين، ولا يوجد في الكربوهيدرات ؟
   a. الكربون
   b. النيتروجين
   c. الأكسجين
   d. الهيدروجين

3. أيّ من الجزيئات الآتية يستطيع أن يُخزِّن الطاقة الكيميائية؟
   a. ADP
   b. ATP
   c. الجلوكوز
   d. كل ما ذكر

4. ما العنصر الذي يوجد في الكربوهيدرات، ولا يوجد في الأدينين ؟
   a. الكربون
   b. النيتروجين
   c. الأكسجين
   d. الهيدروجين

5. ما عدد ذرّات الكربون التي توجد في جُزيء الرا يبوز؟
   a. 2
   b. 4
   c. 5
   d. 6

6. إذا شبّهنا الكائن الحي بمركز تجاري كبير، فأيّ العبارات الآتية تُمثِّل دور ATP؟
   a. مالك المركز.
   b. المادة المشتراة.
   c. العملة التي تدفعها عند الشراء.
   d. الكهرباء اللازمة لإضاءة المركز.

7. الطاقة المُخزَّنة في روابط _____ ، تُحوَّل وتُستخدم لإنجاز عمل مستخدمة الطاقة من جُزيء تخزين قصير الأجل يُسمّى _____ .
   a. جُزيء بنائي: جُزيء هدمي
   b. ATP: جلوكوز
   c. جلوكوز: ATP
   d. مادة تنفُّس هوائي: مادة تنفُّس لاهوائي

8. يمكن للميتوكندريا أن:

a. تكون ذات شكل يشبه بذرة الفاصوليا، أو تكون كروية أو عصوية.

b. تكون ذات ثلاثة أبعاد.

c. توجد في البكتيريا أو في البكتيريا الخضراء المزرقَّة.

d. تكون أكبر من الخلية.

9. ما الجُزيئات التي تنتقل بسهولة عبر الغشاء الداخلي للميتوكندريا من دون الحاجة إلى ناقل بروتيني؟

a. السكَّر.

b. البيروفيت.

c. الإلكترونات .

d. الأكسجين، وثاني أكسيد الكربون، والماء.

10. اين يقع انزيم بناء ATP؟

a. على الأغشية الخلوية.

b. على الغشاء الداخلي للميتوكندريا.

c. في حشوة الميتوكندريا.

d. داخل الحيِّز بين الغشائي للميتوكندريا.

11. أيّ مسار غالبًا ما تتبعه الخلية عند عدم توفُّر الأكسجين؟

a. التحلُّل السكّري.

b. التنفُّس الخلوي.

c. التنفُّس الهوائي.

d. أكسدة البيروفيت.

12. أيّ المسارات ينتج البيروفيت من الجلوكوز؟

a. التحلُّل السكَّري.

b. التنفُّس الخلوي.

c. التنفُّس الهوائي.

d. أكسدة البيروفيت.

13. ما الفرق بين مرحلة استهلاك الطاقة ومرحلة انتاجها في التحلُّل السكّري؟

a. إطلاق ATP في المرحلة الأولى.

b. استهلاك ADP في المرحلة الأولى.

c. اختزال ADP في المرحلة الثانية.

d. استخدام ATP في المرحلة الأولى، وإطلاقه في المرحلة الثانية.

14. ما عدد جُزيئات كل من البيروفيت وATP التي تُنتج في التحلُّل السكَّري؟

a. واحد (1) بيروفيت و 2 ATP.

b. اثنان (2) من البيروفيت و2 ATP.

c. واحد (1) من البيروفيت و4 ATP.

d. اثنان (2) من البيروفيت و4 ATP.

15. ما عدد NADH التي تُرسل عادة من التحلُّل السكَّري إلى حشوة في الميتوكندريا؟

a. واحد (1).

b. اثنان (2).

c. ثلاثة (3).

d. أربعة (4).

16. يجري تحويل البيروفيت إلى _____ من خلال _____ .

a. أستيل-مرافق الإنزيم A؛ التنفُّس اللاهوائي.

b. أستيل-مرافق الإنزيم A؛ أكسدة البيروفيت .

c. الجلوكوز؛ التحلُّل السكَّري.

d. الجلوكوز؛ التخمُّر الكحولي.

17. في دورة كربس، أي الجمل الآتية **صحيحة**؟

a. يتّحد أستيل مرافق الإنزيم A مع السيترات لتكوين الأوكزالوأستات.

b. تُخزَّن الطاقة من مركّبات الكربون في ADP.

c. تحمل مرافقات الإنزيم NADH و $FADH_2$ الإلكترونات إلى سلسلة نقل الالكترون.

d. كل ما ذكر صحيح.

18. في دورة كربس، أي مما يأتي يلزم لبدء الدورة؟

a. يضيف أستيل-مرافق الإنزيم A ذرّتين من الكربون إلى أوكزالوأستات لتكوين السيترات.

b. يجري التقاط الطاقة من مركّبات الكربون بوساطة ADP.

c. ينقل مرافقا الإنزيمات NADH و $FADH_2$ الإلكترونات إلى سلسلة نقل الإلكترون.

d. يجب أن يدخل ثاني أكسيد الكربون الدورة لتجديد ذرّات الكربون.

19. أي النواتج الآتية تحرّرها دورة كربس إذا حدثت مرَّتين؟

a. اثنان (2) أستيل-مرافق الإنزيم A، 2 ATP، 2 NADH، $2\,CO_2$.

b. اثنان (2) سيترات، 2 ATP، 4 NADH، $2\,CO_2$.

c. 2 ATP، 4 NADH، $2\,CO_2$.

d. 2 ATP، 6 NADH، $2\,FADH_2$، $4\,CO_2$.

20. في أثناء حدوث الفسفرة التأكسديّة:

a. تضيف الأسموزية الكيميائية أيونات الهيدروجين (H^+) إلى التحلُّل السكَّري .

b. يزدوج سلسلة نقل الالكترون بعملية الأسموزية الكيميائية لإنتاج ATP من ADP.

c. يجري تجديد ADP بوساطة انزيم بناء ATP.

d. يكوّن سلسلة نقل الالكترون منحدرًا كهروكيميائيًّا باستخدام البروتونات.

21. في أثناء الأسموزية الكيميائية:

a. تبني أيونات الهيدروجين (H^+) منحدرًا كهروكيميائيًا.

b. يربط انزيم بناء ATP البروتونات، ويستخدم الطاقة لإنتاج ATP.

c. يُطلَق 2 ATP، و 4 NADH، و $2\,H_2O$.

d. تضخّ 4 NADH البروتونات من خلال معقّدات بروتينية.

22. ماذا ينتج من عملية الأسموزية الكيميائية؟

a. ATP وH_2O

b. ADP وH_2O و P_i

c. ADP وH_2O

d. ATP وH_2O ، وO_2

23. ما أفضل تقدير لعدد وحدات ATP الناتجة من التنفُّس الهوائي؟

a. 26-28 ATP

b. 30-32 ATP

c. 34 ATP

d. 38 ATP

أسئلة إجابات قصيرة وتفكير ناقد

الدرس 4-1: ATP: عملة الطاقة

24. اكتب أسماء الجُزيئات الثلاثة التي تكوّن ATP.

25. لماذا تتحرّر الطاقة عند تحويل ATP إلى ADP؟ فيم تستخدم الخلايا هذه الطاقة؟

26. وضّح لماذا تكون كل الطاقة التي يستخدمها جسم الإنسان مصدرها الأساسي الشمس.

27. ارسم مُخطّطًا يوضّح تدوير ATP وADP، وكيف تقدّم البطارية نموذجًا جيدًّا للطاقة في هذا المُخطَّط؟

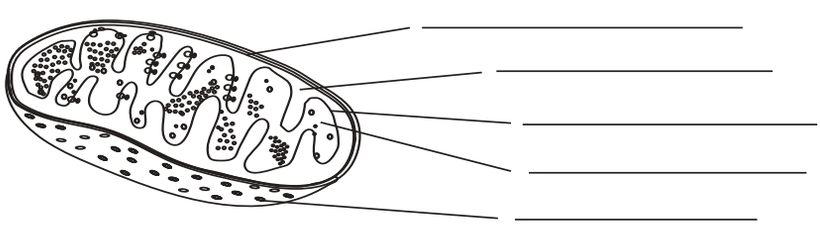
28. ما مصدر الطاقة المستخدمة لتجديد ATP في الخلايا؟

29. احسب عدد ATP الذي يمكن إنتاجه نظريًّا من 1 mol من الجلوكوز.

30. علِّل: الموادّ المتفاعلة والموادّ الناتجة في المعادلاتين الكيميائيتين الموجزتين لعمليتي البناء الضوئي والتنفُّس الخلوي تسبّب إرباكًا حول آلية حدوثهما.

الدّرس 4-2: الميتوكندريا

31. عيّن على المخطط الآتي الأسماء الصحيحة مما يأتي:



a. الغشاء الداخلي

b. الغشاء الخارجي

c. الحيّز بين الغشائي

d. قناة بروتينية

32. لِمَ تنطوي الأغشية الداخلية للميتوكندريا نحو الداخل؟

الدرس 4-3: التنفُّس الهوائي

33. كيف يختلف عائد ATP من عملية التنفُّس اللاهوائي عن عائده من عملية التنفُّس الهوائي؟

34. ما الفرق بين التنفُّس الخارجي العادي والتنفُّس الذي جرت مناقشته في هذه الوحدة؟

35. اكتب معادلة كيميائية بسيطة لكيفية تحوّل NADH إلى NAD^+. لا ضرورة لكتابة صيغتهما الكيميائية.

36. فيمَ يُستخدم ATP أثناء مرحلة إدخال الطاقة في التحلُّل السكّري؟ أجب إجابة محدَّدة.

37. لِمَ يُعَدّ الإنزيم PFK -1 هدفًا للفيروسات، مثل فيروس HIV، أو السرطان؟

38. اكتب أسماء المراحل الثلاث للتنفُّس الهوائي.

39. حدّد عدد جُزيئات كل مادة في كل مرحلة من مراحل التنفُّس الهوائي في الجدول أدناه.

الجدول 1: المواد الداخلة والمواد الناتجة في عملية التنفُّس الخلوي

الجُزيء	التحلُّل السكّري		أكسدة البيروفيت		دورة كربس		الفسفرة التأكسديّة	
	داخلة	ناتجة	داخلة	ناتجة	داخلة	ناتجة	داخلة	ناتجة
a) جلوكوز								
b) بيروفيت								
c) أستيل-مرافق الإنزيم *A*								
d) ATP								
e) ADP								
f) NAD^+								
g) NADH								
h) FAD								
i) $FADH_2$								
j) أكسجين								
k) ثاني أكسيد الكربون								
l) ماء								

الدرس 4-4: التنفُّس اللاهوائي

40. استخدم الإنترنت للبحث عن البكتيريا المستخدمة للميثان. اذكر اسم نوع منها وموطنه.

41. كيف تستمر العضلات في توليد الطاقة عندما لايكون امتصاص كافٍ من الأكسجين؟

42. تُستخدم التراكيب الآتية خلال انقباض عضلات الإنسان. ارسم خريطة مفاهيم للفكرة الرئيسة «انقباض العضلات» على ورقة منفصلة، بدءًا بمستوى الخلية، مستخدمًا المعلومات والأشكال التي تضمنتها الوحدة. ثم تبادل الخريطة مع زميلك، بهدف تحسينها وعرضها في أفضل طريقة تتمثَّل بها المصطلحات والعمليات كلها.

a. أيونات الكالسيوم (Ca^{2+})

b. ATP

c. ADP

d. P_i

e. المنحدر الكهروكيميائي

f. خيوط الأكتين والميوسين

g. الليف العضلي (خلية)

h. العضلة

i. الميتوكندريا

j. الأكسجين

k. ثاني أكسيد الكربون

l. الجلوكوز

m. بيروفيت

n. حمض اللاكتيك

o. التحلُّل السكَّري

p. التخمُّر

q. التنفُّس الهوائي

r. التنفُّس اللا هوائي

مشروع البحث

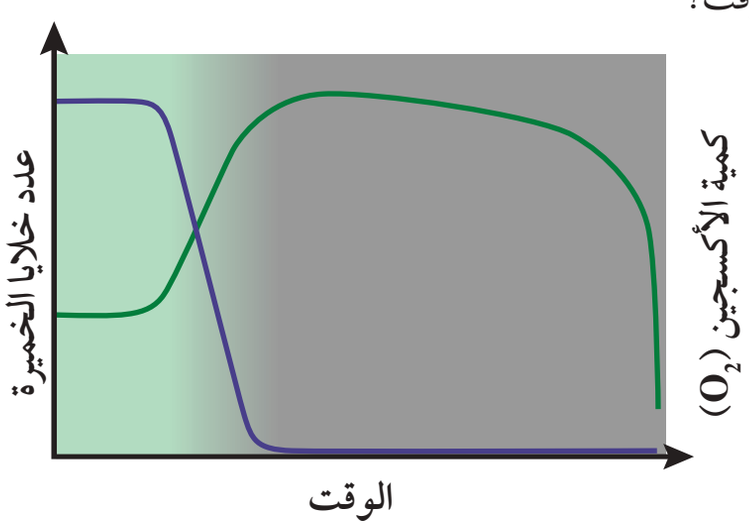
استخدم الإنترنت في البحث عن حجرات متنوعة، تُسمّى مقاييس سرعة التنفُّس، التي يمكن تصميمها واستخدامها في تقدير كمية الجلوكوز والأكسجين التي تستهلكها الحشرات، عن طريق قياس كمية ثاني أكسيد الكربون المنتجة.

1. ابحث في تصميم الحجرة، ونوع الحشرة التي يمكنك الحصول عليها بسهولة.
2. حضّر قائمة بالمواد الخاصة بك، والخطوات، وقدِّمها إلى معلِّمك لأخذ موافقته قبل البدء بالتجريب.
3. اجمع الملاحظات والبيانات لحساب عملية الأيض الأساسية.
4. بعد أن تعرف أن تصميمك يعمل ، يمكنك صياغة فرضية وإجراء استقصاء آخر لمتغيّر معيّن تعتقد أنه قد يغيّر معدَّل الأيض للحشرة، أو إجراء مقارنة بحشرة أخرى.
5. قدّم تقريرًا نهائيًّا، أو قدّم عرضًا لمسار تجربتك.

رابط مع الرّياضيّات

تعتبر خميرة الخبز Saccharomyces cerevisiae كائن حي لاهوائي اختياري. يقوم بعملية التنفُّس الخلوي في حال توفّر الأكسجين، وبالتخمّر الكحولي في ظروف انخفاض الأكسجين. خلطت الخميرة بالجلوكوز والماء. يوضح الرسم البياني أدناه كيف تغيّر عدد الخلايا وتغيّر مستوى الأكسجين المحصور في الوعاء المغلقة بمرور الوقت.

6. وفقًا للرسم البياني أدناه، ما لون الخط الذي يمثل كل من:
   a. عدد خلايا الخميرة بمرور الوقت؟
   b. كمية الأكسجين بمرور الوقت؟
   c. فسِّر إجابتك.



الشكر والتقدير

يتقدّم المؤلّفون والناشرون بجزيل الشكر إلى السادة الآتي ذكرهم، لسماحهم باستخدام ملكياتهم الفكرية، وبوافر الامتنان لموافقتهم على نشر الصور.

Kateryna Kon /Shutterstock; hfgimages/Shutterstock; Cal Holman/GI; AppleZoomZoom/Stutterstock; GualtieroBoffi Merdan/Shutterstock; Davide Sarrus/ Shutterstock; Panos Karras/ Shutterstock; KrimKate/ Shutterstock; Mario Savioa/ Shutterstock; Spaskov/Shutterstock; LeonidAndronov/ Shutterstock; PlavUSA87/Shutterstock; NatureArt/Shutterstock; KristpovBurgstadt/Shutterstock; SimoneN/Shutterstock; MrsYa/ Shutterstock; vnlit/Shutterstock; travelerpix/ Shutterstock; petarg/Shutterstock; montreep/Shutterstock; EverettHistorical/ Shutterstock; Phongphan/Shutterstock; MarcoTomasini/ Shutterstock; BigChem/Shutterstock; ColinHayes/Shutterstock; designhua/ Shutterstock; EricIsalee/ Shutterstock; Amineaya/ Shutterstock; JoseLuisCalvo/Shutterstock; kurhan/ Shutterstock; Lebenkulturen.de/Shutterstock; Peter Olsonn/ Shutterstock; Robynmac/GoGraph; grafvision/ GoGraph; artjazz/ GoGraph; jgroup/ GoGraph; FitreaRamli/ GoGraph; Yanikstock1188/ GoGraph; monkeebusiness/ GoGraph; pixelrobot/ GoGraph; FotoYou123/ GoGraph; Paulista/ GoGraph; tomwang/ GoGraph; michael812/ GoGraph; Kaferphoto/ GoGraph; OleksandrLysenko/ GoGraph; Sparkla/ GoGraph; SURZ/ GoGraph; kadmy/ GoGraph; joebelanger/ GoGraph; Lsaloni/ GoGraph; AlexanderPokeusay/ GoGraph; KumbThong/ GoGraph; 3DSculptor/ GoGraph; Nirodesign/ GoGraph; shotsstudio/GoGraph; believeinme/ GoGraph; sframe/GoGraph; Lonely11/GoGraph; Eraxion/ GoGraph; woodoo/GoGraph; mikos/GoGraph; phillipus/ GoGraph; Coprid/GoGraph; PixelChaos/GoGraph; AllenCat/ GoGraph; Andreus/GoGraph; chyennezj/GoGraph; bdspn/ GoGraph; ia_64/GoGraph; AntonioGuillem; /GoGraph; Gigava/GoGraph; Krisdog/GoGraph; malajski/GoGraph; 4374344sean/GoGraph; alila/GoGraph; normaals/GoGraph; Jaron Ontakrai/Shutterstock; Maxx-Studio/Shutterstock; WikipediaCreativeCommons; SergeiteLegin/GoGraph; elippigraphica/Shutterstock; Pop Paul Catain/Shutterstock; magann/GoGraph; Prykhodov/GoGraph; ronstik/GoGraph; Designus/Shutterstock; Robert Hooke, Micrographia, 1665., Public Domain; Billion Photos/Shutterstock; Woods Hole Oceanographic Institute; NASA; ESA; Halfdark/GettyImages; ifong/Shutterstock ; petarg/Shutterstock; Matteo Colombo/ Getty Images;