سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

رؤية عمان 2040
نتقدم بثقة
Moving Forward with Confidence

الأحياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية 1445 هـ - 2023 م

سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

الأحياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية 1445 هـ - 2023 م

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

مطبعة جامعة كامبريدج، الرمز البريدي CB2 8BS، المملكة المتحدة.

تشكل مطبعة جامعة كامبريدج جزءًا من الجامعة.
وللمطبعة دور في تعزيز رسالة الجامعة من خلال نشر المعرفة، سعيًا وراء
تحقيق التعليم والتعلم وتوفير أدوات البحث على أعلى مستويات التميز العالمية.

© مطبعة جامعة كامبريدج ووزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

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
مطبعة جامعة كامبريدج ومن وزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

الطبعة التجريبية ٢٠٢٣ م، طُبعت في سلطنة عُمان

هذه نسخة تمَّت مواءمتها من كتاب الطالب – الأحياء للصف الثاني عشر – من سلسلة كامبريدج للأحياء
لمستوى الدبلوم العام والمستوى المتقدم AS & A Level للمؤلفين ماري جونز، ريتشارد فوسبيري، دينيس تايلور،
جنيفر غريغوري.

تمت مواءمة هذا الكتاب بناءً على العقد الموقع بين وزارة التربية والتعليم ومطبعة
جامعة كامبريدج.
لا تتحمل مطبعة جامعة كامبريدج المسؤولية تجاه المواقع الإلكترونية
المستخدمة في هذا الكتاب أو دقّتها، ولا تؤكد أن المحتوى الوارد على تلك المواقع دقيق
وملائم، أو أنه سيبقى كذلك.

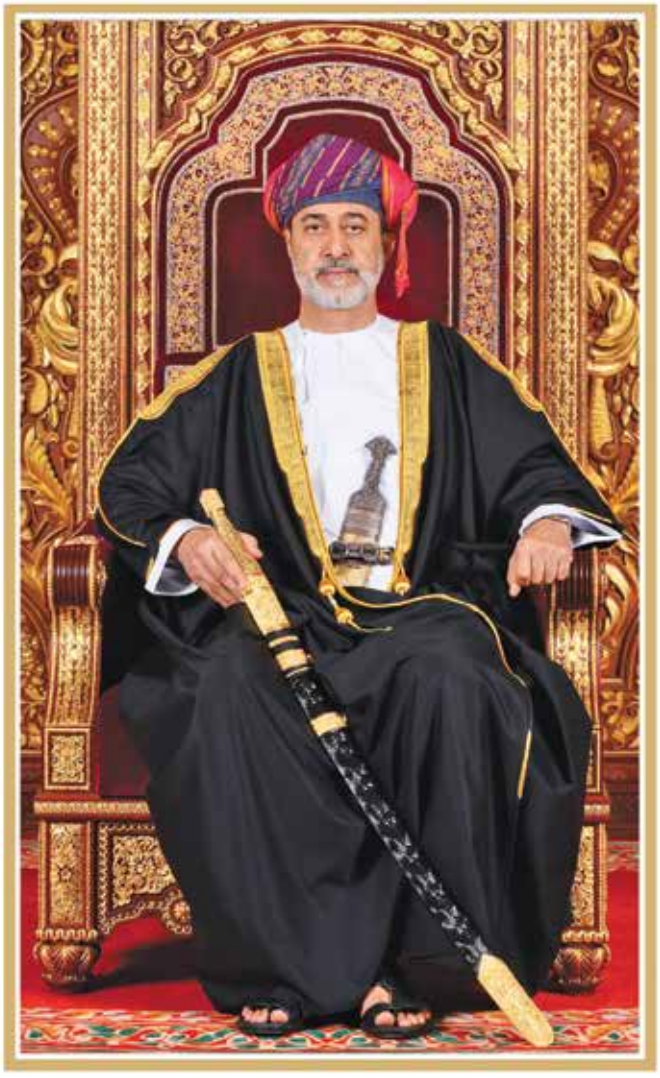
تمت مواءمة الكتاب

بموجب القرار الوزاري رقم ٢٠٢٣/٣٦ واللجان المنبثقة عنه

جميع حقوق الطبع والتأليف والنشر محفوظة لوزارة التربية والتعليم

**ولا يجوز طبع الكتاب أو تصويره أو إعادة نسخه كاملًا أو مجزّأ أو ترجمته
أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات بهدف تجاري بأي شكل من الأشكال
إلّا بإذن كتابي مسبق من الوزارة، وفي حال الاقتباس القصير يجب ذكر المصدر.**

المغفور له
السلطان قابوس بن سعيد
-طيّب الله ثراه-



حضرة صاحب الجلالة
السلطان هيثم بن طارق المعظم
-حفظه الله ورعاه-

سلطنـــــة عُمـــــان

(المحافظات والولايات)

النَّشيدُ الْوَطَنِيُّ

يا رَبَّنا احْفَظْ لنا جَلالَةَ السُّلْطان
وَالشَّعْبَ في الأَوْطان بِالْعِزِّ والأَمان
وَلْيَدُمْ مُؤَيَّدًا عاهِلاً مُمَجَّدًا
بِالنُّفوسِ يُفْتَدى

يا عُمانُ نَحْنُ مِنْ عَهْدِ النَّبي أَوْفِياءُ مِنْ كِرامِ الْعَرَبِ
فارْتَقي هامَ السَّماء وَامْلَئي الْكَوْنَ ضياء
وَاسْعَدي وَانْعَمي بِالرَّخاء

تقديم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على خير المرسلين، سيّدنا مُحمَّد، وعلى آله وصحبه أجمعين. وبعد:

لقد حرصت وزارة التربية والتعليم على تطوير المنظومة التعليمية في جوانبها ومجالاتها المختلفة كافة؛ لتُلبّي مُتطلّبات المجتمع الحالية، وتطلُّعاته المستقبلية، ولتتواكب مع المُستجدّات العالمية في اقتصاد المعرفة، والعلوم الحياتية المختلفة؛ بما يؤدّي إلى تمكين المخرجات التعليمية من المشاركة في مجالات التنمية الشاملة للسلطنة.

وقد حظيت المناهج الدراسية، باعتبارها مكوِّنًا أساسيًا من مكوِّنات المنظومة التعليمية، بمراجعة مستمرة وتطوير شامل في نواحيها المختلفة؛ بدءًا من المقرّرات الدراسية، وطرائق التدريس، وأساليب التقويم وغيرها؛ وذلك لتتناسب مع الرؤية المستقبلية للتعليم في السلطنة، ولتتوافق مع فلسفته وأهدافه.

وقد أولت الوزارة مجال تدريس العلوم والرياضيات اهتمامًا كبيرًا يتلاءم مع مستجدات التطور العلمي والتكنولوجي والمعرفي. ومن هذا المنطلق اتَّجهت إلى الاستفادة من الخبرات الدولية؛ اتساقًا مع التطوُّر المتسارع في هذا المجال، من خلال تبنّي مشروع السلاسل العالمية في تدريس هاتَين المادّتَين وفق المعايير الدولية؛ من أجل تنمية مهارات البحث والتقصّي والاستنتاج لدى الطلبة، وتعميق فهمهم للظواهر العلمية المختلفة، وتطوير قدراتهم التنافُسية في المسابقات العلمية والمعرفية، وتحقيق نتائج أفضل في الدراسات الدولية.

إن هذا الكتاب، بما يحويه من معارف ومهارات وقيَم واتجاهات، جاء مُحقِّقًا لأهداف التعليم في السلطنة، وموائمًا للبيئة العمانية، والخصوصية الثقافية للبلد، بما يتضمَّنه من أنشطة وصور ورسوم. وهو أحد مصادر المعرفة الداعمة لتعلُّم الطالب، بالإضافة إلى غيره من المصادر المختلفة.

نتمنّى لأبنائنا الطلبة النجاح، ولزملائنا المعلّمين التوفيق فيما يبذلونه من جهود مُخلِصة، لتحقيق أهداف الرسالة التربوية السامية؛ خدمة لهذا الوطن العزيز، تحت ظل القيادة الحكيمة لمولانا حضرة صاحب الجلالة السلطان هيثم بن طارق المعظّم، حفظه الله ورعاه.

والله ولي التوفيق

د. مديحة بنت أحمد الشيبانية

وزيرة التربية والتعليم

المحتويات

المقدمة xi

كيف تستخدم هذه السلسلة xiii

كيف تستخدم هذا الكتاب xv

الوحدة الأولى: الأحماض النووية وبناء البروتين

١-١ تركيب DNA و RNA ٢٠

١-٢ تضاعف DNA ٢٦

١-٣ الشيفرة الجينية ٢٨

١-٤ بناء البروتين ٢٩

١-٥ الطفرات الجينية ٣٤

الوحدة الثانية: الوراثة

٢-١ الأمشاج والتكاثر ٤٥

٢-٢ كيف يحدث التباين الجيني؟ ٥١

٢-٣ الوراثة ٥٥

٢-٤ الوراثة والمخططات الجينية ٥٦

٢-٥ الجينات والبروتينات والطراز المظهري ٧١

٢-٦ التحكم في التعبير الجيني ٧٣

الوحدة الثالثة: التقنية الجينية

٣-١ الهندسة الجينية ٨٦

٣-٢ أدوات تقني الجينات ٨٧

٣-٣ فصل وتضخيم DNA ٩٦

٣-٤ التقنية الجينية والطب ١٠١

٣-٥ التقنية الجينية والزراعة ١٠٧

الوحدة الرابعة: الاتزان الداخلي

٤-١ الاتزان الداخلي ١٢٢

٤-٢ تركيب الكلية ١٢٥

٤-٣ التحكم في المحتوى المائي ١٣٥

٤-٤ التحكم في تركيز جلوكوز الدم ١٣٩

٤-٥ الاتزان الداخلي في النباتات ١٤٦

الوحدة الخامسة: التحكم والتنسيق

٥-١ مقارنة جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي ١٦٤

٥-٢ التواصل العصبي ١٦٥

٥-٣ الانقباض العضلي ١٨٨

٥-٤ التحكم والتنسيق في النباتات ١٩٤

قائمة المصطلحات ٢٠٦

الملحق رقم ١ ..... ٢١٤

الملحق رقم ٢ ..... ٢١٥

المقدمة

يستند هذا الكتاب بشكل أساسيّ إلى كتاب علم الأحياء الذي كتب لمنهج كامبريدج (Cambridge AS & A Level Biology 9700). ويغطي الفصل الدراسي الأول من منهج سلطنة عمان لمادة الأحياء للصف الثاني عشر.

تعتمد دراسة الكتاب على جهودك الخاصة في التعلم، وعلى ما يوجهك المعلم إليه. وترتكز وحداته على المعارف والمهارات التي درستها في سنوات سابقة، كما ترتكز بعض الوحدات المتأخرة على المعرفة المتأتية من الوحدات التي عرضت قبلها.

تؤمّن الكثير من الأسئلة الواردة في المحتوى فهمًا أعمق للحقائق والمفاهيم، وبالتالي لن يكفي حفظ العبارات ومحتوى الرسوم التخطيطيّة، واسترجاعها، بل يفترض بك أن تطوّر فهمًا معمّقًا لكل مفهوم. وسيساعدك في تحقيق ذلك محاولتك الإجابة عن الأسئلة الواردة ضمن الوحدات وفي نهايتها.

من المهم جدًا إدراك أن جميع موضوعات الكتاب ترتبط بعضها ببعض، على الرغم من أنك ستدرسها على شكل سلسلة من الموضوعات المختلفة، وستحتاج إلى تكوين روابط بين المفاهيم المختلفة لتتمكّن من الإجابة عن بعض الأسئلة. على سبيل المثال، قد تتطلب الإجابة عن أحد الأسئلة الجمع بين المعرفة عن بناء البروتين والأمراض المعدية وعمليات النقل في الثدييات. وستلاحظ أن بعض المفاهيم الأساسيّة تتكرر باستمرار، ومنها:

- الخلايا كوحدات للحياة.
- العمليات الكيميائيّة الحيويّة.
- جزيء الوراثة DNA.
- الكائنات الحيّة في بيئاتها.
- الملاحظة والتجربة.

فكّر، أثناء تعلمك، في ما تعلمته سابقًا، ومدى ارتباطه بما تتعلمه الآن. ستجد في بعض أسئلة التفكير الواردة في نهاية الوحدات روابط معيّنة يمكنك التفكير فيها، وهي تحفزك على أن تفكر في طريقة تعلمك، بما يساعدك في تحقيق أقصى استفادة من وقتك وقدراتك أثناء تعلمك. يمكنك الاستفادة أيضًا من قوائم التقويم الذاتي الواردة في نهاية كل وحدة لتستكشف مدى فهمك لكل موضوع، وتعرف ما إذا كنت في حاجة إلى بذل مزيد من الجهد في دراسته.

تمثل المهارات العمليّة جزءًا مهمًا في كتاب الأحياء، وستطوّر مهاراتك مع إجرائك للأنشطة والاستقصاءات العمليّة المرتبطة بالموضوعات التي تدرسها.

يؤمّن كتاب التجارب العملية والأنشطة إرشادات عامة ذات صلة بكثير من المهارات التي تحتاج إلى تطويرها وأنت تجري الأنشطة والاستقصاءات العمليّة – ومن ذلك، رسم التمثيلات البيانيّة وتحليلها والتخطيط للتجارب – وحل المسائل المختلفة. كما يشتمل على الكثير من الشروح، بما فيها الشرح المفصّل عن كيفيّة إجراء جميع الاستقصاءات العمليّة التي يتضمنها المنهج.

ستكون دراستك لكتاب الأحياء هذا مثيرة للاهتمام، بخاصة مع الاكتشافات المتلاحقة والتقنيات الجديدة التي تعرضها وسائل الإعلام. لذا، نأمل أن تجد في ما ستدرسه الفائدة والمتعة اللتَين نتوخّاهما، وأن تطوّر مزيدًا من الاهتمام بعلم الأحياء باستمرار.

كيف تستخدم هذه السلسلة

تقدّم هذه المكوّنات (أو المصادر) الدعم للطلبة في الصف الثاني عشر في سلطنة عمان لتعلم مادة الأحياء واستيعابها، حيث تعمل كتب هذه السلسلة جميعها معًا لمساعدة الطلبة على تطوير المعرفة والمهارات العلمية اللازمة لهذه المادة. كما تقدّم الدعم للمعلمين لإيصال هذه المعارف للطلبة وتمكينهم من مهارات الاستقصاء العلمي.

يقدّم «كتاب الطالب» دعمًا شاملًا لمنهج الأحياء للصف الثاني عشر في سلطنة عمان، ويقدّم شرحًا للحقائق والمفاهيم والتقنيات العلمية بوضوح، كما يستخدم أمثلة من العالم الواقعي للمبادئ العلمية. والأسئلة التي تتضمنها كل وحدة تساعد على تطوير فهم الطلبة للمحتوى، في حين أن الأسئلة الموجودة في نهاية كل وحدة تحقق لهم مزيدًا من التطبيقات العلمية الأساسية.

يحتوي «كتاب التجارب العملية والأنشطة» على أنشطة وأسئلة نهاية الوحدة، والتي تمّ اختيارها بعناية، بهدف مساعدة الطلبة على تطوير المهارات المختلفة التي يحتاجون إليها أثناء تقدمهم في دراسة كتاب الأحياء. كما تساعد هذه الأسئلة الطلبة على تطوير فهمهم لمعنى الأفعال الإجرائية المستخدمة في الأسئلة، إضافة إلى دعمهم في الإجابة عن الأسئلة بشكل مناسب.

كما يحقّق هذا الكتاب للطلبة الدعم الكامل الذي يساعدهم على تطوير مهارات الاستقصاء العملية الأساسية. وكذلك مهارات تخطيط الاستقصاءات، واختيار الجهاز المناسب وكيفية التعامل معه، وطرح الفرضيات، وتدوين النتائج وعرضها، وتحليل البيانات وتقييمها.

يدعم دليل المعلم «كتاب الطالب» و «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، ويعزز الأسئلة والمهارات العملية الموجودة فيهما. ويتضمّن هذا الدليل أفكارًا تفصيلية للتدريس وإجابات عن كل سؤال ونشاط وارد في «كتاب الطالب» وفي «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، فضلًا عن الإرشادات التعليمية لكل موضوع، بما في ذلك خطة التدريس المقترحة، وأفكار للتعلم النشط والتقويم التكويني، والمصادر المرتبطة بالموضوع، والأنشطة التمهيدية، والتعليم المتمايز (تفريد التعليم) والمفاهيم الخاطئة وسوء الفهم. كما يتضمن أيضًا دعمًا مفصلًا لإجراء الاستقصاءات العملية وتنفيذها في «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، بما في ذلك فقرات «مهم» لجعل الأمور تسير بشكل جيد، إضافة إلى مجموعة من عينات النتائج التي يمكن استخدامها إذا لم يتمكن الطلبة من إجراء التجربة، أو أخفقوا في جمع النتائج النموذجية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

خلال دراستك هذا الكتاب، ستلاحظ الكثير من الميزات المختلفة التي ستساعدك في التعلم. هذه الميزات موضحة على النحو الآتي:

أهداف التعلّم

تُمثّل هذه الأهداف مضمون كل وحدة دراسية، وتساعد على إرشاد الطلبة خلال دراسة «كتاب الطالب»، كما تشير إلى المفاهيم المهمة المطروحة في كل موضوع، ويتم التركيز عليها عند تقويم الطالب.

قبل أن تبدأ بدراسة الوَحدة

تحتوي هذه الميزة على أسئلة وأنشطة تتمحور حول المعرفة القبلية للموضوعات التي ستحتاج إليها قبل البدء بدراسة الوحدة.

العلوم ضمن سياقها

تُقدّم هذه الميزة أمثلة وتطبيقات واقعية للمحتوى الموجود في كل وحدة دراسية، ما يعني أنها تشجع الطلبة على إجراء المزيد من البحث في الموضوعات المختلفة.

مهارة عملية

لا يحتوي هذا الجزء من الكتاب على تعليمات مفصلة لإجراء تجارب معيّنة، لكنك ستجد، في مربّعات النص هذه، توجيهات أساسية حول النشاط العملي الذي تحتاج إلى تطبيقه.

أمثلة

تحتوي على أمثلة محلولة توضّح كيفية استخدام صيغة رياضية معيّنة لإجراء عملية حسابية.

أسئلة

يتخلّل النص أسئلة تمنحك فرصة للتحقق من أنك قد فهمت الموضوع الذي قرأت عنه.

مصطلحات علمية

يتم تمييز المصطلحات الأساسية في النص عند تقديمها لأول مرة. ثم يتم تقديم تعريفات لها في الهامش تشرح معاني هذه المصطلحات.

سوف تجد أيضًا تعريفات لهذه المصطلحات في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

أفعال إجرائية

لقد تمّ إبراز الأفعال الإجرائية الواردة في المنهج الدراسي بلون غامق في أسئلة نهاية الوحدة، ويمكن استخدامها في الاختبارات، خصوصًا عندما يتم تقديمها للمرة الأولى. وستجد في الهامش تعريفًا لها.

سوف تجد أيضًا التعريفات نفسها في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

مهمّ

يتم في مربّعات النص هذه إدراج حقائق وإرشادات مهمّة للطلبة.

ملخّص

تحتوي مربّعات النص هذه على ملخّص للنقاط الرئيسية في نهاية كل وحدة.

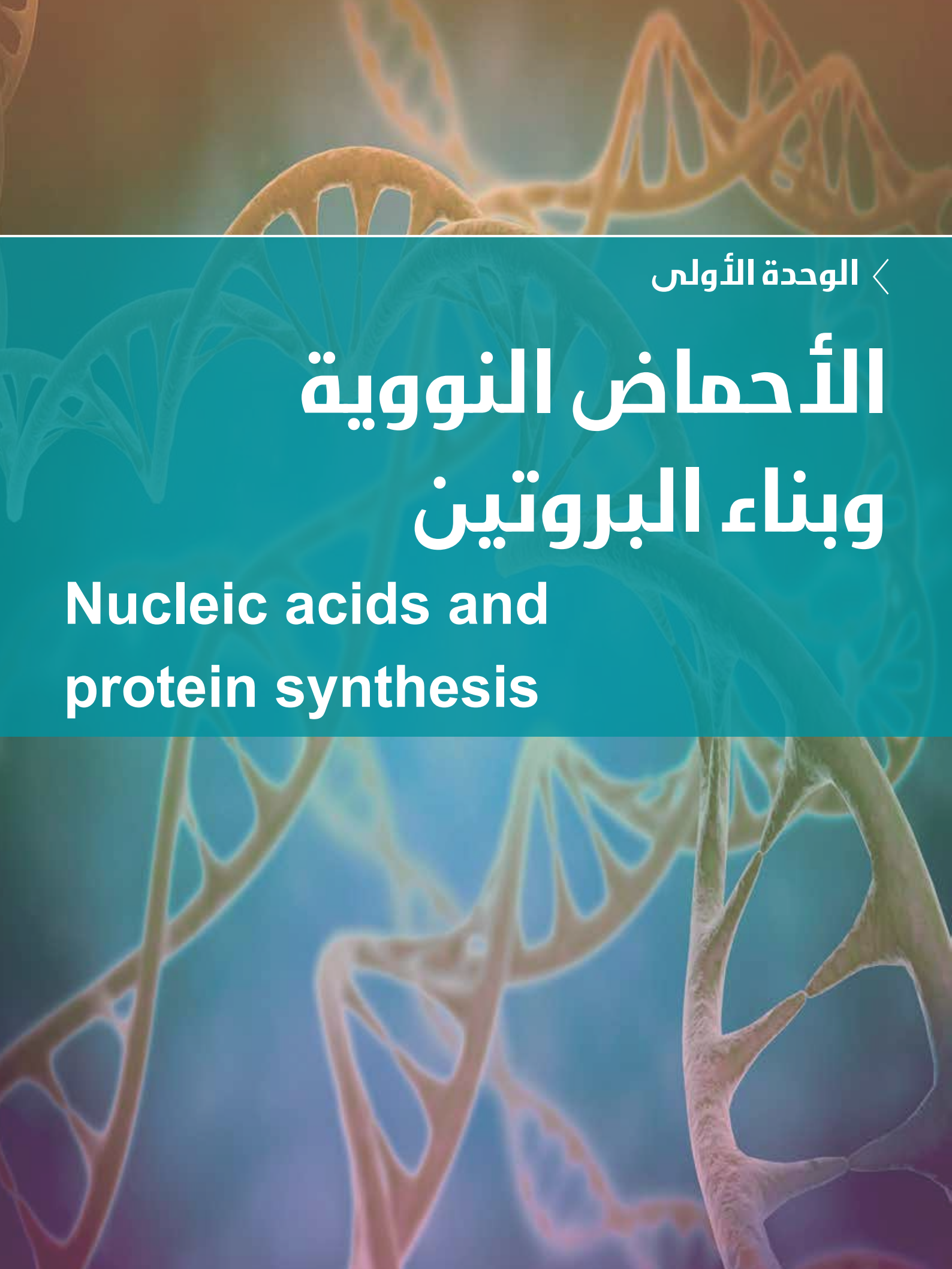
أسئلة نهاية الوحدة

تقيس هذه الأسئلة مدى تحقّق الأهداف التعليمية في الوحدة، وقد يتطلب بعضها استخدام معارف علمية من وحدات سابقة. تتوافر إجابات هذه الأسئلة في دليل المعلم.

قائمة تقييم ذاتي

تلي الملخّص عبارات تتضمّن عناوين منها: «أستطيع أن» التي تتطابق مع أهداف التعلم الموجودة في بداية الوحدة؛ و «أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد»، أو «متمكّن إلى حدٍّ ما» اللتَين تشيران إلى وجوب مراجعة ما تراه ضروريًا في هذا المجال. وقد تجد أنه من المفيد تقييم مدى ثقتك بكل من هذه العبارات أثناء عملية المراجعة.

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا



الوحدة الأولى

الأحماض النووية وبناء البروتين

Nucleic acids and protein synthesis

أهداف التعلّم

١-١ يصف تركيب النيوكليوتيدات، بما في ذلك النيوكليوتيد المفسفر ATP (الصيغة التركيبية غير مطلوبة).

٢-١ يذكر أن القاعدتَين أدنين وجوانين هما بيورينات يتكون كل منهما من حلقتَين، وأن القواعد سايتوسين وثايمين ويوراسيل هي بيريميدينات يتكون كل منها من حلقة واحدة (الصيغة التركيبية للقواعد غير مطلوبة).

٣-١ يصف تركيب جزيء DNA على أنه لولب مزدوج، متضمنًا:

- أهمية أزواج القواعد المكملة بين الشريط ′5 إلى ′3 والشريط ′3 إلى ′5 (شريطان متوازيان متعاكسا الاتجاه).
- الاختلافات في الرابطة الهيدروجينيّة بين أزواج القواعد C–G و A–T.
- ربط النيوكليوتيدات بواسطة روابط فوسفات ثنائية الإستر.

٤-١ يصف تركيب جزيء RNA، باستخدام RNA المرسال (mRNA) كمثال.

٥-١ يصف آلية التضاعف شبه المحافظ لجزيء DNA أثناء طور التضاعف S، من دورة الخلية، متضمنًا:

- أدوار إنزيم DNA بوليميريز وإنزيم DNA لايجيز (معرفة الإنزيمات الأخرى ذات الصلة بتضاعف DNA في الخلايا وأنواع DNA بوليميريز المختلفة ليست مطلوبة).
- الاختلافات بين الشريط المتقدم والشريط المتأخر.
- التضاعف نتيجة لقيام DNA بوليميريز بإضافة نيوكليوتيدات في الاتجاه ′5 إلى ′3 فقط.

٦-١ يصف مبدأ الشيفرة الجينية العالميّة التي تشفر فيها ثلاثيات مختلفة من قواعد DNA لأحماض أمينيّة معيّنة أو أنها تمثل كودونات بدء وإيقاف.

٧-١ يصف كيف تُستخدم المعلومات في DNA أثناء عمليتَي النسخ والترجمة لبناء عديدات الببتيد، متضمنًا أدوار كل من:

- إنزيم RNA بوليميريز
- RNA المرسال (mRNA)
- الكودونات
- RNA الناقل (tRNA)
- الكودونات المضادة
- الرايبوسومات.

٨-١ يذكر أن شريط جزيء DNA المستخدم في عمليّة النسخ يسمّى شريط النسخ أو القالب وأن الشريط الآخر يسمى شريط اللانسخ أو شريط اللاقالب.

٩-١ يشرح أنه في الخلايا حقيقية النواة، يتم تعديل جزيء RNA الذي ينتج عن عمليّة النسخ (النسخة الأوليّة) بإزالة التتابعات غير المشفرة (الإنترونات) وربط التتابعات المشفرة (الإكسونات) معًا لتكوين mRNA.

١٠-١ يذكر أن عديد الببتيد يُشفّر بواسطة الجين، وأن ذلك الجين عبارة عن تتابع من النيوكليوتيدات تكوّن جزءًا من جزيء DNA.

١١-١ يذكر أن الطفرة الجينيّة هي تغيّر في تتابع أزواج القواعد في جزيء DNA، والذي يمكن أن يؤدي إلى تكوين عديد ببتيد مختلف.

١٢-١ يشرح أن الطفرة الجينيّة تحدث نتيجة استبدال أو حذف أو إدخال نيوكليوتيدات في DNA، ويلخص كيف يؤثر كل نوع من هذه الطفرات في عديد الببتيد الناتج.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- أين يوجد DNA في الخلايا؟
- لماذا يسمّى DNA أحيانًا «جزيء الحياة»؟
- يمكن القول إن اكتشاف تركيب DNA هو أحد أهم الاكتشافات في تاريخ الإنسان. كيف تبرر هذا القول؟

العلوم ضمن سياقها

تتشابه من الخارج وتختلف من الداخل

يتمثل أحد المواضيع المهمة في علم الأحياء في القدرة على تمييز الأنواع المختلفة في عملية تسمّى التصنيف. وقد استخدم العلماء تقليديًا السمات الشكلية الخارجية (مورفولوجيا)، أو بمعنى آخر الطرز المظهرية للكائنات الحية، لتحديد ما إذا كانت تنتمي إلى النوع نفسه أم لا. قد يبدو ذلك سهلًا عند دراسة أنواع مختلفة تمامًا، مثل مقارنة الضفدع بالماعز والتي تتصف باختلافات يمكن تحديدها بسهولة، مثل غطاء الجسم، وسلوك التكاثر، ونمط التغذية، وما إلى ذلك. لكن العملية تصبح أكثر صعوبة عند دراسة الأنواع المتقاربة.

غالبًا ما يتم تمييز الطيور من خلال الريش وشكل الجسم ومناسبة تركيب المنقار، وحتى الصوتيات الحيوية *Bioacoustics* (الأصوات التي تصدرها الكائنات الحية كإشارات للتواصل). لقد عُثر على طائر البلبل مخطط الأذن (*Pycnonotus conradi*) في ميانمار وتايلاند والهند والصين (الصورة ١-١). وكان علماء الطيور يفترضون سابقًا أن جميع طيور البلبل في المنطقة تنتمي إلى النوع نفسه، إذ إنها تتشابه في الريش والصوتيات الحيوية في جميع أنحاء المنطقة.

وفي عام 2016 م، حلل علماء من جمعية الحفاظ على الحياة البرية (*Wildlife Conservation Society –WCS*) وجامعة سنغافورة الوطنية (*National University of Singapore–NUS*) عيّنات البلابل خلال دراستهم للجينوم – المجموعة الكاملة من DNA الكائن الحي– ومقارنة جينومات البلابل في جنوب شرق آسيا. واستخدموا تقنيات جديدة لاستعادة تتابعات DNA في آلاف المواقع من الجينوم بأكمله، ففوجئوا بأن ما كانوا يعتقدون أنه نوع واحد إنما هو في الواقع نوعان مختلفان. كان لدى الطيور المقيمة في ميانمار اختلافات كثيرة في تتابعات DNA مقارنة بتلك الموجودة في تايلاند والهند والصين. حفز ذلك العلماء على دراسة الطيور بشكل أكثر دقة، فاكتشفوا أنها تختلف أيضًا في لون العيون، وهذه صفة تساعد الطيور على تحديد نوعها، بالتالي يحدث «انعزال تكاثري» Reproductive isolation، بحيث لا يتزاوج النوعان معًا.

أدى هذا الاكتشاف إلى إعادة تسمية نوعَي الطيور لتبين الاختلافات فيما بينهما. حتى بات يُعرف طائر ميانمار الآن باسم بلبل أيياروادي *P.blanfordi* وهو مستقل عن البلبل الأصلي مخطط الأذن *P.conradi*.

وفي حين لا يزال العديد من أنواع هذه الطيور منتشرًا، فإن استخدام تقنية قراءة تتابعات DNA يعدّ عملية مهمة في الحفاظ على الكائنات الحية المعرضة للانقراض، وذلك للمساعدة في الحفاظ على التنوع الحيوي.

يمكن استخدام هذه التقنية لتحديد الأنواع المهددة حاليًا بالانقراض، والتي كان يعتقد سابقًا أنها تنتمي إلى مجموعة أوسع من الأنواع.

الصورة ١-١ يتشابه هذان الطائران إلى حد كبير في المظهر الخارجي والسلوك. ويعيش كلاهما في جنوب شرق آسيا. وقد اكتشف العلماء عن طريق تتابع DNA فقط أنهما نوعان مختلفان. (أ) البلبل مخطط الأذن يتغذى على النمل في عشه (ب) بلبل أيياروادي يحمل عنكبوتًا.

أسئلة للمناقشة

- برأيك، ما أهمية تحديد الاختلافات في DNA بين الكائنات الحية المتشابهة؟
- للكائن الحي DNA فريد. يتشابه أفراد النوع نفسه في أكثر من 99% من تتابعات DNA في الجينومات. فكر في تطبيقات أخرى لتتابعات DNA إلى جانب التصنيف؟

١-١ تركيب DNA و RNA

مصطلحات علمية

نيوكليوتيد Nucleotide: جزيء يتكوّن من قاعدة نيتروجينية وسكر خماسي، ومجموعة فوسفات.

عديد النيوكليوتيد Polynucleotide: شريط من النيوكليوتيدات مرتبطة معًا بروابط فوسفات ثنائية الإستر.

إذا كنت ترغب في تصميم جزيء يكون بمثابة المادة الجينية في الكائنات الحية، يجب أن تكون له سمتان أساسيتان:

- القدرة على تخزين المعلومات (مجموعة من التعليمات اللازمة للتحكم في سلوك الخلايا).
- القدرة على نسخ نفسه بدقة (حين تنقسم الخلية، يجب نقل نسخة طبق الأصل من «الجزيء الجيني» لكل خلية من الخلايا الناتجة، من دون أن يتم فقدان المعلومات).

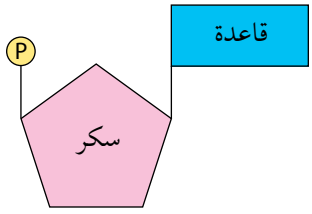
يرمز DNA إلى الحمض النووي الرايبوزي منقوص الأكسجين Deoxyribonucleic acid، ويرمز RNA إلى الحمض النووي الرايبوزي Ribonucleic acid. ويُسمّيان معًا الأحماض النووية Nucleic acids، لأنه تمّ العثور عليهما في الأصل داخل النواة. وجزيئات DNA و RNA هي جزيئات كبيرة مثل البروتينات وعديدة التسكر، أي أنها بوليمرات طويلة السلسلة مكوّنة من وحدات مونومر مرتبطة معًا تسمّى **النيوكليوتيدات Nucleotides**، وبالتالي فإن DNA و RNA هي **عديدة النيوكليوتيد Polynucleotides**.

النيوكليوتيدات

تتكوّن النيوكليوتيدات من ثلاثة مكوّنات أصغر منها هي:

- قاعدة نيتروجينية Nitrogenous base
- سكر خماسي Pentose sugar
- مجموعة فوسفات Phosphate group.

يبيّن الشكل ١-١ تركيب النيوكليوتيد وكيفية ارتباط مكوّناته الثلاثة معًا.



الشكل ١-١ تركيب النيوكليوتيد. يتكوّن النيوكليوتيد من قاعدة نيتروجينية، وسكر خماسي، ومجموعة فوسفات (P).

القاعدة النيتروجينية

توجد أربع قواعد نيتروجينية (تحتوي على النيتروجين) مختلفة، في كل من DNA و RNA. القواعد في DNA هي: أدنين Adenine، جوانين Guanine، ثايمين Thymine، وسايتوسين Cytosine وفي RNA تحل قاعدة مماثلة تسمّى يوراسيل Uracil محل الثايمين. ويشار غالبًا إلى القواعد بترميزها بالحرف الأول من الكلمة الإنجليزية: A,G,T,C,U.

تنتمي القاعدتان أدنين وجوانين كيميائيًا إلى البيورينات Purines، وهي ذات تركيب ثنائي الحلقة، وتنتمي القواعد الثلاث الأخرى، ثايمين وسايتوسين ويوراسيل كيميائيًا إلى البيريميدينات Pyrimidines، وهي ذات تركيب أحادي الحلقة.

السكر الخماسي

تسمّى السكريات التي تحتوي على خمس ذرات كربون سكريات خماسية Pentoses. يوجد نوعان من السكر الخماسي في الأحماض النووية، الرايبوز Ribose والرايبوز منقوص الأكسجين Deoxyribose.

يسمّى الحمض النووي الذي يحتوي على الرايبوز، الحمض النووي الرايبوزي (RNA). ويسمّى الحمض النووي الذي يحتوي على الرايبوز منقوص الأكسجين، الحمض النووي الرايبوزي منقوص الأكسجين (DNA). وكما يدل الاسم، فإن الرايبوز منقوص الأكسجين هو تقريبًا الرايبوز نفسه ينقصه ذرة أكسجين واحدة في الجزيء.

مجموعة الفوسفات

تعطي مجموعة الفوسفات الأحماض النووية طبيعتها الحمضية.

سؤال

(١) استفد من الشكل ١-١، لرسم نيوكليوتيد يمكن أن يوجد في:

أ. DNA فقط.

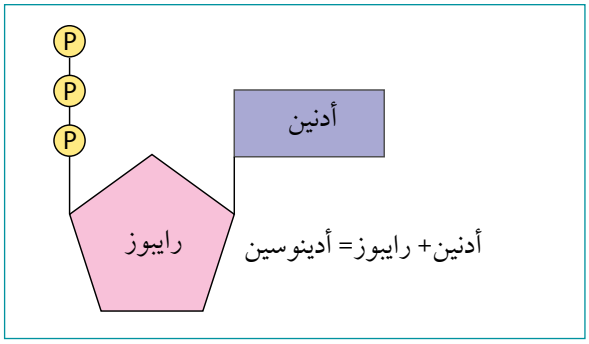
ب. RNA فقط.

حدد السكر والقاعدة في كل حالة واكتب مسمياتها.

تركيب ATP

على الرغم من أن ATP (أدينوسين ثلاثي الفوسفات) ليس جزءًا من DNA أو RNA، فإنك ستتعرف على تركيبه هنا لأنه نيوكليوتيد أيضًا.

يبيّن الشكل ١-٢ تركيب ATP، ومكوّناته الثلاثة هي أدنين ورايبوز وفوسفات. يشكل الأدنين والرايبوز معًا الأدينوسين، والذي يمكنه أن يرتبط مع مجموعة أو مجموعتَين أو ثلاث مجموعات من الفوسفات ليكوّن أدينوسين أحادي الفوسفات (AMP)، أو أدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP)، أو أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) على التوالي.



الشكل ١-٢ تركيب ATP، أدينوسين ثلاثي الفوسفات.

لا تخلط بين الأدنين والأدينوسين، فالأدينوسين هو جزء من اسم ATP (أدينوسين ثلاثي الفوسفات)، وهو أدنين يرتبط مع سكر؛ ولا تخلط بين الثايمين Thymine والثيامين Thiamine، فالثيامين هو فيتامين.

ثنائي النيوكليوتيد وعديدة النيوكليوتيد

يمكن أن يرتبط نيوكليوتيدان معًا بواسطة تفاعل تكثيف (التفاعل نفسه المستخدم لربط حمض أميني بحمض أميني آخر، أو سكر بسكر آخر).

سؤال

(٢) سمّ الرابطة التي يتم تكوينها عندما:

أ. يرتبط حمضان أمينيان معًا بواسطة التكثيف.

ب. يرتبط سكران معًا بواسطة التكثيف.

يسمّى الجزيء المتكوّن من ارتباط نيوكليوتيدَين معًا **ثنائي النيوكليوتيد** **Dinucleotide** (الشكل ١-٣أ). وتسمّى الرابطة التي تنشأ **رابطة فوسفات ثنائية الإستر** **Phosphodiester bond**. يستخدم المصطلح ثنائية الإستر Diester لأن مجموعة الفوسفات هنا تحتوي على رابطتَي إستر؛ واحدة لكل من السكرَين المرتبطَين بها. يمكن تكرار عملية ارتباط النيوكليوتيدات عدة ملايين من المرات لتكوين عديد النيوكليوتيد Polynucleotide الذي له شكل شريط طويل غير متفرع من النيوكليوتيدات، كما يوضح الشكل ١-٣ب.

ترتبط جزيئات السكر ومجموعات الفوسفات بواسطة روابط فوسفات ثنائية الإستر لتكوّن عمودًا فقريًّا تبرز منه القواعد جانبيًا من جهة اليمين بزوايا قائمة.

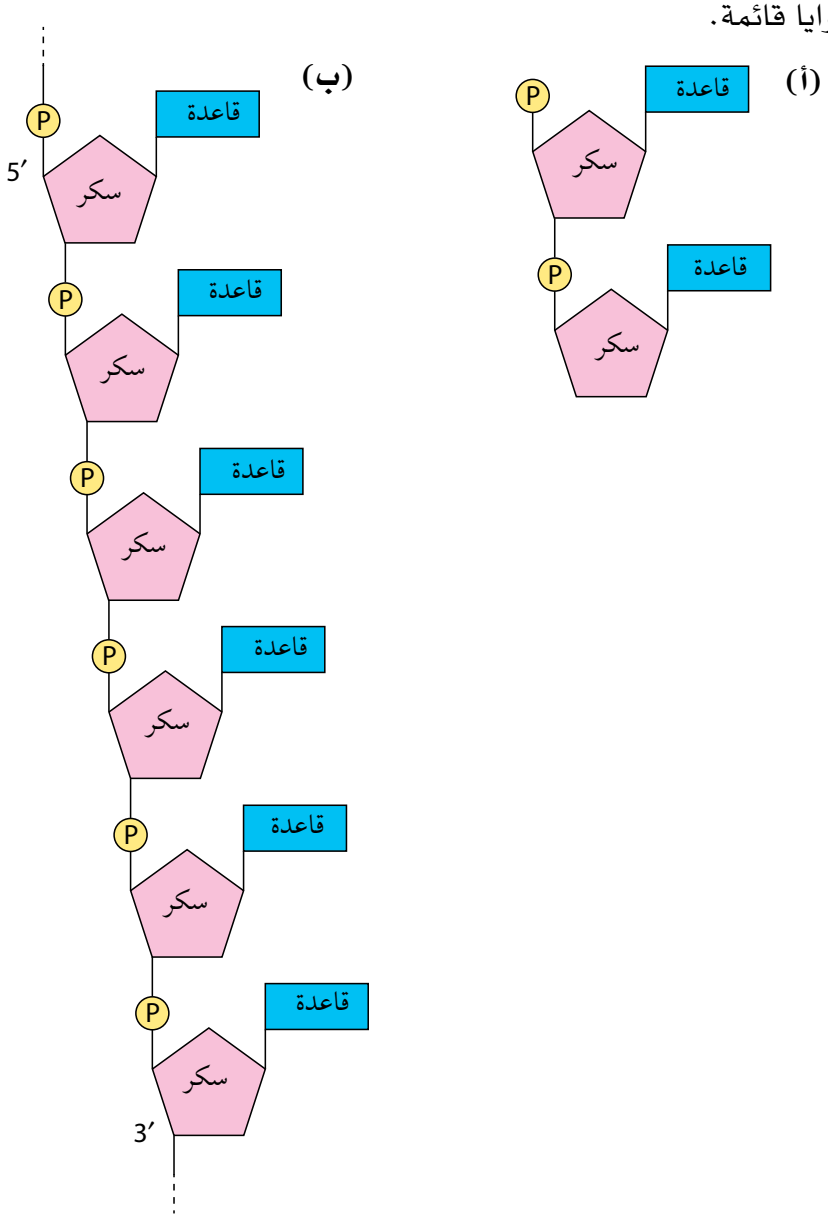
مصطلحات علمية

ثنائي النيوكليوتيد

Dinucleotide: نيوكليوتيدان مرتبطان معًا برابطة فوسفات ثنائية الإستر.

رابطة فوسفات ثنائية الإستر

Phosphodiester bond: رابطة تربط نيوكليوتيدَين معًا. ثمّة رابطتا إستر؛ تربط كل واحدة منهما مجموعة الفوسفات المشتركة بجزيئَي السكر على جانبَيها.



الشكل ١-٣ (أ) تركيب ثنائي النيوكليوتيد. (ب) تركيب عديد النيوكليوتيد.

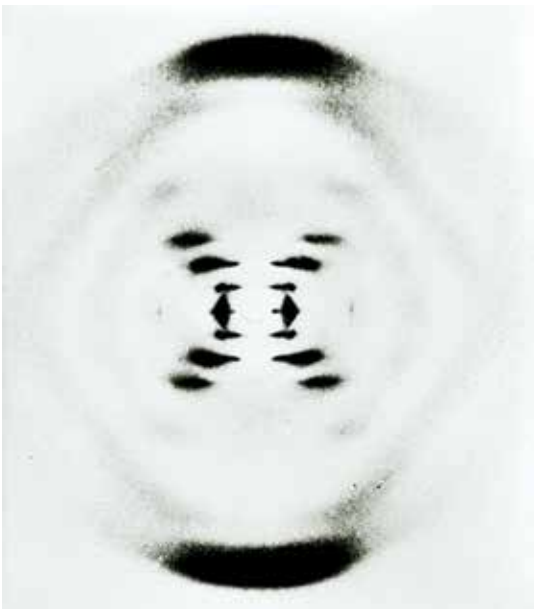
تركيب DNA

في خمسينيات القرن الماضي، كان تركيب عديد النيوكليوتيد معروفًا كما في الشكل ١-٣ب، لكنه لم يبيّن كيف يستطيع DNA تخزين المعلومات أو نسخ نفسه. فعام 1953م توصل العالمان في جامعة كامبريدج جيمس واتسون James Watson وفرانسيس كريك Francis Crick، اعتمادًا على مجموعة أدلة لعلماء آخرين، إلى تكوين نموذج ثلاثي الأبعاد لجزيء DNA، حيث اعتمدوا على البيانات التي استخلصوها من صور حيود الأشعة السينية لجزيء DNA التي التقطتها العالمة روزاليند فرانكلين Rosalind Franklin، التي عملت في الكلية الملكية في لندن. وقد اقترحت الصور التي التقطتها تركيبًا لولبيًّا لجزيء DNA (الصورة ١-٢ب).

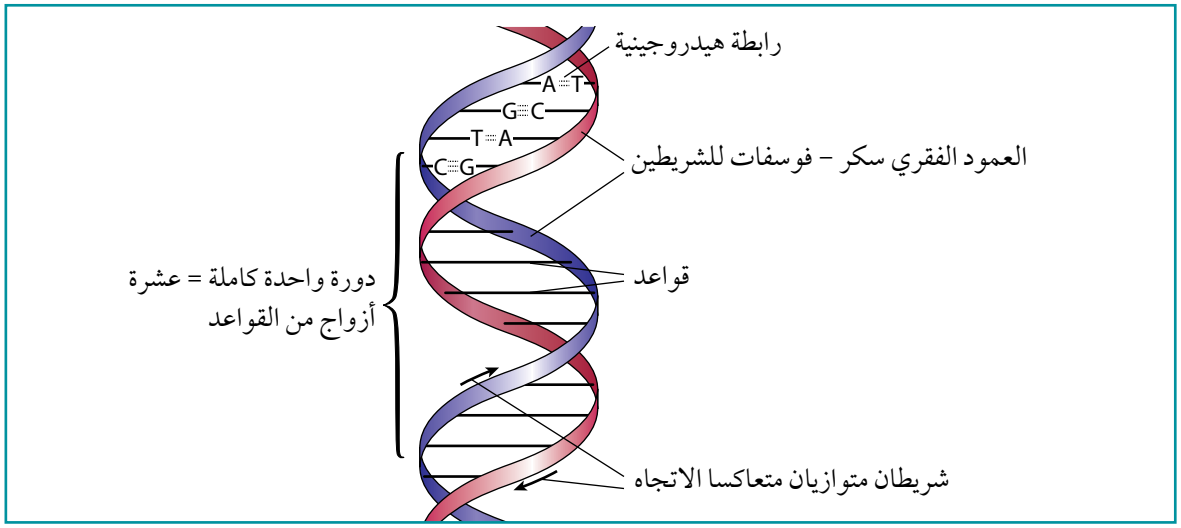
كوّن واتسون وكريك نموذجًا لتركيب DNA على شكل لولب مزدوج Double helix، مستخدمَين شريطين من عديد النيوكليوتيد يمتدان في اتجاهَين متعاكسَين، ويرتبطان معًا بواسطة روابط هيدروجينية بين القواعد (الشكل ١-٤).

(أ)

(ب)



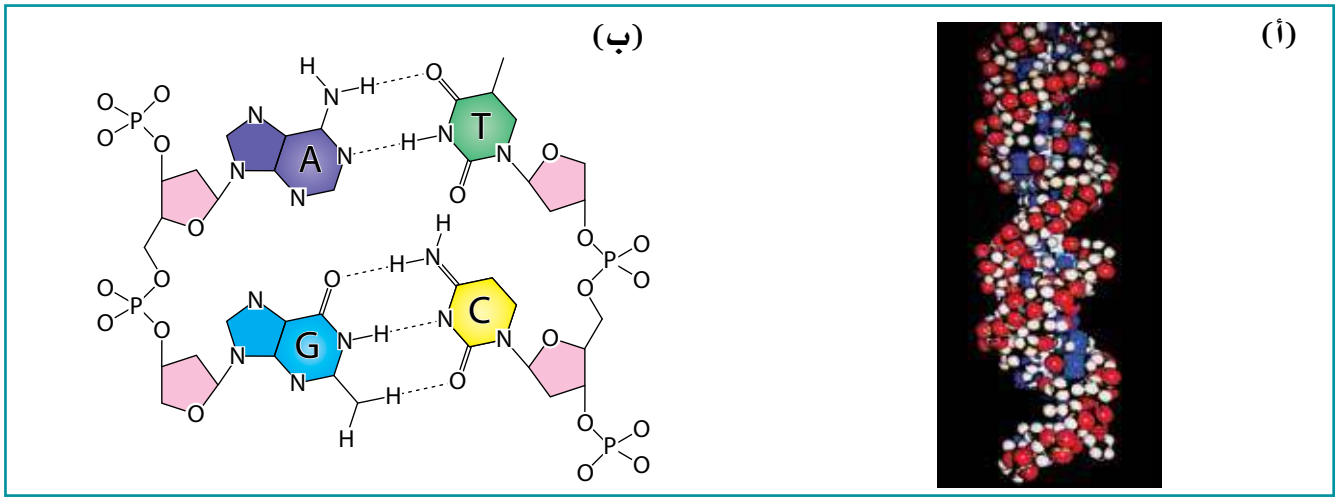
الصورة ١-٢ (أ) روزاليند فرانكلين، التي وفرت صور حيود الأشعة السينية الخاصة بها لجزيء **DNA** أدلة مهمة عن تركيبه. (ب) صورة حيود الأشعة السينية لليف من **DNA**.



الشكل ١-٤ رسم مبسّط للّولب المزدوج لجزيء **DNA**. تظهر القواعد **A**، **G**، **T**، **C** في جزء فقط من الجزيء.

خصائص جزيء DNA

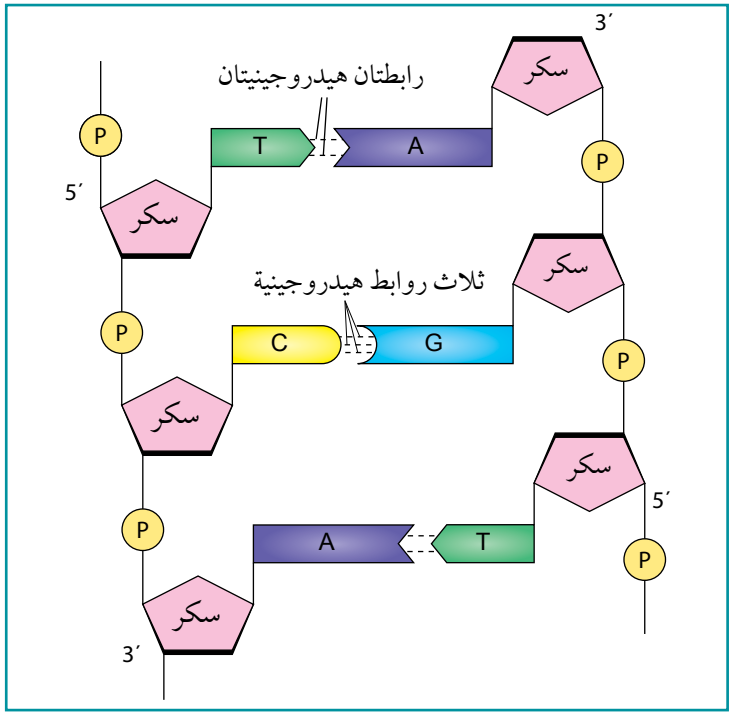
يبيّن الشكل ١–٥أ نموذج ملء الفراغ Space-filling لجزيء DNA. ويبيّن الشكل ١–٥ب، والشكل ١–٦ رسومًا تخطيطية لجزء من جزيء DNA، حيث يشير ′5 و ′3 في الشكل ١–٦ إلى ذرات الكربون 5 و 3 من السكر (الصف ١١ الوحدة الثانية الجزئيات الحيوية). ويُسمّى طرفا شريط DNA الطرف ′5 والطرف ′3. حيث يوجد عند الطرف ′5 الفوسفات، وعند الطرف ′3 السكر.



الشكل ١–٥ (أ) نموذج ملء الفراغ لـ DNA. (ب) تُظهر أزواج القواعد G-C, A-T كيف يتناسب بعضها مع بعض في ترابطها بروابط هيدروجينية. لاحظ أن هناك رابطتَين هيدروجينيتَين بين A و T وثلاث روابط هيدروجينية بين G و C.

يتصف جزيء DNA بالخصائص الآتية:

- يتكوّن من شريطي (سلسلتَي) عديد النيوكليوتيد.
- كل شريط هو لولب يَميني Right–handed يلتفّ باتجاه عقارب الساعة.
- يلتفّ الشريطان أحدهما حول الآخر ليشكلا لولبًا مزدوجًا.
- يمتد الشريطان في اتجاهَين متعاكسَين، لذا يقال إنهما متوازيان ومتعاكسا الاتجاه.
- لكل شريط عمود فقري من سكر – فوسفات تبرز منه قواعد بزوايا قائمة.
- تنجذب القواعد في الشريط الواحد إلى القواعد في الشريط الآخر بواسطة روابط هيدروجينية بين القواعد، بحيث يبقى الشريطان معًا.



الشكل ١–٦ جزء من جزيء DNA. يتم تثبيت شريطي عديد النيوكليوتيد اللذَين يمتدان في اتجاهَين متعاكسين، معًا بروابط هيدروجينية بين القواعد. ترتبط A مع T برابطتَين هيدروجينيتَين، وترتبط C مع G بثلاث روابط هيدروجينية، وهو ما يسمّى ازدواج القواعد المكمّلة.

مصطلحات علمية

ازدواج القواعد المكملة
Complementary base pairing: الارتباط بين A و T أو U وبين C و G بروابط هيدروجينية في الأحماض النووية.

- بسبب ارتباط الشريطين معًا (مثل قطع أحجية الصور المقطوعة Puzzel)، يرتبط الأدنين (A) دائمًا مع الثايمين (T)، ويرتبط الجوانين (G) دائمًا مع السايتوسين (C) وهذا يسمى **ازدواج القواعد المكملة** **Complementary base pairing** (وهذا يشرح بيانات تشارجاف – انظر السؤال ٣).
- ترتبط A مع T برابطتَين هيدروجينيتَين، وترتبط G مع C بثلاث روابط هيدروجينية.
- يرتبط البيورين دائمًا مع البيريميدين (الشكل ١–٦).

- تكون البيورينات بعرض حلقتَين، والبيريميدينات بعرض حلقة واحدة. وتكون المسافة بين عمودَي الشريطين ثابتة وبعرض ثلاث حلقات دائمًا.
- تحدث الدورة الكاملة للّولب المزدوج كل 10 أزواج من القواعد.

يعتمد تتابع القواعد في الشريط الواحد على تتابع القواعد في الشريط الآخر، لأن القاعدة A يجب أن ترتبط مع القاعدة T، والقاعدة G يجب أن ترتبط مع القاعدة C. أي أن الشريطين يكمل أحدهما الآخر.

أدرك واتسون وكريك على الفور كيف يوضح هذا التركيب عملية تخزين DNA للمعلومات، وكيف ينسخ نفسه.

إن المعلومات هي تتابع القواعد الأربع C، T، G، A بأي ترتيب على طول الجزيء. وأي تتابع ممكنٌ ضمن الشريط الواحد، لكن يجب أن يكون التتابع في الشريط الآخر مكمّلًا له؛ فتتابع القواعد هو بمثابة رسالة مشفرة.

ومن الخصائص الجميلة أيضًا لجزيء DNA أنه يمكن أن ينسخ نفسه (يتضاعف) بدقة عن طريق «انفكاك» Unzipping شريطي DNA، وهذا سهل نسبيًا لأن الشريطين يرتبط أحدهما بالآخر بروابط هيدروجينية ضعيفة، وبالتالي يمكن لكل شريط منهما أن يكوّن نسخة من نفسه، ليتم إنتاج جزيئَين متماثلَين من DNA.

سؤال

(٣) تتضمن الأدلة التي استخدمها واتسون وكريك في تكوين نموذج DNA بيانات من الكيميائي الأمريكي إروين تشارجاف Erwin Chargaff. يبيّن الجدول ١–١ بعضًا من هذه البيانات. ارصد نمطًا بسيطًا في نسب القواعد.

مصدر DNA	أدنين (%)	جوانين (%)	ثايمين (%)	سايتوسين (%)
الإنسان (ثديي)	30.9	19.9	29.4	19.8
الدجاجة (طائر)	28.8	20.5	29.2	21.5
السلمون (سمكة)	29.7	20.8	29.1	20.4
الجرادة (حشرة)	29.3	20.5	29.3	20.7
القمح (نبات)	27.3	22.7	27.1	22.8
الإشريكية القولونية Escherichia coli (بكتيريوم)	24.7	26.0	23.6	25.7
آكل البكتيريا X 174 (فيروس)	24.6	24.1	32.7	18.5

الجدول ١–١ الكميّات النسبية من القواعد الأربع في كائنات حية مختلفة. مجموع الأرقام في كل صف يساوي 100 تقريبًا. يمثل كل رقم النسبة المئوية لتلك القاعدة في DNA الكائن الحي المذكور.

تركيب RNA

جزيء RNA شريط مفرد من عديد النيوكليوتيد على العكس من DNA. ستدرس لاحقًا في هذه الوحدة بناء البروتين (الموضوع ١-٤). وهذا يتضمن ثلاثة أنواع من RNA هي RNA المرسال Messenger RNA (mRNA)، و RNA الناقل Transfer RNA (tRNA)، و RNA الرايبوسومي Ribosomal RNA (rRNA). ينثني RNA الناقل و RNA الرايبوسومي على شكل تراكيب معقدة، في حين يبقى RNA المرسال على شكل شريط غير ملتف.

٢-١ تضاعف DNA

تفسِّر الطبيعة اللولبية لجزيء DNA كيفية تضاعفه. ويعرف العلماء الآن بالتفصيل كيف تحدث هذه العملية، وأنها تحدث أثناء الطور S من دورة الخلية.

تتحكم الإنزيمات في عملية التضاعف. وهي تبدأ بفك التفاف اللولب المزدوج وانفصال شريطي DNA عن طريق كسر الروابط الهيدروجينية التي تربط عادة الشريطين معًا، وهذا هو «الانفكاك Unzipping» الذي ورد سابقًا. بعد ذلك، يستخدم إنزيم **DNA بوليميريز DNA polymerase** في عملية النسخ، حيث يلتصق جزيء من DNA بوليميريز بكل شريط مفرد، ويضيف في كل مرة نيوكليوتيدًا واحدًا يرتبط بالشريط الجاري نسخه بواسطة رابطة هيدروجينية.

يستطيع DNA بوليميريز النسخ فقط في الاتجاه ′5 إلى ′3 على طول كل شريط، ويسبب ذلك مشكلة. فإذا أمعنت النظر في الشكل ١-٧، فسترى أنه يجري نسخ الشريط الأصلي العلوي ′3 إلى ′5 باتجاه عملية الانفكاك تمامًا. ويتبع DNA بوليميريز اتّجاه عملية الانفكاك نفسها ناسخًا DNA أثناء انفكاكه. ويسمّى الشريط الجديد الذي يتشكّل **بالشريط المتقدم Leading strand**. أمّا نسخ الشريط الأصلي السفلي ′5 إلى ′3، فيجري بعكس اتجاه الانفكاك، وعلى العكس من الشريط الأصلي العلوي، وهذا يعني أنه على DNA بوليميريز نسخ جزء منفك من DNA، ثم العودة مرّة أخرى لنسخ الجزء التالي من DNA المنفك، ومع الاستمرار في تكرار هذه العملية، ينتج من ذلك مجموعة من القطع الصغيرة من DNA التي تمّ نسخها تسمّى قطع أوكازاكي Okazaki fragments على اسم عالم الكيمياء الحيوية الذي اكتشفها. وفي هذه الحالة، يسمّى الشريط الجديد الذي يتكوّن **بالشريط المتأخر Lagging strand**.

ينهي العملية إنزيم آخر يسمّى **DNA لايجيز DNA ligase**. وظيفة هذا الإنزيم ربط جميع النيوكليوتيدات الجديدة بروابط تساهمية (فوسفات ثنائية الإستر)، والتي تكون قبل ذلك مرتبطة بالشريط الأصلي فقط بروابط هيدروجينية بين القواعد المكمّلة Complementary bases. يربط DNA لايجيز النيوكليوتيدات المتجاورة بروابط فوسفات ثنائية الإستر لتكوين العمود الفقري سكر- فوسفات لجزيء DNA الجديد. ترتبط قطع أوكازاكي بالطريقة نفسها أيضًا. يبيّن الشكل ١-٨ تفاصيل أكثر عن التضاعف، بما في ذلك ازدواج القواعد Base pairing.

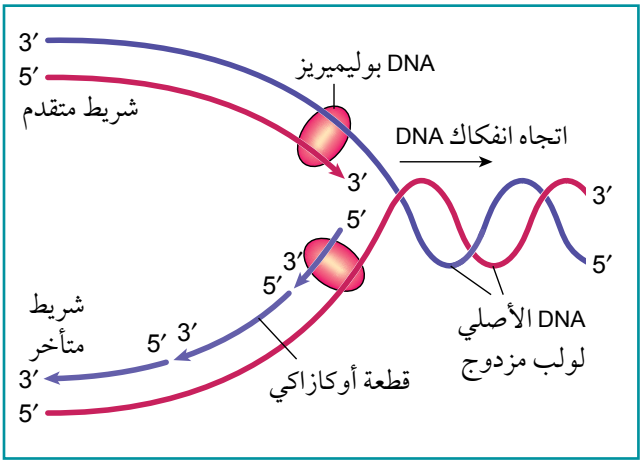
مصطلحات علمية

DNA بوليميريز DNA polymerase: إنزيم ينسخ DNA. يمتد على طول كل شريط مفرد مضيفًا نيوكليوتيدًا مكمّلًا واحدًا في كل مرة، لترتبط بعد ذلك بواسطة إنزيم DNA لايجيز.

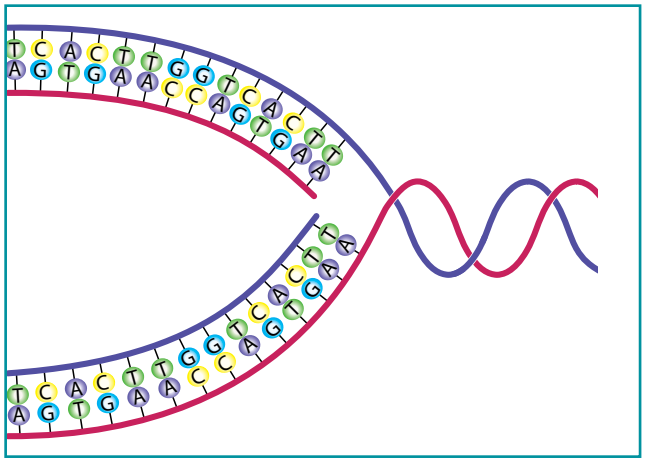
الشريط المتقدم Leading strand: أثناء تضاعف DNA، يَنسخ الشريط الأصلي ′3 إلى ′5 نفسه لإنتاج شريط متقدم.

الشريط المتأخر Lagging strand: أثناء تضاعف DNA، يَنسخ الشريط الأصلي ′5 إلى ′3 نفسه لإنتاج شريط متأخر.

DNA لايجيز DNA ligase: إنزيم يحفز ربط نيوكليوتيدَين معًا بروابط تساهمية فوسفات ثنائية الإستر أثناء تضاعف DNA.



الشكل ١-٧ رسم تخطيطي لتضاعف DNA. يمكن تكوين الشريط المتأخر فقط على شكل قطع قصيرة عند انفكاك DNA.



الشكل ١-٨ تضاعف DNA يبيّن ازدواج القواعد.

التضاعف شبه المحافظ

تسمّى طريقة نسخ DNA التي تمّ وصفها **التضاعف شبه المحافظ Semi-conservative replication**. إذ في كل مرة يتضاعف فيها جزيء DNA يُحتَفظ بنصف الجزيء الأصلي في كل من الجزيئات الجديدة. ولو كان التضاعف محافظًا، لبقي جزيء DNA الأصلي كما هو في نهاية العملية، وكان جزيء DNA الناتج مُكوّنًا من شريطين جديدين.

مصطلحات علمية

التضاعف شبه المحافظ Semi-conservative replication: الطريقة التي يتم خلالها نسخ جزيء DNA لتكوين جزيئَين متماثلَين يحتوي كل منهما على شريط واحد من الجزيء الأصلي وشريط واحد متكوّن حديثًا.

أسئلة

٤ **أ.** كوّن قائمة بالجزيئات المختلفة اللازمة لحدوث تضاعف DNA.

ب. اذكر وظيفة كل من هذه الجزيئات.

ج. في أي جزء من الخلية حقيقية النواة يحدث تضاعف DNA؟

٥ يمثل الشكل ١-٩ رسمًا تخطيطيًا لجزيء DNA. أحد الشريطين أحمر اللون والآخر أزرق. استخدم اللونَين الأحمر والأزرق بشكل مناسب لرسم الجزيئَين الناتجَين من تضاعف الجزيء الأصلي:

أ. إذا كان التضاعف شبه محافظ.

ب. إذا كان التضاعف محافظًا.

الشكل ١-٩ DNA- ماذا يحدث أثناء التضاعف؟

٣-١ الشيفرة الجينية

مصطلحات علمية

الجين Gene: تتابع محدد من نيوكليوتيدات DNA الذي يشفّر لعديد ببتيد أو بروتين معيّن.

أدرك العلماء بعد معرفة تركيب DNA أن تتابع القواعد على شريطي DNA يجب أن يمثل شيفرة لتتابع الأحماض الأمينية في عديدات ببتيد البروتين.

والمنطق الذي أدى إلى إدراك العلماء لهذه الحقيقة هو أن الإنزيمات تتحكم بأنشطة الخلية، والإنزيمات أغلبها بروتينات. ولكل نوع من البروتينات تتابع فريد من الأحماض الأمينية يحدد تركيبه وبالتالي وظيفته. لذا فإن التحكم بتتابع الأحماض الأمينية في بروتينات الخلية يعني التحكم بالإنزيمات التي سيتم تكوينها، وبالتالي التحكم بأنشطة الخلية. يمثل تتابع القواعد في DNA الخلية – الشيفرة لجميع البروتينات في تلك الخلية وفي الكائن الحي؛ وتسمّى شيفرة عديد الببتيد الواحد **جين Gene**.

يوجد 20 نوعًا شائعًا من الأحماض الأمينية في البروتينات، ولكن توجد فقط أربع قواعد مختلفة في DNA لتشفيرها. لا يمكن أن تشفر كل قاعدة لحمض أميني واحد فقط. وحتى لو شُفّرت قاعدتان لحمض أميني واحد، فسيكون هناك احتمال لوجود 16 شيفرة ممكنة: AA، AG، AT، AC، GA، GG، GT، GC، TA، TG، TT، TC، CA، CG، CT، CC. ولا يزال هذا العدد غير كاف لتشفير 20 حمضًا أمينيًا.

إذا كانت الشيفرة لكل حمض أميني ثلاثية القواعد، فسيكون هناك 64 مجموعة ممكنة ثلاثية القواعد. لا شك أن هذا العدد يبدو كبيرًا جدًا لتشفير 20 حمضًا أمينيًا فقط، لأنه في الواقع تشفر معظم الأحماض الأمينية بأكثر من شيفرة واحدة. وقد تمّ تدريجيًا الكشف عن طبيعة الشيفرة، وبحلول عام 1964 م تم تكوين جدول لشيفرات الأحماض الأمينية مثل الجدول الوارد في الملحق ٢، وأصبح من الممكن البحث عن أي شيفرة فيه.

سؤال

٦ فكّر في صيغة عامة، واكتبها للتنبؤ بعدد الأحماض الأمينية التي يمكن تشفيرها بأربع قواعد.

خصائص الشيفرة الجينية

تتصف الشيفرة الجينية لـ DNA بالخصائص الآتية:

- الشيفرة ثلاثية Triplet code. ويعني أن ثلاث قواعد تكوّن شيفرة الحمض الأميني الواحد. على سبيل المثال، TAC شيفرة DNA للحمض الأميني ميثونين (يختصر إلى «Met» في جدول DNA في الملحق ٢).
- الشيفرة عالمية. وهذا يعني أن كل شيفرة ثلاثية تشفر للحمض الأميني نفسه في جميع الكائنات الحية.
- هناك ثلاث من ثلاثيات DNA تعمل بمثابة «علامات الوقف Full stops» في نهاية الجملة (انظر الملحق ٢). فأثناء بناء البروتين تحدد شيفرات الإيقاف هذه نهاية الجين. في حين تعمل بعض الثلاثيات عمل «إشارات البدء Start signals»، التي تحدد بداية الترجمة (١-٤ بناء البروتين). كمثال على ذلك، شيفرة DNA التي تشفر للميثونين هي TAC.
- توصف الشيفرة بأنها مكررة. وهذا يعني أن بعض الأحماض الأمينية تشفر بأكثر من ثلاثية واحدة. على سبيل المثال، يبيّن جدول DNA في الملحق ٢ أن ACA، ACG، تشفر الحمض الأميني سيستين، أي أن الحرف الثالث يمكن أن يكون A أو G؛ لاحظ أن A و G؛ كلاهما بيورينات، لذا فإن الشيفرة هي AC بيورين ACpurine.

سؤال

٧ ماذا تعني حقيقة أن الشيفرة الجينية عالمية؟

١-٤ بناء البروتين

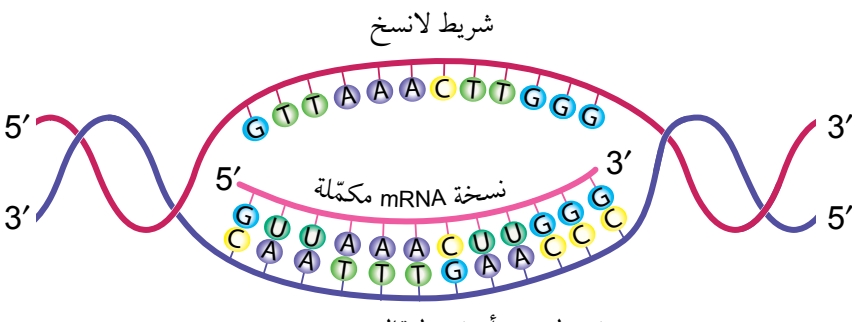
«DNA يكوّن RNA، و RNA يكوّن البروتين»

درست سابقًا أن DNA هو شيفرة للبروتينات. ولكن DNA يوجد في النواة، وتُصنع البروتينات في الرايبوسومات التي توجد في السيتوبلازم خارج النواة. لا بد إذًا من وجود طريقة تصل عبرها المعلومات من DNA إلى الرايبوسومات؛ واستخدام جزيء وسيط يوفر الحل. ففي عام 1961 م، اقترح العالمان الفرنسيان جاكوب Jacob ومونود Monod أن الجزيء الوسيط قد يكون RNA، ووصفاه بأنه RNA مرسال Messenger RNA، واختصارًا mRNA، وتبيّن فيما بعد صحة هذا الاقتراح؛ وقد لخصا بدقة عملية بناء البروتين في عبارة «DNA يكوّن RNA، و RNA يكوّن البروتين». تبيّن هذه العبارة أن بناء البروتين عملية تحدث على مرحلتَين: المرحلة التي فيها DNA يكوّن mRNA وتسمّى **النسخ Transcription**، والمرحلة التي تشفَّر فيها الرسالة التي يحملها mRNA لتكوين البروتين وتسمّى **الترجمة Translation**.

النسخ

يحدث النسخ في النواة (حيث يوجد DNA)، ويسمّى الإنزيم المسؤول عن النسخ RNA بوليميريز. يرتبط إنزيم RNA بوليميريز ببداية الجين المراد نسخه، ويبدأ بفكّ التفاف DNA للجين ويؤدي ذلك إلى كسر الروابط الهيدروجينية بين أزواج القواعد بين الشريطين (انفكاك DNA)، وبالتالي تكوين شريطين منفصلين لجزء من DNA (في الجزء المفكوك) مع بقاء تركيب اللولب المزدوج الطبيعي على جانبيه (الشكل ١-١٠). ويتم نسخ أحد الشريطين فقط، الذي يسمى الشريط القالب Template strand أو شريط النسخ strand Transcribed. يبيّن جدول DNA الوارد في الملحق ٢ الثلاثيات في شريط النسخ أو القالب. ويسمى الشريط الآخر شريط اللانسخ أو اللاقالب. وتتكوّن نسخة mRNA المكملة من شريط النسخ.

تذكّر أن RNA يحتوي على القاعدة يوراسيل بدلًا من الثايمين. وهذا يعني أن القواعد A,G,T,C في DNA تنسخ في RNA على شكل U,C,A,G على التوالي. يبيّن الشكل ١-١٠ تتابعًا قصيرًا من جزيء DNA يشفّر لأربعة أحماض أمينية.



الشكل ١-١٠ النسخ. جزء من DNA يشفر لأربعة أحماض أمينية مع نسخة mRNA مكمّلة.

مصطلحات علمية

النسخ Transcription: نسخ المعلومات الجينية في جزيء DNA وتحويلها إلى شريط مكمل من mRNA، ويستخدم شريط واحد من شريطي DNA كقالب أثناء عملية النسخ (يسمّى شريط القالب أو شريط النسخ)، والتي يقوم بها إنزيم RNA بوليميريز.

الترجمة Translation: مرحلة من مراحل عملية بناء البروتين يتم خلالها تحويل (ترجمة) تتابع النيوكليوتيدات في جزيء RNA المرسال (mRNA) حسب قواعد الشيفرة، إلى تتابع مقابل من الأحماض الأمينية في سلسلة عديد الببتيد، وهي تحدث في الرايبوسومات.

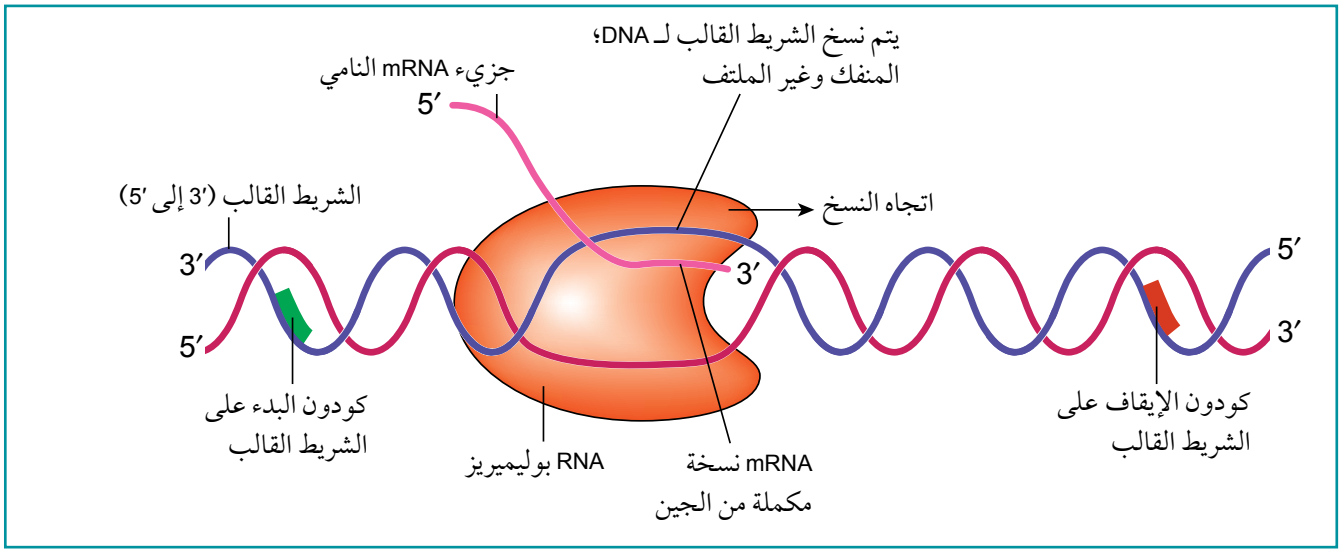
تشفّر كل مجموعة من ثلاث قواعد لحمض أميني واحد، (شيفرة ثلاثية). الشريط السفلي 3′ إلى 5′ هو الشريط القالب (شريط النسخ). وعند القراءة من الطرف الأيسر لشريط القالب، تلاحظ الثلاثية الأولى CAA. وهذه هي شيفرة DNA للحمض الأميني فالين Valine (Val) في جدول DNA الوارد في الملحق ٢).

سؤال

(٨) استفد من الجدول DNA الوارد في الملحق ٢ لتحديد الأحماض الأمينية الثلاثة التي يشفرها DNA (وتلي ثلاثية CAA) في الشكل ١-١٠. الأسماء الكاملة للأحماض الأمينية مدرجة في الملحق ١.

يتكوّن جزيء mRNA من نيوكليوتيدات توجد حرة في النواة. ومع انتقال RNA بوليميريز على طول الجين، تقترب النيوكليوتيدات الحرة وترتبط بروابط هيدروجينية مع النيوكليوتيدات المكملة لها في الشريط القالب. ومع وصول كل نيوكليوتيد يقوم إنزيم RNA بوليميريز بربطه إلى جزيء mRNA النامي برابطة فوسفات ثنائية الإستر، ومع تكوّن تلك الروابط تتكسر الروابط الهيدروجينية بين جزيء mRNA والشريط القالب. انظر إلى المسمى «جزيء mRNA النامي» الوارد في الشكل ١-١١. وفي النهاية يتم الوصول إلى كودون إيقاف، فيطلق عندها إنزيم RNA بوليميريز جزيء mRNA الذي اكتمل تكوينه حرًا في النواة، ويغادر إنزيم RNA بوليميريز جزيء DNA الذي يعود للشكل اللولبي. يبيّن الشكل ١-١١ عملية النسخ.

يغادر mRNA النواة عبر الثقوب النووية في الغلاف النووي، وهو شريط مفرد من عديد نيوكليوتيد، وبعد تكوّنه لا ينطوي ليشكل تركيبًا أكثر تعقيدًا (انظر الشكل ١-١١)، عكس النوعَين الآخرَين من RNA المشاركَين في عملية الترجمة (tRNA و rRNA).



الشكل ١-١١ النسخ.

تعديل mRNA

في حقيقيات النواة، mRNA يتم تعديله Modification (تغيير جزئي) قبل أن يغادر النواة. ويسمّى الجزيء الأصلي قبل تعديله نسخة RNA الأولية Primary transcript RNA. وتسمّى عملية التعديل معالجة RNA Processing RNA. وإحدى خطوات المعالجة هي الربط Splicing. يتضمن الربط بداية إزالة التتابعات غير المشفرة، والتي تسمى إنترونات Entrons، من النسخة الأولية، ثم ربط تتابعات التشفير المتبقية معًا، والتي تسمى إكسونات Exons.

لا يزال الجدل دائرًا حول وظيفة الإنترونات. يعرف العلماء أن إنترونات DNA يمكن أن تساعد في تنظيم نشاط الجينات، ويعرفون أيضًا أن جزيء النسخة الأولية في بعض الحالات يمكن أن يُربط بطرائق مختلفة (الربط البديل Alternative splicing)، لينتج منه جزيئات mRNA مختلفة عن النسخة الأولية الأصلية. وتؤدي هذه الجزيئات المختلفة من mRNA إلى إنتاج بروتينات مختلفة، وهذا يعني أن جينًا واحدًا يمكن أن يشفر لعدة بروتينات مختلفة أو عدة أشكال من البروتين نفسه.

الترجمة

مصطلحات علمية

كودون Codon: تتابع من ثلاث قواعد على جزيء mRNA الذي يشفّر لحمض أميني معيّن أو شيفرة إيقاف أو شيفرة بدء.

الكودون المضاد Anticodon: تتابع من ثلاث قواعد غير مزدوجة Unpaired على جزيء tRNA ترتبط مع الكودون على mRNA.

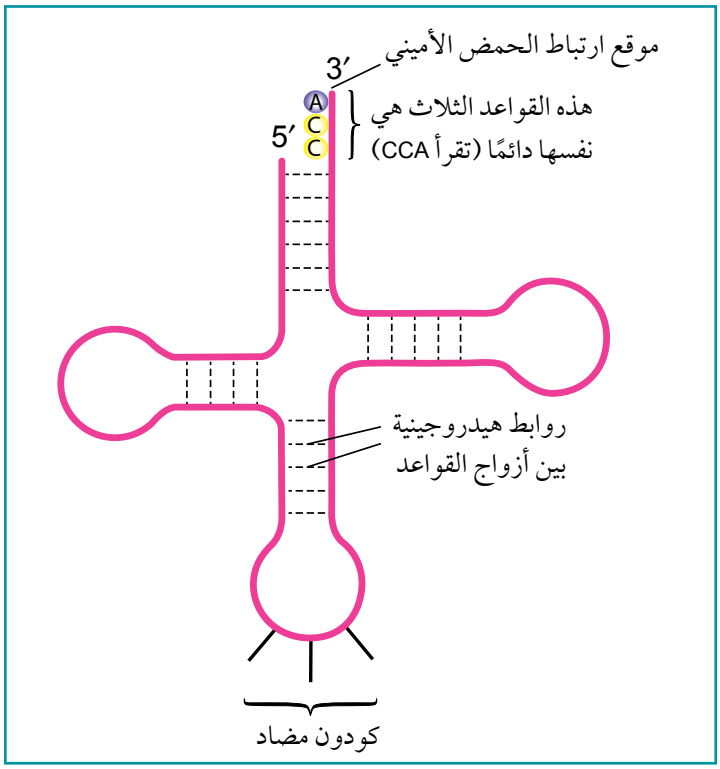
الترجمةُ Translation هي العملية التي يتم من خلالها تحويل تتابع القواعد في mRNA إلى تتابع الأحماض الأمينية في عديد ببتيد. وكما درست، فإن تتابع القواعد في جزيء mRNA هو نسخة مكملة من جين يشفر لعديد ببتيد معيّن. تقرأ شيفرة DNA في مجموعات من ثلاث قواعد. وتسمّى المجموعة المكملة للقواعد الثلاث المشفرة للحمض الأميني في mRNA **كودون Codon**. يبيّن الملحق ٢ ثلاثيات DNA وكودونات mRNA المكملة لها.

الترجمة عملية معقدة، حيث إن عضية الرايبوسوم تعمل على وضع جميع الجزيئات المرتبطة بهذه العملية معًا. تذكّر أن كل رايبوسوم مكوّن من وحدتَين: وحدة صغيرة ووحدة كبيرة، وأنها تتكوّن من rRNA وبروتين.

تتضمن الترجمة النوع الثالث من RNA وهو tRNA، ووظيفته نقل الأحماض الأمينية إلى الرايبوسوم. يبيّن الشكل ١-١٢ تركيب جزيء tRNA.

تتوافر رسوم متحركة للترجمة على شبكة الإنترنت، وهي تساعد في تطوير فهم الطبيعة الديناميكية للعملية.

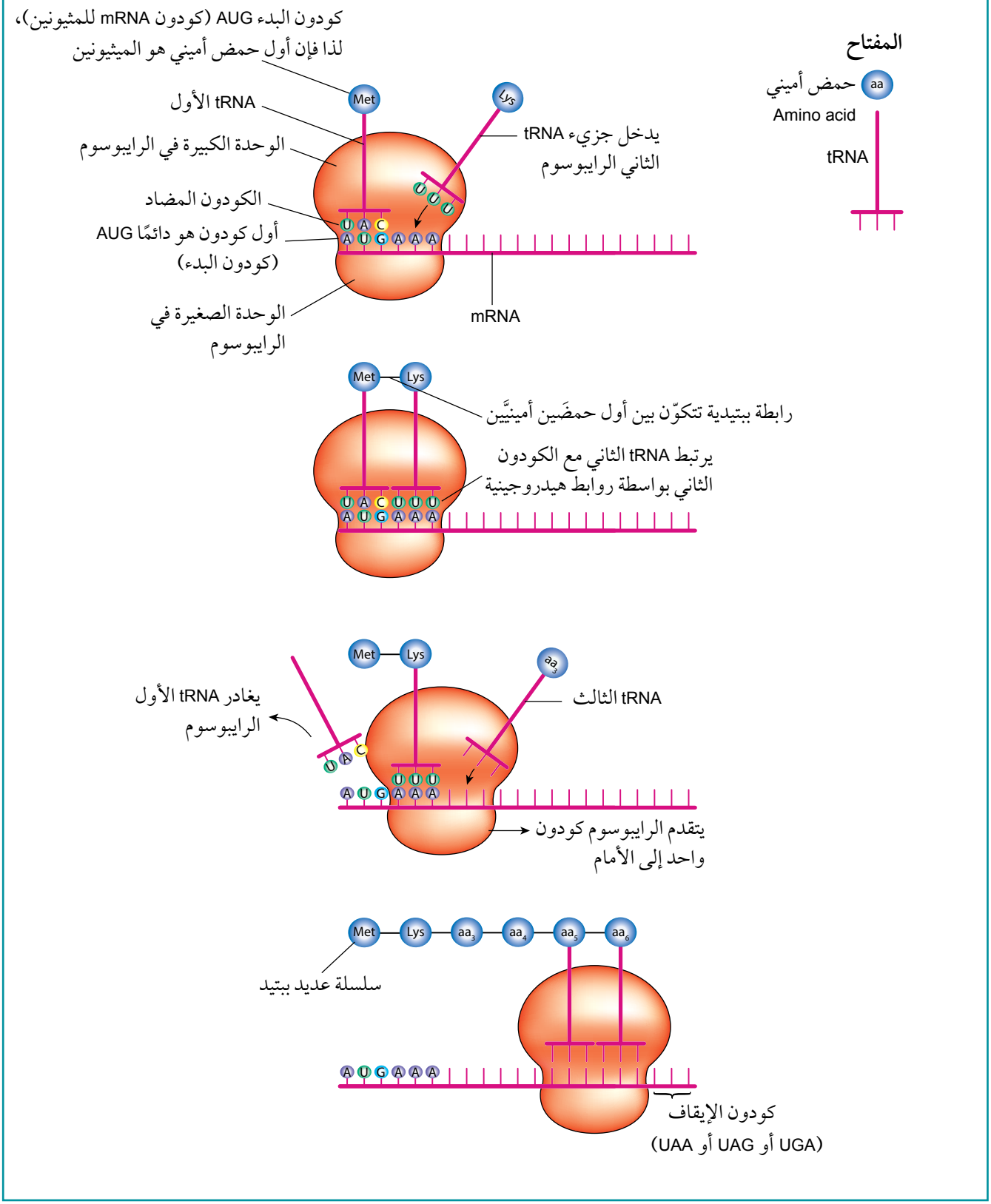
يمثل tRNA رابطًا بين mRNA وتتابع الأحماض الأمينية في البروتين. لكل حمض أميني جزيء tRNA معيّن يحمله. يرتبط الحمض الأميني بأحد طرفَي الجزيء (الشكل ١-١٢)، وفي الطرف الآخر من الجزيء تبرز ثلاث قواعد تشكل **الكودون المضاد Anticodon**، وهي مكملة لكودون الحمض الأميني المحمول على tRNA، والإنزيمات مسؤولة عن التأكد من أن كل tRNA ينقل الحمض الأميني الصحيح.



الشكل ١-١٢ جزيء tRNA. يتكوّن الجزيء من شريط مفرد ينثني على نفسه مكونًا شكل ورقة برسيم. يرتبط حمض أميني واحد بأحد طرفَي الجزيء (وبعد الارتباط يمكن أن يعبر عنه بـ حمض أميني-tRNA)، ويوجد على الطرف الآخر كودون مضاد يتعرف على كودون الحمض الأميني المحمول على tRNA.

لبدء الترجمة، يرتبط الرايبوسوم بجزيء mRNA الذي يظهر محصورًا داخل أخدود بين وحدتَي الرايبوسوم (الصغيرة والكبيرة)، ويصبح جاهزًا لاستقبال أول جزيء tRNA. يبيّن الشكل ١-١٣ تسلسل الأحداث بعد ذلك.

يدخل إلى الرايبوسوم جزيء tRNA الأول وبه الكودون المضاد والمكمل لأول كودون على mRNA ويرتبط برابطة هيدروجينية مع الكودون. يمكن أن يستقبل الرايبوسوم جزيئَين من tRNA في الوقت نفسه، لذا فإن tRNA الثاني يدخل الرايبوسوم، والذي يحتوي على الكودون المضاد الذي يطابق الكودون الثاني في mRNA. وبذلك يتموضع الحمضان الأمينيان اللذان نقلهما جزيئان من tRNA أحدهما بجوار الآخر، وتتكوّن رابطة ببتيدية بينهما. بعد ذلك يغادر أول tRNA، ويتقدم الرايبوسوم كودون واحد إلى الأمام، ويدخل tRNA الثالث، ناقلًا الحمض الأميني التالي. وتتكرر هذه العملية إلى حين الوصول إلى كودون إيقاف. ثم يغادر عديد الببتيد المكتمل الرايبوسوم، وينطوي ليشكل التركيب الثانوي والثالثي. وتساعد بروتينات خاصة في عملية الطي هذه وتتحكم فيها، وقد يدخل عديد الببتيد الشبكة الإندوبلازمية الخشنة لينقل إلى جزء آخر من الخلية.



الشكل ١-١٣ بناء البروتين – الترجمة.

١-٥ الطفرات الجينية

الطفرة Mutation هي تغيير عشوائي في تركيب **DNA** (**الطفرة الجينية Gene mutation**) أو في تركيب أو عدد الكروموسومات (**الطفرة الكروموسومية Chromosome mutation**).

الطفرة الجينية هي تغيير في تتابع النيوكليوتيدات، وبالتالي تغيير في تتابع القواعد في DNA. تحدث الطفرة عندما يتم استبدال أو حذف أو إدخال نيوكليوتيد ومن الممكن أن يحصل ذلك بسبب الأخطاء التي تحدث أثناء تضاعف DNA، أو بسبب تلف في DNA بفعل عوامل مثل الإشعاع أو المواد المسرطنة.

مصطلحات علمية

الطفرة الجينية Gene mutation: تغيير في تتابع القواعد في جزيء DNA.

الطفرة الكروموسومية Chromosome mutation: تغيير عشوائي غير متوقع في تركيب أو عدد الكروموسومات في الخلية.

قد يسبب التغيير في تتابع قواعد DNA تغييرًا في تتابع الأحماض الأمينية لعديد الببتيد الذي يشفره DNA الطافر. ويسمى مسبب الطفرة مُطفِّر Mutagen، مثل الأشعة السينية X-Ray.

الطفرات الجينية أحداث عشوائية ومن المحتمل أن تكون ضارة، لأن إجراء أي تغيير عشوائي في تتابع الأحماض الأمينية (التركيب الأولي) في عديد الببتيد يمكن أن يكون ضارًا. قد يؤثر مثل هذا التغيير على الطريقة التي ينطوي بها عديد الببتيد، وبالتالي يؤدي إلى تغيير التركيب الثالثي للبروتين، الأمر الذي يؤثر في وظيفة عديد الببتيد. وقد درست في الصف الحادي عشر كيف أن الطفرات في جينات معيّنة يمكن أن تسبب السرطان.

أنواع الطفرات

ثمّة أنواع مختلفة من الطفرات الجينية، والثلاثة الأكثر شيوعًا هي:

- الاستبدال Substitution: استبدال قاعدة بأخرى (تحل قاعدة محل قاعدة أخرى في DNA).
- الحذف Deletion: فقدان قاعدة من تتابع DNA من دون أن يتم استبدالها.
- الإدخال Insertion: إضافة قاعدة إلى تتابع DNA.

الاستبدال

يمكن أن يُستخدم تتابع القواعد في شريط القالب في الشكل ١-١٠ كمثال لتوضيح تأثير الاستبدال. يظهر تتابع القواعد في السطر الأول أدناه، وتشير الخطوط العمودية إلى كيفية قراءة الشيفرة؛ ثلاث قواعد في كل مرة، ويظهر أيضًا تتابع الأحماض الأمينية المشفرة. السطر الثاني من القواعد يُظهر الاستبدال، ولقد استُبدلت في الثلاثية الثانية القاعدة T الوسطى بالقاعدة A (مبيّنة بالأحمر للتوضيح). لاحظ أدناه التغير الناتج في تتابع الأحماض الأمينية المشفرة (التتابعات تقرأ من اليسار إلى اليمين).

CAA|TTT|GAA|CCC|	valine | lysine | leucine | glycine فالين لايسين ليوسين جلايسين
CAA|TAT| GAA|CCC|	valine | isoleucine | leucine | glycine فالين أيزوليوسين ليوسين جلايسين

يبيّن تتابع القواعد الآتي كيف أن الاستبدال لا يؤثر بالضرورة على تتابع الأحماض الأمينية المشفرة في الثلاثية الثانية، حيث استبدلت القاعدة الثالثة T ب C (مبيّنة بالأحمر للتوضيح).

CAA|TTC|GAA|CCC valine | lysine | leucine | glycine
جلايسين ليوسين لايسين فالين

لاحظ أن ليس لذلك تأثير على تتابع الأحماض الأمينية لأن اللايسين يُشفر بكل من الشيفرتين الجينيتين TTT وTTC. الحمض الأميني الذي يُشفَّر بأكثر من ثلاثية واحدة هو مثال على تكرار الشيفرة الجينية.

مثال على الاستبدال: فقر الدم المنجلي

يمكن أن يكون الخلل الجيني الوراثي فقر الدم المنجلي sickle cell anaemia مثالًا على مدى تأثير الاستبدال، فهو يؤثر في بروتين الهيموجلوبين.

الهيموجلوبين هو الصبغة الحمراء في خلايا الدم الحمراء، وهو يحمل الأكسجين في جميع أنحاء الجسم. وكما درست في الصف الحادي عشر، يتكوّن جزيء الهيموجلوبين من 4 سلاسل عديد ببتيد، تحتوي كل سلسلة على مجموعة هيم واحدة، تتضمّن الحديد في مركزها. تسمّى سلسلتان من عديد الببتيد سلسلتَي ألفا (α)، وتسمّى السلسلتان الأخريان سلسلتَي بيتا (β).

والجين الذي يشفر لتتابع الأحماض الأمينية في سلسلتَي بيتا (β) ليس هو نفسه في جميع الناس. تبدأ سلسلتا بيتا (β) لدى معظم الناس بتتابع الأحماض الأمينية الآتي (من اليسار إلى اليمين):

Val–His–Leu–Thr–Pro–Glu–Glu–Lys–

ولكن في الأشخاص المصابين بفقر الدم المنجلي يتم استبدال تتابع القواعد CAT ويصبح تتابع الأحماض الأمينية (من اليسار إلى اليمين):

Val–His–Leu–Thr–Pro–Val–Glu–Lys–

الطفرة المسؤولة هي طفرة استبدال حيث تمّ استبدال القاعدة T الثانية في الثلاثية CTT بـ A. وفي هذه الحالة ينتج من الفرق البسيط في تتابع الأحماض الأمينية فقر الدم المنجلي.

الحذف والإدخال

يمكن أن تكون طفرات الحذف والإدخال أخطر من طفرات الاستبدال لأنها تسبب «**طفرات انزياح الإطار Frame - shift mutations**».

تبيّن تتابعات القواعد الآتية تأثير إدخال أو حذف قاعدة واحدة على كيفية قراءة الشيفرة. تمّ اختيار تكرار التتابع TAG كمثال لأنه يجعل رؤية التغيير أسهل.

الشيفرة الطبيعية:

TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|TAG|

إدخال قاعدة (تبدو باللون الأحمر):

TAG|TAG|TAG|TAG|CTA|GTA|GTA|GTA|GTA|GTA|GTA|GTA|

مصطلحات علمية

طفرة انزياح الإطار Frame - shift mutation: نوع من الطفرات الجينية يحدث بسبب إدخال أو حذف نيوكليوتيد واحد أو أكثر، والذي يؤدي إلى قراءة غير صحيحة لتتابع الثلاثيات بسبب انزياح إطار القراءة.

حذف قاعدة (حُذفت القاعدة T الأولى من الثلاثية TAG الخامسة):

TAG|TAG|TAG|TAG|AGT|AGT|AGT|AGT|AGT|AGT|AGT|

لاحظ أنه في حالتَي الإدخال والحذف تتغيّر الشيفرة كلها. فإطار القراءة الذي يتضمن قراءة كل ثلاثية قد انزاح بمقدار قاعدة واحدة، ومن هنا جاء المصطلح **طفرة انزياح الإطار**. فجميع الثلاثيات من الطفرة وما بعدها تتأثر. لذا من المحتمل أن تكون جميع الأحماض الأمينية المشفرة غير صحيحة، ومن المحتمل أن يكون عديد الببتيد أو البروتين المتكوّن نتيجة لذلك غير فعّال.

أسئلة

(٩) انقل الجدول ١-٢، واستخدمه لتلخيص الاختلافات بين DNA و mRNA.

الميزة	DNA	mRNA
السكر الذي يوجد في التركيب		
القواعد المستخدمة في التركيب		
عدد الأشرطة		
التركيب العام		
الموقع في الخلية		
الوظيفة		

الجدول ١-٢ الاختلافات بين DNA و mRNA.

(١٠) ارسم رسمًا تخطيطيًا مبسّطًا، أو استخدم المخطط الانسيابي لتلخص المراحل المهمة في بناء البروتين. ضمّن المصطلحات الآتية:

نواة، ثقب نووي، mRNA، DNA، نسخ، ترجمة، رايبوسوم، حمض أميني، tRNA، حمض أميني – tRNA، عديد ببتيد.

ملخّص

DNA و RNA كلاهما عديد نيوكليوتيد يتكوّن من أشرطة طويلة من النيوكليوتيدات. يحتوي النيوكليوتيد على سكر خماسي ومجموعة فوسفات وقاعدة نيتروجينية. السكر في RNA هو رايبوز، وفي DNA هو رايبوز منقوص الأكسجين.
يتكوّن جزيء DNA من شريطي (سلسلتَي) عديد نيوكليوتيد، يرتبطان بروابط هيدروجينية بين القواعد، وتركيبه العام لولبي مزدوج. يوجد في DNA أربع قواعد هي: أدنين (A) يرتبط دائمًا مع ثايمين (T)، وجوانين (G) يرتبط دائمًا مع سايتوسين (C).
يتكوّن RNA من شريط عديد نيوكليوتيد واحد فقط، الذي قد ينطوي حول نفسه كما في حالة tRNA. القاعدة ثايمين في RNA يحل مكانها يوراسيل.
الأدنين والجوانين هي بيورينات يتكوّن تركيبها من حلقتَين (ثنائية الحلقة)، والثايمين والسايتوسين واليوراسيل هي بيريميدينات يتكوّن تركيبها من حلقة واحدة (أحادية الحلقة).
تتضاعف جزيئات DNA أثناء الطور (S)، من الطور البيني عن طريق التضاعف شبه المحافظ. يحتوي كل من الجزيئَين الجديدَين المتكوّنَين على شريط أصلي واحد وشريط جديد واحد.
يشفّر تتابع قواعد النيوكليوتيدات في جزيء DNA لتتابع الأحماض الأمينية في عديد الببتيد. يشفَّر كل حمض أميني بثلاث قواعد. الجين هو تتابع من DNA يشفّر لعديد ببتيد واحد.
يحدث بناء البروتين على مرحلتَين: النسخ والترجمة. تتكوّن أثناء النسخ نسخة RNA مكملة لتتابع القواعد في الجين. تسمّى نسخة RNA، RNA المرسال (mRNA). وتسمّى كل مجموعة من ثلاث قواعد في mRNA تشفر لحمض أميني واحد، كودون.
يتم تعديل جزيء mRNA المتكوّن أثناء النسخ في حقيقيات النواة (النسخة الأولية) بإزالة التتابعات غير المشفرة (الإنترونات)، وربط التتابعات المشفرة (الأكسونات) المتبقية معًا لتكوين آخر جزيء mRNA المستخدم في الترجمة.
ينتقل mRNA أثناء الترجمة إلى الرايبوسوم في السيتوبلازم. وينقل جزيء RNA الناقل (tRNA) الأحماض الأمينية المناسبة إلى الرايبوسوم. يتقدم الرايبوسوم مسافة كودون واحد كل مرة على طول جزيء mRNA، ويحدد تتابع النيوكليوتيدات تتابع الأحماض الأمينية المرتبطة معًا لتكوين عديد الببتيد.
التغيّر في تتابع النيوكليوتيدات في DNA هو طفرة جينية. ويمكن حدوث عدة أنواع من الطفرات الجينية بما في ذلك الاستبدال والحذف والإدخال.

أسئلة نهاية الوحدة

١ أي من الآتي يوجد في كل من DNA و mRNA؟

أ. التركيب اللولبي المزدوج
ب. عمود فقري سكر – فوسفات
ج. الرايبوز
د. الثايمين

٢ أي من العبارات الآتية عن ازدواج القواعد في الأحماض النووية **ليست** صحيحة؟

أ. يمكن أن يرتبط الأدنين مع الثايمين أو اليوراسيل.
ب. يرتبط الجوانين فقط مع السايتوسين.
ج. يمكن أن يرتبط الثايمين مع الأدنين أو اليوراسيل.
د. يرتبط اليوراسيل فقط مع الأدنين.

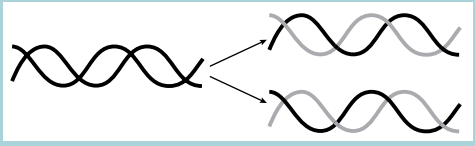
٣ ما الصيغة الرياضية العامة للتنبؤ بعدد الأحماض الأمينية التي يمكن تشفيرها بأربع قواعد؟

أ. $4 + 3$
ب. 4×3
ج. 3^4
د. 4^3

٤ تتكوّن الأحماض النووية من أشرطة مكوّنة من:

أ. أحماض أمينية
ب. قواعد
ج. هستونات
د. نيوكليوتيدات

٥ انقل الرسم الآتي.



اكتب تعليقات توضيحية على الرسم لشرح تضاعف DNA.

٦ انقل الجدول.

يبيّن الجدول جميع الكودونات في mRNA التي تشفر للحمض الأميني ليوسين. أكمل الجدول بكتابة الكودونات المضادة في tRNA لكل كودون يرتبط بها وثلاثية DNA الذي استنسخت منها.

الكودون في mRNA	الكودون المضاد في tRNA	ثلاثية DNA الذي استنسخ منها mRNA
UUA		
UUG		
CUU		
CUC		
CUA		
CUG		

تابع

٧ حدثت طفرة جينية في خلية شخص تنتج أمشاجًا. أدت الطفرة إلى تغير في ثلاثية DNA من CTA إلى GTA. يشفّر CTA للحمض الأميني حمض الأسبارتيك، ويشفّر GTA للحمض الأميني هستيدين.

أ. اذكر نوع الطفرة التي أدت إلى التغيّر من CTA إلى GTA.

ب. اشرح: لماذا يسبب هذا النوع من الطفرات دائمًا تغيّرًا في الحمض الأميني الذي تشفّره الثلاثية المتأثرة؟

ج. اشرح: لماذا يمكن أن تكون الطفرة ضارة؟

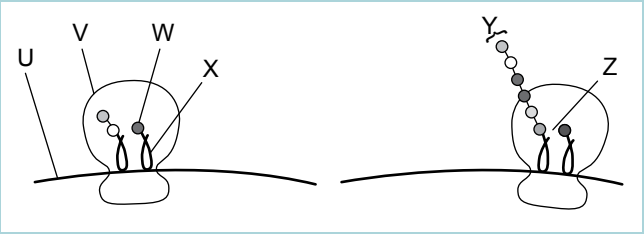
د. اشرح: لماذا الاحتمال الأكثر أن تكون الطفرة ضارة لأنها حدثت في خلية تنتج الأمشاج؟

هـ. يوجد نوعان آخران من الطفرات في القواعد هما الإدخال والحذف. اقترح الأسباب التي تؤدّي غالبًا إلى أن لإدخال ثلاثة نيوكليوتيدات إلى تتابع في DNA أو حذفها منه تأثيرًا أقل على عديد الببتيد المشفر مقارنة مع إدخال أو حذف نيوكليوتيد واحد.

٨ انقل الجدول وأكمله للتمييز بين عمليتَي النسخ والترجمة.

	النسخ	الترجمة
موقع حدوثها في الخلية		
الجزيء المستخدم كقالب		
الجزيء الناتج		
الجزيئات المكوّنة (المونومرات) للجزيء الناتج		
جزيء واحد آخر ضروري لحدوث العملية		

٩ يبيّن الرسم مرحلتَين في بناء عديد الببتيد. يظهر عديد الببتيد واحد من بين التراكيب المرمزة.



أ. حدّد المسمّيات التي تشير إليها الرموز (**U** و **V** و **W** و **X** و **Y**).

ب. يبيّن الرمز **Z** موقع تكوين رابطة كيميائية. اذكر نوع الرابطة التي ستتكوّن.

ج. اشرح سبب انتقال موقع **V** بين المرحلتَين المبيّنتَين.

تابع

١٠ حلل تشارجاف وزملاؤه في الأربعينيات من القرن الماضي مكوّنات قواعد DNA في كائنات حية مختلفة. يبيّن الجدول الأعداد النسبية لقواعد أدنين (**A**)، سايتوسين (**C**)، جوانين (**G**)، وثايمين (**T**) لثلاثة من هذه الكائنات.

الكائن الحي (النسيج)	الأعداد النسبية للقواعد			
	A	C	G	T
الثور (الطحال)	27.9	20.8	22.7	27.3
الثور (الغدة الثيموسية)	28.2	21.2	21.5	27,8
الخميرة	31.3	17.1	18.7	32.9
فيروس بشريط DNA واحد	24.3	18.2	24.5	32.3

اشرح:

أ. لماذا الأعداد النسبية لكل قاعدة في الطحال والغدة الثيموسية للثور هي نفسها تقريبًا (ضمن الخطأ التجريبي)؟

ب. لماذا الأرقام النسبية لكل قاعدة في الخميرة تختلف عن الأرقام في طحال الثور وغدته الثيموسية؟

ج. لماذا نسبة **A** إلى **T** و **C** إلى **G** تساوي تقريبًا 1 في الثور والخميرة (ضمن الخطأ التجريبي)؟

د. لماذا نسبة **A** إلى **T** و **C** إلى **G** في الفيروس لا تساوي 1؟

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أصف تركيب النيوكليوتيدات، بما في ذلك ATP.	١-١			
أصف باختصار تركيب القواعد المكوّنة لـ DNA و RNA (الأدنين والجوانين والثايمين والسايتوسين واليوراسيل).	١-١			
أصف تركيب جزيء DNA متضمنًا أهمية ازدواج القواعد المكملة وأدوار الروابط الهيدروجينية وروابط فوسفات ثنائية الإستر.	١-١			
أصف تركيب RNA، باستخدام المثال RNA المرسال (mRNA).	١-١			
أصف آلية التضاعف شبه المحافظ لجزيء DNA متضمنًا أدوار DNA بوليميريز و DNA لايجيز والفرق بين الشريط المتقدم والشريط المتأخر.	١-٢			
أشرح كيف أن تتابع الأحماض الأمينية في عديد الببتيد مشفر بتتابع من النيوكليوتيدات في DNA (الجين).	١-٣			
أصف مبدأ الشيفرة الجينية العالميّة التي تشفر فيها قواعد DNA لأحماض أمينيّة معيّنة أو تمثل كودونات البدء والإيقاف.	١-٣			
أشرح أدوار DNA و RNA أثناء عمليتَي النسخ والترجمة لبناء عديدات الببتيد وأصف دور كل من RNA بوليميريز و mRNA والكودونات وtRNA والكودونات المضادة والرايبوسومات.	١-٤			
أشرح تعديل جزيء mRNA بعد عمليّة النسخ.	١-٤			
أشرح طبيعة وأنواع وتأثيرات الطفرات الجينية.	١-٥			

الوحدة الثانية

الوراثة

Inheritance

أهداف التعلّم

٢-١ يشرح معنى المصطلحات: الجين، أحادي المجموعة الكروموسوميّة (*n*)، ثنائي المجموعة الكروموسوميّة (*2n*).

٢-٢ يشرح المقصود بـ أزواج الكروموسومات المتماثلة.

٢-٣ يشرح ضرورة الانقسام المنصف خلال الانقسام الاختزالي لتكوين الأمشاج.

٢-٤ يصف سلوك الكروموسومات في الخلايا النباتيّة والخلايا الحيوانيّة أثناء الانقسام الاختزالي بالإشارة إلى سلوك الغلاف النووي وغشاء سطح الخلية وخيوط المغزل (أسماء الأطوار الرئيسيّة للانقسام الاختزالي، مطلوبة: الطور التمهيدي الأول، الطور الاستوائي الأول، الطور الانفصالي الأول، الطور النهائي الأول، الطور التمهيدي الثاني، الطور الاستوائي الثاني، الطور الانفصالي الثاني، الطور النهائي الثاني).

٢-٥ يفسر الصور المجهريّة الضوئيّة والرسوم التخطيطيّة للخلايا في مراحل الانقسام الاختزالي المختلفة، ويحدّد الأطوار الرئيسيّة للانقسام الاختزالي.

٢-٦ يشرح أن عمليّة العبور والاصطفاف العشوائي (التوزيع الحر) لأزواج الكروموسومات المتماثلة والكروماتيدات غير الشقيقة أثناء الانقسام الاختزالي تؤدي إلى تكوين أمشاج مختلفة جينيًا، مع الإشارة إلى الأليلات والارتباط والموقع الكروموسومي.

٢-٧ يشرح أن الاندماج العشوائي للأمشاج عند الإخصاب يؤدي إلى تكوين أفراد مختلفين جينيًا.

٢-٨ يشرح معنى المصطلحات: سائد، مُتنحٍّ، سيادة مشتركة طراز مظهري، طراز جيني، متماثل الأليلات وغير متماثل الأليلات.

٢-٩ يشرح معنى التلقيح الاختباري، الجيل الأول F1، الجيل الثاني F2، والارتباط بالجنس.

٢-١٠ يفسّر ويكوّن مخططات جينيّة بما في ذلك مربعات بانيت، ليشرح ويتنبأ بنتائج تزاوجات أحادية الهجين وتزاوجات ثنائية الهجين تتضمن السيادة التامة والسيادة المشتركة، والأليلات المتعددة والمرتبطة بالجنس.

٢-١١ يفسّر ويكوّن مخططات جينيّة بما في ذلك مربعات بانيت، ليشرح ويتنبأ بنتائج تزاوجات ثنائية الهجين تتضمن المرتبطة بالكروموسوم الجسدي والتفوق الجيني (معرفة النسب المتوقعة من أنواع الجينات المتفوقة ليست مطلوبة).

٢-١٢ يفسّر ويكوّن مخططات جينيّة بما في ذلك مربعات بانيت، ليشرح ويتنبأ بنتائج تزاوجات اختباريّة.

٢-١٣ يشرح الصلة بين الجينات والبروتينات والطراز المظهري مع الإشارة إلى:

الجين *TYR*، وإنزيم تايروسينيز والمهق.

- الجين *HBB*، والهيموجلوبين وفقر الدم المنجلي.
- الجين *F8*، والعامل الثامن VIII، والهيموفيليا.
- الجين *HTT*، وبروتين هنتنغتن ومرض هنتنغتون.

٢-١٤ يصف الاختلافات بين الجينات التركيبيّة والجينات المنظمة والاختلافات بين الإنزيمات القابلة للتثبيط والإنزيمات القابلة للتحفيز.

٢-١٥ يصف تنظيم التحكم الجيني في إنتاج البروتين في الخلايا بدائية النواة باستخدام أوبرون *Lac* (معرفة دور أحادي فوسفات الأدنين الحلقي cAMP ليست مطلوبة).

٢-١٦ يذكر أن عوامل النسخ هي بروتينات ترتبط بـ DNA وتشارك في التحكم بالتعبير الجيني في الخلايا حقيقيّة النواة عن طريق تقليل أو زيادة معدل النسخ.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

اشرح ما يلي:

لماذا ينتج من الانقسام المتساوي خلايا لها التركيب والوظائف نفسها كتلك التي للخلية الأصلية؟

فكر في الآتي:

- ما الذي يحدّد تركيب ووظيفة الخلية؟
- كيف تنتقل المعلومات من خلية إلى أخرى أثناء الانقسام المتساوي؟

العلوم ضمن سياقها

قطط الأوسي Ocicats

في أوائل الستينيات من القرن الماضي أجرت مربية قطط (في الولايات المتحدة) تزاوجًا بين قط سيامي *Siamese cat* وقطة حبشية *Abyssinian cat*، وهما سلالتان موجودتان منذ زمن طويل جدًا. كانت المربية تحاول إنتاج نوع جديد من القطط يتّصف بنمط فراء القط السيامي ولون القطة الحبشية. لذا، لم تهتم بقط صغير ولد بفراء مرقط، والذي أسمته تونجا Tonga، فباعته مشترطة على المشتري أن يخصيه حتى لا يقوم بتكثيره.

بعد زمن قصير، سمع مربي قطط آخر بالقط تونجا، وكان مهتمًا بتكثير القطط المرقطة، فطلب إلى المربية إنتاج المزيد منه، فقامت بإجراء تزاوج ثان بين القط السيامي والقطة الحبشية، فأنجبا أيضًا قطًا مرقطًا آخر. ومع مرور الزمن، أخذ مزيد من المربّين يهتمون بالقطط المرقطة، وتعلّموا تدريجيًا كيف يجرون تزاوجات تنتجها. وقد أطلقوا عليها اسم قطط الأوسي *Ocicats*، لأن فراءها يشبه فراء القط البري الأمريكي المرقط – الأوسيلوت Ocelot.

يتم اليوم تربية قطط الأوسي في العديد من البلدان، ويختار المربون الآباء بعناية، بحيث أصبحوا ينتجون هذه القطط بعدّة ألوان. كما تطوّر فهم أفضل للجينات المنتجة للفراء المرقط، بحيث أصبح المربون قادرين على التنبؤ باحتمالات ظهور الألوان المختلفة في النسل بفعل التزاوجات المختلفة. لكن في علم الوراثة، لا شيء مؤكد، وتحدث دائمًا مفاجآت.

الصورة ٢-١ قط أوسي صغير. تم إنتاج هذا القط ذي الفراء المرقط لأول مرة في ستينيات القرن الماضي.

أسئلة للمناقشة

- في ضوء معرفتك بكيفية عمل الجينات، اقترح كيف يمكن للأشكال المختلفة من الجين إنتاج ألوان فراء مختلفة في قطة أو في حيوان آخر.
- في ضوء معرفتك بالجينات وكيفية عملها، كيف تفسر إنجاب قطّتَين غير مرقطتَين لقطة مرقطة؟

٢-١ الأمشاج والتكاثر

يتكاثر الإنسان والعديد من الحيوانات والنباتات، بواسطة **التكاثر الجنسي** **Sexual reproduction** فقط. يتضمن التكاثر الجنسي تكوين خلايا جنسية خاصة تسمّى **الأمشاج** **Gametes**. تندمج نواتا مشيجَين معًا بعملية تسمّى **الإخصاب** **Fertilization**، وتسمّى الخلية الناتجة من اندماجهما **الزيجوت** **Zygote**. ينقسم الزيجوت تكرارًا عن طريق الانقسام المتساوي مكوّنًا كائنًا حيًا عديد الخلايا. بهذه الطريقة تبدأ حياتك وحياة كل إنسان آخر.

درست سابقًا أن جزيء DNA الموجود في الكروموسومات يحتوي على التعليمات اللازمة لبناء البروتينات في الخلية. وتحتاج كل خلية إلى مجموعة كاملة من هذه التعليمات. يحتوي كل كروموسوم على جزيء DNA، الذي يحتوي بدوره على الشيفرة اللازمة لبناء الكثير من عديدات الببتيد أو البروتينات المختلفة. ويسمّى جزء DNA الذي يشفر لبروتين أو عديد ببتيد واحد، الجين Gene. ومن المهم عندما تنقسم الخلية أن تحتوي كل خلية جديدة ناتجة على مجموعة كاملة من الجينات. وقد درست في الصف الحادي عشر كيف يتم ذلك بواسطة الانقسام المتساوي، لكن في التكاثر الجنسي يوجد بعض الاختلاف.

الخلايا أحادية المجموعة الكروموسومية والخلايا ثنائية المجموعة الكروموسومية

توجد مجموعتان كاملتان من الكروموسومات في نوى معظم خلايا الجسم (ما عدا خلايا الدم الحمراء، لأنها لا تحتوي على نواة مطلقًا). تدعى الخلية التي تحتوي على مجموعتَين من الكروموسومات **ثنائية المجموعة الكروموسومية** **Diploid**. المجموعة الواحدة الكاملة من الكروموسومات تحتوي على مجموعة واحدة كاملة من الجينات، وبالتالي على مجموعة واحدة كاملة من التعليمات لتكوين جميع البروتينات التي يحتاج إليها الكائن الحي. وفي الإنسان هناك 23 كروموسومًا في المجموعة الواحدة الكاملة، وبالتالي يوجد 46 كروموسومًا في الخلية ثنائية المجموعة الكروموسومية.

تبيّن الصورة ٢-٢ مجموعتَي الكروموسومات في خلية الإنسان، وقد تمّ تحريك صور الكروموسومات الفردية بحيث تترتّب في أزواج متطابقة، ولكل كروموسوم منها رقم. وتحتوي الكروموسومات التي تحمل الرقم نفسه على الجينات نفسها في المواقع نفسها، وتسمّى هذه **الكروموسومات المتماثلة** **Homologous chromosomes**.

يساهم كل مشيج أثناء التكاثر الجنسي بمجموعة واحدة من الكروموسومات لتكوين الزيجوت. على سبيل المثال، يبدأ الإنسان حياته عند اندماج مجموعة كروموسومات كاملة من الحيوان المنوي من الأب مع مجموعة كروموسومات كاملة من بويضة الأم، أثناء اندماج نواتي المشيجين. لذا من المهم أن تحتوي الأمشاج على مجموعة واحدة فقط من الكروموسومات. الخلية التي تحتوي على مجموعة واحدة من الكروموسومات تسمّى **أحادية المجموعة الكروموسومية** **Haploid**.

يمكن استخدام الحرف (n) للدلالة على عدد الكروموسومات في المجموعة الواحدة. تحتوي الخلية أحادية المجموعة الكروموسومية على العدد (n) من الكروموسومات، وتحتوي الخلية ثنائية المجموعة الكروموسومية على العدد ($2n$)

مصطلحات علمية

التكاثر الجنسي **Sexual reproduction**: تكاثر يتضمن اندماج الأمشاج بعملية الإخصاب لتكوين الزيجوت.

المشيج **Gamete**: خلية جنسية. وهي غالبًا أحادية المجموعة الكروموسومية.

الإخصاب **Fertilization**: اندماج نواتي مشيجين لتكوين الزيجوت.

الزيجوت **Zygote**: خلية تنتج من اندماج نواتَي مشيجَين. معظم الزيجوتات ثنائية المجموعة الكروموسومية.

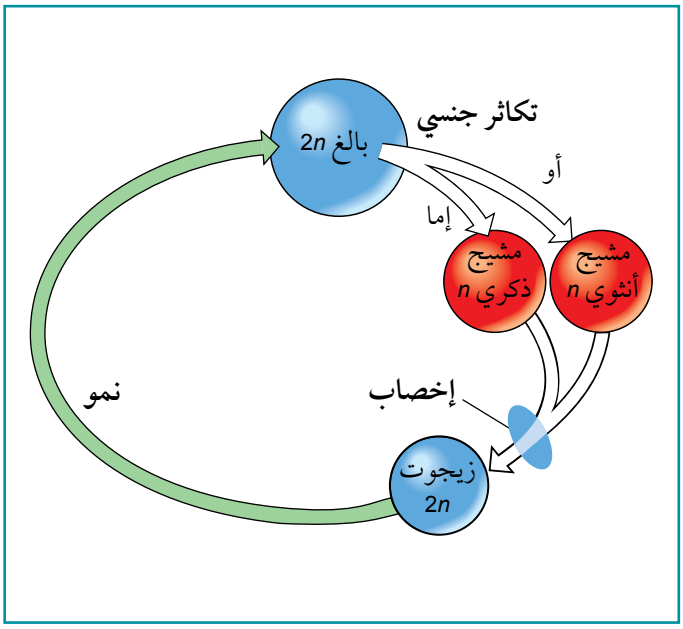
ثنائية المجموعة الكروموسومية **Diploid**: الخلايا التي تحتوي على مجموعتين كاملتين من الكروموسومات، ويمكن الإشارة إليها بالرمز ($2n$).

الكروموسومات المتماثلة **Homologous chromosomes**: كروموسومان يحملان الجينات نفسها وفي المواقع نفسها.

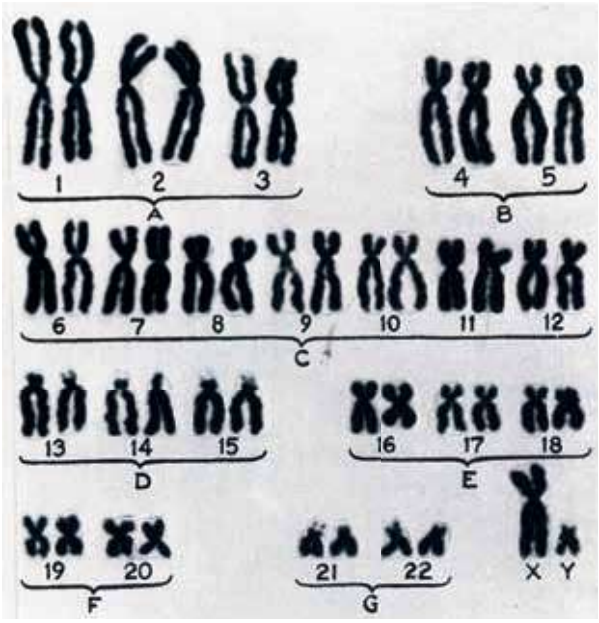
أحادية المجموعة الكروموسومية **Haploid**: تحتوي على مجموعة واحدة من الكروموسومات، ويمكن الإشارة إليها بالرمز (n).

من الكروموسومات. يختلف عدد الكروموسومات في المجموعة الكاملة في الأنواع المختلفة. ففي الإنسان $n = 23$. وفي البعوض $n = 3$، وفي شجرة الأفوكادو $n = 12$.

من الضروري أن تكون الأمشاج أحادية المجموعة الكروموسومية، بحيث عند اندماجهما ينتج زيجوت ثنائي المجموعة الكروموسومية. كما هو مبيّن في الشكل ٢-١.



الشكل ٢-١ مخطط دورة حياة كائن حي ثديي.



الصورة ٢-٢ الكروموسومات في نواة خلية ذكر الإنسان مرتبة في أزواج متماثلة. تسمّى الصورة كهذه مخطط كروموسومي (كاريوجرام).

أسئلة

١ اقترح سبب ترتيب الكروموسومات في الصورة ٢-٢ على النحو الموضح.

٢ يتم إعداد صورة المخطط الكروموسومي عن طريق معالجة الصور الفوتوغرافية للكروموسومات وترتيبها حيث لا تكون الكروموسومات مصطفة بالترتيب المبيّن في الصورة ٢-٢. اقترح الطور من دورة الخلية الذي يتم فيه التقاط صور الكروموسومات هذه، وأعط سببًا لاقتراحك هذا.

٣ انظر إلى الشكل ٢-١. في أي مرحلة / مراحل يحدث الانقسام المتساوي؟

الانقسام الاختزالي

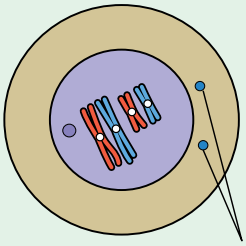
الانقسام الاختزالي Meiosis، نوع من الانقسام الخلوي الذي يؤدي إلى إنتاج خلايا أحادية المجموعة الكروموسومية من خلية ثنائية المجموعة الكروموسومية، وهو يستخدم لإنتاج الأمشاج في الإنسان والحيوان والنبات.

يلخص الشكل ٢-٢ أحداث الانقسام الاختزالي. تابع سلسلة الرسوم التخطيطية أثناء قراءتك للوصف في الفقرات الآتية. وتظهر الصورة ٢-٤ سلسلة صور مجهرية ضوئية لأطوار الانقسام الاختزالي في حبوب لقاح لنبات الزنبق. تابع سلسلة الصور هذه أيضًا وراجعها مرارًا لتتعرَّف على كيفية ظهور الانقسام الاختزالي تحت المجهر الضوئي.

مصطلحات علمية

الانقسام الاختزالي Meiosis: انقسام خلوي يؤدي إلى إنتاج أربع خلايا جديدة تحتوي نواة كل منها على نصف عدد كروموسومات الخلية الأصلية وأليلات معاد تنظيمها، ويحدث في الإنسان والحيوان والنبات ويؤدي إلى تكوين الأمشاج.

الانقسام الاختزالي الأول

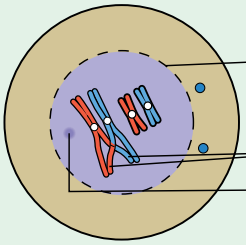


1. بداية الطور التمهيدي الأول
يماثل بداية الطور التمهيدي في الانقسام المتساوي

2. منتصف الطور التمهيدي الأول
تتجمع الكروموسومات المتماثلة بشكل مزدوج. تسمى هذه العملية التشابك Synapsis. ويسمى كل زوج الثنائيات المتكافئة Bivalent

يتحرك الجسمان المركزيان باتجاه الطرفين المتقابلين للخلية كما في الانقسام المتساوي

3. نهاية الطور التمهيدي الأول

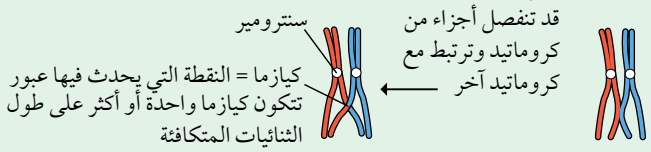


يتفكّك الغلاف النووي كما في الانقسام المتساوي

قد يحدث عبور بين الكروماتيدات

تختفي النوية كما في الانقسام المتساوي

حدوث العبور في الثنائيات المتكافئة



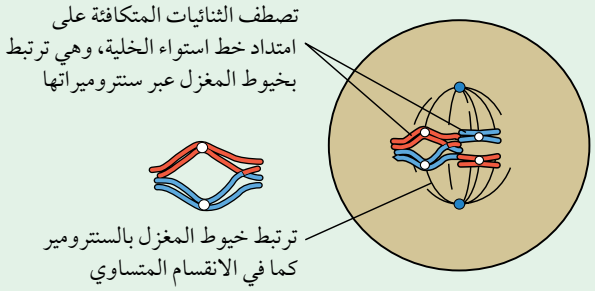
قد تنفصل أجزاء من كروماتيد وترتبط مع كروماتيد آخر

سنترومير

كيازما = النقطة التي يحدث فيها عبور تتكون كيازما واحدة أو أكثر على طول الثنائيات المتكافئة

تظهر خيوط المغزل في نهاية الطور التمهيدي الأول.

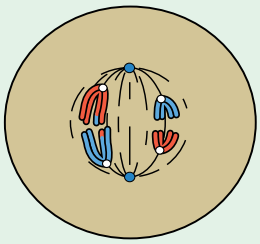
4. الطور الاستوائي الأول (يبيّن العبور لدى الكروماتيدات الطويلة)



تصطف الثنائيات المتكافئة على امتداد خط استواء الخلية، وهي ترتبط بخيوط المغزل عبر سنترومير اتها

ترتبط خيوط المغزل بالسنترومير كما في الانقسام المتساوي

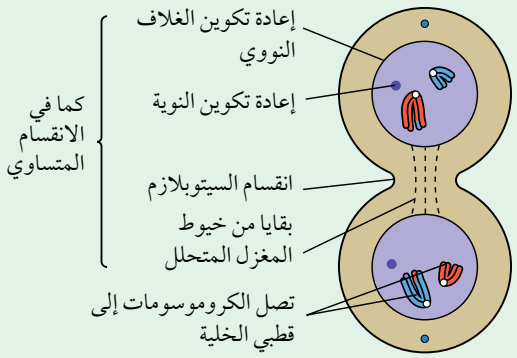
5. الطور الانفصالي الأول



لا تنقسم السنترومير ات هنا على عكس ما يحدث في الانقسام المتساوي

تنفصل الكروموسومات المتماثلة وتتجه كاملة باتجاه القطبين المتقابلين للخلية ، حيث تسحب السنترومير ات أولًا بفعل تَقصّر الأُنيبيبات الدقيقة لخيوط المغزل

6. الطور النهائي الأول



كما في الانقسام المتساوي

إعادة تكوين الغلاف النووي

إعادة تكوين النوية

انقسام السيتوبلازم

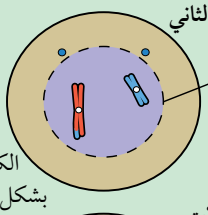
بقايا من خيوط المغزل المتحلل

تصل الكروموسومات إلى قطبي الخلية

يحدث الانقسام السيتوبلازمي في الخلايا الحيوانية عادة قبل مرورها بالانقسام الاختزالي الثاني. تنتقل العديد من الخلايا النباتية إلى الانقسام الاختزالي الثاني من دون إعادة تكوين الغلاف النووي أو النوية. تنفصل الكروماتيدات أثناء الانقسام الاختزالي الثاني كما في الانقسام المتساوي

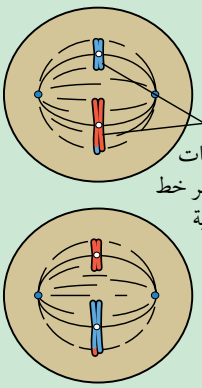
الانقسام الاختزالي الثاني

7. الطور التمهيدي الثاني



يتفكّك الغلاف النووي وتختفي النوية

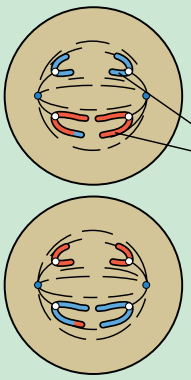
8. الطور الاستوائي الثاني



تصطف الكروموسومات بشكل منفصل عبر خط استواء الخلية

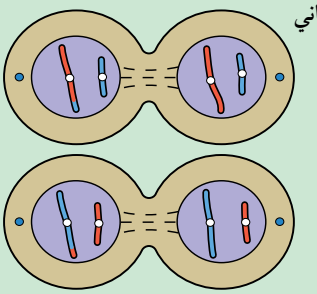
تتضاعف الأجسام المركزية والسنتريولات وتنتقل إلى القطبين المتقابلين من الخلية

9. الطور الانفصالي الثاني



تنقسم السنترومير ات، وتسحب خيوط المغزل الكروماتيدات إلى القطبين المتقابلين

10. الطور النهائي الثاني



يماثل الطور النهائي في الانقسام المتساوي، لكن تتكون في الطور النهائي في الانقسام الاختزالي الثاني أربع خلايا جديدة أحادية المجموعة الكروموسومية

الشكل ٢-٢ الانقسام الاختزالي وانقسام السيتوبلازم في الخلية الحيوانية.

يشمل الانقسام الاختزالي انقسامَين خلويَّين، وليس انقسامًا خلويًا واحدًا كما في الانقسام المتساوي، يُسميان الانقسام الاختزالي الأول Meiosis I والانقسام الاختزالي الثاني Meiosis II. ويتضمن كل انقسام التتابع نفسه للأطوار كما في الانقسام المتساوي وهي الطور التمهيدي، والطور الاستوائي، والطور الانفصالي، والطور النهائي.

مصطلحات علمية

الثنائيات المتكافئة

Bivalent: كروموسومان متماثلان يصطفان أحدهما بجوار الآخر أثناء الانقسام الاختزالي الأول.

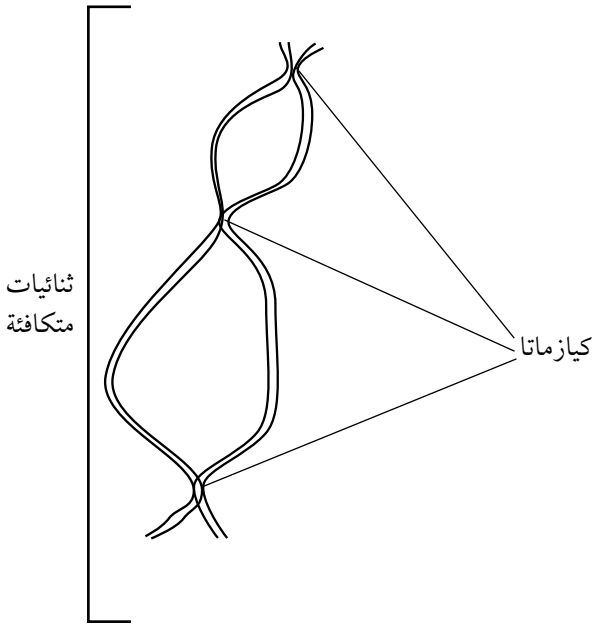
الكيازما Chiasma (جمعها الكيازماتا **Chiasmata**): الموضع الذي تتقاطع فيه الكروماتيدات غير الشقيقة من الكروموسومات المتماثلة.

الطور التمهيدي الأول

يبدأ الانقسام الاختزالي بالطور التمهيدي الأول Prophase I وكما في الانقسام المتساوي، عندما تتكثف الكروموسومات وتصبح مرئية. ويكون كل كروموسوم قد تمّ نسخه في الطور S من الطور البيني، ويصبح كل كروموسوم مكوّنًا من كروماتيدَين «شقيقَين» متطابقين يرتبطان معًا بواسطة السنترومير. وعلى العكس من الانقسام المتساوي فإن الكروموسومات الآن تصطف وتترتب في أزواج متماثلة على سبيل المثال يصطف الكروموسومان رقم 1 أحدهما بجوار الآخر، ويسمّى كل زوج من الكروموسومات المتماثلة **الثنائيات المتكافئة Bivalent**.

يكون الكروموسومان في الثنائيات المتكافئة متقاربَين جدًا. بحيث يتقاطع الكروماتيدان غير الشقيقَين المتقابلان في نقطة تقاطع تسمى **كيازما Chiasma** (جمعها الكيازماتا **Chiasmata**). يوجد غالبًا كيازما واحدة، ولكن قد توجد أكثر من كيازما. في كل زوج من الكروموسومات (الصورة ٢-٣ والشكل ٢-٣). تساعد الكيازماتا على بقاء الكروموسومات مرتبطة معًا في أزواج عند انتقالها عبر الطور الاستوائي الأول. وقد ينكسر جزء من كروماتيد أحد الكروموسومات

الصورة ٢-٣ صورة مجهرية ضوئية تظهر الثنائيات المتكافئة في الطور التمهيدي الأول من الانقسام الاختزالي. تبين الكيازما أن العبور حدث بين كروماتيدَين غير شقيقَين.



الشكل ٢-٣ رسم تفسيري الثنائيات المتكافئة.

مصطلحات علمية

العبور Crossing over: تبادل الأليلات بين الكروماتيدات غير الشقيقة للكروموسومات المتماثلة أثناء الانقسام الاختزالي الأول.

وينفصل عنه ليرتبط مع الكروماتيد غير الشقيق من الكروموسوم المتماثل الآخر بما يسمّى عملية **العبور Crossing over**، وستتعرف لاحقًا في هذه الوحدة على أهميته.

ينتقل الجسمان المركزيان إلى قطبي الخلية أثناء الطور التمهيدي الأول، كما في الانقسام المتساوي، ويبدأ تكوين خيوط المغزل من الأنيبيبات الدقيقة، لترتبط بالسنترومير في أزواج الكروموسومات المتماثلة، ويتفكك الغلاف النووي وتختفي النوية. لا تحتوي الخلايا النباتية على الأجسام المركزية، ولكن تتشكل خيوط المغزل بطريقة مماثلة (الصورة ٢-٤ (أ)).

الطور الاستوائي الأول

في الطور الاستوائي الأول Metaphase I تتحرك خيوط المغزل المرتبطة بالسنترومير باتجاه خط استواء الخلية (الصورة ٢-٤ (ب))، محركة معها الثنائيات المتكافئة. والكروموسومات المتماثلة لكل ثنائية متكافئة تبقى مترابطة عند الكيازماتا.

الطور الانفصالي الأول

في الطور الانفصالي الأول Anaphase I تبدأ خيوط المغزل بسحب السنترومير لتنفصل أزواج الكروموسومات المتماثلة في كل ثنائية متكافئة إحداهما من جوار الأخرى وتتباعدان في اتجاهَين متضادَّين. يتم سحب الكروموسوم بأكمله مع السنترومير الذي يستمر بربط كروماتيدَي كل كروموسوم أحدهما بالآخر، على خلاف ما يحدث في الانقسام المتساوي، حيث يتم سحب كروماتيد كل كروموسوم بدل سحب الكروموسوم كاملًا (الصورة ٢-٤ (ج)).

الطور النهائي الأول

تكون الكروموسومات في الطور النهائي الأول Telophase I قد وصلت إلى الطرفَين المتقابلَين في الخلية المنقسمة. وتبدأ خيوط المغزل بالتحلل بعد أن أنجزت مهمتها في سحب الكروموسومات إلى قطبَي الخلية. في معظم الخلايا الحيوانية يتكوّن غلاف نووي حول كل مجموعة من الكروموسومات كما يتم تكوين النوية. وربما لا يحدث هذا في الخلايا النباتية حيث تنتقل الخلايا إلى المرحلة التالية من الانقسام من دون أن تحدث فيها هذه التغيّرات (الصورة ٢-٤ (د)).

مصطلحات علمية

الانقسام المنصف Reduction division: انقسام خلوي يؤدي إلى تنصيف في عدد الكروموسومات، الانقسام الاختزالي الأول هو انقسام منصف.

يطلق على جميع التغيّرات السابقة **الانقسام المنصف Reduction division**. وتحتوي كل خلية جديدة على مجموعة واحدة كاملة من الكروموسومات تتضمّن كروموسومًا واحدًا من كل زوج متماثل. وفي حين كانت الخلية الأصلية ثنائية المجموعة الكروموسومية، مع مجموعتَين من الكروموسومات، تكون الخلايا الجديدة الناتجة أحادية المجموعة الكروموسومية.

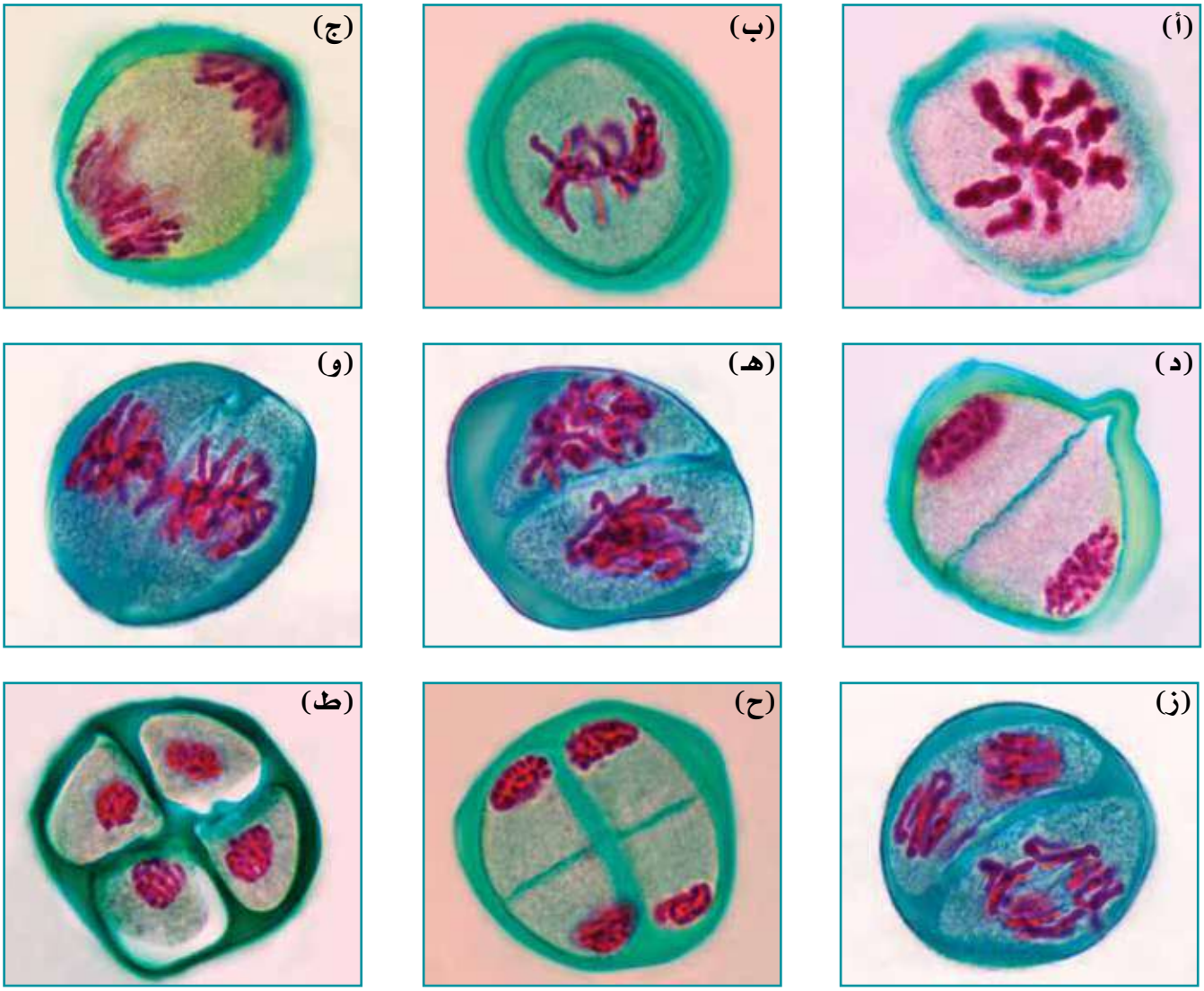
انقسام السيتوبلازم

ينقسم السيتوبلازم عادة إلى قسمَين، مكوّنًا خليتَين كاملتَين في كل منهما عدد أحادي من الكروموسومات.

الطور التمهيدي الثاني، والطور الاستوائي الثاني، والطور الانفصالي الثاني، والطور النهائي الثاني

تمرّ بعد ذلك كل خلية ناتجة أحادية المجموعة الكروموسومية تكوّنت حديثًا بانقسام يماثل تقريبًا الانقسام المتساوي يسمّى الانقسام الاختزالي الثاني. ادرس الشكل ٢-٢ جيدًا لتتذكر تسلسل أحداث أطوار هذا الانقسام في الصورة ٢-٤ التي تبيّن الانقسام الاختزالي الثاني في (هـ، و، ز، ح) والانقسام السيتوبلازمي في (ط). في كل صورة، ما الخصائص أو الميزات التي يمكنك استخدامها لتحديد كل طور؟

تتمثل النتيجة الإجمالية للانقسام الاختزالي بإنتاج أربع خلايا أحادية المجموعة الكروموسومية من خلية واحدة ثنائية المجموعة الكروموسومية. ستلاحظ أن هذه الخلايا ليست متطابقة جينيًا، وعلى الرغم من أن كلًّا منها تحتوي على مجموعة كاملة من الكروموسومات التي تحمل الجينات نفسها، إلّا أن أليلات هذه الجينات لا تكون بالضرورة هي نفسها. وستتعرف في الموضوع التالي، أن أحداث الانقسام الاختزالي تؤدي إلى تباين جيني Genetic variation بين الخلايا الناتجة.



الصورة ٢-٤ صور مجهرية ضوئية لأطوار الانقسام الاختزالي في متك الزنبق، **x400**: (أ) الطور التمهيدي الأول، (ب) الطور الاستوائي الأول،(ج) الطور الانفصالي الأول، (د) الطور النهائي الأول، (هـ) الطور التمهيدي الثاني (و) الطور الاستوائي الثاني (ز) الطور الانفصالي الثاني (ح) الطور النهائي الثاني (ط) الانقسام السيتوبلازمي.

أسئلة

٤ سمّ طور الانقسام الاختزالي الذي يحدث فيه كل ممّا يأتي. اذكر ما إذا كان الطور يحدث أثناء الانقسام الاختزالي الأول أو أثناء الانقسام الاختزالي الثاني.

أ. تزدوج الكروموسومات المتماثلة لتكوين ثنائيات متكافئة.

ب. يحدث العبور بين كروماتيدات الكروموسومات المتماثلة.

ج. تنفصل الكروموسومات المتماثلة.

د. تنقسم السنترومیرات وتنفصل الكروماتيدات.

هـ. تتشكل نوى أحادية المجموعة الكروموسومية لأول مرة.

٥ تسمّى الخلية التي تحتوي على ثلاث مجموعات من الكروموسومات ثلاثية المجموعة الكروموسومية (3*n*). وتسمّى الخلية التي تحتوي على أربع مجموعات من الكروموسومات رباعية المجموعة الكروموسومية (4*n*). هل يمكن أن يحدث انقسام اختزالي في خلية (3*n*) أو خلية (4*n*) ؟ اشرح إجابتك.

٦ عدد الكروموسومات في خلية ذبابة الفاكهة ثنائية المجموعة الكروموسومية (2*n*) هو 8. انقل الجدول ٢-١ وأكمله لتبيّن النتائج المختلفة للانقسام المتساوي والانقسام الاختزالي في خلية ذبابة الفاكهة.

	الانقسام المتساوي	الانقسام الاختزالي
عدد مرات الانقسام		
عدد الخلايا الناتجة		
عدد كروموسومات كل نواة في الخلايا الناتجة		

الجدول ٢-١

٢-٢ كيف يحدث التباين الجيني؟

مصطلحات علمية

موقع كروموسومي Locus: (جمعها مواقع كروموسومية **Loci**) موقع الجين على الكروموسوم.

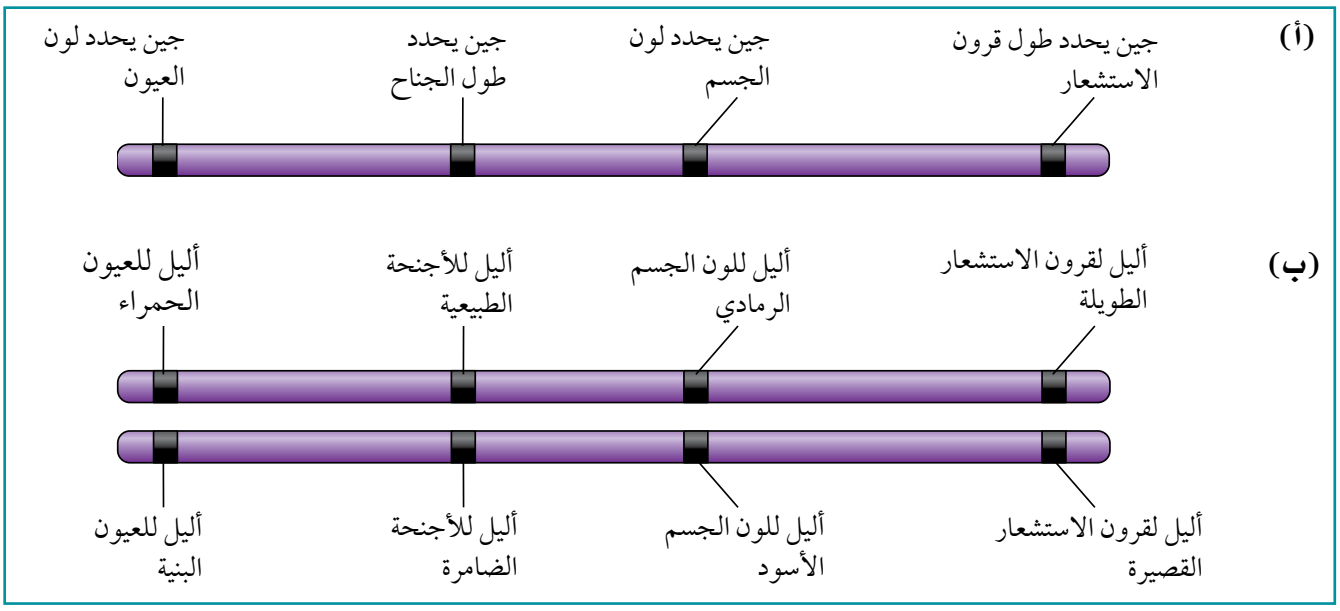
أليل Allele: شكل من أشكال الجين.

لقد درست سابقًا أن كل كروموسوم في زوج الكروموسومات المتماثلة يحتوي على الجينات نفسها الموجودة في المواقع نفسها. وأن موقع الجين على الكروموسوم يسمّى **الموقع الكروموسومي Locus** (جمعها مواقع كروموسومية **Loci**). على سبيل المثال تحتوي ذبابة الفاكهة *Drosophila melanogaster* على أربعة أزواج من الكروموسومات. يوجد على الكروموسوم 2 جينات تساعد في تحديد طول قرون الاستشعار على رأس ذبابة الفاكهة، ولون الجسم، ولون العيون، وطول الجناح. يبيّن الشكل ٢-٤أ مواقع هذه الجينات. يوجد على هذا الكروموسوم عدد من الجينات أكثر بكثير ممّا يظهر في الشكل.

قد تتذكّر أن الجينات توجد بأشكال مختلفة تسمّى **أليلات Alleles**. على سبيل المثال، قد يكون للجين الذي يحدد لون عيون ذبابة الفاكهة أليلات مختلفة تشفر للون العيون الأحمر أو البني. يبيّن الشكل ٢-٤ب أليلين لكل من الجينات الأربعة في الشكل ٢- ٤أ.

لذا، قد يحتوي كل كروموسوم في زوج الكروموسومات المتماثلة في الخلية ثنائية المجموعة الكروموسومية على أليلين مختلفين من الجين نفسه، أي أن الكروموسومَين المتماثلَين ليسا متطابقَين جينيًا.

يحدث أثناء الانقسام الاختزالي الأول عمليتان ينتج منهما تراكيب أليلات جديدة مختلفة في كل خلية ناتجة. هاتان العمليتان هما العبور والتوزيع الحر Independent assortment.



الشكل ٢-٤ (أ) مواقع كروموسومية لأربعة جينات على كروموسوم واحد في ذبابة الفاكهة.
(ب) بعض الأليلات المحتملة لهذه الجينات الأربعة.

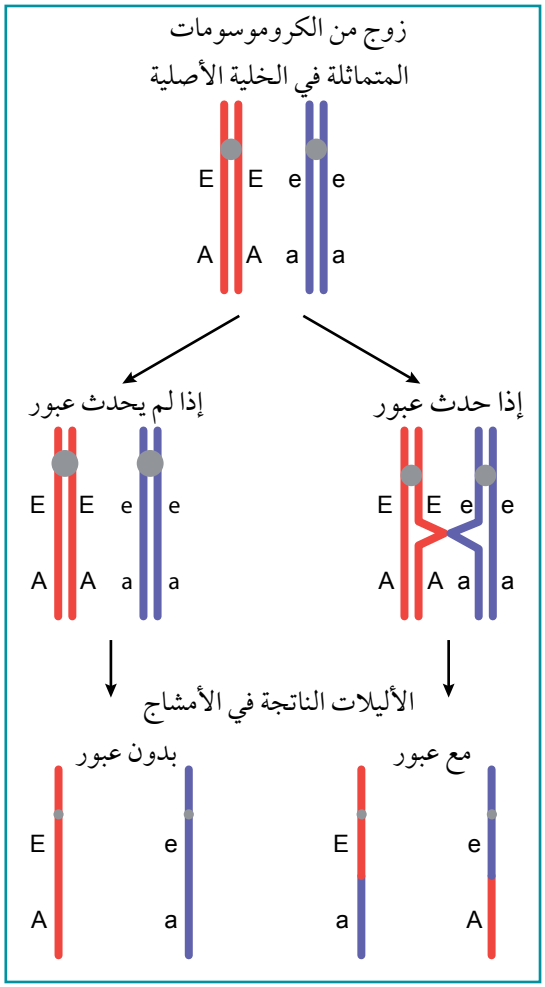
التباين الجيني نتيجة العبور

درست سابقًا في هذه الوحدة، أنه خلال الانقسام الاختزالي الأول يمكن لأجزاء من كروماتيد على كروموسوم في الثنائيات المتكافئة أن تتبادل أماكنها مع أجزاء مكافئة من كروماتيد الكروموسوم الآخر. تسمّى هذه العملية العبور، وتؤدي إلى إنتاج تراكيب مختلفة من الأليلات على الكروموسومَين.

على سبيل المثال، يبيّن الشكل ٢-٤ جينين هما الجين الذي يحدد طول قرون الاستشعار والجين الذي يحدد لون العيون. جين طول قرون الاستشعار له أليلان. يعطي الأليل A قرن الاستشعار الطويل، ويعطي الأليل a قرن الاستشعار القصير. وجين لون العيون له أيضًا أليلان، الأليل E يعطي العيون الحمراء، والأليل e يعطي العيون البنية (الشكل ٢-٥).

تحتوي الخلية الأصلية على جميع الأليلات الأربعة هذه. لاحظ أن أليلَي هذَين الجينَين A و E يقعان على أحد زوجَي الكروموسومات المتماثلة، ويقع الأليلان الآخران للجينَين a و e على الكروموسوم الآخر.

لا يحدث عبور بين موقعَي هذَين الجينَين في بعض الخلايا عندما تزدوج هذه الكروموسومات أثناء الانقسام الاختزالي، وتبقى الأليلات على كروموسومها. بالمقابل يحدث العبور في بعض الخلايا، الأمر



الشكل ٢-٥ كيف ينتج من آلية العبور تباين جيني في الخلايا الناتجة.

الذي يؤدي إلى تبادل مواقع الأليلات على الكروموسومات، فتصبح الأليلات على أحد الكروموسومَين A و e، وعلى الكروموسوم الآخر a و E.

عندما تتكوّن الخلايا الجديدة (الأمشاج) في نهاية الانقسام الاختزالي، سيحصل كل منها على كروماتيد واحد من كل كروموسوم. وسيحصل بعضها على كروماتيدات لم يحدث فيها عبور، لذا سيكون فيها إمّا (A و E) أو (a و e). في حين سيحصل بعضها الآخر على كروماتيدات حدث فيها عبور وسيكون فيها إمّا (A و e)، أو (a و E).

هذا يعني وجود أربعة أنواع من الأمشاج:

الأليلات A و E تشفر لقرن الاستشعار الطويل والعيون الحمراء.

الأليلات a و e تشفر لقرن الاستشعار القصير والعيون البنية.

الأليلات A و e تشفر لقرن الاستشعار الطويل والعيون البنية.

الأليلات a و E تشفر لقرن الاستشعار القصير والعيون الحمراء.

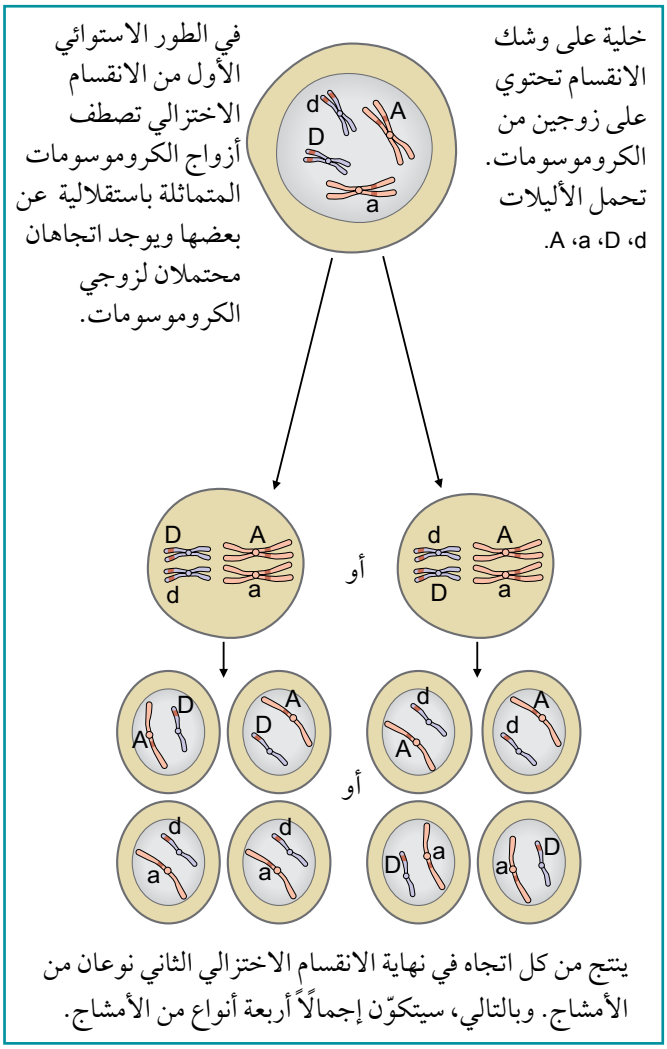
ستدرس في هذه الوحدة لاحقًا كيف سيؤثر هذا الأمر في الأبناء لدى الكائن الحي الذي يحدث فيه عبور.

التباين الجيني نتيجة التوزيع الحر

تعرفت على كيفية حدوث تباين جيني في الخلايا الناتجة من الانقسام الاختزالي عن طريق تبادل الأليلات بين الكروموسومات المتماثلة (العبور)، وستتعرف الآن كيف يمكن أن تسبب أيضًا تراكيب الكروموسومات المختلفة تباينًا جينيًا.

وقد درست في الطور الاستوائي الأول من الانقسام الاختزالي أن الكروموسومات قد ازدوجت، ليتم سحبها في هذا الطور إلى خط استواء الخلية بواسطة خيوط المغزل. وتصطف عشوائيًّا بحيث يمكن لأي كروموسوم في كل زوج أن يتّجه إلى أي قطب في الخلية (الشكل ٢-٦)، وليس لاتجاه أحد الأزواج تأثير على اتجاه أي زوج آخر.

ستعتمد تراكيب الأليلات التي ستوجد في الخلايا الناتجة عندما يتم فصل الكروموسومات المتماثلة بعضها عن بعض على كيفية اصطفاف الكروموسومات المتماثلة. لاحظ أن زوجين من الكروموسومات فقط في كل منهما جين واحد، يمكنهما إنتاج أربعة تراكيب مختلفة محتملة من الأليلات. تخيل إذا كان عدد تراكيب الأليلات المحتملة من 23 زوجًا من الكروموسومات، يحمل كل منها مئات أو آلاف الجينات، بحيث لن تكون هناك حدود



الشكل ٢-٦ كيف ينتج من التوزيع الحر للكروموسومات تباين جيني في الخلايا الناتجة.

مصطلحات علمية

التوزيع الحر Independent assortment: إنتاج تراكيب جينية مختلفة من الأليلات في الخلايا الناتجة بسبب الاصطفاف العشوائي للثنائيات المتكافئة على خط استواء الخلية أثناء الطور الاستوائي الأول من الانقسام الاختزالي.

تقريبًا للرقم الناتج. تسمّى قدرة أي أليل على أن يكون موجودًا في الخلية نفسها التي يوجد بها أليل آخر، **التوزيع الحر Independent assortment**.

وعند النظر إلى تراكيب الكروموسومات وحدها، فستلاحظ وجود 8 388 608 احتمالًا من التراكيب المختلفة للكروموسومات في الإنسان. يمكن حساب ذلك عن طريق حساب 2^n، حيث تمثل n العدد أحادي المجموعة الكروموسومية. وبحساب جميع الأليلات المختلفة في جميع الجينات المختلفة على هذه الكروموسومات، ستلاحظ أن التباينات المحتملة هائلة.

التباين الجيني نتيجة الإخصاب العشوائي

يؤدي كل من مصدرَي التباين الجيني اللذَين درستهما- العبور والتوزيع الحر- إلى إنتاج تراكيب مختلفة من الأليلات في الأمشاج. وإذا افترضنا أن أي مشيج ذكري يمكن أن يندمج مع أي مشيج أنثوي، ومع كل التباينات الكبيرة المحتملة فيها، فمن غير المحتمل أن يكون الأفراد التي أنتجها التكاثر الجنسي متطابقة جينيًا. إذ سيكون لديهم بالتأكيد تراكيب مختلفة من الأليلات.

الجدول ٢-٢ يلخص أسباب وتأثيرات هذه المصادر الثلاثة للتباين الجيني.

مصدر التباين الجيني	كيف يسبب التباين؟	التأثير
العبور أثناء الطور التمهيدي الأول من الانقسام الاختزالي	تغيّر تركيب أليلات جين أو أكثر على الكروموسوم، وبالتالي التركيب الإجمالي للأليلات على ذلك الكروموسوم	تباين جيني بين الأمشاج الناتجة من الفرد
التوزيع الحر أثناء الطور الاستوائي الأول من الانقسام الاختزالي	ينتج من الاصطفاف العشوائي للثنائيات المتكافئة العديد من تراكيب الكروموسومات المختلفة، وبالتالي العديد من تراكيب الأليلات المختلفة	تباين جيني بين الأمشاج الناتجة من الفرد
اندماج الأمشاج عشوائيًا أثناء الإخصاب	يمكن أن يندمج أي مشيج ذكري مع أي مشيج أنثوي	تباين جيني بين أفراد الكائنات الحية الناتجة

الجدول ٢-٢ أسباب وتأثيرات ثلاثة مصادر للتباين الجيني.

٢-٣ الوراثة

الوراثة هي دراسة كيفية انتقال الصفات التي تحددها الجينات من الأباء إلى الأبناء.

تذكّر أن الجين هو تتابع من DNA يشفر لإنتاج جزيء عديد ببتيد. وأن الشيفرة تحمل تتابع قواعد النيوكليوتيدات في جزيء DNA. والثلاثية مكوِّنة من ثلاث قواعد للحمض الأميني الواحد في عديد الببتيد الذي يتم بناؤه على الرايبوسومات في الخلية (الوحدة الأولى، الموضوع ١-٤، بناء البروتين). ويحتوي الكروموسوم الواحد على مقدار من DNA يكفي لتشفير عديدات ببتيد كثيرة.

وسوف تتذكّر من دراستك السابقة أن الجينات توجد بأشكال مختلفة تسمّى أليلات. وأن جين الصفة الواحدة، على سبيل المثال جين لون الفراء في الأرانب، يوجد في الموقع الكروموسومي نفسه وعلى الكروموسوم نفسه لكل الأفراد من النوع الواحد. وستختلف أليلات هذا الجين بعضها عن بعض في تتابع قواعد النيوكليوتيدات. وقد يشفر أليل منها لإنزيم يؤدي إلى إنتاج صبغة بنّية في الفراء، في حين قد يوجد أليل آخر ذو تتابع مختلف من النيوكليوتيدات يؤدي إلى إنتاج إنزيم غير فعّال وظيفيًا ولا يؤدي إلى ظهور أي صبغة مطلقًا، فيكون لون الفراء أبيض.

سيرث كل أرنب أليلًا واحدًا للون الفراء من كل من الأبوين. يمكن استخدام الحرف **B** ليرمز إلى الأليل الذي يشفر للفراء البني، و **b** للأليل الذي يشفر للفراء الأبيض. وسيكون **الطراز الجيني Genotype** للأرانب (تراكيب الأليلات التي ورثتها الأرنب) هو: **bb** أو **Bb** أو **BB**. والطراز الجيني يمكن أن يكون **متماثل الأليلات Homozygous** أو **غير متماثل الأليلات Heterozygous**.

عند وجود نسخة واحدة من الأليل B في الأرنب، تتكوّن إنزيمات فعّالة وظيفيًا تنتج صبغة بنيّة. وفي غياب الأليل B، لن تنتج صبغة. تسمّى الصفات الملحوظة في الكائن الحي **الطراز المظهري Phenotype**. وفي هذه الحالة يكون الطراز المظهري للأرنب إما بنّيًا أو أبيض.

الطراز الجيني	الطراز المظهري
BB	فراء بني
Bb	فراء بني
bb	فراء أبيض

لون فراء الأرنب ذات الطراز الجيني **BB** في هذا المثال هو نفسه في الأرنب ذات الطراز الجيني **Bb**. الأليل **B** **سائد Dominant**، والأليل **b** **مُتنحٍّ Recessive**. ويؤثر الأليل **b** فقط في الطراز المظهري عند غياب الأليل **B**.

وليس هذا هو الحال في جميع أليلات الجينات. على سبيل المثال، يشفر جين له ثلاثة أليلات (**الأليلات المتعددة Multiple alleles**) فصائل الدم في الإنسان. الأليل **A** يعطي فصيلة الدم **A**، والأليل **B** يعطي فصيلة الدم **B**. ومع ذلك، إذا كان لدى شخص نسخة من

مصطلحات علمية

الطراز الجيني
Genotype: الأليلات التي توجد في الكائن الحي.

متماثل الأليلات
Homozygous: وجود أليلَين متطابقَين من الجين.

غير متماثل الأليلات
Heterozygous: وجود أليلَين مختلفين لجين معيّن.

الطراز المظهري
Phenotype: الصفات الملحوظة في الكائن الحي، وهي تتأثر بالجينات وبالبيئة.

سائد Dominant: الأليل السائد له التأثير نفسه على الطراز المظهري، سواء وجد أليل آخر أو لم يوجد.

مُتنحٍّ Recessive: الأليل المتنحي يؤثر فقط في الطراز المظهري في غياب الأليل السائد.

الأليلات المتعددة
Multiple alleles: وجود ثلاثة أليلات أو أكثر لجين معيّن، مثل تحديد فصائل الدم A، B، O.

مصطلحات علمية

سيادة مشتركة Codominant: يؤثر كل من أليلَي السيادة المشتركة في الطراز المظهري عند وجودهما معًا.

A ونسخة من **B**، تكون فصيلة دمه **AB**. هذان أليلان ذات **سيادة مشتركة Codominant**؛ فكلا الأليلين يؤثران في الشخص غير متماثل الأليلات.

في حالة السيادة المشتركة، علينا استخدام طريقة لتوضيحها تختلف بعض الشيء عن تلك التي استخدمت لإظهار جينات لون الفراء السائدة والمتنحية، حيث يرمز الحرف الأساسي إلى الجين، والحروف العلوية ترمز إلى الأليلات، وفي حالة فصائل الدم تكون: I^A لأليل الفصيلة **A**، و I^B لأليل الفصيلة **B**.

ولجين فصيلة الدم أيضًا أليل ثالث يشفر لفصيلة الدم **O**. هذا الأليل مُتنحٍّ للفصيلة **A** والفصيلة **B**، ويرمز إليه I^o. وللتلخيص:

الطراز الجيني	الطراز المظهري
I^AI^B	فصيلة الدم **AB**
I^AI^A	فصيلة الدم **A**
I^AI^o	فصيلة الدم **A**
I^BI^B	فصيلة الدم **B**
I^BI^o	فصيلة الدم **B**
I^oI^o	فصيلة الدم **O**

عندما تجيب عن أسئلة الوراثة، ستساعدك كتابة جميع تراكيب الأليلات – جميع الطرز الجينية المختلفة– والطرز المظهرية المحتملة في فهم مسائل الوراثة.

٤-٢ الوراثة والمخططات الجينية

يمثل نمط تزاوج لوراثة جين مفرد **تزاوج أحادي الهجين Monohybrid cross**. ويسمّى نمط تزاوج لوراثة جينَين مختلفين **تزاوج ثنائي الهجين Dihybrid cross**. ويمكن نمذجة كلا نوعي التزاوج باستخدام المخططات الجينية.

مصطلحات علمية

تزاوج أحادي الهجين Monohybrid cross: نمط تزاوج لوراثة جين واحد.

تزاوج ثنائي الهجين Dihybrid cross: نمط تزاوج لوراثة جينين مختلفين.

مخطط جيني Genetic diagram: طريقة معيارية يمكن من خلالها التنبؤ بنتائج التزاوج الجيني وتفسيره.

التزاوجات أحادية الهجين

من خلال معرفة الطرز الجينية لأبوَين في تزاوج ما، يمكنك التنبؤ بالطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء. تتمثل الخطوة الأولى بإدراك أن الانقسام الاختزالي ينتج أمشاجًا يحتوي كل منها على أليل واحد فقط، لذا سيرث الأبناء أليلًا واحدًا من كل من الأبوَين. يمكن بعد ذلك حساب احتمالات الطرز الجينية والمظهرية للأبناء.

يمكن توضيح كل ذلك في **مخطط جيني Genetic diagram**، والذي يمثل طريقة معيارية للتنبؤ بما يتوقع حدوثه نتيجة للتزاوج.

لقد درست في الصف العاشر نوعًا من التزاوج أحادي الهجين ينتج أبناءً بنسبة 3:1 من أبوين كلاهما غير متماثلي الأليلات، وهنا، ومن خلال الأمثلة التالية ستسترجع هذا النوع قبل أن تتعرّف على أنواع أخرى من هذا التزاوج.

لتوقع ما يمكن حدوثه إذا جرى تزاوج بين أرنبَين غير متماثلَي الأليلات، سيكون المخطط الجيني لهذا التزاوج كما يأتي.

- **الطراز المظهري للأبوين** فراء بنّي × فراء بنّي
- **الطراز الجيني للأبوين** Bb Bb
- **أمشاج الأبوين** (B) أو (b) (B) أو (b)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

أمشاج الأنثى \ أمشاج الذكر	(B)	(b)
(B)	BB فراء بني	Bb فراء بني
(b)	Bb فراء بني	bb فراء أبيض

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: 3 فراء بنّي: 1 فراء أبيض

ومثال آخر على تزاوج أحادي الهجين بين أرنبين أحدهما غير متماثل الأليلات.

- **الطراز المظهري للأبوين** فراء بني × فراء أبيض
- **الطراز الجيني للأبوين** Bb bb
- **أمشاج الأبوين** (B) أو (b) الجميع (b)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

أمشاج الأنثى \ أمشاج الذكر	(B)	(b)
(b)	Bb فراء بني	bb فراء أبيض

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: 1 فراء بني: 1 فراء أبيض

ومن الأمور المهمة التي يجب ملاحظتها وتذكرها حول المخططات الجينية:

- اعرض دائمًا المخطط الجيني الكامل، بما في ذلك العناوين على الجانب الأيمن. سيبيّن ذلك بوضوح لأي شخص يشاهده ما تقوم به، وسيساعدك أيضًا في تذكر ما عملته.

مصطلحات علمية

مربع بانيت Punnett square: جزء من المخطط الجيني يستنبط فيه الطرز الجينية للأبناء من الطرز الجينية للأمشاج.

- الجدول الذي ترسمه ضمن المخطط الجيني يسمّى **مربع بانيت Punnett square**، وهو يمثل جزءًا من المخطط الجيني، وليس مخططًا جينيًا كاملًا.
- في أمشاج الأبوَين تعرض الأنواع المختلفة من الأمشاج التي يمكن أن ينتجها كل من الأبوَين. إذا كان الأب متماثل الأليلات، كما في حالة الأنثى (أحد الأبوين) ذات اللون الأبيض في المخطط الجيني الأول، فسينتج نوع واحد فقط من الأمشاج، لذا عليك إظهار هذا النوع الواحد فقط، وبالتالي لا حاجة إلى كتابة (b) و (b). إذا كتبت الحرف مرتَين فستكون الإجابة صحيحة أيضًا، لكن سيكون المخطط الجيني معقدًا ولا طائل له.

- يتوقع منك عادة توضيح الطراز الجيني للأبناء والطراز المظهري الذي يعبّر عنه. الطريق الأسهل للقيام بذلك كتابة الطراز المظهري في مربع بانيت أسفل الطراز الجيني مباشرة.
- من المهم إدراك أن الطرز الجينية المتوقعة تعتمد جميعها على الاحتمال، ولا يمكن التأكد من أيّ حيوان منوي سيخصب أي بويضة. التوقع في التزاوج بين الأرنبَين غير متماثلي الأليلات الذي ورد سابقًا، سينتج صغارًا (خرانق) لون فرائها بنّي ثلاثة أضعاف الصغار (الخرانق) بلون الفراء الأبيض. لكن النتيجة قد تكون مغايرة. على سبيل المثال، إذا ولد أرنبان فقط فقد يكون لونهما بنّيًا، أو حتى أبيض.
- يتم تكوين المخططات الجينية التي تتضمن أليلات ذات سيادة مشتركة بالطريقة نفسها كما في المثال السابق، لكن بالطبع مع الاستخدام الصحيح لرموز هذه الأليلات.

أسئلة

(٧) كوّن مخططًا جينيًا يبيّن احتمال ولادة طفل فصيلة دمه B لأبوَين فصيلة دمهما AB. استخدم الرمزَين I^A و I^B لتمثيل الأليلات.

(٨) وُلدت طفلة فصيلة دمها O لامرأة فصيلة دمها A ورجل فصيلة دمه B. استخدم هذه المعلومات لتحديد الطرز الجينية للمرأة والرجل، ثم كوّن مخططًا جينيًا توضح فيه كيف ورثت الطفلة فصيلة دمها. استخدم الرموز I^A و I^B و I^O لتمثيل الأليلات.

الجيل الأول F1 والجيل الثاني F2 والتزاوجات الاختبارية

تعرّفت حتى الآن على ما يكفي لتكون قادرًا على الإجابة عن معظم الأسئلة حول التزاوجات التي تتضمن أليلات مختلفة من جين واحد والتي تسمّى تزاوجات أحادية الهجين. ولكنك بحاجة إلى أن تعرف ثلاثة مصطلحات علمية أخرى مرتبطة بهذه التزاوجات.

فعند تزاوج فردَين متماثلَي الأليلات - على سبيل المثال أرنب بنّي متماثل الأليلات **BB** مع أرنب بيضاء متماثلة الأليلات **bb** - فسيعرف الأبناء باسم **الجيل الأول F_1** **First filial generation** ويكون الجميع بالطبع غير متماثلَي الأليلات.

وعند تزاوج فردَين من أفراد الجيل الأول، فسيعرف الأبناء باسم **الجيل الثاني F_2** **Second filial generation**.

لاحظ أن الفرد الذي يتّصف بطراز مظهري مُتنحٍّ يجب أن يكون متماثل الأليلات للأليل المتنحي. يجب أن يكون الطراز الجيني للأرنب البيضاء دائمًا **bb**. بالمقابل فإن الطراز الجيني للأرنب البنّي غير معروف، فقد يكون **Bb** أو **BB**.

يمكن إجراء **تزاوج اختباري** **Test cross** لتحديد الطراز الجيني لفرد يحمل الصفة السائدة في طرازه المظهري. ويتضمن هذا العمل إجراء تزاوج بين الفرد ذي الطراز المظهري السائد وطرازه الجيني غير معروف وفرد طرازه المظهري مُتنحٍّ. ويمكن الحصول على معلومات عن الطراز الجيني للفرد ذي الطراز المظهري السائد من الطرز المظهرية للأبناء الناتجة.

مصطلحات علمية

الجيل الأول F_1 First filial generation: الأبناء الناتجون من تزاوج بين أفراد طرازهم الجيني متنحٍ متماثل الأليلات مع أفراد طرازهم الجيني سائد متماثل الأليلات.

الجيل الثاني F_2 Second filial generation: الأبناء الناتجون من تزاوج بين أفراد الجيل الأول.

تزاوج اختباري Test cross: تزاوج فرد بصفة سائدة مع فرد بصفة متنحية متماثلة الأليلات. يمكن أن تشير الطرز المظهرية للأبناء الناتجة ما إذا كان الطراز الجيني للفرد ذي الصفة السائدة متماثل الأليلات أم غير متماثل الأليلات.

أسئلة

٩ كوّن مخططًا جينيًا يوضح أن جميع الأبناء الناتجة من تزاوج أرنب بنّي متماثل الأليلات وأرنب بيضاء ستكون في الجيل الأول F_1 أرانب بنّية غير متماثلة الأليلات.

١٠ بناءً على التزاوج الموضح في السؤال ٩، كوّن مخططًا جينيًا للتنبؤ بنسب الطرز المظهرية في الجيل الثاني F_2.

١١ **أ.** أُجري تزاوج بين أرنب بنّي وأرنب بيضاء، فأنجبا خمس أرانب بنّية وأرنبًا واحدة بيضاء. استخدم المخطط الجيني لتوضح كيف تدل هذه النتيجة أن الأرنب البنّي يجب أن يكون غير متماثل الأليلات.

ب. أجري تزاوج اختباري ثان بين أرنب آخر بنّي وأرنب بيضاء، فأنجبا أربعة صغار جميعها بنّية. اشرح: لماذا تشير هذه النتيجة إلى أن الأرنب البنّي قد يكون متماثل الأليلات ولكنها لا تتيح لك التأكد من ذلك؟

مصطلحات علمية

الكروموسومات الجنسية
Sex chromosomes: الكروموسومات التي تحدد الجنس. وهي في الإنسان X و Y.

الارتباط بالجنس

عندما تنظر إلى الصورة ٢-٢ يمكنك أن ترى أن الكروموسومَين الأخيرَين في صورة المخطط الكروموسومي Karyogram ليسا متماثلَين. يطلق على هذين الكروموسومَين اسم **الكروموسومات الجنسية** **Sex chromosomes**. في ذكر الإنسان، أحد هذين الكروموسومَين قصير ويحتوي على عدد قليل من الجينات ويسمّى الكروموسوم Y، والآخر أطول بكثير ويحتوي على العديد من الجينات التي لا توجد على الكروموسوم Y، ويسمّى الكروموسوم X. عند ذكر الإنسان كروموسوم واحد من كل من هذين الكروموسومَين (XY)، وعند أنثى الإنسان كروموسومان (XX).

يشفر أحد الجينات على الكروموسوم X لإنتاج عامل ضروري في تخثّر الدم يسمّى العامل الثامن F8 . ولهذه الصفة أليلان، الأليل السائد الذي يشفر للعامل الثامن الطبيعي، والأليل المتنحي الذي ينتج منه غياب العامل الثامن. يمكن استخدام الحرفَين F و f لهذين الأليلَين. فالشخص الذي لديه الأليل المتنحي فقط، وليس لديه الأليل السائد، لا يستطيع تكوين العامل الثامن، ولا يتخثر دمه بشكل طبيعي، ويكون مصابًا بمرض الهيموفيليا Haemophilia (نزف الدم الوراثي).

لأنثى الإنسان كروموسومان X في كل منهما نسخة واحدة من هذا الجين، لذا لديها ثلاثة طرز جينية محتملة. وحيث إن الجينات توجد على الكروموسوم X، تُوضَّح الطرز المحتملة كالآتي:

الطراز الجيني	الطراز المظهري
X^FX^F	أنثى بتخثر طبيعي للدم
X^FX^f	أنثى بتخثر طبيعي للدم
X^fX^f	أنثى مصابة بالهيموفيليا

بالمقابل، لذكر الإنسان كروموسوم X واحد فقط، لذلك يمكن أن يكون لديه طرازان جينيان فقط، تُوضَّح الطرز المحتملة كالآتي:

الطراز الجيني	الطراز المظهري
X^FY	ذكر بتخثر طبيعي للدم
X^fY	ذكر مصاب بالهيموفيليا

يوصف هذا الجين بأنه **مرتبط بالجنس** **Sex-linked**، لأنه يوجد فقط على الكروموسوم X، وتتأثر وراثته بجنس الفرد. على سبيل المثال، يبيّن المخطط الجيني الآتي الأبناء المحتمل إنجابهم من زواج امرأة غير متماثلة الأليلات برجل لديه تخثر طبيعي للدم.

- **الطراز المظهري للأبوين**: أنثى بتخثر طبيعي للدم × ذكر بتخثر طبيعي للدم
- **الطرازالجيني للأبوين**: X^FX^f — X^FY
- **أمشاج الأبوين**: X^f أو X^F — X^F أو Y

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

أمشاج الأنثى	أمشاج الذكر: X^F	أمشاج الذكر: Y
X^F	X^FX^F أنثى بتخثر طبيعي للدم	X^FY ذكر بتخثر طبيعي للدم
X^f	X^FX^f أنثى بتخثر طبيعي للدم	X^fY ذكر مصاب بالهيموفيليا

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: 2 أنثى بتخثر طبيعي للدم: 1 ذكر بتخثر طبيعي للدم: 1 ذكر مصاب بالهيموفيليا

لم يكن أيّ من الأبوَين مصابًا بالهيموفيليا، لكن كان هناك احتمال واحد من أربعة احتمالات أن يُنجبا طفلًا ذكرًا مصابًا بالهيموفيليا. فمصدر أليل الهيموفيليا من الأم (غير متماثلة الأليلات، وتحمل أليل الهيموفيليا)، لذا فهي **حاملة** **Carrier** لأليل مرض الهيموفيليا من دون إظهار أعراضه.

مصطلحات علمية

مرتبط بالجنس **Sex- linked**: جين يوجد على منطقة من كروموسوم جنسي. توجد معظم الجينات المرتبطة بالجنس عند الإنسان على الكروموسوم X.

حامل **Carrier**: الفرد الذي يوجد لديه أليل معيّن كنسخة واحدة (من الجين) بحيث يحجب تأثيره (التعبير عنه) وجود أليل سائد، فلا تظهر الصفة المرتبطة به (مثل مرض وراثي) لكن يمكن أن تنتقل إلى الأبناء.

أسئلة

(١٢) اشرح سبب عدم وراثة الابن الذكر الهيموفيليا من أبيه.

(١٣) يوجد جين على الكروموسوم X عند الإنسان يحدد القدرة على رؤية اللونَين الأحمر والأخضر. ويمنع أليل مُتنحٍّ شائع هذه القدرة، لذا لا يستطيع الشخص التمييز بين اللونَين الأحمر والأخضر، أي أنه مصاب بعمى ألوان الأحمر والأخضر.

أ. اقترح رموزًا مناسبة لأليلَي هذا الجين.

ب. استخدم الرموز التي اخترتها لتكوين مخطط جيني للتنبؤ باحتمال ولادة طفل ذكر مصاب بعمى ألوان لأب رؤيته طبيعية وأم غير متماثلة الأليلات، (بيّن الكروموسومَين X و Y، ورموز الأليلات).

(١٤) أحد جينات لون الفراء في القطط مرتبط بالجنس. يشفر الأليل C^O للفراء البرتقالي، ويشفر الأليل C^B للفراء الأسود. ولهذَين الأليلَين سيادة مشتركة. وعندما يوجد كلاهما معًا، يكون نمط فراء القط مرقطًا مع

بقع برتقالية وبقع سوداء، وسميت هذه القطط باسم قطط صدفة السلحفاة Tortoiseshell cats نسبة إلى لون الفراء الذي يشبه لون صدفة السلحفاة.

أ. اشرح السبب الذي يمنع أن تكون ذكور القطط من نوع صدفة السلحفاة؟

ب. ارسم مخططًا جينيًا يظهر الطرز الجينية والطرز المظهرية المتوقعة للأبناء الناتجين من تزاوج قط فراؤه برتقالي مع قطة من نوع صدفة السلحفاة.

التزاوجات ثنائية الهجين

بعد أن درست وراثة أليلات لجين واحد فقط، ستدرس الآن وراثة جينَين مختلفَين، بما يسمّى التزاوج ثنائي الهجين Dihybrid cross.

ارجع إلى مثال لون فراء الأرنب (الأليلان **B** و **b** للونين البنّي والأبيض)، وفكّر في طول الأذن أيضًا. افترض وجود أليلَين لطول الأذن، **E** للأذن الطويلة، و **e** للأذن القصيرة. حيث الأليل **E** سائد والأليل **e** مُتنحٍّ. يوجد جين لون الفراء وجين طول الأذن على كروموسومَين مختلفَين.

ويمكن أن تشكل أليلات هذين الجينَين العديد من الطرز الجينية والطرز المظهرية المختلفة التي يجدر التفكير فيها، كالآتية:

الطراز الجيني	الطراز المظهري
BB EE	فراء بنّي، أذنان طويلتان
BB Ee	فراء بنّي، أذنان طويلتان
BB ee	فراء بنّي، أذنان قصيرتان
Bb EE	فراء بنّي، أذنان طويلتان
Bb Ee	فراء بنّي، أذنان طويلتان
Bb ee	فراء بنّي، أذنان قصيرتان
bb EE	فراء أبيض، أذنان طويلتان
bb Ee	فراء أبيض، أذنان طويلتان
bb ee	فراء أبيض، أذنان قصيرتان

لاحظ كيف تكتب الطرز الجينية: يكتب أولًا الطراز الجيني لجين واحد، ويليه مباشرة الطراز الجيني للجين الثاني. لا تخلط حرف **B** مع حرف **E**.

فكّر الآن في الأمشاج التي يمكن أن تنتجها أرانب طرزها الجينية **BbEe**. أثناء الانقسام الاختزالي يكون سلوك الكروموسوم الذي يحمل الجين **B/b** مستقلًا عن سلوك الكروموسوم الذي يحمل الجين **E/e**. وفي نهاية الانقسام الاختزالي، ستنتج هذه الأرانب أربعة أنواع من الأمشاج (الحيوانات المنوية أو البويضات). سيحتوي نصفها على الأليل **B** ويحتوي نصفها الآخر على الأليل **b** للون الفراء. ومن بين هذه الأمشاج، سيحتوي نصف تلك التي تحتوي على الأليل **B**، على الأليل **E** لطول الأذن، ويحتوي النصف الآخر على الأليل **e**. والأمر نفسه ينطبق على الأليل **b**. لذا تكون الطرز الجينية لأمشاج الأرنب هي:

be **bE** **Be** **BE**

ملاحظات:

- سيكون لدى الأمشاج نسخة واحدة فقط من كل جين، كما في حالة التزاوج أحادي الهجين.
- تكتب أليلات الجينين بجوار بعضها.
- يُفضل دائمًا كتابة الجين نفسه أولًا – لا تبدل مكان حرف **B** وحرف **E**.

لنفكر الآن في نتائج تزاوج أرنب طرازها الجيني **BbEe** مع أرنب طرازه الجيني **Bbee**.

- **الطراز المظهري للأبوين** فراء بنّي، أذنان طويلتان × فراء بنّي، أذنان قصيرتان
- **الطراز الجيني للأبوين** **BbEe** **Bbee**
- **أمشاج الأبوين** (BE) (Be) (bE) (be) (Be) (be)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

		أمشاج الذكر	
		(Be)	(be)
أمشاج الأنثى	(BE)	**BBEe** فراء بنّي، أذنان طويلتان	**BbEe** فراء بنّي، أذنان طويلتان
	(Be)	**BBee** فراء بنّي، أذنان قصيرتان	**Bbee** فراء بنّي، أذنان قصيرتان
	(bE)	**BbEe** فراء بنّي، أذنان طويلتان	**bbEe** فراء أبيض، أذنان طويلتان
	(be)	**Bbee** فراء بنّي، أذنان قصيرتان	**bbee** فراء أبيض، أذنان قصيرتان

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: 3 فراء بنّي أذنان طويلتان: 3 فراء بنّي أذنان قصيرتان: 1 فراء أبيض أذنان طويلتان: 1 فراء أبيض أذنان قصيرتان

ملاحظة:

- يمكن أن ينتج أحد الأبوَين، ذو الطراز الجيني **Bbee** نوعَين من الأمشاج فقط. لذا عليك أن توضّح فقط هذين النوعَين – لا حاجة إلى أن تكرر كل نوع مرتَين (لا يُعدّ تكرار كتابة الأمشاج هنا خطأ، لكن سيكون حجم مربع بانيت الذي تكوّنه ضعف ما يجب أن يكون عليه، وستحتاج إلى وقت أطول لإكماله).
- توخَّ الحذر عند كتابة الطرز الجينية في مربع بانيت. اكتب دائمًا أليلَي أحد الجينات متبوعَين بأليلَي الجين الآخر. لا تخلط حرف **B** مع حرف **E**.

يرد تاليًا مثال آخر على التزاوج ثنائي الهجين.

في نبات الطماطم جين يشفّر للون الساق. لهذا الجين أليلان:

جين لون الساق

A = أليل الساق الأرجوانية

a = أليل الساق الخضراء

الأليل **A** سائد والأليل **a** مُتنحٍّ

ويوجد جين آخر في موقع كروموسومي آخر على كروموسوم مختلف يشفر لشكل الورقة.

جين شكل الورقة

D = أليل الأوراق المسننة

d = أليل الأوراق الملساء

الأليل **D** سائد والأليل **d** مُتنحٍّ

- **الطراز المظهري للأبوين** ساق أرجوانية، أوراق مسننة × ساق خضراء، أوراق ملساء
- **الطراز الجيني للأبوين** **AaDd** **aadd**
- **أمشاج الأبوين** (AD) (Ad) (aD) (ad) (ad)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

	أمشاج الذكر
	(ad)
أمشاج الأنثى (AD)	**AaDd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة
أمشاج الأنثى (Ad)	**Aadd** ساق أرجوانية، أوراق ملساء
أمشاج الأنثى (aD)	**aaDd** ساق خضراء، أوراق مسننة
أمشاج الأنثى (ad)	**aadd** ساق خضراء، أوراق ملساء

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأفراد الناتجة:

أربعة طرز مظهرية مختلفة بنسبة 1 : 1 : 1 : 1

هذا مثال على تزاوج اختباري ثنائي الهجين. إذا زاوجت فردًا يظهر صفات سائدة في الطراز المظهري مع آخر يظهر صفات متنحية، يمكن استخدام الطرز المظهرية للأبناء لمعرفة الطراز الجيني المجهول للأب.

إذا زاوجت نباتَي طماطم كلاهما غير متماثل الأليلات في كلا الموقعَين الكروموسوميَّين، فستحصل على النسبة 9: 3: 3: 1. يوضح المخطط الجيني الآتي كيفية ذلك.

- **الطراز المظهري للأبوين**: ساق أرجوانية، أوراق مسننة × ساق أرجوانية، أوراق مسننة
- **الطراز الجيني للأبوين**: Aa Dd × Aa Dd
- **أمشاج الأبوين**: (AD) (Ad) (aD) (ad) × (AD) (Ad) (aD) (ad)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

أمشاج الأنثى \ أمشاج الذكر	(AD)	(Ad)	(aD)	(ad)
(AD)	**AADD** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**AADd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**AaDD** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**AaDd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة
(Ad)	**AADd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**AAdd** ساق أرجوانية، أوراق ملساء	**AaDd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**Aadd** ساق أرجوانية، أوراق ملساء
(aD)	**AaDD** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**AaDd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**aaDD** ساق خضراء، أوراق مسننة	**aaDd** ساق خضراء، أوراق مسننة
(ad)	**AaDd** ساق أرجوانية، أوراق مسننة	**Aadd** ساق أرجوانية، أوراق ملساء	**aaDd** ساق خضراء، أوراق مسننة	**aadd** ساق خضراء، أوراق ملساء

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأفراد الناتجة: 9 ساق أرجوانية، أوراق مسننة: 3 ساق أرجوانية، أوراق ملساء: 3 ساق خضراء، أوراق مسننة: 1 ساق خضراء، أوراق ملساء

هذه النسبة 9: 3: 3: 1 نموذجية للتزاوج ثنائي الهجين، الذي يكون فيه كل من الأبوَين غير متماثل الأليلات في الموقعَين الكروموسوميَّين للجينَين.

أسئلة

(١٥) أليل لون الجسم الرمادي في نوع من الحيوانات سائد على لون الجسم الأبيض، وأليل لون العيون القاتمة سائد على أليل لون العيون الفاتحة.

أ. باستخدام الرموز G و g لأليلات لون الجسم، و D و d لأليلات لون العيون، كوّن مخططًا جينيًا يظهر الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء المتوقعين من تزاوج بين حيوان متماثل الأليلات للون الجسم الرمادي وعينَين قاتمتَين وآخر متماثل الأليلات للون الجسم الأبيض وعينَين فاتحتَين.

ب. إذا تزاوج أفراد الجيل الأول F_1 معًا، فماذا تتوقع أن تكون الطرز المظهرية للأبناء من الجيل الثاني؟ وبأي نسبة؟ استخدم المخطط الجيني لشرح إجابتك.

(١٦) في نوع من النباتات أليل الساق الطويل سائد على أليل الساق القصير، وأليلا لون الأوراق ينتجان أوراقًا باللون الأخضر أو الأبيض في حالة تماثل الأليلات، وهما ذات سيادة مشتركة، وينتجان أوراقًا مبرقشة (مبقعة باللونَين الأخضر والأبيض) في حال كانت الأليلات غير متماثلة.

تمّ تزاوج نبات سيقانه طويلة وأوراقه خضراء مع نبات سيقانه قصيرة وأوراقه مبرقشة. فتكوّن الجيل الناتج من نباتات سيقانها طويلة وأوراقها خضراء ونباتات سيقانها طويلة وأوراقها مبرقشة، بنسبة 1:1. كوّن مخططًا جينيًا لشرح هذا التزاوج.

(١٧) في نوع من الحيوانات أليل العيون السوداء B سائد على أليل العيون الحمراء b، وأليل الفراء الطويل F سائد على أليل الفراء القصير f.

أ. ما الطرز الجينية المحتملة لحيوان بعينَين سوداوَين وفراء طويل؟

ب. كيف يمكن معرفة الطراز الجيني لهذا الحيوان؟

مصطلحات علمية

التفوق الجيني

Epistasis: تفاعل بين جينَين في موقعَين كروموسوميَّين مختلفَين، يؤثر أحدهما في تعبير الجين الآخر.

يوجد في بعض الأحيان جينان مختلفان على كروموسومات مختلفة تؤثر في الصفة نفسها، حيث تؤثر أليلات جين على تعبير الجين الآخر، بما يسمّى **التفوق الجيني Epistasis**.

على سبيل المثال، في وراثة لون الريش في الدجاج يوجد تفاعل بين موقعي جينين على كروموسومين مختلفين F/f و G/g . يحدد الجين G/g ما إذا كان الطائر سينتج ريشًا ملوّنًا أم لا، حيث يشفر الأليل G لصبغة تنتج ريشًا ملوّنًا، في حين لا ينتج الأليل g أي صبغة، لذا يكون للدجاج ريش أبيض. لكن هذا الجين يتأثر بالجين F/f. فالأليل السائد F يمنع إنتاج الريش الملوّن، ولو كان لدى الطائر الأليل G.

الطرز الجينية والطرز المظهرية المحتملة كما ياتي:

الطراز الجيني	الطراز المظهري
FF GG	ريش أبيض
FF Gg	ريش أبيض
FF gg	ريش أبيض
Ff GG	ريش أبيض
Ff Gg	ريش أبيض
Ff gg	ريش أبيض
ff GG	ريش ملوّن
ff Gg	ريش ملوّن
ff gg	ريش أبيض

أسئلة

(١٨) ارجع إلى القائمة السابقة. سلالة من دجاج تسمى الليجهورن الأبيض White Leghorn طرازه الجيني **FFGG**، وسلالة أخرى تسمّى وايندوت الأبيض White Wyandotte طرازه الجيني **ffgg**.

أ. كوّن مخططًا جينيًا يبيّن أن الجيل F_1 الناتج من تزاوج بين طيرين أحدهما من سلالة دجاج ليجهورن والآخر من سلالة دجاج وايندوت الأبيض، سيكون ريشه أبيض.

ب. كوّن مخططًا جينيًا ثانيًا للتنبؤ بالطرز المظهرية للأفراد الناتجة من تزاوج بين أثنين من الطيور من الجيل الأول F_1 هذا.

(١٩) في نبات السالفيا Salvia، يتأثر لون الأزهار بجينَين A/a و B/b. يشفر الأليل B للأزهار الأرجوانية اللون وهو سائد على الأليل b الذي يشفر للأزهار الوردية اللون. ومع ذلك لا ينتج أي من اللونَين إلا بوجود الأليل A أيضًا.

أ. كوّن قائمة بالطرز الجينية التسعة والطرز المظهرية المحتملة التي سينتجها كل منهما.

ب. كوّن مخططًا جينيًا يبيّن كيف أن تزاوجًا بين نبات سالفيا أزهاره وردية اللون متماثل الأليلات ونبات سالفيا أزهاره بيضاء اللون متماثل الأليلات يمكن أن ينتج نسلًا من الأزهار جميع أفراده أرجوانية اللون.

ج. كوّن مخططًا جينيًا ثانيًا لتشرح السبب في أن التزاوج الداخلي Interbreeding لأفراد هذا النسل ينتج جيلًا ثانيًا F_2 من النبات أزهار أفراده أرجوانية ووردية وبيضاء اللون بنسبة 9: 3: 4.

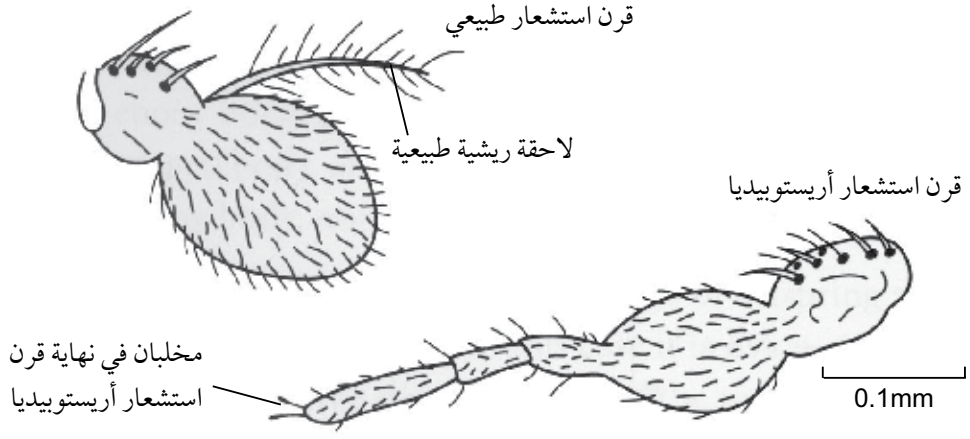
مصطلحات علمية

الارتباط بالكروموسوم الجسدي Autosomal linkage: وجود جينَين على الكروموسوم الجسدي نفسه (كل الكروموسومات ما عدا الكروموسومات الجنسية)، لذا يميلان إلى أن يورثا معًا، ولا يتوزعان بشكل مستقل.

الارتباط بالكروموسوم الجسدي

عندما يكون موقع جينَين أو أكثر على الكروموسوم نفسه، فإنها لا تتوزع بشكل مستقل في الانقسام الاختزالي كما لو كانت على كروموسومات مختلفة. تبقى (تُورَّث) هذه الجينات معًا في التركيب نفسه كما في الأبوَين، فتسمّى جينات مرتبطة Linked genes.

ويطلق عليه **الارتباط بالكروموسوم الجسدي Autosomal linkage**، وهو يشمل جميع الكروموسومات ما عدا الكروموسومات الجنسية. مثال على ذلك: لذبابة الفاكهة *Drosophila*



الشكل ٢- ٧ قرن استشعار ذبابة الفاكهة طبيعي وقرن استشعار أريستوبيديا.

الطبيعية جسم رمادي وقرون استشعار ذات لواحق ريشية Arista (الشكل ٢-٧). ويكون جين لون الجسم وجين شكل قرون الاستشعار متقاربَين على الكروموسوم نفسه، لذا فهما مرتبطان.

ينتج الجسم الأسود من أليل مُتنحٍّ يسمى الأبنوسي Ebony. والأليل المتنحي لشكل قرون الاستشعار المسمّى «أريستوبيديا Aristopedia» ينتج قرن استشعار يخلو من لاحقة ريشية ويشبه شكله إلى حد ما شكل أرجل ذبابة الفاكهة، مع مخلبَين في نهايته.

وأليلات هذَين الجينَين التي تؤثر في لون الجسم وشكل قرون الاستشعار، هي:

جين لون الجسم

E = أليل الجسم الرمادي
e = أليل الجسم الأبنوسي

جين شكل قرون الاستشعار

A = أليل شكل قرن الاستشعار الطبيعي
a = أليل شكل قرن الاستشعار أريستوبيديا

جرى تزاوج بين ذبابة متماثلة الأليلات ذات جسم رمادي وقرون استشعار طبيعية وذبابة متماثلة الأليلات ذات جسم أبنوسي وقرون استشعار أريستوبيديا. كان لجميع أفراد النسل الناتج جسم رمادي وقرون استشعار طبيعية. كوّن مخططًا جينيًا لتبيان ذلك.

لتسهيل تتبع الأليلات المرتبطة في المخطط الجيني يمكن وضع فئات الجينات المرتبطة بين قوسَين. فعلى سبيل المثال تكتب أليلات الطراز الجيني **EEAA**، هكذا (**EA**)، (**EA**).

- **الطراز المظهري للأبوين**: ذكر، جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية × أنثى، جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا
- **الطراز الجيني للأبوين**: **(EA)(EA)** × **(ea)(ea)**
- **أمشاج الأبوين**: **EA** × **ea**

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

	أمشاج الذكر
	EA
أمشاج الأنثى **ea**	**(ea)(EA)** جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: جميع الأبناء الناتجة لها جسم رمادي وقرون استشعار طبيعية.

والآن، ما نتيجة تزاوج ذكر من الجيل الأول F_1 مع أنثى ذات جسم أبنوسي وقرون استشعار أريستوبيديا؟

- **الطراز المظهري للأبوين**: ذكر، جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية × أنثى، جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا
- **الطراز الجيني للأبوين**: (EA)(ea) × (ea) (ea)
- **أمشاج الأبوين**: EA ea × ea

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

أمشاج الأنثى	أمشاج الذكر: ea	أمشاج الذكر: EA
ea	(ea) (ea) جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا	(ea) (EA) جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية

النسبة المتوقعة للطرز المظهرية للأبناء: 1 جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية: 1 جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا.

سؤال

٢٠ ما نسبة الطرز المظهرية المتوقعة من تزاوج ذكر دروسوفيلا من الجيل الأول F_1 وأنثى ذات جسم أبنوسي وقرون استشعار أريستوبيديا، إذا لم يكن جين لون الجسم وجين شكل قرن الاستشعار مرتبطَين معًا على الكروموسوم نفسه؛ أي موجودة على كروموسومات مختلفة؟ (يمكنك استخدام مخطط جيني للإجابة).

الارتباط بالكروموسوم الجسدي والعبور

الارتباط التام Complete linkage بين الجينات على الكروموسوم نفسه نادر جدًا. لقد درست أنه أثناء الطور التمهيدي الأول من الانقسام الاختزالي، تتبادل الكروموسومات المتماثلة أجزاء من الكروماتيدات، وبالتالي يمكن أن تتبادل أليلات من كروموسوم متماثل أماكنها مع أليلات من الكروموسوم الآخر وهذا يسمى العبور.

العبور يكسر الارتباط بين الجينات على الكروموسومات نفسها.

عادة، لا يحدث عبور في ذكر ذبابة الفاكهة (لا يُعرف سبب ذلك)، إنما يحدث في الأنثى. بالإشارة إلى المثال السابق لتزاوج ذبابة الفاكهة، دعنا الآن نجري تزاوجًا اختباريًا لأنثى ذبابة الفاكهة طرازها الجيني **(EA) (ea)** حيث يحدث عبور بين الجينَين المرتبطَين.

يبيّن الشكل ٢-٨ تشكيل أربعة أنواع مختلفة من الأمشاج بدلًا من النوعَين المتوقع وجودهما عند عدم حدوث عبور.

يكون لمعظم الأفراد الناتجين من هذا التزواج صفات ذات تراكيب أبويّة (جسم رمادي وقرون استشعار طبيعية)، أو (جسم أبنوسي وقرون استشعار أريستوبيديا) بما يسمّى **أنماط أبويّة Parental types**، وهذه تظهر بنسبة 1:1. فإذا كان الارتباط تامًا يتوقع أن يكون جميع الأبناء ذات أنماط أبويّة فقط، وهذا ما حدث في التزاوج الاختباري لذكر ذبابة الفاكهة.

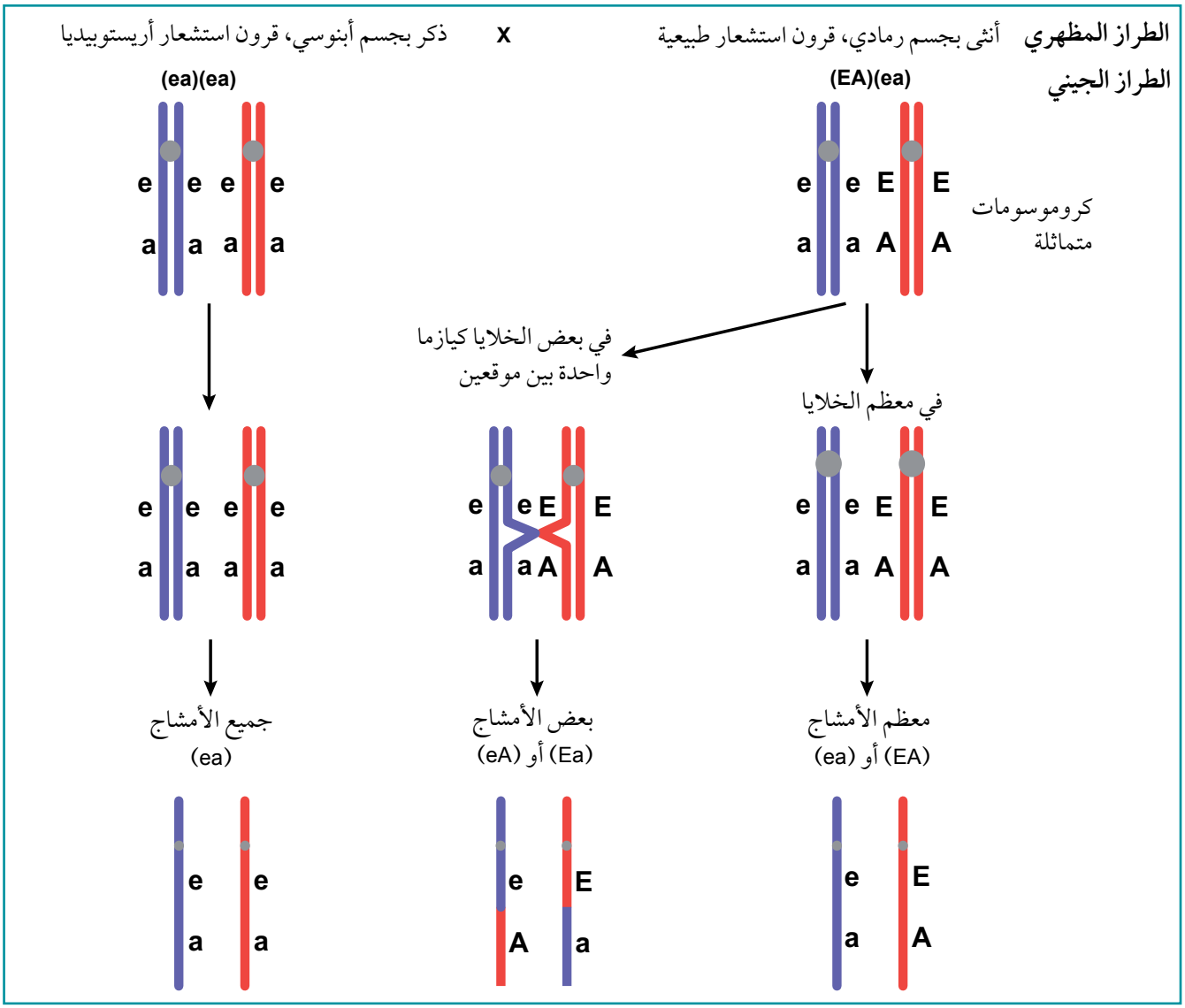
مصطلحات علمية

النمط الأبوي Parental type: الأبناء الذين يظهرون التراكيب نفسها لصفات الأبوَين.

مصطلحات علمية

تراكيب عبورية Recombinants: الأبناء الذين يظهرون تراكيب من الصفات مختلفة عن الأبوَين.

لكن عندما يتم التزاوج الاختباري للأنثى، ينتج بعض الأفراد بتراكيب مختلفة من الصفات عن الأبوين. فبعضها يكون بجسم رمادي وقرون استشعار أريستوبيديا، وبعضها الآخر بجسم أبنوسي وقرون استشعار طبيعية. وتسمّى هذه **تراكيب عبورية Recombinants**، وتنتج من العبور الذي يعيد تركيب صفات الأبوَين الأصليَّين. وتكون فئتا التراكيب العبورية بنسبة 1:1.



الشكل ٢-٨ حدوث عبور في أنثى ذبابة الفاكهة، عدم حدوث عبور في ذكر ذبابة الفاكهة.

النتائج الفعلية للتزاوج هي:

جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية	44%
جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا	44%
جسم رمادي، قرون استشعار أريستوبيديا	6%
جسم أبنوسي، قرون استشعار طبيعية	6%

ويوضح المخطط الجيني التالي هذا التزاوج.

- **الطراز المظهري للأبوين** أنثى، جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية × ذكر، جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا
- **الطراز الجيني للأبوين** (ea)(EA) (ea)(ea)
- **أمشاج الأبوين** عدد كثير من (EA) (ea)، عدد قليل من (Ea) (eA) (ea)

الطرز الجينية والطرز المظهرية للأبناء

		أمشاج الذكر (ea)
أمشاج أنثى بأعداد كثيرة	(EA)	(EA)(ea) جسم رمادي، قرون استشعار طبيعية
	(ea)	(ea)(ea) جسم أبنوسي، قرون استشعار أريستوبيديا
أمشاج أنثى بأعداد قليلة	(Ea)	(Ea)(ea) جسم رمادي، قرون استشعار أريستوبيديا
	(eA)	(eA)(ea) جسم أبنوسي ، قرون استشعار طبيعية

قد يحدث العبور بين جينَين عندما يكونان في موقعَين متباعدَين، لوجود مسافة على الكروموسوم تفصل بينهما وتسمح بحدوث العبور. يمكن الاستفادة من ذلك بتكوين فكرة عن مواقع الجينات على الكروموسوم. فكلما ازداد عدد التراكيب العبورية في الأبناء، كان حدوث العبور أكثر، وتكون المسافات بين الجينات أكبر.

أسئلة

(٢١) ممكن أن تنتج نباتات البازلاء بذورًا ملساء أو بذورًا مجعدة، ولونها إما أخضر أو أصفر. أليل البذور المستديرة، R، هو السائد، وكذلك أليل البذور الصفراء Y هو السائد.

أ. جرى تزاوج بين نباتي بازلاء لهما الطرز الجينية RrYy و rryy.

ما الطرز الجينية والطرز المظهرية المتوقعة للنباتات الناتجة، إذا كانت جينات هاتين الصفتين على كروموسومات مختلفة.

ب. ما الطرز الجينية والطرز المظهرية المتوقعة للنباتات الناتجة، إذا كانت جينات هاتين الصفتين على الكروموسوم نفسه ولم يحدث عبور بين المواقع الكروموسومية للجينات.

ج. اشرح كيف يمكن أن يكون لأحد النبتات الناتجة تركيب من الصفتين (شكل البذور ولونها)، مختلف عن تراكيب الأبوين، حتى لو وجدت جينات هاتين الصفتين على الكروموسوم نفسه.

(٢٢) جرى تزاوج بين ذبابتَي فاكهة متماثلتَي الأليلات، إحداهما ذات أجنحة مستقيمة وجسم رمادي والأخرى ذات أجنحة ملتفة وجسم أبنوسي. ثم أجري تلقيح اختباري لأنثى من الجيل الأول مع ذكر ذي أجنحة ملتفة وجسم أبنوسي، فكانت النتائج كما يأتي:

أجنحة مستقيمة، جسم رمادي	113
أجنحة مستقيمة، جسم أبنوسي	30
أجنحة ملتفة، جسم رمادي	29
أجنحة ملتفة، جسم أبنوسي	115

أ. ما نسبة الطرز المظهرية المتوقعة من تزاوج اختباري ثنائي الهجين مثل هذا، إذا لم يوجد ارتباط أو عبور؟

ب. فسّر الاختلاف بين النتائج المتوقعة والنتائج الفعلية.

ج. احسب النسبة المئوية للأفراد ذوي التراكيب العبورية.

٢-٥ الجينات والبروتينات والطراز المظهري

درست حتى الآن تأثير الجينات على الطراز المظهري من دون معرفة الآليات التي تتسبب بهذه التأثيرات. وفي هذا الموضوع، ستتعرف على أربعة جينات تؤثر في الطرز المظهرية عند الإنسان، وعلى كيفية تأثير هذه الجينات.

مهمّ

عندما تكتب الاختصارات الجينية بخط اليد، يوضع خط تحت رمز الجين للإشارة إلى الخط المائل، مثل هذا TYR.

في هذا الموضوع سيتم استخدام طريقة مختلفة، متفق عليها، لترميز أليلات جينات الإنسان. كنت قد استخدمت حرفًا واحدًا ليرمز إلى الأليل الواحد، لكنك ستستخدم الآن لمعظم جينات الإنسان اختصارًا من ثلاثة أحرف، مكتوبة بخط مائل. هذه طريقة عامة متفق عليها إذ يستخدم جميع العلماء في العالم الذين يتضمن عملهم هذه الجينات الاختصارات نفسها. على سبيل المثال، يشار إلى جين إنتاج إنزيم تايروسينيز Tyrosinase بالاختصار *TYR* المكوّن من ثلاثة أحرف مكتوبة بخط مائل. ويشار إلى البروتين الذي يشفره الجين باستخدام الاختصار نفسه للجين المكوّن من ثلاثة أحرف مكتوبة بخط غير مائل (TYR).

الجين *TYR*، والتايروسينيز، والمهق

يقدم المهق مثالًا جيدًا على الصلة بين الجين والإنزيم والطراز المظهري للإنسان.

تكون صبغة الميلانين الداكنة في المهق مفقودة كليًا أو جزئيًا من العيون والجلد والشعر. وهذا يؤدي في الإنسان إلى عيون ذات قزحية زرقاء فاتحة أو وردية، وجلد وشعر فاتحَين جدًا (الصورة ٢-٥). يبدو بؤبؤ العين بلون أحمر. وتكون الحالة مصحوبة بضعف في الرؤية، وحركات العين السريعة، والميل إلى تجنّب الضوء الساطع.

الصورة ٢-٥ طفل مصاب بالمهق مع زملائه في جنوب أفريقيا.

يوجد الجين *TYR* على الذراع الطويلة للكروموسوم 11 (الشكل ٢-٩)، حيث يوجد أليل مُتنحٍّ غير طبيعي ينتج عنه المهق. ويولد في العالم سنويًا 1من كل 17000 طفل متماثل الأليلات المتنحية، فيظهر بالتالي عليهم المهق. ومع ذلك، فالحالة شائعة نسبيًا في بعض الجماعات السكانية، مثل الهوبي *Hopi* في أريزونا وهنود جزر كونا سان بلاس *Kuna San Blas* في بنما. ينتج الميلانين عن طريق مسار الأيض الآتي:

تايروسينيز

تايروسين ← دوبا DOPA ← دوباكينون ← ميلانين

الشكل ٢-٩ موقع الجينين *TYR* و *HBB* على الكروموسوم 11.

يؤدي أليل مُتنحٍّ من جين التايروسينيز إلى غياب إنزيم تايروسينيز، أو وجود تايروسينيز غير نشط في الخلايا التي يتم فيها إنتاج الميلانين، حيث لا يمكن تحويل التايروسين إلى دوبا DOPA ودوباكينون لتكوين الميلانين، فلا تتم أول خطوتَين في تحويل الحمض الأميني تايروسين إلى ميلانين.

تتكوّن إنزيمات التايروسينيز في النباتات وفي الإنسان والحيوانات. يمكن رؤية تأثير الإنزيم في اسوداد شريحة بطاطس تركت معرضة للهواء.

الجين *HBB*، والهيموجلوبين، وفقر الدم المنجلي

يشفر الجين *HBB* لتتابع الأحماض الأمينية في عديد الببتيد بيتا(β)- جلوبين في الهيموجلوبين، ويوجد على الذراع القصيرة للكروموسوم 11 (الشكل ٢-٩).

يبدأ عديد الببتيد بيتا (β)- جلوبين في الأشخاص الطبيعيّين بتتابع الأحماض الأمينية الذي يشفرها الأليل الطبيعي الآتي:

فالين - هستيدين - ليوسين - ثريونين - برولين - جلوتامين - جلوتامين - لايسين

لكن، يُستبدل تتابع القواعد CTT ب CAT الأمر الذي يحدث تغيرًا طفيفًا في تتابع الأحماض الأمينية هذه ليصبح التتابع كالآتي:

فالين - هستيدين - ليوسين- ثريونين - برولين - فالين- جلوتامين - لايسين

يؤدي هذا الاختلاف البسيط في تتابع الأحماض الأمينية إلى اختلاف بسيط في جزيء الهيموجلوبين عندما يكون مرتبطًا مع الأكسجين. لكن عندما لا يكون مرتبطًا مع الأكسجين، فإن عديد الببتيد بيتا(β)- جلوبين غير الطبيعي يجعل جزيء الهيموجلوبين أقل ذوبانًا، فتميل الجزيئات إلى الالتصاق بعضها ببعض مكوّنة أليافًا طويلةً داخل خلايا الدم الحمراء، ويتغير شكل خلايا الدم الحمراء إلى شكل منجلي. وعندما يحدث هذا الالتصاق، تصبح الخلايا ذات الشكل المنجلي غير قادرة على نقل الأكسجين. كما تعلق بالشعيرات الدموية الصغيرة، فتمنع مرور أي خلايا سليمة.

الشخص المصاب بهذا النوع غير الطبيعي من بيتا (β)- جلوبين قد يعاني فقر الدم بشدة (نقص الأكسجين الذي ينقل إلى الخلايا)، ويمكن أن يتسبب المرض بالوفاة. فقر الدم المنجلي شائع بشكل خاص في بعض أجزاء أفريقيا والهند.

والشخص الذي لديه نسخة واحدة من الأليل *HBB* الطبيعي ونسخة واحدة من أليل فقر الدم المنجلي يتكوّن لديه بعض الهيموجلوبين الطبيعي وبعض هيموجلوبين الخلايا المنجلية. لا تظهر على المصابين أية أعراض بشكل عام، إلا إذا وجدوا في ظروف تتطلب فيها العضلات الكثير من الأكسجين- على سبيل المثال ممارسة تمارين رياضية مجهدة.

الجين *F8*، و العامل الثامن (VIII)، والهيموفيليا

يحتوي جين *F8* على شيفرة لبناء بروتين يسمّى عامل التخثر الثامن Coagulation factor VIII. يتم بناء البروتين في خلايا الكبد، ويفرز في بلازما الدم، ويؤدّي دورًا مهمًا في سلسلة الأحداث التي تتم أثناء تخثر الدم.

ينتج من الأليلات غير الطبيعية لهذا الجين أشكال غير طبيعية من بروتين العامل الثامن (VIII)، وقد يتم إنتاج كميّة أقل من المعتاد من العامل الثامن (VIII)، أو حتى عدم إنتاجه على الإطلاق. وهذا يعني عدم تخثر الدم بشكل طبيعي، وإمكانية حدوث نزيف شديد حتى من جروح صغيرة. تسمّى هذه الحالة الهيموفيليا Haemophilia.

يوجد جين *F8* في المنطقة غير المتماثلة من الكروموسوم X، ما يعني أن الجين مرتبط بالجنس. يوجد لدى الذكور نسخة واحدة فقط من الكروموسوم X، وبالتالي لا يمكن حجب تأثير الأليل غير الطبيعي بآخر طبيعي. ويمكن أن تكون الإناث غير متماثلة الأليلات لهذه الحالة من دون أن تظهر عليهن أية أعراض مطلقًا، حيث إن نسخة واحدة من الجين الطبيعي تكفي لبناء ما يحتجن إليه من العامل الثامن (VIII).

الجين *HTT*، و البروتين هنتنغتن، ومرض هنتنغتون

موقع الجين *HTT* هو على الكروموسوم 4، وهو يشفر لإنتاج بروتين يسمّى هنتنغتن Huntingtin. لا يزال عمل هذا البروتين بالضبط مجهولًا، لكن يعرف أنه مهم في تطور الخلايا العصبية، بخاصة في الدماغ.

يحتوي تتابع نيوكليوتيدات هذا الجين في بعض الناس على عدد كبير من الثلاثية CAG المتكررة (بما يسمّى أحيانًا «تأتأة *Stutter*»). ويكون تطور الخلايا العصبية غير طبيعي إذا كان عدد مرات التكرار أكثر من 40، فيصاب الشخص بمرض هنتنغتون Huntington's disease (إذا كان عدد مرات التكرار بين 36 و 39 مرة، يتطوّر المرض، وأحيانًا لا يتطور). تتطوّر الحالة تدريجيًا مع التقدم في السن، وفي معظم الأحيان لا تظهر الأعراض إلّا ما بين سن 30 - 40 من العمر. حيث يبدأ الشخص المصاب بفقدان قدرته على التحكم في الحركة والمشي والكلام والتفكير بوضوح. هذه الحالة مميتة، ويمكن أن تحدث الوفاة خلال 15 - 20 سنة من بعد ظهور الأعراض.

هذا الأليل غير الطبيعي سائد، لذلك يوجد احتمال واحد من اثنين لوراثة شخص لهذه الحالة إذا كان أحد أبوَيه يحمل هذا الأليل. وحيث إن هذه الحالة قد تكون غير ظاهرة إلى أن يصبح الشخص بالغًا، فإنه قد ينجب أطفالًا قبل أن يعرف باحتمال نقل مرض هنتنغتون لهم.

٦-٢ التحكم في التعبير الجيني

درست سابقًا أنه يُقال عن الجين «معبر عنه» عندما يُنسخ إلى mRNA، ثم تتم ترجمة mRNA لإنتاج البروتين. نسبة ضئيلة فقط من الجينات الموجودة في نواة الخلية يتم التعبير عنها فعليًا في أي وقت. على سبيل المثال، لن يتم التعبير عن جين إنتاج الميلانين مطلقًا في خلايا عضلة القلب.

ستتعرف في هذا الموضوع كيف يتم التحكم في التعبير الجيني في كائن حي بدائي النواة، بكتيريوم الإشريكية القولونية *Escherichia coli*. ثم تتعرف على التحكم في التعبير الجيني في حقيقية النواة.

التحكم الجيني في بدائيات النواة

في البداية فهم العلماء لكيفية «تشغيل On وإيقاف Off» الجينات من الدراسات التي أجريت على البكتيريا. واحد من الجينات الأكثر دراسة هو الجين الذي يشفر لإنتاج إنزيم **بيتا (β)- جلاكتوسيديز** β-**galactosidase** (يعرف أيضًا باسم لاكتيز Lactase). تستخدم بعض البكتيريا هذا الإنزيم لتحليل اللاكتوز في بيئة البكتيريوم إلى جلوكوز وجلاكتوز، حيث يمكن امتصاصهما واستخدامهما كمصدر للطاقة في الخلية.

الجين الذي يشفر لإنتاج إنزيم بيتا(β)- جالاكتوسيديز هو مثال على **الجين التركيبي** **Structural gene**. الجين التركيبي هو الذي يشفر لإنتاج بروتين تستخدمه الخلية. تشفر بعض الجينات التركيبية لبروتينات تصبح جزءًا من تركيب الخلية، ولكن العديد منها لها أدوار أخرى، مثل التشفير للإنزيمات.

يتم التحكم في التعبير عن جين اللاكتيز من قبل جينات أخرى توجد بالقرب منه على DNA الحلقي (جزيء DNA)، وتسمى **الجينات المنظمة** **Regulatory genes**.

مصطلحات علمية

بيتا (β) - جلاكتوسيديز β-**galactosidase**: إنزيم يحفز التحلل المائي للاكتوز إلى جلوكوز وجلاكتوز.

الجين التركيبي **Structural gene**: الجين الذي يشفر لبروتين له وظيفة في الخلية.

الجين المنظم **Regulatory gene**: الجين الذي يشفر لبروتين يساعد في التحكم في تعبير جينات أخرى.

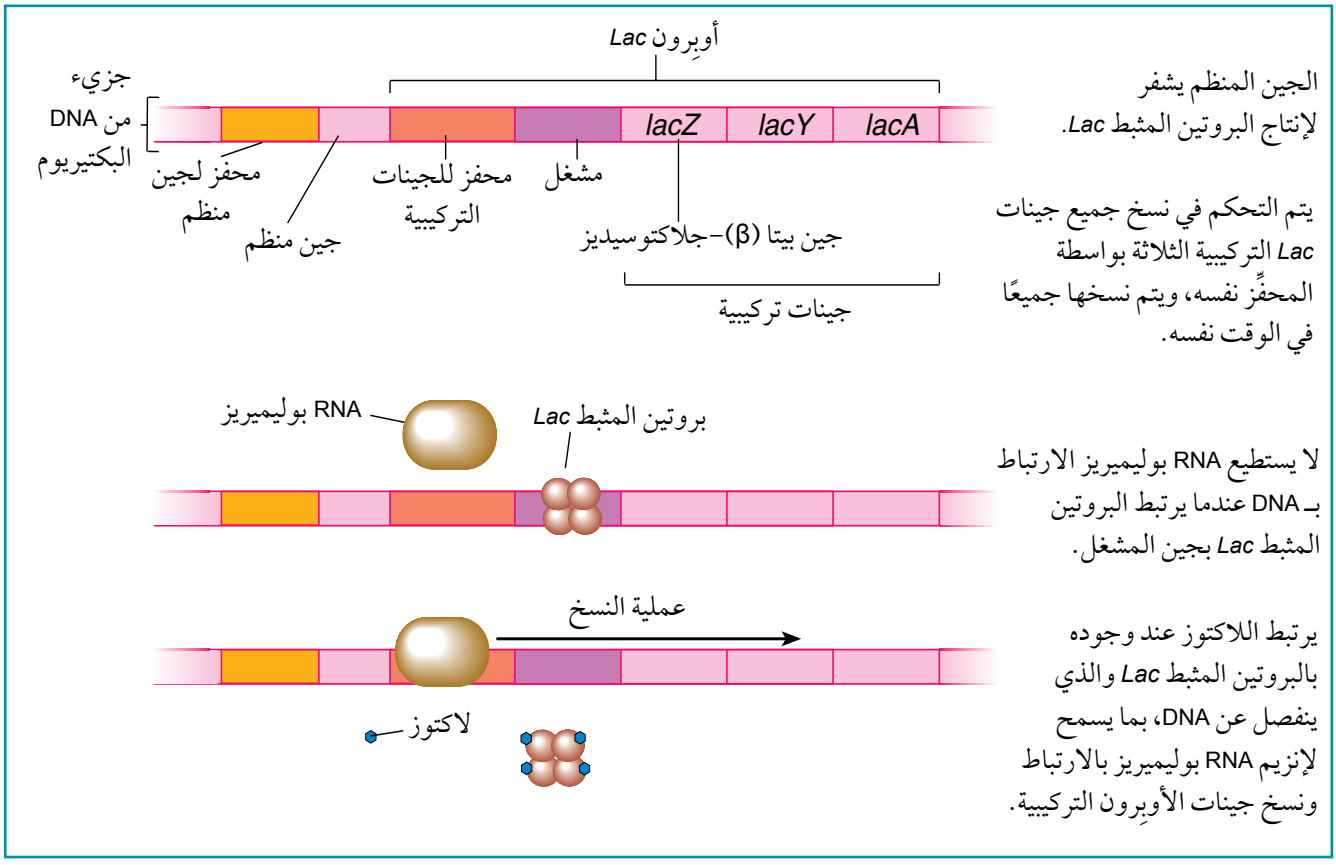
الجينات التركيبية والمناطق الأخرى من DNA المجاورة لها (المشغل Operator والمحفز Promoter) التي تعمل معًا؛ توجد بشكل عام في مجموعة تسمى **أوبرون Operon**. ويسمّى الأوبِرون المسؤول عن إنتاج إنزيم اللاكتيز في البكتيريا **أوبِرون Lac Operon *Lac*** (حيث *Lac* اختصار لـ Lactose). يظهر الشكل ٢-١٠ تركيب أوبِرون *Lac*.

يختلف عدد جزيئات إنزيم بيتا(β)-جلاكتوسيديز الموجودة في بكتيريوم الإشريكية القولونية *Escherichia coli*، مع اختلاف تركيز اللاكتوز في الوسط الذي تنمو فيه. وتتغير كمية الإنزيم عن طريق تشغيل أو إيقاف نسخ جين بيتا(β)-جلاكتوسيديز.

مصطلحات علمية

أوبرون Operon: وحدة وظيفية في عملية النسخ، وهي مجموعة من الجينات يتحكم بها المحفز نفسه.

أوبرون *Lac* Operon Lac: هو الأوبِرون الذي يوجد في بعض البكتيريا ويتحكم في إنتاج إنزيم بيتا(β) - جالاكتوسيديز وبروتينين تركيبيين آخرَين.



الشكل ٢-١٠ أوبِرون *Lac*.

فيما يأتي تسلسل الأحداث عند عدم وجود لاكتوز في الوسط الذي تنمو فيه البكتيريوم.

- يشفر الجين المنظم لبروتين يسمّى المُثبط Repressor.
- يرتبط المُثبط بمنطقة المشغل، قريبًا من جين بيتا(β) - جلاكتوسيديز.
- لأن المثبط مرتبط بمنطقة المشغل، فإن ذلك يمنع ارتباط RNA بوليميريز بمنطقة المحفز.

- نتيجة لذلك، لن تنسخ الجينات التركيبية الثلاثة.

للبروتين المُثبط موقعا ارتباط، حيث يمكن أن يرتبط البروتين المُثبط مع DNA عند موقع، ومع اللاكتوز عند موقع آخر. ويتغير شكل البروتين المثبط عندما يرتبط اللاكتوز بموقعه، لذلك يغلق موقع ربط DNA.

عندما يوجد اللاكتوز في الوسط الذي تنمو فيه البكتيريوم تحدث العمليات الآتية:

- تمتص البكتيريوم اللاكتوز.
- يرتبط اللاكتوز مع البروتين المُثبط، الأمر الذي يؤدي إلى تغيير شكله ومنعه من الارتباط مع DNA في موقع التشغيل.
- لم يعد النسخ مُثبطًا، الأمر الذي يؤدي إلى إنتاج mRNA من الجينات التركيبية الثلاثة.

يتم تشغيل الجينات ونسخها في آن واحد. فيمكن الآن أن تمتص البكتيريوم اللاكتوز وتفككه.

تتيح هذه الآلية للبكتيريوم إنتاج بيتا(β) – جلاكتوسيديز والإنزيمين الآخرين (اللذان يُشفر لهما من الجينين *lacY* و *lacA*) وبكميات متساوية فقط عندما يوجد اللاكتوز في الوسط المحيط. وهي بذلك تتجنب إهدار الطاقة والمواد.

إنزيم بيتا(β) – جلاكتوسيديز هو **إنزيم قابل للتحفيز Inducible enzyme**، أي أنه يتم إنتاجه فقط عندما توجد مادته المتفاعلة. إذ يحُث وجود المادة المتفاعلة نسخ جين الإنزيم. ويمنع ارتباط جزيء المستجيب (وهو في هذه الحالة اللاكتوز) بالمثبط من ارتباط المثبط مع المشغل، ليتحرر بعد ذلك المثبط ثم يبدأ النسخ (الشكل ٢–١٠).

هناك إنزيمات أخرى يتم التحكم بإنتاجها بطريقة مختلفة قليلًا تسمّى **الإنزيمات القابلة للتثبيط Repressible enzymes** حيث يساعد ارتباط جزيء المستجيب بالمثبط على ارتباط المثبط مع المشغل، فيوقف النسخ.

مصطلحات علمية

إنزيم قابل للتحفيز Inducible enzyme: إنزيم يتم بناؤه فقط عند وجود مادته المتفاعلة.

إنزيم قابل للتثبيط Repressible enzyme: إنزيم يتم بناؤه عادة، ويتم منع بنائه عند وجود مستجيب.

عامل النسخ Transcription factor: جزيء بروتيني يؤثر إما بتنشيط نسخ الجين أو تثبيطه.

عوامل النسخ في حقيقية النواة

لا تحتوي حقيقية النواة على أوبِرونات مثل بدائية النواة، وبدلًا من ذلك، تتحكم **عوامل النسخ Transcription factors** في تعبير الجينات في حقيقية النواة.

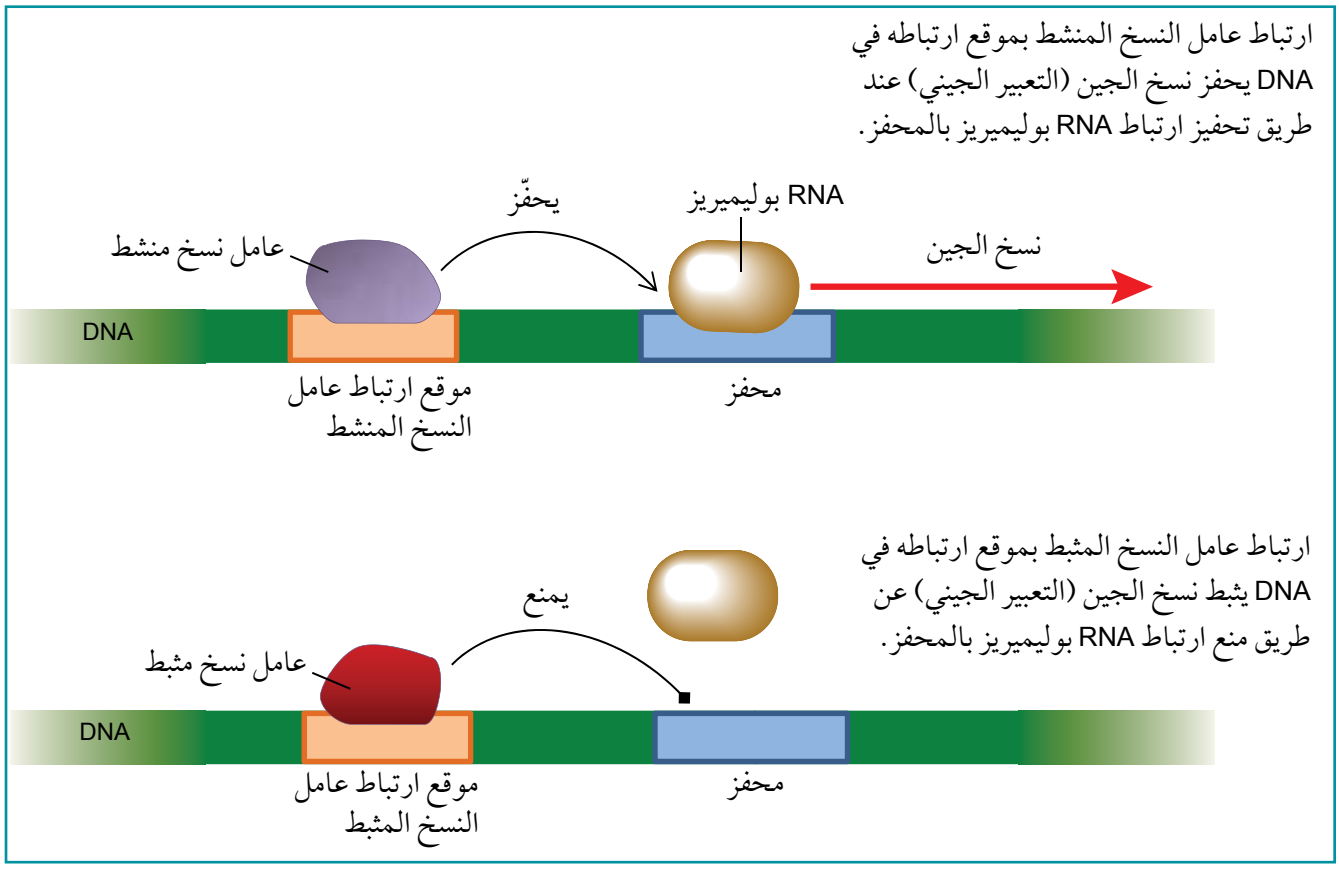
عامل النسخ بروتين يرتبط مع DNA ويؤثر سواء بنسخ الجين أو عدم نسخه. وتعمل عوامل النسخ على التأكد من أنه تمّ التعبير عن الجينات في الخلية الصحيحة في الوقت الصحيح وبالمقدار الصحيح.

في الإنسان، على سبيل المثال، يعتقد أن 10% تقريبًا من الجينات تشفر لبروتينات تعمل كعوامل نسخ.

ترتبط بعض عوامل النسخ بمنطقة المحفِّز أو بمناطق أخرى في DNA، للسماح بنسخ جين معيّن أو منع ذلك. وبالتالي وجودها يزيد أو يقلل من معدل نسخ الجين.

يوجد العديد من الأنواع المختلفة من عوامل النسخ، لها تأثيرات مختلفة. وربما يكون العلماء قد اكتشفوا نسبة صغيرة منها حتى الآن، ولا يزالون يبحثون للعثور على أنواع جديدة للمزيد من فهم كيفية عملها. يبيّن الشكل ٢-١١ آلية العمل المحتملة لنوعين من عوامل النسخ.

قد تساعد عوامل النسخ على تنظيم التعبير الجيني عن طريق تنشيط التسلسل الصحيح لجينات مختلفة (على سبيل المثال عند التطور من زيجوت إلى جنين)، والاستجابة للمنبهات البيئية للتحكم في التعبير الجيني، والاستجابة للهرمونات مثل التستوستيرون وتنظم نمو الخلايا وموتها.



الشكل ٢-١١ مثالان على آلية عمل عوامل النسخ لزيادة أو تقليل معدل النسخ.

ملخّص

الكروموسومات المتماثلة هي أزواج كروموسومات في الخلية ثنائية المجموعة الكروموسومية لها نفس التركيب، وجيناتها لها نفس المواقع الكروموسومية والتي قد تختلف في أليلاتها.

يتضمن الانقسام الاختزالي انقسامَين: الانقسام الأول، الانقسام الاختزالي الأول (I) وهو انقسام منصف يقلل عدد الكروموسومات إلى النصف ويفصل الكروموسومات المتماثلة، بحيث تحتوي كل خلية على كروموسوم من كل زوج. والانقسام الثاني، الانقسام الاختزالي الثاني (II)، ويفصل الكروماتيدات في كل كروموسوم. ينتج الانقسام الاختزالي أربع خلايا في كل منها مجموعة كاملة واحدة من الكروموسومات.

تحتوي الخلايا ثنائية المجموعة الكروموسومية على مجموعتَين من الكروموسومات، وبالتالي نسختَين من كل جين. في التكاثر الجنسي، تتكوّن الأمشاج أحادية المجموعة الكروموسومية التي تحتوي على مجموعة واحدة من الكروموسومات، وبالتالي نسخة واحدة من كل جين. تتلقى كل خلية ناتجة نسختَين من كل جين، واحدة من كل من الأبوَين.

تختلف الخلايا الناتجة من الانقسام الاختزالي جينيًا عن بعضها وعن الخلية الأصلية. وهذا ناتج من التوزيع الحر للكروموسومات عندما تصطف أزواج الثنائيات المتكافئة على خط الخلية أثناء الطور الاستوائي الأول، وكذلك عن العبور بين كروماتيدات الكروموسومات المتماثلة أثناء الطور التمهيدي الأول. ينتج التباين الجيني أيضًا من الإخصاب العشوائي، حيث تندمج الأمشاج المحتوية على أنواع مختلفة من الجينات لتكوين الزيجوتات.

التكوين الجيني للكائن الحي هو طرازه الجيني. وصفاته الظاهرة هي الطراز المظهري، والذي يتأثر بالتعبير عن جيناته. تسمّى أشكال الجين المختلفة أليلات. قد تبدي الأليلات سيادة (تامة) أو سيادة مشتركة أو تنحيًا. الكائن الحي الذي يمتلك أليلَين متماثلَين من الجين هو متماثل الأليلات. والكائن الحي الذي يمتلك أليلَين مختلفَين هو غير متماثل الأليلات. إذا كان للجين عدة أليلات مختلفة، مثل جين فصائل الدم في الإنسان، تسمّى بالأليلات المتعددة.

يعرف الجين الموجود على الكروموسوم X وليس على الكروموسوم Y باسم الجين المرتبط بالجنس. الجينات المتجاورة على كروموسوم غير الكروموسومات الجنسية تسمى المرتبطة بالكروموسومات الجسدية.

يمكن تحديد الطراز الجيني لكائن حي يظهر صفة سائدة عن طريق تزاوجه مع كائن حي يظهر الصفة المتنحية ما يسمّى التزاوج الاختباري. التزاوجات أحادية الهجين تتضمن وراثة جين واحد. والتزاوجات ثنائية الهجين تتضمن نوعَين مختلفَين من الجينات. قد تتفاعل الجينات المختلفة لتؤثر في صفة الطراز المظهري نفسها، وهي حالة تسمى التفوّق الجيني.

يشفر الجين *HBB* لعديد الببتيد بيتا(β) – جلوبين في الهيموجلوبين. وجود تتابع قواعد مختلف في هذا الأليل ينتج منه فقر الدم المنجلي. يتضمن أليل الجين *HTT* المسؤول عن مرض هنتنغتون تكرار ثلاثية من النيوكليوتيدات تسمى (التأتأة). المهق والهيموفيليا يظهران تأثير عديدات الببتيد المفقودة أو غير النشطة على الطراز المظهري.

يقدم أوبرون *Lac* مثالًا على أنه كيف يمكن لبدائية النواة أن تغيّر نسخ مجموعة من الجينات التركيبية للإنزيمات المرتبطة بامتصاص اللاكتوز وأيض الغذاء، اعتمادًا على ما إذا كان اللاكتوز موجودًا أم لا. تشفر الجينات التركيبية للبروتينات التي تحتاج إليها الخلية لتركيبها أو أيضها، في حين تتحكم الجينات المنظمة في تعبير جينات أخرى. يمكن أن يمنع البروتين المثبط إنتاج الإنزيم القابل للتثبيط، بالارتباط بموقع جين المشغل. ويتم إنتاج الإنزيم القابل للتحفيز فقط عندما تكون مادته المتفاعلة موجودة.

تتأكد عوامل النسخ في حقيقية النواة أنه تمّ التعبير عن الجينات في الخلية الصحيحة في الوقت الصحيح وبالمقدار الصحيح.

أسئلة نهاية الوحدة

١ **أ.** ميِّز بين المصطلحَين: الطراز الجيني والطراز المظهري.

ب. ميِّز بين المصطلحَين: متماثل الأليلات وغير متماثل الأليلات.

ج. في نباتات البازلاء Sweet-pea، يتحكم الجين **A/a** بلون الأزهار. يشفر الأليل السائد للأزهار الأرجوانية ويشفر الأليل المتنحي للأزهار الحمراء.

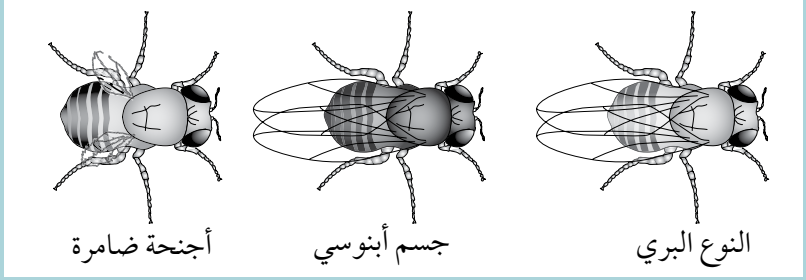
ويتحكم الجين الثاني **B/b** بشكل حبوب اللقاح. يعطي الأليل السائد حبوب لقاح متطاولة الشكل ويعطي الأليل المتنحي حبوب لقاح كروية الشكل.

أجري تزاوج اختباري لنبات طرازه الجيني **AaBb**، عن طريق التزاوج الداخلي، مع نبات أزهاره حمراء وحبوب لقاحه كروية الشكل.

انقل الجدول وأكمل رسمه لتبيّن نسبة الطرز المظهرية المتوقعة للنباتات الناتجة من هذا التزاوج. أمشاج أحد الأبوين موضّحة في الجدول.

أمشاج الأنثى		أمشاج الذكر
AB	الطراز الجيني: الطراز المظهري:	
Ab	الطراز الجيني: الطراز المظهري:	
aB	الطراز الجيني: الطراز المظهري:	
ab	الطراز الجيني: الطراز المظهري:	

٢ **أ.** تتغذى ذبابة الفاكهة على السكريات في الفاكهة التالفة. تسمى الذبابة ذات الصفات الطبيعية النوع البري Wild type. يكون لها جسم رمادي وأجنحة أطول من بطنها. بعض الذباب له جسم بلون أبنوسي Ebony أو أجنحة ضامرة Vestigial. توضح الرسوم التخطيطية التالية هذه الأنواع الثلاثة من الذبابة.



يتم تشفير صفات النوع البري بأليلات سائدة: **A** لجسم النوع البري و **B** لأجنحة النوع البري.

اشرح المقصود بالمصطلحَين: **أليل، سائد**.

تابع

ب. جرى تزاوج بين ذبابتَي فاكهة من النوع البري، كلتاهما غير متماثلة الأليلات في موقعَي الجينَين.
ارسم مخططًا جينيًا يبيّن الأفراد المحتملة الناتجة من هذا التزاوج.

٣ يتأثر لون الريش في الببغاء Budgerigars بالعديد من الجينات المختلفة. أحد هذه الجينات هو **G/g**، والذي يحدد لون الريش أخضر أو أزرق. الأليل **G** سائد، ويعطي ريشًا أخضر اللون، والأليل **g** مُتنحٍّ، ويعطي ريشًا أزرق اللون.

يوجد جين آخر على كروموسوم مختلف يؤثر في شدة اللون، وله أليلان بسيادة مشتركة: C^P يعطي لونًا فاتحًا، و C^D يعطي لونًا داكنًا. يبيّن الجدول ستة ألوان تنتج من تراكيب مختلفة من أليلات هذَين الجينَين.

اللون	شدة اللون		
	فاتح	وسط	داكن
أخضر	أخضر فاتح	أخضر داكن	أخضر زيتوني
أزرق	أزرق فاتح	أزرق داكن	أرجواني

أ. اذكر الطراز الجيني لكل من:

١. طائر لونه أخضر داكن متماثل الأليلات عند الموقع الكروموسومي G/g.

٢. طائر أزرق فاتح.

ب. كوّن مخططًا جينيًا يبيّن الأفراد المحتملة الناتجة من تزاوج الطائر الأخضر الداكن متماثل الأليلات. وطائر لونه أزرق داكن.

٤ **أ.** بالإشارة إلى التحكم في تعبير جين بيتا(β) – جلاكتوسيديز في البكتيريا الإشريكية القولونية E.coli، اشرح معنى كل من المصطلحات الآتية:

١. أوبرون.

٢. جين تركيبي.

٣. إنزيم قابل للتحفيز.

ب. اشرح كيف أن وجود اللاكتوز في الوسط المحيط يسبب بناء بيتا(β) – جلاكتوسيديز.

ج. اشرح السبب الذي يجعل عملية إفراز البكتيريا لبيتا(β) مفيدًا – جالاكتوسيديز فقط عند وجود اللاكتوز.

تابع

٥ تؤدي هرمونات الغدة الدرقية وظائف مختلفة في الجسم، بما في ذلك زيادة معدل الأيض، وحفز النمو لدى الأطفال، وزيادة قدرة عضلة القلب على الانقباض. هرمونات الغدة الدرقية جزيئات صغيرة، تعتمد على الحمض الأميني تايروسين Tyrosine، وتدخل الخلايا المستهدفة عبر بروتينات حاملة.

أ. اشرح سبب دخول هرمونات الغدة الدرقية إلى الخلايا عبر بروتينات حاملة، بدلًا من الانتشار من خلال الطبقة الثنائية للدهون المفسفرة.

ب. تنتقل هرمونات الغدة الدرقية إلى نواة الخلية المستهدفة، حيث ترتبط بمستقبل. تكون هذه المستقبلات الهرمونية مرتبطة بـ DNA بالقرب من جين معيّن، حيث تثبط نسخه. وعندما يرتبط الهرمون بالمستقبل يحفز نسخ الجين.

١. اذكر اسم جزيء، مثل مستقبل هرمونات الغدة الدرقية، يؤثر في نسخ الجين.

٢. يشفر أحد الجينات الذي يتأثر نسخه بهرمونات الغدة الدرقية لبناء الميوسين (بروتين عضلي). اقترح كيف أن تأثير هرمونات الغدة الدرقية على جين معيّن يمكن أن يؤثر في عضلة القلب.

ج. يشفر الجين *THBR* لنوع واحد من مستقبل هرمونات الغدة الدرقية وموقعه على الكروموسوم 3. بعض الأشخاص لديهم أليل غير طبيعي من هذا الجين على واحد من كروموسومات رقم 3، ولديهم حالة تسمّى مقاومة الغدة الدرقية Thyroid resistance، وفيها تفرز هرمونات الغدة الدرقية بشكل طبيعي، لكن من دون التأثير المعتاد في الخلايا المستهدفة.

١. استخدم المعلومات لتحديد ما إذا كان الأليل غير الطبيعي سائدًا أم متنحّيًا. اشرح إجابتك.

٢. اشرح كيف يمكن أن يؤدي الأليل غير الطبيعي إلى عدم قدرة الخلايا على الاستجابة لهرمونات الغدة الدرقية.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أشرح معنى المصطلحات: الجين، أحادي المجموعة الكروموسوميّة (n) ثنائي المجموعة الكروموسوميّة ($2n$).	١-٢			
أشرح المقصود بأزواج الكروموسومات المتماثلة.	١-٢			
أشرح ضرورة الانقسام المنصف خلال الانقسام الاختزالي لتكوين الأمشاج.	١-٢			
أصف سلوك الكروموسومات في الخلايا النباتية والحيوانية أثناء الانقسام الاختزالي بالإشارة إلى سلوك الغلاف النووي وغشاء سطح الخلية وخيوط المغزل (وأسمي الأطوار الرئيسية للانقسام الاختزالي: الطور التمهيدي الأول، الطورالاستوائي الأول الطور الانفصالي الأول، الطور النهائي الأول، الطور التمهيدي الثاني، الطورالاستوائي الثاني، الطور الانفصالي الثاني، الطور النهائي الثاني).	١-٢			
أفسِّر الأطوار الرئيسية للانقسام الاختزالي في الصور المجهريّة والرسوم التخطيطية للخلايا في مراحل الانقسام الاختزالي المختلفة، وأحدِّد الأطوار الرئيسيّة للانقسام الاختزالي.	١-٢			
أشرح أن عملية العبور والاصطفاف العشوائي (التوزيع الحر) لأزواج الكروموسومات المتماثلة والكروماتيدات غير الشقيقة أثناء عملية الانقسام الاختزالي تؤدي إلى إنتاج أمشاج مختلفة جينيًّا مع الإشارة إلى الأليلات، والارتباط والموقع الكروموسومية.	٢-٢			
أشرح أن الاندماج العشوائي للأمشاج يؤدي إلى تكوين أفراد مختلفين جينيًّا.	٢-٢			
أشرح معنى المصطلحات: سائد، متنح، سيادة مشتركة، طراز مظهري، طراز جيني، متماثل الأليلات، غير متماثل الأليلات.	٣-٢			

قائمة تقييم ذاتي

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أشرح معنى: التلقيح الاختباري، الجيل الأول (F1)، الجيل الثاني (F2)، والارتباط بالجنس.	٢-٤			
أكوّن وأفسّر مخططات جينية، بما في ذلك، مربعات بانيت، لأشرح وأتنبأ بنتائج تزاوجات أحادية الهجين وتزاوجات ثنائية الهجين تتضمن أمثلة على السيادة التامة، والسيادة المشتركة والأليلات المتعددة والارتباط بالجنس.	٢-٤			
أكوّن وأفسّر المخططّات الجينية، بما في ذلك مربعات بانيت، لأفسر وأتنبأ نتائج تزاوجات ثنائية الهجين تتضمن الارتباط بالجنس والتفوق الجيني.	٢-٤			
أكوّن وأفسّر مخططات جينية، بما في ذلك مربعات بانيت، للأفسر واتنبأ بنتائج بتزاوجات اختبارية.	٢-٤			
أشرح الصلة بين الجينات والبروتينات والطراز المظهري مع الإشارة إلى: • الجين *TYR*، والتايروسينيز، والمهق • الجين *HBB*، والهيموجلوبين، وفقر الدم المنجلي • الجين *F8*، والعامل الثامن (VIII)، والهيموفيليا • الجين *HTT* والبروتين هنتنغتن ومرض هنتنغتون.	٢-٥			
أصف الاختلافات بين الجينات التركيبية والجينات المنظمة والاختلافات بين الإنزيمات القابلة للتثبيط والإنزيمات القابلة للتحفيز.	٢-٦			
أصف تنظيم التحكم الجيني في إنتاج البروتين في الخلايا بدائية حقيقيات النواة باستخدام أوبرون *Lac*.	٢-٦			
أذكر أن عوامل النسخ هي بروتينات ترتبط بـ DNA وتشارك في التحكم بالتعبير الجيني في الخلايا حقيقية النواة عن طريق تقليل أو زيادة معدل النسخ.	٢-٦			

الوحدة الثالثة

التقنية الجينية

Genetic technology

أهداف التعلّم

٣-١ يشرح معنى المصطلح DNA معاد التركيب.

٣-٢ يشرح أن الهندسة الجينية هي المعالجة المقصودة للمادة الجينية لتعديل خصائص معيّنة في الكائن الحي، وقد يشمل ذلك نقل جين إلى الكائن الحي ليتم التعبير عنه.

٣-٣ يشرح أن الجينات التي تنقل إلى الكائن الحي قد تكون:

- مستخلصة من DNA كائن حي مانح.
- مصنعة من mRNA كائن حي مانح.
- مصنعة كيميائيًا من نيوكليوتيدات.

٣-٤ يشرح دور كل من إنزيمات القطع إندونيوكلييز و DNA لايجيز والبلازميدات و DNA بوليميريز، وإنزيم ترانسكريبتيز العكسي، في نقل الجين إلى الكائن الحي.

٣-٥ يشرح سبب نقل المحفز إلى الكائن الحي بالإضافة إلى الجين المطلوب.

٣-٦ يشرح كيف يمكن تأكيد التعبير الجيني باستخدام العلامات الجينية التي تشفر للمنتجات المتوهجة.

٣-٧ يصف ويشرح المراحل المتضمنة في تفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR) لاستنساخ وتضخيم DNA بما في ذلك دور *Taq* بوليميريز.

٣-٨ يصف ويشرح كيفية استخدام الفصل الكهربائي الهلامي لفصل قطع DNA مختلفة الطول.

٣-٩ يشرح ميزات استخدام بروتينات الإنسان المعاد تركيبها في معالجة الأمراض باستخدام أمثلة الإنسولين، والعامل الثامن VIII، وإنزيم الأدينوسين دي أمينيز.

٣-١٠ يحدّد ميزات الفحص الجيني باستخدام الأمثلة من سرطان الثدي (*BRCA1, BRCA2*) مرض هنتنغتون، والتليّف الكيسي.

٣-١١ يناقش الاعتبارات الاجتماعيّة والأخلاقيّة لاستخدام الفحص الجيني في الطب.

٣-١٢ يشرح أن الهندسة الجينية قد تساعد في حل مشكلة الطلب العالمي للغذاء من خلال تحسين جودة وإنتاجية حيوانات المزرعة والمحاصيل الزراعية، باستخدام أمثلة السلمون المعدل جينيًّا ومقاومة مبيدات الأعشاب في فول الصويا ومقاومة الحشرات في القطن.

٣-١٣ يناقش الآثار الأخلاقية والاجتماعية لاستخدام الكائنات المعدلة جينيًّا في إنتاج الغذاء.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

درست تركيب ووظيفة DNA في الوحدة الأولى، ويتطلب فهم الكثير من هذه الوحدة، معرفة جيدة بـ DNA وكيف يختلف عن RNA والبروتين.

ارسم رسمًا تخطيطيًا كبيرًا ومشروحًا لتبيّن:

- خصائص DNA.
- الاختلافات بين DNA و mRNA.
- كيف تختلف البروتينات عن DNA.

أضف إلى الرسم التخطيطي تعليقات توضح كيف أن تركيب DNA يجعله مناسبًا لتخزين المعلومات واسترجاعها ونقلها من جيل إلى آخر.

العلوم ضمن سياقها

مكافحة الجرائم عبر DNA

استدعى سكان حيٍّ من الأحياء الشرطة ليلًا، وأخبروهم أنهم سمعوا أصواتًا عالية في أحد منازل الحي، تبعها صوت إغلاق أبواب بشكل عنيف، وصوت سيارة تغادر الشارع بسرعة.

عندما وصلت الشرطة إلى المنزل وجدته خاليًا من سكّانه، مع وجود علامات صراع عنيف. ووجدت على أرض المطبخ قطرات دم، وسكينًا مغطى نصلها ومقبضها بالدم. تمّ استدعاء الضباط المختصين بمسرح الجريمة فأخذوا السكين كدليل وتم تسليمها إلى الطب الشرعي للتحليل.

يأخذ المختصون في الطب الشرعي عينة صغيرة من الدم للحصول على DNA منها للتحليل (الصورة ٣-١). كمية صغيرة من الدم تؤخذ عن السكين تكفي للمساعدة في التعرف على الضحية أو ربما مرتكب الجريمة.

يتم استخراج DNA من خلايا الدم البيضاء، حيث يعالج مختصو الطب الشرعي بدايةً الخلايا بمادة خاصة لفكّها وتحرير DNA في المحلول. تُلتقط عينة من DNA الخام على كُرات مغناطيسية، ويترك معظم بقايا الخلية والبروتين في المحلول. يتم هضم أي بروتين متبقٍّ في العيّنة باستخدام إنزيم بروتييز، ثم يغسل ليبقى DNA نقيًا وسليمًا. وأخيرًا يغسل DNA النقي عن الكُرات في كمية قليلة من المذيب.

من المحتمل إيجاد عيّنة DNA صغيرة جدًا ليمكن تحليلها، لذا تتم زيادة الكمية باستخدام DNA بوليميريز لتضخيم المناطق الرئيسية Key regions من DNA. ويؤدي ذلك إلى تكوين نسخ متعددة منها تستخدم لتكوين البصمة الوراثية Genetic profile. يتم مقارنة البصمات الوراثية للأشخاص الذين يوجد دمهم على السكين، مع بصمات محفوظة في قاعدة بيانات DNA الموجودة عند الشرطة للكشف عن أي تطابق. إذا وجدت البصمة في قاعدة البيانات يكون احتمال التطابق الإيجابي كبيرًا جدًا. وإن لم توجد، تلجأ الشرطة إلى الطرائق التقليدية في متابعة الأمر.

الصورة ٣-١ يأخذ أخصائي الطب الشرعي عينّة من الدم عن سكين وجدت في مسرح الجريمة.

سؤال للمناقشة

هناك احتمال كبير أن يكون DNA الخاص بك مختلفًا عن أي شخص آخر في العالم. ناقش أسباب ذلك.

٣-١ الهندسة الجينية

تهدف **الهندسة الجينية** **Genetic engineering** إلى إزالة جين (أو جينات) من كائن حي، ونقله إلى كائن حي آخر ليتم التعبير عن الجين. يسمّى DNA الذي جرى تعديله بهذه العملية، والذي يحتوي الآن على نيوكليوتيدات من كائنَين حيَّين **DNA معاد التركيب** **Recombinant DNA (rDNA)**. ويسمّى الكائن الحي الذي تمّ فيه التعبير عن الجين أو الجينات الجديدة **الكائن الحي المعدل جينيًا** **Genetically modified organism (GMO)** ويسمّى أيضًا الكائن الحي المحوّر جينيًّا **Transgenic organism** وقد يكون DNA من نوع آخر أو من كائن حي آخر من النوع نفسه.

تعدّ الهندسة الجينية وسيلة للتغلب على معوقات نقل الجينات بين الأنواع. فغالبًا ما تؤخذ الجينات من كائن حي من نطاق آخر أو مملكة أخرى، مثال ذلك إدخال جين بكتيري في نبات أو إدخال جين إنسان في بكتيريوم. وعلى العكس من التكاثر الانتقائي الذي يشمل مجموعات كاملة من الجينات (الصف العاشر، الوحدة السادسة، الموضوع ٦-٢ التكاثر الانتقائي)، تؤدي الهندسة الجينية إلى نقل جين واحد في أغلب الأحيان. ولذلك يجب مراعاة القضايا الأخلاقية والاجتماعية المتعلقة بهذا الموضوع، والتي سيتم مناقشتها في نهاية هذه الوحدة.

نظرة عامة عن نقل الجين

توجد عدة طرائق لتكوين الكائنات الحية المعدلة جينيًّا، ولكنها تشمل الخطوات المهمة الآتية:

1. يتم تحديد الجين المطلوب. ويمكن اقتطاعه من كروموسوم أو تكوينه من mRNA بالنسخ العكسي، أو يتم بناؤه من النيوكليوتيدات.
2. يتم تكوين عدة نسخ من الجين باستخدام تقنية تفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR).
3. يتم إدخال الجين في **ناقل** **Vector**، والذي يوصل الجين إلى داخل خلايا الكائن الحي. ومن أمثلة النواقل: البلازميدات والفيروسات والليبوسومات.
4. يتم تحديد الخلايا التي تحتوي على الجين الجديد، غالبًا باستخدام العلامات الجينية Marker genes، ثم يتم استنساخ هذه الخلايا.

يستخدم مهندس الجينات مجموعة من الأدوات Tool kit لتنفيذ هذه الخطوات:

- إنزيمات، مثل إنزيمات القطع إندونيوكلييز، وإنزيم DNA لايجيز وإنزيم ترانسكريبتيز العكسي.
- نواقل، تشمل البلازميدات والفيروسات.
- جينات تشفر لمواد يسهل تحديدها ويمكن أن تُستخدم كعلامات.

سؤال

١ اشرح كيف يختلف التكاثر الانتقائي عن الهندسة الجينية.

مصطلحات علمية

الهندسة الجينية Genetic engineering: أي إجراء يتضمن تغيير المعلومات الجينية في كائن حي عن طريق إدخال جين من كائن حي آخر، يسمّى هذا الكائن الحي كائنًا حيًّا معدلًا جينيًّا (GMO).

DNA معاد التركيب Recombinant (rDNA) DNA: يتم تكوينه اصطناعيًا بربط قطع من DNA من كائنين حيين من النوع نفسه أو نوعَين مختلفَين أو أكثر.

الكائن الحي المعدل جينيًا (GMO) Genetically modified organism: أي كائن حي تمّ تغيير DNA فيه بطريقة لا تحدث طبيعيًا أو بالتكاثر الانتقائي وقد يكون مصدر DNA من كائن حي من نوع آخر أو من النوع نفسه.

ناقل Vector: وسيلة لإيصال الجينات إلى الخلية المستخدمة في التقنية الجينية؛ على سبيل المثال، البلازميدات والفيروسات.

٣-٢ أدوات تقني الجينات

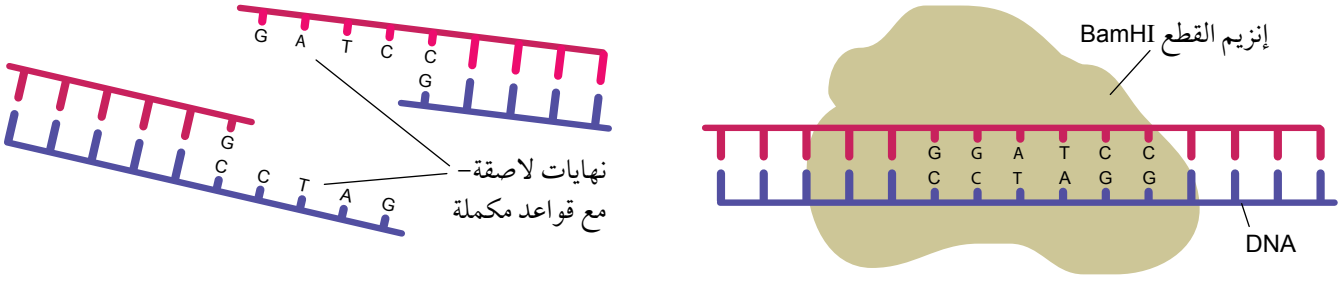
إنزيمات القطع

تستجيب البكتيريا عن طريق إنتاج إنزيمات تسمّى إنزيمات القطع Restriction enzymes عندما تهاجمها فيروسات تسمّى **الفيروسات آكلة البكتيريا (الفاجات)** **Phages – Bacteriophages**. وهذه فئة من الإنزيمات التي تحد من العدوى الفيروسية عن طريق تقطيع DNA الفيروسي إلى أجزاء أصغر لتحطيمه. وهي تقوم بذلك عن طريق قطع العمود الفقري سكر – فوسفات في أماكن محددة في داخل جزيء DNA، وليس في نهايتَيه، لذا تسمّى **إنزيمات القطع إندونيوكلييز Restriction endonuclease enzymes**.

يستهدف كل إنزيم موقع قطع Restriction site، وهو تتابع محدّد من أربع إلى ست قواعد. على سبيل المثال، إنزيم القطع المسمّى BamHI، يقطع DNA الفيروسي عند التتابع GGATCC على الشريط 5′ إلى 3′ والتتابع المكمل CCTAGG على الشريط 3′ إلى 5′. للعديد من مواقع القطع تتابعات متناظرة Palindromic sequences (يكون التتابع نفسه عندما يقرأ من كلا الاتجاهين). وطبيعيٌّ أن تحمي البكتيريا DNA الخاص بها سواء من التغيير الكيميائي لقواعده، أو عدم وجود مواقع قطع فيه.

يمكن أن يقطع إنزيم القطع بطريقة مستقيمة عبر العمود الفقري سكر– فوسفات لتكوين نهايات مستقيمة، أو كما هو مبيّن في الشكل ٣–١، بطريقة متعرّجة لتكوين «نهايات لاصقة»، تاركًا أجزاء قصيرة من قواعد غير مزدوجة. ويمكن عند هذه النهايات اللاصقة تكوين روابط هيدروجينية مع تتابع القواعد المكملة على أجزاء أخرى من DNA المقطوع.

عندما يُقطع شريط طويل بهذه الطريقة يتكوّن مزيج من أجزاء مختلفة الطول، ويعمل تقني الجينات على فصل هذه الأجزاء تبعًا لأطوالها باستخدام الفصل الكهربائي الهلامي. يمكن بعد ذلك تكوين نسخ عديدة من جزء DNA المستهدف باستخدام تفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR) (Polymerase chain reaction). (انظر الموضوع ٣–٤، فصل وتضخيم DNA).



الشكل ٣–١ إنزيم القطع BamHI يقطع DNA بشكل متعرج لينتج قطع ذات نهايات لاصقة. لاحظ أن النهايات اللاصقة مكملة لتتابع القواعد -CTAG و -GATC.

مصطلحات علمية

إنزيمات القطع إندونيوكلييز Restriction endonuclease enzymes: إنزيمات مشتقة أصلًا من البكتيريا، تقطع في أماكن محددة داخل جزيء DNA وليس في نهايته.

الفيروسات آكلة البكتيريا (الفاجات) Bacteriophages-Phages: نوع من الفيروسات يهاجم البكتيريا. تكون المادة الجينية للفاجات على شكل جزيء DNA مزدوج.

سُمّيت إنزيمات القطع باختصارات تشير إلى مصدرها (الجدول ٣-١). أضيفت الأرقام الرومانية للتمييز بين الإنزيمات المختلفة من المصدر نفسه. على سبيل المثال، EcoRI تأتي من الأشريكية القولونية *Escherichia coli* (سلالة RY13)، وكانت الأولى التي حددت من مصدرها.

سؤال

(٢) **أ.** اشرح المصطلح «نهاية لاصقة».

ب. تم قطع أربعة أجزاء مختلفة الطول من DNA: A , B ,C ,D، بإنزيم القطع EcoRI. عدد مواقع القطع لهذا الإنزيم في الأجزاء المختلفة: A - 5, B - 7, C - 0, D - 3. حدد عدد القطع التي ستتكوّن من كل جزء من DNA بعد حضانته مع EcoRI.

ج. صف ميزات مواقع القطع المبيّنة في الجدول ٣-١.

د. استخدم المعلومات في الجدول ٣-١ لشرح مزايا استخدام إنزيمات القطع إندونيوكلييز في الهندسة الجينية.

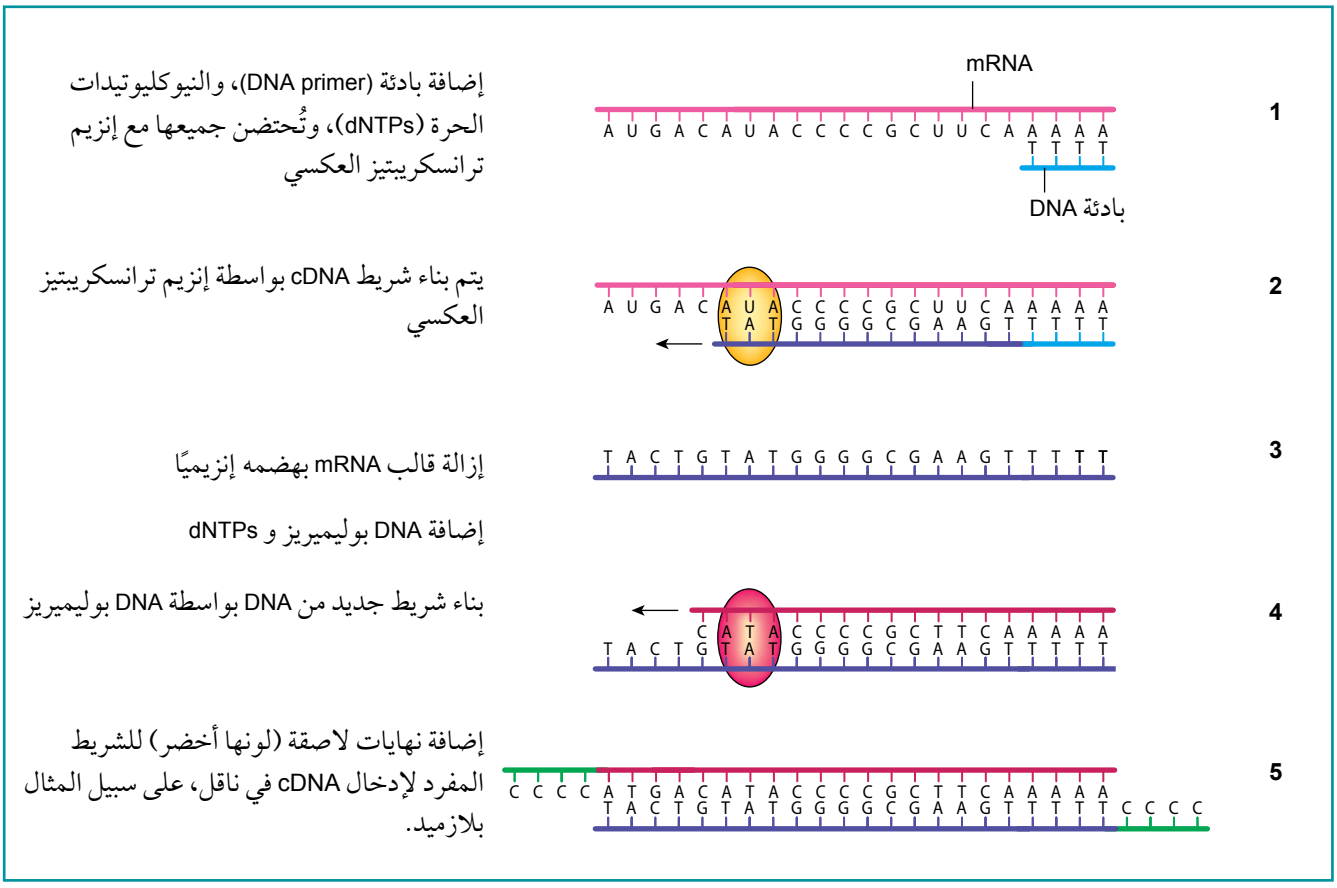
إنزيم القطع	موقع القطع	موقع القطع عبر DNA	مصدر الإنزيم
EcoRI	5′ –G AATTC– 3′ 3′ –CTTAA G– 5′	–G | AATTC– –CTTAA | G–	الأشريكية القولونية *Escherichia coli*
BamHI	5′ –G GATCC– 3′ 3′ –CCTAG G– 5′	–G | GATCC– –CCTAG | G–	باسيلوس أميلوليكوفاسينز *Bacillus amyloliquefaciens*
HindIII	5′ –A AGCTT– 3′ 3′ –TTCGA A– 5′	–A | AGCTT– –TTCGA | A–	هيموفيلوس إنفلونزا *Haemophilus influenzae*
HaeIII	5′ –GG CC– 3′ 3′ –CC GG– 5′	–GG | CC– –CC | GG–	هيموفيلوس إيجيبتيوس *Haemophilus aegyptius*

الجدول ٣-١ أربعة أنواع من إنزيمات القطع إندونيوكلييز، ومواقع القطع لها، والبكتيريا التي اكتشفت فيها لأول مرة.

إنزيم ترانسكريبتيز العكسي

يحتوي DNA الكروموسومي في جينات حقيقية النواة على تتابع مُشَفّر من القواعد (إكسونات) وتتابع غير مُشَفّر (إنترونات). يُنسخ DNA إلى RNA في النواة، ويقطع RNA إلى أجزاء. وبعد عملية الربط تستخدم الإكسونات فقط من RNA في تكوين mRNA، الذي يغادر النواة. ولتجنب استخدام DNA الكروموسومي بالإنترونات والإكسونات، يستخدم التقنيون جزيء mRNA من السيتوبلازم، كقالب لصنع DNA، وهذا أصبح ممكنًا بعد اكتشاف إنزيم ترانسكريبتيز العكسي Reverse transcriptase الذي يوجد في فيروسات RNA.

ويستخدم هذا الإنزيم شريط mRNA المفرد ونيوكليوتيدات DNA الحرة لتكوين شريط DNA مفرد (Single-stranded DNA). ثم يُستخدم إنزيم DNA بوليميريز لبناء عديد نيوكليوتيد مكمل لشريط DNA، مكوّنًا DNA مكمل مزدوج الشريط (Double-stranded complementary DNA)، ويعبر عنه اختصارًا cDNA (الشكل ٣-٢).



الشكل ٣-٢ النسخ العكسي من mRNA لتكوين cDNA. dNTPs هي ديوكسي نيوكليوتيد ثلاثية الفوسفات، مثل، dCTP، dGTP، dTTP، dATP.

بناء DNA اصطناعيًا

يتمكن العلماء من بناء الجينات، وذلك باستخدام الشيفرة الجينية (انظر الوحدة الأولى، الموضوع ١-٣، الشيفرة الجينية)، وحتى بناء **الجينومات Genomes** الكاملة مباشرة من نيوكليوتيدات DNA، من دون استخدام قوالب DNA الكروموسومي أو mRNA. تستطيع أجهزة بناء DNA تكوين أجزاء DNA قصيرة اعتمادًا على تتابع النيوكليويتدات المحفوظ في الحاسوب، والذي يتم اختباره اعتمادًا على تتابع الأحماض الأمينية التي تنتج منه. يتم ربط قطع DNA القصيرة معًا لتكوين تتابع طويل من النيوكليوتيدات، والذي يتم إدخاله في البلازميدات ليستخدم في الهندسة الجينية. وقد استخدمت هذه التقنية لتكوين جينات جديدة تستخدم على سبيل المثال، في تكوين اللقاحات. كما استخدمت لتكوين جينومات بكتيريا صناعية تحتوي على مليون زوج من القواعد.

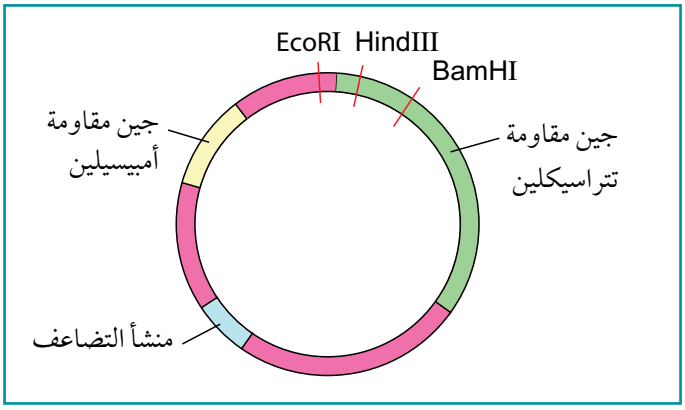
مصطلحات علمية

الجينوم Genome:
المجموعة الكاملة من الجينات أو المادة الجينية الموجودة في الخلية أو الكائن الحي. يحتوي جينوم حقيقية النواة على DNA في النواة والميتوكندريا، وتشمل جينومات النباتات DNA الموجود في البلاستيدات الخضراء.

النواقل

إدخال جين في بلازميد ناقل

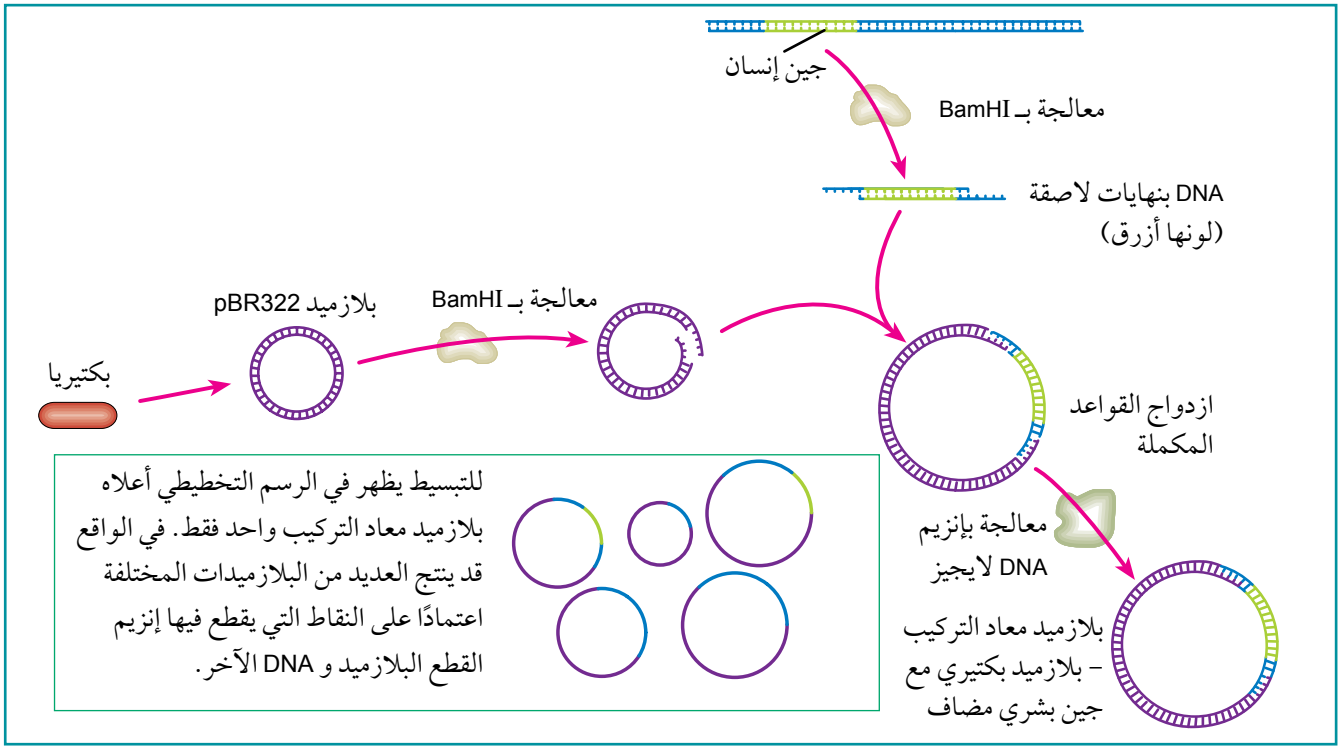
تستخدم النواقل لوضع الجزء المرغوب فيه من DNA الذي يحتوي على جين واحد أو أكثر داخل خلية مضيفة. أحد أنواع النواقل هو البلازميد Plasmid (الشكل ٣-٣)، وهي قطع حلقية صغيرة من أشرطة DNA مزدوجة. توجد البلازميدات طبيعيًا في البكتيريا، والتي غالبًا ما تحتوي على جينات مقاومة للمضادات الحيوية. ويمكن تبادلها بين البكتيريا من النوع نفسه، وحتى بين البكتيريا من أنواع مختلفة. فإذا أدخل مهندس جيني قطعة من DNA في بلازميد، يمكن استخدام هذا البلازميد لنقل DNA إلى خلية البكتيريا.



الشكل ٣-٣ البلازميدات قطع حلقية من أشرطة DNA مزدوجة، يرسم عادة كما هو موضح هنا. يبدو في الرسم البلازميد pBR322 الذي يستخدم في إنتاج إنسولين الإنسان بواسطة البكتيريا المعدلة جينيًا (GM). ويظهر كذلك جين مقاوم للمضاد الحيوي تتراسيكلين Tetracycline وأخر للمضاد الحيوي أمبيسيلين Ampicillin.

يمكن الحصول على البلازميدات عن طريق معالجة البكتيريا بالإنزيمات لتفكيك جدرانها الخلوية. ثم توضع في جهاز الطرد المركزي، حيث يجري تدويرها بسرعة كبيرة، ما يؤدي إلى فصل البلازميدات الحلقية الكبيرة نسبيًا عن البلازميدات الأصغر بكثير.

يُستخدم إنزيم القطع لفتح DNA البلازميد الحلقي (الشكل ٣-٤). ويجب أن يُستخدم الإنزيم نفسه في قطع الجين المطلوب، لتصبح النهايات اللاصقة لكل من الجين و DNA البلازميد مكملة لبعضها (الشكل ٣-١). إذا استُخدم إنزيم قطع يعطي نهايات مستقيمة، فسيحتاج نهايات لاصقة ترتبط بكل من الجين و DNA البلازميد.



الشكل ٣-٤ إدخال جين إنسان في البلازميد البكتيري pBR322.

تمزج البلازميدات المفتوحة وأجزاء DNA التي تحتوي على الجين المطلوب معًا، حيث ترتبط بعض النهايات اللاصقة على البلازميدات مع النهايات اللاصقة على DNA. والعديد منها ببساطة يعود إلى وضعه الطبيعي (حلقة مغلقة) من دون دمج DNA. يربط إنزيم DNA لايجيز معًا العمود الفقري سكر- فوسفات في DNA والبلازميد (الوحدة الأولى، الموضوع ١-٢، تضاعف DNA). حيث يقوم الإنزيم بذلك عن طريق تحفيز تكوين روابط فوسفات ثنائية الإستر، وهذا يكوّن حلقة مغلقة من أشرطة DNA المزدوجة المحتوية على الجين الجديد، فيتكون البلازميد معاد التركيب. يمكن تعديل البلازميدات البكتيرية لإنتاج نواقل، ويمكن أيضًا إنتاج البلازميدات اصطناعيًا.

إدخال البلازميدات إلى البكتيريا

تتمثل الخطوة التالية للعملية في جعل البكتيريا تمتص البلازميدات. توضع البكتيريا والبلازميدات أولًا في محلول يوجد فيه تركيز عالٍ من أيونات الكالسيوم، ثم يبرد المزيج ويُعرض لصدمة حرارية؛ فيزيد ذلك من احتمال عبور البلازميدات عبر غشاء سطح خلية البكتيريا. نسبة قليلة من البكتيريا، ربما 1%، تمتص البلازميدات معادة التركيب، فيقال إنها عُدّلت Transformed. والبقية تمتص البلازميدات المغلقة من دون جين مدمج بها، أو لا تمتص أي بلازميد على الإطلاق.

التعرف على البكتيريا ذات DNA معاد التركيب

من المهم تحديد البكتيريا التي عُدّلت بنجاح ليمكن استخدامها في تكوين البروتين المشفر من الجين. كان هذا الأمر يتم سابقًا عن طريق نشر البكتيريا على صفائح آجار Agar تحتوي كل منها على مضاد حيوي. وقد تراجع الاهتمام بهذه التقنية، واستبدلت بطرائق أبسط لتحديد البكتيريا المعدلة باستخدام العلامات الجينية.

ينسخ DNA بوليميريز في البكتيريا البلازميدات، ثم تنقسم البكتيريا بالانشطار الثنائي، بحيث تحتوي كل خلية ناتجة على عدة نسخ من البلازميد. يعرف إنتاج عدة نسخ من البلازميد معاد التركيب باسم الاستنساخ الجيني Gene cloning، وهذه إحدى الطرائق لإنتاج عدة نسخ من الجين للاستخدام في الهندسة الجينية أو الأبحاث. تنسخ البكتيريا الجين الجديد إلى mRNA لتستخدمه في الترجمة لتكوين بروتين يسمّى البروتين معاد التركيب (الشكل ٣-٥).

أسئلة

٣ ميّز بين rDNA و cDNA.

٤ لخص مزايا استخدام البلازميدات كنواقل في الهندسة الجينية.

٥ كوّن رسمًا تخطيطيًا يبيّن كيفية قطع جزء من DNA بإنزيمات القطع ثم ادخاله في بلازميد. بيّن كلا شريطَي DNA في الرسم.

إنسولين الإنسان معاد التركيب

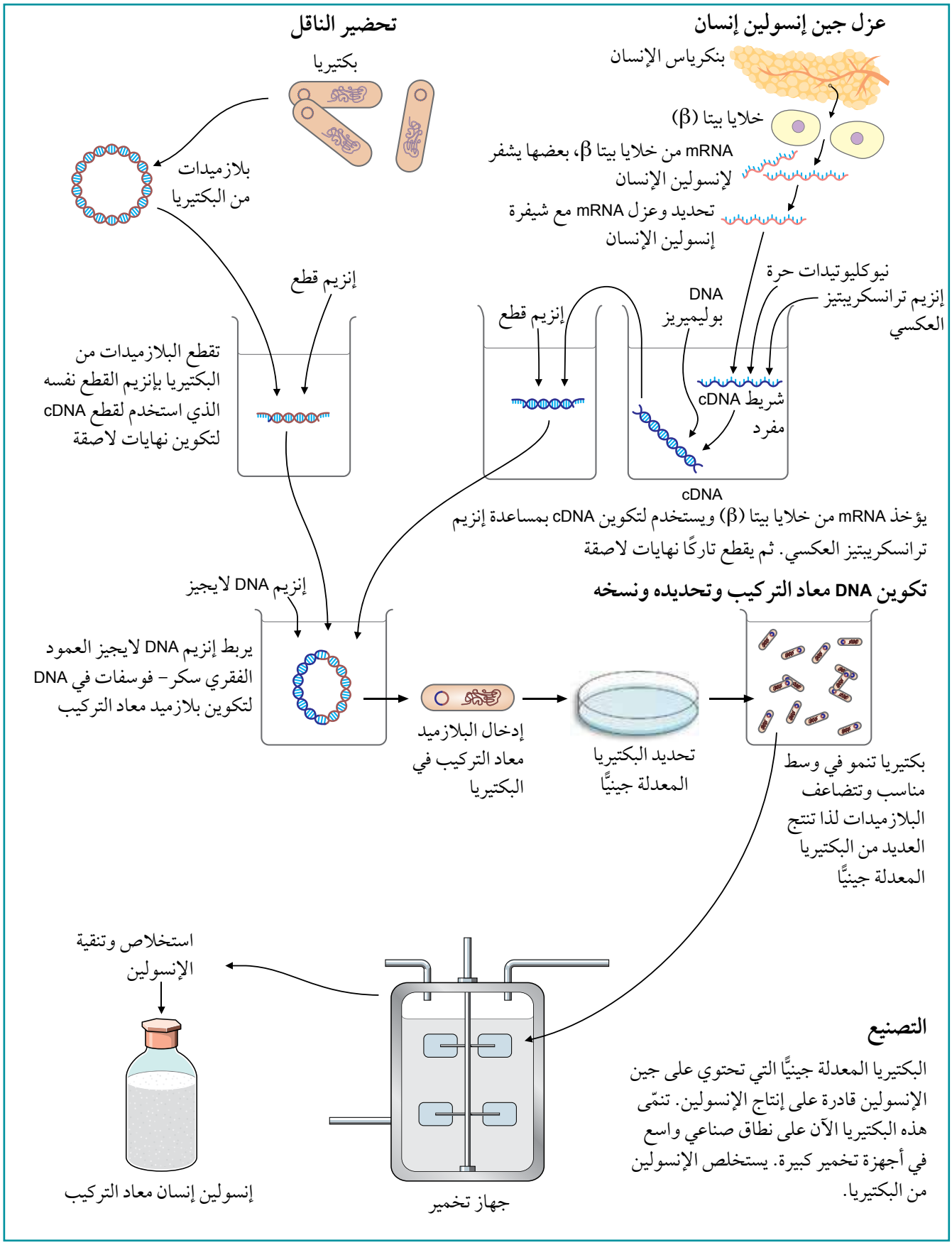
ينتج أحد أنواع مرض السكري من عدم قدرة البنكرياس على إنتاج الإنسولين (الوحدة الرابعة: الاتزان الداخلي، الموضوع ٤-٤، التحكم في تركيز الجلوكوز في الدم). وقد كان مرضى هذا النوع من السكري، قبل أن يتوافر الإنسولين من البكتيريا المعدلة جينيًّا، يعالجون بإنسولين مستخلص من بنكرياس الخنازير أو الماشية. وفي السبعينات من القرن الماضي، بدأت شركات التقنية الجينية الحيوية العمل على فكرة إدخال جين إنسولين الإنسان في خلية البكتيريا، ثم استخدام خلية البكتيريا في إنتاج الإنسولين. وقد جربوا لذلك عدة طرائق مختلفة، لينجحوا أخيرًا في ثمانينيات القرن الماضي، وأصبح إنسولين الإنسان معاد التركيب متوافرًا بدءًا من العام 1983م. يبيّن الشكل ٣-٥ طريقة إنتاج إنسولين الإنسان معاد التركيب.

واجه العلماء مشكلات في تحديد موقع الجين الذي يشفر لإنسولين الإنسان وعزله عن بقية DNA في خلية الإنسان. لذا، وبدلًا من قطع الجين من الكروموسوم المرتبط به، استخلص العلماء mRNA الإنسولين من خلايا بيتا (β) البنكرياسية. وهذه هي الخلايا الوحيدة التي تعبّر عن جين الإنسولين وتحتوي على كمية كبيرة من mRNA للإنسولين. أُستُخدِم mRNA كقالب للنسخ العكسي لتكوين شريط DNA مفرد. ثم استُخدِمت جزيئات DNA المفردة كقالب لإنزيم DNA بوليميريز لتكوين DNA مزدوج (الشكل ٣-٢). وبهذه الطريقة حصل مهندسو الجينات على جينات إنسولين يمكن إدخالها في البلازميدات لتعديل بكتيريوم الأشريكية القولونية.

يُصنّع إنسولين الإنسان معاد التركيب حاليًّا في خلايا خميرة معدلة جينيًّا أو في خلايا حيوانية بدل خلايا البكتيريا. ويعود ذلك إلى أن الخلايا حقيقية النواة تحتوي على جهاز جولجي حيث يمكن تجميع وثَنْي سلسلتَي عديد ببتيد الإنسولين بشكل صحيح. الميزة الرئيسية لهذا الإنسولين معاد التركيب أنه متوافر ومتاح لتلبية الطلب المتزايد. فلا يعتمد الحصول على الإنسولين على عوامل مثل توفر البنكرياس الحيواني. كما أن هذا الإنسولين هو إنسولين إنسان بدلًا من إنسولين من نوع آخر، والذي لا يكون مطابقًا كليًا.

الصورة ٣-٢ إنسولين أسبارت Aspart insulin، نوع من الإنسولين معاد التركيب يصنع بواسطة الخميرة المعدلة جينيًّا ويباع تحت العلامة التجارية NovoLog® وغيرها. غالبا ما يؤخذ فقط قبل تناول الطعام ويكون له التأثير الأقصى بعد نحو ساعتين ويستمر لمدة أربع ساعات.

عمل مهندسو الجينات على تغيير تتابع نيوكليوتيدات جين الإنسولين لتكوين جزيئات بتسلسل أحماض أمينية مختلفة قليلًا. هذه الجزيئات المماثلة من الإنسولين لها خصائص مختلفة. على سبيل المثال، قد يعمل بعضه بشكل أسرع، ويكون من المفيد تناوله قبل الوجبة مباشرة (انظر الصورة ٣-٢). وقد يعمل بعضه بشكل أبطأ خلال فترة 8 – 24 ساعة، ويكون بالتالي مفيدًا في الحفاظ على تركيز إنسولين الدم قريبًا من الثبات بحيث لا ينقص كثيرًا. يتناول كثير من مرضى السكري كلا هذَين النوعين من الإنسولين معاد التركيب في الوقت نفسه.



الشكل ٣- ٥ إنتاج الإنسولين من البكتيريا المعدلة جينيًّا.

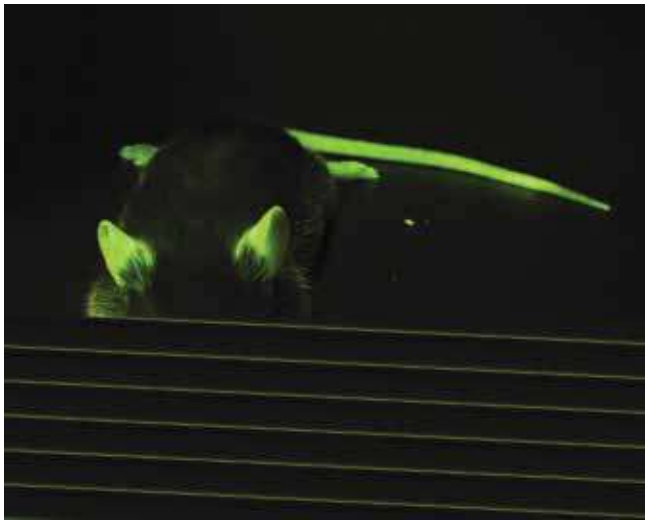
العلامات الجينية

تُستخدم العلامات الجينية Genetic markers لتحديد البكتيريا المعدلة جينيًا. وتُستخدم الجينات المقاومة للمضادات الحيوية Antibiotic-resistance genes كعلامات بمعدل أقل في الوقت الحاضر لتقليل خطر البكتيريا المقاومة للمضادات الحيوية. ويستعيض العلماء عن ذلك، باستخدام جينات تشفر للإنزيمات المنتجة للمواد المتوهجة Fluorescent. على سبيل المثال، الإنزيمات التي تم الحصول عليها من قنديل البحر تصنع بروتينًا يسمّى GFP (البروتين المتوهج الأخضر Green fluorescent protein)، والذي يتوهج باللون الأخضر في الضوء فوق البنفسجي. يُدخَل جين الإنزيم في البلازميدات، لذا كل ما يجب القيام به لتحديد البكتيريا التي امتصت البلازميد معاد التركيب، هو تسليط الضوء فوق البنفسجي عليها. فتلك التي تتوهج باللون الأخضر هي البكتيريا المعدلة جينيًا. يمكن استخدام العلامة الجينية نفسها في العديد من الكائنات الحية (الصورة ٣-٣).

يُستخدم إنزيم بيتا جلوكورونيديز β-glucuronidase (GUS)، والذي يؤخذ من الأشريكية القولونية، كعلامة جينية أخرى. عندما تُحتضن أي خلية معدّلة جينيًّا - تحتوي على الإنزيم - مع بعض المواد المتفاعلة عديمة اللون أو غير المتوهجة، يمكن للإنزيم أن يحوّلها إلى نواتج ملوّنة أو متوهجة. وهذا يفيد بشكل خاص في الكشف عن نشاط الجينات التي يتم إدخالها في النباتات مثل نبات الندية *Sundew* في الصورة ٣-٤.

سؤال

٦ هل ستكون جميع خلايا البكتيريا المتوهجة قد امتصت بالفعل الجين المراد إدخاله؟ اشرح إجابتك.



الصورة ٣-٣ فأر معدل جينيًا يعبّر عن جين بروتين متوهج.

الصورة ٣- ٤ نبات الندية، نبات آكل الحشرات يستخدم شعيرات لاصقة لاصطياد الحشرات. إلى اليسار ورقة من نبات الندية معدل جينيًا يعبّر عن جين إنزيم GUS. وضعت الورقة في محلول من مادة عديمة اللون وإنزيم GUS، وحوَّل الإنزيم لونها إلى هذا اللون الأزرق الداكن، ما يشير إلى أن النبات جرى تعديله جينيًا بنجاح. إلى اليمين ورقة ندية عادية.

المحفزات

مصطلحات علمية

محفز Promoter: جزء من DNA يتضمن موقع ارتباط لإنزيم RNA بوليميريز حيث يبدأ نسخ الجين أو الجينات. تحتوي المحفزات أيضًا في حقيقية النواة على مواقع لارتباط عوامل النسخ.

تحتوي البكتيريا على العديد من الجينات المختلفة التي تصنع العديد من البروتينات المختلفة. لكن لا يتم تشغيل كل الجينات معًا. تصنع البكتيريا فقط البروتينات المطلوبة في الظروف التي تنمو فيها. على سبيل المثال، تصنع بكتيريا الأشريكية القولونية إنزيم بيتا (β)- جلاكتوسيديز فقط عندما تنمو في وسط يحتوي على لاكتوز ولا يتوافر فيه جلوكوز (انظر الوحدة ٢، الموضوع ٢-٦ التحكم في التعبير الجيني).

يتم التحكم في التعبير عن الجينات، مثل تلك الموجودة في أوبرون *Lac*، عن طريق **محفز Promoter**، وهو منطقة في DNA يرتبط بها RNA بوليميريز عند بداية النسخ. ولكي يتم التعبير عن الجين، يجب إدخال المحفز المناسب إلى البكتيريوم. عندما عُدلت البكتيريا لأول مرة لإنتاج الإنسولين، أدخل جين الإنسولين إلى جوار جين إنزيم بيتا (β)- جلاكتوسيديز، فتشاركا المحفز نفسه (انظر الرسم التخطيطي لأوبرون *Lac* في الشكل ٢-١٠). يعمل المحفز على تشغيل جين الإنسولين عندما تحتاج البكتيريا إلى أيض اللاكتوز، وبالتالي تصنع البكتيريا كلًا من بيتا (β)- جلاكتوسيديز وإنسولين إنسان عندما تنمو في وسط غذائي يحتوي على اللاكتوز وليس الجلوكوز.

يسمح المحفز لإنزيم RNA بوليميريز بالارتباط مع DNA، والتأكد أيضًا من أنه مَيَّزَ أيًّا من شريطي DNA هو الشريط القالب. وفي التتابع النيوكلوتيدي لمنطقة المحفز، توجد نقطة بدء النسخ، وهي أول نيوكليوتيد من الجين يتم نسخه. بهذه الطريقة، يمكن القول إن المحفز يتحكم في التعبير عن الجين، ويتأكد من وجود مستوى عال من التعبير الجيني. تذكّر أن البروتينات المعروفة باسم عوامل النسخ في خلايا حقيقية النواة ضرورية للارتباط بمنطقة المحفز أو RNA بوليميريز قبل بدء النسخ (الوحدة الثانية، الموضوع ٢-٦، التحكم في التعبير الجيني).

سؤال

(٧) أعد ترتيب العبارات أدناه لتكوين مخطط انسيابي يبيّن الخطوات المتبعة في تكوين البكتيريا القادرة على صنع بروتين إنسان معاد التركيب مثل الإنسولين أو العامل الثامن.

أ. إدخال بلازميد في بكتيريوم مضيفة.

ب. عزل mRNA الجين المطلوب.

ج. استخدام إنزيم DNA لايجيز لغلق العمود الفقري سكر- فوسفات للبلازميد معاد التركيب.

د. استخدام DNA بوليميريز لتكوين cDNA مزدوج.

هـ. استنساخ البكتيريا المعدلة وحصاد البروتين معاد التركيب.

و. تكوين cDNA مفرد باستخدام إنزيم ترانسكريبتيز العكسي.

ز. قطع البلازميدات باستخدام إنزيم القطع.

ح. إضافة جزء قصير من DNA مفرد لتكوين نهايات لاصقة باستخدام إنزيم.

ط. تكوين بلازميدات معادة التركيب بازدواج القواعد المكملة.

ي. خلط DNA مزدوج مع البلازميدات.

٣-٣ فصل وتضخيم DNA

تفاعل البوليميريز المتسلسل

يُستخدم **تفاعل البوليميريز المتسلسل Polymerase chain reaction** (اختصارًا PCR) تقريبًا في كل تطبيقات التقنية الجينية لتضخيم جزء معيّن من DNA. يمكن إنتاج كميّات غير محدودة من جزء DNA من كميّة صغيرة من DNA (وإن كان جزيئًا واحدًا) وبطريقة سهلة وسريعة. يبيّن الشكل ٣-٦ المراحل المتضمنة في دورة واحدة من تفاعل PCR.

يضاف ما يأتي إلى كل أنبوبة في جهاز PCR:

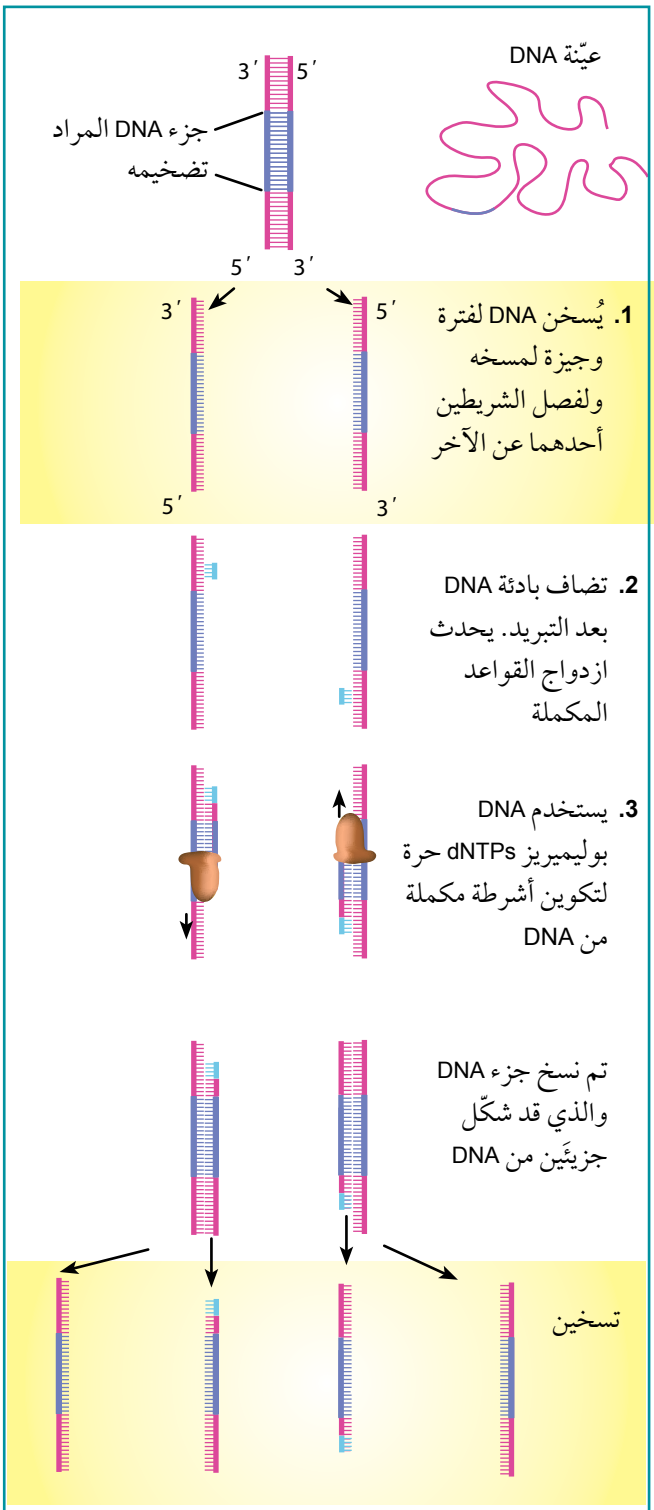
- عيّنة من DNA، وهي جزء DNA المراد تضخيمه.
- جزآن قصيران مختلفان من شريط DNA مفرد يعملان كبادئات لإنزيم DNA بوليميريز.
- جزيئات حرة من ديوكسي نيوكليوتيد ثلاثي الفوسفات (dNTPs)، والتي تعمل كوحدات أساسية لبناء أشرطة جديدة من DNA.
- محلول منظم عند pH 7–8.
- محلول من DNA بوليميريز مستقر حراريًا.

يتم تشغيل جهاز PCR ويترك ليعمل. تتطلب كل مرحلة درجة حرارة مختلفة، لذا تُغير أجهزة PCR درجة حرارة المزيج ذاتيًا. الأنابيب صغيرة جدًا (تستوعب 0.05 mL تقريبًا)، وجدرانها رقيقة جدًا، لذا تتغير درجة الحرارة فيها بسرعة عندما تتغير درجة الحرارة في الجهاز (الصورة ٣-٥).

مصطلحات علمية

تفاعل البوليميريز المتسلسل

Polymerase chain reaction (PCR): عملية يتم فيها تضخيم أجزاء معيّنة من DNA آليًا باستخدام مراحل متناوبة من فصل عديد النيوكليوتيد (تمسخ DNA) وبناء DNA الذي يحفزه إنزيم DNA بوليميريز.



تسخين DNA يسبب تمسخه، والذي يبدأ دورة جديدة من النسخ متتبعًا المراحل 1 إلى 3. تكرار الدورة من 10 إلى 12 مرة ينسخ قطعة DNA عدة مرات.

الشكل ٣-٦ المراحل الثلاث في دورة واحدة من PCR. المنطقة الوحيدة في العيّنة المراد تضخيمها هي تلك التي بين البادئتين (اللون الأزرق).

- **المرحلة الأولى التمسخ** Denaturation: يتم أولًا تمسيخ DNA بتسخينه إلى 95°C تقريبًا، الأمر الذي يكسر الروابط الهيدروجينية بين أزواج القواعد، ويفصل شريطي DNA أحدهما عن الآخر، لتبقى القواعد مكشوفة (غير مزدوجة).

- **المرحلة الثانية (الالتصاق** Annealing): ترتبط البادئات مع تتابع القواعد على كلا جانبَي DNA الجاري تضخيمه عن طريق تكوين روابط هيدروجينية. وتتطلب العملية وجود البادئات إذ لا يمكن أن يبدأ إنزيم DNA بوليميريز بتكوين DNA بدون وجود شريط يمكن البناء عليه. تتكوّن البادئات غالبًا من 20 زوجًا من القواعد تقريبًا، ذات تتابع مكمل لتتابع القواعد على كلا جانبَي جزء DNA الجاري نسخه. تحتوي البادئات على تتابع قواعد مختلف، حيث ترتبط إحداهما بالشريط «صعودًا» وترتبط الأخرى بالشريط «نزولًا» كما في الشكل ٣-٦. يتطلب الارتباط بالبادئات درجة حرارة 60°C تقريبًا.

الصورة ٣-٥ باحثة عمانية من المديرية العامة للبحوث الزراعية والحيوانية بسلطنة عمان تقوم بتحميل جهاز PCR (مدوّر حراري) بمواد التفاعل اللازمة لتضخيم عيّنات صغيرة من DNA. يغير الجهاز تلقائيًا درجة حرارة المزيج في كل أنبوبة. بعد 30 دورة في هذا الجهاز، سيتكون ملياري نسخة (2^{30}) من DNA الأصلي.

- **المرحلة الثالثة (الإطالة** Extension): يستخدم إنزيم DNA بوليميريز بعد ذلك dNTPs لتكوين أشرطة جديدة من DNA مقابل تلك المكشوفة. ويتطلب ذلك درجة حرارة 72°C تقريبًا. ويتم الحصول على إنزيم DNA بوليميريز المستخدم في هذه العملية من الكائنات الحية الدقيقة التي تكيّفت للعيش في البيئات الحارة.

في نهاية الدورة الأولى، بعد أن يكون DNA قد تم نسخه، يسخن المزيج مرة أخرى للبدء بالدورة الثانية، والتي ينتج منها أربعة جزيئات من DNA مزدوج.

Taq بوليميريز هو أول إنزيم DNA بوليميريز مستقر حراريًا يستخدم في PCR. وقد استخلص من البكتيريا المحبة للحرارة *Thermus aquaticus*، التي وجدت في الينابيع الحارة في منتزه يلوستون Yellowstone Park في الولايات المتحدة الأمريكية. يمثل هذا الإنزيم قيمة كبيرة لـ PCR لسببَين: الأول لأنه لا يتحطم في مرحلة التمسخ، لذا يجب ألّا نستبدله أثناء كل دورة، والثاني، له درجة حرارة مثلى عالية، الأمر الذي يعني أن درجة الحرارة لمرحلة الإطالة يجب ألّا تنخفض إلى أقل من تلك في عملية الالتصاق، ما يزيد من الكفاءة إلى أقصى حد. العديد من إنزيمات DNA بوليميريز المختلفة والمستقرة حراريًا متاحة الآن لـ PCR.

يمكنك أن ترى أنه من الناحية النظرية قد يستمر تكرار التفاعل للأبد، مكوّنًا نسخًا أكثر وأكثر، من عدد ضئيل من جزيئات DNA الأصلية. يمكن استخدام جزيء DNA واحد لإنتاج مليارات النسخ المماثلة في غضون ساعات قليلة. فقد أدت تقنية PCR إلى إمكانية الحصول على ما يكفي من DNA من عيّنة صغيرة- على سبيل المثال، جزيء مجهري من قطرة دم تركت في مسرح الجريمة.

تستخدم تقنية PCR الآن بشكل روتيني في علم الطب الشرعي لتضخيم DNA من عيّنات نسيجية تركت في مسرح الجريمة. وقد أمكن حل العديد من الجرائم بمساعدة PCR، إضافة إلى DNA باستخدام الفصل الكهربائي الهلامي.

أسئلة

(٨) أ. اشرح سبب الحاجة إلى بادئة لكي يكون PCR فعالًا؟

ب. اقترح سبب عدم التصاق البادئات بعضها مع بعض والتي تستخدم في PCR.

ج. اذكر أنواع النيوكليوتيدات الحرة (dNTPs) الأربعة التي تضاف إلى أوعية التفاعل في بداية عملية PCR.

د. اشرح سبب استخدام بعض إنزيمات DNA بوليميريز فقط مثل *Taq* بوليميريز في PCR.

هـ. اذكر ما يحدث لـ DNA أثناء دورة واحدة في PCR.

(٩) أ. ما عدد جزيئات DNA التي يمكن تكوينها من جزيء DNA مزدوج بعد 8 دورات من PCR؟

ب. اشرح سبب عدم إمكانية استخدام تفاعل PCR كما هو موضح في الشكل ٣-٦؛ لزيادة عدد جزيئات RNA بالطريقة نفسها المستخدمة في زيادة عدد جزيئات DNA.

مصطلحات علمية

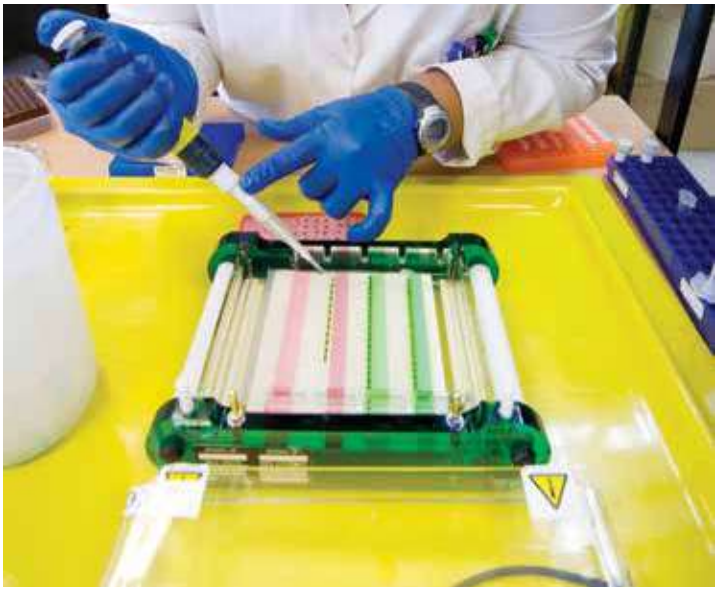
الفصل الكهربائي الهلامي

Gel electrophoresis: فصل الجزيئات المشحونة (مثلًا DNA) بالحركة المتفاوتة عبر هلام في مجال كهربائي. تعتمد درجة الحركة على كتلة أجزاء DNA.

الفصل الكهربائي الهلامي

الفصل الكهربائي الهلامي Gel electrophoresis تقنية تستخدم لفصل جزيئات مختلفة (الصورة ٣-٦). وهي تستخدم على نطاق واسع في تحليل DNA بفصل أجزاء من DNA. تتضمن هذه التقنية وضع خليط من الجزيئات في آبار Wells تُحفر في هلام وتعرَّض لمجال كهربائي. تعتمد حركة الجزيئات المشحونة داخل الهلام استجابة للمجال الكهربائي على عدد من العوامل، وأكثرها أهمية ما يأتي:

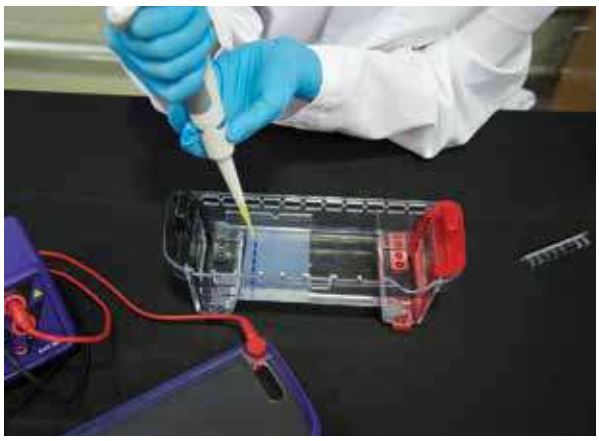
- الشُحنة – إن مجموعة الفوسفات في DNA ذات شحنة سالبة، لذا ستتحرك قطع DNA باتجاه القطب الموجب (+).
- الحجم – تتحرك الجزيئات الأصغر أو الأقصر عبر الهلام بشكل أسرع من الجزيئات الأكبر أو الأطول، وتتناسب المسافة التي تقطعها قطعة DNA عكسيًا مع طولها، فكلما كانت أقصر تقطع مسافة أطول عبر الهلام.



الصورة ٣-٦ تحليل التنوع الجيني في الشعاب المرجانية. يتم تضخيم DNA المستخلص من الشعاب المرجانية بواسطة PCR، ويوضع على الهلام ليتم فصله عن طريق الفصل الكهربائي الهلامي.

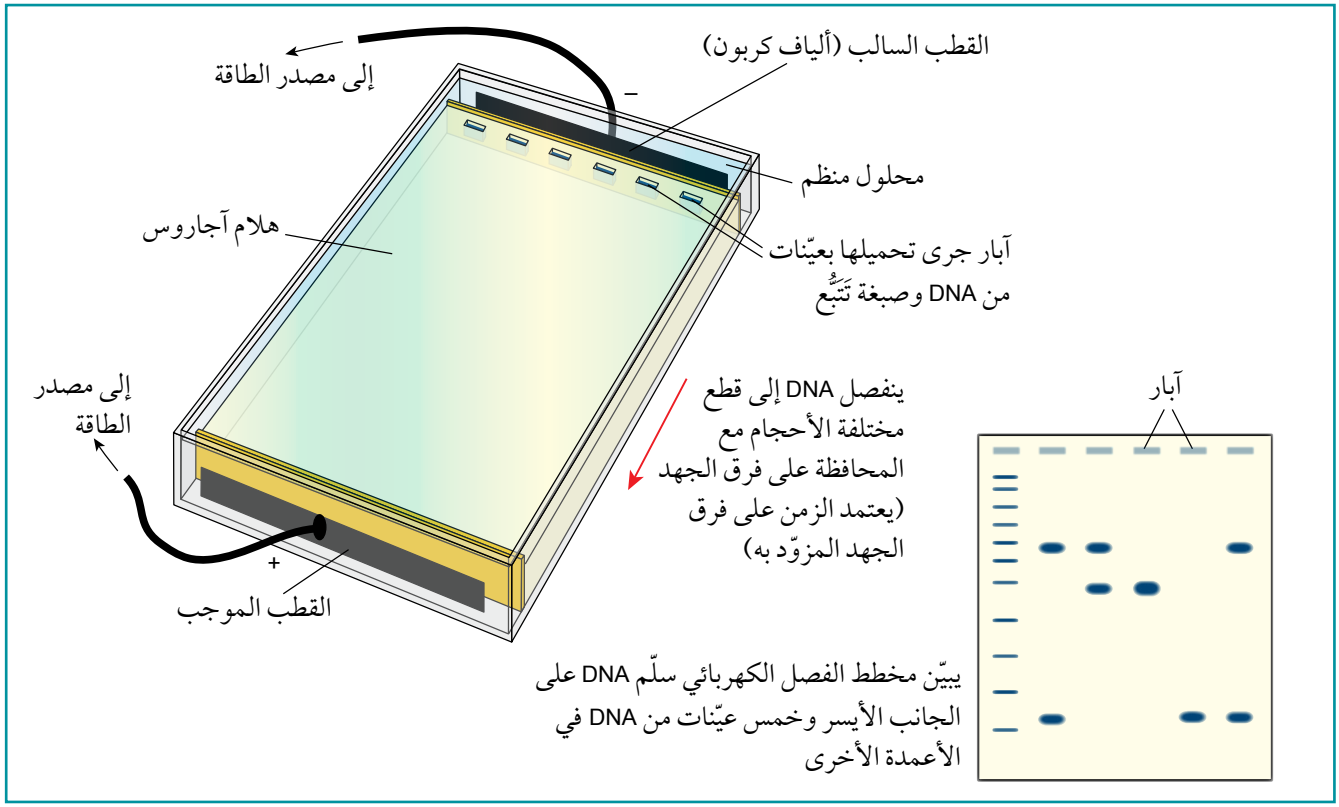
الخطوات

1. بعد تحضير الهلام (من أجاروس Agarose مثلًا)، يصبّ محلول منظم في الخزان بحيث يغطي الهلام، ليوفر pH ثابت.
2. تستخدم ماصة دقيقة Micropipette لنقل عيّنات DNA إلى جميع الآبار (الصورتان ٣-٦ و ٣-٧). تحتوي عيّنات DNA على صبغة تَتَبُّع Tracking dye.
3. غالبًا ما توضع عيّنة مرجعية بأطوال معروفة من قطع DNA في بئر على أحد جانبَي الهلام أو كلا الجانبَين، ويستخدم بمثابة «سلّم» DNA لتحديد أطوال قطع DNA في العيّنات الأخرى (الشكلان ٣-٧ و ٣-٨).

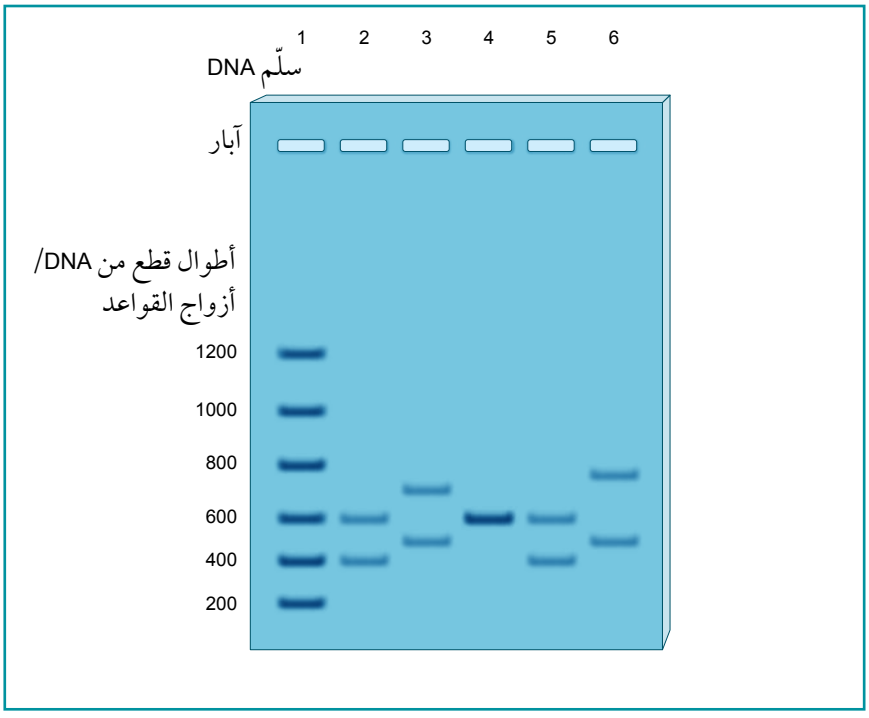


الصورة ٣-٧ استخدام الماصة الدقيقة لتحميل الآبار في هلام الأجاروس مع عيّنات من DNA مختلطة مع صبغة تَتَبُّع زرقاء.

4. توصل حزمة بطاريات بأقطاب كهربائية. يكون القطب السالب في الطرف نفسه للآبار المحملة ب DNA (الشكل ٣-٧).
5. تُظهر صبغة التَتَبُّع المسافة التي تحركتها المادة في العيّنات عبر الهلام.
6. يسكب المحلول المنظم خارجًا، وتضاف صبغة مناسبة إلى الهلام. تشطف الصبغة لتكشف عن قطع عبر الهلام التي تمثل مواقع قطع DNA. يمكن تحديد أطوال قطع DNA بمقارنتها مع «سلّم» DNA على جانب الهلام.



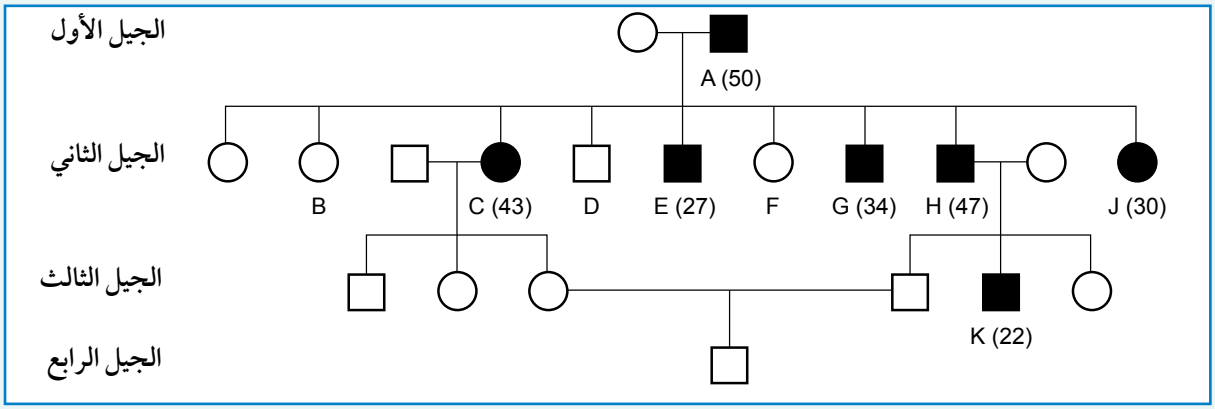
الشكل ٣-٧ يحتوي خزان الفصل الكهربائي على هلام آجاروس مع عيّنات DNA في آبار. يملأ الخزان بمحلول منظم ويتصل بمصدر طاقة. ستتحرك العيّنات باتجاه القطب الموجب.



الشكل ٣-٨ رسم تخطيطي لهلام مصبوغ يبين نواتج PCR لخمسة أشخاص، لكل شخص قطعة أو قطعتان تتراوح أطوالها بين 400 و 800 زوج من القواعد. DNA في العمود 4 مصبوغ بلون داكن لأن الشخص متماثل الأليلات مع القطعة ذات 600 زوج من القواعد، لذلك يوجد ضعف كميّة DNA في القطع مقارنة بتلك التي في الأعمدة 2، 3، 5، 6.

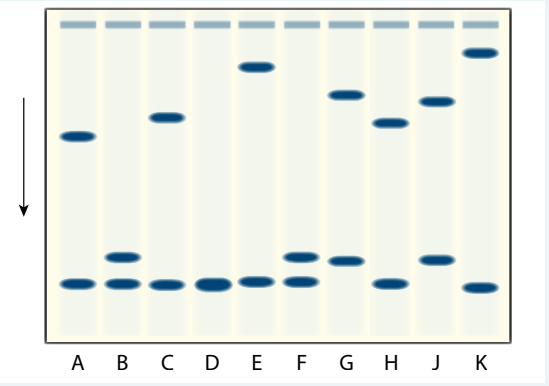
سؤال

(١٠) اكتشفت الباحثة الجينية نانسي ويكسلر Nancy Wexler موقع الجين المسؤول عن مرض هنتنغتون (انظر الوحدة الثانية) من خلال دراسة كل نسل ماري سوتو Mary Soto التي توفيت بالمرض في أوائل القرن التاسع عشر. عاش العديد من هؤلاء الأشخاص في قرى حول بحيرة ماراكايبو Maracaibo في فنزويلا. يبيّن مخطط سلالة العائلة في الشكل ٣-٩ وراثة مرض هنتنغتون في أربعة أجيال من العائلة.



الشكل ٣-٩ مخطط سلالة عائلة بعض أفرادها مصاب بمرض هنتنغتون. تشير الأرقام الموجودة بين قوسَين إلى أعمار أفراد العائلة المصابين عندما ظهرت عليهم أعراض المرض لأول مرة.

جمعت عيّنات دم من بعض أفراد العائلة، واستخلص DNA. وبعد معالجته بـ PCR جرى فصله بالفصل الكهربائي الهلامي. تبيّن الصورة ٣-٨ مخطط الفصل الكهربائي لهؤلاء الأفراد.



الصورة ٣-٨ مخطط فصل كهربائي لعيّنات DNA من أفراد مختارين من العائلة المبيّنة في الشكل ٣-٩. يشير السهم إلى اتجاه حركة قطع DNA من الآبار.

أ. اشرح سبب استخدام PCR في تحليل DNA هذه العائلة.

ب. اشرح سبب إمكانية فصل أجزاء DNA من مختلف الأطوال بالفصل الكهربائي الهلامي؟

ج. اشرح سبب وجود شريط واحد من DNA للفرد D، في حين يوجد شريطان من DNA لبقية الأفراد، في الصورة ٣-٨.

د. استنادًا إلى الوحدة الثانية والشكل ٣-٩ والصورة ٣-٨، صف الاستنتاجات التي يمكن التوصل إليها من البيانات في مخطط الفصل الكهربائي.

هـ. ناقش النصيحة التي يمكن أن تقدمها الاستشارة الوراثية إلى الأفراد في الجيلَين 3، 4 لهذه العائلة.

٣-٤ التقنية الجينية والطب

توفر التقنية الجينية إمكانية صنع منتجات خاصة للإنسان بواسطة تقنيات DNA معاد التركيب، مثل أنواع مختلفة من الإنسولين معاد التركيب.

تشمل مزايا استخدام البكتيريا والخمائر وزراعة خلايا الثدييات لإنتاج هذه البروتينات ما يأتي:

- لهذه الخلايا متطلبات غذائية بسيطة.
- يمكن تكوين كميّات كبيرة من المنتجات.
- لا تتطلب منشآت الإنتاج مساحة كبيرة.
- يمكن تنفيذ عمليات الإنتاج في أي مكان في العالم تقريبًا.
- لا يتم استخلاص البروتينات من مصادر حيوانية أو عن طريق جمع الدم من العديد من المتبرعين، لذلك يوجد القليل من المشكلات العملية أو الأخلاقية.

بالإضافة إلى الإنسولين، يتم إنتاج بروتينين آخرَين للإنسان بتقنيات مشابهة هما:

- العامل الثامن VIII– بروتين تخثر الدم.
- إنزيم أدينوسين دي أمينيز Adenosine deaminase، الذي يحفز تفكك الأدينوسين منزوع الأكسجين بخاصة في الخلايا اللمفاوية – T.

العامل الثامن بروتين ضروري لتخثر الدم. يشفر الجين البشري *F8* في الكروموسوم X لإنتاج العامل الثامن، وعند حدوث طفرة في هذا الجين يؤدّي إلى الإصابة بمرض الهيموفيليا. تستخدم عدة شركات خلايا جرذ الهامستر المعدلة جينيًا لإنتاج العامل الثامن معاد التركيب. حيث يتم إدخال الجين *F8* في خلايا الكلية والمبيض للهامستر، ويزرع في أجهزة تخمير، حيث تنتج الخلايا باستمرار العامل الثامن الذي يستخلص وينقى قبل استخدامه في معالجة المصابين بالهيموفيليا (الوحدة الثانية، الموضوع ٢-٤، الوراثة والمخططات الجينية). يحتاج هؤلاء الناس إلى حقن منتظمة من العامل الثامن، والذي كانوا يحصلون عليه من الدم المتبرع به قبل توافر العامل الثامن معاد التركيب. يحمل الدم المتبرع به مخاطر العدوى المنقولة بالدم – على سبيل المثال فيروس نقص المناعة البشري (HIV)، في حين يخلو العامل الثامن معاد التركيب من هذه المخاطر.

تؤدي طفرات جين *ADA* على الكروموسوم 20 إلى نقص إنزيم أدينوسين دي أمينيز (ADA)، وهذا هو أحد أسباب المرض المسمّى نقص المناعة المشترك الحاد (SCID). يحفز هذا الإنزيم نزع الأمين من الأدينوسين منقوص الأكسجين كجزء من عملية أيض DNA في الخلايا. وللأدينوسين منقوص الأكسجين تأثير سام على الخلايا اللمفاوية – التائية (T-lymphocytes)، لذلك يكون لدى الأطفال الذين يولدون بدون (ADA) ضعف في جهاز المناعة. يمكن للأطفال المصابين ب SCID تلقي العلاج عن طريق أخذ حقن منتظمة من (ADA). يستخلص الإنزيم من الماشية، لكنه يصنع أيضًا عن طريق البكتيريا المعدلة جينيًا (الإشريكية القولونية *Escherichia coli*). وتم الكشف حديثًا عن وجود حالات للإصابة بهذا المرض في بعض من محافظات سلطنة عمان.

ما هو الفحص الجيني؟

الفحص الجيني Genetic screening تحليل لـ DNA الشخص للتحقق من وجود أليل واحد أو أكثر من الأليلات المرتبطة بمرض. يمكن أخذ عيّنات من DNA للاختبار من الأجنة وحديثي الولادة والأطفال والبالغين. ويمكن إجراء بعض الفحوصات قبل ولادة الطفل (الصورة ٣-٩ والشكل ٣-١١).

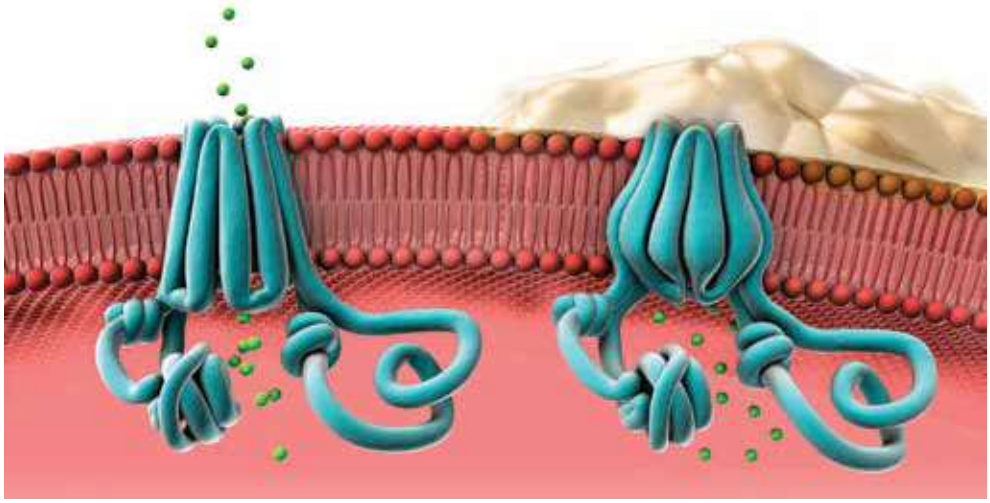
إذا بدأت أعراض المرض تظهر على شخص من عائلة تعاني مرض هنتنغتون، فمن المحتمل أن ينصح بإجراء اختبار جيني لتأكيد التشخيص. في حين يمكن أن يعرض على الأشخاص الآخرين في العائلة ممن لا يظهرون أية أعراض إجراء الاختبار الجيني نفسه (الشكل ٣-٩، والصورة ٣-٩). والاختبار الذي يجرى للأشخاص الذين لا تظهر عليهم أعراض المرض، يسمّى الفحص الجيني Genetic screening. والاختبار هو نفسه، سواء كان لدى الشخص أعراض أم لا. وهو يتضمن تقنية PCR لتضخيم الجين *HTT* والفصل الكهربائي لتحديد أطوال الأليلَين.

مصطلحات علمية

الفحص الجيني Genetic screening: فحص الجنين أو حديث الولادة أو الطفل أو البالغ لمعرفة ما إذا كان أليل معيّن موجودًا.

التليف الكيسي Cystic fibrosis (CF): مرض وراثي ينتج من أليلات متنحية من جين *CFTR* (منظم النقل عبر الغشاء في التليف الكيسي).

التليف الكيسي Cystic fibrosis (CF) من أكثر الأمراض الوراثية الخطيرة شيوعًا لدى الناس من أصل شمال أوروبي. يصيب المرض 1 تقريبًا من كل 2000 ولادة لأطفال أحياء. ينتج التليف الكيسي من طريق أليل متنحٍّ من جين يشفر لبروتين ناقل يسمّى منظم النقل عبر الغشاء في التليف الكيسي (CFTR - cystic fibrosis transmembrane conductance regulator).



الشكل ٣-١٠ نموذج حاسوبي للبروتينات الناقلة عبر الغشاء في التليف الكيسي. CFTR يظهر في الشكل إلى جهة اليسار، بروتين ناقل يعمل بشكل طبيعي، فهو يتحكم بحركة أيونات الكلوريد (بالأخضر) باتجاه منحدر التركيز إلى خارج الخلية ما يؤدي إلى ارتفاع تركيز هذه الأيونات خارج الخلية، وهذا يسبب خروج الماء من الخلايا بالأسموزية، الأمر الذي يخفف من سماكة المخاط الذي تنتجه الخلايا الأخرى. ويظهر في الشكل أيضًا، إلى جهة اليمين بروتين ناقل لا يعمل بشكل طبيعي بسبب وجود أليل متنحٍّ للجين *CFTR*. ويؤدي عدم قدرة البروتين الناقل على نقل أيونات الكلوريد إلى خارج الخلية، إلى انخفاض معدلات الأسموزية، وبقاء المخاط سميكًا، وبالتالي ظهور أعراض التليف الكيسي.

يوجد العديد من أليلات جين *CFTR*، والعديد منها يشفر لنسخ غير طبيعية من بروتين الغشاء. الأشخاص الذين يحملون نسختَين من هذه الأليلات قد يكون لديهم CFTR غير فعال وظيفيًّا، ويكونون مصابين بالتليف الكيسي.

نظرًا إلى أن أليلات *CFTR* غير الطبيعية متنحية، فإن الشخص الذي لديه أليل غير طبيعي واحد وأليل طبيعي واحد يكون قادرًا على تكوين كافٍ من بروتين CFTR للبقاء بصحة جيدة. ويكون مثل هذا الشخص حاملًا للمرض بدون أعراض. وفي كل مرة ينجب فيها زوجان غير متماثلي الأليلات طفلًا، سيكون هناك احتمال واحد من أربعة أن يكون الطفل مصابًا بالمرض. ما يجعل من المهم فحص الأشخاص الذين لديهم تاريخ من المرض في عائلاتهم.

يتضمن الفحص الجيني للتليف الكيسي تحديد التتابع النيوكليوتيدي لأليلَي الجين *CFTR* الموجودَين على الكروموسوم 7. ويكشف الاختبار الحالي العديد من الطفرات الأكثر شيوعًا. إذا وجد أن كلا الزوجَين غير متماثلي الأليلات لأليلات CFTR غير الطبيعية، فقد تقترح عليهما الاستشارة الوراثية إجراء العلاج بالإخصاب خارج الجسم (In vitro fertilization-IVF) (أطفال الأنابيب). وأخذ خزعة من الأجنة وفحصها بحيث يتم غرس الأجنة الطبيعية في رحم الأم. وفي إنجاز طبي سُجّل في سلطنة عمان اكتشف حديثًا مرض وراثي نادر سببه خلل جيني يشبه التليف الكيسي يدعى (AGR2).

يرتبط تطور سرطان الثدي بطفرات في الجينات *BRCA-1* و *BRCA-2*، وهي تشفر للبروتينات التي تمنع تطور الأورام. تؤدّي هذه البروتينات المسماة BRCA-1 و BRCA-2 دورًا مركزيًا في إصلاح DNA. فإذا لم يصلح التلف في DNA بسبب طفرة تُسبب غياب تلك البروتينات تصبح الخلية سرطانية. قد تختار المرأة البالغة التي لديها تاريخ عائلي بسرطان الثدي أن تُجري فحصًا جينيًا بحثًا عن الأليلات الطافرة لـ *BRCA-1* و *BRCA-2*، والتي تزيد إلى حدّ كبير من احتمال تطور سرطان الثدي لدى المرأة. إذا كانت نتيجة الفحص إيجابية، فقد تحتاج المرأة إلى إجراء فحوصات متكررة للعلامات الأولى للسرطان، أو أن تخضع للعلاج بعقار مثل تاموكسيفين الذي يمنع عمل هرمون إستروجين على أنسجة الثدي. يتضمن الفحص الجيني تتابع مناطق من الكروموسومين 7 و 13 حيث توجد جينات *BRCA*.

التشخيص قبل الولادة

يُستخدم فحص السائل الأمنيوسي Amniocentesis في الأسبوع (16–15) من الحمل. ويمكن إجراء العديد من الاختبارات المختلفة على هذه العيّنة للتحقق من صحة الجنين. حيث تؤخذ معظم عيّنات السائل الأمنيوسي للبحث عن الطفرات الكروموسومية.

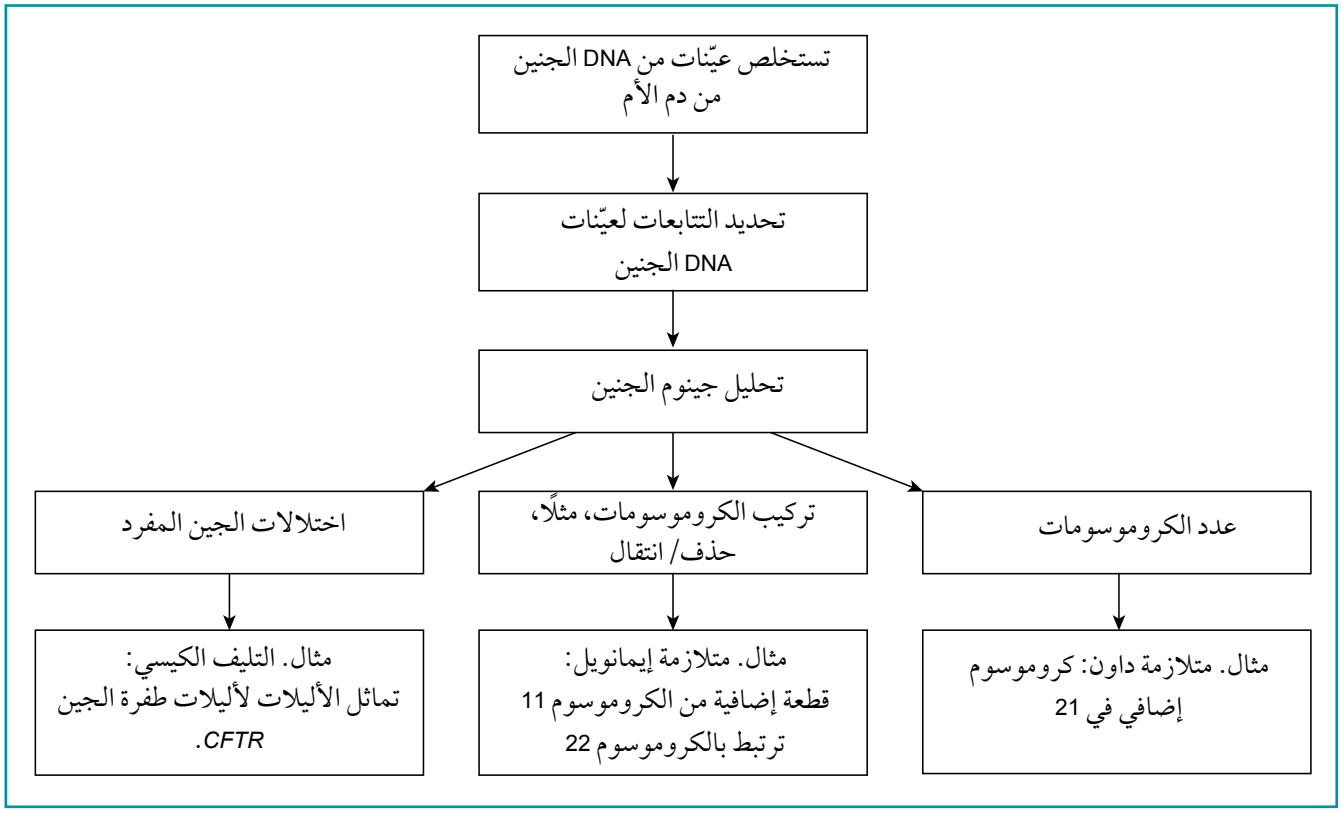
ويتم استخدام المسح الضوئي بالموجات فوق الصوتية Ultrasound scanning لتصوير الجنين وتحديد موقع المشيمة والجنين والحبل السري. ويتم اختيار مكان مناسب لإدخال إبرة حقنة تحت الجلد، وهي التي تُحدد الموضع على سطح جلد البطن. بحيث، يكون هذا الموضع بعيدًا عن الجنين والحبل السري والمشيمة.

يمكن إجراء فحص الخملات المشيمية Chronic villus sampling (CVS) بأخذ عيّنة (خزعة) منها بين الأسبوعين 10 و 13 من الحمل. وهي تتيح للآباء الحصول على تحذير مبكر عن أي تشوهات وراثية في الجنين أكثر ممّا هو ممكن من فحص السائل الأمنيوسي. تؤخذ العيّنة الصغيرة بواسطة إبرة من جزء من المشيمة يسمى الكوريون. وتكون تلك الإبرة ضيقة (يقل قطرها عن 0.8 mm). ويراقب الإجراء بواسطة التصوير بالموجات فوق الصوتية، (الصورة ٣–٩).

يبلغ معدل الإجهاض النموذجي لمعظم النساء في الأسابيع (12-10) من الحمل، (3%–2) تقريبًا. تسبب خزعة الخملات المشيمية، مثل فحص السائل الأمنيوسي، زيادة صغيرة في خطر الإجهاض، تصل نسبتها إلى 2%-1 تقريبًا. ويزيد خطر فحص السائل الأمنيوسي قليلًا، لكن عيّنة الخملات المشيمية قبل 15 أسبوعًا قد تكون أقل خطرًا من فحص السائل الأمنيوسي.

الصورة ٣–٩ يستخدم في عيّنة الخملات المشيمية التصوير بالموجات فوق الصوتية لتوجيه الإبرة إلى المشيمة لأخذ عيّنة صغيرة من خملات الجنين المشيمية. ثم تؤخذ عيّنة صغيرة من دم الجنين للتحليل.

يُعدّ الفحص الجنيني غير الجراحي قبل الولادة بديلًا عن فحص السائل الأمنيوسي وعيّنة الخملات المشيمية. تنتقل أجزاء من DNA خلايا المشيمة، والتي لها الطراز الجيني نفسه الذي للجنين، إلى الدورة الدموية للأم. تُعزل هذه الأجزاء من عيّنات الدم وتفحص. يمكن أن يوضح الفحص ما إذا كان لدى الجنين أية تشوهات وراثية مثل تغيرات في عدد الكروموسومات وتغيرات في تركيب الكروموسومات والطفرات الجينية (الشكل ٣-١١).



الشكل ٣-١١ يمكن أن يحدد تتابع DNA الجنين Fetal DNA Sequencing مجموعة متنوعة من الاختلالات الوراثية، بما في ذلك تغيرات في عدد الكروموسومات وتركيبها، وتلك التي تسببها الطفرات الجينية.

أسئلة

(١١) علم زوجان أنهما غير متماثلي الأليلات لأليل طافر من *CFTR*. وقد اقترح لهما المعالجة بأطفال الأنابيب وخزعة من الجنين. اذكر الطراز الجيني للجنين المرجح غرسه.

(١٢) لخص الاختلافات بين فحص السائل الأمنيوسي وفحص الخملات المشيمية (CVS) والفحص الجيني غير الجراحي قبل الولادة.

الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية للفحص الجيني

تؤكد اللجنة الوطنية لأخلاقيات البيولوجيا في سلطنة عمان على أهمية نشر الوعي بأخلاقيات البيولوجيا. يتضمن الجدول ٣-٢ الآتي بعض الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية للفحص الجيني.

الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية المؤيدة	الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية المعارضة
يمكن إعطاء العلاجات الوقائية إذا شخّص المرض قبل تطوُّر الأعراض، على سبيل المثال في حالة سرطان الثدي	تستند قرارات الأشخاص الأصحاء حاليًا إلى ما قد يحدث، وقد يصابون بالقلق أو يخضعون لعلاجات وقائية غير ضرورية
يمكن تقديم نصائح بشأن تغييرات نمط الحياة التي يمكن أن تقلل من مخاطر الإصابة بالمرض قبل ظهور الأعراض، على سبيل المثال في حالة سرطان الثدي	لا يتوافر حاليًا علاج لبعض الأمراض مثل مرض هنتنغتون. والعلاجات المتوافرة تخفف الأعراض عند ظهورها- لذلك يأتي التساؤل حول أهمية معرفتهم بأنهم يحملون أليل المرض، خصوصًا أن العديد من المصابين بالمرض عاشوا حتى سن الرشد وكوّنوا عائلات
توجد فوائد اقتصادية، لأن الفحص والوقاية يكونان غالبًا أقل كلفة بكثير من العلاجات طويلة الأمد. ويُعرض المجتمع لضغط أقل لدعم العائلات أو الأشخاص الذين يعانون حالات صحية غير قابلة للشفاء	يوجد احتمال لسوء استخدام (بخاصة في حالة الفحص الجيني قبل الولادة)، كما في حالة رفض الآباء للأجنّة على أساس الكروموسومات الجنسية، ما يؤدي إلى عدم توازن نسبة الجنسَين في المجتمع
إذا توافرت التقنيات لفحص الأشخاص عن أمراض محتملة، فيجدر أخلاقيًا السماح لهم باتخاذ قرارات مدروسة بشأن حياتهم	يوجد سؤال أخلاقي عمّا إذا كان يجب إنهاء الحمل أو لا- إذ يستنكر الكثيرون اختيار الأجنة أثناء عملية الإخصاب خارج الرحم أو إنهاء الحمل بعد اكتشاف عيب جيني. يعيش الكثيرون مع حالات جينية مرضية وتتقبلهم عائلاتهم وهم قدموا مساهمات قيمة للمجتمع
قد يرغب حاملو مرض هنتنغتون في معرفة فرص التوريث قبل الإنجاب	يمكن إنفاق الأموال التي تُستهلك على الفحص الجيني أو غيره من التقنيات الجينية في مجال آخر- على سبيل المثال، الرعاية الصحية الأساسية للفقراء
قد يعني الفحص الجيني أثناء عملية الإخصاب خارج الرحم أنه يمكن للأبوين اختيار أجنة «سليمة» للغرس بدل تلك التي لديها أليلات للأمراض، وتجنب إنجاب طفل يحتمل أن يعاني المرض طوال الحياة	هل يفترض «إنجاب» أشقاء يوفرون أنسجة مطابقة للأطفال الحاليين الذين يعانون مشكلات صحية؟ (حدث ذلك في المملكة المتحدة في عام 2004م، حيث استخدمت خلايا الحبل السري لمولود جديد في علاج الأخ المريض الأكبر سنًا)

الجدول ٣-٢ بعض الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية المؤيدة والمعارضة للفحص الجيني.

٣-٥ التقنية الجينية والزراعة

النباتات المعدلة جينيًّا

معظم النباتات المعدلة جينيًّا هي نباتات المحاصيل التي جرى تعديلها لتكون مقاومة لمبيدات الحشرات أو الآفات الحشرية. تتيح مقاومة مبيدات الأعشاب للمزارعين رش مبيدات الأعشاب لقتل الأعشاب الضارة، في حين تبقى المحاصيل مثل الذرة من دون أن تتأثر (الصورة ٣-١٠). حيث تتنافس الأعشاب مع المحاصيل على الأرض والضوء والماء والمواد الغذائية من التربة. وتقلل مقاومة الآفات من الخسائر المرتبطة بالآفات الحشرية مثل خنفساء القطن. وتخفِّف هذه التعديلات بعض التكاليف على المزارعين وتزيد من إنتاجية المحصول.

الصورة ٣-١٠ جزء من حقل ذرة مقاومة لمبيدات الأعشاب. تمّ رش المحصول بمبيدات الأعشاب التي تقتل الأعشاب لكنها تبقي نباتات الذرة دون أن تتأثر.

المحاصيل المقاومة لمبيدات الأعشاب

تسمح زراعة محصول مقاوم لمبيدات الأعشاب بالاستفادة الكاملة من الموارد المتاحة لزيادة الإنتاج. تم تعديل نباتات فول الصويا لتصبح مقاومة للمبيدات العشبية. يثبط مبيد الأعشاب غليفوسات إنزيمًا له صلة بتركيب ثلاثة أحماض أمينية: فينيل ألانين، وتيروسين، وتربتوفان. يحتاج النبات إلى هذه الأحماض الأمينية لتكوين البروتينات الضرورية. يتم امتصاص غليفوسات عبر الأوراق لينتقل إلى القمم النامية، ومن دون تكوين البروتينات في مناطق النمو يموت النبات.

تحتوي الكائنات الحية الدقيقة المختلفة على نسخ من الإنزيم المشارك في بناء الفينيل ألانين والتيروسين والتربتوفان، والتي لا تتأثر بالغليفوسات. والجين الذي نُقل إلى نباتات المحاصيل مصدره سلالة من بكتيريوم الأجرعية المورمة *Agrobacterium*.

توجد مخاوف من أن زراعة المحاصيل المقاومة لمبيدات الأعشاب قد يكون لها تأثيرات ضارة على البيئة. وتشمل هذه التأثيرات ما يأتي:

- يمكن أن تصبح النباتات المعدّلة جينيًّا أعشابًا زراعية عندما تنمو في حقول محاصيل أخرى.
- ستنقل حبوب اللقاح الجين المقاوم إلى الأقارب البرية للمحاصيل الزراعية، ما ينتج نسلًا هجينًا هو أعشاب غازية.
- سوف تصبح الأعشاب المقاومة لمبيدات الأعشاب هي السائدة، لأنه يستخدم كميات كثيرة من نفس المبيدات.

تمّ العثور على نباتات طافرة مقاومة لمبيدات الأعشاب من مختلف الأنواع بالقرب من حقول استخدم فيها الغليفوسات بكثافة. ومع ذلك، تستخدم مبيدات الأعشاب على نطاق واسع كمبيدات للأعشاب الضارة، وكذلك على المحاصيل المقاومة للغليفوسات. التقنية الجينية ليست بالضرورة مسؤولة عن الازدياد الكبير لهذه المقاومة والتي قد تنشأ في المناطق التي لا تزرع فيها محاصيل معدَّلة جينيًّا.

المحاصيل المقاومة للحشرات

تمثل النباتات المعدلة جينيًّا والمحمية من آفات الحشرات تطوّرًا زراعيًا مهمًّا. فالذرة محمية من حفّار ساق الذرة Corn borer، هذه الآفة تأكل أوراق النباتات وتحفر جحورًا في الساق وتختبئ فيها، ثم تشق طريقها صعودًا حتى يصبح النبات غير قادر على دعم أكواز الذرة حيث تنمو الحبوب. وقطن البرباد *Gossypium hirsutum* محمي ضد الآفات مثل خنفساء القطن *Helicoverpa armigera* (الصورتان ٣-١١، ٣-١٢). تتحسن الإنتاجية في كلا النباتَين عن طريق التعديل الجيني.

السم Bt قاتل للحشرات التي تأكله، لكنه لا يضر الحيوانات الأخرى. تمّ الحصول على جين هذا السم من البكتيريوم العصوية التورنجية *Bacillus thuringiensis*. تنتج سلالات مختلفة من هذه البكتيريا سمومًا مختلفة يمكن استخدامها ضد أنواع مختلفة من الحشرات. المحاصيل الزراعية التي تحتوي على جين السم Bt (من البكتيريوم العصوية التورنجية) تستطيع إنتاج مبيداتها الحشرية الخاصة بها. ومع ذلك، يمكن لجماعات الحشرات أن تصبح مقاومة للسموم.

مصطلحات علمية

سم Bt: سم مبيد للحشرات تنتجه البكتيريوم العصوية التورنجية *Bacillus thuringiensis*. ينقل الجين الذي يشفر للسم إلى نباتات المحاصيل لتصبح مقاومة للآفات الحشرية.

قد تؤدي الأعداد الكبيرة من نباتات المحاصيل التي تحتوي على جين سم Bt إلى تسريع ارتفاع المقاومة له. وتتمثل الآثار الضارة بالبيئة الأكثر احتمالاً من تنمية المحاصيل المقاومة للحشرات في:

- زيادة المقاومة في جماعات الآفات الحشرية.
- تأثير ضار على الأنواع الأخرى من الحشرات.
- نقل الجين المضاف إلى أنواع أخرى من النباتات.

على الجانب الإيجابي، تستخدم مبيدات الآفات بنسبة أقل. الأمر الذي يقلل من خطر نقل الرذاذ إلى مناطق أخرى والتأثير في أنواع غير مستهدفة من الحشرات. تذكّر أيضًا أن الحشرات التي تأكل المحصول بالفعل هي التي تتأثر بسم Bt.

الصورة ٣-١١ نباتات قطن تُزرع للحصول على الألياف التي تنمو داخل الثمار، المعروفة باسم اللوز. في هذه الصورة يبدو لوز القطن على وشك التفتح قبل حصاد المحصول مباشرة.

الصورة ٣-١٢ خنفساء القطن آفة حشرية تصيب نباتات القطن. تتغذى يرقات هذه الآفة على لوز القطن.

وفي عام 2006م نص مرسوم سلطاني بإصدار قانون المبيدات في سلطنة عمان يهدف إلى تنظيم عمليات إنتاج واستيراد وتداول المبيدات بالسلطنة.

أسئلة

(١٣) تمّ تعديل العديد من أنواع المحاصيل جينيًّا للتعبير عن السموم القائمة على مركّبٍ سام من بكتيريوم العصوية التورنجية *Bacillus thuringiensis*. تزرع في بلدان مثل الولايات المتحدة الأمريكية والصين والبرازيل أصناف معدلة جينيًّا من فول الصويا وبذور اللفت الزيتية والقطن والذرة والتبغ.

أ. اشرح مزايا تنمية أصناف Bt من نباتات المحاصيل هذه.

ب. لخص كيفية زراعة نباتات محاصيل مثل تلك المدرجة أعلاه، معدلة جينيًّا، لتحسين الإنتاجية.

(١٤) لخص المخاطر المحتملة لزراعة أصناف المحاصيل الزراعية المعدلة جينيًّا، واقترح الخطوات التي يمكن اتخاذها للتقليل منها.

الحيوانات المعدلة جينيًّا

تُعدّ الحيوانات المعدلة جينيًّا لإنتاج الغذاء أكثر ندرة من نباتات المحاصيل. مثال على ذلك، سمك السلمون الأطلسي المعدل جينيًّا الذي تمّ تطويره في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا (الصورة ٣-١٣). تم إدخال جين هرمون النمو المنظم الذي استُخلِص من سمك السلمون شينوك *Chinook*، ومحفز Promoter من نوع آخر من السمك هو سمك بوت المحيطات *Ocean pout*، في بويضة مخصبة من سلمون المحيط الأطلسي. ويكون سمك السلمون المعدل جينيًّا عن طريق إنتاج هرمون النمو، قادرًا على النمو طوال العام، بدلًا من الربيع والصيف فقط. نتيجة لذلك، تصل الأسماك المعدلة جينيًّا إلى حجم مناسب لبيعها في السوق في 18 شهرًا تقريبًا، مقارنة مع 3 أعوام التي تحتاج إليها سمكة غير معدلة. وقد اُقترِح تربية الإناث العقيمة فقط وزراعتها في خزانات أرضية. تقلل خصائص السلمون المعدل جينيًّا من قدرته على منافسة السمك البري في البيئة الطبيعية. وقد أدى هذا إلى اضطرار إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) إلى الإعلان أنه من غير المرجح أن يكون لهذا السمك أية تأثيرات مهمة على البيئة، وأنه آمن كغذاء مثل سلمون الأطلسي التقليدي.

الصورة ٣- ١٣ سلمون معدل جينيًّا وسلمون غير معدل جينيًّا من العمر نفسه. لاحظ أن السمك المعدل جينيًّا يصل إلى الحجم الأقصى بسرعة أكبر.

التداعيات الأخلاقية والاجتماعية لاستخدام الكائنات المعدلة جينيًّا في إنتاج الغذاء

التبرير الذي قدمته الشركات الكبرى التي لديها استثمارات كبيرة في المحاصيل المعدلة جينيًّا، هو أن الزراعة تحتاج إلى زيادة إنتاج المحاصيل إذا أردنا الحصول على ما يكفي من الغذاء لسكان العالم. وأن تكون الأراضي الزراعية المنتجة أكثر إنتاجية إذ فُقدت الكثير من الأراضي المنخفضة المستخدمة حاليًا لتنمية المحاصيل بسبب ارتفاع مستويات سطح البحر. ويعود سبب الاستثمار في المحاصيل المقاومة للحشرات لتقليل الخسائر الفادحة التي تحدث قبل الحصاد وبعده.

ومع ذلك، يشكك كثير من الناس في هذه الادعاءات، ويشعرون بالقلق تجاه التأثيرات البيئية للمحاصيل المعدلة جينيًّا. وتتمثل بعض المخاوف تجاه المحاصيل المعدلة جينيًّا بما يأتي:

- قد تصبح نباتات المحاصيل المعدلة جينيًّا أعشابًا ضارة أو تغزو المواطن الطبيعية.
- يمكن نقل الجين (الجينات) التي تم إدخالها، بواسطة حبوب اللقاح إلى النباتات غير المعدلة جينيًّا التي تنمو في المزارع التي بها المحاصيل العضوية Organic crops.
- قد تشكل النباتات المعدلة جينيًّا خطرًا مباشرًا على الإنسان أو الحيوانات الأليفة أو غيرها من الحيوانات المفيدة، كونها سامة أو تسبّب ردات فعل تحسُّسية.
- سوف تترك مبيدات الأعشاب التي يمكن استخدامها حاليًّا على المحاصيل بقايا سامة Toxic residues في المحصول، وقد تضر المستهلكين.
- البذور المعدلة جينيًّا مرتفعة الثمن، وقد تلغي كلفتها أي ميزة في تنمية المحاصيل المقاومة.
- يحتاج المزارعون في الغالب إلى شراء البذور كل موسم بما يبقي الكلفة مرتفعة. بالمقابل، يمكن حفظ البذور من محاصيل هذه السنة من الأصناف التقليدية (غير المعدلة جينيًّا) لزراعتها في العام التالي (الصورة ٣-١٤).
- في أجزاء من العالم حيث يتم تنمية الكثير من المحاصيل المعدلة جينيًّا، يوجد خطر فقدان الأصناف التقليدية، وهذا أمر مهم لأن هذه الأصناف تحتوي على جينات أساسية مرغوب فيها لأماكن معيّنة. وقد يكون لها خصائص يمكن أن تكون مفيدة في عالم يتغير فيه المناخ. وهذا يتطلب برامج في تنمية وحصاد الأصناف التقليدية، وإنشاء بنك بذور لحفظها.

الصورة ٣-١٤ مجموعة من البذور من بنك البذور في سلطنة عُمان. يحتوي البنك حاليًا على أكثر من 50% من بذور النباتات المحلية، وتجري فيه أبحاثًا علمية بشكل مستمر لحفظ البذور للمستقبل.

لكن هل توجد أية آثار ضارة على المجتمعات البشرية من التقنية الجينية؟ هل لديها أية مخاطر فعلية على المجتمعات البشرية؟

تتوافر أدلة قليلة على انتقال جينات إلى الحياة البرية. ولم يظهر «عشب خارق» مقاوم لمبيدات الأعشاب يقلل من نمو المحاصيل. يوجد عدد قليل جدًا من الأمثلة على أغذية منتجة من الكائنات المعدلة جينيًّا قد تُصبح بشكل غير متوقع مسبِّبة للحساسية. وما لم تصبح الآثار المعروفة للمحاصيل المعدلة جينيًّا أكبر بكثير مما تمّ قياسه حتى الآن، يمكن القول إن التأثير على المجتمعات البشرية قليل. قد توجد تأثيرات محتملة لا يمكن بعد قياسها من زراعة المحاصيل المعدلة جينيًّا، مثل العواقب المستقبلية لأي خسارة في التنوع الحيوي.

ملخّص

تتضمن التقنية الجينية استخدام مجموعة من التقنيات لاستقصاء تتابع النيوكليوتيدات في DNA وتغيير DNA الكائن الحي. تتضمن الهندسة الجينية استخلاص DNA من كائن حي وإدخاله في DNA كائن حي آخر لتكوين DNA معاد التركيب (rDNA). يجب إدخال الجين (الجينات) بطريقة يتم فيها التعبير عنها في الكائن الحي المعدل جينيًا (GMO).

إنزيمات القطع إندونيوكلييز هي إنزيمات تقطع في مواقع محددة عبر DNA تسمّى مواقع القطع. يمكن أن تؤدي إنزيمات القطع إلى إجراء عمليات قطع متعرجة في DNA، بحيث تؤدي إلى ظهور أجزاء قصيرة من القواعد غير المزدوجة تسمّى النهايات اللاصقة، أو قطوع مستقيمة. تكون قطع DNA ذات النهايات اللاصقة المكملة لبعضها قادرة على الارتباط معًا لتكوين روابط هيدروجينية. يربط إنزيم DNA لايجيز العمود الفقري سكر- فوسفات لقطع DNA معًا عن طريق حفز تكوين روابط فوسفات ثنائية الإستر.

تستخدم النواقل في الهندسة الجينية لنقل قطع من DNA إلى داخل الخلايا: والأمثلة النموذجية هي البلازميدات، الفيروسات، الليبوسومات.

البلازميدات حلقات من DNA المزدوج، وهي مفيدة في الهندسة الجينية لأنها تستطيع أن تقطع بواسطة إنزيمات القطع ولها محفزات وعلامات جينية (مثلًا جينات المضادات الحيوية، البروتين المتوهج الأخضر GFP، إنزيم بيتا (β) جلوكورونيديز GUS) يتم إدخالها إلى جانب الجين (الجينات) لتعديل الخلية المضيفة.

يجب إدخال المحفز إلى جانب الجين لأن الكائنات الحية لن تقوم بنسخ الجين والتعبير عنه إلا إذا كان هناك موقع ربط إنزيم RNA بوليميريز.

يمكن التعرف على الخلايا التي تلقت بلازميدات بها جين مرغوب فيه عن طريق البروتين المتوهج الأخضر (GFP) أو الصبغة المناسبة (GUS).

يمكن تصنيع أجزاء من DNA للتعديل الجيني مباشرة من mRNA باستخدام إنزيم ترانسكريبتيز العكسي. ويمكن أيضًا تصنيع أجزاء من DNA من النيوكليوتيدات باستخدام معرفة الشيفرة الجينية.

تفاعل البوليميريز المتسلسل PCR طريقة لتكوين عدد كبير جدًا من نسخ DNA من كميات صغيرة (حتى جزيء واحد). يتم في PCR مسخ DNA بالحرارة لفصل الشريطين أحدهما عن الآخر. يرتبط جزء صغير من DNA يسمّى البادئة بإحدى نهايتَي كل شريط بحيث يمكن أن يبدأ DNA بوليميريز ببناء شريط مكمل باستخدام النيوكليوتيدات الحرة (كما في التضاعف). تفصل نسخ DNA المزدوجة مرة أخرى، وتكرر العملية عدة مرات «لتضخيم» DNA. تستخدم جزيئات DNA بوليميريز المستقر حراريًا في PCR، وكان *Taq* بوليميريز الذي يوجد في البكتيريا المحبة للحرارة، *Thermus aquaticus* هو أول إنزيم استخدم في *PCR*.

يستخدم الفصل الكهربائي الهلامي لفصل قطع من DNA بأطوال مختلفة، وتوضع المواد المراد اختبارها في آبار في هلام الأجاروس كما يوصل مجال كهربائي عبر الهلام.

يتم حاليًا إنتاج العديد من بروتينات الإنسان المعادة التركيب بواسطة الكائنات الحية المعدلة جينيًا، مثل البكتيريا والخمائر. يتيح هذا الإنتاج توافر أدوية مثل أدينوسين دي أمينيز (ADA) المعاد التركيب لمعالجة SCID العامل الثامن المعاد التركيب لمعالجة الهيموفيليا. يضمن هذا الإنتاج أيضًا التزويد بأدوية أخرى كانت متاحة من مصادر أخرى، مثل الإنسولين.

يتضمن الفحص الجيني اختبار الأشخاص لمعرفة ما إذا كانوا يحملون أي أليلات غير طبيعية للجينات التي يمكن أن تسبب المرض. يوجد فحوص جينية للعديد من الأمراض الجينية بما في ذلك سرطان الثدي المرتبط ب *BRCA-1* و *BRCA-2*، ومرض هنتنغتون والتليف الكيسي. قد تساعد الاستشارة الوراثية الأشخاص الذين يجدون أنهم أو أن أطفالهم الذين سيولدون لاحقًا يحملون أليلًا يسبب المرض.

تستخدم الهندسة الجينية لتحسين جودة وإنتاجية المحاصيل الزراعية والثروة الحيوانية. جرى تعديل جيني لمحاصيل زراعية مثل الذرة والقطن لمقاومة مبيدات الأعشاب ومقاومة الحشرات للتقليل من خسارتها وزيادة الإنتاج.

يمكن للتقنية الجينية أن تقدم فوائد، على سبيل المثال، الزراعة والطب، لكنها تتضمن مخاطر مرتبطة بانتقال الجينات المعنية إلى كائنات حية بدلًا من الكائن المضيف المقصود. ويُعدّ الخطر مرتفعًا على وجه الخصوص بالنسبة إلى المحاصيل المعدلة جينيًا والتي تطلق لتنمو في الوسط البيئي.

الآثار الاجتماعية للتقنية الجينية هي الآثار المفيدة لهذه التقنية على المجتمعات البشرية. الأخلاق مجموعة من المعايير التي توافق عليها مجموعة من الناس لتنظيم سلوكها والتمييز بين النشاط المقبول وغير المقبول. يجب أن تقرر كل مجموعة أولًا ما إذا كان البحث في التقنية الجينية مقبولًا، وبعد ذلك تبني التقنيات الناجحة.

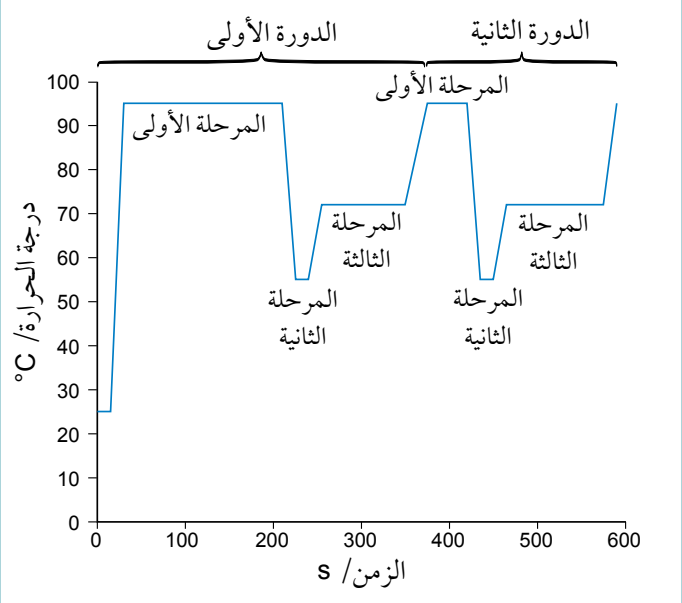
أسئلة نهاية الوحدة

١ أ. يبيِّن الجدول إنزيمات تستخدم في التقنية الجينية. انقل الجدول وأكمله لتبيّن دور كل إنزيم؟

الإنزيم	الدور
DNA لايجيز	
DNA بوليميريز	
إنزيم القطع إندونيوكلييز	
إنزيم ترانسكريبتيز العكسي	

ب. اشرح مزايا وعيوب الفحص الجيني.

٢ يبيّن التمثيل البياني التغيرات في درجة الحرارة في جهاز PCR أثناء دورتَين.



أ. سمّ الإنزيم الذي يقوم ببناء DNA أثناء PCR.

ب. اشرح الأسباب الآتية:

١. ضرورة أن تكون درجة الحرارة مرتفعة للمرحلة الأولى.

٢. لا حاجة إلى إضافة إنزيمات إلى كل دورة.

٣. يُستخدم المحلول المنظم في PCR.

ج. ١. صف ما يحدث في المرحلتين الثانية والثالثة.

٢. اقترح السبب الذي يجعل المرحلة الأولى من الدورة الأولى أطول من المرحلة الأولى من الدورة الثانية وجميع الدورات اللاحقة.

د. اشرح سبب عدم ملاءمة زوج واحد من البادئات لتضخيم جميع عيّنات DNA عند استخدام PCR.

تابع

هـ. اشرح سبب عدم إعادة تركيب DNA أحادي الشريط الذي يتكوّن بعد المرحلة الأولى من PCR لتكوين DNA المزدوج.

و. اشرح كيف يختلف PCR عن تضاعف DNA أثناء دورة الخلية.

٣ يتضمّن البناء الجيني Gene construct إدخال جين واحد أو أكثر مع تتابعات قاعدية منظمة معًا في ناقل لتكوين DNA معاد التركيب، وغالبًا ما يشمل البناء الجيني على علامات جينية مثل البروتين المتوهج الأخضر المحسن *(Enhanced EGFP)*.

أ. ١. اشرح سبب استخدام العلامات الجينية مثل البروتين المتوهج الأخضر المحسن *EGFP* في البناء الجيني.

٢. اشرح ميزة استخدام الإنزيم كعلامة جينية عوضًا عن البروتين.

سمك السلمون أكوا أدفانتج هو أنثى سمك السلمون الأطلسي المعدلة جينيًّا. يحتوي هذا السمك على نسخة واحدة من opAFP– GHc2، وهو بناء جيني جرى تحضيره من جين تركيبي من سلمون شينوك *Oncorhynchus tshawytscha* الذي يشفر لهرمون النمو ومحفز من سمك بوت المحيط *Zoarces americanus*.

ب. ١. لخص طريقة يتم فيها الحصول على الجين الذي يشفر لهرمون النمو من سلمون شينوك *O.thawytscha*.

٢. اشرح سبب ضرورة تضمين محفز في البناء.

٣. اقترح كيفية تجميع مكوّنات البناء الجيني.

٤. حدد كيفية إدخال مكونات البناء الجيني في خلايا أنثى سلمون الأطلسي المعدلة جينيًّا Salmo salar.

ج. السلمون المعدل جينيًّا ثلاثي المجموعة الكروموسومية (*3n*). اقترح مزايا تكوين سلمون ثلاثي المجموعة الكروموسومية (*3n*).

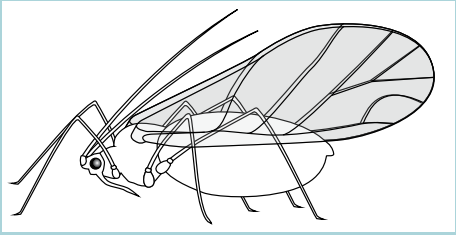
د. تتم تنمية السلمون المعدل جينيًا هذا في منشآت بنما، لكن لم تكن هناك موافقة لسنوات عديدة من إدارة الغذاء والدواء في الولايات المتحدة الأمريكية عليه.

اقترح السبب في صعوبة الحصول على موافقة إدارة الغذاء والدواء للسلمون المعدل جينيًّا؟

٤ حشرات المَن Aphids آفات مهمة اقتصاديا للعديد من نباتات المحاصيل في جميع أنحاء العالم. حشرات المَن لها أجزاء فم ثاقبة كما هو مبيّن في الرسم. إنها تُدخل أجزاء الفم في نسيج اللحاء وتتغذى على عصارة اللحاء.

تابع

حشرات المَن الأخضر *Myzus persicae* لا تقلّل فقط من إنتاجية المحصول من خلال تغذيتها، لكنها تنقل أيضًا أكثر من 100 فيروس نباتي مختلف.



أ. اذكر المصطلح الذي يطلق على الكائن الحي الناقل لمسببات الأمراض.

توجد أنواع كثيرة من حشرات المَن الأخضر *M. persicae* مقاومة للعديد من المبيدات الحشرية. يعمل المبيد الحشري بيريمي كارب Pirimicarb عن طريق ارتباط إنزيم أستيل كولين أستيريز (AChE) بالتشابكات العصبية في الحشرات. يشفر الجين *Ace* للأستيل كولين أستيريز الذي يتكوّن من أكثر من 500 حمض أميني. أظهرت تتابعات DNA لهذا الجين أن المَن المقاوم لديه تغير في حمض أميني واحد في AChE كما هو مبيّن في الرسم التخطيطي.

AChE من المَن غير المقاوم											
لـ بيريمي كارب	leu	tyr	tyr	phe	ile	ser	tyr	tyr	gly	glu	glu
AChE من المَن المقاوم											
لـ بيريمي كارب	leu	tyr	tyr	phe	ile	phe	tyr	tyr	gly	glu	glu

ب. ١. اشرح كيف يمكن التنبؤ بالتركيب الأولي للبروتين من تتابع الجين.

٢. يمكن أن يكتشف الباحثون وظيفة للبروتين من معرفتهم بتركيبه الأولي فقط. اشرح كيف يمكن ذلك.

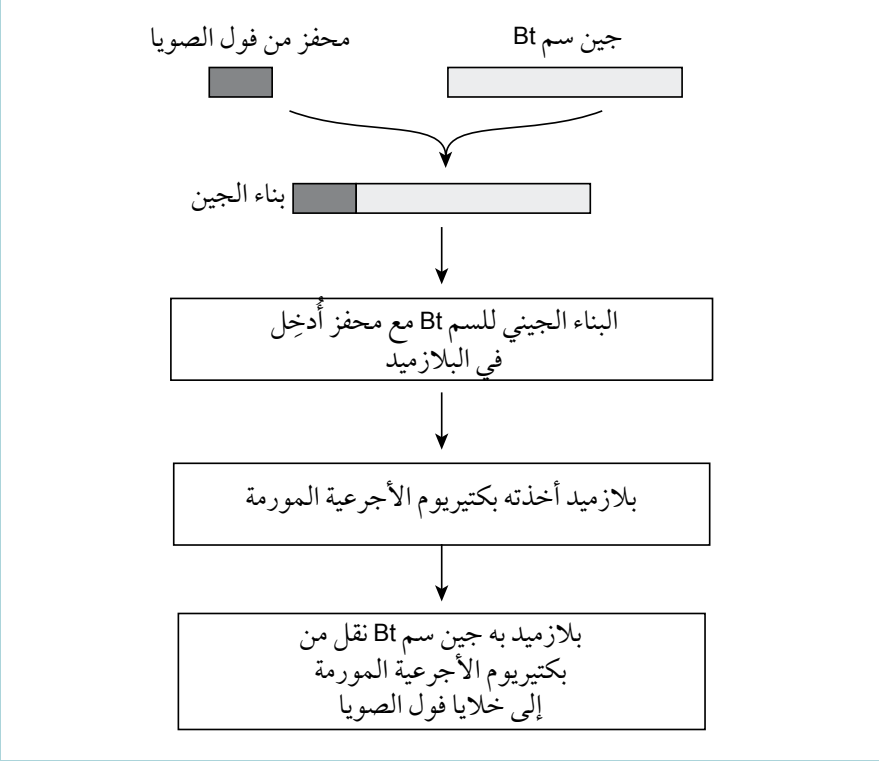
٣. اشرح كيف أن التغير في حمض أميني واحد في AChE يمكن أن يوفر مقاومة لمبيدات الحشرات مثل بيريمي كارب.

ج. الأنواع الأخرى من المَن التي تبدي مقاومة لبيريمي كارب لها التغير نفسه في التركيب الأولي لأستيل كولين أستيريز.

اشرح كيف يمكن أن تكون مقاومة بيريمي كارب قد نشأت في جماعة من المن *Myzus persicae*.

تابع

٥ جرى هندسة نبات فول الصويا جينيًا ليصبح مقاومًا لبعض الآفات الحشرية. أُدخِل الجين *cry* من بكتيريوم العصوية التورنجية *Bacillus thuringiensis* الذي يشفر للسم في نباتات فول الصويا باستخدام بكتيريوم الأجرعية المورمة *Agrobacterium tumefaciens*، كما هو مبيّن في خطوات المخطط الانسيابي.



أ. اشرح سبب ارتباط محفز بجين سم Bt كما هو مبيّن في خطوات المخطط الانسيابي.

ب. يستخدم إنزيم DNA لايجيز في الخطوات المبيّنة في المخطط الانسيابي. اشرح دور DNA لايجيز في تكوين فول صويا معدَّل جينيًّا.

ج. لخص كيف تستخدم خلايا نبات القطن جين *cry* لتكوين البروتين السام.

د. كان فول الصويا ينمّى في تجارب ميدانية واسعة النطاق قبل أن يصبح متاحًا على نطاق واسع للمزارعين. اقترح سببَين لضرورة التجارب الميدانية.

هـ. خصصت مساحات واسعة من الأراضي في أمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية والصين لزراعة المحاصيل المعدلة جينيًّا مثل الذرة المقاومة لمبيدات الأعشاب والقطن المقاوم لمبيدات الآفات. لخص الحجج المقدمة لإدخال هذه المحاصيل المعدلة جينيًّا.

تابع

٦ BRCA-1 و BRCA-2 بروتينان يتكوّن كل منهما من عديد ببتيد واحد. يشارك هذان البروتينان في التحكم في دورة الخلية وإصلاح DNA.

يمكن أن تسبب الطفرات في الجينين *BRCA-1* و *BRCA-2* تغيرات في البروتينات، لذا لا يمكن التحكم في دورة الخلية بشكل صحيح.

كشف تتابع DNA العديد من الطفرات في الجينَين. وقد اكتشف أن بعضها يؤدي إلى الإصابة بالسرطان. واكتشف أن العديد منها غير ضارة، ولا تعرف تأثيرات أخرى عنها.

يتكوّن BRCA-1 من 1863 حمضًا أمينيًا، تؤدي إحدى الطفرات العديدة التي تحدث في *BRCA-1* إلى تغير في الحمض الأميني في الموقع 871 في التركيب الأولي للبروتين، كما هو مبيّن في الجدول.

الكودون في الشريط اللانسخ (اللاقالب) لجين طبيعي	CCA	حمض أميني في الموقع 871 من BRCA-1 عادي	برولين
الكودون في الشريط اللانسخ (اللاقالب) لجين طافر	CAA	حمض أميني في الموقع 871 من BRCA-1 طافر	جلوتامين

أ. ١. اذكر نوع الطفرة الجينية المبيّنة في الجدول.

٢. يحتوي الحمض الأميني برولين على مجموعة R غير قطبية (سلسلة جانبية) ويحتوي الجلوتامين على مجموعة R قطبية.

اقترح التأثير الذي قد تسببه هذه الطفرة على تركيب BRCA-1.

ب. تورث الطفرات في *BRCA-1* كاختلالات جسدية سائدة. اشرح كيف تختلف وراثة هذا الاختلال عن وراثة نمط من اختلال جسدي متنحٍ، في جين *CFTR* المسبب للتليف الكيسي.

ج. بعض الطفرات في *BRCA-1* أكثر شيوعًا في مجموعات معيّنة من الناس. ينتج من حذف نيوكليوتيدان من الجين جزيئات من BRCA-1 تتكوّن من 38 حمضًا أمينيًا فقط. هذه الطفرة سائدة في اليهود الأشكناز *Ashkenazi Jews* أكثر من المجموعات العرقية الأخرى.

١. اشرح سبب تكوّن البروتين BRCA-1 من 38 حمضًا أمينيًا فقط في الناس الذين يحملون هذه الطفرة.

٢. اشرح سبب حدوث طفرات معيّنة من *BRCA-1* اكثر أحتمالًا في مجموعات عرقية معيّنة؟

٣. يوجد في بعض البلدان برامج للفحص الجيني لسرطان الثدي. اقترح الآثار المترتبة للتكرار العالي لبعض الطفرات في مجموعات عرقية معيّنة على برامج الفحص هذه.

قائمة تقييم ذاتي

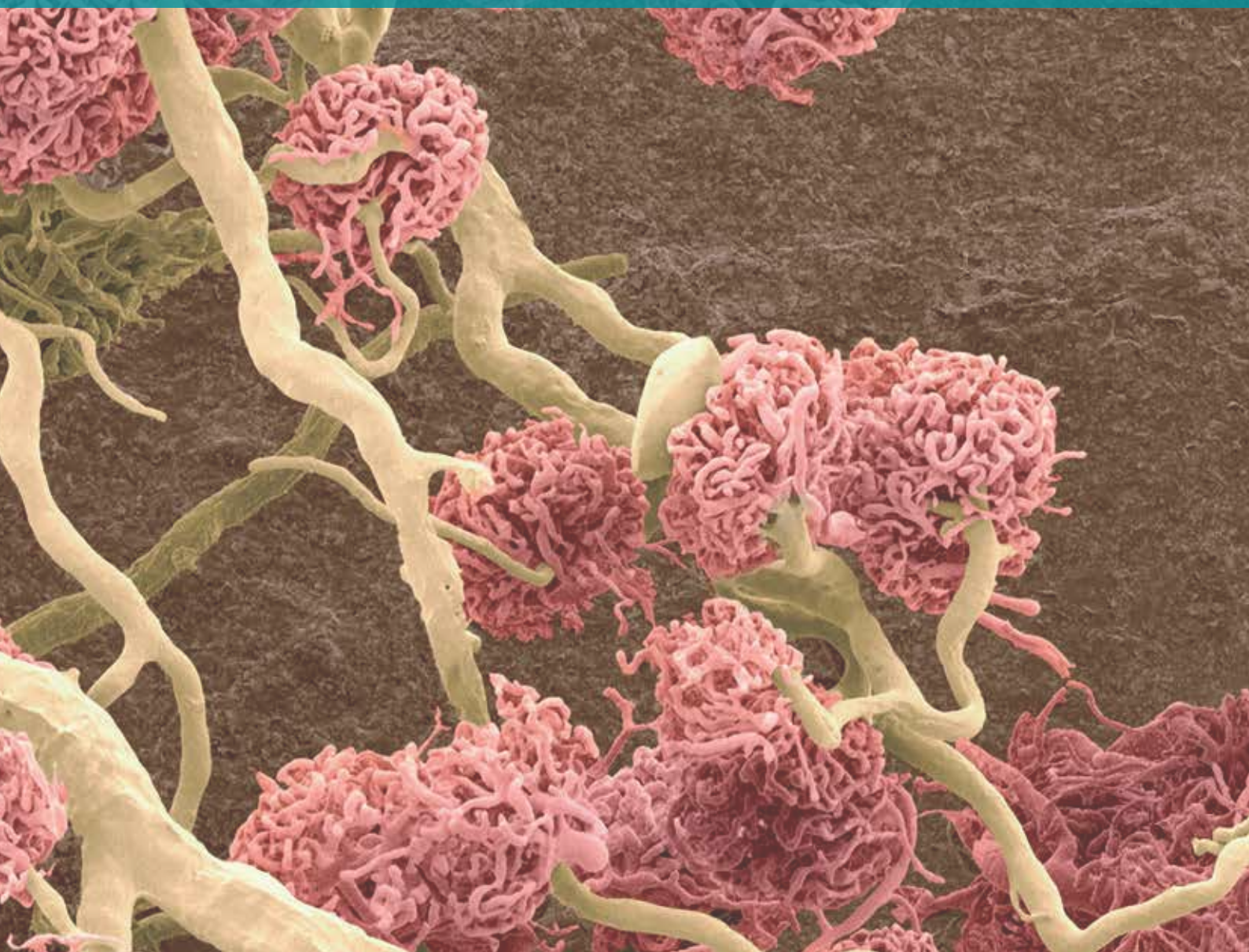
بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أشرح معنى المصطلح DNA معاد التركيب.	٣-١			
أشرح أن الهندسة الجينية هي المعالجة المقصودة للمادة الجينية وقد يشمل ذلك نقل جين من كائن إلى كائن حي آخر.	٣-١			
أشرح مصدر الجينات المستخدمة في الهندسة الجينية.	٣-١			
أشرح دور كل من إنزيمات القطع إندونيوكلييز وDNA لايجيز والبلازميدات و DNA بوليميريز، وإنزيم ترانسكريبتيز العكسي في الهندسة الجينية.	٣-٢			
أشرح سبب نقل المحفز إلى الكائن الحي بالإضافة إلى الجين المطلوب في الهندسة الجينية.	٣-٢			
أشرح كيف يمكن تأكيد التعبير الجيني باستخدام العلامات الجينية التي تشفر للمنتجات المتوهجة.	٣-٢			
أصف وأشرح المراحل المتضمنة في تفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR) بما في ذلك دور *Taq* بوليميريز.	٣-٢			
أصف وأشرح كيفية استخدام الفصل الكهربائي الهلامي لفصل قطع DNA مختلفة الطول.	٣-٣			
أشرح كيف تستخدم بروتينات الإنسان المعاد تركيبها في إنتاج الإنسولين، والعامل الثامن VIII وإنزيم الأدينوسين دي أمينيز.	٣-٣			
أحدّد ميزات الفحص الجيني في سرطان الثدي، والتليّف الكيسي.	٣-٤			
أناقش الاعتبارات الاجتماعية والأخلاقية لاستخدام الفحص الجيني في الطب.	٣-٤			
أشرح بعض استخدامات الكائنات المعدلة جينيًّا GMOs في الزراعة باستخدام أمثلة مثل السلمون ومقاومة مبيدات الأعشاب في فول الصويا ومقاومة الحشرات في القطن.	٣-٥			
أناقش الآثار الأخلاقية والاجتماعية لاستخدام الكائنات المعدلة جينيًّا في إنتاج الغذاء.	٣-٥			

الوحدة الرابعة

الاتزان الداخلي

Homeostasis



أهداف التعلّم

٤-١ يعرّف الاتزان الداخلي ويذكر أهميته في الثدييات.

٤-٢ يذكر مبادئ الاتزان الداخلي من حيث المنبهات الداخلية والخارجية والمستقبلات وأجهزة التنسيق (الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء) والمستجيبات (العضلات والغدد) والتغذية الراجعة السلبية.

٤-٣ يذكر أن اليوريا يتم إنتاجها في الكبد من خلال نزع المجموعة الأمينية من الأحماض الأمينية الزائدة.

٤-٤ يصف تركيب كُلية الإنسان، مقتصرًا على:

- المحفظة الليفية
- القشرة
- النخاع
- حوض الكُلية
- الحالب
- فروع الشريان الكلوي والوريد الكلوي.

٤-٥ يحدّد في الرسوم التخطيطية، والصور المجهرية الضوئية، والصور المجهرية الإلكترونية، أجزاء النفرون والأوعية الدموية والتراكيب المرتبطة بها، مقتصرًا على:

- الكُبيبة
- محفظة بومان
- الأُنيبيب الملتوي القريب
- التواء هنلي
- الأُنيبيب الملتوي البعيد
- القناة الجامعة.

٤-٦ يصف ويشرح تكوين البول في النفرون، مقتصرًا على:

- تكوين راشح الكُبيبة بالترشيح الفائق في محفظة بومان
- إعادة الامتصاص الانتقائي في الأُنيبيب الملتوي القريب.

٤-٧ يلخص كيف يتم ضبط تركيز البول، مع الإشارة إلى التواء هنلي والأُنيبيب الملتوي البعيد والقناة الجامعة.

٤-٨ يربط التركيب الدقيق لمحفظة بومان والأُنيبيب الملتوي القريب بوظائفها في تكوين البول.

٤-٩ يصف أدوار تحت المهاد والغدة النخامية الخلفية والهرمون المانع لإدرار البول (ADH) والأكوابورينات والقنوات الجامعة في تنظيم الأسموزية.

٤-١٠ يشرح كيف تنظم آليات التغذية الراجعة السلبية تركيز الجلوكوز في الدم، مع الإشارة إلى تأثير الإنسولين على خلايا العضلات وخلايا الكبد وتأثير الجلوكاجون على خلايا الكبد.

٤-١١ يصف مبادئ التأشير الخلوي باستخدام مثال التحكم في تركيز سكر الدم عن طريق هرمون الجلوكاجون، مقتصرًا على:

- ارتباط الهرمون بمستقبل سطح الخلية ما يسبب تغيرات الشكل الفراغي.
- تنشيط البروتين G الذي يؤدي إلى تحفيز إنزيم أدينيليل سيكليز.
- تكوين المرسال الثاني cAMP (أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي).
- تنشيط بروتين كاينيز A بواسطة أحادي فوسفات الأدينوسين الحلقي الذي يؤدي إلى بدء تتالي الإنزيمات.
- تضخيم الإشارة من خلال تتالي الإنزيمات نتيجة لتنشيط المزيد من الإنزيمات عن طريق الفسفرة.
- الاستجابة الخلوية التي يتم فيها تنشيط الإنزيم النهائي في المسار، يؤدي إلى حفز تفكيك الجلايكوجين.

٤-١٢ يشرح مبادئ عمل شرائط الاختبار وأجهزة الاستشعار الحيوية لقياس تركيز الجلوكوز في البول والدم، مع الإشارة إلى إنزيمَي الجلوكوز أكسيديز والبيروكسيديز.

٤-١٣ يصف تركيب الخلايا الحارسة ووظيفتها.

٤-١٤ يوضح أن الثغور تستجيب للتغيرات في الظروف البيئية عن طريق الفتح والإغلاق، وأن تنظيم فتحة الثغر يوازن بين الحاجة إلى امتصاص ثاني أكسيد الكربون بالانتشار والحاجة إلى تقليل فقد الماء عن طريق النتح.

٤-١٥ يصف آلية فتح وإغلاق الثغور.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

تخيل خلية في عمق كبدك، وفكّر في كيفية بقائها على قيد الحياة. فكّر في المواد التي تحتاج إليها للبقاء على قيد الحياة، وفي جميع الفضلات التي تنتجها. فكّر أيضًا في الظروف التي يتم الاحتفاظ بها عند المستويات المثلى لتعمل بكفاءة، وفي أجهزة الجسم التي تعمل معًا للحفاظ على الخلية حية.

ناقش أفكارك مع زملائك.

العلوم ضمن سياقها

النوم العميق لدى الدب الأسود

حفاظ الدب الأسود *Ursus americnus* على درجة حرارة جسم ثابتة ودافئة في فصل الشتاء الطويل يتطلب عمليات أيض مكلفة بالنسبة إلى حيوان ثديي، حيث يكون الجو باردًا جدًا ويصعب الحصول على الطعام، ولذلك تتغذى الدببة السوداء جيدًا خلال الصيف لتخزن الدهون الغنية بالطاقة (الصورة ٤-١). وهي تحفر في الخريف وبداية الشتاء أوكارًا لنفسها، أو تجد وكرًا جاهزًا في مكان ما كالكهف. وهذه الدببة تتكوّر على نفسها وتنام بمجرد دخولها الوكر بانتظار تحسّن الطقس. وتتكيّف عمليات أيضها مع هذه الفترة الطويلة من الخمول عندما لا تأكل أو تشرب أو تتبول أو تتبرّز، وتوفر لها الطاقة الدهون المختزنة وبعض بروتينات العضلات. الفضلة الناتجة من أيض البروتين هي اليوريا، التي يتم تصفيتها من الدم عن طريق الكلى. تستمر الكلى في تكوين البول، لكن يُعاد امتصاصه من المثانة. لا يمكن تخزين اليوريا، وعوضًا من ذلك تعيد بكتيريا الأمعاء تدويرها، فتحلل اليوريا إلى أمونيا وثاني أكسيد الكربون، ليتم امتصاصهما إلى الدم. ويخرج ثاني أكسيد الكربون إلى خارج الجسم مع هواء الزفير، في حين تتّحد الأمونيا مع الجليسرول الناتج من أيض الدهون، وذلك لتكوين الأحماض الأمينية. تستخدم الأحماض الأمينية لبناء الإنزيمات اللازمة بكميّات أكبر للتحلُّل المائي المتزايد للدهون لتكوين الأحماض الدهنية التي توفر الطاقة في عملية التنفس أثناء السُّبات الشتوي للدب.

الصورة ٤-١ تعزز الدببة أثناء الصيف مخزونها من الدهون للبقاء على قيد الحياة خلال الأشهر السبعة أو نحو ذلك عندما لا تأكل.

سؤال للمناقشة

تؤثر تجربة انعدام الوزن التي يعيشها رواد الفضاء أثناء الرحلات الفضائية على العمليات الحيوية الطبيعية في أجسامهم.

توجد خطط تمكن رواد الفضاء من قطع مسافات طويلة في الفضاء. على سبيل المثال، تستغرق مركبة الفضاء سبعة أشهر للسفر من الأرض إلى المريخ. ناقش المشكلات ذات الصلة في الحفاظ على صحة رواد الفضاء في رحلات الفضاء المأهولة إلى المريخ، واقترح حلولًا للمشكلات التي حددتها.

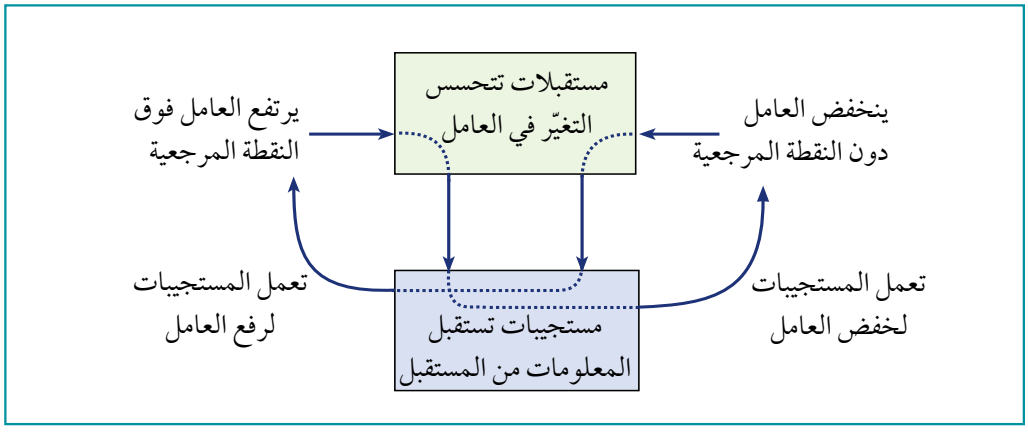
٤-١ الاتزان الداخلي

تتصف الكائنات الحية بوجود أجهزة تحكّم تحافظ على بيئة الجسم الداخلية بحالة قريبة من الثبات بما يضمن أن تعمل أجهزة الجسم بكفاءة، وهو ما يسمّى **الاتزان الداخلي Homeostasis**. ويتطلب هذا الأمر مراقبة المتغيرات داخل الجسم وخارجه، ويشمل الحفاظ على العوامل الفسيولوجية، مثل:

- درجة حرارة الجسم الداخلية.
- فضلات الأيض، بخاصة ثاني أكسيد الكربون واليوريا.
- الرقم الهيدروجيني pH للدم.
- تركيز الجلوكوز في الدم.
- جهد الماء للدم.
- تركيز غازَي التنفس في الدم: الأكسجين وثاني أكسيد الكربون.

درست في الصفوف السابقة بعض الآليات التي يتم من خلالها التحكم بهذه العوامل. وستركز في هذه الوحدة على كيفية الحفاظ على جهد الماء وتركيز الجلوكوز في الدم.

البيئة المباشرة التي توجد فيها الخلايا الحية هي السائل النسيجي. وتحافظ الثدييات بشكل أساسي على المتغيرات في السائل النسيجي ضمن حدود معيّنة بالتحكم في قيم العوامل الفسيولوجية في الدم. يبيّن الشكل ٤-١ حلقة **التغذية الراجعة السلبية Negative feedback** المستخدمة غالبًا للحفاظ على الاتزان الداخلي. وهذا يتضمن **المُستَقبِل Receptor** و**المُستَجيب Effector**. تشمل المستجيبات العضلات والغدد. يتحسس المستقبل **المنبّهات Stimuli** (مفردها: منبّه **Stimulus**) الصادرة عن المتغير الذي يتم التحكم فيه. ويرسل المعلومات عبر الجهاز العصبي إلى الجهاز العصبي المركزي، الذي يحدد بعد ذلك كيفية الاستجابة عن طريق عمل المستجيب. تسمّى أعمال المستجيبات أحيانًا **الإجراءات التصحيحية Corrective actions**، إذ يتمثل تأثيرها بتصحيح (أو عكس) التغيرات التي تم الكشف عنها.



الشكل ٤-١ حلقة التحكم بالتغذية الراجعة السلبية.

مصطلحات علمية

الاتزان الداخلي Homeostasis: الحفاظ على بيئة داخلية ثابتة نسبيًا للخلايا داخل الجسم.

التغذية الراجعة السلبية Negative feedback: عملية يؤدي فيها تغيير في بعض المتغيرات (مثلًا تركيز الجلوكوز في الدم) إلى حدوث عمليات تعيده إلى الوضع الطبيعي.

المستقبل Receptor: خلية أو نسيج يتحسس لمنبّهات محددة ويتواصل مع مركز تحكم لتوليد نبضات كهربائية أو إرسال مرسال كيميائي.

المستجيب Effector: نسيج أو عضو يقوم بعمل استجابة للمنبّه مثل العضلات والغدد الصماء.

منبّه Stimulus (جمعها منبّهات **Stimuli**): تغيّر في البيئة الخارجية أو الداخلية يتحسسه المستقبل وقد يسبب حدوث استجابة.

الإجراء التصحيحي Corrective action: استجابة أو سلسلة استجابات تعيد العامل الفسيولوجي إلى المستوى الطبيعي بحيث يتم الحفاظ على بيئة ثابتة للخلايا داخل الجسم.

تؤدي المراقبة المستمرة والتغذية الراجعة السلبية (كما هو مبيّن في الشكل ٤-١)، إلى تأرجح العامل قيد التحكم حول قيمة «مثالية» أو **النقطة المرجعية Reference point**. على سبيل المثال، تتأرجح درجة الحرارة المثالية لجسم الإنسان بين 36°C و 38°C، ويمكن أن يتأثر هذا النطاق بمجموعة متنوعة من العوامل الأخرى، مثل العمر والجنس والوقت من اليوم.

تتطلب آليات الاتزان الداخلي في الثدييات معلومات يجب أن تُنقل بين أجزاء الجسم المختلفة. ويوجد في الثدييات نوعان من أجهزة التنسيق يقومان بذلك: الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء.

- تنتقل المعلومات في الجهاز العصبي على شكل نبضات كهربائية Electrical impulses على طول الخلايا العصبية.
- يستخدم جهاز الغدد الصماء مراسيل كيميائية تسمّى **هرمونات Hormones**، تنتقل في الدم على شكل إشارات خلوية بعيدة المدى.

سؤال

١ **أ.** صف البيئة المباشرة لخلية نموذجية في جسم الثدييات.

ب. اشرح أهمية أن تكون البيئة الداخلية للثدييات منظمة بشكل دقيق.

ج. اشرح دور كل ممّا يأتي في الحفاظ على البيئة الداخلية للثدييات: المنبهات، المستقبلات، أجهزة التنسيق، المستجيبات.

د. ميّز بين المدخلات والمخرجات في آلية التحكم بالاتزان الداخلي.

في بعض الأحيان لا تستجيب آليات التحكم بواسطة التغذية الراجعة السلبية. فإذا كان شخص يستنشق هواء يحتوي على نسبة عالية جدًا من ثاني أكسيد الكربون، فسيكون تركيز ثاني أكسيد الكربون في الدم مرتفعًا. وبالتالي تستشعر مستقبلات ثاني أكسيد الكربون ذلك، وتسبب زيادة معدل التنفس، فيتنفس الشخص بشكل أسرع، ويأخذ المزيد من ثاني أكسيد الكربون؛ الأمر الذي يزيد من تنبيه المستقبلات، فيتنفس الشخص بسرعة أكبر وبشكل متزايد. تمثل هذه الحالة **التغذية الراجعة الإيجابية Positive feedback**، والتي كما تلاحظ لا تؤدّي دورًا في الحفاظ على ثبات البيئة الداخلية للجسم.

مصطلحات علمية

النقطة المرجعية Reference point: القيمة المثالية للعامل الفسيولوجي التي يتحكم فيها الجسم في الاتزان الداخلي.

الهرمون Hormone: مادة تفرزها غدة صماء تنتقل في بلازما الدم إلى جزء آخر من الجسم حيث يكون لها تأثير.

التغذية الراجعة الإيجابية Positive feedback: عملية يؤدي تغير بعض المتغيرات فيها مثل العامل الفسيولوجي إلى عمليات تُعزِّز التغير الأولي.

الإفراز Excretion: إزالة المنتجات السامة أو فضلات الأيض من الجسم.

اليوريا Urea: ناتج إفرازي نيتروجيني يتكوّن في الكبد من نزع مجموعة الأمين من الأحماض الأمينية.

الإفراز

تنتج العديد من تفاعلات الأيض التي تحدث داخل الجسم مواد غير مرغوب فيها، وبعضها سامة. تعرف عملية إزالة منتجات الأيض غير المرغوب فيها هذه باسم **الإفراز Excretion**.

يتكوّن في جسم الإنسان العديد من منتجات الأيض، لكن اثنَين منها يتكوّنان بكميّات أكبر بكثير من بقية المنتجات، وهما ثاني أكسيد الكربون و**اليوريا Urea**. ينتج ثاني أكسيد الكربون بشكل مستمر في الخلايا التي تتنفس هوائيًا.

وتنقل فضلات ثاني أكسيد الكربون في مجرى الدم من هذه الخلايا إلى الرئتَين، حيث يحدث تبادل الغازات داخل الرئتَين، وينتشر ثاني أكسيد الكربون من الدم إلى الحويصلات الهوائية، ثم يفرز إلى خارج الجسم مع هواء الزفير.

يتمّ إنتاج اليوريا في الكبد من الأحماض الأمينية الفائضة فيه، وتنقل ذائبة في بلازما الدم من الكبد إلى الكليتَين. تزيل الكليتان اليوريا من الدم، وتفرزها ذائبةً في الماء، ويسمى المحلول الناتج البول Urine.

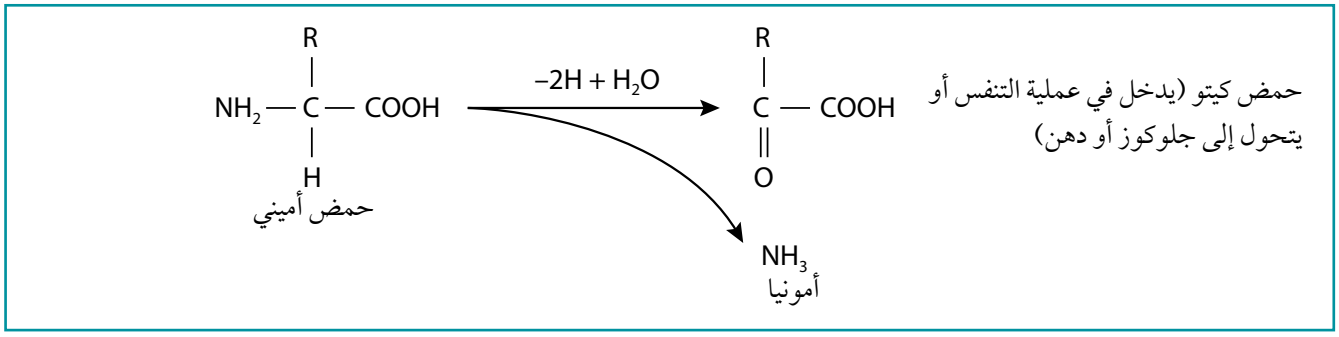
نزع الأمين

لا يخزن الجسم البروتين الزائد والناتج من تناول كميّات أكبر من حاجته. وسيكون التخلص من كل الكمية الزائدة إسرافًا أو هدرًا للطاقة لأن الأحماض الأمينية توفر طاقة مفيدة. لذا يعمل الكبد على الاستفادة من هذه الطاقة بإزالة مجموعات الأمين في عملية تسمّى **نزع الأمين Deamination**.

يبيّن الشكل ٤-٢ كيفية حدوث نزع الأمين. إذ تُزال في خلايا الكبد مجموعة الأمين ($-NH_2$) من الحمض الأميني، مع ذرة هيدروجين إضافية. ويتحدان لتكوين الأمونيا (NH_3)، وقد يدخل حمض الكيتو Keto acid المتبقي دورة كريبس في عملية التنفس، أو يتحوّل إلى جلوكوز أو جلايكوجين أو دهن للتخزين.

مصطلحات علمية

نزع الأمين Deamination: تحطيم الأحماض الأمينية الفائضة في الكبد، بإزالة مجموعة الأمين، على شكل أمونيا، التي تتحوّل إلى يوريا.



الشكل ٤-٢ ينزع الأمين من الأحماض الأمينية في الكبد لتكوين الأمونيا وأحماض الكيتو.

الأمونيا مركب شديد الذوبان والسُّمية. وفي العديد من الحيوانات المائية (مثل السمك الذي يعيش في المياه العذبة) تنتشر الأمونيا من الدم وتذوب في الماء المحيط بالحيوان. ترفع الأمونيا في الإنسان وحيوانات اليابسة من قيمة الرقم الهيدروجيني pH في السيتوبلازم، وهي تتداخل مع عمليات الأيض مثل التنفس، ومع التأشير الخلوي في الدماغ. ويُمنع حدوث هذا الضرر بتحويل الأمونيا مباشرة إلى يوريا، وهي أقل ذوبانًا وسُّمية. وتعمل عدة تفاعلات في دورة تعرف باسم دورة اليوريا على ربط الأمونيا وثاني أكسيد الكربون معًا لتكوين اليوريا. ينتج الإنسان البالغ (25-30 g) تقريبًا من اليوريا في اليوم.

اليوريا هي ناتج الإفراز النيتروجيني الرئيسي في الإنسان. وينتج الإنسان أيضًا كميّات صغيرة من منتجات إفرازية نيتروجينية، بخاصة الكرياتينين وحمض اليوريك. يتكوّن حمض اليوريك من تفكُّك البيورينات من النيوكليوتيدات، وليس من الأحماض الأمينية.

تنتشر اليوريا من خلايا الكبد إلى بلازما الدم. ويجب أن تُفرز كل اليوريا التي يتم إنتاجها يوميًّا، وإلّا فإنها تتراكم في الدم وتصبح خطرة. وعند مرور الدم في الكليتَين، يتم ترشيح اليوريا وإفرازها. ويساعد تعرّف تركيب الكُلية في شرح كيفية حدوث هذه العملية.

سؤال

(٢) **أ.** حمض اليوريك فضلات نيتروجينية، يتكوّن من تفكُّك البيورينات. ما هي البيورينات؟ وما استخداماتها؟

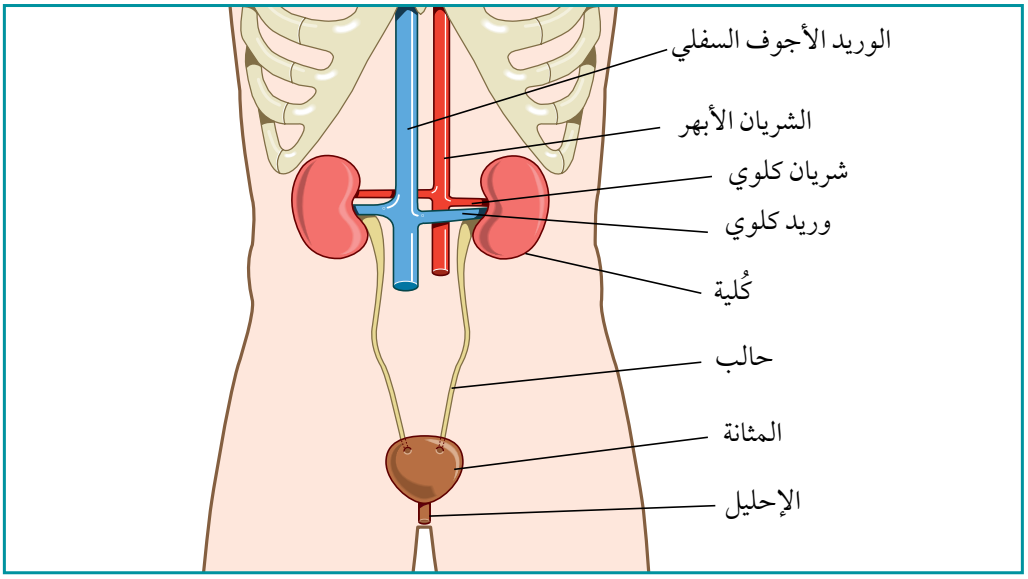
ب. اشرح أهمية إفراز ثاني أكسيد الكربون والفضلات النيتروجينية، وضرورة عدم تراكمها في الجسم.

٤-٢ تركيب الكُلية

يبيّن الشكل ٤-٣ موضع الكليتَين في الجسم، بالإضافة إلى التراكيب المرتبطة بها. تتلقى كل كُلية الدم من شريان كلوي Renal artery، وتعيده عن طريق وريد كلوي Renal vein. وتنقل أنبوبة ضيقة تسمّى الحالب Ureter (الصورة ٤-٢) البول من كل كُلية إلى المثانة. وتنقل أنبوبة مفردة تسمّى الإحليل Urethra، البول من المثانة إلى خارج الجسم.

يبيّن المقطع الطولي في الكُلية (الشكل ٤-٤) وجود ثلاث مناطق رئيسية فيها. وتحاط الكُلية ككل بمحفظة ليفية، قاسية إلى حد ما، توجد القشرة Cortex أسفلها. وتتكوّن المنطقة المركزية من النخاع Medulla، وتوجد منطقة تسمّى حوض الكُلية Renal pelvis حيث يرتبط الحالب بالكُلية.

يبيّن مقطع في الكُلية كما يُشاهد بالمجهر الضوئي (الصورة ٤-٣) أنها مكوّنة من آلاف الأُنيبيبات تسمّى **النفرونات Nephrons**، والعديد من الأوعية الدموية. ويبيّن الشكل ٤-٦أ موضع نفرون واحد، ويبيّن الشكل ٤-٦ب تركيب هذا النفرون. تكوّن إحدى نهايتَي الأُنيبيب تركيبًا على شكل كأس يسمّى **محفظة بومان Bowman's capsule**، تحيط بشبكة من الشعيرات الدموية تسمّى **الكُبيبة Glomerulus**. توجد كبيبات ومحافظ بومان لجميع النفرونات في قشرة الكُلية. يمتد الأُنيبيب باتجاه مركز الكُلية ليكوّن بداية منطقة ملتوية تسمّى **الأُنيبيب الملتوي القريب Proximal convoluted tubule**، ثم أُنيبيبًا طويلًا على شكل حرف U في النخاع يسمّى **التواء هنلي Loop of Henle**.



الشكل ٤-٣ موضع الكليتَين والتراكيب المرتبطة بها في جسم الإنسان.

مصطلحات علمية

النفرون Nephron: الوحدة التركيبية والوظيفية للكُلية، تتكوّن من محفظة بومان وأنبوبة مقسمة إلى ثلاث مناطق: الأُنيبيب الملتوي القريب، والتواء هنلي، والأُنيبيب الملتوي البعيد.

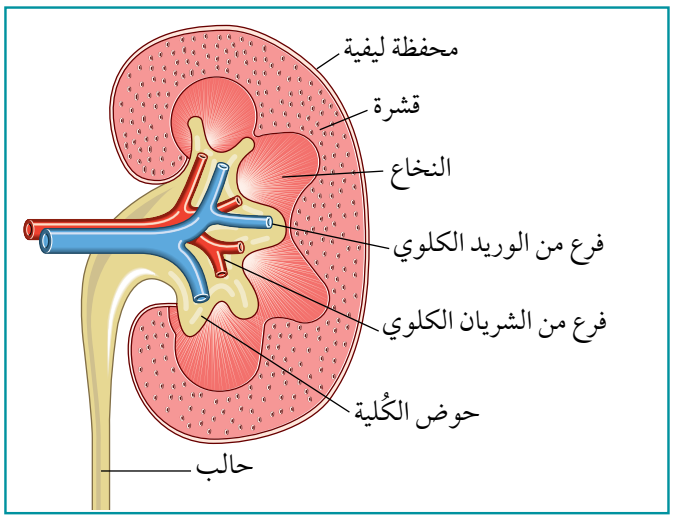
محفظة بومان Bowman's capsule: جزء النفرون الذي له شكل كوب ويحيط بكُبيبة ويجمع راشح الكُبيبة من الدم.

الكُبيبة Glomerulus: مجموعة من الشعيرات الدموية داخل محفظة بومان في قشرة الكُلية.

الأُنيبيب الملتوي القريب Proximal convoluted tubule: جزء من النفرون يمتد من محفظة بومان إلى التواء هنلي.

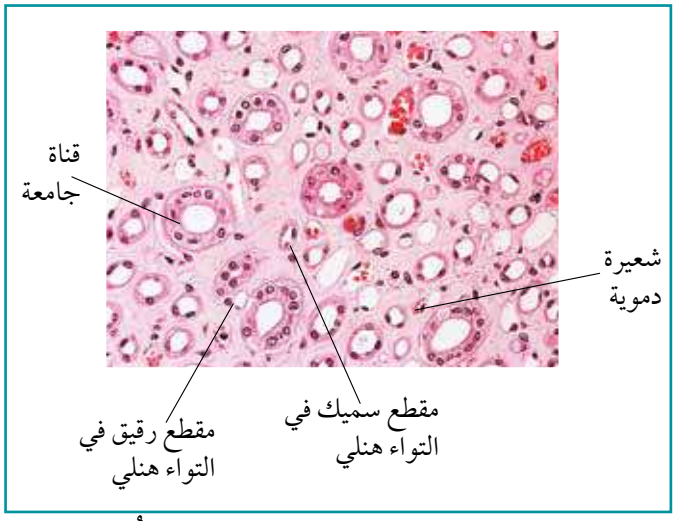
التواء هنلي Loop of Henle: جزء من النفرون يوجد بين الأُنيبيب الملتوي القريب والأُنيبيب الملتوي البعيد.

الصورة ٤-٢ كُلية مع حالب مرتبط بها.

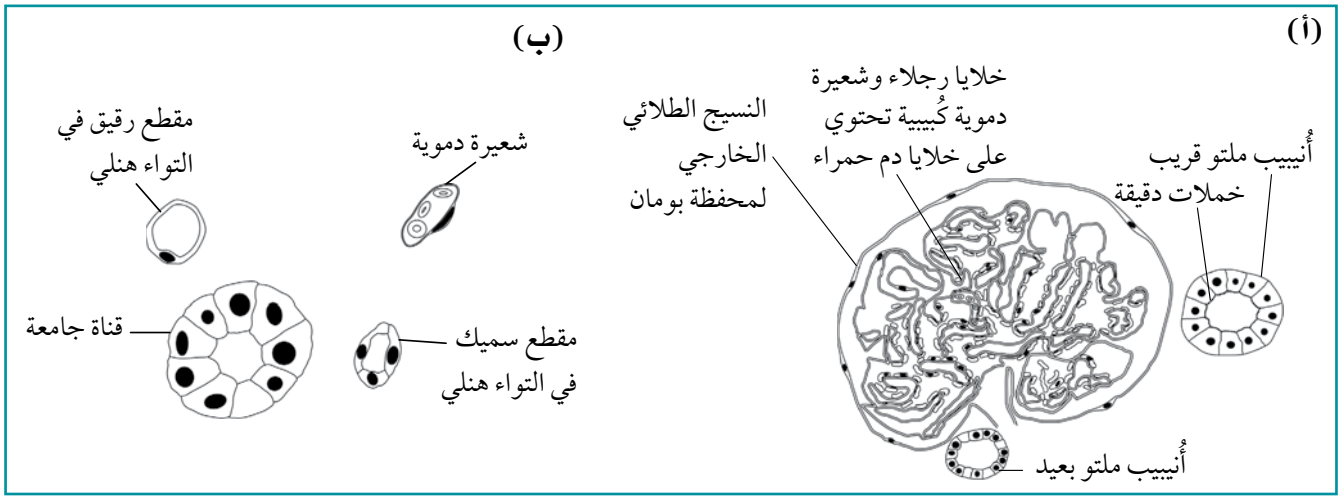


الشكل ٤-٤ كُلية مقطوعة من المنتصف طوليًا.

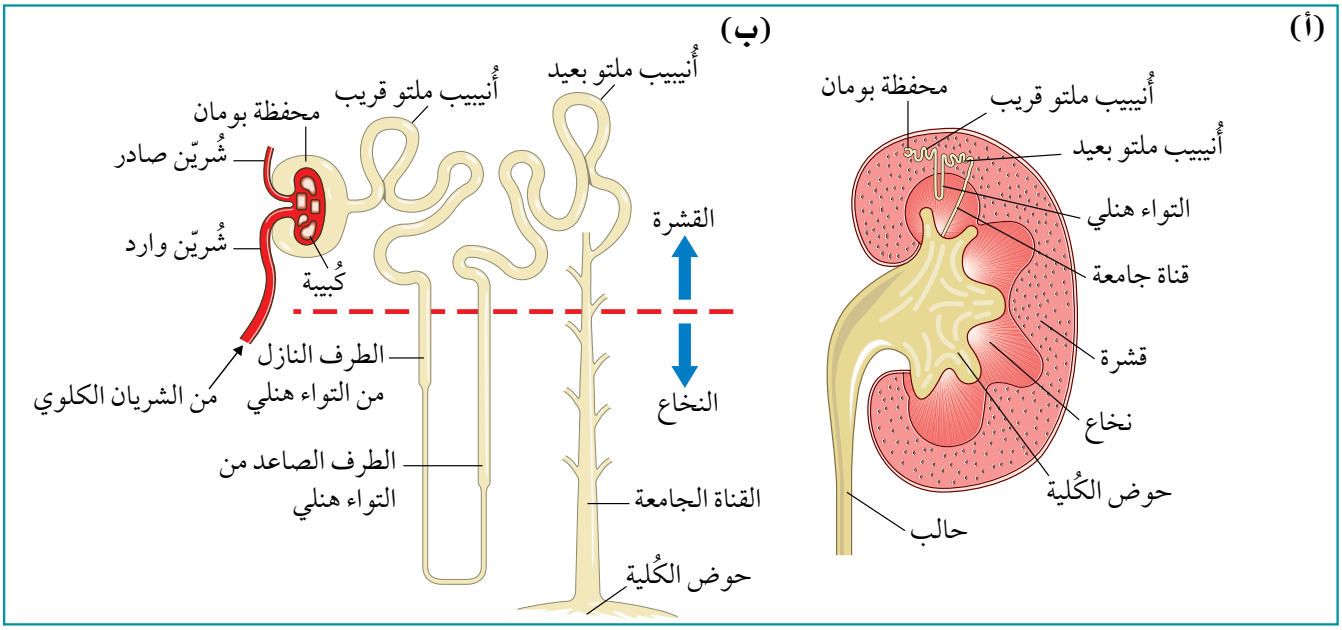
الصورة ٤-٣ صورة مجهرية ضوئية لقسم من قشرة الكُلية يبيّن الكُبيبة ومحفظة بومان محاطة بالأُنيبيب الملتوي القريب و البعيد (X150).



الصورة ٤-٤ صورة مجهرية ضوئية لمقطع في نخاع الكُلية (X300).



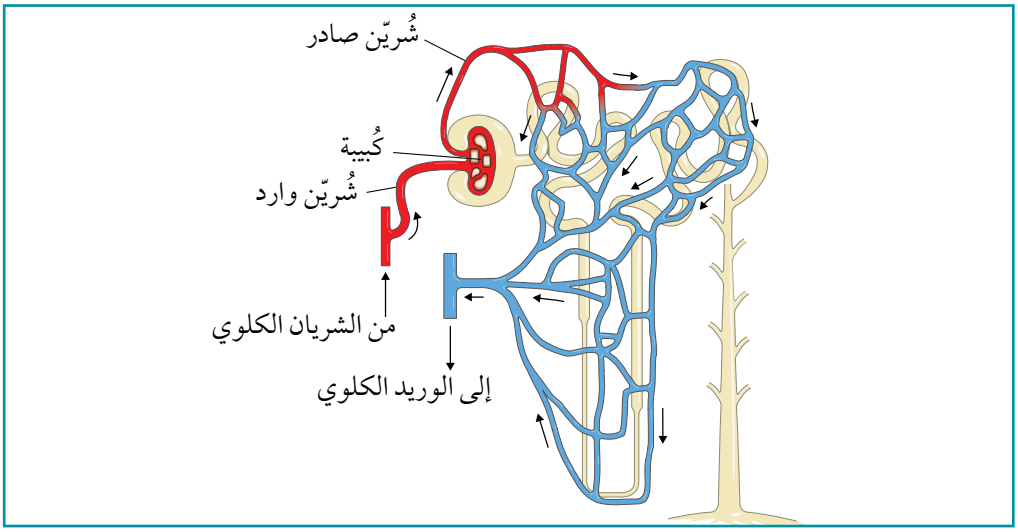
الشكل ٤-٥ (أ) رسم تفسيري للصورة ٤-٣. (ب) رسم تفسيري للصورة ٤-٤.



الشكل ٤-٦ (أ) مقطع في كُلية يبيّن موضع النفرون. (ب) النفرون. السائل في النفرون هو الراشح من بلازما الدم، وعندما يصل القناة الجامعة يسمى البول.

يمثل الطرف النازل الجزء الأول من الالتواء. ويمتد الطرف الصاعد مرة أخرى إلى القشرة ليكوّن منطقة ملتوية أخرى تسمّى **الأُنيبيب الملتوي البعيد** **Distal convoluted tubule**، قبل أن تتصل في النهاية بـ **قناة جامعة** **Collecting duct** التي تؤدي إلى الأسفل عبر النخاع إلى حوض الكُلية.

ترتبط الأوعية الدموية ارتباطًا وثيقًا بالنفرونات (الشكل ٤-٧). وتُزوّد كل كُبيبة بالدم المتدفق من فرع من الشريان الكلوي عبر **الشُريّن الوارد** **Afferent arteriole**. وتنضم الشعيرات الدموية في الكُبيبة معًا مكوّنة **الشُريّن الصادر** **Efferent arteriole**. يتدفق الدم عبر الشُريّنات الصادرة إلى شبكة من الشعيرات الدموية تمتد بشكل وثيق بجوار بقية النفرون، ويتدفق الدم من هذه الشعيرات في الوُريّدات ليصب في فرع من الوريد الكلوي.



الشكل ٤-٧ تزويد النفرون بالدم. يوجد أيضًا العديد من الشعيرات الدموية بجوار القنوات الجامعة (انظر أيضًا الصورتَين ٤-٣ و ٤-٤، والشكل ٤-٥).

مصطلحات علمية

الأُنيبيب الملتوي البعيد Distal convoluted tubule: جزء من النفرون يمتد من التواء هنلي إلى القناة الجامعة.

القناة الجامعة Collecting duct: أنبوبة في نخاع الكُلية تنقل البول من الأُنيبيبات الملتوية البعيدة لعدة نفرونات إلى حوض الكُلية.

الشريّن الوارد Afferent arteriole: شريّن يحمل الدم إلى الشعيرات الدموية للكُبيبة.

الشريّن الصادر Efferent arteriole: شُريّن يحمل الدم بعيدًا عن الشعيرات الدموية للكُبيبة.

مصطلحات علمية

الترشيح الفائق Ultrafiltration: الترشيح على النطاق الجزيئي لفصل الجزيئات الصغيرة عن الجزيئات الأكبر مثل البروتينات (مثل الترشيح الذي يحدث عند تدفق الدم عبر الشعيرات الدموية، بخاصة تلك الموجودة في كُبيبات الكُلية).

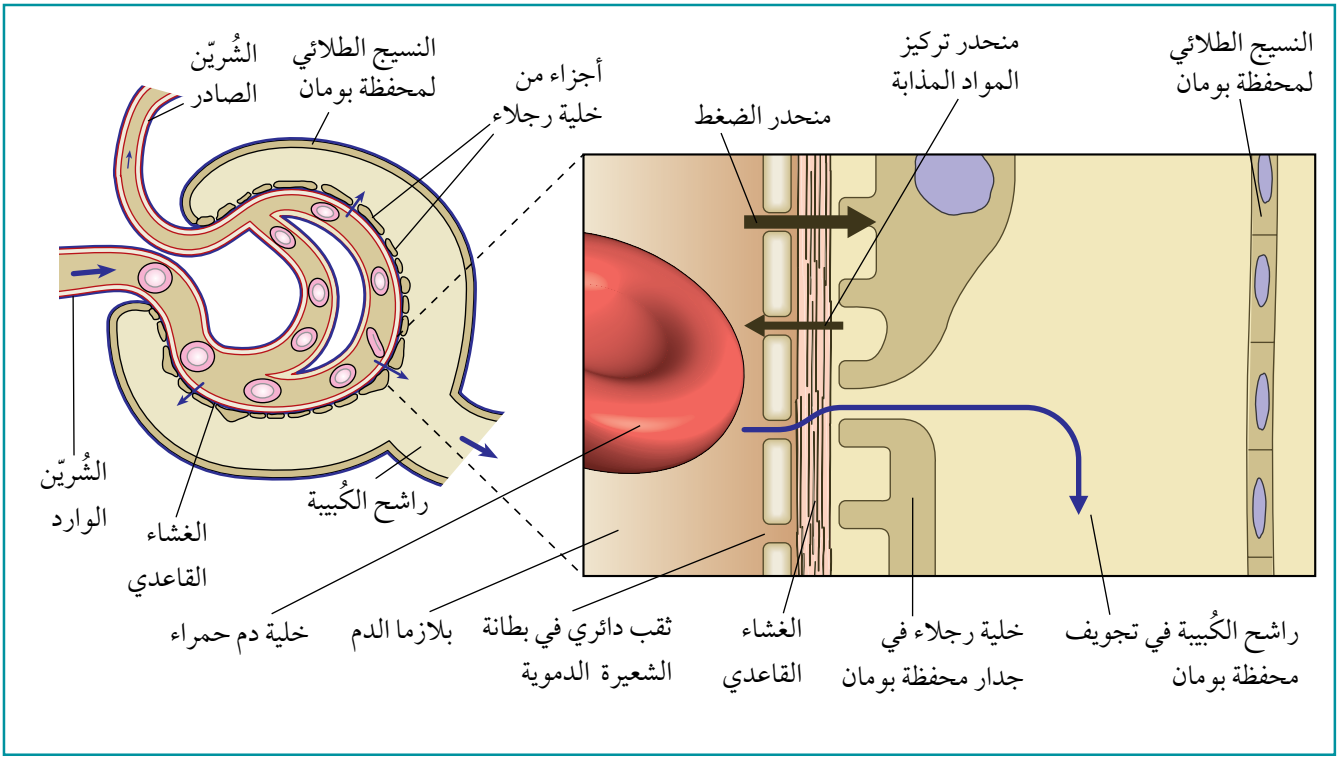
إعادة الامتصاص الانتقائي Selective reabsorption: حركة مواد معيّنة من الراشح في النفرونات لتعود إلى الدم.

خلايا رجلاء Podocytes: إحدى الخلايا التي تكوّن النسيج الطلائي لمحفظة بومان والمحيطة بالشعيرات الدموية الكُبيبية.

تكوّن الكُلية البول على مرحلتين: المرحلة الأولى **الترشيح الفائق Ultrafiltration**، وتتضمن ارتشاح الجزيئات الصغيرة، بما في ذلك اليوريا، من الدم إلى محفظة بومان لتكوين الراشح، حيث يتدفّق من المحفظة على طول النفرون باتجاه القناة الجامعة. والمرحلة الثانية **إعادة الامتصاص الانتقائي Selective reabsorption**، وتتضمن استرداد أي جزيئات صغيرة من الراشح عند تدفقه عبر النفرون.

الترشيح الفائق

يبيّن الشكل ٤-٨ مقطعًا في جزء من الكُبيبة ومحفظة بومان. يُفصَل الدم في الشعيرات الدموية للكُبيبة عن تجويف محفظة بومان بطبقتَين من الخلايا وغشاء قاعدي. أول طبقة من الخلايا هي بطانة الشعيرة الدموية، وكل خلية من البطانة مثقبة بعدة آلاف من ثقوب غشائية دائرية دقيقة قطرها (60 - 80 nm) تقريبًا. ويوجد بعد ذلك الغشاء القاعدي، الذي يتكوّن من شبكة من ألياف الكولاجين والبروتينات السكرية. تتكوّن الطبقة الثانية من الخلايا من خلايا طلائية تكوّن البطانة الداخلية لمحفظة بومان. تحتوي هذه الخلايا على العديد من الامتدادات الدقيقة الشبيهة بالأقدام بينها فجوات، تسمّى خلايا هذه الطبقة **خلايا رجلاء Podocytes** (الصورة ٤-٥).



الشكل ٤-٨ تفاصيل بطانة الشعيرات الدموية للكُبيبة ومحفظة بومان. توضح الأسهم كيف أن محصلة التأثير للضغط المرتفع في الشعيرة الدموية وانخفاض تركيز المواد المذابة في محفظة بومان يدفع السائل من البلازما إلى داخل تجويف المحفظة لتكوين الراشح. يعمل الغشاء القاعدي كمرشح جزيئي.

الصورة ٤-٥ (أ) صورة مجهرية إلكترونية (الماسح) ملونة لقالب الراتنج **Resin cast** للشعيرات الدموية للكُبيبات والأوعية الدموية الأكبرالتي تزودها بالدم (**X60**). تمت إزالة الخلايا التي تحيط عادة بالكُبيبات للكشف عن الشعيرات الدموية الملتفة. (ب) صورة مجهرية إلكترونية (الماسح) بألوان زائفة لخلايا رجلاء (**X3900**). الخلايا الرجلاء هي الخلايا الظاهرة باللون الأخضر – الأزرق مع امتداداتها الملتفة حول شعيرة دموية والتي تظهر باللون البنفسجي.

تجعل الثقوب الموجودة في بطانة الشعيرات الدموية والفجوات بين الخلايا الرجلاء من السهل على المواد المذابة في بلازما الدم المرور من الدم إلى محفظة بومان. لكن الغشاء القاعدي يمنع مرور جزيئات البروتين الكبيرة عبرها. فأي جزيء بروتين كتلته الجزيئية أعلى من 69000 g/mol تقريبًا لا يستطيع المرور عبر الغشاء القاعدي، ولا يمكنه المغادرة من الشعيرات الدموية الكُبيبية. لذلك يعمل الغشاء القاعدي كمرشح. خلايا الدم الحمراء وخلايا الدم البيضاء والصفائح الدموية الكُبيبية أكبر من أن تمر عبر الثقوب في البطانة، لذا تبقى في الدم. يبيّن الجدول 4-1 التراكيز النسبية للمواد في الدم وفي راشح الكُبيبة. لاحظ أن راشح الكُبيبة يطابق بلازما الدم ما عدا أنه تقريبًا لا يحتوي على بروتينات البلازما.

المادة	التركيز في بلازما الدم g / L	التركيز في راشح الكُبيبة g / L
الماء	900	900
بروتينات البلازما	80.0	0.05
الأحماض الأمينية	0.5	0.5
الجلوكوز	1.0	1.0
اليوريا	0.3	0.3
حمض اليوريك	0.04	0.04
الكرياتينين	0.01	0.01
الأيونات غير العضوية (بشكل أساسي K^+، Na^+ و Cl^-)	7.2	7.2

الجدول٤-١ تراكيز المواد في الدم وفي راشح الكُبيبة.

العوامل المؤثرة على معدل ترشيح الكُبيبة

معدل ارتشاح السائل من الدم إلى الشعيرات الدموية الكبيبية في محفظة بومان يسمّى معدل ارتشاح الكُبيبة Glomerular filteration rate، ويبلغ هذا المعدل في كليتَي الإنسان 125 mL /min.

تذكّر أن الماء ينتقل من المنطقة ذات جهد الماء الأعلى إلى المنطقة ذات جهد الماء الأقل، مع منحدر جهد الماء، وينخفض جهد الماء بوجود المواد المذابة (المذاب) ، ويرتفع بفعل الضغط العالي.

إن تركيز المواد المذابة في الدم في الشعيرات الدموية الكُبيبية أعلى من تركيز المواد المذابة في الراشح في محفظة بومان. ويعود ذلك إلى العدد الكبير من بروتينات البلازما الكبيرة التي لا يمكنها أن تمر عبر محفظة بومان (الجدول ٤-١).

يكون ضغط الدم داخل الشعيرات الدموية مرتفعًا نسبيًا، لأنه يمر في الشرينات الواردة العريضة ومن ثم ينضغط ليمر في الشرينات الصادرة الضيقة (الشكل ٤-٨).

إن الضغط المرتفع يزيد من حجم الدم، وبالتالي يزيد من جهد الماء في البلازما في الشعيرات الدموية الكُبيبية بالرغم من وجود المواد المذابة، مقارنة بالراشح (جهد ماء أقل). لذلك ينتقل الماء من الدم إلى محفظة بومان وليس العكس.

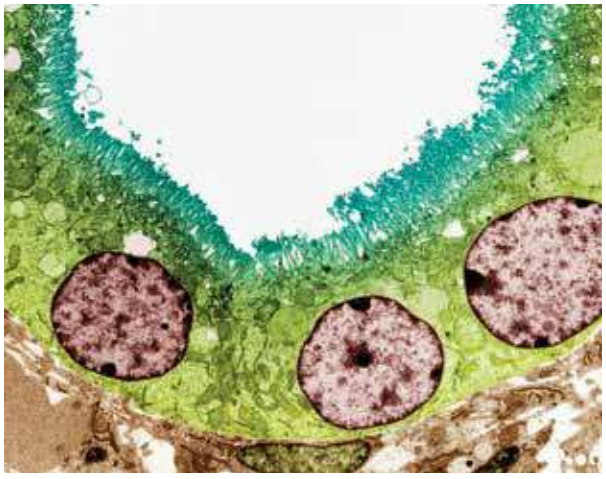
إعادة الامتصاص الانتقائي

من الضروري بقاء العديد من المواد الموجودة في راشح الكُبيبة في الجسم، لذا يعاد امتصاصها إلى الدم عند مرور السائل على طول النفرون. وحيث إنه يعاد امتصاص مواد معيّنة، لذا تسمّى العملية إعادة الامتصاص الانتقائي.

إعادة الامتصاص في الأُنيبيب الملتوي القريب

يتم معظم إعادة الامتصاص في الأُنيبيب الملتوي القريب. وتتكوّن بطانة هذا الجزء من النفرون من طبقة واحدة من خلايا طلائية مكعبة يتناسب تركيبها مع وظيفتها في إعادة الامتصاص باحتوائها على ما يأتي:

- العديد من الخملات الدقيقة Microvilli على سطح الغشاء المواجه لتجويف النفرون لزيادة مساحة سطح إعادة امتصاص المواد من الراشح الموجود في التجويف (الصورة ٤-٦).
- العديد من البروتينات الناقلة المشتركة في غشاء التجويف.
- الروابط المحكمة Tight junctions التي تربط الخلايا المتجاورة معًا بقوة بحيث لا يستطيع السائل المرور بين الخلايا (يجب أن تمر جميع المواد المعاد امتصاصها عبر الخلايا).

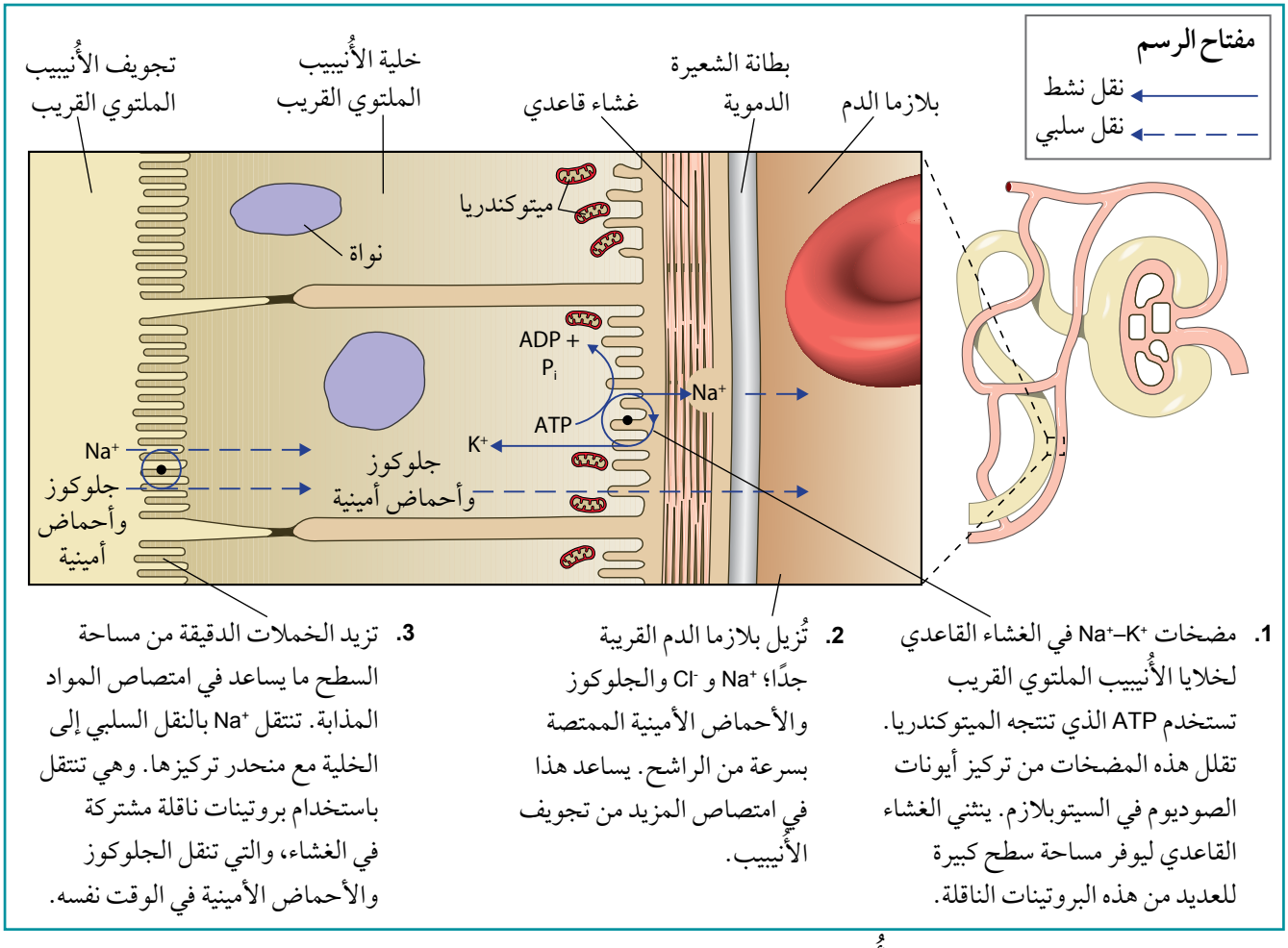


الصورة ٤-٦ صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) بألوان زائفة لخلايا طلائية مكعبة تكوّن بطانة الأنيبب الملتوي القريب (X 2200). يوجد العديد من الخملات الدقيقة على سطح خلايا التجويف توفر مساحة سطح كبيرة، والعديد من الميتوكندريا التي توفر الطاقة وذلك لإعادة الامتصاص الانتقائي للأيونات والجلوكوز والأحماض الأمينية.

- العديد من الميتوكندريا لتوفير الطاقة لبروتينات مضخة صوديوم – بوتاسيوم (Na^+–K^+) في الأغشية القاعدية للخلايا.

تكون الشعيرات الدموية قريبة جدًا من السطح الخارجي للأُنيبب. يأتي الدم في هذه الشعيرات مباشرة من الكُبيبة، لذا فهو يحتوي على بلازما أقل بكثير من المعتاد، وقد فقد الكثير من الماء والعديد من الأيونات والمواد المذابة الصغيرة الأخرى.

تكون الأغشية القاعدية للخلايا المبطنة للأُنيبيب الملتوي القريب هي الأقرب للشعيرات الدموية. تدفع مضخات صوديوم – بوتاسيوم في هذه الأغشية أيونات الصوديوم إلى خارج الخلايا (الشكل ٤–٩)، ليحملها الدم بعيدًا. يُخفض ضخّ أيونات الصوديوم إلى خارج الخلايا من تركيزها داخل الخلايا، لذا تنتشر هذه الأيونات في الراشح مع منحدر تركيزها عبر أغشية التجويف. إلا أن أيونات الصوديوم لا تنتشر بحرّية عبر الغشاء، بل يمكنها فقط الدخول بواسطة بروتينات ناقلة مشتركة Co-transporter خاصة في الغشاء. توجد عدة أنواع من البروتينات الناقلة المشتركة، ينقل كل منها أيونات الصوديوم ومادة أخرى معها، مثل الجلوكوز أو نوع معيّن من الأحماض الأمينية. وهذه هي طريقة النقل الغشائي نفسها التي تنقل السكروز إلى الخلايا المرافقة في نسيج اللحاء (الصف الحادي عشر، الوحدة السادسة).



1. مضخات Na^+–K^+ في الغشاء القاعدي لخلايا الأُنيبيب الملتوي القريب تستخدم ATP الذي تنتجه الميتوكندريا. تقلل هذه المضخات من تركيز أيونات الصوديوم في السيتوبلازم. ينثني الغشاء القاعدي ليوفر مساحة سطح كبيرة للعديد من هذه البروتينات الناقلة.
2. تُزيل بلازما الدم القريبة جدًا؛ Na^+ و Cl^- والجلوكوز والأحماض الأمينية الممتصة بسرعة من الراشح. يساعد هذا في امتصاص المزيد من تجويف الأُنيبيب.
3. تزيد الخملات الدقيقة من مساحة السطح ما يساعد في امتصاص المواد المذابة. تنتقل Na^+ بالنقل السلبي إلى الخلية مع منحدر تركيزها. وهي تنتقل باستخدام بروتينات ناقلة مشتركة في الغشاء، والتي تنقل الجلوكوز والأحماض الأمينية في الوقت نفسه.

الشكل ٤–٩ إعادة الامتصاص في الأُنيبيب الملتوي القريب. يحتوي الغشاء القاعدي بالإضافة إلى بروتينات مضخة Na^+–K^+ على العديد من البروتينات الناقلة للانتشار المسهّل للمواد المذابة مثل الجلوكوز والأحماض الأمينية من الخلايا إلى الدم.

النقل السلبي لأيونات الصوديوم إلى **داخل** الخلايا مع منحدر تركيزها يساعد على نقل جزيئات الجلوكوز بهذه الطريقة إلى الخلايا، وحتى بعكس منحدر التركيز للجلوكوز. وتُعدّ حركة الجلوكوز والأحماض الأمينية هذه مثالًا على النقل النشط الثانوي Secondary active transport، وذلك لأن الطاقة (على شكل ATP) تُستخدم في ضخ أيونات الصوديوم وليس نقل هذه المواد المذابة. وبمجرد دخول الجلوكوز إلى الخلية فإنه ينتشر مع منحدر تركيزه من خلال البروتين الناقل في الغشاء القاعدي إلى الدم.

ينتقل كل الجلوكوز في الراشح الكُبيبي من الأُنيبيب الملتوي القريب إلى الدم. ولا يبقى عادة أي جلوكوز في الراشح، لذا لا يوجد جلوكوز في البول. وعلى نحو مماثل، يُعاد امتصاص الأحماض الأمينية والفيتامينات والعديد من أيونات الصوديوم وأيونات الكلوريد (Cl^-) في الأُنيبيب الملتوي القريب.

تزيد إزالة هذه المواد المذابة من الراشح من جهد الماء فيه. **وتقلل** حركة هذه المواد المذابة إلى داخل الشعيرات الدموية من جهد الماء للدم، فيحدث منحدر جهد ماء شديد بين الراشح والدم، لينتقل الماء مع هذا المنحدر عبر الخلايا إلى الدم بالأسموزية. وينتقل كلٌّ من الماء والمواد المذابة المعاد امتصاصها ليعود كلاهما إلى الدورة الدموية.

تُقلِّل إعادة امتصاص الكثير من الماء والمواد المذابة من الراشح في الأُنيبيب الملتوي القريب إلى حد كبير من حجم الراشح المتبقي. وفي الإنسان البالغ يدخل إلى الأُنيبيب الملتوي القريب كل دقيقة 125 mL تقريبًا من الراشح، لكن 64% فقط منه تقريبًا ينتقل إلى التواء هنلي (الشكل ٤-٧).

أسئلة

٣ **أ.** من أين يأتي الدم في الشعيرات الدموية المحيطة بالأُنيبيب الملتوي القريب؟

ب. ما المواد المذابة التي ستوجد في هذا الدم ولا توجد في الراشح الكُبيبي؟

ج. كيف يمكن أن تساعد هذه المواد المذابة في إعادة امتصاص الماء من الأُنيبيب الملتوي القريب؟

د. اذكر اسم العملية التي يتم فيها إعادة امتصاص الماء.

٤ **أ.** احسب حجم الراشح الذي يدخل التواءات هنلي من من الأُنيبيبات الملتوية القريبة كل دقيقة.

ب. اشرح كيف أن كلًا من الميزات الآتية لخلايا الأُنيبيبات الملتوية القريبة عملت على مناسبة تركيبها لإعادة امتصاص المواد المذابة:

١. وجود الخملات الدقيقة.

٢. وجود العديد من الميتوكندريا.

٣. طي الأغشية القاعدية.

إعادة الامتصاص في التواء هنلي والقناة الجامعة

لاحظ في الشكل ٤-٦ أن التواء هنلي يوازي القناة الجامعة في النخاع. وظيفة هذا الالتواء تكوين تركيز عالٍ جدًا من أيونات الصوديوم وأيونات الكلوريد في السائل النسيجي في النخاع. ويتحقق هذا جزئيًا عن طريق النقل النشط بواسطة خلايا المنطقة السميكة للطرف الصاعد لكل التواء (الصورة ٤-٤ و الشكل ٤-٥ب). يمكن أن يبلغ تركيز المذاب في النخاع في كليتَي الإنسان أربعة أضعاف تركيزه في بلازما الدم. وستلاحظ أن تكوين سائل نسيجي في النخاع يساعد على إعادة امتصاص الكثير من الماء من السائل في القناة الجامعة أثناء مروره عبر النخاع. ونتيجة لذلك، تحتفظ الكليتان بالماء في الجسم بدل إفرازه في البول، ما يساعد على منع الجفاف Dehydration.

مصطلحات علمية

الهرمون المانع لإدرار البول Antidiuretic hormone (ADH): هرمون تفرزه الغدة النخامية الخلفية. وهو يزيد إعادة امتصاص الماء في الكلى ويقلل بالتالي من فقد الماء في البول.

يستمر مرور الراشح بعد مغادرته التواء هنلي في الأُنيبيب الملتوي البعيد إلى القناة الجامعة، والتي تمتد في النخاع. ويمر السائل مرة أخرى عبر المناطق التي يكون فيها تركيز المذاب في السائل النسيجي مرتفعًا جدًا وجهد الماء منخفضًا جدًا. لذا يمكن أن يخرج الماء من القناة الجامعة بالأسموزية، إلى أن يساوي جهد الماء للبول جهد الماء للسائل النسيجي في النخاع، والذي قد يكون أكبر بكثير من جهد الماء للدم. ويتحكم **الهرمون المانع لإدرار البول Antidiuretic hormone (ADH)** في الدرجة التي يحدث بها ذلك.

ترتبط قدرة بعض الثدييات الصغيرة مثل القوارض، على إنتاج بول شديد التركيز بالسماكة النسبية للنخاع في الكُلية. يبلغ التركيز الأقصى للبول الذي يمكن أن يكوّنه الإنسان أربع مرات تركيز بلازما الدم. يمكن للقوارض الصحراوية مثل الجربوع والجرذ الكنغري تكوين بول يزيد تركيزه 20 مرة عن تركيز بلازما الدم. ويعود ذلك لكون النخاع سميكًا نسبيًا ولوجود طيات عميقة في الخلايا التي تبطن الطرف الصاعد من التواءات هنلي. كما توجد العديد من مضخات Na^+-K^+، ويحتوي السيتوبلازم على العديد من الميتوكندريا، وفي كل منها العديد من الأعراف. وهذا يعني قدرة الخلايا على إنتاج الكثير من ATP لتوفير الطاقة اللازمة لضخ أيونات الصوديوم إلى السائل النسيجي.

سؤال

٥ ناقش مع زملائك كيف تعيد كليتا الإنسان امتصاص الكثير من الماء من الراشح بحيث تكونان قادرتَين على تكوين البول بتركيز يبلغ أربعة أضعاف تركيز بلازما الدم. ارجع إلى كتاب الطالب للصف الحادي عشر، الوحدة الخامسة، للتأكد من استخدامك لمصطلح جهد الماء بشكل صحيح.

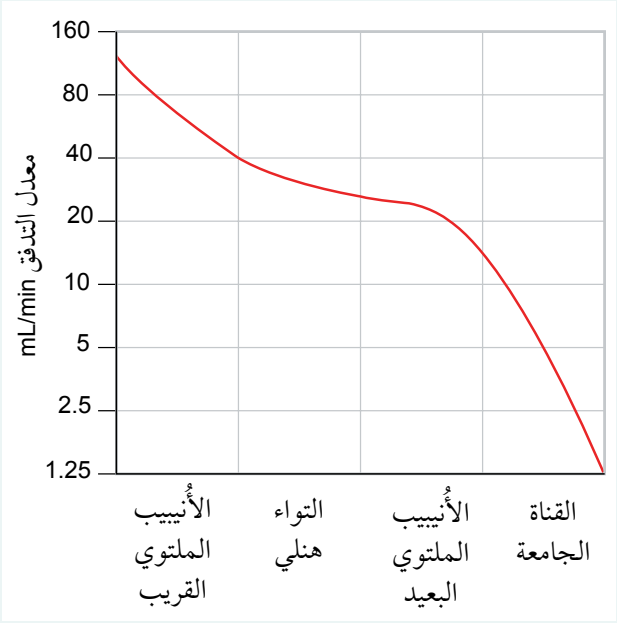
إعادة الامتصاص في الأُنيبيب الملتوي البعيد والقناة الجامعة

الجزء الأول من وظائف الأُنيبيب الملتوي البعيد هو نفسه الذي في الطرف الصاعد من التواء هنلي. والجزء الثاني من وظائف الأُنيبيب الملتوي البعيد هو نفسه الذي في القناة الجامعة.

تضخ أيونات الصوديوم من السائل في الأُنيبيب الملتوي البعيد والقناة الجامعة بالنقل النشط إلى السائل النسيجي، لتنتقل بعد ذلك إلى الدم. ولكن أيونات البوتاسيوم تنقل بالنقل النشط **إلى** الأُنيبيب. يمكن أن يتغير المعدل الذي ينتقل به هذان الأيونان من وإلى السائل في النفرون، للمساعدة في تنظيم تركيز هذَين الأيونَين في الدم. أيونات الصوديوم والبوتاسيوم مهمة في توصيل موجات النبضات الكهربائية في محاور الخلايا العصبية (انظر الوحدة الخامسة، الموضوع ٥-٢، التواصل العصبي).

أسئلة

٦ **أ.** يبيّن الشكل ٤-١٠ المعدل النسبي الذي يتدفق فيه السائل عبر النفرونات والقنوات الجامعة. إذا كان الماء يتدفق في أنبوبة غير منفذة مثل خرطوم المياه، فإنه سيتدفق إلى الخارج من الطرف البعيد بمعدل تدفقه إلى الداخل. ومع ذلك، من الواضح أن هذا لا يحدث في النفرون. فكّر فيما يحدث في كل منطقة، واقترح تفسيرًا لشكل التمثيل البياني.



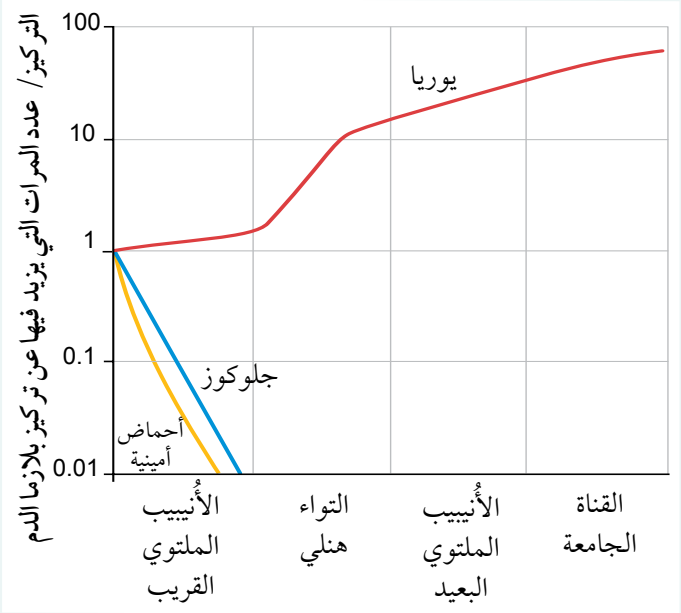
الشكل ٤-١٠ معدلات التدفق في النفرونات والقنوات الجامعة.

ب. يبيّن الشكل ٤-١١ التراكيز النسبية لثلاث مواد في كل جزء من النفرون والقنوات الجامعة. اشرح أشكال المنحنيات لكل من:

١. الجلوكوز.

٢. الأحماض الأمينية.

٣. اليوريا.



الشكل ٤-١١ التراكيز النسبية لثلاث مواد في أجزاء مختلفة من النفرونات والقنوات الجامعة.

٤-٣ التحكم في المحتوى المائي

مستقبلات أسموزية و تحت المهاد و ADH

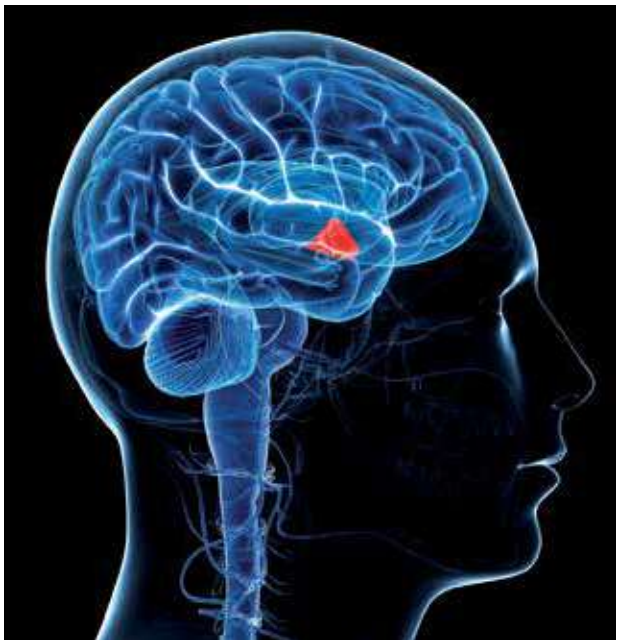
التنظيم الأسموزي Osmoregulation هو التحكم بجهد الماء لسوائل الجسم. وهذا التنظيم جزء مهم في الاتزان الداخلي، ويشمل تحت المهاد Hypothalamus والغدة النخامية الخلفية Posterior pituitary gland والكليتَين (الشكل ٤-١٢).

تتم مراقبة جهد الماء للدم باستمرار بواسطة خلايا عصبية حسية متخصصة في تحت المهاد تسمى **مُستقبلات أسموزية Osmoreceptors**. عندما تتحسس هذه الخلايا **انخفاضًا** في جهد الماء للدم دون النقطة المرجعية، ترسل نبضات عصبية على طول الخلايا العصبية لتنقلها إلى حيث تنتهي هذه الخلايا في الغدة النخامية الخلفية (الشكل ٤-١٣). تحفز هذه الموجات إطلاق (ADH)، وهو هرمون ببتيدي يتكوّن من تسعة أحماض أمينية. تدخل جزيئات ADH الدم في الشعيرات الدموية وتُنقل إلى جميع أنحاء الجسم. يقلل ADH من فقد الماء عن طريق البول من خلال إعادة امتصاص الكلى لأكبر قدر ممكن من الماء. تعني كلمة «إدرار البول» تكوين بول مخفف. ويأتي اسم الهرمون المانع لإدرار البول من كونه يوقف تكوين البول المخفف عن طريق تحفيز إعادة امتصاص الماء.

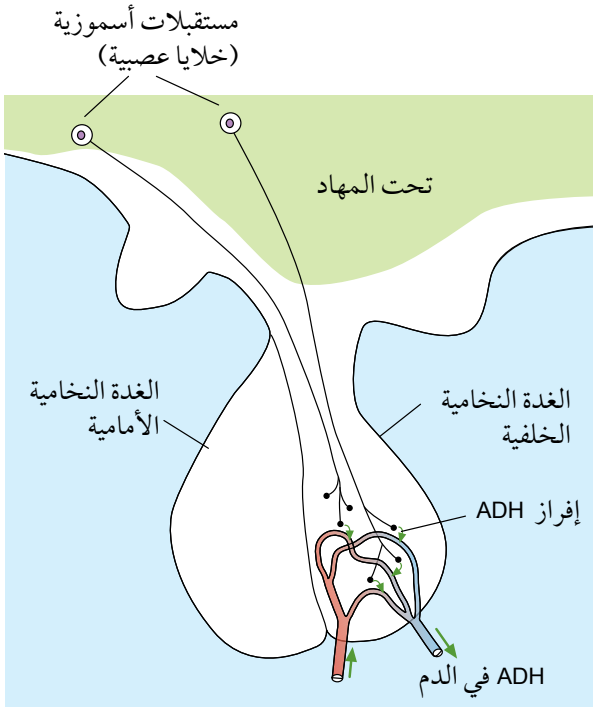
مصطلحات علمية

التنظيم الأسموزي Osmoregulation: التحكم في جهد الماء للدم والسائل النسيجي عن طريق التحكم في المحتوى المائي و/ أو تركيز الأيونات، بخاصة أيونات الصوديوم.

مُستقبل أسموزي Osmoreceptor: نوع من المستقبل يتحسّس التغيّرات في جهد الماء للدم.



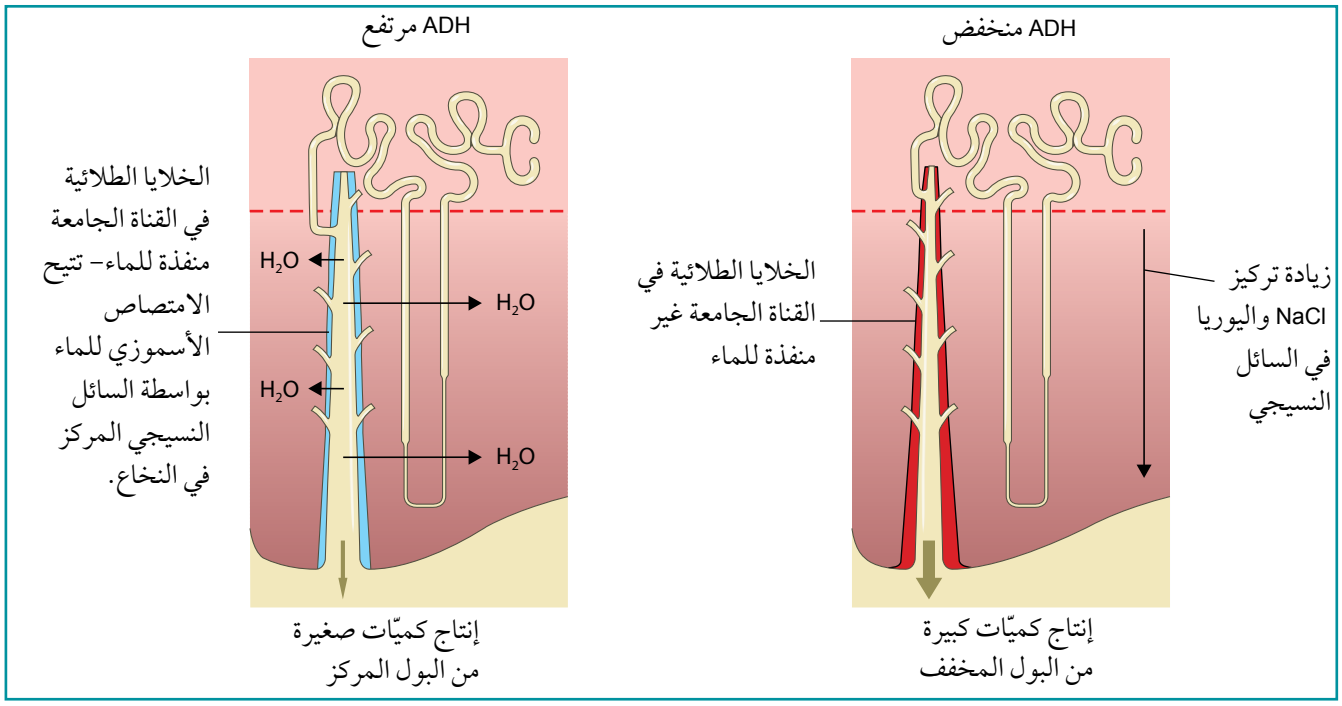
الشكل ٤-١٢ موضع منطقة تحت المهاد في الدماغ، كما تُشاهد باللون الأحمر. توجد الغدة النخامية أسفل تحت المهاد مباشرة.



الشكل ٤-١٣ تنتج الخلايا العصبية في تحت المهاد هرمون ADH، ليطلق في الدم حيث تنتهي الخلايا العصبية في الغدة النخامية الخلفية.

كيف يؤثر الهرمون المانع لإدرار البول على الكليتَين

درست سابقًا أنه يُعاد امتصاص الماء بالأسموزية من الراشح في النفرون، عند مروره عبر القنوات الجامعة. الخلايا المستهدفة من (ADH) هي خلايا القناة الجامعة. يؤثر (ADH) في أغشية خلايا تجويف القناة الجامعة، ويجعلها أكثر نفاذية للماء من المعتاد (الشكل ٤-١٤).

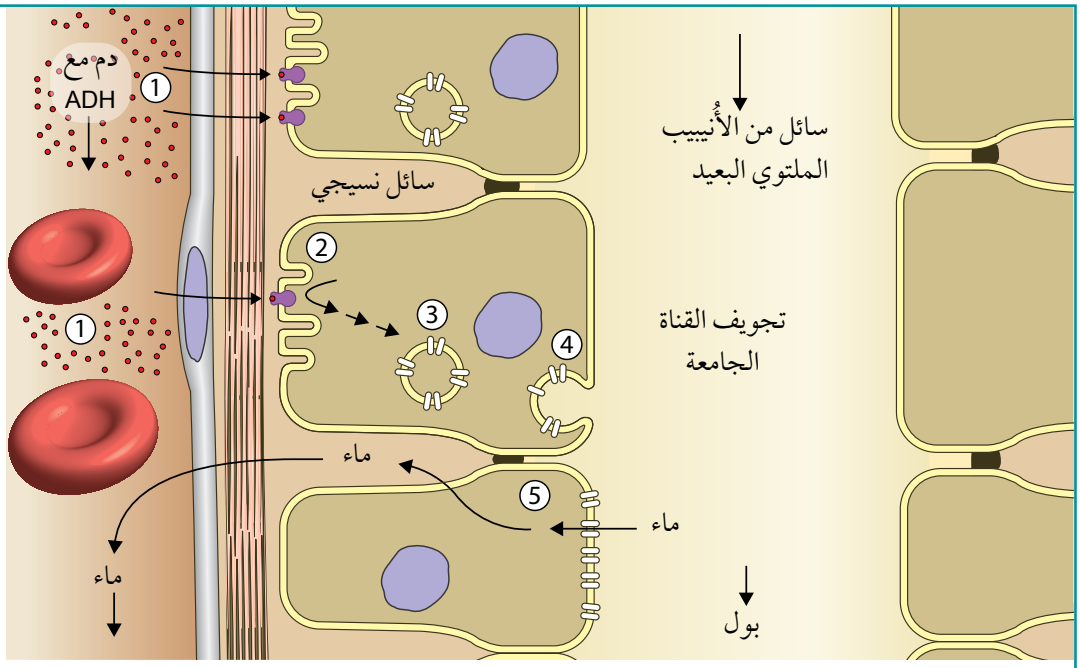


الشكل ٤-١٤ تأثير (ADH) على إعادة امتصاص الماء من البول في القنوات الجامعة.

ينتج هذا التغير في النفاذية من زيادة عدد القنوات المنفذة للماء المعروفة باسم الأكوابورينات Aquaporins (قنوات بروتينية ممتدة عبر غشاء سطح الخلية تسمح بحركة الماء عبرها) في أغشية خلايا تجويف القناة الجامعة. تحتوي هذه الخلايا على حويصلات بها العديد من الأكوابورينات في أغشيتها (الشكل ٤-١٥).

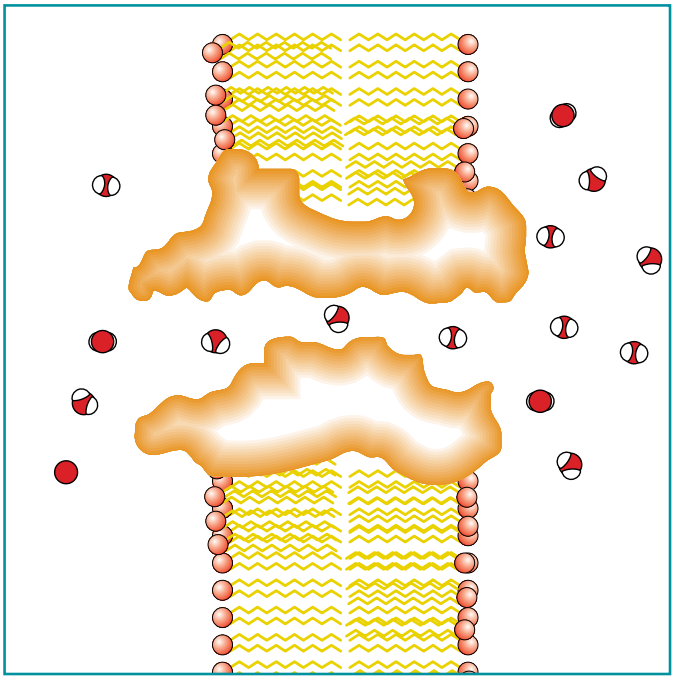
وعند تدفق السائل عبر القناة الجامعة، تنتقل جزيئات الماء عبر الأكوابورينات (الشكل ٤-١٦) من داخل الأُنيبيب إلى السائل النسيجي في الخارج. ويحدث هذا لأن جهد الماء للسائل النسيجي في النخاع منخفض جدًّا، وجهد الماء للسائل في القنوات الجامعة مرتفع جدًّا. يفقد السائل في القناة الجامعة الماء ويصبح أكثر تركيزًا. ويتسبب إفراز (ADH) في زيادة إعادة امتصاص الماء إلى الدم. وستتدفق كميّة صغيرة من البول المركز من الكليتَين عبر الحالبَين إلى المثانة (الشكل ٤-١٧).

ماذا يحدث عندما يوجد في الجسم كمية من الماء تفوق حاجته، وذلك عند شرب كمية كبيرة من الماء أو مشروبه المفضل مثلًا؟ عندما توجد زيادة في جهد الماء للدم، تصبح مستقبلات أسموزية في تحت المهاد غير قابلة للتنبيه، وتتوقف الخلايا العصبية في الغدة النخامية الخلفية عن إفراز (ADH). ومع عدم وجود تحفيز من (ADH)، تنتقل الأكوابورينات بعيدًا عن غشاء سطح خلايا القناة الجامعة، لتعود إلى السيتوبلازم كجزء من الحويصلات (عكس ما يحدث في ٣ و ٤ في الشكل ٤-١٥). وتصبح خلايا القناة الجامعة غير منفذة للماء. يتدفق السائل عبر القناة الجامعة من دون فقد أي ماء، لذا تتجمع كمية كبيرة من البول المخفّف في حوض الكُلية وتتدفّق إلى الحالب ثم إلى المثانة.

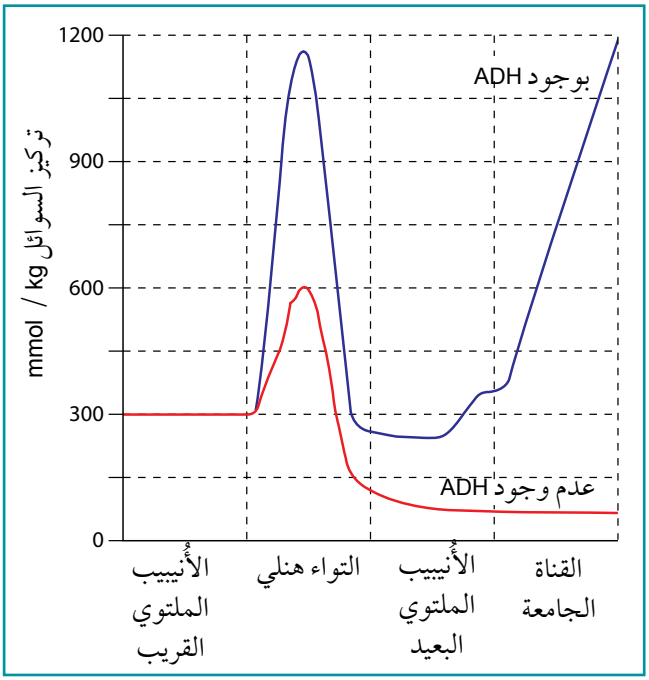


1. يرتبط ADH مع المستقبلات في غشاء سطح الخلية للخلايا المبطنة للقناة الجامعة.
2. ينشّط هذا الأمر سلسلة من التفاعلات التي يتحكم فيها الإنزيم وتنتهي بإنتاج إنزيم فوسفوريليز نشط.
3. يسبب الفوسفوريليز انتقال حويصلات محاطة بغشاء تحتوي على الأكوابورينات إلى غشاء سطح الخلية.
4. تندمج الحويصلات مع غشاء سطح الخلية.
5. يمكن أن ينتقل الماء الآن بحرّية عبر أكوابورينات أخرى (غير مرئية في الشكل) من الخلايا مع منحدر جهد الماء إلى السائل النسيجي المركّز وبلازما الدم في نخاع الكُلية.

الشكل ٤-١٥ كيف يزيد ADH إعادة امتصاص الماء في القناة الجامعة



الشكل ٤-١٦ تسمح الأكوابورينات للماء بالانتشار عبر الأغشية، كالتي في الخلايا المبطنة للقنوات الجامعة.



الشكل ٤-١٧ تركيز السوائل في مناطق مختلفة من النفرونات والقنوات الجامعة للإنسان، بوجود ADH وعدم وجوده.

ويميل الإنسان في ضوء هذه الظروف إلى إنتاج كميّة كبيرة من البول المخفف، ليفقد كثيرًا من الماء الذي شربه، للحفاظ على ثبات جهد الماء للدم.

لا تستجيب خلايا القناة الجامعة فورًا لانخفاض إفراز ADH من الغدة النخامية الخلفية، لأن تفكك ADH الموجود في الدم يتطلب بعض الوقت، إذ إن نصف الكميّة تتفكّك كل 15-20 دقيقة تقريبًا. ولكن، حين يتوقف وصول ADH إلى خلايا القناة الجامعة، تحتاج الأكوابورينات 10-15 دقيقة فقط لتنتقل من غشاء سطح الخلية إلى السيتوبلازم ريثما تتمّ الحاجة إليها مرة أخرى.

أسئلة

(٧) عثر على الأكوابورينات في أغشية سطح الخلية للعديد من الخلايا النباتية والخلايا الحيوانية. اشرح سبب كون الأكوابورينات شائعة جدًا.

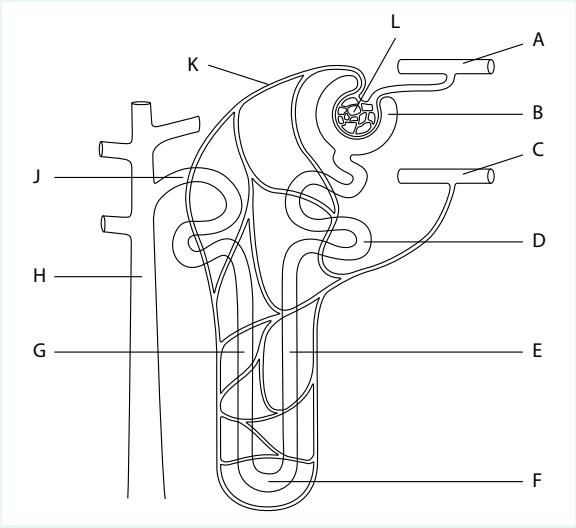
(٨) **أ.** استخدم مثال المحتوى المائي للدم لشرح المصطلحَين: **النقطة المرجعية، والاتزان الداخلي.**

ب. كوّن رسمًا تخطيطيًا يبيّن كيف يتم التحكم بجهد الماء للدم، وحدد على الرسم ما يأتي: المستقبلات، المدخلات، المستجيب، الناتج. وضّح كيف يتم تنظيم الأجزاء المختلفة من الجسم، وبيّن دور التغذية الراجعة السلبية في ذلك.

ج. صف المشكلات التي يمكن أن تحدث إذا لم يتم التحكم بجهد الماء لبلازما الدم، ولم يتم الحفاظ عليه ضمن حدود معيّنة.

(٩) **أ.** طابق الأحرف الواردة في الرسم التخطيطي (الشكل ٤-١٨) مع العبارات الآتية:

أ. ١. موضع الترشيح الفائق.
٢. موضع إعادة الامتصاص الانتقائي.
٣. وعاء دموي به التركيز الأعلى من اليوريا.
٤. منطقة جهد الماء الأقل.
٥. موضع عمل ADH.



الشكل ٤ - ١٨ نفرون الكُلية والأوعية الدموية المرتبطة به.

ب. اشرح الميزة الوظيفية للترتيب الموازي للتراكيب E, G, H في نخاع الكُلية.

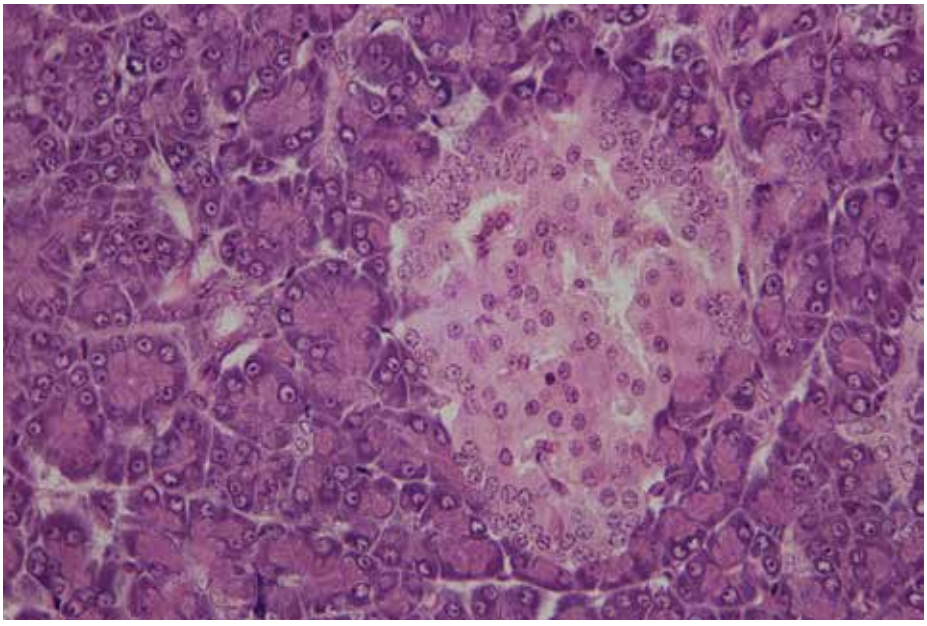
ج. استفد من الشكل ٤-١٧ لوصف وشرح تراكيز السائل في الأُنيبيب الملتوي القريب وفي القناة الجامعة.

د. ١. اشرح تأثير ADH على العضو المستهدف.
٢. شرب الكحول يؤثر على إفراز ADH، اقترح خطر ذلك على الجسم.

٤-٤ التحكم في تركيز جلوكوز الدم

تُنقل الكربوهيدرات في مجرى دم الإنسان على شكل جلوكوز ذائب في بلازما الدم. يحتوي كل 100 mL من الدم في الإنسان الطبيعي عادة ما بين 80 mg و 120 mg من الجلوكوز (4.4–6.7 mmol/L). إذا انخفض التركيز عن ذلك، فربما لا يتوفر في الخلايا ما يكفي من الجلوكوز لعملية التنفس، وقد تكون غير قادرة على أداء وظائفها بشكل طبيعي. وهذا مهم بشكل خاص للخلايا التي تعتمد على الجلوكوز فقط في تنفسها مثل خلايا الدماغ. يمكن أن تسبب التراكيز المرتفعة جدًا من الجلوكوز في الدم أيضًا مشكلات رئيسية تؤثر سلبًا في سلوك الخلايا الطبيعي. ويعمل هرمونان يفرزهما نسيج الغدة الصماء في البنكرياس على التحكم في تركيز جلوكوز الدم لتحقيق الاتزان الداخلي للجلوكوز. يحتوي هذا النسيج على مجموعات من الخلايا تعرف باسم **جُزيرات لانجرهانس Islets of langerhans** (الصورة ٤-٧). تحتوي هذه الجُزيرات على نوعَين من الخلايا:

- خلايا ألفا (α) وتفرز هرمون **الجلوكاجون Glucagon**.
- خلايا بيتا (β) وتفرز هرمون **الإنسولين Insulin**.



الصورة ٤-٧ صورة مجهرية ضوئية لجُزيرة لانجرهانس (باللون الوردي) محاطة بنسيج داكن الصبغة تفرز إنزيمات تعمل في الأمعاء الدقيقة. توجد الجُزيرات مثل هذه في جميع أنحاء البنكرياس وتشكل بمجموعها غدة البنكرياس الصماء (360×).

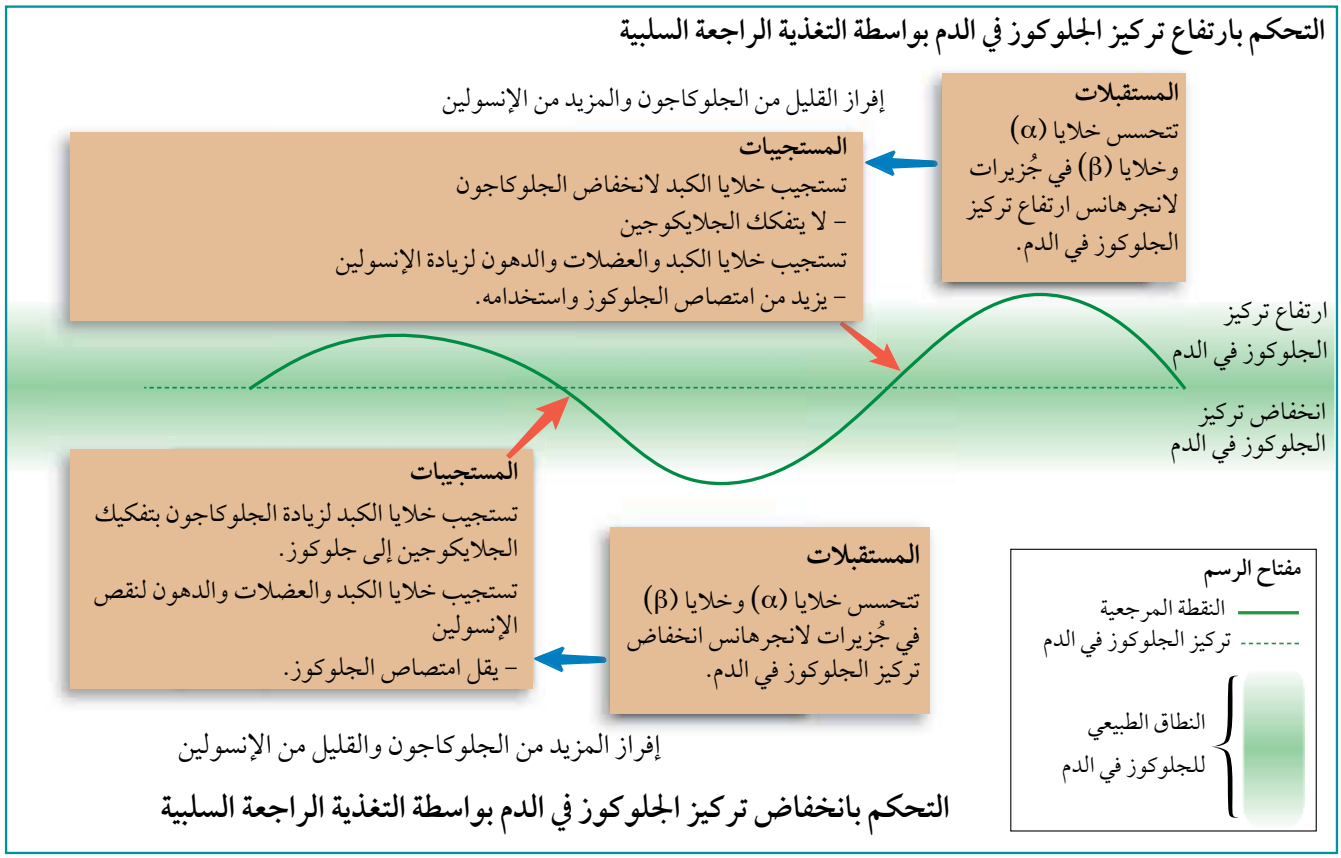
تعمل خلايا (α) و (β) كمستقبلات ومركز تحكم في آلية الاتزان الداخلي هذه. وينظم الهرمونان الجلوكاجون والإنسولين عمل المستجيبات. يبيّن الشكل ٤-١٩ كيف يتغير تركيز جلوكوز الدم الطبيعي ضمن حدود حول النقطة المرجعية reference point، والتي يشار إليها بالخط المتقطع.

مصطلحات علمية

جُزيرات لانجرهانس Islets of langerhans: مجموعة من الخلايا في البنكرياس تفرز الجلوكاجون والإنسولين.

الجلوكاجون Glucagon: هرمون ببتيدي صغير تفرزه خلايا ألفا في جُزيرات لانجرهانس في البنكرياس ليزيد من تركيز الجلوكوز في الدم.

الإنسولين Insulin: هرمون ببتيدي صغير تفرزه خلايا بيتا في جُزيرات لانجرهانس في البنكرياس ليخفض من تركيز الجلوكوز في الدم.



الشكل ٤-١٩ آلية تنظيم تركيز الجلوكوز في الدم (يقرأ الشكل من اليمين إلى اليسار).

زيادة تركيز الجلوكوز في الدم

بعد تناول وجبة تحتوي على الكربوهيدرات، يُمتص الجلوكوز من الطعام الذي تم هضمه من الأمعاء الدقيقة، ويمر إلى الدم. وتتحسس خلايا (α) و (β) الزيادة في تركيز الجلوكوز عند تدفق الدم عبر البنكرياس. تستجيب خلايا (α) بإيقاف إفراز الجلوكاجون، في حين تستجيب خلايا (β) بإفراز الإنسولين إلى بلازما الدم، لينتقل إلى جميع أنحاء الجسم.

الإنسولين بروتين، ولا يستطيع المرور عبر أغشية سطح الخلية لتحفيز الآليات داخل الخلية مباشرة. وبدلًا من ذلك، يرتبط الإنسولين بمستقبل في غشاء سطح الخلية، ويؤثر في الخلية بشكل غير مباشر من خلال عمل المراسيل داخل الخلوية (كما درست في الصف الحادي عشر).

توجد مستقبلات خاصة بالإنسولين في العديد من خلايا الأنسجة (على سبيل المثال، الخلايا في الكبد، والأنسجة العضلية، والأنسجة الدهنية Adipose). يُحفز الإنسولين الخلايا التي توجد فيها هذه المستقبلات لزيادة معدل امتصاصها للجلوكوز من الدم وتحويله إلى جلايكوجين. كما يزيد الإنسولين أيضًا من استخدام الجلوكوز في التنفس، فينخفض بذلك تركيز الجلوكوز في الدم.

يدخل الجلوكوز الخلايا بالانتشار المسهل فقط، عبر بروتينات ناقل الجلوكوز GLUT (Glucose transporters)، وهي عدة أنواع. تحتوي خلايا العضلات على نوع يسمّى GLUT4. وتبقى عادة بروتينات GLUT في السيتوبلازم بالطريقة نفسها التي تبقى فيها الأكوابورينات في خلايا القناة الجامعة. عندما ترتبط جزيئات الإنسولين بالمستقبلات على الخلايا العضلية، تنتقل الحويصلات مع بروتينات GLUT4 إلى غشاء سطح الخلية، وتندمج معه. تسهل بروتينات GLUT4 حركة الجلوكوز إلى داخل الخلية (الشكل ٤-٢٠). تحتوي خلايا الدماغ على بروتينات GLUT1، وتحتوي خلايا

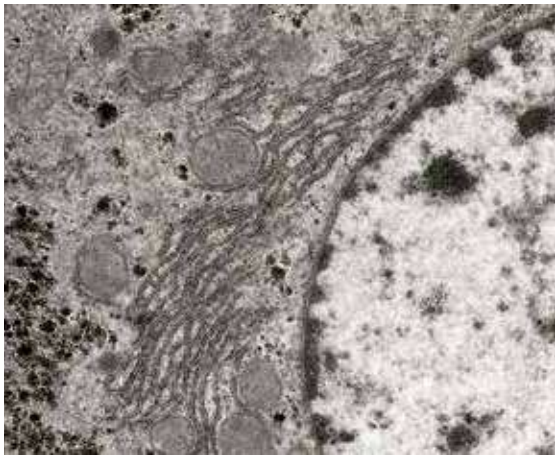
الكبد على بروتينات GLUT2. تبقى بروتينات GLUT1 و GLUT2 دائمًا في غشاء سطح الخلية، ولا يتغير توزيعها بفعل الإنسولين.

يحفز الإنسولين تنشيط إنزيم جلوكوكاينيز، والذي يعمل على إضافة الفوسفات إلى الجلوكوز، والذي يُحتجز داخل الخلايا، لأن الجلوكوز المفسفر لا يستطيع المرور عبر بروتينات نقل الجلوكوز في أغشية سطح الخلية.

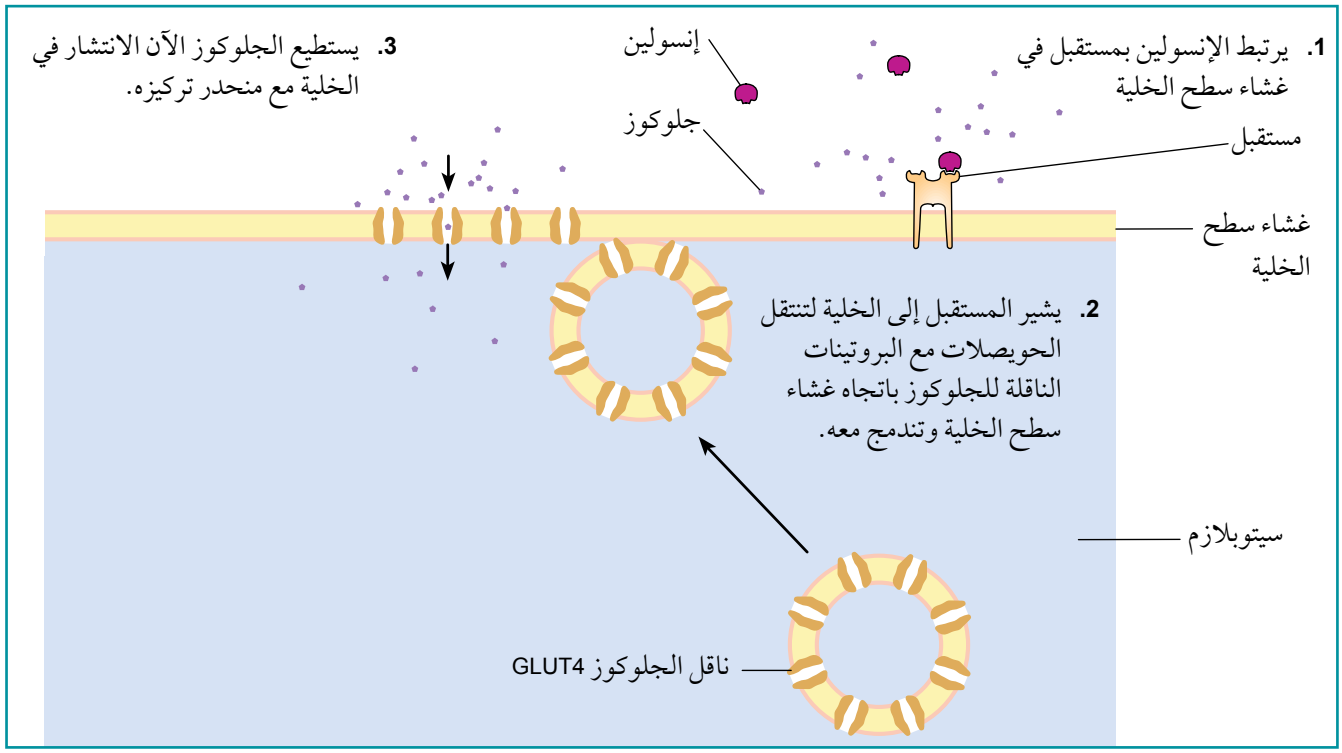
يمكن تحويل الجلوكوز إلى جلايكوجين عديد التسكر، وهو جزيء كبير غير قابل للذوبان يتكوّن من عدة وحدات جلوكوز مرتبطة معًا بروابط جلايكوسيدية 1,4 مع نقاط تفرّع 1,6. الجلايكوجين مخزن للطاقة قصير الأمد يوجد في خلايا الكبد والعضلات، ويتحوّل بسهولة مرة أخرى إلى جلوكوز. يحفز الإنسولين تنشيط إنزيمَين، فوسفوفركتوكاينيز وجلايكوجين سينثيز، واللذَين معًا يحفزان إضافة جزيئات جلوكوز للجلايكوجين – هذه العملية تعرف باسم **تكوّن الجلايكوجين Glycogenesis**. عندما يفرز الإنسولين تحدث زيادة في حجم (قياس) حبيبات الجلايكوجين داخل خلايا الكبد والعضلات (الصورة ٤–٨).

مصطلحات علمية

تكوّن الجلايكوجين Glycogenesis: بناء الجلايكوجين بإضافة مونمرات الجلوكوز.



الصورة ٤–٨ صورة مجهرية إلكترونية (نافذ) لجزء من خلية كبد (x 22000). تمثل البقع الداكنة إلى اليسار حبيبات جلايكوجين في السيتوبلازم. يمكن رؤية الميتوكندريا أيضًا.



الشكل ٤–٢٠ يزيد الإنسولين نفاذية خلايا العضلات للجلوكوز بتحفيز حركة الحويصلات مع GLUT4 إلى غشاء سطح الخلية.

سؤال

(١٠) حدد التراكيب المَرئية في خلية الكبد المبيّنة في الصورة ٤–٨. اقترح أدوار هذه التراكيب في خلايا الكبد.

انخفاض تركيز الجلوكوز في الدم

عندما تتحسس خلايا ألفا (α) وخلايا بيتا (β) في البنكرياس انخفاضًا في تركيز الجلوكوز في الدم، تستجيب خلايا ألفا (α) بإفراز الجلوكاجون، في حين تستجيب خلايا بيتا (β) بإيقاف إفراز الإنسولين. يبيّن الشكل ٤-٢١ مراحل التأشير الخلوي التي تلي وصول الجلوكاجون إلى سطح خلايا الكبد.

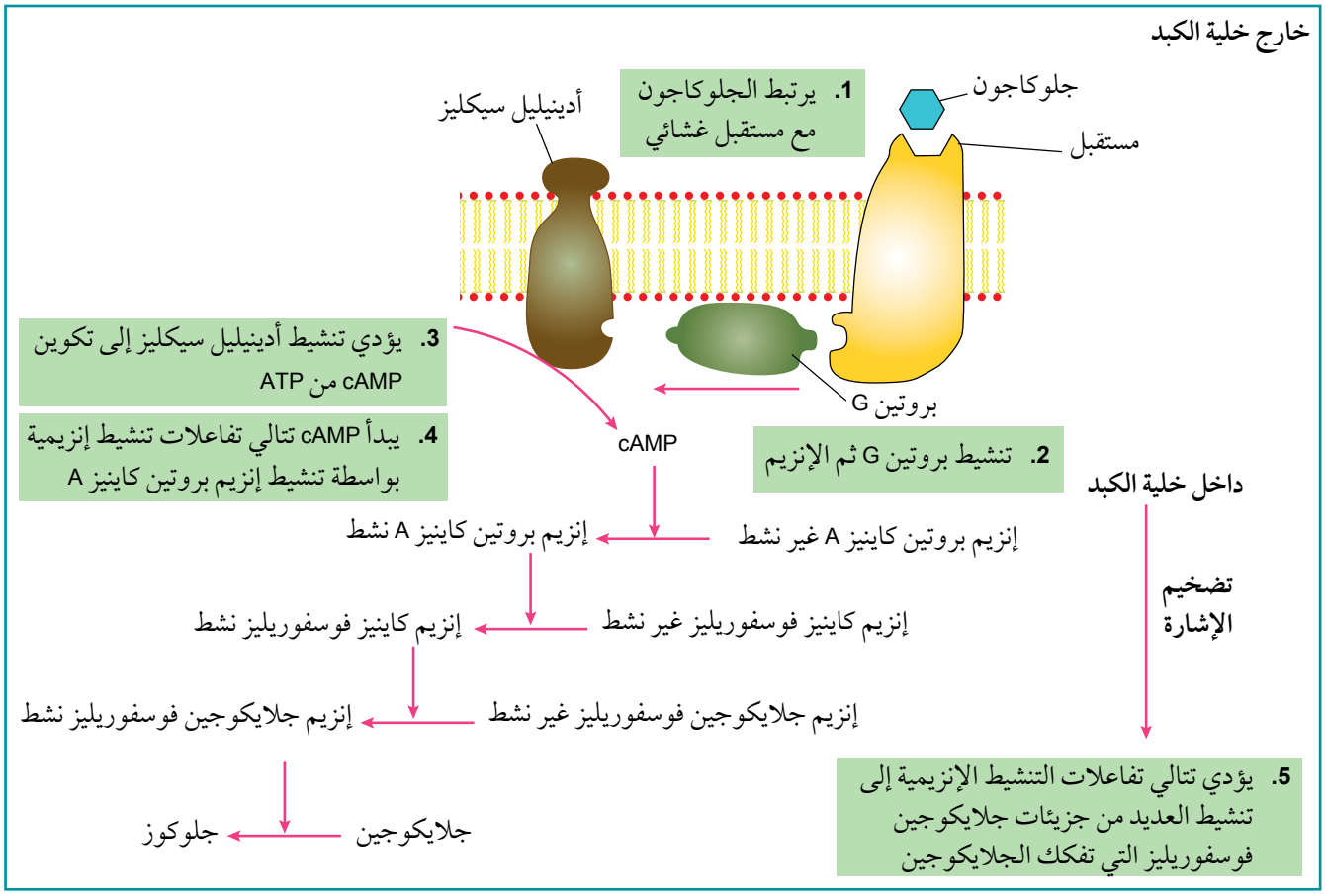
يقلل انخفاض تركيز الإنسولين في الدم من معدل امتصاص واستخدام الكبد والخلايا العضلية للجلوكوز. يستمر الامتصاص لكن بمعدل أقل. يرتبط الجلوكاجون بمستقبلات محددة مختلفة في أغشية سطح الخلية لخلايا الكبد. لا توجد مستقبلات للجلوكاجون على سطح خلايا العضلات. وطريقة التأشير الخلوي في الاستجابة للجلوكاجون هي نفسها التي وصفت سابقًا. يحدث التحويل بعد ارتباط الجلوكاجون بمستقبله. ويسبب الارتباط تغيّرًا في شكل الجزيئات في البروتين المستقبِل الذي ينشط بروتين G، والذي بدوره ينشط إنزيم **أدينيليل سيكليز Adenylyl cyclase**، وهو جزء من غشاء سطح الخلية مثل المستقبل. يحفز الأدينيليل سيكليز تحويل ATP إلى **AMP الحلقي (cAMP) Cyclic AMP**، وهو مرسال ثان (الشكل ٤-٢١). ترتبط جزيئات cAMP مع إنزيمات **بروتين كاينيز A Protein kinase A** في السيتوبلازم وتنشطها.

مصطلحات علمية

أدينيليل سيكليز Adenylyl cyclase: إنزيم يحفز تكوين المرسال الثاني c-AMP.

AMP الحلقي (cAMP) Cyclic AMP: المرسال الثاني في مسار التأشير الخلوي.

بروتين كاينيز A Protein kinase A: إنزيم ينشطه AMP الحلقي، وعندما ينشط يضيف مجموعات فوسفات إلى بروتينات أخرى، بما فيها كاينيز فوسفوريليز لتنشيطها.



الشكل ٤-٢١ يحفز الجلوكاجون تنشيط إنزيمات جلايكوجين فوسفوريليز في خلايا الكبد من خلال عمل cAMP وتتالي الإنزيمات التي تؤدي إلى تضخيم الإشارة الأصلية التي تصل إلى سطح الخلية.

وتنشط إنزيمات بروتين كاينيز A بدورها إنزيمات **كاينيز فوسفوريليز Phosphorylase kinase** بإضافة مجموعات فوسفات إليها. وينشط كاينيز فوسفوريليز جلايكوجين فوسفوريليز من خلال إضافة مجموعات فوسفات إليها. ويمثل هذا تتالي إنزيمات يؤدي إلى تضخيم الإشارة الخلوية الأصلية من الجلوكاجون.

يحفز جلايكوجين فوسفوريليز تفكك الجلايكوجين إلى جلوكوز في عملية تعرف باسم **تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis**، وذلك بإزالة مونمرات جلوكوز من «النهايات» العديدة لكل جزيء جلايكوجين. يزداد تركيز الجلوكوز داخل الخلية، وتنتشر جزيئات الجلوكوز إلى الخارج عبر البروتينات الناقلة إلى الدم. يحفز الجلوكاجون أيضًا تكوّن الجلوكوز من الأحماض الأمينية والأحماض الدهنية والجليسرول والبيروفات واللاكتات في عملية تعرف باسم **استحداث الجلوكوز Gluconeogenesis** والتي تعني تكوّن جزيء جلوكوز «جديد».

يطلق الكبد نتيجة لإفراز الجلوكاجون كميات إضافية من الجلوكوز لزيادة تركيزه في الدم.

يعمل الجلوكاجون والإنسولين معًا كجزء من التغذية الراجعة السلبية، أيّ انحراف في تركيز الجلوكوز عن النقطة المرجعية يحفّز إجراءات المستجيبات لإعادته إلى مستواه الطبيعي.

لا تبقى تراكيز جلوكوز الدم ثابتة مطلقًا حتى لدى أكثر الأشخاص صحة. ويعود أحد أسباب ذلك إلى التأخير الزمني الحتمي بين التغير في تركيز جلوكوز الدم وبدء إجراءات تصحيحه. يؤدي التأخير الزمني في أنظمة التحكم إلى التذبذب، حيث لا تبقى الأشياء ثابتة تمامًا، إذ ترتفع قليلًا أحيانًا فوق المستوى «المطلوب» وتنخفض عنه قليلًا أحيانًا أخرى، كما هو مبيّن في الشكل ٤-١٩.

يزيد هرمون الأدرينالين أيضًا من تركيز جلوكوز الدم. وهو يقوم بذلك عن طريق الارتباط بمستقبلات مختلفة على سطح خلايا الكبد الأمر الذي ينشط تتالي التنشيط الأنزيمي نفسه كما في التنشيط بواسطة الجلوكاجون (الشكل ٤-٢١). وبالتالي، تتحقق النتيجة النهائية نفسها وهي تفكّك الجلايكوجين. يحفز الأدرينالين أيضًا تفكّك الجلايكوجين المختزن في العضلات أثناء ممارسة التمارين الرياضية. ويبقى الجلوكوز الناتج في خلايا العضلات لأنه ضروري للتنفس.

مصطلحات علمية

كاينيز فوسفوريليز Phosphorylase kinase: إنزيم من تتالي الإنزيمات التي تعمل استجابة للجلوكاجون. ينشط الإنزيم جلايكوجين فوسفوريليز بإضافة مجموعة فوسفات.

تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis: تفكك الجلايكوجين بإزالة مونمرات الجلوكوز.

استحداث الجلوكوز Gluconeogenesis: تكوّن الجلوكوز في الكبد من مصادر غير كربوهيدراتية مثل الأحماض الأمينية والبيروفات واللاكتات والأحماض الدهنية والجليسرول.

أسئلة

(١١) يتضمن ضبط تركيز الجلوكوز في الدم آلية تغذية راجعة سلبية.

أ. ما المنبهات والمُستقبلات والمُستجيبات في آلية التحكم هذه؟

ب. اشرح كيف تشارك التغذية الراجعة السلبية في آلية الاتزان الداخلي (قد تحتاج إلى الرجوع إلى الموضوع ٤-١).

(١٢) **أ.** سمِّ العملية التي يدخل بها الجلوكوز إلى الخلايا ويغادر منها.

ب. اشرح لماذا:

١. لا تحتوي الخلايا العضلية على مستقبلات للجلوكاجون؟

٢. يوجد مرسال ثان للإنسولين والجلوكاجون؟

٣. للإنسولين والجلوكاجون مرسال ثان مختلف؟

(١٣) اشرح السبب الذي يدفع إلى ضرورة تضخيم الإشارة في خلايا الكبد للتحكم في جلوكوز الدم.

قياس تركيز الجلوكوز في البول

السكري Diabetes mellitus مرض شائع جدًا، والأشخاص المصابون بالسكري غير قادرين على التحكم بالمستوى الطبيعي لتركيز الجلوكوز في الدم. يصاب بعض الناس بالمرض في وقت مبكر من الحياة نتيجة توقف خلايا (β) في البنكرياس عن إنتاج الإنسولين. لكن معظم الاشخاص المصابين بالسكري يصابون بالمرض في مرحلة متأخرة من الحياة عندما تفشل خلاياهم في الاستجابة للإنسولين.

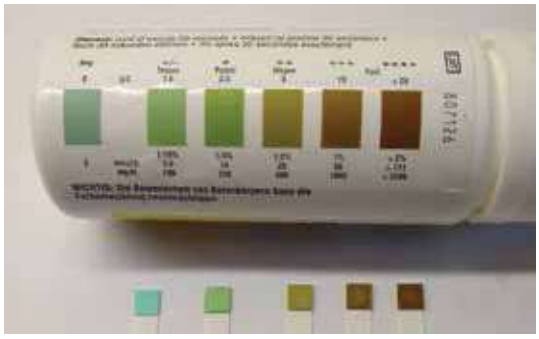
قد يشير وجود الجلوكوز في البول إلى أن الشخص مصاب بالسكري. إذا زاد تركيز الجلوكوز في الدم عن قيمة معيّنة تعرف باسم العتبة الكلوية Renal threshold، فلن يتم إعادة الامتصاص لكل الجلوكوز من الراشح في الأُنيبيب الملتوي القريب في الكُلية، وسيظهر بعضه في البول. توفر فحوص بسيطة للبول مؤشرات مبكرة على وجود مشكلات صحية، بما في ذلك السكري، والذي يمكن عندها استقصاؤه بشكل أكثر شمولًا.

يمكن استخدام شرائط الاختبار لفحص البول لمجموعة من العوامل المختلفة، بما في ذلك الرقم الهيدروجيني pH والجلوكوز والكيتونات Ketones والبروتين. تحتوي شرائط الفحص للكشف عن الجلوكوز على إنزيم جلوكوز أكسيديز Glucose oxidase والبيروكسيديز Peroxidase. يُثَبَّت هذان الإنزيمان على لوحة صغيرة على أحد طرفي الشريط، وتغطّى اللوحة بغشاء سليلوزي يسمح للجزيئات الصغيرة فقط من الدم بالوصول إلى الإنزيمات. تُغمر اللوحة بالبول لفترة قصيرة، فإذا كانت تحتوي على جلوكوز، فإن جلوكوز أكسيديز يحفز تفاعلًا كيميائيًا يتأكسد فيه الجلوكوز إلى حمض جلوكونيك Gluconic acid، وينتج أيضًا بيروكسيد الهيدروجين Hydrogen peroxide. يحفز البيروكسيديز التفاعل بين بيروكسيد الهيدروجين ومادة كيميائية عديمة اللون Chromogen في الشريط لتكوين كروموجين مؤكسد Oxidised chromogen وهو مركب بنّي اللون.

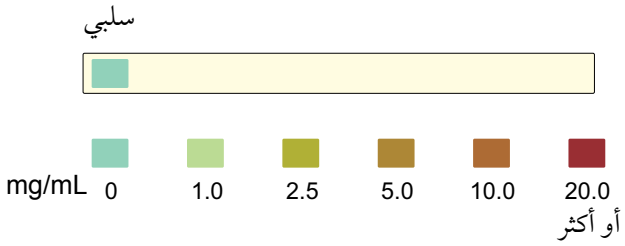
$$\text{جلوكوز} + \text{أكسجين} \xrightarrow{\text{جلوكوز أكسيديز}} \text{حمض جلوكونيك} + \text{بيروكسيد الهيدروجين}$$

$$\text{بيروكسيد الهيدروجين} + \text{كروموجين (بدون لون)} \xrightarrow{\text{بيروكسيديز}} \text{كروموجين مؤكسد (ملوَّن)} + \text{ماء}$$

يطابق اللون الناتج على الشريط مع لوحة الألوان التي تشير إلى اختلاف تراكيز الجلوكوز. كلما زاد تركيز الجلوكوز كان اللون داكنًا أكثر (الصورة ٤-٩ والشكل ٤-٢٢).



الصورة ٤-٩ شرائط فحص للكشف عن الجلوكوز في البول. تقارن الألوان على الشرائط بعد غمرها في البول مع لوحة ألوان مرافقة لشرائط الفحص.



الشكل ٤-٢٢ لوحة الألوان لتفسير اللون الذي يُشاهد على شرائط الفحص في الصورة ٤-٩. تبدو تراكيز الجلوكوز هنا بوحدة mg/mL.

جلوكوز أكسيديز خاص بالجلوكوز، لذا يعطي الفحص نتائج سلبية مع السكريات الأخرى مثل الفركتوز واللاكتوز والسكروز، ما يجعله نموذجًا جيدًا لتخصص الإنزيم واستخدام الإنزيمات المثبتة.

قياس الجلوكوز في الدم

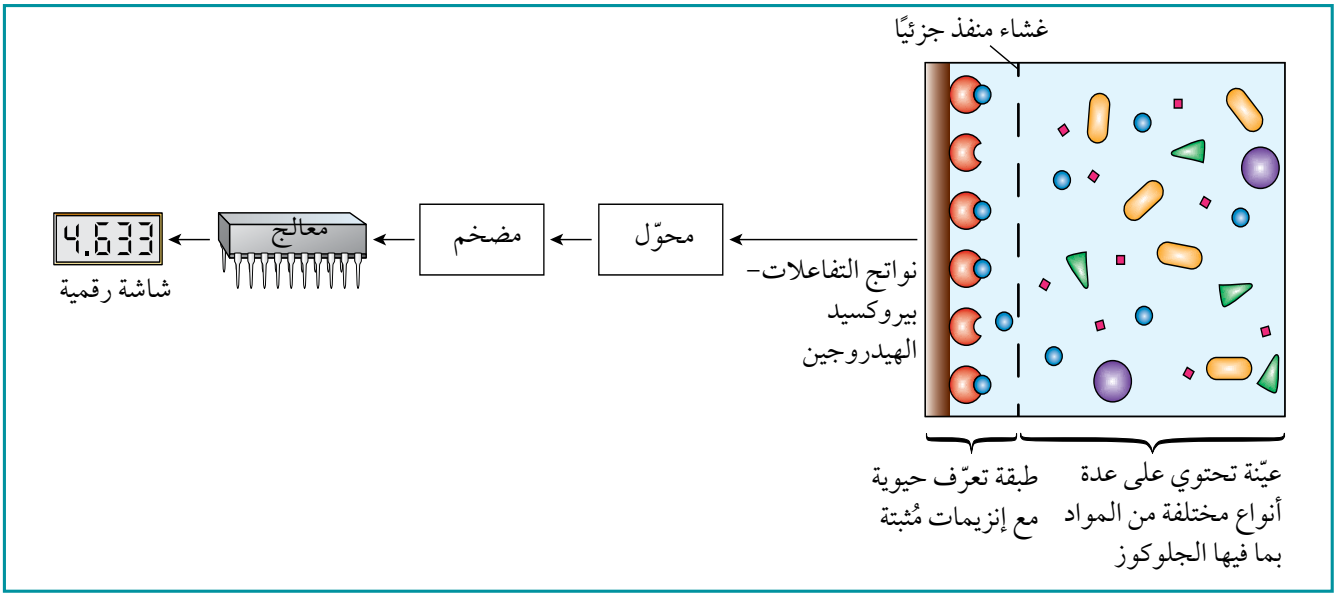
تتمثل إحدى مشكلات فحوصات البول في أنها لا تشير إلى تركيز جلوكوز الدم الحالي. بل إنها تبيّن ما إذا كان التركيز أعلى من العتبة الكلوية أم لا في الفترة الزمنية التي جمع فيها البول في المثانة.

جهاز الاستشعار الحيوي Biosensor مثل ذلك المبيّن في الصورة ٤-١٠ يوفر لمريض السكري إمكانية فحص دمه لمعرفة كيف ينظم جسمه تركيز الجلوكوز. يستخدم جهاز الاستشعار الحيوي، كما في شرائط الفحص، جلوكوز أكسيديز المثبت على طبقة التعرف (الشكل ٤-٢٣)، لفحص عيّنة صغيرة من الدم. تمر الجزيئات الصغيرة في البلازما عبر الغشاء، وتدخل جزيئات الجلوكوز مواقع الإنزيم النشطة وتحفز التفاعل لإنتاج حمض الجلوكونيك وبيروكسيد الهيدروجين. يتأكسد بيروكسيد الهيدروجين في القطب الذي يكشف نقل الإلكترونات، ويتناسب تدفق الإلكترونات مع عدد جزيئات الجلوكوز أكسيديز. يضخم جهاز الاستشعار التيار فيقرأ بواسطة مقياس يعطي قراءة رقمية لتركيز الجلوكوز في غضون ثوان. يمكن تخزين النتائج، وإرسالها إلكترونيًا إلى الطبيب (الصورة ٤-١٠).

مصطلحات علمية

جهاز الاستشعار الحيوي Biosensor: أداة تستخدم المادة الحيوية مثل الإنزيم لقياس تركيز مركب كيميائي.

الصورة ٤-١٠ تستخدم أجهزة الاستشعار الحيوية مواد حيوية مثل الإنزيمات لقياس تركيز الجزيئات مثل الجلوكوز. يستخدم جهاز الاستشعار الحيوي لفحص تركيز السكر في عيّنة من الدم، ويبيّن المقياس القراءة ضمن المعدل الطبيعي.

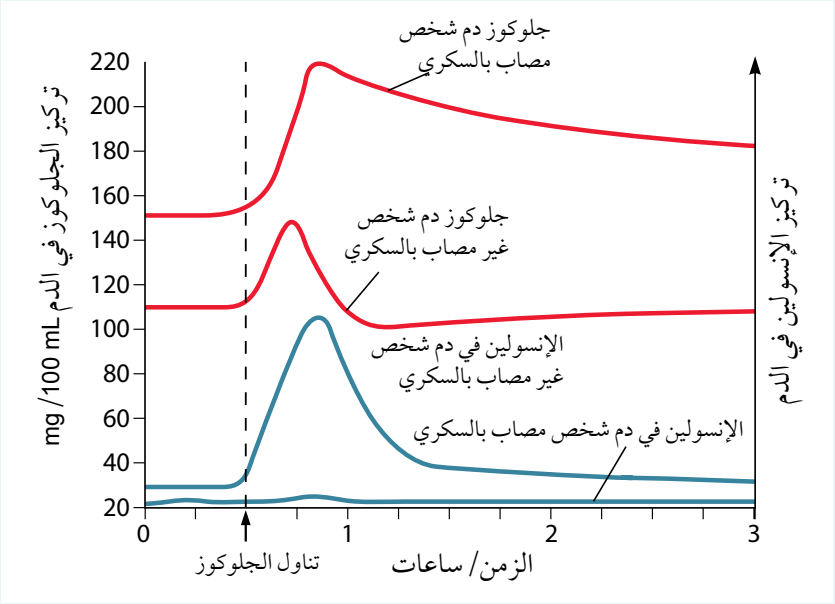


الشكل ٤-٢٣ رسم تخطيطي يبيّن مكوّنات جهاز الاستشعار الحيوي للجلوكوز.

أسئلة

(١٤) يمكن استخدام شرائط الاختبار لفحص عيّنات حيوية بالإضافة إلى البول للكشف عن الجلوكوز. اذكر ميزة استخدام شرائط الفحص بدل محلول بندكت للكشف عن الجلوكوز.

(١٥) **أ.** انظر إلى الشكل ٤-٢٤:



الشكل ٤-٢٤ تراكيز الجلوكوز والإنسولين في الدم بعد تناول الجلوكوز من قبل شخص يجري التحكم بمستوى الجلوكوز في دمه بشكل طبيعي وشخص مصاب بالسكري.

١. صف التغيرات في تراكيز الجلوكوز والإنسولين في الدم خلال ساعات الاستقصاء الثلاث.
٢. اشرح الاختلافات بين الاستجابات على تناول الجلوكوز لدى الشخصَين.

ب. يدرَّب المصابون بالسكري على حقن أنفسهم بالإنسولين.

١. اشرح سبب عدم إمكانية تناول الإنسولين بالفم.
٢. اقترح كيف يمكن للأشخاص المصابين بالسكري مراقبة فاعلية الإنسولين الذي يأخذونه.

(١٦) اقترح مزايا استخدام جهاز الاستشعار الحيوي الإلكتروني لقياس تركيز الجلوكوز في الدم، بدل استخدام شرائط الفحص لقياس الجلوكوز في البول.

٤-٥ الاتزان الداخلي في النباتات

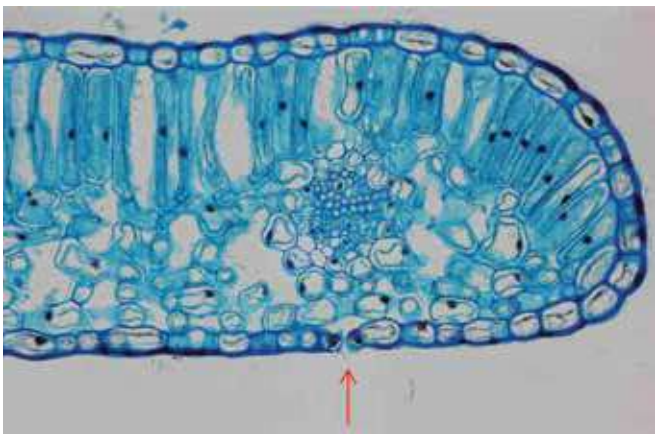
من المهم للنباتات كما هو للحيوانات الحفاظ على بيئة داخلية ثابتة. على سبيل المثال، تتطلب خلايا النسيج الوسطي في الأوراق إمدادًا ثابتًا من ثاني أكسيد الكربون إذا كانت ستستخدم على النحو الأمثل الطاقة الضوئية لعملية التمثيل الضوئي. درست في الصف التاسع كيف أن التراكيز المنخفضة من ثاني أكسيد الكربون تحدّ من معدل عملية التمثيل الضوئي، وستدرس المزيد عن العوامل المحددة في الصف الثاني عشر، الفصل الدراسي الثاني.

تتحكم الثغور بانتشار الغازات إلى الأوراق ومنها، وبالتالي تتحكم في دخول ثاني أكسيد الكربون إلى الأوراق. الثغور هي الفتحات الموجودة بين **الخلايا الحارسة Guard cells**، لكن المصطلح يستخدم عادة للإشارة إلى الخليتَين الحارستَين والفتحة بينهما (الصورة ٤-١١).

مصطلحات

الخلية الحارسة Guard cell: خلية بشرة على شكل كُلية توجد مع خلية أخرى في زوج يحيط بالثغر وينظّم فتحه أو إغلاقه.

الصورة ٤-١١ صورة مجهرية ضوئية لثغر مفتوح وثغر مغلق كما تظهر في البشرة السفلى من ورقة ترايديسكانتيا (العنكبوتية) (**x870**). تظهر البلاستيدات الخضراء داخل الخلايا الحارسة، ويظهر جدار الخلية الداخلي السميك في الثغر إلى اليسار مع فتحة ضيّقة.



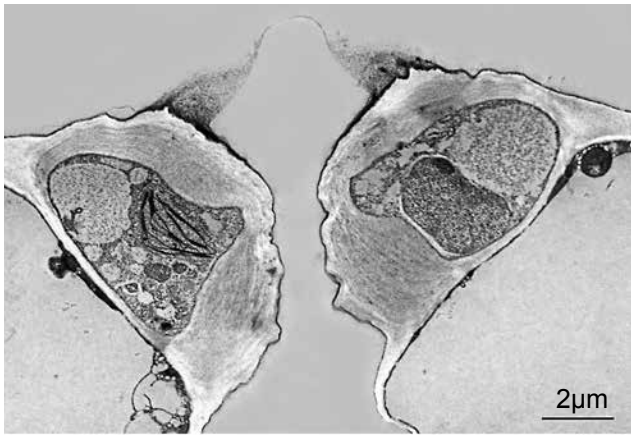
الصورة ٤-١٢ صورة مجهرية ضوئية لمقطع عرضي في ورقة نبات الخربق ***Helleborus*** (**x100**). يشير السهم إلى الثغر المفتوح في البشرة السفلى. والفراغ الهوائي تحت الثغر متصل مع جميع الفراغات الهوائية بين الخلايا في النسيج الوسطي كما تُشاهَد في الصور المجهرية الإلكترونية (الماسح) من داخل الأوراق.

قد تبدو الثغور بسيطة جدًا، لكن الخلايا الحارسة عالية التخصص تستجيب لمجموعة واسعة من المنبّهات البيئية للتحكم في البيئة الداخلية للورقة (الصورة ٤-١٢).

الثغور موزّعة على الأوراق والسيقان الخضراء والأزهار. وتحتوي البشرة السفلى للأوراق عادة على أكبر عدد من الثغور (الصورتان ٤-١١، ٤-١٢). تحاط فتحة الثغر بخليتَين حارستَين كما هو مبيّن في الصورة ٤-١١.

الخلايا الحارسة نشطة جدًا من الناحية الأيضية. تتصف الخلية الحارسة النموذجية مثل تلك الموجودة في نبات رشاد الصخر *Thale cress* بالميزات الآتية (انظر الصورة ٤-١٣):

- للخلايا الحارسة جدران سميكة تواجه الهواء خارج الورقة وفتحة الثغر، حيث يُحاط الجدار الخارجي بطبقة الكيوتيكل الشمعية السميكة، وغالبًا ما يمتد على شكل حواف بارزة. وتكون الجدران التي تواجه خلايا البشرة المجاورة أرق بكثير.
- ألياف السليلوز الدقيقة مرتبة على هيئة حزم كما هي مبيّنة في الشكل ٤-٢٦.
- غالبًا ما يكون غشاء سطح الخلية منثنيًا ويحتوي على العديد من القنوات والبروتينات الناقلة.
- يحتوي السيتوبلازم على عدد كبير من البلاستيدات الخضراء والميتوكندريا.
- يزداد حجم حبيبات النشا في البلاستيدات الخضراء عند تخزين النشا في الليل ويقل حجمها في النهار.
- يوجد العديد من الفجوات الصغيرة بدلًا من فجوة واحدة كبيرة.



الصورة ٤-١٣ صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) في زوج من الخلايا الحارسة تحيط بثغر في نبات رشاد الصخر **Thale cress**. الهواء خارج الورقة في الأعلى، وخلايا البشرة على كلا جانبَي الخلايا الحارسة على اليمين واليسار.

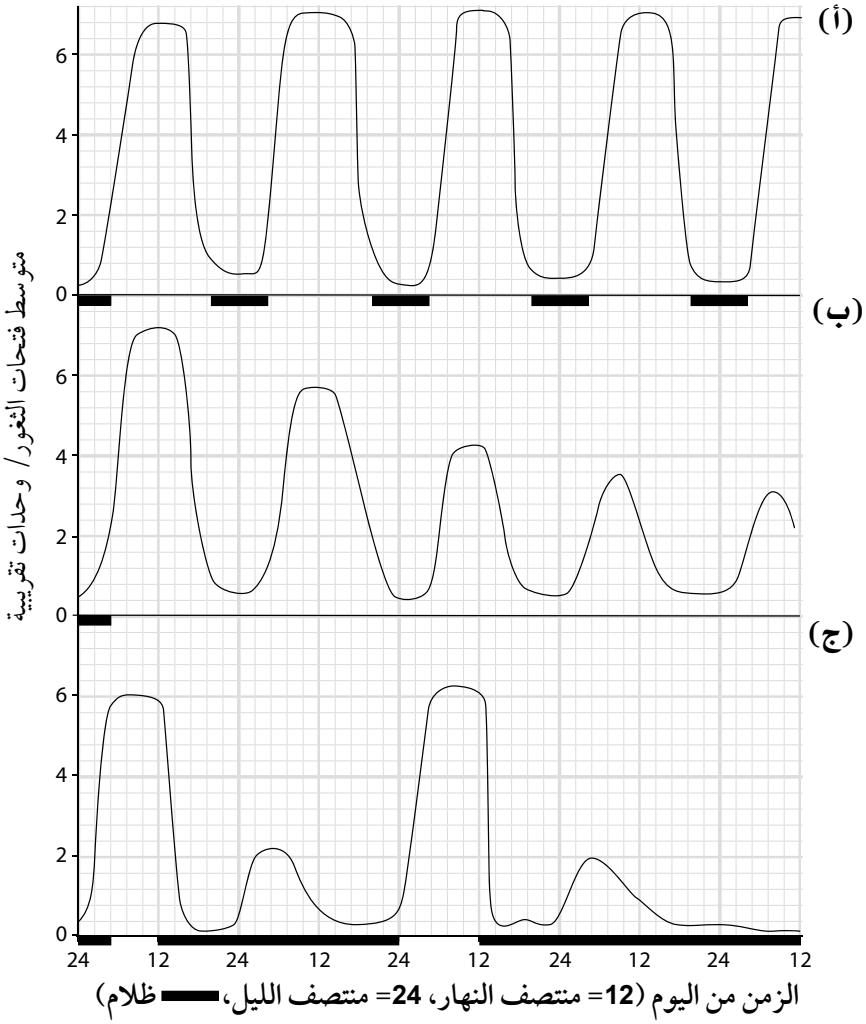
سؤال

(١٧) اشرح ميزات الخلايا الحارسة.

فتح الثغور وإغلاقها

تفتح الثغور وتغلق بإيقاعات يومية مستمرة، وتستمر هذه الإيقاعات حتى عند بقائها في ضوء مستمر أو ظلام دائم (الشكل ٤-٢٥). يحافظ فتح الثغور أثناء النهار على انتشار ثاني أكسيد الكربون إلى الداخل وانتشار غاز الأكسجين إلى الخارج. كما ينتشر بخار الماء إلى الخارج في عملية النتح (الصف الحادي عشر، الوحدة السادسة). إغلاق الثغور ليلًا عندما لا يحدث التمثيل الضوئي يُقلِّل من معدل النتح، وبالتالي يحافظ على الماء. فالثغور تستجيب للتغيرات في ظروف البيئة، ولذلك تفتح استجابة لما يأتي:

- زيادة شدة الضوء.
- انخفاض تراكيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الفراغات الهوائية للورقة. عندما تفتح الثغور تحصل الأوراق على غاز ثاني أكسيد الكربون لعملية التمثيل الضوئي، لكنها تميل إلى أن تفقد الكثير من الماء في النتح.



الشكل ٤-٢٥ (أ) قيست فتحات الثغور في أوراق ترادسكانتيا (العنكبوتية) *Tradescantia* على مدار عدة أيام للكشف عن الإيقاع اليومي في فتح الثغور وإغلاقها. (ب) استمر هذا الإيقاع حتى عند وجود النباتات في ضوء مستمر. (ج) استمر هذا الإيقاع أيضًا في فترات طويلة من الظلام.

وتغلق الثغور استجابة لما يأتي:

- الظلام.
- التركيز العالي من غاز ثاني أكسيد الكربون في الفراغات الهوائية في الورقة.
- انخفاض نسبة الرطوبة.
- درجة الحرارة المرتفعة.
- الإجهاد المائي، عندما يكون إمداد الماء من الجذور محدودًا، و/ أو توجد معدلات عالية من النتح.

تتمثل مشكلة إغلاق الثغور في انخفاض إمداد غاز ثاني أكسيد الكربون أثناء النهار، لذا يقل معدل التمثيل الضوئي. وتتمثل ميزة إغلاق الثغور في احتجاز الماء داخل الورقة، وهذا أمر مهم في وقت الاجهاد المائي.

آليات فتح وإغلاق الثغور

تفتح الخلايا الحارسة عندما تحصل على الماء وتصبح منتفخة. وتغلق عندما تفقد الماء وتصبح رخوة، وتقوم بذلك عن طريق الأسموزية.

فتح الثغور

من الضروري انخفاض جهد الماء قبل أن يدخل الماء إلى الأوراق بالأسموزية. يحدث هذا الانخفاض بفعل نشاط البروتينات الناقلة في أغشية سطح الخلية. تنقل مضخات البروتون في الغشاء التي تعمل بطاقة ATP أيونات الهيدروجين (H^+) إلى خارج الخلايا الحارسة استجابة للضوء. ويؤدي الانخفاض في تركيز أيونات الهيدروجين داخل الخلايا إلى فتح القنوات البروتينية الناقلة لأيونات البوتاسيوم (K^+)، فتدخل إلى الخلية. ويحدث ذلك لأن إزالة أيونات الهيدروجين أدّى إلى أن يصبح داخل الخلية مشحونًا بشحنة سالبة مقارنة مع خارجها. ولكون أيونات البوتاسيوم ذات شحنة موجبة، فإنها تنتقل مع المنحدر الكهربائي باتجاه المنطقة ذات الشحنة السالبة. كما تنتشر أيونات البوتاسيوم إلى الخلايا مع منحدر التركيز.

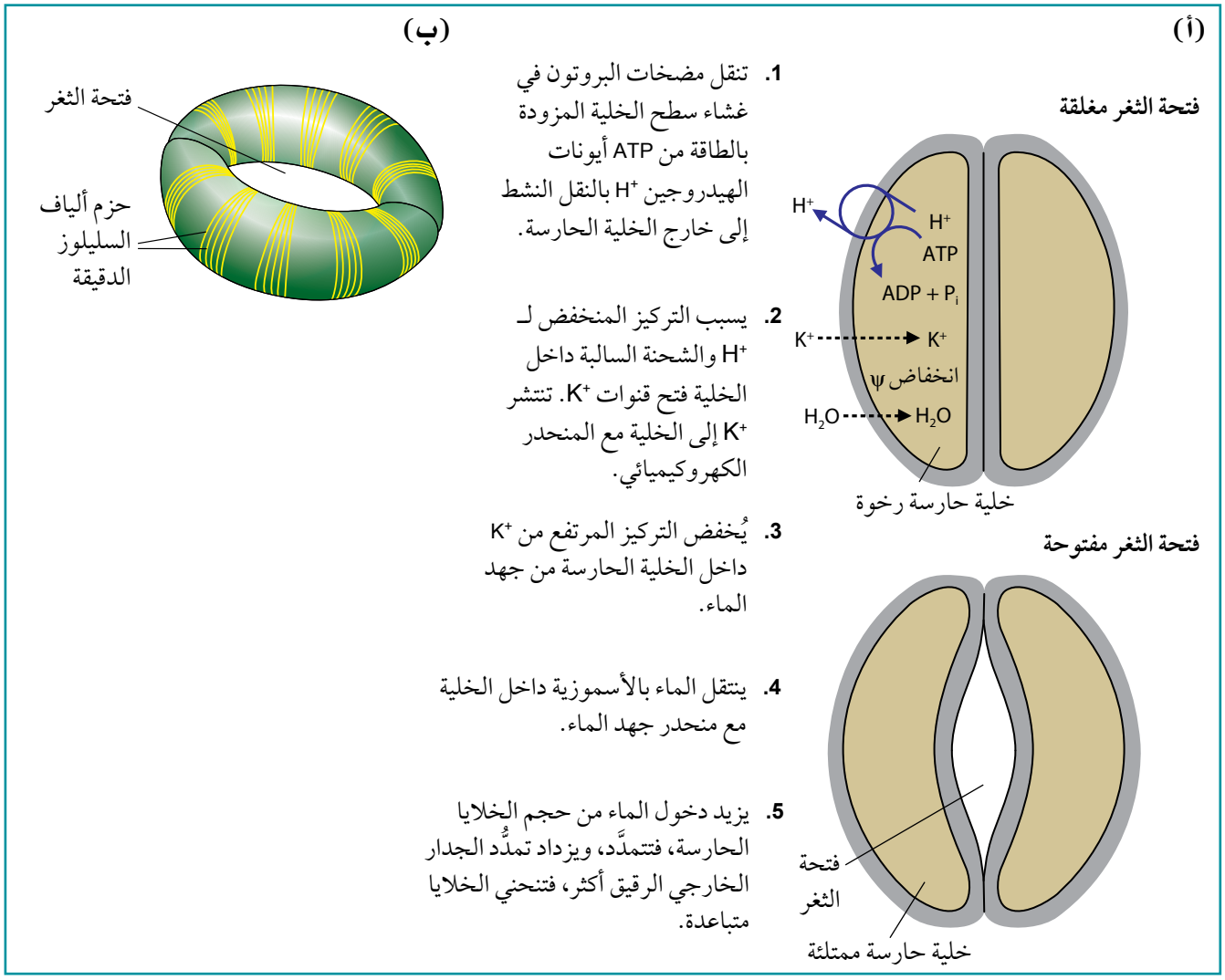
مصطلحات علمية

المنحدر الكهروكيميائي Electrochemical gradient: منحدر عبر غشاء سطح الخلية يشمل الفرق في تركيز الأيونات وفرق الجهد.

هذا المنحدر المشترك هو **المنحدر الكهروكيميائي Electrochemical gradient** (الشكل ٤-٢٦). تدخل أيضًا أيونات أخرى خاصة الكلوريد والنترات (غير موضحة بالشكل) للحفاظ على التوازن الكهربائي.

المزيد من أيونات البوتاسيوم داخل الخلايا الحارسة يزيد من تركيز المواد المذابة، الأمر الذي يقلل من جهد الماء. فيتكوّن منحدر جهد للماء بين خارج الخلية وداخلها، فينتقل الماء بالأسموزية عبر الأكوابورينات في الغشاء ويدخل معظمه إلى الفجوات ليسبب زيادة في حجمها. يزداد ضغط الامتلاء للخلايا الحارسة وتفتح الثغور. النشا المختزن في البلاستيدات الخضراء يتفكك لتكوين أيونات المالات السالبة التي تدخل إلى الفجوات. وتساعد هذه الأيونات أيضًا في الحفاظ على التوازن الكهربائي، كما تُسهم في تقليل جهد الماء أثناء فتح الثغور.

تُسهم السماكة غير المتساوية لجدران الخلايا الحارسة ووجود حزم ألياف السليلوز الدقيقة في منع تمددها في جميع الاتجاهات. فبدلًا من ذلك تزداد الخلايا في الطول وليس في القطر. وفيما ترتبط نهايات الخليتَين الحارستَين وتنحني الجدران الرقيقة الخارجية بسهولة أكبر مقارنة بالجدران الداخلية السميكة، تصبح الخلايا الحارسة مقوّسة، كما تنتفخ الخلايا الحارسة باتجاه الخلايا المجاورة، وتبدو أشبه بزوج من ثمار الموز، وبالتالي يفتح الثغر بين الخليتَين.



الشكل ٤-٢٦ كيف تفتح الثغور. (أ) سلسلة الأحداث التي تحدث أثناء فتح الثغور. (ب) تقيّد حزم من ألياف السليلوز الدقيقة توسع الخلايا الحارسة إلى الأطراف، لذا تدفع الخلايا عكس بعضها وتدفع إلى الخارج مقابل الخلايا المجاورة.

الإغلاق

تغلق الثغور عندما تتوقف بروتينات مضخة أيونات الهيدروجين، وتغادر أيونات البوتاسيوم الخلايا الحارسة لتدخل إلى الخلايا المجاورة. تعود أيونات المالات إلى البلاستيدات الخضراء لتتحوّل إلى نشا. فيتكوّن منحدر جهد للماء في الاتجاه المعاكس، لذا يغادر الماء الخلايا الحارسة فتصبح رخوة وتغلق الثغور. لإغلاق الثغور تأثيرات كبيرة على النبات. فهو يقلل من امتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون اللازم لعملية التمثيل الضوئي، ويقلِّل من معدل النتح. وحيث إن النتح يستخدم لتبريد النبات، وسحب الماء والأيونات المعدنية إلى الأعلى ليزود بها الأوراق، فإن إغلاق الثغور يحدث فقط عندما يكون تقليل فقد بخار الماء والحفاظ على الماء هو العامل الأكثر أهمية.

سؤال

(١٨) **أ.** اكتب الشرح على الرسم التخطيطي الذي رسمته في الإجابة عن السؤال ١٧ لتبيّن كيف أن الخلايا الحارسة يتناسب تركيبها لفتح الثغور وإغلاقها.

ب. ارسم مخططًا انسيابيًا يبيّن مراحل فتح الثغر وإغلاقه.

ج. متى يكون إغلاق الثغور ميزة للنباتات؟ اشرح إجابتك.

ملخّص

تحافظ الثدييات على بيئتها الداخلية ثابتة نسبيًا، الأمر الذي يوفر بيئة مثالية للخلايا لتقوم بأنشطتها بكفاءة. يسمّى الحفاظ على بيئة داخلية ثابتة نسبيًا الاتزان الداخلي. يتطلب الاتزان الداخلي مستقبلات تتحسّس تغيرات الظروف الخارجية مثل درجة الحرارة في البيئة المحيطة، والتغيرات الداخلية في العوامل الفسيولوجية مثل درجة حرارة الجسم والرقم الهيدروجيني pH وتركيز الجلوكوز وجهد الماء للدم. هذه التغيرات في منبّهات البيئة الداخلية والبيئة الخارجية، يتم تحسّسها بواسطة المستقبلات مثل مستقبلات درجة الحرارة في الجلد ومستقبلات أسموزية في تحت المهاد. ينظم الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء آليات الاتزان الداخلي. ويشارك التأشير الخلوي في تنظيم أنشطة المستجيبات التي تقوم بالإجراءات التصحيحية لإعادة حالة الاتزان الداخلي.

تستخدم أجهزة التحكم في الاتزان الداخلي التغذية الراجعة السلبية والتي فيها ينبه أي تغير في عامل ما المستجيبات للقيام بأنشطة لإعادة العامل إلى النقطة المرجعية.

المستجيبات هي الخلايا والأنسجة والأعضاء (بما فيها العضلات والغدد) التي تقوم بالوظائف اللازمة لإعادة العوامل الفسيولوجية إلى النقطة المرجعية.

الإفراز هو إزالة فضلات عمليات الأيض بخاصة غاز ثاني أكسيد الكربون واليوريا.

نزع الأمين (المجموعة الأمينية) من الأحماض الأمينية الفائضة في الكبد ينتج الأمونيا، والتي تتحوّل إلى اليوريا، والتي تمثل الفضلات النيتروجينية الرئيسية. تفرز اليوريا ذائبة في الماء على شكل بول.

تنظم الكليتان تركيز عدة مواد مختلفة في سوائل الجسم عن طريق إفراز كميّات مناسبة منها.

تُحاط كل كُلية بمحفظة ليفية، ولكل كُلية ثلاث مناطق: القشرة والنخاع وحوض الكُلية.

يوجد في داخل كل كُلية آلاف النفرونات والأوعية الدموية المرتبطة بها.

تنتج الكليتان البول عن طريق الترشيح الفائق وإعادة الامتصاص الانتقائي.

ينتقل الدم إلى الكُبَيبَة عن طريق الشريّن الوارد. يدفع الضغط المائي المرتفع في الكُبَيبَة المواد عبر بطانة الشعيرات الدموية والغشاء القاعدي وبين الخلايا الرجلاء لمحفظة بومان. يعمل الغشاء القاعدي كمرشح، بما يسمح فقط للجزيئات الصغيرة بالمرور عبره. يتجمع الراشح في محفظة بومان، ثم يدخل إلى الأُنيبيب الملتوي القريب، حيث يحدث معظم إعادة الامتصاص، بالانتشار والنقل النشط. يعاد امتصاص المواد أيضًا في الأُنيبيب الملتوي البعيد والقناة الجامعة.

تحتوي خلايا بطانة الشعيرات الدموية في الكُبيبة على العديد من الثقوب والخلايا الرجلاء المحتوية على العديد من ثقوب الترشيح التي تساعد في ارتشاح الجزيئات الصغيرة من بلازما الدم إلى محفظة بومان.

تحتوي الخلايا الطلائية المكعبة في الأُنيبيب الملتوي القريب على خملات دقيقة توفر منطقة ذات مساحة سطح كبيرة ملامسة للراشح، وغشاء قاعدي منثنٍ (مطويّ) لانتقال المواد المعاد امتصاصها إلى الدم، والعديد من الميتوكندريا لتوفير الطاقة للنقل النشط.

تعمل التواءات هنلي لتكوين تراكيز عالية من أيونات الصوديوم والكلوريد في السائل النسيجي في النخاع. يحتوي نسيج النخاع على جهد ماء منخفض جدًا. يُعاد امتصاص الماء من السائل في القناة الجامعة بالأسموزية إذا كان الجسم يعاني حالة الجفاف. يتم التحكم بكميّة المحتوى المائي للدم بتغيير كميّة الماء المفرزة في البول من الكلى. ويتم ذلك بتنظيم نفاذية الخلايا الطلائية للقنوات الجامعة للماء، ومن ثم حجم الماء المعاد امتصاصه من القنوات الجامعة إلى الدم. تتحسس مستقبلات أسموزية تحت المهاد التغيرات في جهد الماء، فإذا انخفض جهد الماء تطلق الغدة النخامية الخلفية الهرمون المانع لإدرار البول الذي ينبه لزيادة امتصاص القنوات الجامعة للماء من البول.

تابع

يتم التحكم في تركيز الجلوكوز في الدم بفعل الهرمونَين البروتينيَّين الإنسولين والجلوكاجون، اللذَين تفرزهما جُزيرات لانجرهانس في البنكرياس.
ينبِّه الإنسولين خلايا في الكبد والعضلات والأنسجة الدهنية لامتصاص المزيد من الجلوكوز، ويحفز الكبد والعضلات لتكوين الجلايكوجين للتخزين قصير الأمد. وتستجيب الأنسجة الدهنية بتحويل الجلوكوز إلى دهون للتخزين طويل الأمد. ويتمثل التأثير الكلي للإنسولين بخفض تركيز الجلوكوز في الدم.
ينبه الجلوكاجون خلايا في الكبد لتفكيك الجلايكوجين وإطلاق الجلوكوز إلى الدم، وبالتالي زيادة تركيز الجلوكوز.
الإنسولين والجلوكاجون بروتينان، لذا لا يستطيعان عبور أغشية الخلايا المستهدفة. يرتبط كلا الهرمونَين بمستقبلات محددة على أغشية سطح الخلية لهذه الخلايا. وينشط الارتباط سلسلة من التغيرات في الخلايا التي تضخم الإشارة بحيث تكون استجابات الخلايا سريعة.
يؤدي ارتباط الجلوكاجون بمستقبله إلى تحفيز بروتين G الذي ينشط إنزيم أدينيليل سيكليز الغشائي، والذي يحوّل ATP إلى المرسال الثاني cAMP. ينشط cAMP بروتين كاينيز A الذي يُنشئ تتالي إنزيمات تنشط بدورها إنزيم جلايكوجين فوسفوريليز الذي يفكك الجلايكوجين إلى الجلوكوز.
تستخدم شرائط اختبار البول للكشف عن مجموعة متنوعة من المواد بما فيها الجلوكوز؛ والذي يشير وجوده في البول إلى أن الشخص مصاب بمرض السكري.
يستخدم الجلوكوز أكسيديز المثبّت، في شرائط الاختبار للكشف عن الجلوكوز. يغيّر الإنزيم الجلوكوز إلى حمض جلوكونيك وبيروكسيد الهيدروجين، والذي يسبب تغيّرًا في اللون في مادة كيميائية أخرى على الشريط. تشير مجموعة الألوان على الشريط إلى تركيز الجلوكوز في البول. تستخدم أجهزة الاستشعار الحيوية المبدأ نفسه، لكنها تنتج تيارًا كهربائيًا صغيرًا بدل تغير اللون، بما يوفر قراءة رقمية مباشرة.
تتحكم الثغور في انتقال الغازات بين الغلاف الجوي والفجوات الهوائية بين الخلايا داخل الورقة. وهي تتيح انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون داخل الورقة للاستخدام في التمثيل الضوئي، وانتشار بخار الماء خارج الورقة في عملية النتح. يتكوّن كل ثغر من خليتَين حارستَين على كلا جانبَي الثغر. تحتوي جدران الخلايا الحارسة على حزم من ألياف السليلوز التي تقيد الزيادة في حجمها باتجاه الأطراف. عندما تنتفخ الخلايا الحارسة، تدفع باتجاه بعضها لفتح الثغر. الخلايا الحارسة خلايا متخصصة بامتياز تستجيب للتغيرات في شدة الضوء وتراكيز غاز ثاني أكسيد الكربون داخل الورقة.
بشكل عام تفتح الخلايا الحارسة أثناء النهار وتغلق أثناء الليل، على الرغم من استمرار هذا الإيقاع في حالة الضوء المستمر وفي الظلام المستمر. تحتوي أغشية سطح الخلية الحارسة على مضخات البروتون التي تنقل أيونات الهيدروجين بالنقل النشط إلى خارج الخلايا. الأمر الذي يحفز انتقال أيونات البوتاسيوم إلى الداخل مع منحدرها الكهروكيميائي. تقلل أيونات البوتاسيوم من جهد الماء للخلايا الحارسة، لذا يدخل الماء بالأسموزية وتنتفخ الخلايا وتفتح الثغور. لإغلاق الثغور، توقف مضخات البروتون عملها، وتتدفق أيونات البوتاسيوم إلى خارج الخلايا، ما يرفع من جهد الماء داخل الخلايا، وينتقل الماء بالتالي إلى الخارج بالأسموزية. تصبح الخلايا الحارسة رخوة فيغلق الثغور.

أسئلة نهاية الوحدة

أفعال إجرائية

لخص Outline: اذكر النقاط الرئيسية.

أعطِ Give: كوّن إجابة من مصدر معيّن أو من الذاكرة.

١ **أ.** لخّص دور الكليتَين في الاتزان الداخلي.

ب. تبيِّن الصورة المجهرية الضوئية الآتية جزءًا من الكُلية.

مقدار التكبير: x180

١. سمِّ الأجزاء **A, B, C, D**.

٢. حدّد منطقة الكُلية المبيّنة في الشكل وأعطِ سبب تحديدك هذا.

٣. احسب أقصى عرض حقيقي للتركيب المسمّى (**A**)، وبيّن خطوات حلّك.

٢ **أ.** يبلغ إجمالي حجم دم الإنسان 5.5 L تقريبًا. تتلقى كليتا الإنسان في حالة الراحة 25% من الدم الذي تضخه عضلة القلب. ويبلغ الناتج الفعلي للدم الذي يضخه القلب في حالة الراحة 5.6 L/min. يبقى معدل الترشيح الكبيبي في الشخص السليم ثابتًا طوال الوقت عند 125 mL/min. ويبلغ حجم البول الناتج كل يوم بين 1.2 L و 2 L.

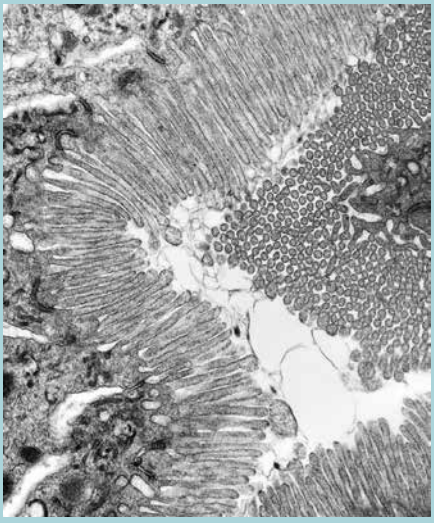
١. احسب حجم الدم الذي يتدفق عبر الكليتَين في الدقيقة. وضِّح خطوات حلّك.

٢. استخدم الرقم الذي حسبته في الجزء (١) لتحديد النسبة المئوية للدم المتدفق في الكليتَين والذي سيصبح راشحًا.

٣. ينتج شخص 1.5 L من البول في اليوم. احسب النسبة المئوية للراشح الذي يُفقد في البول خلال يوم واحد.

تابع

ب. تمثل الصورة المجهرية الإلكترونية (النافذ) الآتية جزءًا من غشاء تجويف الأُنيبيب الملتوي القريب.



١. اشرح مظهر الخلايا المبيّنة في الصورة المجهرية الإلكترونية.

٢. يوجد العديد من الميتوكندريا في خلايا الأُنيبيب الملتوي القريب. اشرح سبب احتواء هذه الخلايا على العديد من الميتوكندريا.

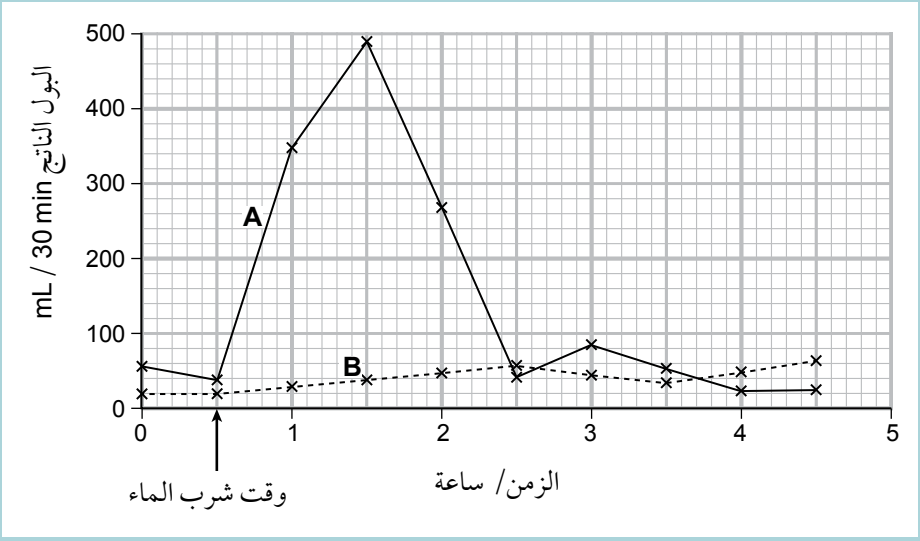
ج. اشرح كيف تحدّد خلايا بطانة القنوات الجامعة في الكُلية تركيز البول الذي يدخل حوض الكُلية.

٣ التحكم في المحتوى المائي للدم مثال على الاتزان الداخلي.

أ. اذكر اسم الجزء من الجسم الذي يراقب جهد الماء في الدم.

في استقصاء للعوامل التي تؤثر في إنتاج البول، شرب شخص لترًا واحدًا من الماء، ثم جُمع بوله على فترات من نصف ساعة لمدة أربع ساعات بعد الشرب. يبيّن الخط **A** في الشكل نتائج ذلك. شرب الشخص نفسه في اليوم التالي لترًا واحدًا من محلول ملحي مخفف، وجمع البول بالطريقة نفسها (الخط **B**). جهد الماء للمحلول الملحي المخفف هو نفسه جهد الماء لبلازما الدم.

تابع



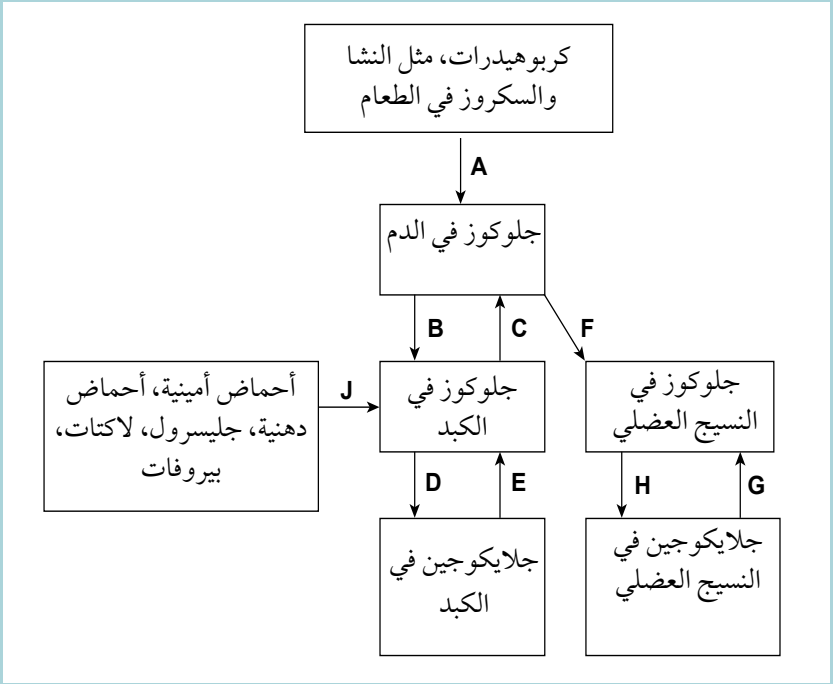
ب. احسب كميّة البول الناتجة في أول ساعتَين من شرب لتر الماء.

ج. اشرح سبب إنتاج الشخص الكثير من البول بعد شرب لتر الماء.

د. اقترح سبب اختلاف النتائج خلال اليوم الثاني (عند شرب المحلول الملحي المخفف) عن تلك التي في اليوم الأول.

هـ. اشرح سبب مشاركة التغذية الراجعة السلبية، وليس التغذية الراجعة الإيجابية في آليات الاتزان الداخلي.

٤ يبيّن المخطط الانسيابي بعض مسارات أيض الكربوهيدرات في جسم الإنسان.



تابع

أ. حدّد الحرف أو الأحرف من (A) إلى (J) التي تدل على كل ممّا يأتي:

١. تكوّن الجلايكوجين.

٢. تحلل الجلايكوجين.

٣. استحداث الجلوكوز.

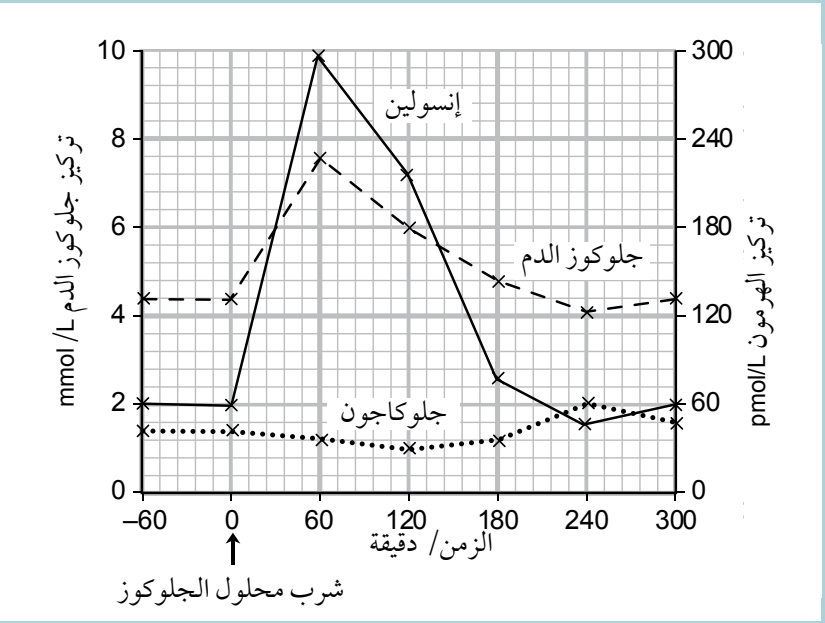
٤. العمليات التي يحفزها الإنسولين.

٥. العمليات التي يحفزها الجلوكاجون.

ب. اقترح سبب عدم وجود سهم في الاتجاه المعاكس للسهم (F).

ج. اشرح سبب أهمية تنظيم تركيز جلوكوز الدم.

٥ أُجري استقصاء لتحديد استجابة خلايا البنكرياس للزيادة في تركيز جلوكوز الدم. طُلب إلى شخص عدم أكل أو شرب أي شيء عدا الماء لمدة 12 ساعة، ثم سُمح له بشرب مشروب من محلول السكر. أُخذت عيّنات من دم الشخص على فترات من ساعة واحدة لمدة خمس ساعات، وحدّدت تراكيز الجلوكوز والإنسولين والجلوكاجون في الدم. يبيّن التمثيل البياني نتائج الاستقصاء.



أ. ١. اشرح سبب الطلب إلى الشخص عدم أكل أو شرب أي شيء غير الماء لمدة 12 ساعة قبل شرب محلول الجلوكوز.

٢. استخدم المعلومات في الشكل لوصف استجابة خلايا البنكرياس للزيادة في تركيز الجلوكوز.

٣. لخص دور الإنسولين عند زيادة تركيز الجلوكوز في الدم.

ب. ١. اقترح كيف ستتغير النتائج إذا استمر الاستقصاء أكثر من خمس ساعات بدون أن يتناول الشخص أي طعام.

٢. لخص تتابع الأحداث التي تلي ارتباط الجلوكاجون بمستقبلاته الغشائية على خلية الكبد.

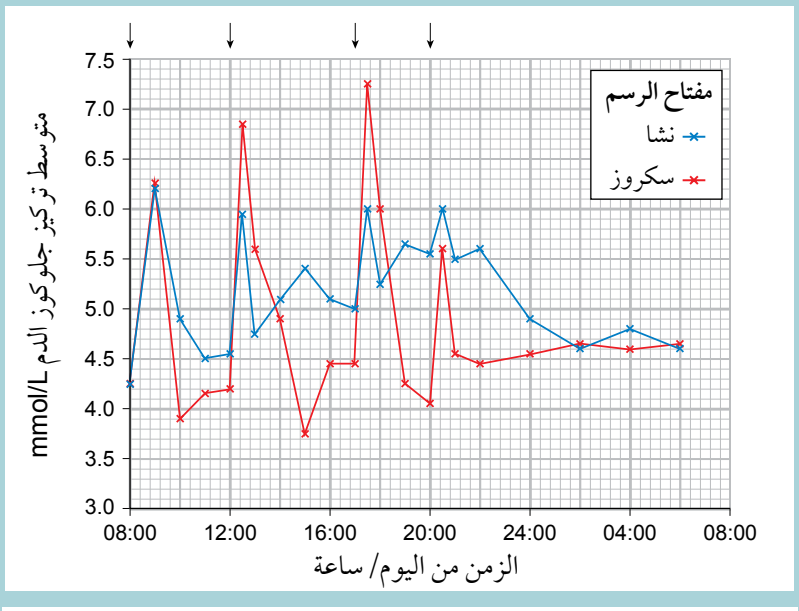
تابع

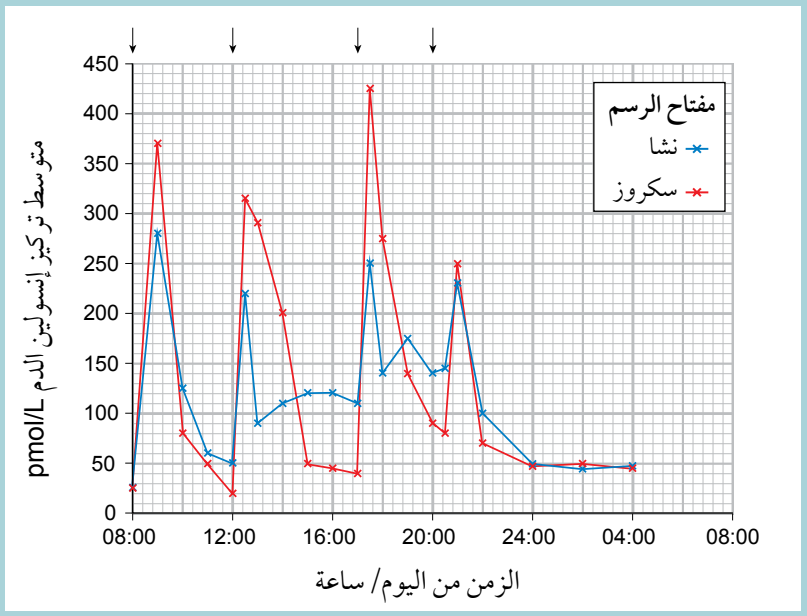
٦ أ. اشرح سبب اعتبار التحكم في جلوكوز الدم مثالًا على التغذية الراجعة السلبية؟

تحتوي العديد من الأطعمة المصنعة التي يتم تناولها في الأنظمة الغذائية الحديثة على كميّات مرتفعة من السكروز. يُعتقد أن هذه الأطعمة تمثل عاملًا خطرًا في الإصابة بالبدانة والسكري من النوع الثاني.

أُجريت دراسة حول تأثير الأنظمة الغذائية التي تحتوي على نسبة مرتفعة من النشا والسكروز على تركيز الإنسولين في الدم لثمانية متطوّعين بصحة جيدة.

صام كل متطوّع لمدة 8 ساعات، ثم تناول طعامًا غنيًا بالنشا لمدة 24 ساعة. وفي وقت لاحق كرر المتطوّعون الإجراء، لكنهم تناولوا طعامًا غنيًا بالسكروز، وروقبت تراكيز الجلوكوز والإنسولين في الدم لمدة 24 ساعة كما يبيّن التمثيل البياني. تشير الأسهم إلى زمن الوجبات الأربع التي تناولها المتطوّعون: الإفطار، الغداء، العشاء (المبكر)، العشاء (المتأخر).





تابع

ب. تكوّن الكربوهيدرات (النشا أو السكروز) في كل نظام غذائي 50% من الطاقة. اقترح ثلاثة عوامل أخرى يجب التحكم فيها في دراسة مثل هذه.

ج. ١. اذكر متوسط تراكيز الجلوكوز والإنسولين في الصيام.

٢. قارن تأثير النظامَين الغذائيَّين على تراكيز الجلوكوز والإنسولين.

٣. اشرح أسباب الاختلافات التي حددتها في (ج.٢).

د. ارسم رسمًا بيانيًا يوضح كيف سيتغيّر تركيز الجلوكاجون خلال الفترة الزمنية المحددة في التمثيلات البيانية.

أفعال إجرائية

قارن **Compare**: حدّد أوجه التشابه و/ أو الاختلاف معلّقًا عليها.

ارسم **Sketch**: أنشئ رسمًا بسيطًا يوضح الميزات الرئيسية.

٧ **أ.** اشرح معنى جهاز الاستشعار الحيوي.

ب. انقل وأكمل المقطع الآتي الذي يصف عمل جهاز الاستشعار الحيوي.

يستخدم العديد من مرضى السكري جهاز الاستشعار الحيوي لقياس تركيز الجلوكوز في الدم. يستخدم جهاز الاستشعار الحيوي إنزيم ..... على لوحة. يحول هذا الإنزيم الجلوكوز إلى حمض الجلوكونيك و ..... . ينتج قطب في جهاز الاستشعار الحيوي تيار ..... ضئيل، يكون ..... لتركيز الجلوكوز في الدم. يُقرأ التيار بواسطة المقياس، الذي يعطي قراءة لتركيز جلوكوز الدم. إذا كانت القراءة مرتفعة جدًا، يحتاج الشخص إلى أخذ ..... لخفضها.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أعرّف معنى مصطلح الاتزان الداخلي وأذكر أهمية الاتزان الداخلي للثدييات.	٤-١			
أذكر مبادئ الاتزان الداخلي من حيث المنبّهات الداخلية والخارجية والمستقبلات وأجهزة التحكم والتنسيق (الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء) والمستجيبات (العضلات والغدد) والتغذية الراجعة السلبية.	٤-١			
أذكر أن اليوريا يتم إنتاجها في الكبد من خلال إزالة المجموعة الأمينية من الأحماض الأمينية الزائدة.	٤-١			
أصف تركيب كُلية الإنسان مقتصرًا على المحفظة الليفية، والقشرة، والنخاع، وحوض الكُلية، والحالب.	٤-٢			
أحدّد في الرسوم التخطيطية والصور المجهرية الضوئية أجزاء النفرون والأوعية الدموية المرتبطة به مقتصرًا على الكُبَيبة، ومحفظة بومان، والأُنيبيب الملتوي القريب، والتواء هنلي والأُنيبيب الملتوي البعيد، والقناة الجامعة.	٤-٢			
أصف وأشرح كيفية تكوّن البول في النفرونات مقتصرًا على تكوين الراشح الكُبَيبي بالترشيح الفائق في محفظة بومان وإعادة الامتصاص الانتقائي في الأُنيبيب الملتوي القريب.	٤-٢			
ألخص كيف يتم ضبط تركيز البول، مع الإشارة إلى التواء هنلي والأُنيبيب الملتوي البعيد والقناة الجامعة.	٤-٢			
أربط التركيب الدقيق لمحفظة بومان والأُنَيبيب الملتوي القريب مع وظائفها في تكوين البول والتي تشمل الترشيح الفائق وإعادة الامتصاص الانتقائي.	٤-٢			
أصف أدوار تحت المهاد والغدة النخامية الخلفية و(ADH) والأكوابورينات والقنوات الجامعة في تنظيم الأسموزية.	٤-٣			
أشرح كيفية التحكم بتركيز الجلوكوز في الدم مع الإشارة إلى تأثير الإنسولين على خلايا العضلات وخلايا الكبد وتأثير الجلوكاجون على خلايا الكبد.	٤-٤			

قائمة تقييم ذاتي

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أصف مبادئ التأشير الخلوي من خلال دور الجلوكاجون في التحكم بتركيز الجلوكوز في الدم.	٤-٤			
أشرح كيفية استخدام شرائط الاختبار وأجهزة الاستشعار الحيوية في قياس تركيز الجلوكوز في البول والدم وأشرح دور إنزيمَي الجلوكوز أكسيديز والبيروكسيديز.	٤-٤			
أصف تركيب ووظيفة الخلايا الحارسة وأشرح كيف تنظم اتساع فتحة الثغر.	٤-٥			
أشرح أن الثغور تتحكم في دخول غاز ثاني أكسيد الكربون بالانتشار وتنظيم فقد بخار الماء عن طريق النتح مما يوازن بين حاجات التمثيل الضوئي والحفاظ على المياه.	٤-٥			
أشرح أن للثغور إيقاعًا يوميًا من الفتح والإغلاق وأنها تستجيب للتغيرات في الظروف البيئية.	٤-٥			

الوحدة الخامسة

التحكم والتنسيق
Control and coordination

أهداف التعلّم

٥-١ يقارن سمات الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء.

٥-٢ يصف تركيب ووظيفة الخلية العصبية الحسية والخلية العصبية الحركية ويذكر أن الخلية العصبية الموصلة تربط بين الخلية العصبية الحسية والخلية العصبية الحركية.

٥-٣ يلخص دور خلايا المستقبلات الحسية في تحسس المنبهات وتحفيز انتقال النبضات العصبية في الخلايا العصبية الحسية.

٥-٤ يصف تسلسل الأحداث التي تؤدي إلى تكوّن جهد الفعل في الخلية العصبية الحسية، باستخدام خلية مستقبِل كيميائي مثل برعم التذّوق.

٥-٥ يصف ويشرح التغيرات في جهد غشاء الخلايا العصبية، بما في ذلك:

- كيفية الحفاظ على جهد الراحة.
- الأحداث التي تحدث أثناء جهد الفعل.
- كيفية استعادة جهد الراحة أثناء فترة الجموح.

٥-٦ يصف ويشرح الانتقال السريع للنبضة العصبية في الخلايا العصبية المايلينية مع الإشارة إلى النقل الوثبي.

٥-٧ يشرح أهمية فترة الجموح في تحديد تكرار النبضات العصبية.

٥-٨ يصف تركيب التشابك العصبي الكوليني ويشرح كيف يعمل، بما في ذلك دور أيونات الكالسيوم.

٥-٩ يصف التركيب الدقيق للعضلة المخططة مع الإشارة إلى القطعة العضلية باستخدام الصور المجهرية الإلكترونية والرسوم التخطيطية.

٥-١٠ يشرح نموذج الخيط المنزلق للانقباض العضلي بما في ذلك دور تروبونين، وتروبوميوسين، وأيونات الكالسيوم و ATP.

٥-١١ يشرح دور الأكسين في نمو الاستطالة عن طريق تحفيز ضخ البروتونات المسببة لحموضة جدران الخلايا.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

اكتب قائمة بالأدوار المختلفة التي تقوم بها بروتينات غشاء سطح الخلية. لقد درست ذلك في الصف الحادي عشر، الوحدة الخامسة.

ناقش قائمتك مع الآخرين.

العلوم ضمن سياقها

حيث يلتقي علم الأحياء مع علم النفس

من المعروف أن لدى البشر خمس حواس: اللمس والبصر، والسمع، والتذوق، والشم. تشير الأبحاث العلمية الحديثة إلى أنه يمكننا أيضًا اكتشاف التغيرات الطفيفة التي تحدث في بيئتنا، والتي لا يمكننا وصفها بالكلمات، ما يجعلنا نتخيل أن هناك «حاسة سادسة». يمتلك بعض الأشخاص أيضًا ما يسمى بالحس المتزامن (Synaesthesia)، وهي حالة تتمثل في أن تحفيز السمع – على سبيل المثال – يسبب استجابة بصرية (الصورة ٥–١).

نعلم أننا نمتلك في الواقع حاسة سادسة حقيقية، وهي تُعدّ أمرًا مسلّمًا به. يروي طبيب الأعصاب أوليفر ساكس Oliver Sacks في مقالته «السيدة المفصولة عن الجسد» قصة امرأة استيقظت يومًا لتجد أنها فقدت كل إحساس بأنها تمتلك جسدًا*. لقد توقفت جميع الخلايا العصبية الحسية المرتبطة بالمستقبلات الحسية الموجودة في عضلاتها ومفاصلها عن نقل النبضات العصبية ولم يكن لديها أي تغذية راجعة من عضلاتها، ولم تكن قادرة على تنسيق حركاتها. كانت الطريقة الوحيدة التي يمكن أن تعيش بها بدون هذه الحاسة السادسة هي أن تدرب نفسها على الاعتماد كليًا على بصرها من أجل تنسيق عمل عضلاتها. ويصف رجل يعاني الحالة نفسها الجهود اللازمة للقيام بذلك أنها تعادل الجري في الماراثون في كل يوم. حاليًا، يسمى الإحساس بوعي الجسد وإدراكه استقبال الحس العميق Proprioception.

قام طبيب الأعصاب الكندي وايلدر بينفيلد Wilder Penfield، في منتصف القرن العشرين، بمحاولات لعلاج العديد من الأشخاص المصابين بالصرع Epilepsy عن طريق إحداث ثقوب في جماجمهم ووضْعِ أقطاب كهربائية مباشرة على سطح أجزاء مختلفة من أدمغتهم. وبذلك، تمكن من تحديد وظائف مناطق مختلفة من الدماغ. على سبيل المثال، كان بينفيلد أول شخص يتمكن من تحديد مناطق الدماغ التي تنسق الكلام.

الصورة ٥–١ وجد الباحثون الذين يدرسون النشاط الكهربائي في الدماغ أن بعض الناس يسمعون بالفعل اللون وأنهم يرون الأصوات.

* هذا المقال منشور في كتاب «**الرجل الذي حَسِب زوجته قبعة**».

سؤال للمناقشة

حقق وايلدر بينفيلد اكتشافات مهمة من خلال إجراء التجارب على مرضاه. ناقش أخلاقيات القيام بإجراء التجارب على الجهاز العصبي في الإنسان. فكّر في تجارب يمكن إجراؤها لاكتشاف المزيد عن الحاسة السادسة لدى الأشخاص.

١-٥ مقارنة جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي

درست في الوحدة الرابعة كيف تُستخدم الهرمونات للتواصل بين الأجزاء المختلفة من الكائن الحي، لتحافظ على بيئة داخلية ثابتة. بعض الأحيان يمكن أيضًا، استخدام الهرمونات للاستجابة إلى منبّه خارجي، ما يؤدي إلى حدوث تغيير في نشاط جزء من الكائن الحي. من الأمثلة على ذلك تأثير هرمون الأدرينالين خلال الاستجابة المسماة «الكر أو الفر 'fight or flight'» عند إدراك وجود خطر ما. يمكن أيضًا تحقيق التنسيق بين أجزاء جسم الكائن الحي بواسطة النبضات العصبية التي تنتقل في الجهاز العصبي. في كل من أنظمة التواصل الهرمونية والكهربائية، تُستخدم المستقبلات لتحسُّس التغيرات في البيئة المحيطة، ثم يتم إرسال المعلومات إلى الجهاز العصبي المركزي بحيث تنتج الاستجابة المناسبة من قبل المستجيبات. يوضح الجدول ٥-٢ بعض الأمثلة على هذه المستقبلات.

جهاز الغدد الصماء

مصطلحات علمية

الغدة الصماء
Endocrine gland: عضو يفرز الهرمونات مباشرة في الدم؛ تُعرف الغدد الصماء أيضًا باسم الغدد اللاقنوية.

جهاز الغدد الصماء
The endocrine system: يتكوّن من جميع الغدد الصماء في الجسم مع الهرمونات التي تفرزها.

الهرمونات هي جزيئات تأشير خلوي تنتجها **الغدد الصماء** **Endocrine glands**. تفرز هذه الغدد هرموناتها مباشرة في الدم. وينتقل الهرمون بعد ذلك لمسافات طويلة من موقع الإفراز، إلى مختلف الأعضاء المستهدفة. تُعدّ الهرمونات مثالية للتحكم في وظائف الجسم التي لا تحتاج في عملها إلى استجابات فورية.

يتكوّن **جهاز الغدد الصماء** **The endocrine system** من جميع الغدد الصماء في الجسم والهرمونات التي تفرزها. تشمل الأمثلة الغدة النخامية وجُزيرات لانجرهانس في البنكرياس (انظر الشكل ٤-١٣ والصورة ٤-٧ الوحدة الرابعة)، والغدد الكظرية، والخصيتَين، والمبيضَين.

العديد من الهرمونات، مثل الهرمون (ADH) والإنسولين، هي ببتيدات أو بروتينات صغيرة، قابلة للذوبان في الماء، وبالتالي لا يمكنها عبور الطبقة المزدوجة من الدهون المفسفرة المكوّنة لأغشية سطح الخلية. ترتبط هذه الهرمونات بالمستقبِلات الموجودة على سطح الخلايا المستهدفة، والتي بدورها تحفز جزيئات تعمل كمرسال ثانٍ لنقل الإشارة في جميع أنحاء السيتوبلازم (انظر الشكل ٤-٢١، الوحدة الرابعة).

تفرز الخصيتان والمبيضان الهرمونات الستيرويدية وهي التستوستيرون والإستروجين والبروجسترون. تتميز الستيرويدات بأنها قابلة للذوبان في الدهون، لذلك يمكنها أن تمر عبر الطبقة المزدوجة من الدهون المفسفرة المكوّنة لأغشية سطح الخلية. وبمجرد عبور جزيئات هذه الهرمونات غشاء سطح الخلية، ترتبط بمستقبِلات داخل السيتوبلازم أو داخل نواة الخلية، وتسبب تنشيط عمليات حيوية مختلفة مثل عملية النسخ (الوحدة الأولى، الموضوع ١-٤، بناء البروتين).

أسئلة

(١) **أ.** ارسم مخططًا Outline drawing لجسم الإنسان وحدد مواضع كل من: الغدة النخامية والبنكرياس والغدد الكظرية والخصيتَين والمبيضَين. أضف شروحًا توضيحية على الرسم الخاص بك لإظهار أدوار هذه الغدد.

ب. ينتقل كل من هرمون الجلوكاجون و(ADH) عبر جميع أنحاء الجسم في الدم. يستخدم كلا الهرمونَين تسلسل التأشير الخلوي نفسه داخل الخلايا (انظر الوحدة ٤). اشرح السبب في أن الهرمون (ADH) لا يسبب تفعيل تسلسل التأشير الخلوي الذي يحفز تحلل الجلايكوجين في خلايا الكبد.

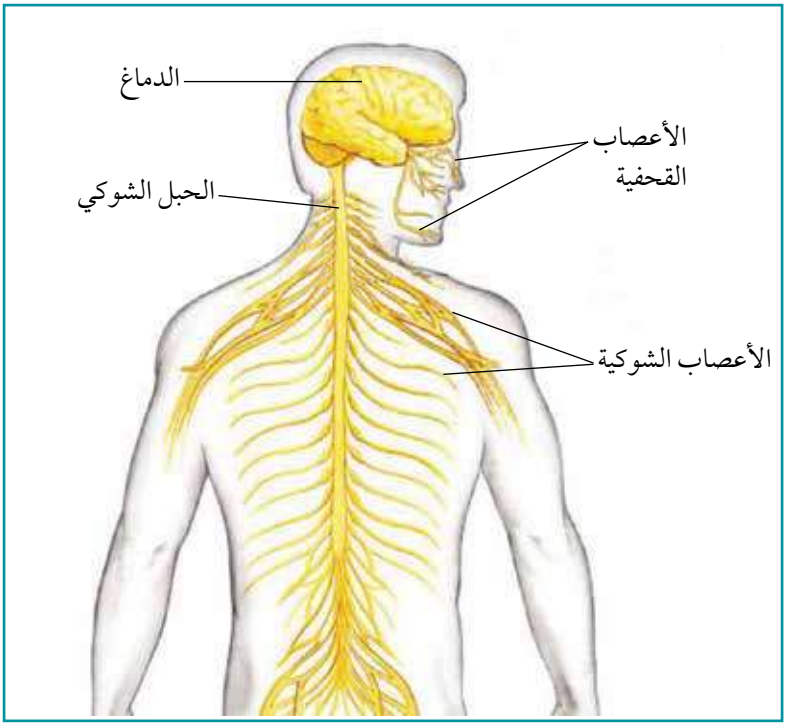
ج. اشرح السبب في أن الهرمونات الستيرويدية، مثل البروجسترون والإستروجين، يمكن أن تمر بسهولة عبر غشاء سطح الخلية، بينما لا تستطيع هرمونات أخرى فعل ذلك.

(٢) يقوم كل من هرمون الإنسولين والجلوكاجون و (ADH) بتنسيق الجوانب المرتبطة بالاتزان الداخلي. ارسم جدولًا يلخص كل ما تعلمته سابقًا من الوحدة الرابعة عن هذه الهرمونات الثلاثة.

الجهاز العصبي

يتكوّن الجهاز العصبي في الثدييات من:

- الدماغ والحبل الشوكي Spinal cord، اللذَين يشكلان الجهاز العصبي المركزي (Central nervous system - CNS).
- الأعصاب القحفية Cranial nerves والأعصاب الشوكية Spinal nerves التي تشكل الجهاز العصبي الطرفي (Peripheral nervous system - PNS) (الشكل ٥-١).



الشكل ٥-١ الجهاز العصبي في الإنسان. يحتوي كل عصب على العديد من الخلايا العصبية، وتحتوي معظم الأعصاب الموضحة في الرسم على كل من الخلايا العصبية الحسية والخلايا العصبية الحركية.

مصطلحات علمية

الخلية العصبية Neurone: خلية متخصصة لتوصيل النبضات العصبية.

النبضة العصبية Nerve impulse: موجة من إزالة الاستقطاب الكهربائي على جانبي غشاء سطح الخلية العصبية وتنتقل عبر هذه الخلايا.

تحتوي الأعصاب على العديد من **الخلايا العصبية Neurons**. ترتبط الأعصاب القحفية بالدماغ، وترتبط الأعصاب الشوكية بالحبل الشوكي. يتم نقل المعلومات على شكل **نبضات عصبية Nerve impulses** عبر الخلايا العصبية بسرعات عالية جدًا. تحمل الخلايا العصبية هذه المعلومات مباشرة إلى الخلايا المستهدفة. تنسق الخلايا العصبية أنشطة المستقبلات الحسية (مثل تلك الموجودة في العين) ومراكز اتخاذ القرار في الجهاز العصبي المركزي والمستجيبات مثل العضلات والغدد المختلفة.

يلخص الجدول ٥-١ الاختلافات الرئيسية بين جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي.

	جهاز الغدد الصماء	الجهاز العصبي
طريقة الانتقال	الهرمونات عبر الدم	نبضات كهربائية في الخلايا العصبية والنواقل العصبية عبر التشابكات العصبية
سرعة الانتقال	عادة ما تكون بطيئة، ولكنها طويلة الأمد	سريعة، ولكنها قصيرة الأمد
الدخول في الخلايا المستهدفة	إما أن تنتشر الهرمونات عبر غشاء سطح الخلية أو عبر الارتباط بمستقبلات غشاء سطح الخلية لتحفيز الاستجابات في الخلايا المستهدفة	تعمل النواقل العصبية على تنشيط قنوات الصوديوم وقنوات البوتاسيوم في أغشية سطح الخلية لتحفيز الاستجابات في الخلايا المستهدفة
الأنسجة والأعضاء الرئيسية	الغدد: أعضاء متخصصة مثل الغدة الدرقية والغدة النخامية والأعضاء التناسلية (الخصيتين والمبيضين)	الدماغ والحبل الشوكي
مستوى التحكم	استجابات لا إرادية للحفاظ على بيئة داخلية ثابتة؛ استجابات تنتشر (عادة) في جميع أنحاء الجسم	الاستجابات إرادية و لا إرادية؛ تكون الاستجابات (عادة) حصرًا على المستجيبات

الجدول ٥-١ مقارنة بين جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي.

٥-٢ التواصل العصبي

الخلايا العصبية

هناك ثلاثة أنواع من الخلايا العصبية (الشكل ٥-٢)، لكل منها وظيفة مختلفة:

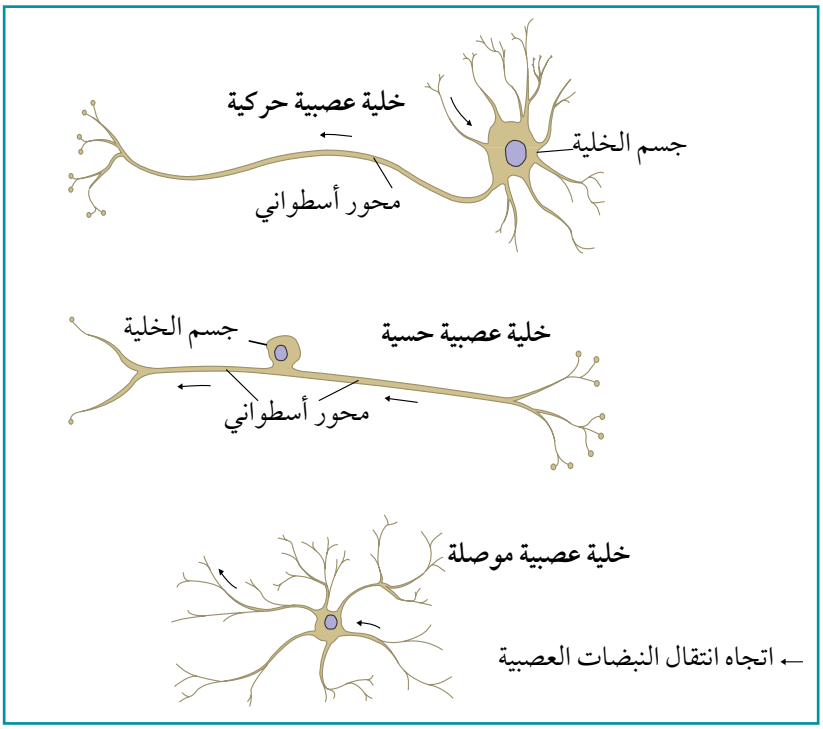
- **الخلايا العصبية الحسية Sensory neurones** تنقل النبضات العصبية من المستقبلات إلى الجهاز العصبي المركزي.
- الخلايا العصبية الموصلة Relay neurones تنقل النبضات العصبية من الخلايا العصبية الحسية إلى الخلايا العصبية الحركية.

- **الخلايا العصبية الحركية Motor neurones** تنقل النبضات العصبية من الجهاز العصبي المركزي إلى المستجيبات.

مصطلحات علمية

الخلية العصبية الحسية
Sensory neurone: خلية تنقل النبضات العصبية من المستقبلات إلى الجهاز العصبي المركزي.

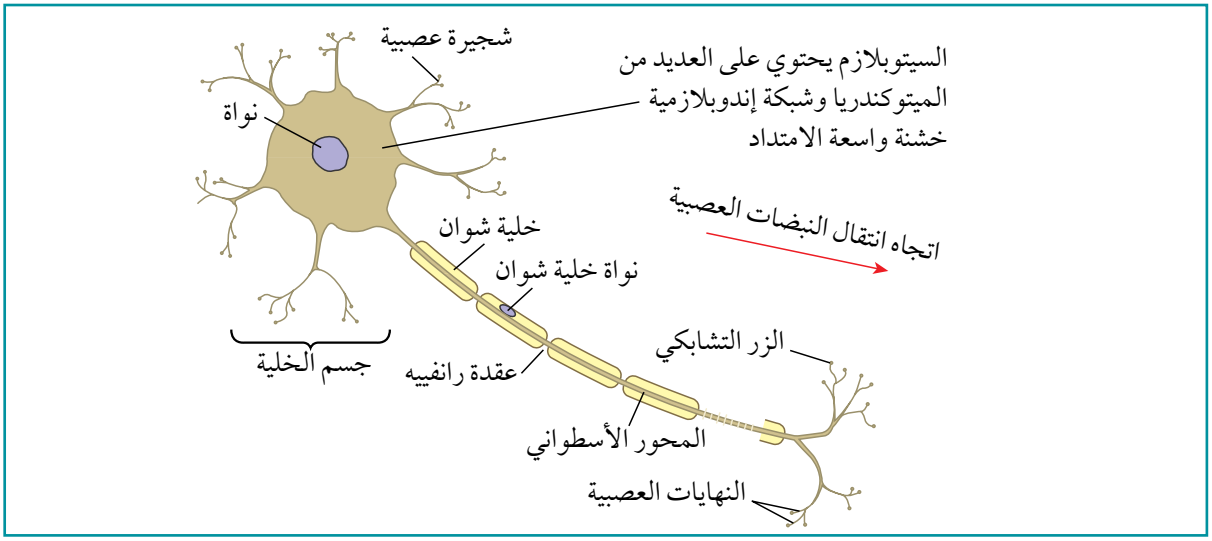
الخلية العصبية الحركية
Motor neurone: خلية عصبية يكون جسمها في الدماغ أو الحبل الشوكي أو في عقدة عصبية (منطقة منتفخة في العصب)، وتنقل النبضات العصبية إلى مستجيب مثل العضلات أو الغدد.



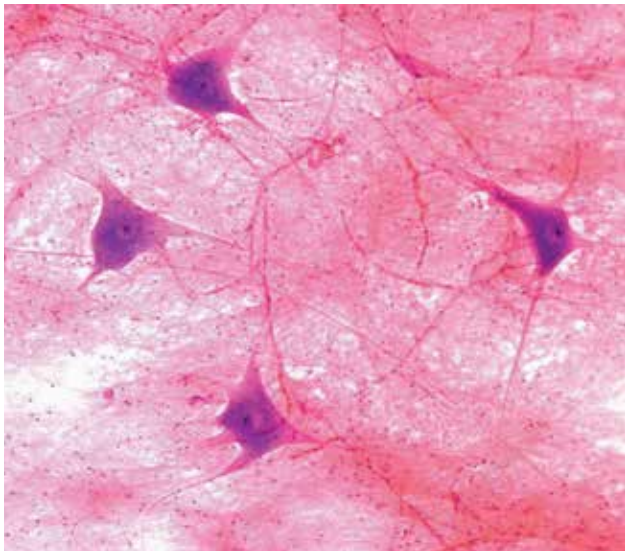
الشكل ٥-٢ الخلايا العصبية الحركية والحسية والموصلة.

الخلايا العصبية الحركية

يوضح الشكل ٥-٣ التركيب التفصيلي للخلايا العصبية الحركية لدى الثدييات، والتي تنقل النبضات العصبية من الدماغ أو الحبل الشوكي إلى العضلات أو الغدد.



الشكل ٥-٣ مقطع طولي في خلية عصبية حركية. يمكن أن يصل طول المحور الأسطواني إلى أكثر من متر.



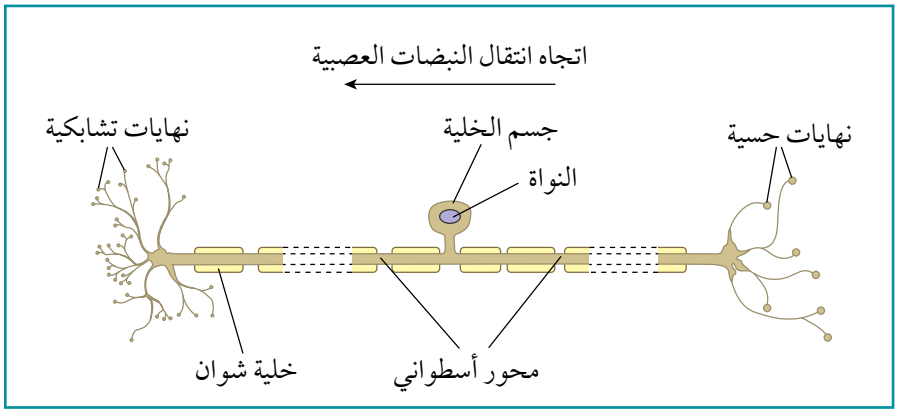
الصورة ٥-٢ صورة مجهرية ضوئية لأربع خلايا عصبية حركية مأخوذة من الحبل الشوكي. يمكن رؤية أجسام الخلايا وأنويتها والتفرعات الخارجة منها. في كل حالة، يمثل أحد الامتدادات محورًا أسطوانيًا (x130).

يقع جسم الخلية العصبية الحركية داخل الحبل الشوكي أو الدماغ. توجد نواة الخلية العصبية دائمًا في جسم الخلية. عند النظر إلى هذه الخلايا تحت المجهر الضوئي، يمكن غالبًا رؤية بقع داكنة في السيتوبلازم (الصورة ٥-٢) التي تمثل مناطق صغيرة من الشبكة الإندوبلازمية الخشنة.

يمتد من جسم الخلية العصبية امتدادات سيتوبلازمية رفيعة، ويكون بعضها قصيرًا جدًا، وغالبًا ما يكون له العديد من التفرعات تسمى الشجيرات العصبية Dendrites. تحتوي الخلايا العصبية الحركية على العديد من الشجيرات العصبية كثيرة التفرع. توفر هذه الشجيرات مساحة سطح كبيرة لترتبط بها النهايات العصبية لمحاور الخلايا العصبية الأخرى. يتميز المحور الأسطواني من الشجيرات العصبية بأنه أطول بكثير، وينقل النبضات العصبية عبر مسافات طويلة. قد يكون للخلايا العصبية الحركية التي يقع جسمها الخلوي في الحبل الشوكي محور أسطوانيّ يمتد إلى أحد أصابع قدمك، لذلك قد تكون المحاور الأسطوانية طويلة جدًا. يوجد داخل سيتوبلازم المحور الأسطواني بعض العضيات مثل الميتوكوندريا. تحتوي النهايات العصبية كذلك على الميتوكوندريا، جنبًا إلى جنب مع العديد من الحويصلات التي تحتوي على مواد كيميائية تسمى النواقل. تشارك هذه الحويصلات في تمرير النبضات العصبية إلى خلية مستجيب مثل خلية عضلية أو غدة.

الخلايا العصبية الحسية

تمتلك الخلايا العصبية الحسية التركيب الأساسي نفسه الذي تمتلكه الخلايا العصبية الحركية، ولكنها تختلف في أن لها محورًا أسطوانيًا يمتد طوليًا، مع جسم الخلية، والذي يكون بالقرب من مصدر المنبهات، أو داخل انتفاخ العصب الشوكي المسمى العقدة العصبية Ganglion (الشكل ٥-٤).



الشكل ٥-٤ مقطع طولي في خلية عصبية حسية.

الخلايا العصبية الموصلة

توجد هذه الخلايا بشكل كامل داخل (CNS). سوف تتعرف على هذه الخلايا أكثر عند دراسة الأقواس المنعكسة (الشكل ٥-٦)

سؤال

(٣) قم بعمل جدول تقارن فيه بين الخلايا العصبية الحركية والحسية من حيث: موقع جسم الخلية بالنسبة إلى الخلية، وموقع جسم الخلية في الجهاز العصبي المركزي، واتجاه النبضات العصبية، والوظيفة.

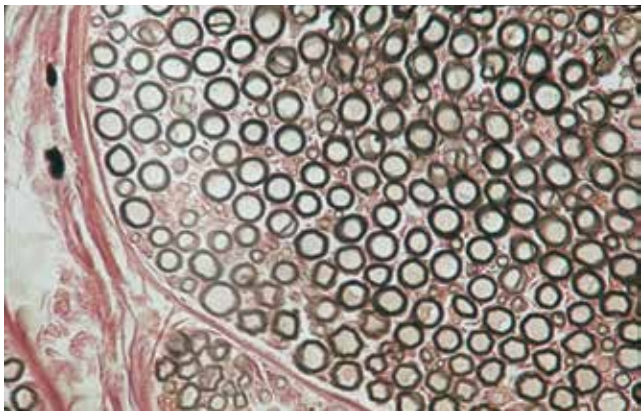
مصطلحات علمية

المايلين Myelin: مادة عازلة تحيط بالمحاور الأسطوانية للعديد من الخلايا العصبية؛ يتكون المايلين من طبقات من أغشية سطح الخلية تكوّنها خلايا شوان، وهي غنية جدًا بالدهون المفسفرة وبالتالي فهي غير منفذة للماء والأيونات في سوائل الأنسجة.

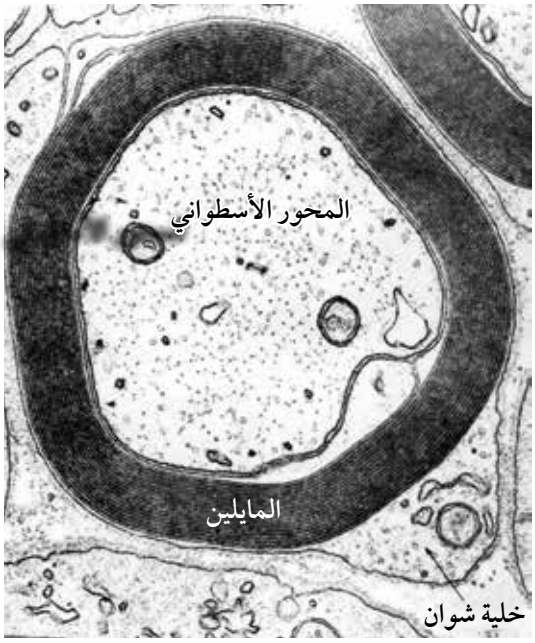
المايلين

تتم حماية المحاور الأسطوانية للخلايا العصبية الحركية والحسية على معظم طولها داخل الأعصاب. تُظهر الصورة ٥-٣ مقطعًا عرضيًا لعصب ممتلئ بالخلايا العصبية، (وتحديدًا محاورها الأسطوانية). يمكنك أن ترى أن بعضها محاط بحلقات داكنة كثيفة. هذه المادة التي تصطبغ بلون داكن هي مادة **المايلين Myelin**، وتصنعها خلايا متخصصة تسمى خلايا شوان، والتي تحيط بالمحاور الأسطوانية على طولها لبعض الخلايا العصبية. يمكنك مشاهدة خلايا شوان هذه تحيط بالخلايا العصبية الحركية في الشكلَين ٥-٣ و٥-٥، والصورة ٥-٤.

ليست كل المحاور الأسطوانية محمية بالمايلين. يمكنك أن ترى في الصورة ٥-٣ المحاور الأسطوانية لبعض الخلايا العصبية بدون حلقات داكنة؛ وهي الخلايا العصبية غير المايلينية Unmyelinated neurones. يُقدَّر بأن نحو ثلثَي الخلايا العصبية الحركية والحسية في جسمك هي خلايا عصبية غير مايلينية.



الصورة ٥-٣ صورة مجهرية ضوئية لمقطع عرضي في عصب (x1600). تمثل الدوائر المحاور الأسطوانية لخلايا عصبية حسية وحركية. معظم هذه المحاور الأسطوانية محاطة بالمايلين (تحديدًا تلك التي تظهر خطوط داكنة حولها) وبعضها غير مايلينية. تحاط كل مجموعة من المحاور الأسطوانية بغلاف الحزمة العصبية Perineurium (أحمر اللون) الذي يتكوّن من نسيج ضام مع ألياف من بروتين الكولاجين. يتكوّن العصب الكامل من العديد من هذه المجموعات؛ على سبيل المثال العصب الشوكي.

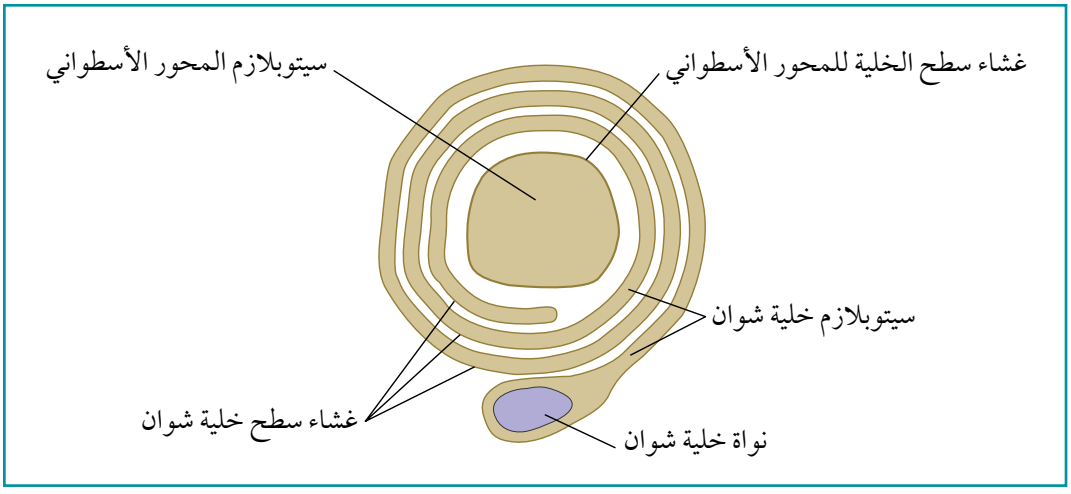


الصورة ٥-٤ صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) لمقطع عرضي في محور عصبي مايليني (x24000).

مصطلحات علمية

عقدة رانفييه Node of Ranvier: فاصل أو فجوة قصيرة جدًا بين خلايا شوان حيث تكون المحاور الأسطوانية العصبية المايلينية غير مغطاة بالمايلين لذا تكون مكشوفة للسائل النسيجي.

يوضح الشكل ٥-٥ كيفية التفاف خلية شوان بشكل لولبي حول المحور الأسطواني لخلية عصبية، وإحاطته بطبقات عديدة من غشاء سطح الخلية الخاص بها. يتكوّن هذا الغلاف المحيط، المسمى بغمد المايلين Myelin sheath، إلى حد كبير من الدهون، مع بعض البروتينات. يؤثر هذا الغمد على سرعة توصيل النبضات العصبية. يطلق على المناطق الصغيرة المكشوفة من المحور الأسطواني بين خلايا شوان اسم **عقد رانفييه Nodes of Ranvier**. توجد عقد رانفييه كل (1-3 mm) تقريبًا على طول المحاور الأسطوانية للخلايا العصبية في الإنسان. العقد نفسها صغيرة جدًا ويتراوح طولها بين (2-3 µm).

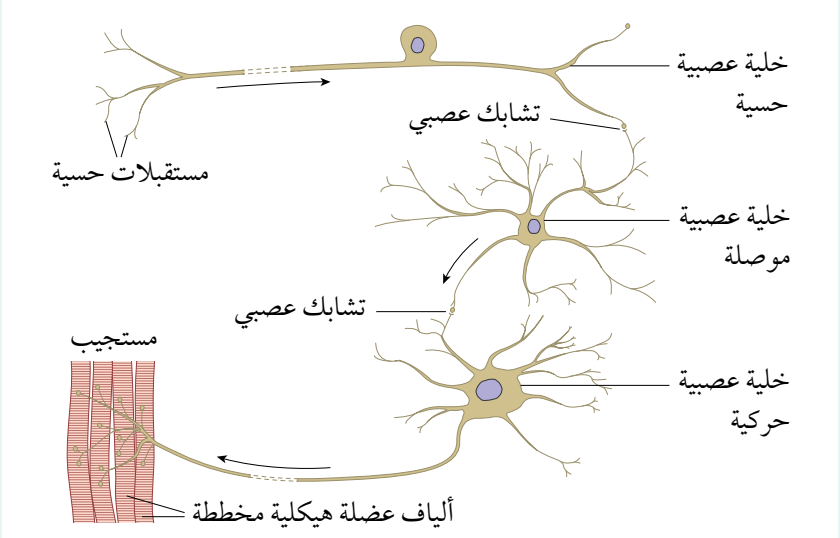


الشكل ٥-٥ رسم تخطيطي لمقطع عرضي في المحور الأسطواني لخلية عصبية مايلينية يوضح كيفية تكون المايلين بواسطة خلية شوان.

أسئلة

٤ استخدم أي مواد متاحة بسهولة لتكوين نموذج ثلاثي الأبعاد لخلية عصبية مايلينية لإظهار العلاقة بين المحور الأسطواني وغمد المايلين وعقد رانفييه.

٥ ما هي المزايا التي يحققها ترتيب الخلايا العصبية في سلسلة كما هو موضح في الشكل ٥-٦؟



الشكل ٥-٦ رسم تخطيطي بسيط لقوس الانعكاس - يوضح ترتيب ثلاث خلايا عصبية في سلسلة تعمل على تنسيق الاستجابة السريعة لمنبّه معيّن. تظهر الأسهم اتجاه انتقال النبضات العصبية في الخلايا العصبية الثلاث.

كيف تعمل الخلايا العصبية معًا

يوضح الشكل ٥-٦ كيف تعمل الخلايا العصبية الثلاث الحسية والموصلة والحركية معًا لإحداث استجابة لمنبّه معيّن. قوس الانعكاس Reflex arc هو المسار الذي تنتقل فيه النبضات العصبية من المُستقبِل إلى المستجيب من دون تدخل الدماغ (الصف التاسع، الوحدة السادسة).

لا تحتوي بعض أقواس الانعكاس على خلايا عصبية موصلة، وتنتقل النبضة العصبية مباشرة من الخلية العصبية الحسية إلى الخلية العصبية الحركية. من الأمثلة على ذلك الفعل المنعكس نفضة الركبة Knee-jerk reflex الذي يستخدمه أخصائيو الصحة لاختبار الجهاز العصبي. في داخل (CNS)، يكون للخلايا العصبية الحسية والخلايا العصبية الموصلة امتدادات تتفرع لتتصل مع الخلايا العصبية الأخرى في (CNS). تسمح هذه الامتدادات بتكامل المعلومات الواردة من الخلايا العصبية الحسية بحيث يمكن تنسيق أشكال معقدة من السلوك.

انتقال النبضات العصبية

تنقل الخلايا العصبية النبضات الكهربائية بسرعة كبيرة على طول غشاء سطح الخلية من أحد طرفَي الخلية العصبية إلى الطرف الآخر؛ وهي **ليست** تدفقًا للإلكترونات مثل التيار الكهربائي العادي، بل هي تغييرات قصيرة وسريعة جدًا في توزيع الشحنة الكهربائية على **جانبَي** غشاء سطح الخلية. يطلق على هذه النبضات اسم **جهد الفعل Action potential**. وتتسبب بحدوثها الحركة السريعة جدًا لأيونات الصوديوم وأيونات البوتاسيوم على جانبي غشاء المحور الأسطواني بين السائل النسيجي والسيتوبلازم.

جهد الراحة

تتميز بعض المحاور الأسطوانية في عدد من الحيوانات مثل الحبار وديدان الأرض بأنها غير مايلينية، وذات قطر كبير جدًا؛ بحيث إنه من الممكن إدخال أقطاب كهربائية صغيرة في السيتوبلازم لقياس التغيرات في الشحنة الكهربائية. يوضح الشكل ٥-٧ جزءًا من أحد هذه المحاور. المحور الأسطواني في حالة الراحة والذي لا يقوم بنقل النبضات الكهربائية، يكون داخله سالبًا مقارنة بالخارج (الشكلان ٥-٧ و ٥-٨). ويسمى هذا الفرق **فرق الجهد Potential difference**، وغالبًا ما يكون بين 60 mV- و 70 mV-. بمعنى آخر، يكون الجهد الكهربائي داخل المحور الأسطواني **أقل** بمقدار يتراوح بين 60 mV و 70 mV مقارنة بخارجه. يطلق على هذا الاختلاف اسم **جهد الراحة Resting potential**. هناك العديد من العوامل التي تُسهم في تكوين جهد الراحة في الخلية العصبية:

- مضخات الصوديوم - البوتاسيوم في غشاء سطح الخلية (الشكل ٥-٨ب).

تقوم هذه المضخات باستمرار بضخ أيونات الصوديوم (Na^+) إلى خارج المحور الأسطواني وأيونات البوتاسيوم (K^+) إلى داخل المحور الأسطواني. مضخات الصوديوم - البوتاسيوم هي بروتينات غشائية تستخدم الطاقة الناتجة من

مصطلحات علمية

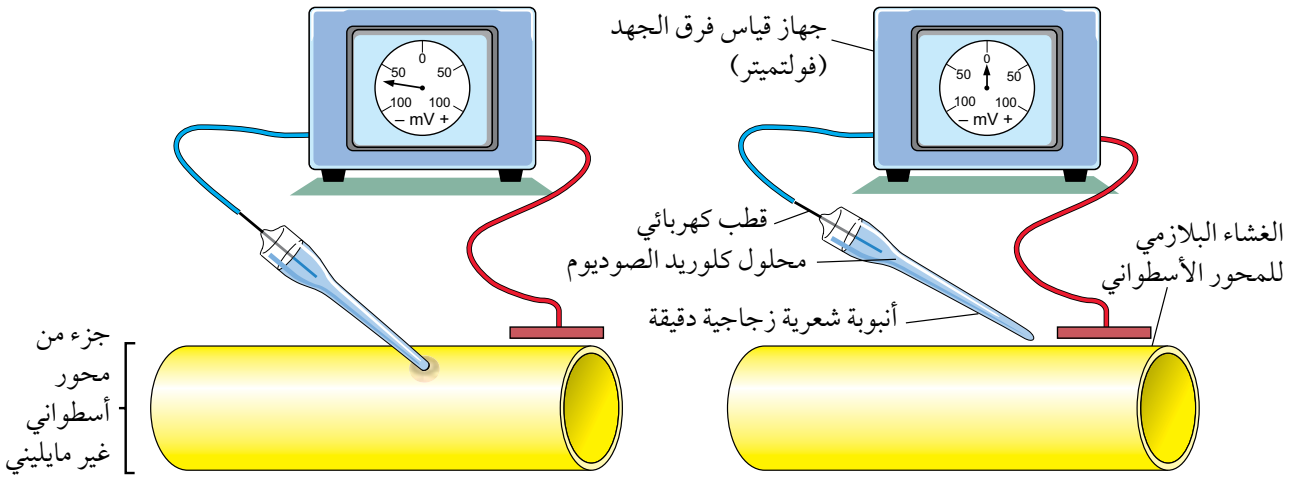
جهد الفعل Action potential: تغيير قصير ووجيز في فرق الجهد من 70 mV- إلى 30 mV+ عبر أغشية سطح الخلية للخلايا العصبية وخلايا العضلات سببه حركة أيونات الصوديوم إلى الداخل.

فرق الجهد Potential difference: الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتَين بشكل عام؛ وفي الجهاز العصبي، هي فرق الجهد بين داخل وخارج غشاء سطح الخلية مثل الغشاء الذي يحيط بالمحور الأسطواني.

جهد الراحة Resting potential: الفرق في الجهد الكهربائي الذي يتم الحفاظ عليه عبر غشاء سطح الخلية للخلايا العصبية عندما لا يقوم بنقل جهد فعل؛ عادة ما يكون نحو 70 mV- بالداخل ويتم الحفاظ عليه جزئيًا بواسطة مضخات الصوديوم والبوتاسيوم.

التحلل المائي لجزيئات ATP لضخ هذه الأيونات عكس منحدر تركيزها. يتم إخراج ثلاثة أيونات صوديوم من المحور الأسطواني مقابل إدخال اثنين من أيونات بوتاسيوم باستخدام الطاقة الناتجة من التحلل المائي لجزيء واحد من ATP.

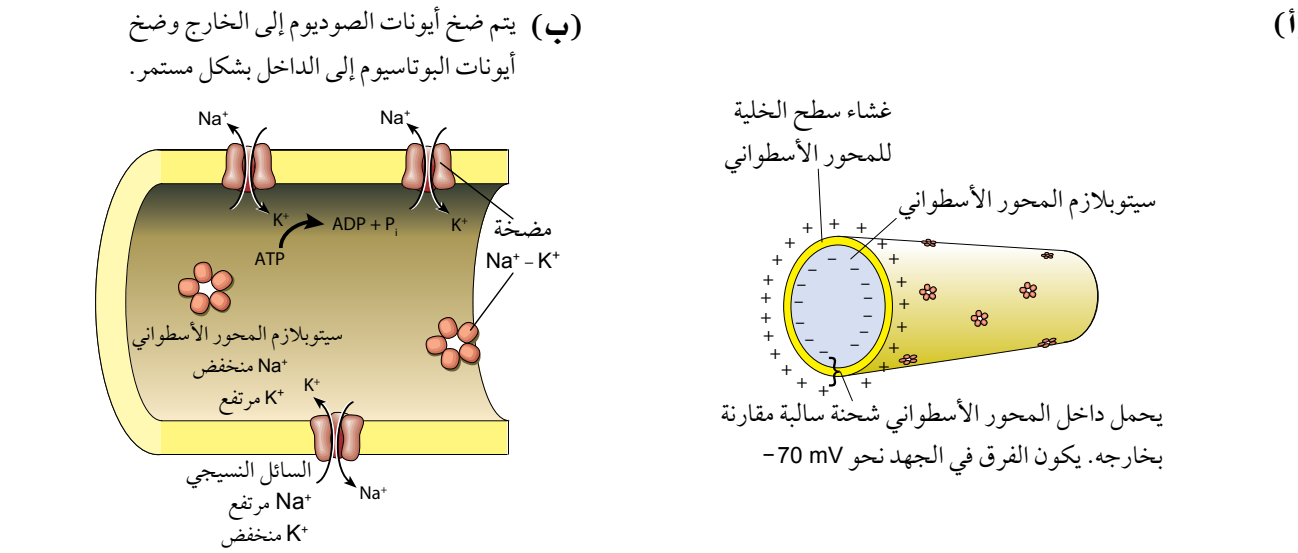
- وجود العديد من المواد العضوية التي تحمل جزيئاتها شحنة سالبة داخل الخلية مثل البروتينات سالبة الشحنة.
- عدم نفاذية غشاء سطح الخلية للأيونات؛ لا يمكن لأيونات الصوديوم أن تنتشر عبر غشاء سطح المحور الأسطواني خلال الطبقة المزدوجة من الدهون المفسفرة التي لها ذيول كارهة للماء، بحيث إنها لا تسمح بحركة الأيونات عبرها (الصف الحادي عشر، الوحدة الخامسة).



1. قبل لمس المحور الأسطواني، يكون القطبان الكهربائيان عند قيمة الجهد الكهربائي نفسه، لذا يُظهر الفولتميتر فرق جهد يساوي صفرًا.

2. عندما يتم غرز أحد القطبين الكهربائيين داخل المحور الأسطواني، يبيّن الفولتميتر أن هناك فرقًا في الجهد بين الداخل والخارج بنحو 70 mV– في الداخل مقارنة بالخارج.

الشكل ٥–٧ قياس جهد الراحة لمحور أسطواني



الشكل ٥–٨ (أ) في جهد الراحة، يكون للمحور الأسطواني جهد كهربائي سالب في الداخل.
(ب) تحافظ مضخة الصوديوم – البوتاسيوم على جهد الراحة من خلال الإبقاء على أيونات الصوديوم أكثر في السائل النسيجي مقارنة بتركيز أيونات البوتاسيوم في سيتوبلازم المحور الأسطواني.

- تغلق البروتينات القنوية التي تستجيب للتغيرات في فرق الجهد عبر غشاء الخلية، بحيث لا تتمكن أيونات الصوديوم والبوتاسيوم من الانتشار عبرها. سيتم وصف هذه البروتينات لاحقًا، وهي تُعرف باسم البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية Voltage-gated channel proteins.

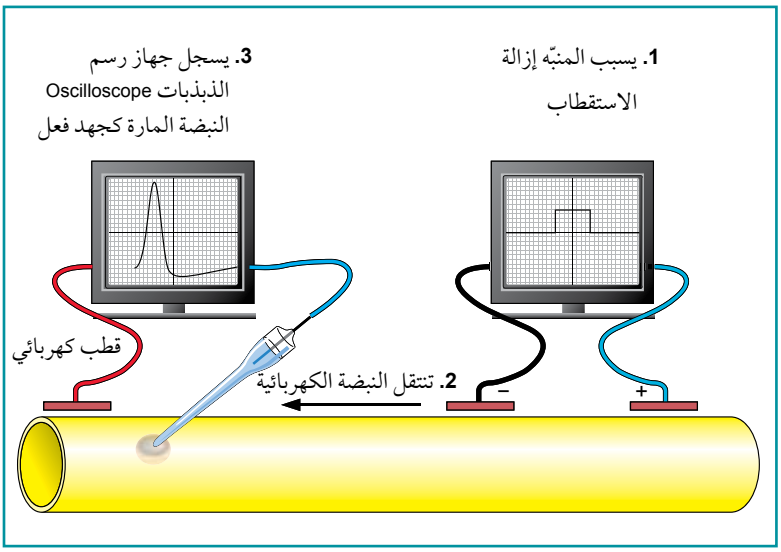
يحتوي غشاء الخلية على بروتينات قنوية تمر عبرها أيونات البوتاسيوم وأخرى تمر عبرها أيونات الصوديوم تكون **مفتوحة طوال الوقت**. يوجد عدد أكبر منها خاص بأيونات البوتاسيوم مقارنة بتلك الخاصة بأيونات الصوديوم. لذلك يمكن أن ينتشر المزيد من أيونات البوتاسيوم إلى الخارج مقارنةً بانتشار أيونات الصوديوم إلى الداخل. ومع ذلك، هناك العديد من الجزيئات الكبيرة سالبة الشحنة داخل الخلية التي تجذب أيونات البوتاسيوم، الأمر الذي يقلّل من فرصة انتشارها إلى الخارج. وتؤدي هذه التأثيرات إلى الزيادة الكلية للأيونات السالبة داخل الغشاء مقارنة بخارجه.

يتميز غشاء المحور الأسطواني بأنه غير منفذ نسبيًا لأيونات الصوديوم، إنما هناك شيئان يؤثران على حركة أيونات الصوديوم إلى الداخل أثناء حدوث جهد الفعل: هناك منحدر تركيز حاد، كما أن السطح الداخلي من غشاء الخلية يحمل شحنة سالبة، الأمر الذي يجذب الأيونات موجبة الشحنة إليه. يُعرف هذا المنحدر «المزدوج» بالمنحدر الكهروكيميائي (انظر الوحدة ٤ الاتزان الداخلي، الموضوع ٤-٥).

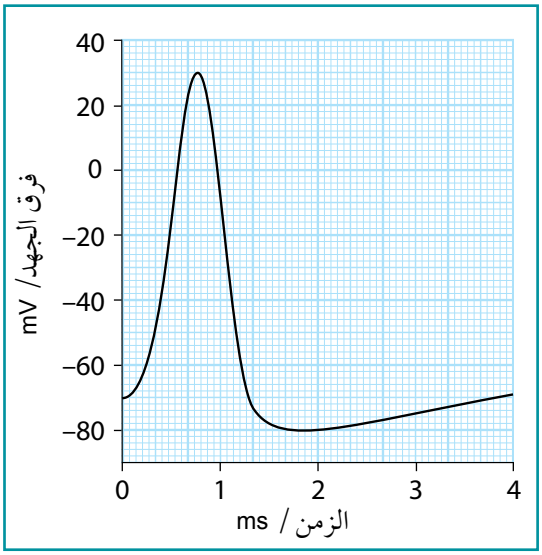
جهود الفعل

مع إضافة صغيرة إلى الجهاز الموضح في الشكل ٥-٧، من الممكن تنبيه المحور الأسطواني بواسطة تيار كهربائي صغير جدًا ولمدة وجيزة جدًا (الشكل ٥-٩). إذا تمّ تنبيه المحور الأسطواني بهذه الطريقة، فإن خط التتبع الثابت على شاشة الحاسوب يتغير فجأة. يتحوّل فرق الجهد الكهربائي عبر غشاء سطح الخلية للمحور الأسطواني فجأة من 70 mV- إلى 30 mV+. بعدها يعود فرق الجهد الكهربائي ذاك بسرعة إلى طبيعته بعد «ارتفاع حاد» لمدة وجيزة (الشكل ٥-١٠). تستغرق العملية بأكملها نحو 3 ms.

هذا التغيير السريع والعابر في فرق الجهد الكهربائي عبر غشاء سطح الخلية هو ما يعرف بجهد الفعل. وهو ناتج من تغيرات في نفاذية غشاء سطح الخلية لأيونات الصوديوم وأيونات البوتاسيوم.



الشكل ٥-٩ تسجيل جهود الفعل. يتم عرض التغيرات في فرق الجهد عبر غشاء محور أسطواني عندما تمر النبضة بالقطب الكهربائي.



الشكل ٥-١٠ تسجيل جهد الفعل في موقع واحد على محور أسطواني عصبي (كما هو موضح في الشكل ٥-٩).

بالإضافة إلى البروتينات القنوية المفتوحة طوال الوقت، هناك بروتينات قنوية أخرى في غشاء سطح الخلية تسمح لأيونات الصوديوم أو أيونات البوتاسيوم بالمرور عبرها. تفتح البروتينات القنوية وتغلق اعتمادًا على الفولتية أو حالة الجهد الكهربائي عبر الغشاء، ويطلق عليها اسم **البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية Voltage-gated channel proteins**. عندما يكون الغشاء في جهد الراحة، تكون هذه القنوات مغلقة.

يتسبب التيار الكهربائي المستخدم لتنبيه المحور الأسطواني بفتح قنوات الصوديوم المبوبة بالفولتية في غشاء سطح الخلية، ما يسمح بدخول أيونات الصوديوم عبرها. نظرًا إلى وجود تركيز أكبر بكثير من أيونات الصوديوم خارج المحور الأسطواني مقارنة بداخله بدايةً، حيث، يتم فتح عدد قليل فقط من القنوات. وتسبب حركة أيونات الصوديوم نحو الداخل تغييرات في فرق الجهد عبر الغشاء، والذي يصبح أقل سالبية في الداخل مقارنة بالخارج. وهذا ما يسمى **بإزالة الاستقطاب Depolarisation**. يؤدي هذا إلى فتح المزيد من القنوات بحيث تدخل المزيد من أيونات الصوديوم، ويترتب على ذلك المزيد من إزالة الاستقطاب. إذا وصل فرق الجهد إلى نحو mV 50–، فسيتم فتح المزيد من القنوات حتى يصل داخل الغشاء إلى جهد يعادل mV 30+ مقارنة بالخارج. وهذا مثال على التغذية الراجعة الإيجابية لأن مقادير صغيرة من إزالة الاستقطاب تؤدي إلى إزالة الاستقطاب بشكل سريع ومتتالٍ (الوحدة ٤، الاتزان الداخلي، الموضوع ٤–١). يتم توليد جهود الفعل فقط إذا وصل فرق الجهد إلى قيمة بين mV 60– و mV 50–. هذه القيمة هي **جهد العتبة Threshold potential**. وإذا لم يتم الوصول إلى هذه القيمة، فلن يحدث جهد فعل.

بعد نحو ms 1، تغلق جميع القنوات المبوبة بالفولتية لأيونات الصوديوم، لذلك تتوقف أيونات الصوديوم عن الانتشار إلى **داخل** المحور الأسطواني. في الوقت نفسه، تفتح مجموعة أخرى من البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية للسماح بانتشار أيونات البوتاسيوم إلى خارج المحور الأسطواني، مع منحدر تركيزها. تتسبب حركة أيونات البوتاسيوم إلى الخارج بانتقال الشحنة الموجبة من داخل المحور الأسطواني إلى خارجه، وبالتالي تعيد فرق الجهد إلى الوضع الطبيعي mV 70–. وهذا ما يُسمى **إعادة الاستقطاب Repolarisation**. وفي الواقع، يصبح فرق الجهد عبر الغشاء، لفترة وجيزة، أكثر سالبية من جهد الراحة في الحالة الطبيعية (الشكل ٥–١٠). بعد ذلك، تنغلق البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات البوتاسيوم، وتعود البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات الصوديوم للاستجابة مرة أخرى لحالة إزالة الاستقطاب. تستمر مضخة الصوديوم–البوتاسيوم في ضخ أيونات الصوديوم إلى الخارج وأيونات البوتاسيوم إلى الداخل طوال الوقت. تحافظ هذه المضخات على توزيع أيونات الصوديوم وأيونات البوتاسيوم عبر الغشاء بحيث يمكن لجهود الفعل أن تستمر في الحدوث.

استخدم إصبعك للنقر على مكان واحد على سطح صلب مثل سطح طاولة. انقر بشكل أسرع وارصد عدد المرات التي يمكنك فيها النقر بإصبعك خلال 15 ثانية. احسب معدل تكرار النقرات في الثانية الواحدة. قارن هذا المعدل مع معدل تكرار تكوّن النبضة العصبية في خلية عصبية. تذكّر أن كل نبضة عصبية تمثل انتقال جهد فعل (نقرة إصبع) على طول خلية عصبية، وأن المعلومات حول قوة المنبّهات يمكن ترميزها على أنها معدل تكرار النبضات العصبية.

مصطلحات علمية

بروتين قنوي مبوب بالفولتية Voltage-gated channel protein: بروتين قنوي غائر يمتد عبر غشاء سطح الخلية يفتح أو ينغلق استجابة للتغيرات في الجهد الكهربائي عبر الغشاء.

إزالة الاستقطاب Depolarisation: انعكاس جهد الراحة عبر غشاء سطح الخلية لخلية عصبية أو عضلية، بحيث يصبح الداخل مشحونًا بشحنة موجبة مقارنة بشحنة الخارج.

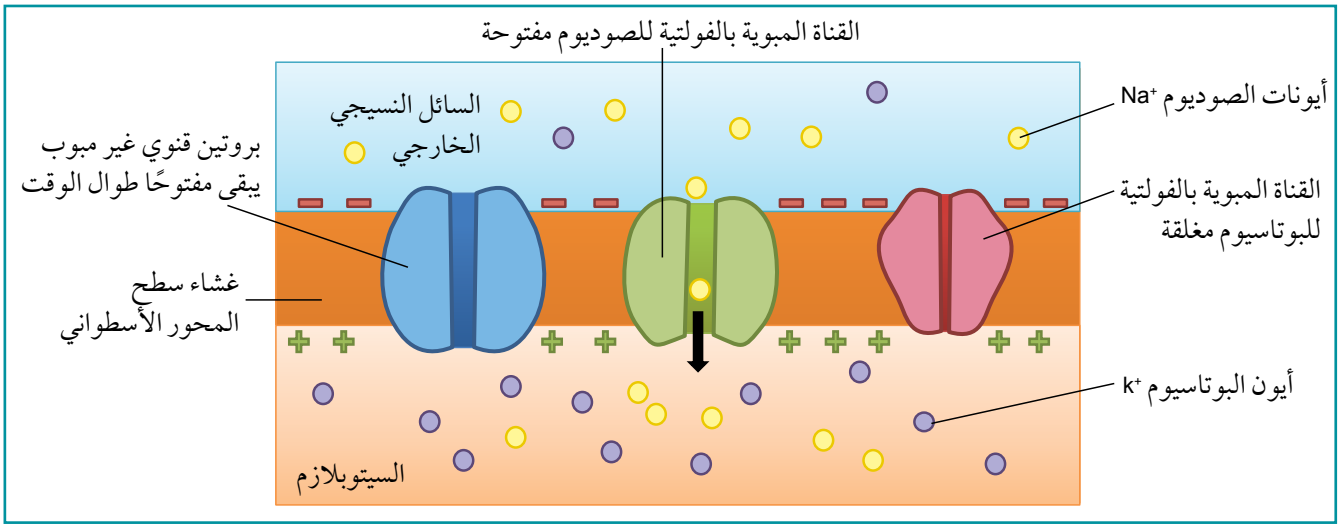
جهد العتبة Threshold potential: فرق الجهد الحرج عبر غشاء سطح الخلية لمستقبلات حسية أو لخلية عصبية والذي يجب الوصول إليه قبل بدء جهد الفعل.

إعادة الاستقطاب Repolarisation: إعادة فرق الجهد عبر غشاء سطح الخلية لخلية عصبية أو عضلية إلى وضعه الطبيعي الذي يتبع عملية إزالة استقطاب جهد الفعل.

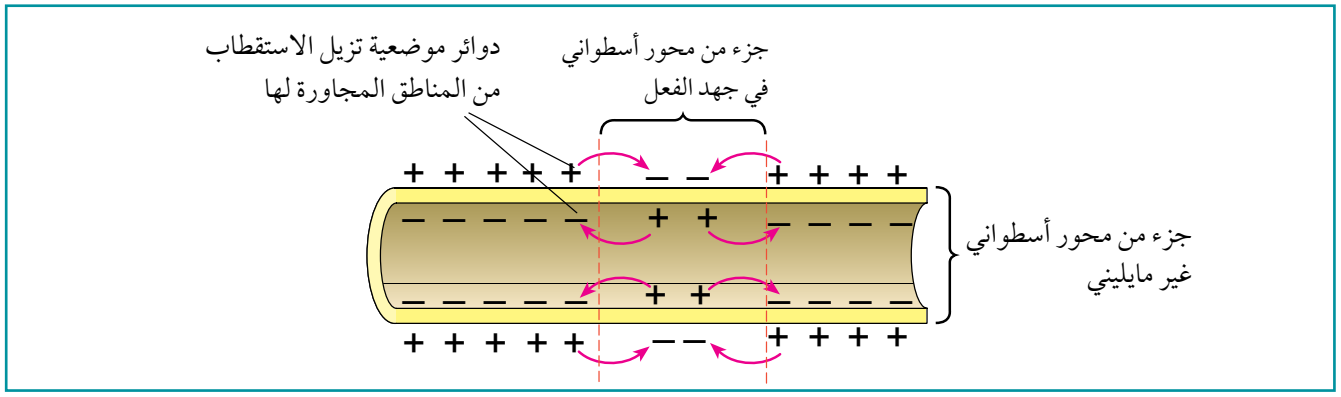
يوضح الشكل ٥-١٠ ما يحدث في نقطة معيّنة في غشاء محور أسطواني. ومع ذلك، فإن وظيفة الخلية العصبية هي نقل المعلومات نفسها **على طولها**. كيف تساعد جهود الفعل في نقل المعلومات عبر خلية عصبية؟

يؤدي جهد الفعل عند أي نقطة في غشاء سطح خلية محور أسطواني إلى إنتاج جهد فعل في الغشاء على جانبَي تلك النقطة (خارجها وداخلها). يوضح الشكل ٥-١٢ كيف يحدث هذا. يؤدي إزالة الاستقطاب المؤقت للغشاء في موقع جهد الفعل إلى تدفق التيار في كلا الاتجاهَين بين منطقة إزالة الاستقطاب والمناطق التي تكون في حالة راحة على جانبَيها. تزيل هذه الدوائر الموضعية الاستقطاب في المناطق التي تكون في حالة الراحة، حيث تفتح البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات الصوديوم، ويصل الجهد الكهربائي للغشاء إلى جهد العتبة بحيث تتمكن جهود الفعل من المرور على طول الغشاء.

يتدفق التيار بسبب وجود اختلاف في الشحنة بين داخل غشاء المحور الأسطواني وخارجه. من المتفق عليه توضيح اتجاه تدفق التيار بواسطة أسهم تشير من الشحنة الموجبة باتجاه الشحنة السالبة، كما هو موضح في الشكل ٥-١٢.



الشكل ٥-١١ القنوات البروتينية في غشاء المحور الأسطواني. تبقى القنوات غير المبوبة مفتوحة طوال الوقت لتسمح بحرية مرور الأيونات والماء عبر الغشاء ما يساعد على الحفاظ على الاتزان في التركيب والفولتية. في حين يظهر الرسم التخطيطي حدوث إزالة الاستقطاب: البروتين القنوي لأيونات الصوديوم المبوب بالفولتية تفتح فتمر أيونات الصوديوم إلى السيتوبلازم، ما يجعل داخل المحور الأسطواني مشحونًا بشحنة موجبة مقارنة بالشحنة خارج المحور الأسطواني.



الشكل ٥-١٢ كيفية مرور جهد الفعل على طول محور أسطواني لخلية عصبية. تم تنبيه وسط المحور الأسطواني بواسطة قطب كهربائي لإزالة الاستقطاب. أجزاء المحور الأسطواني إلى اليسار واليمين في جهد الراحة. يعمل تدفق التيار (الموضح بالأسهم) على إزالة استقطاب الأجزاء المجاورة بحيث تمر النبضات العصبية على طول المحور الأسطواني في كلا الاتجاهَين بعيدًا عن الجزء الذي تّم تنبيهه.

مصطلحات علمية

فترة الجموح

Refractory period: فترة زمنية تتعافى خلالها الخلية العصبية من جهد الفعل للعودة إلى وضع جهد الراحة، ولا يمكن خلالها حدوث جهد فعل آخر.

تحدث إزالة الاستقطاب على جانبَي جهد الفعل فقط في الوضع التجريبي عندما يتم التنبيه في مكان ما على طول المحور الأسطواني، كما في الشكل ٥-١٢. في الجسم، تبدأ جهود الفعل عند أحد طرفَي المحاور الأسطوانية، على سبيل المثال، في مكان اتصال المحور الأسطواني مع جسم الخلية العصبية. يتم توليد جهود فعل «جديدة» في اتجاه الأمام وليس في اتجاه الخلف. هذا لأن المنطقة الواقعة في الخلف تكون في حالة تعافٍ من جهد الفعل الذي حدث فيها للتو، لذلك يتم إغلاق البروتينات القنوية المبوبةً بالفولتية لأيونات الصوديوم. تكون هذه القنوات مغلقة بإحكام بحيث لا يمكن فتحها. تسمى فترة التعافي (العودة إلى الوضع الطبيعي)، والتي لا يستجيب خلالها المحور الأسطواني، باسم **فترة الجموح** **Refractory period**. وهذا يعنى:

- جهود الفعل هي أحداث منفصلة، ولا يندمج أحدها مع الآخر.
- هناك حد أدنى من الزمن يفصل بين جهود الفعل التي تحدث في أي منطقة محددة على غشاء سطح خلية عصبية معيّنة.
- يحدد طول فترة الجموح أقصى تكرار تنتقل به النبضات العصبية على طول الخلايا العصبية؛ بالنسبة إلى العديد من الخلايا العصبية، يتراوح هذا بين 200 و 300 نبضة عصبية في الثانية.
- يمكن للنبضة العصبية أن تنتقل في اتجاه واحد فقط على طول الخلية العصبية.

سؤال

٦ انقل الشكل ٥-١٠.

أ. على الرسم الخاص بك، ارسم خطًا أفقيًا عبر التمثيل البياني لتمثيل جهد الراحة.

ب. ماذا يعني القول: «إن جهد الراحة في الداخل يكون -70 mV؟»

ج. صف كيف تحافظ الخلية العصبية على جهد الراحة هذا؟

د. عندما يبدأ جهد الفعل، يتغير فرق الجهد من -70 mV إلى +30 mV في الداخل:

١. لماذا يسمى هذا بـ **إزالة الاستقطاب**؟.

٢. ضع تعليقات توضيحية على التمثيل البياني الخاص بك لوصف ما يحدث في غشاء المحور الأسطواني ويؤدي إلى إزالة الاستقطاب.

هـ. أضف إلى التمثيل البياني الخاص بك تعليقًا توضيحيًا لوصف ما يحدث بين 1 ms و 2 ms.

و. إذا بدأ جهد الفعل في الزمن صفر، فكم يبلغ الزمن الذي تستغرقه استعادة جهد الراحة؟

ز. ١. حدد فترة الجموح على التمثيل البياني الخاص بك.

٢. ما هي أدوار فترة الجموح؟

ح. وابين Ouabain مادة سامة توقف نشاط مضخات الصوديوم-البوتاسيوم. إذا تمّت إضافة وابين إلى جزء من محور أسطواني وفي مكان محدد على طوله، يمكن أن تستمر جهود الفعل بالمرور في تلك المنطقة لنحو 1000 نبضة عصبية. اقترح سبب عدم توقف جهود الفعل عن التكوُّن على الفور.

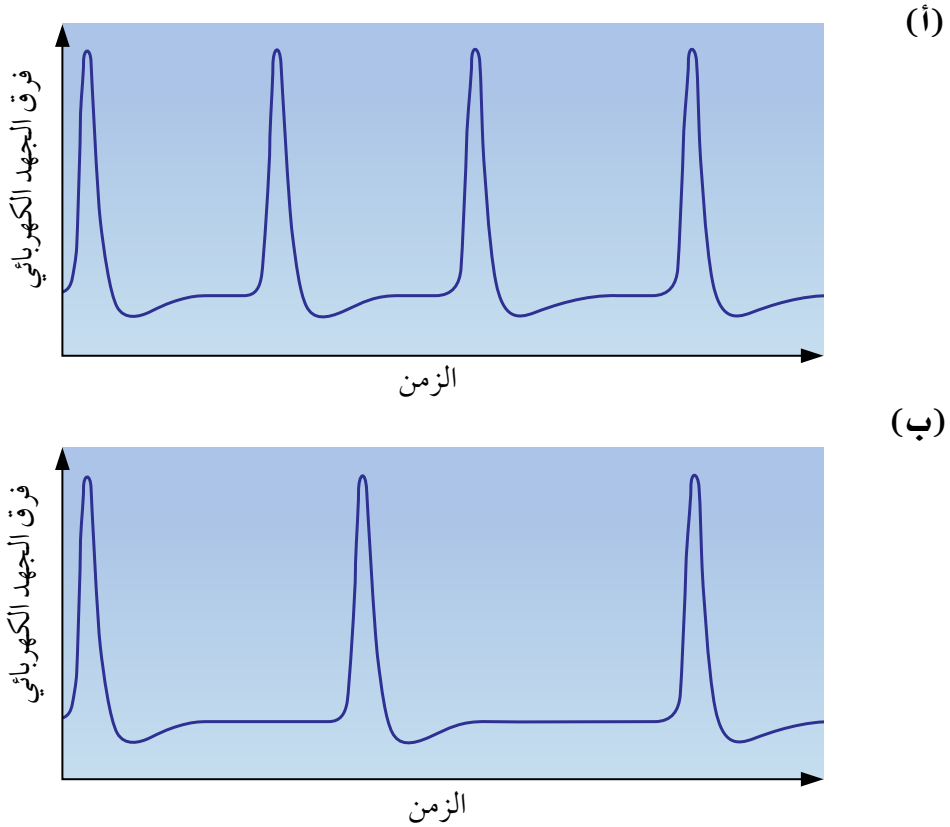
كيف تحمل جهود الفعل المعلومات؟

لا تتغير سعة Amplitude (اتساع الموجات وارتفاعاتها) جهود الفعل أثناء انتقالها، ولا تتغير وفقًا لقوّة المنبّه. تستمر جهود الفعل في الوصول إلى قمة Peak تبلغ +30 mV في داخل المحور الأسطواني وعلى امتداده. على سبيل المثال، يتسبب الضوء القوي الساطع في عينيك في إنتاج جهود فعل بالقوة أو بالقياس نفسه الذي يتسبب فيه الضوء الخافت.

لا تتغير السرعة التي تنتقل بها جهود الفعل وفقًا لقوّة المنبّه. ففي أي محور أسطواني، تكون سرعة انتقال النبضات العصبية هي نفسها دائمًا.

ما يختلف في جهود الفعل الناتجة من منبّه قوي ومنبّه ضعيف هو تكرار عدد هذه الجهود في وحدة الزمن. ينتج المنبّه القوي تتابعًا سريعًا لجهود الفعل، يتبع كل واحد منها على طول المحور الأسطواني جهد الفعل السابق له مباشرة. في المقابل ينتج من المنبه الضعيف عدد أقل من جهود الفعل مما ينتجه المنبِّه القوي في الثانية الواحدة (الشكل ٥-١٣).

يحفز المنبّه القوي عددًا أكبر من الخلايا العصبية مقارنة بالمنبّه الضعيف. ففي حين أن منبهًا ضعيفًا قد ينتج منه جهود فعل تمر عبر واحدة أو اثنتَين فقط من الخلايا العصبية، فإن المنبّه القوي يمكن أن ينتج جهود فعل في العديد من الخلايا العصبية الأخرى.



الشكل ٥-١٣ مخططات لتسجيل جهود الفعل الناتجة من (أ) منبّه قوي و (ب) منبّه ضعيف. لاحظ أن السعة لكل جهد فعل تبقى ثابتةً في الحالتَين، وما يتغير فقط هو تكراره. (أ) ينتج تكرار أكثر من النبضات العصبية عندما يتلقى المستقبل منبّهًا قويًا. هذا التكرار الكثير يحمل رسالة «منبّه قوي». (ب) ينتج تكرار أقل من النبضات العصبية عندما يتلقى المستقبِل منبّهًا أضعف. هذا التكرار الأقل يحمل رسالة «منبّه ضعيف».

يعمل الدماغ على تفسير **تكرار** *Frequency* جهود الفعل التي تصل إليه على طول المحور الأسطواني لخلية عصبية حسية، و**عدد** الخلايا العصبية الحسية التي تنقل جهود الفعل، من أجل الحصول على معلومات حول **قوَّة** المنبّه الذي يتم استقباله في الدماغ عند وصولها إليه. يتم تحديد **طبيعة** المنبّه، سواء كان ضوءًا، أو حرارة، أو لمسًا، وما إلى ذلك، من خلال تحديد **موضع** الخلية العصبية الحسية التي تجلب المعلومات. على سبيل المثال، إذا كان مكان الخلايا العصبية الحسية في شبكية العين، فسوف يفسر الدماغ المعلومات على أنها «ضوء». وإذا قام منبّه مختلف، لسبب ما، مثل منبّه الضغط، بتنبيه خلية مستقبلة في شبكية العين، فسيستمر الدماغ بتفسير جهود الفعل من هذا المستقبل على أنها «الضوء» وليس «الضغط». هذا هو السبب في أن فرك العينَين عندما تكونان مغمضتَين يمكن أن يتسبب في «رؤية» أنماط من الضوء فيهما.

سرعة انتقال النبضات العصبية

هناك عاملان يحددان سرعة انتقال النبضات العصبية:

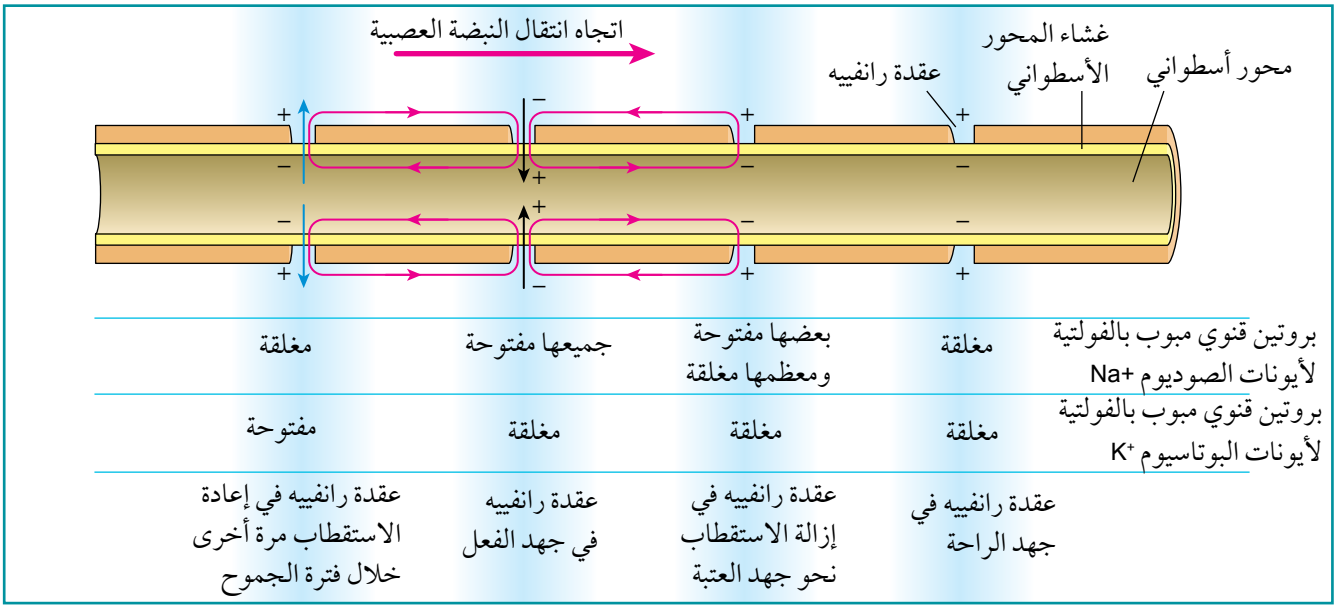
- وجود أو عدم وجود غلاف المايلين حول المحور الأسطواني.
- قطر المحور الأسطواني.

في الخلايا العصبية غير المايلينية، تكون سرعة انتقال التوصيل بطيئة، حيث تصل إلى 0.5 m/s في بعض الحالات. في الخلايا العصبية المايلينية في الثدييات، تنتقل جهود الفعل بسرعات كبيرة تصل إلى 100 m/s. يزيد وجود المايلين من معدل انتقال جهود الفعل عن طريق عزله لغشاء سطح المحور الأسطواني. لا تستطيع أيونات الصوديوم وأيونات البوتاسيوم المرور عبر غمد المايلين، لذلك فإنه من غير الممكن إزالة الاستقطاب أو تكوّن جهود الفعل في أجزاء من المحور العصبي المحاطة بغلاف المايلين. يمكن لجهود الفعل أن تحدث فقط في عقد رانفييه، حيث تتركز فيها جميع جزيئات البروتينات القنوية وبروتينات مضخة Na^+/K^+.

يوضح الشكل ٥-١٤ كيفية انتقال جهد الفعل على طول محور أسطواني محاط بغلاف المايلين. تنتقل الدوائر الموضعية من عقدة رانفييه إلى العقدة التي تليها. وبالتالي، فإن جهود الفعل «تقفز» من عقدة إلى العقدة التي تليها، وعبر مسافة مقدارها نحو (1-3 mm). تسمى طريقة الانتقال هذه باسم **النقل الوثبي Saltatory conduction**. في المحور الأسطواني المايليني، يمكن للنقل الوثبي أن يزيد من سرعة التوصيل بما يصل إلى 50 ضعف سرعة انتقالها على طول محور أسطواني غير مايليني له القطر نفسه.

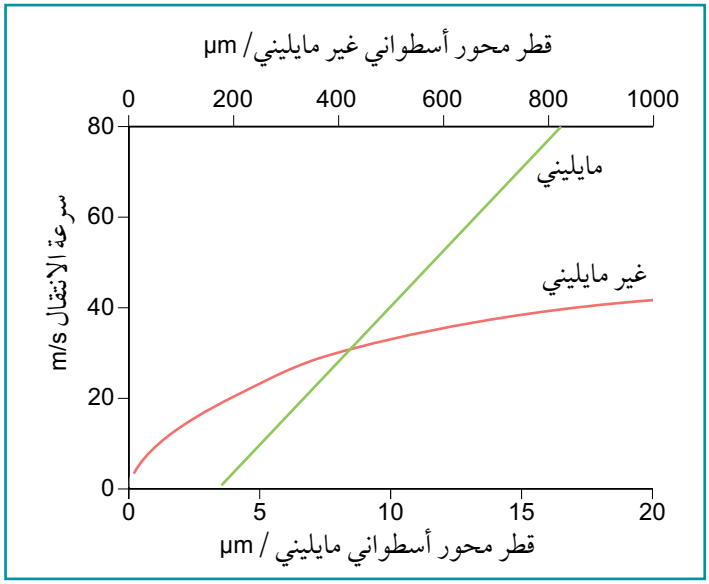
مصطلحات علمية

النقل الوثبي
Saltatory conduction:
انتقال جهد الفعل على طول محور أسطواني مايليني، حيث «يقفز» جهد الفعل من عقدة رانفييه إلى العقدة التالية.



الشكل ٥-١٤ انتقال جهد الفعل في محور أسطواني مايليني. يعمل غلاف المايلين كعازل، ويمنع التغيرات في جهد الغشاء عبر أجزاء غشاء المحور الأسطواني المحاط بالمايلين. تحدث التغيرات في جهد الغشاء فقط في عُقد رانفييه. وبالتالي، فإن جهد الفعل «يثب» من عقدة إلى العقدة التي تليها، وتنتقل بسرعة أكبر بكثير من سرعة انتقالها عبر محور أسطواني غير مايليني.

يؤثر قطر المحور الأسطواني أيضًا على سرعة انتقال النبضات العصبية (الشكل ٥-١٥). تنقل المحاور الأسطوانية السميكة (ذات القطر الكبير) النبضات العصبية أسرع من تلك الرفيعة (ذات القطر الصغير). السبب في ذلك هو أن المحاور الأسطوانية السميكة لديها مساحة سطح أكبر يمكن أن يحدث فيها انتشار الأيونات، ما يزيد من معدل انتشار هذه الأيونات. اللافقاريات كالحبار وديدان الأرض لا تمتلك محاور أسطوانية مايلينية، ولكن لديها عدد قليل من المحاور الأسطوانية العملاقة ذات القطر الكبير غير المايليني التي تمتد على طول أجسامها.



الشكل ٥-١٥ سرعة الانتقال في المحاور الأسطوانية المايلينية وغير المايلينية ذات الأقطار المختلفة.

سؤال

(٧) استخدم المعلومات في الجدول ٥-٢ للإجابة عمّا يأتي:

أ. إذا كانت الخلايا العصبية المايلينية قادرة على نقل النبضات العصبية بسرعة كبيرة، فلماذا تمتلك الثدييات كالإنسان خلايا عصبية غير مايلينية؟

ب. ما هي الوظيفة المحتملة للمحاور الأسطوانية العملاقة في الحبار وديدان الأرض؟

ج. اشرح تأثير قطر المحور الأسطواني المايليني على سرعة انتقال النبضات العصبية في الإنسان؟

د. قارن بين سرعة انتقال النبضات العصبية في محاور الحبار ومحاور مستقبلات الضغط في جلد الإنسان. اقترح سبب الاختلاف.

المحور الأسطواني	سرعة انتقال النبضات العصبية		
	قطر المحور الأسطواني/ µm	المايلين	سرعة الانتقال m/s
محاور الحبار العملاقة	500	لا	25
محاور حركية كبيرة لعضلات رجل الإنسان	20	نعم	120
محاور من مستقبلات الضغط بجلد الإنسان	10	نعم	50
محاور من مستقبلات الحرارة من جلد الإنسان	5	نعم	20
محاور حركية لأعضاء الإنسان الداخلية	1	لا	2

الجدول ٥-٢ سرعة انتقال النبضات العصبية في محاور أسطوانية للحبار والإنسان.

مصطلحات علمية

المستقبل الكيميائي Chemoreceptor: خلية مستقبلة تستجيب للمنبهات الكيميائية؛ توجد المستقبلات الكيميائية في براعم التذوق على اللسان، وفي الأنف (الشم)، وفي الأوعية الدموية حيث يمكنها تحسّس التغيرات في تركيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون.

ما الذي يسبب بدء جهد الفعل؟

كان المنبّه المسبِّب لجهد الفعل الذي تم وصفه سابقًا، تيارًا كهربائيًا صغيرًا. في الحياة الواقعية، يتم توليد جهود الفعل من خلال مجموعة متنوعة من المنبهات، مثل الضوء، الضغط (اللمس)، الصوت، درجة الحرارة أو المواد الكيميائية.

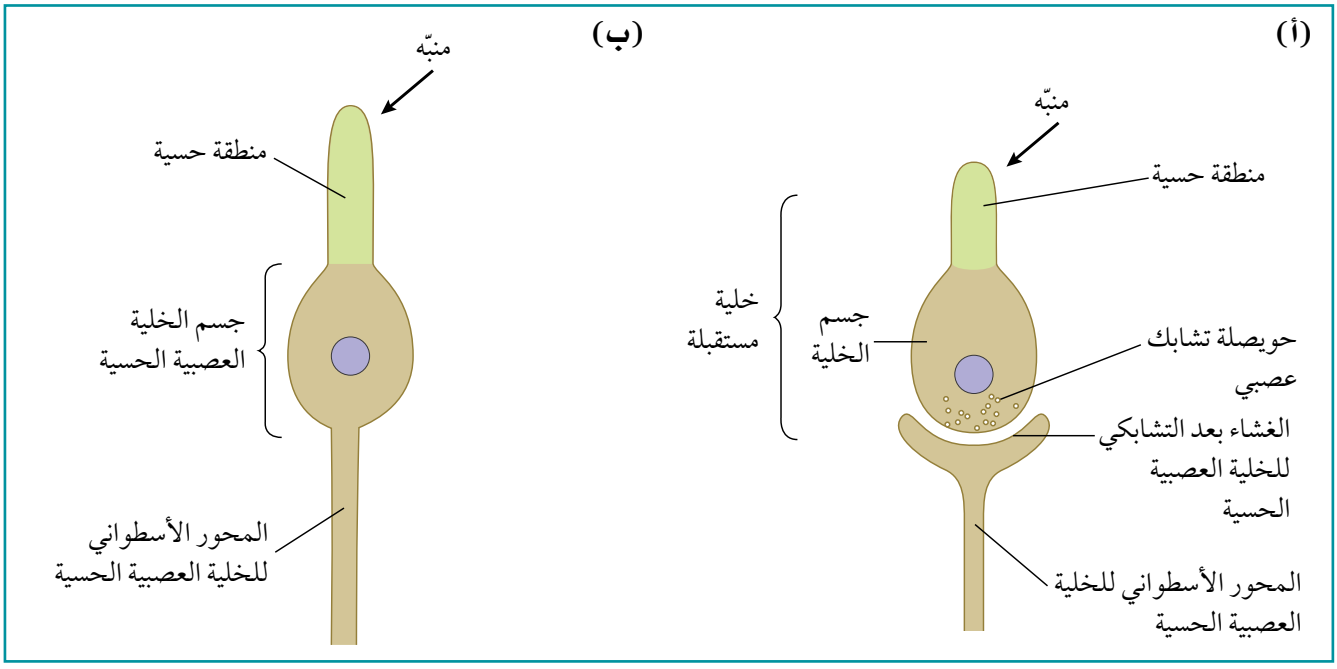
تسمى الخلية التي تستجيب لأحد هذه المنبهات من خلال توليد جهد فعل فيها باسم الخلية المستقبلة Receptor cell. الخلايا المستقبلة هي عبارة عن محولات للطاقة Transducers: فهي تقوم بتحويل الطاقة التي تحتويها المنبهات مثل الضوء أو الحرارة أو الصوت إلى نبضات كهربائية في الخلايا العصبية (الجدول ٥-٣).

غالبًا ما توجد الخلايا المستقبلة في الأعضاء الحسية؛ على - سبيل المثال - توجد الخلايا المستقبلة للضوء في شبكية العين، وتوجد الخلايا المستقبلة للصوت في الأذن الداخلية. بعض المستقبلات، مثل مستقبلات الضوء في العين و **المستقبلات الكيميائية Chemoreceptors** في براعم التذوق، هي خلايا متخصصة يمكنها تحسس نوع معيّن من

المنبهات وتؤثر على النشاط الكهربائي لخلية عصبية حسية. هناك مستقبلات أخرى، مثل بعض أنواع مستقبلات اللمس، تمثل ببساطة نهايات الخلايا العصبية الحسية نفسها (الشكل ٥-١٦).

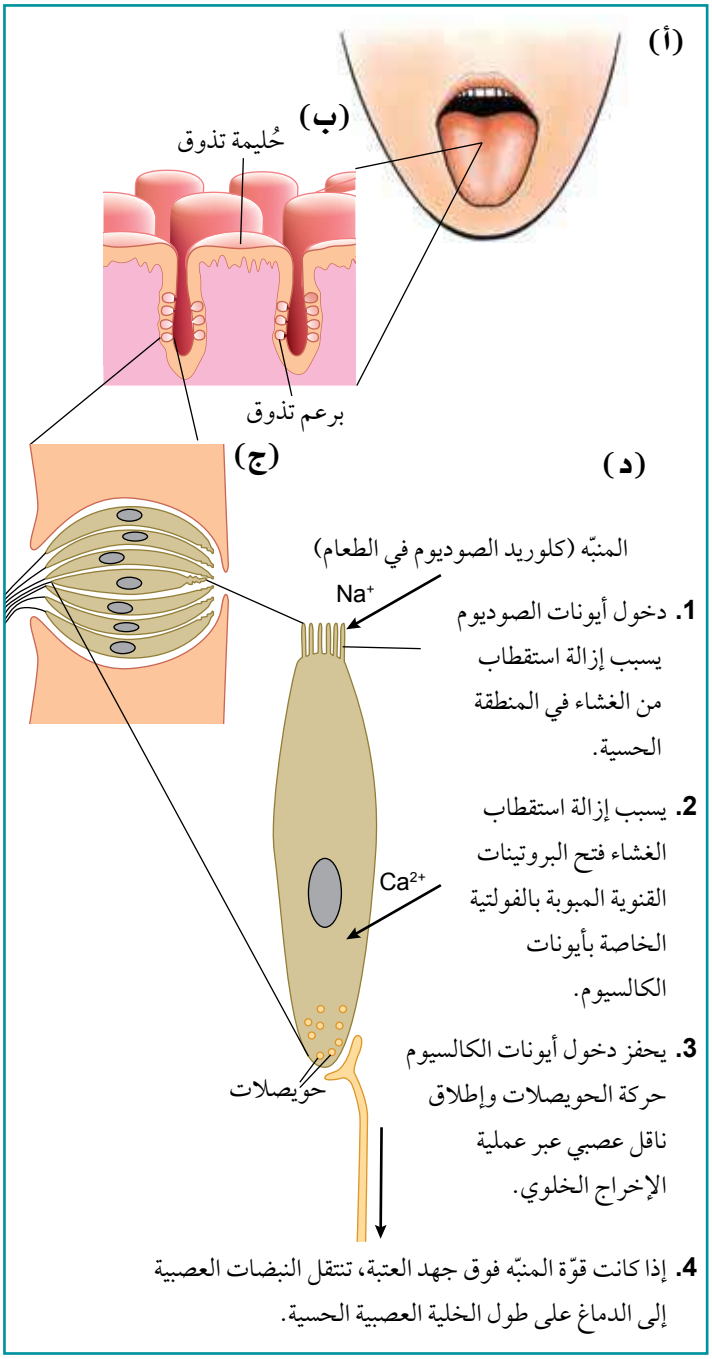
المستقبل	الحاسة	طاقة المنبه
الخلايا العصوية أو المخروطية في الشبكية	البصر	الضوء
براعم التذوق على اللسان	التذوق	جهد كيميائي
الخلايا الشمية في الأنف	الشم	جهد كيميائي
جسيمات باتشيني في الجلد	الضغط	الحركة والضغط
جسيمات مايسنر في الجلد	اللمس	الحركة والضغط
نهايات رافيني في الجلد	درجة الحرارة	الحرارة
مستقبلات الحس العميق في العضلات (مستقبلات التمدد)	موضع الأطراف	الإزاحة الميكانيكية – التمدد
الخلايا الشعرية في القنوات نصف الهلالية في الأذن	التوازن	الحركة
الخلايا الشعرية في قوقعة الأذن	السمع	الصوت

الجدول ٥-٣ بعض الأمثلة على المستقبِلات. كل مستقبل هو محول طاقة يحول طاقة المنبه إلى نبضات في الخلايا العصبية الحسية. تستجيب جميع المستقبِلات في الجدول للمنبهات الخارجية باستثناء مستقبِلات التمدد التي تستجيب للتغيرات التي تحدث داخل العضلات. هناك العديد من المستقبِلات الأخرى التي تستجيب للمنبهات الداخلية.



الشكل ٥-١٦ (أ) يمكن أن تكون المستقبلات خلايا متخصصة (ب) أو نهايات الخلايا العصبية الحسية.

تغطي لسانك العديد من النتوءات الصغيرة أو الحُليمات Papillae. كل حُليمة لديها العديد من براعم التذوق على سطحها (الشكل ٥-١٧). يوجد داخل كل برعم تذوق ما بين 50 و 100 خلية مستقبلة حساسة للمواد الكيميائية المذابة في السوائل التي تشربها أو تلك المواد الكيميائية الموجودة في طعامك، والتي تذوب في اللعاب. تغطي سطح كل مستقبل كيميائي بروتينات مستقبلة يمكنها تحسس هذه المواد الكيميائية المختلفة. هناك عدة أنواع من البروتينات المستقبلة، كل منها يمكنه تحسس نوع مختلف من المواد الكيميائية ما يمنحك طعمًا مختلفًا. كما أن هناك خمسة مذاقات يمكنك الإحساس بها: الطعم الحلو، والحامض، والمالح، والمر، وطعم الأومامي Umami (طعام لذيذ مالح الطعم؛ موجود في الأجبان القديمة، واللحوم المعالجة، والطماطم، والفطر، وسمك السلمون، وشرائح اللحم، والشاي الأخضر، وغير ذلك).



الشكل ٥-١٧ (أ) توجد براعم التذوق في الحليمات التي تتوزع على سطح اللسان (ب) مقطع عرضي خلال حُليمة يوضح توزيع براعم التذوق (ج) برعم تذوق (د) تفاصيل خلية مستقبلة كيميائية واحدة.

المستقبلات الكيميائية في براعم التذوق التي تتحسس طعم الملح، تتأثر بشكل مباشر بأيونات الصوديوم (الشكل ٥-١٧د). تنتشر هذه الأيونات من خلال بروتينات قنوية انتقائية موجودة في غشاء سطح الخلية للخملات الدقيقة ما يؤدي إلى إزالة استقطاب هذا الغشاء. تمثل الزيادة في مقدار الشحنة الموجبة داخل الخلية **جهد المستقبل Receptor potential**. إذا كان هناك تنبيه كافٍ بواسطة أيونات الصوديوم في الفم، فإن جهد المستقبل يصبح كبيرًا بما يكفي لتحفيز فتح البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية الخاصة بأيونات الكالسيوم. تدخل أيونات الكالسيوم إلى السيتوبلازم وتؤدي إلى عملية إخراج خلوي للحويصلات التي تحتوي على ناقل عصبي من الغشاء القاعدي للمستقبل الكيميائي. يحفز الناقل العصبي حدوث جهد الفعل في الخلية العصبية الحسية التي تنقل النبضات العصبية إلى مركز التذوق في القشرة المخية للدماغ.

مصطلحات علمية

جهد المستقبل Receptor potential: تغير في جهد الراحة الطبيعي عبر غشاء خلية مستقبلة، ناتج من تأثير منبّه فيه.

مصطلحات علمية

قانون «الكل أو العدم» All-or-none law: تنقل الخلايا العصبية والخلايا العضلية النبضات إذا كان المنبّه الأولي كافيًا لزيادة جهد غشاء الخلية فوق جهد العتبة.

عندما يتم تنبيه المستقبلات، فإنها تصبح في حالة إزالة الاستقطاب. وإذا كان المنبّه ضعيفًا جدًا وأقل من جهد العتبة، فلن يحدث إزالة استقطاب كافٍ، ولا يتم تنشيط الخلايا العصبية الحسية لإرسال نبضات عصبية (الشكل ٥-١٨). إذا كان جهد المستقبل أعلى من جهد العتبة، فإن الخلية المستقبلة تحفز الخلية العصبية الحسية لتقوم بإرسال النبضات. هذا مثال على **قانون «الكل أو العدم» All-or-none law**؛ إما أن تنقل الخلايا العصبية النبضات العصبية من أحد طرفَيها إلى الآخر أو لا تنقلها نهائيًا. كما رأيت في السابق، فإن جهود الفعل لها دائمًا السعة نفسها (ارتفاع المنحنى عند دراستها مخبريًا). مع زيادة قوّة المنبّهات، يتم إنتاج جهود الفعل بشكل أكثر تكرارًا، ولا تصبح جهود الفعل أكبر؛ حيث إن لدى كل منها السعة نفسها.

سؤال

(٨) استخدم الشكل ٥-١٨ للإجابة عن الأسئلة الآتية:

أ. اشرح المقصود بالمصطلحات العلمية الآتية:

١. **جهد المُستقبل.**

٢. **جهد العتبة للمُستقبل.**

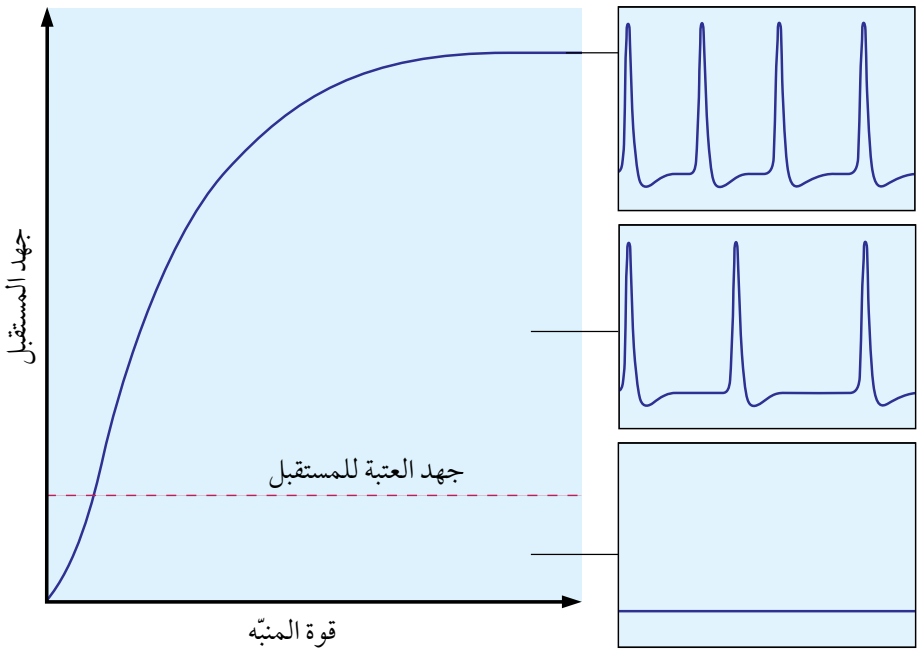
٣. **قانون «الكل أو العدم».**

ب. صف العلاقة بين قوّة المنبّه ومقدار جهد المُستقبل المتولد.

ج. صف العلاقة بين قوّة المنبّه المستخدم وتكرار جهود الفعل المتولدة في الخلية العصبية الحسية.

د. ما الذي يحدد الحد الأقصى لتكرار جهود الفعل في خلية عصبية ما؟

هـ. يمكن أن تزداد قيمة جهود العتبة في الخلايا المستقبِلة أو تنقص. اقترح المزايا المحتملة لذلك.



(ج) يتولد تكرار أكثر من النبضات العصبية في خلية عصبية حسية عندما يتلقى المستقبل منبّهًا قويًا.

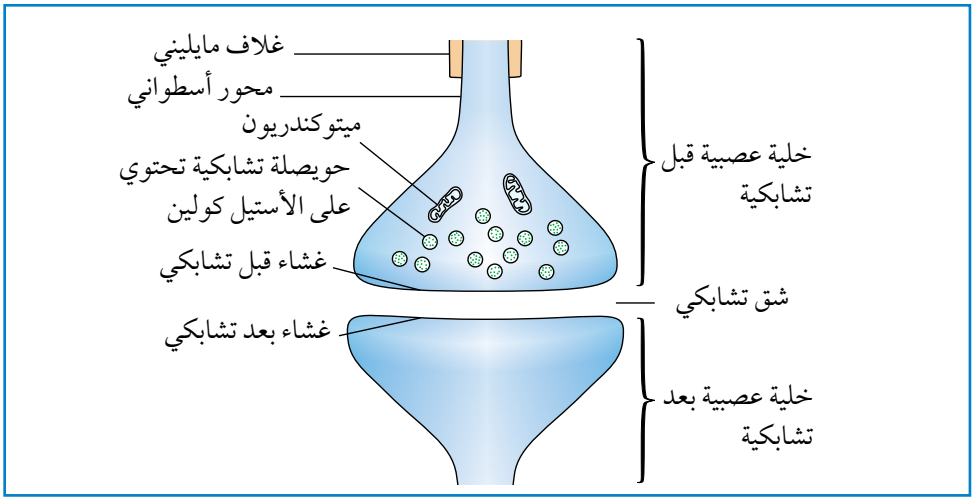
(ب) يتولّد تكرار أقل من النبضات العصبية عندما يتلقى المستقبِل منبهًا ضعيفًا.

(أ) لا يتولّد نبضات عصبية عندما يتلقى المستقبِل منبهًا ضعيفًا جدًا.

الشكل ٥-١٨ (أ) تحت جهد عتبة المستقبِل، لا يتولّد من إزالة الاستقطاب أي نبضات عصبية. مع زيادة قوة المنبّه، يزداد أيضًا جهد المستقبِل. (ب) إذا وصل جهد المستقبِل إلى جهد العتبة، يتم إرسال النبضات على طول الخلية العصبية الحسية بتكرار أقل. (ج) زيادة قوة المنبّه فوق جهد العتبة يزيد من تكرار النبضات؛ وفي الوقت نفسه لا تتغير سعتها (ارتفاع المنحنى كما يظهر خلال التجربة).

التشابكات العصبية

عندما تلتقي خليتان عصبيتان، فإنهما لا تتلامسان تمامًا. هناك فجوة صغيرة جدًا يبلغ عرضها نحو 20 nm بينهما. هذه الفجوة تسمى **الشق التشابكي** **Synaptic cleft**. تُشكِّل أجزاء الخليتين العصبيتين القريبتَين من هذا الشق، بالإضافة إلى الشق نفسه، ما يسمى **التشابك العصبي** **Synapse** (الشكل ٥-١٩).



الشكل ٥-١٩ تشابك عصبي كوليني بين خليتَين عصبيتَين (انظر الشكل ٥-٦)

آلية الانتقال عبر التشابك العصبي

لا يمكن للنبضات العصبية «الوثب» عبر تشابك عصبي كما يتضّح في الشكل ٥-١٩. بدلًا من ذلك، يتم إطلاق جزيئات من **ناقل عصبي** **Neurotransmitter**، لتنبيه الخلية العصبية التالية.

فيما يلي موجز يلخص تسلسل الأحداث:

1. يحدث جهد فعل على غشاء سطح **الخلية العصبية قبل التشابكية** **Presynaptic neurone**.
2. يتسبب جهد الفعل في إطلاق جزيئات كناقل عصبي في الشق التشابكي.
3. تنتشر جزيئات الناقل العصبي عبر الشق التشابكي وترتبط مؤقتًا بمستقبلات على **الخلية العصبية بعد التشابكية** **Postsynaptic neurone**.
4. تستجيب الخلية العصبية بعد التشابكية لجميع النبضات العصبية التي تصل في أي وقت عن طريق إزالة الاستقطاب، وإذا كان مقدار إزالة الاستقطاب الكلي أعلى من جهد العتبة، فسوف ترسل هذه الخلية العصبية نبضة عصبية.

لنلقي نظرة على هذه الأحداث بمزيد من التفصيل. يحتوي السيتوبلازم في الخلية العصبية قبل التشابكية على حويصلات ممتلئة بالناقل العصبي (الصورة ٥-٥).

مصطلحات علمية

الشق التشابكي Synaptic cleft: فجوة صغيرة جدًا بين خليتَين عصبيتَين عند التشابك العصبي؛ تنتقل النبضات العصبية عبر الشقوق التشابكية بواسطة مواد تسمى النواقل العصبية.

التشابك العصبي Synapse: نقطة تلتقي عندها خليتان عصبيتان، ولكنهما لا تتلامسان؛ يتكوّن التشابك العصبي من نهاية خلية عصبية قبل تشابكية، والشق التشابكي، ونهاية خلية عصبية بعد تشابكية.

الناقل العصبي Neurotransmitter: مادة كيميائية يتم إطلاقها في التشابكات العصبية لتقوم بنقل النبضات العصبية بين الخلايا العصبية أو بين خلية عصبية حركية وليف عضلي.

الخلية العصبية قبل التشابكية Presynaptic neurone: خلية عصبية تنتهي عند التشابك العصبي الذي منه يتم إطلاق ناقل عصبي عند وصول جهد فعل الخلية العصبية بعد التشابكية.

الخلية العصبية بعد التشابكية Postsynaptic neurone: الخلية العصبية الموجودة على الجانب الآخر من التشابك العصبي للخلية العصبية التي يصل إليها جهد الفعل.

الصورة ٥-٥ صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) بألوان زائفة لتشابك عصبي (x 52 000). تحتوي الخلية العصبية قبل التشابكية (في الأسفل) على الميتوكندريا (كما هو موضح باللون الأخضر) والعديد من الحويصلات التشابكية (باللون الأزرق)، الممتلئة بجزيئات من النواقل العصبية.

هناك أكثر من 40 ناقلًا عصبيًا مختلفًا؛ تمّ العثور على **النورأدرينالين** **Noradrenaline** و **الأستيل كولين** (ACh) **Acetylcholine** في جميع أنحاء الجهاز العصبي، بينما توجد مواد ناقلة أخرى مثل الدوبامين وحمض الجلوتاميك وحمض جاما-أمينوبيوتيريك (GABA) فقط في الدماغ. سوف يتم التركيز في الصفحات التالية على التشابكات العصبية التي تستخدم (ACh) كناقل عصبي. تُعرف هذه التشابكات العصبية باسم **التشابكات العصبية الكولينية** **Cholinergic synapses**.

حدوث جهد الفعل وإزالة الاستقطاب في الخلية العصبية قبل التشابكية، يحفز فتح **البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات الكالسيوم** **Voltage-gated calcium ion channel proteins**، فيؤدي ذلك إلى انتشار أيونات الكالسيوم إلى داخل الخلية مع المنحدر الكهروكيميائي الحاد لها؛ على افتراض أنه لا توجد أيونات كالسيوم في السيتوبلازم، إنما فقط في السائل المحيط بها (الشكل ٥-٢٠).

يحفز تدفق أيونات الكالسيوم الحويصلات التي تحتوي على (ACh) للانتقال إلى الغشاء قبل التشابكي والاندماج معه، ما يؤدي إلى إفراغ محتوياتها في الشق التشابكي. يتسبب كل جهد فعل في دفع بضع حويصلات فقط للقيام بذلك. تحتوي كل حويصلة على ما يصل إلى 10000 جزيء من (ACh). ينتشر (ACh) عبر الشق التشابكي عادة في أقل من (0.5 ms).

يحتوي غشاء سطح الخلية العصبية بعد التشابكية على **بروتينات مستقبلة** **Receptor proteins**. لجزء من جزيء البروتين المستقبل شكل مكمل لجزء من (ACh)، بحيث يمكن لجزيئات (ACh) الارتباط مؤقتًا بجزيئات هذا البروتين المستقبل والذي يسبِّب تغيرًا في شكل جزيئات البروتين المستقبل، ما يؤدي إلى فتح القنوات الأيونية (الشكل ٥-٢١).

مصطلحات علمية

النورأدرينالين
Noradrenaline: نوع من النواقل العصبية ، والتي تفرزها أيضًا الخلايا في الغدد الكظرية كهرمون.

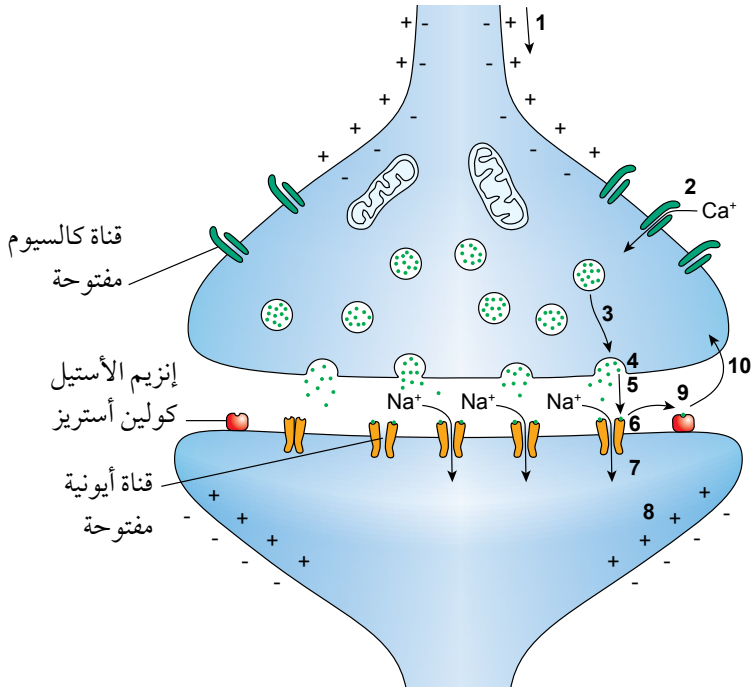
الأستيل كولين (ACh)
Acetylcholine: نوع من النواقل العصبية تفرزها التشابكات الكولينية.

التشابك العصبي الكولينيي
cholinergic synapse: التشابك العصبي الذي تكون فيه المادة الناقلة هي الأستيل كولين (ACh).

البروتين القنوي المبوب بالفولتية لأيونات الكالسيوم
Voltage-gated calcium ion channel protein: بروتين قنوي في أغشية الخلايا العصبية قبل التشابكية والتي تفتح استجابة لإزالة الاستقطاب للسماح بانتشار أيونات الكالسيوم مع منحدرها الكهروكيميائي.

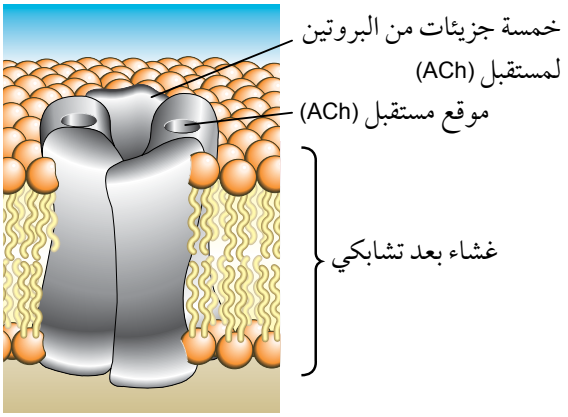
بروتين مستقبل
Receptor protein: بروتين على الغشاء بعد التشابكي يعمل بمثابة بروتين قنوي مبوب بالربيطة، يفتح استجابة لارتباط ناقل عصبي به (يعرف أيضًا باسم مستقبل أيونوتروبيك (Ionotropic receptor)

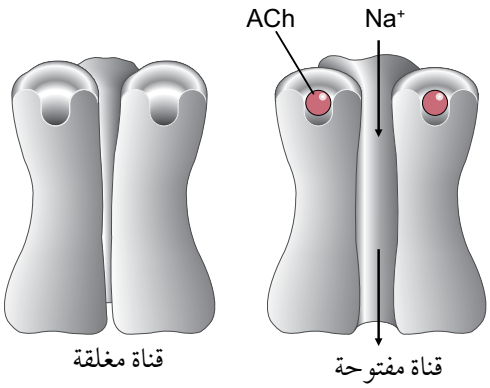
1. وصول جهد فعل.
2. إزالة الاستقطاب في النهاية التشابكية يحفز فتح البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات الكالسيوم. وبذلك تنتشر أيونات الكالسيوم إلى داخل سيتوبلازم الخلية العصبية قبل التشابكية.
3. تتحرك الحويصلات التشابكية بالغشاء قبل التشابكي.
4. تندمج الحويصلات التشابكية في الغشاء قبل التشابكي وتفرغ محتواها من جزيئات (ACh) في الشق التشابكي.
5. تنتشر جزيئات (ACh) عبر الشق التشابكي.
6. ترتبط جزيئات (ACh) بالمستقبلات في الغشاء بعد التشابكي.
7. تخضع المستقبلات لتغييرات في تركيبها وتفتح القنوات الأيونية للسماح لأيونات الصوديوم بالانتشار إلى داخل الخلايا العصبية بعد التشابكية.



8. يصبح الغشاء بعد التشابكي في حالة إزالة استقطاب.
9. يتم تحطيم جزيئات (ACh) بواسطة إنزيم الأستيل كولين إستريز.
10. تقوم الخلايا العصبية قبل التشابكية بامتصاص جزيئات الكولين وتعيد تدويره وتصنع منه (ACh) مرة أخرى.

الشكل ٥-٢٠ الانتقال عبر التشابك العصبي.





الشكل ٥-٢١ تفاصيل كيفية عمل مستقبلات (ACh). يتكوّن المستقبل الواحد من خمس وحدات بروتينية مرتبة في شكل أسطوانة تخترق الغشاء بعد التشابكي. تحتوي اثنتان من هذه الوحدات البروتينية على مواقع مستقبلة (ACh). عندما ترتبط جزيئات (ACh) بكل من هذين الموقعين في المستقبلات، فإنها تسبب تغيرًا في شكل وحدات البروتين، وينتج من ذلك فتح القناة الموجودة بين الوحدات. تحتوي أجزاء من جزيئات البروتين الموجودة حول هذه القناة على أحماض أمينية سالبة الشحنة، والتي تجذب أيونات الصوديوم موجبة الشحنة حتى تمر عبر القناة.

تنتشر أيونات الصوديوم إلى سيتوبلازم الخلية العصبية بعد التشابكية مع المنحدر الكهروكيميائي مسببة إزالة استقطاب الغشاء. هذه البروتينات المستقبلة عبارة عن قنوات أيونية مبوّبة بالربيطة Ligand-gated ion channels يتم تحفيزها على الفتح بواسطة ربيطة (مادة كيميائية) وليس عن طريق تغيير فرق الجهد.

إذا بقيت جزيئات (ACh) مرتبطة بالبروتينات المستقبلة في الغشاء بعد التشابكي، فستظل قنوات أيونات الصوديوم مفتوحة، وستكون الخلايا العصبية بعد التشابكية في حالة إزالة استقطاب بشكل دائم. يتم إعادة تدوير جزيئات (ACh) لمنع حدوث ذلك، وأيضًا لتجنب إهدارها. يحتوي الشق التشابكي على إنزيم، يسمى **الأستيل كولين إستريز Acetylcholinesterase**، والذي يحفز التحلل المائي لكل جزيء (ACh) إلى مادتَي الأسيتات والكولين.

مصطلحات علمية

الأستيل كولين إستريز Acetylcholinesterase: إنزيم موجود في الشق التشابكي وبالتحديد على سطح الغشاء بعد التشابكي (من جهة الشق التشابكي)، وهو يقوم بالتحليل المائي لجزيئات (ACh) إلى جزيئات من الأسيتات والكولين.

يُعاد الكولين إلى الخلايا العصبية قبل التشابكية، حيث يتفاعل مع الأستيل مرافق الإنزيم (A) لتكوين (ACh) مرة أخرى. ثم يتم نقله إلى داخل حويصلات قبل تشابكية جديدة، لتكون جاهزة لنقل جهد الفعل التالي. يستغرق التسلسل الكامل لهذه الأحداث، من لحظة الوصول الأولي لجهد الفعل إلى إعادة تشكيل (ACh)، نحو (5-10 ms).

سؤال

٩ أ. اذكر اسم العملية التي تطلق عبرها الحويصلات التشابكية محتوياتها عند الغشاء قبل التشابكي.

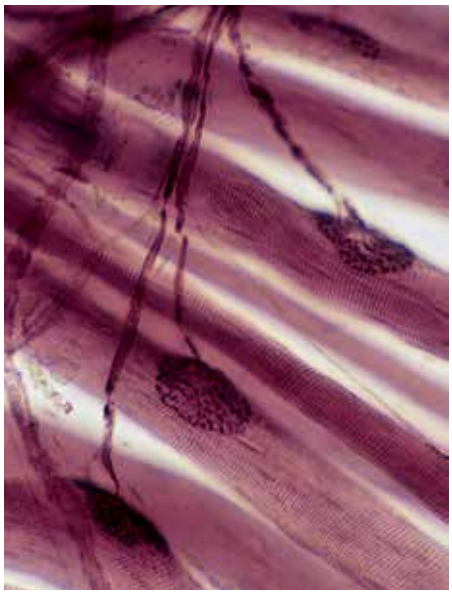
ب. صف دور إنزيم الأستيل كولين إستريز.

يؤدي إزالة استقطاب الخلية العصبية بعد التشابكية إلى توليد جهد فعل عندما يكون فرق الجهد أعلى من جهد العتبة لتلك الخلية العصبية. إذا لم يكن الوضع كذلك، فلن يكون هناك جهد فعل. تزداد الفرصة بأن يحدث جهد فعل وأن يتم إرسال نبضة عصبية في الخلايا العصبية بعد التشابكية إذا قامت أكثر من خلية عصبية قبل تشابكية بإطلاق (ACh) في الوقت نفسه أو خلال فترة زمنية قصيرة.

أجريت الكثير من الأبحاث العلمية حول التشابكات العصبية التي تقع بين الخلايا العصبية الحركية والألياف العضلية، تشكل الخلايا العصبية الحركية ما تسمى الصفيحة النهائية الحركية مع كل ليف عضلي، ويسمى التشابك في هذه الحالة باسم **الوصلة العصبية العضلية Neuromuscular junction** (الصورة ٥-٦). تعمل هذه التشابكات بالطريقة نفسها الموضحة أعلاه. يتم إنتاج جهد فعل في الألياف العضلية، ما قد يؤدي إلى انقباضها (الموضوع ٥-٣).

مصطلحات علمية

الوصلة العصبية العضلية Neuromuscular junction: تشابك عصبي بين خلية عصبية حركية وألياف عضلية.



الصورة ٥-٦ صورة مجهرية ضوئية للوصلات العصبية العضلية (200×). النسيج باللون الأحمر هو ألياف عضلية، بينما تظهر المحاور الأسطوانية كخطوط داكنة. تتفرع نهاية المحور الأسطواني للخلية العصبية الحركية لتتصل مع مختلف الألياف العضلية. يمثل التركيب البيضاوي الشكل على كل ليف عضلي وصلة عصبية عضلية واحدة. يتم تمرير جهود الفعل من المحور الأسطواني إلى العضلة، عبر شق تشابكي، عند هذه الوصلات العصبية العضلية.

أسئلة

(١٠) اقترح:

أ. لماذا تنتقل النبضات العصبية في اتجاه واحد فقط عند التشابكات العصبية؟

ب. إذا وصلت جهود الفعل بشكل متكرر إلى تشابك عصبي، لماذا يصبح هذا التشابك العصبي في النهاية غير قادر على نقل النبضات العصبية إلى الخلية العصبية التالية؟

(١١) كوّن جدولًا لمقارنة التنسيق في الثدييات بواسطة الجهاز العصبي والتنسيق بواسطة جهاز الغدد الصماء.

٥-٣ الانقباض العضلي

مصطلحات علمية

العضلة المخططة

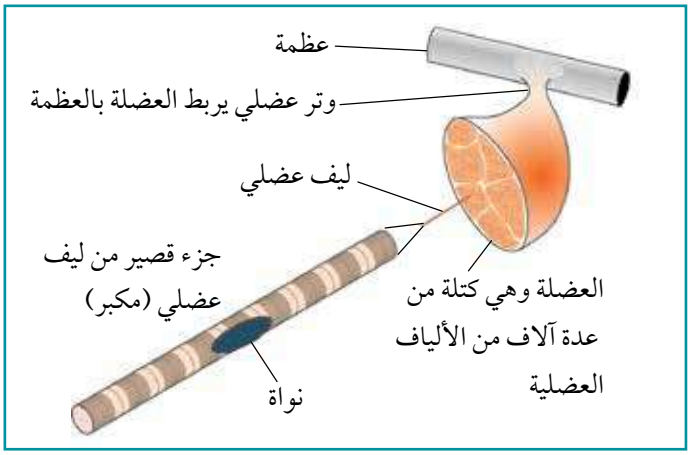
Striated muscle: نوع من الأنسجة العضلية في العضلات الهيكلية (وفي العضلة القلبية)، وتحتوي الألياف العضلية على خطوط عرضية منتظمة عند النظر إليها ورؤيتها تحت المجهر الضوئي.

يتعلق هذا الموضوع بانقباض **العضلات المخططة** **Striated muscles** (الشكل ٥-٢٢ والصورة ٥-٧). يكوِّن هذا النوع من النسيج العضلي العديد من عضلات الجسم المرتبطة بالهيكل العظمي. تنقبض العضلات المخططة فقط عندما يتم تنبيهها للقيام بذلك عن طريق النبضات العصبية التي تصل إليها عبر الخلايا العصبية الحركية. يوصف هذا النوع من الأنسجة العضلية بأنه عصبي المنشأ Neurogenic.

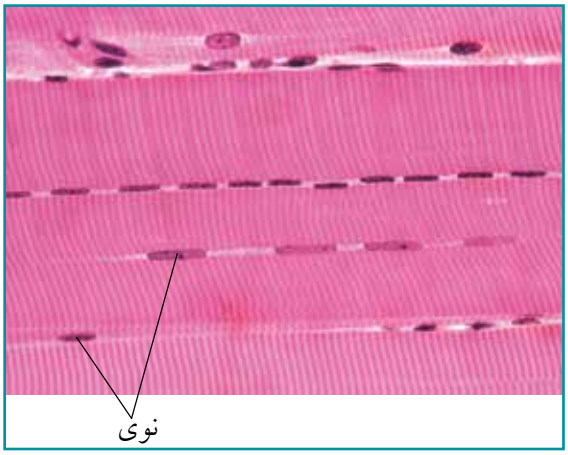
وهناك خصائص أخرى للعضلات المخططة الهيكلية (الشكل ٥-٢٢ والصورة ٥-٧) ومنها:

- مخططة (أي لها خطوط عرضية) على مسافات منتظمة.
- عديدة النوى (مدمج خلوي).
- خلاياها أسطوانية طويلة وغير متفرعة.
- تترتب بها البروتينات المنقبضة على شكل حزم متوازية من الليفيفات العضلية Myofibrils.

من المهم أن يتم تنسيق أنشطة العضلات المختلفة في جسمك. عندما تنقبض العضلة، فإنها تمارس قوة على جزء معيّن من الجسم، مثل عظمة محددة، وينتج من ذلك استجابة معيّنة. يضمن الجهاز العصبي أن سلوك كل عضلة يتناسق مع سلوك جميع العضلات الأخرى، بحيث يمكنها معًا إحداث الحركة المرغوب فيها من دون التسبب في تلف أي جزء من أجزاء الهيكل العظمي أو الجهاز العضلي.



الشكل ٥-٢٢ تركيب العضلة المخططة الهيكلية. نظرًا إلى أن كل عضلة تتكوّن من عدة أنواع من الأنسجة (نسيج عضلي مخطط، ودم، وأعصاب، ونسيج ضام)، فإنها تعدُّ مثالًا على العضو.

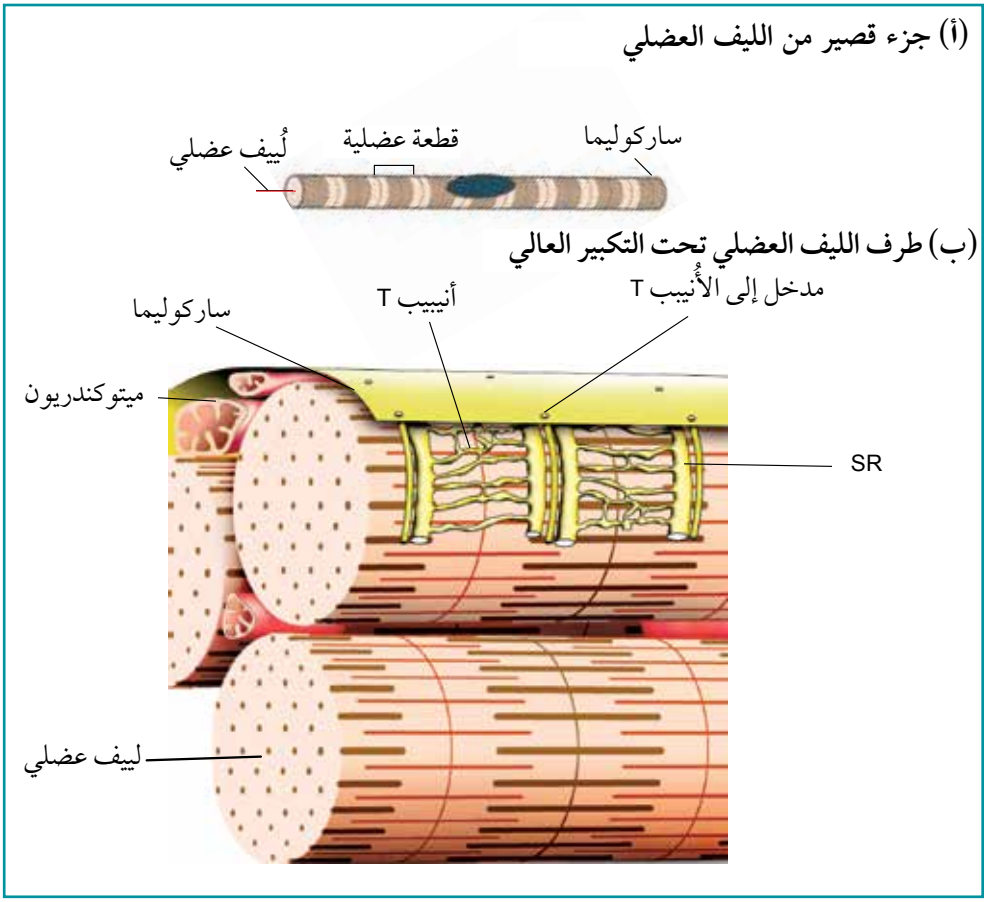


الصورة ٥-٧ صورة مجهرية ضوئية لعدة ألياف عضلية مخططة حيث يمكن مشاهدة الخطوط بالمجهر الضوئي. ويمكن مشاهدة العديد من النوى أيضًا (x 300).

تركيب العضلات المخططة الهيكلية

تتكوّن العضلة – مثل العضلة ذات الرأسَين Biceps – من آلاف الألياف العضلية (الشكل ٥–٢٢ والصورة ٥–٧). كل ليف عضلي عبارة عن «خلية» عالية التخصص وبترتيب عالي التنظيم من البروتينات، وتحاط بغشاء سطح الخلية. يفضل بعض علماء الأحياء تسميتها باسم «مدمج خلوي Syncytium» بدل تسميتها خلية، وذلك لأنها عديدة النوى. تُعرف أجزاء الألياف بمصطلحات مختلفة. فمثلًا، يسمى غشاء سطح الخلية باسم **السركوليما Sarcolemma**، والسيتوبلازم باسم **الساركوبلازم Sarcoplasm** والشبكة الإندوبلازمية باسم **الشبكة الساركوبلازمية (SR) Sarcoplasmic reticulum**.

يحتوي الساركوليما على العديد من الانثناءات العميقة تمتد إلى داخل الألياف العضلية، تسمى **أُنيبيبات (T) T-tubules** (الشكل ٥–٢٣ والصورة ٥–٨). تمتد هذه الأُنيبيبات بالقرب من (SR). تحتوي أغشية (SR) على عدد ضخم من المضخات البروتينية التي تنقل أيونات الكالسيوم إلى التجاويف الداخلية لـ (SR). غالبًا ما يحتوي الساركوبلازم على عدد كبير من الميتوكندريا، وغالبًا ما تكون متراصة ومرتبة بإحكام بين **الليفات العضلية Myofibrils**. تقوم الميتوكندريا بعملية التنفس الهوائي، وتنتج ATP اللازم لانقباض العضلات.



الشكل ٥–٢٣ التركيب الدقيق لجزء من ليف عضلي: (أ) جزء قصير من ليف عضلي يظهر الحجم النسبي لليف العضلي؛ (ب) رسم تخطيطي لصورة مجهرية إلكترونية (الماسح) تظهر طرف ليف عضلي.

مصطلحات علمية

السركوليما Sarcolemma: غشاء سطح الليف العضلي.

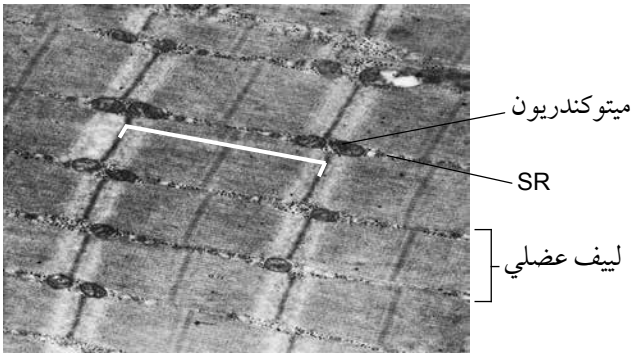
الساركوبلازم Sarcoplasm: سيتوبلازم الليف العضلي (الخلية العضلية).

الشبكة الساركوبلازمية Sarcoplasmic reticulum (SR): الشبكة الإندوبلازمية في الليف العضلي.

أنيبيبات T-tubules (T): انثناءات من الساركوليما تمتد عميقًا داخل الليف العضلي وتنقل إليها النبضات العصبية.

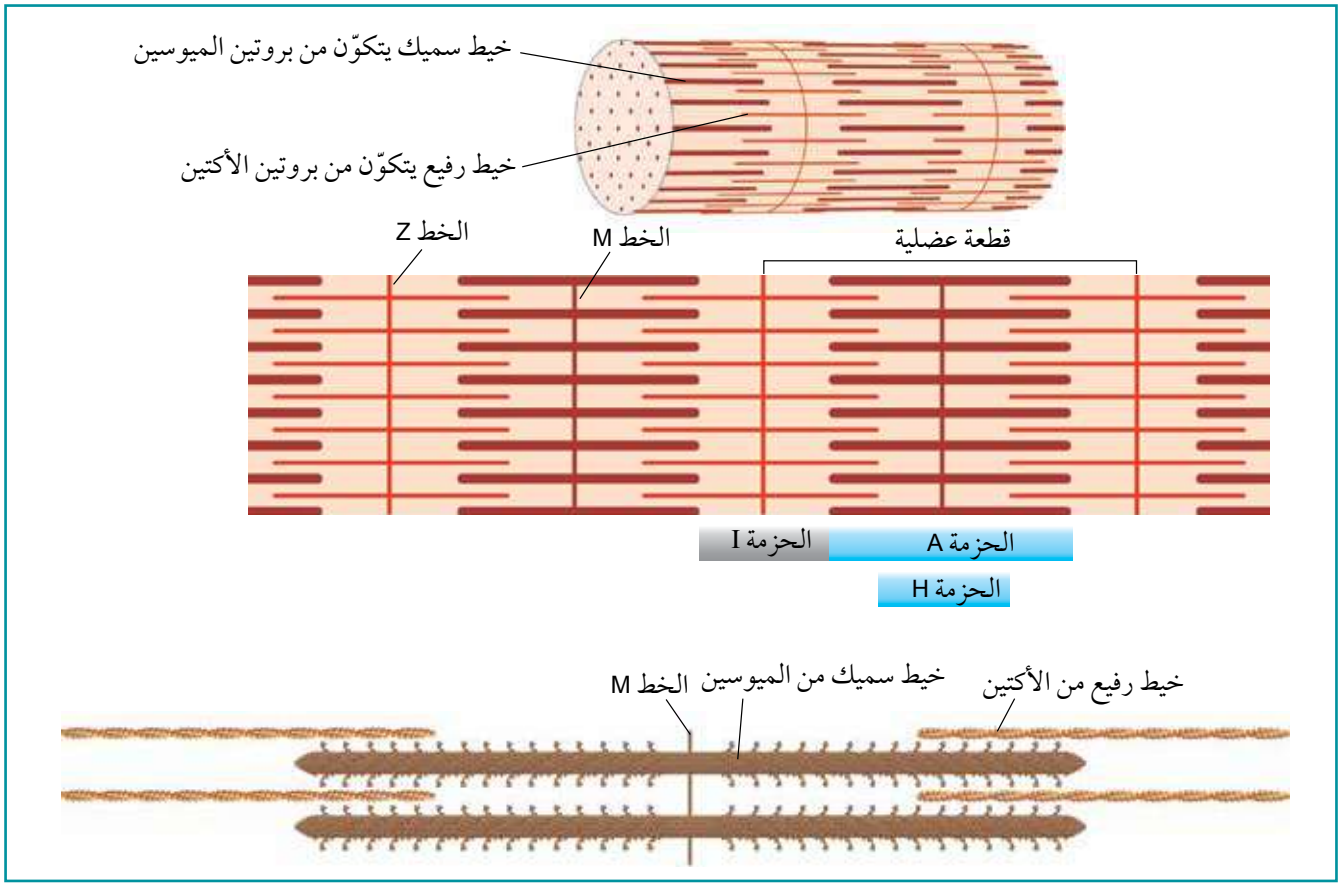
الليف العضلي Myofibril: واحد من عدة حزم أسطوانية مكوّنة من خيوط بروتينية سميكة (ميوسين) وخيوط بروتينية رفيعة (أكتين) تنتظم داخل الليف العضلي.

أكثر ما يلفت الانتباه في الألياف العضلية هذه هو خطوطها العرضية. تنتج هذه الخطوط بسبب الترتيب المنتظم جدًا للعديد من الليفات العضلية في الساركوليما. تكون خطوط كل ليف من الألياف العضلية في النسيج العضلي بالطريقة نفسها تمامًا، ويصطف كل ليف منها بدقة مقابل الليف المجاور، وبذلك يتم إنتاج النمط المخطط الذي يمكنك رؤيته في الشكلَين ٥-٢٢ و٥-٢٣، والصورتين ٥-٧ و٥-٨.



الصورة ٥-٨ صورة تمثل مقطعًا طوليًا لليف عضلي، كما يرى باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ، تظهر أجزاء من سبعة ليفات عضلية. تشير الحاصرة باللون الأبيض داخل الصورة إلى قطعة عضلية (x 12000).

هذا أقصى ما يمكنك رؤيته باستخدام المجهر الضوئي، ولكن باستخدام المجهر الإلكتروني، من الممكن رؤية أن كل لُييف عضلي يتكوّن من مكوّنات أصغر، تسمى الخيوط Filaments. تقع مجموعات متوازية من الخيوط السميكة بين مجموعات من الخيوط الرفيعة. تتكوّن كل من الخيوط السميكة والرفيعة من البروتين. فتتكوّن الخيوط السميكة في الغالب من بروتين **الميوسين Myosin**، بينما الخيوط الرفيعة فتتكّون من بروتين **الأكتين Actin**. الآن يمكنك فهم سبب وجود الخطوط. تشير الأجزاء الداكنة من الخطوط، الحزمة A (A band)، إلى خيوط الميوسين السميكة.



الشكل ٥-٢٤ التركيب الدقيق لجزء من ليف عضلي.

وأما الأجزاء الفاتحة، الحزمة I، فهي حيث لا توجد خيوط الميوسين السميكة، وتوجد فقط خيوط الأكتين الرفيعة (الشكل ٥-٢٤). الأجزاء الأكثر قتامة من الحزمة A هي تداخل الخيوط السميكة والرفيعة معًا. والمنطقة في وسط الحزمة A والتي تبدو أفتح لونًا تسمى الحزمة H وتمثل الأجزاء التي توجد بها الخيوط السميكة فقط.

يوفر الخط المعروف باسم الخط Z مرفقًا لارتباط خيوط الأكتين الرفيعة، ويمثل الخط M الشيء نفسه بالنسبة إلى خيوط الميوسين. يسمى جزء الليف العضلي الواقع بين خطي Z باسم **القطعة العضلية Sarcomere**. تتميز الليفات العضلية بشكلها الأسطواني، لذا فإن الخط Z هو في الحقيقة قرص يفصل قطعة عضلية واحدة عن الأخرى المجاورة لها، ولذلك يسمى أيضًا باسم القرص Z.

مصطلحات علمية

الميوسين Myosin: البروتين الذي يشكل الخيوط السميكة في العضلات المخططة. تقوم الرؤوس الكروية لكل جزيء بتحليل جزيئات ATP وتحتوي على إنزيم ATPase.

الأكتين Actin: البروتين الذي تتكوّن منه الخيوط الرفيعة في العضلات المخططة.

القطعة العضلية Sarcomere: الجزء من الليف العضلي الذي يقع بين قرصي Z.

التروبوميوسين Tropomyosin: بروتين ليفي يشكل جزءًا من الخيوط الرفيعة في الليفات العضلية داخل ألياف (خلايا) العضلات المخططة. يقوم التروبوميوسين بسد موقع الارتباط الخاص برؤوس الميوسين على الخيوط الرفيعة؛ وبالتالي يمنع تكوين الجسور المتقاطعة بين رؤوس الميوسين وخيوط الأكتين.

التروبونين Troponin: بروتين مرتبط بالكالسيوم يمثل جزءًا من الخيوط الرفيعة في الليفات العضلية في العضلات المخططة.

سؤال

(١٢) **أ.** سمِّ نوع النسيج العضلي الموضح في الصورة ٥-٧. فسر إجابتك.

ب. استخدم الشكل ٥-٢٦ لتنفيذ رسم تخطيطي بسيط لإظهار ترتيب الخيوط السميكة والرفيعة في قطعة عضلية من عضلة في حالة الراحة (منبسطة). في رسمك التخطيطي، بيّن كلًا ممّا يلي وقم بتسميته: خيطًا سميكًا واحدًا، وأربعة خيوط رفيعة، وخطَّي Z. قد يستحسن تنفيذ الرسم على ورقة ذات مربعات (مثل ورقة التمثيل البياني).

ج. حدد وسمِّ ما يلي في رسمك التخطيطي: الحزمة A، الحزمة I، الحزمة H.

د. يبلغ متوسط طول القطعة العضلية في عضلة منبسطة 2.25 µm. احسب مقدار التكبير للرسم التخطيطي الذي قمت برسمه، واذكر تسلسل الخطوات التي اتخذتها في إجراء عملية الحساب هذه. اعرض إجابتك مقرّبة إلى أقرب عدد صحيح. اطلب إلى أحد زملائك التأكد من صحة إجابتك.

تركيب الخيوط السميكة والخيوط الرفيعة

تتكوّن الخيوط السميكة من العديد من جزيئات الميوسين، وهو بروتين ليفي له رأس كروي الشكل. يساعد الجزء الليفي على تثبيته في الخيط السميك. داخل الخيوط السميكة، فتتموضع العديد من جزيئات الميوسين معًا في حزمة حيث تتجه رؤوسها الكروية جميعها بعيدًا عن الخط M. المكوّن الرئيسي للخيوط الرفيعة هو بروتين كروي يسمى الأكتين. ترتبط العديد من جزيئات الأكتين معًا لتشكيل سلسلة. تلتف اثنتان من هذه السلاسل إحداهما على الأخرى لتشكل خيطًا رفيعًا. كما يلتف حول سلاسل الأكتين بروتين ليفي يسمى **التروبوميوسين Tropomyosin**. بروتين آخر اسمه **التروبونين Troponin** يرتبط بسلسلة الأكتين على مسافات منتظمة (الشكل ٥-٢٥).

كيف تنقبض العضلات

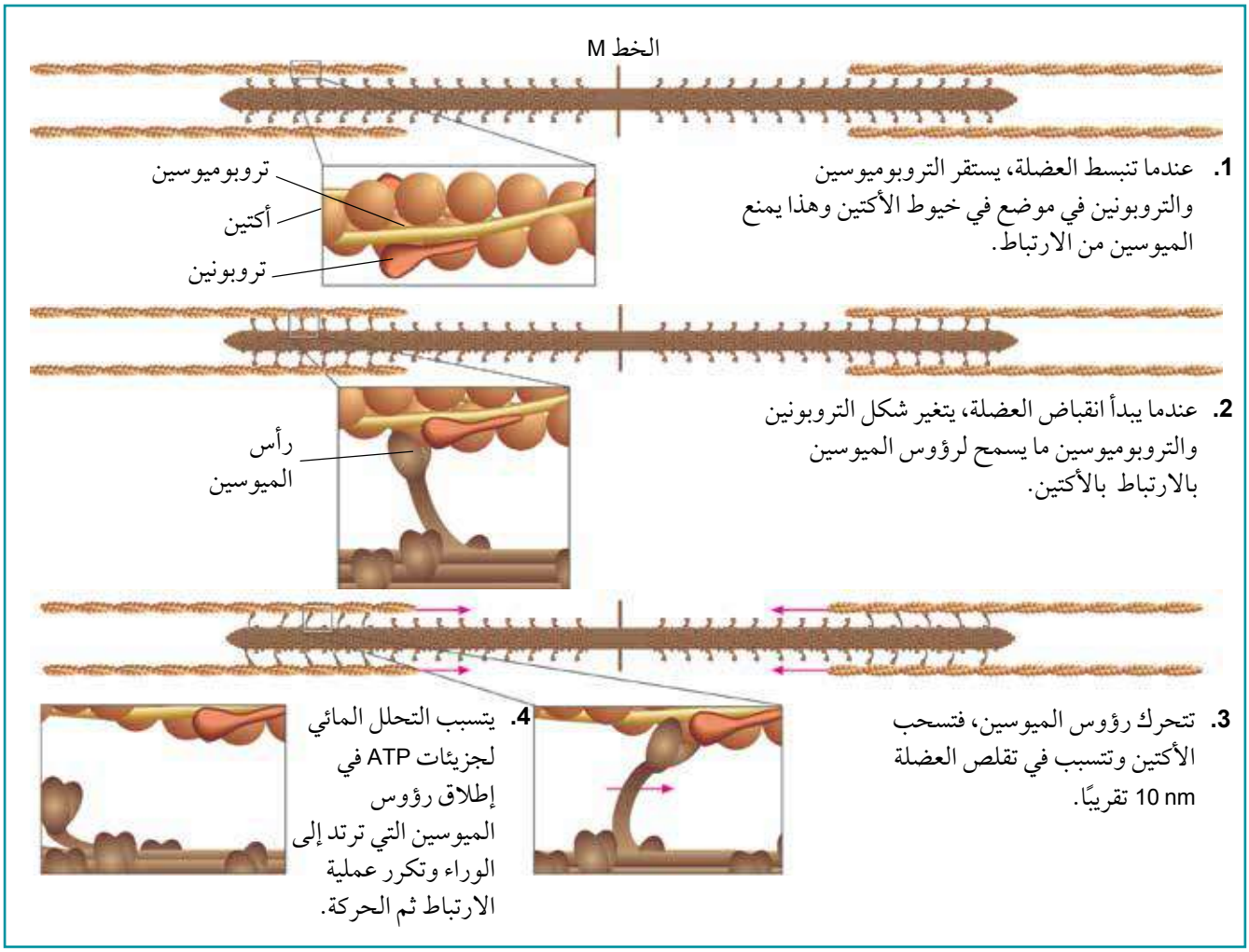
تسبب العضلات الحركة عن طريق انقباضها. تصبح القطع العضلية في كل ليف عضلي أقصر مع سحب أقراص Z قرب بعضها. يوضح الشكل ٥-٢٥ كيف يحدث هذا. يُعرف النموذج الذي يفسر كيفية انقباض الليف العضلي باسم **نموذج الخيط المنزلق Sliding filament model** للانقباض العضلي.

تأتي الطاقة اللازمة للحركة من جزيئات ATP التي ترتبط برؤوس الميوسين. كل رأس ميوسين يحتوي على الإنزيم ATPase الذي يحلل مائيًا ATP إلى ADP و P_i.

عندما تنقبض العضلة، يتم إطلاق أيونات الكالسيوم من (SR) وترتبط بالتروبونين. هذا الارتباط يحفز جزيئات التروبونين لتغيير شكلها (الشكل ٥-٢٥). ونتيجة لذلك، تنتقل جزيئات التروبونين والتروبوميوسين إلى موضع مختلف على الخيوط الرفيعة، ما يؤدي إلى انكشاف أجزاء من جزيئات الأكتين، والتي تعمل كمواقع لربط الميوسين. ترتبط رؤوس الميوسين بهذه المواقع، وتشكل جسورًا متقاطعة بين نوعَي الخيوط.

مصطلحات علمية

نموذج الخيط المنزلق Sliding filament model: آلية انقباض العضلات. داخل كل قطعة عضلية، تتحرك الخيوط الرفيعة لتقترب من بعضها بفعل رؤوس الميوسين في الخيوط السميكة ما يسبب تقصر الطول الإجمالي لكل ليف عضلي.

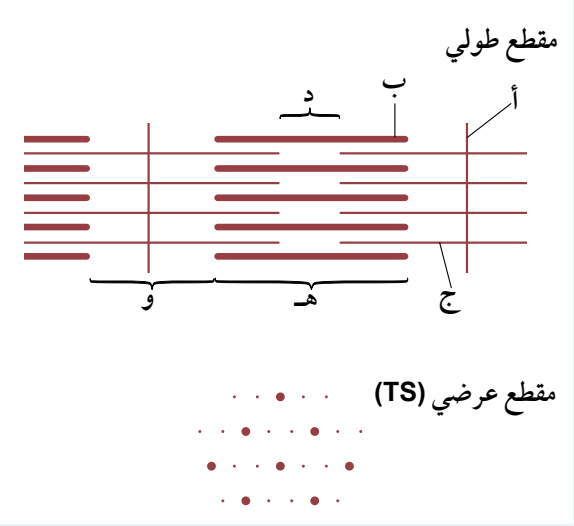


الشكل ٥-٢٥ نموذج الخيط المنزلق للانقباض العضلي. ابحث عن بعض الرسوم المتحركة لنموذج الخيط المنزلق على الإنترنت لترى حركة الخيوط الرفيعة أثناء انقباض العضلة.

بعد ذلك تتحرك رؤوس الميوسين، وتسحب خيوط الأكتين نحو مركز القطعة العضلية. ثم تقوم الرؤوس بالتحلُّل المائي لجزيئات ATP، لتوفير طاقة كافية لتمكينها من الانفكاك عن خيوط الأكتين. تعود الرؤوس وتتحرك إلى مواقعها السابقة وترتبط مرة أخرى بالمواقع المكشوفة على الأكتين. لقد تحركت الخيوط الرفيعة نتيجة لقوة التحريك السابقة، لذلك ترتبط رؤوس الميوسين الآن أبعد قليلًا على طول الخيوط الرفيعة مقتربة من القرص Z. يستمر ويتكرر هذا طالما أن العضلة لديها إمدادات كافية من ATP.

سؤال

(١٣) تمّ فحص مقاطع طولية وعرضية من ألياف عضلية مخططة تحت المجهر الإلكتروني. يوضح الشكل ٥-٢٦ رسومًا للتراكيب التي شوهدت في قطعة عضلية عند رؤيتها في مقاطع طولية ومقاطع عرضية تحت المجهر الإلكتروني النافذ.



الشكل ٥-٢٦ مقطع طولي ومقطع عرضي في ليف عضلي مخطط.

أ. ١. سمِّ التراكيب (أ)، و (ب)، و (ج).

٢. سمّ مناطق القطعة العضلية (د)، و (هـ)، و (و).

ب. اذكر المنطقة من القطعة العضلية التي أُخذ منها المقطع العرضي.

ج. اصنع نموذجًا لقطعة عضلية واستخدمه لشرح كيف يؤدي انزلاق الخيوط في القطعة العضلية إلى انقباض الألياف العضلية. استخدم النموذج الذي صنعته لشرح نموذج الخيط المنزلق للانقباض العضلي لزملائك.

٥-٤ التحكم والتنسيق في النباتات

تمتلك النباتات، شأنها شأن الإنسان والحيوانات، أنظمة تواصل تسمح لها بالتنسيق بين الأجزاء المختلفة من أجسامها. وتستجيب النباتات للتغيرات في بيئتها الخارجية والداخلية، كما رأيت في الوحدة الرابعة. تتضمن معظم استجابات النباتات حدوث تغييرات في بعض جوانب نموّها لكي تستجيب إلى عوامل مختلفة مثل الجاذبية الأرضية والضوء. بعض هذه الاستجابات تنتج من تغيرات سريعة في ضغط الامتلاء في خلاياها، كما يحدث عندما تستجيب الثغور للتغيرات في درجة الرطوبة، وتركيز ثاني أكسيد الكربون، ومدى توافر الماء (الوحدة الرابعة، الموضوع ٤-٥، الاتزان الداخلي في النباتات).

التواصل الكيميائي في النباتات

تُعدّ المواد الكيميائية المعروفة باسم **منظمات النمو النباتية** **Plant growth regulators** أو الهرمونات النباتية **Plant hormones** المسؤولة عن معظم التواصل داخل النباتات. وعلى عكس الهرمونات الحيوانية، لا يتم إنتاج منظمات النمو النباتية من قبل خلايا متخصصة داخل الغدد، ولكنها تنتج من قبل مجموعة متنوعة من الأنسجة. تتحرك هذه المواد عند إفرازها داخل النبات إما مباشرة من خلية إلى أخرى (عن طريق الانتشار أو النقل النشط) أو يتم حملها في عصارة نسيج اللحاء أو عصارة نسيج الخشب. ربما لا يتحرك بعضها بعيدًا عن موقع بنائها وإفرازها وبهذا يكون تأثيرها على الخلايا المجاورة.

سوف تلقي نظرة على مثال واحد من منظمات النمو النباتية، وهو **الأكسين** **Auxin**، الذي يؤثر على العديد من جوانب نمو النبات بما في ذلك النمو بالاستطالة، وتحديد الطول الإجمالي للجذور والفروع.

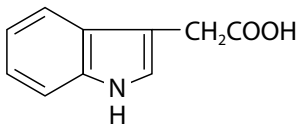
مصطلحات علمية

منظم نمو النبات
Plant growth regulator: أي مادة كيميائية تنتجها النباتات وتؤثر على نموها وتطورها (مثل الأكسينات والسيتوكينين وحمض الأبسيسيك ABA.

الأكسين **Auxin**: منظم نمو النبات (الهرمون النباتي) الذي يحفز استطالة الخلايا.

الأكسينات

تصنع النباتات العديد من المواد الكيميائية المعروفة باسم الأكسينات، وبشكل أساسي الإندول -3- حمض الأسيتيك (IAA) (الشكل ٥-٢٧)، ويعرف ببساطة باسم "أكسين". يتم تصنيع الأكسين في القمم النامية (الأنسجة المولدة) في المجموع الخضري Shoots والجذور، حيث تنقسم الخلايا بنشاط.



الشكل ٥-٢٧ التركيب الجزيئي للأكسين (IAA)

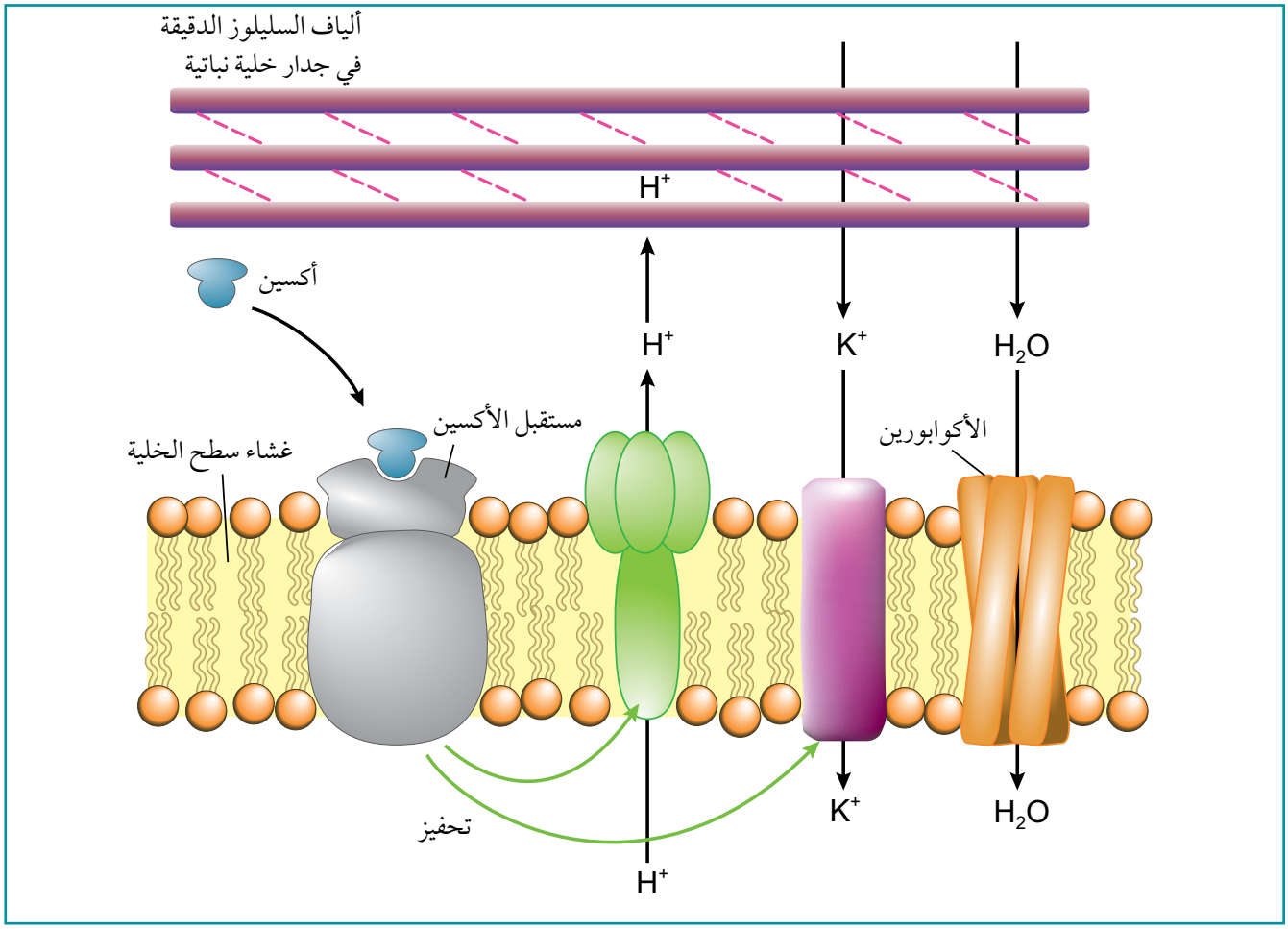
يوضح الشكل٥-٢٨ كيف يشارك الأكسين في التحكم في النمو عن طريق تنبيه استطالة الخلايا. ترتبط جزيئات الأكسين ببروتين مستقبِل على غشاء سطح الخلية. ارتباط الأكسين يُحفِّز مضخات أيونات الهيدروجين (البروتونات) ذات القدرة على التحليل المائي لجزيئات الطاقة ATP، فتعمل على ضخ أيونات الهيدروجين عبر غشاء سطح الخلية

من السيتوبلازم إلى جدار الخلية. في جدران الخلايا، يتم تنشيط البروتينات المعروفة باسم **بروتينات الاستطالة Expansins** عن طريق خفض الرقم الهيدروجيني pH. تقوم بروتينات الاستطالة بفك الروابط الهيدروجينية بين ألياف السليلوز الدقيقة. من غير المعروف بالضبط الآلية التي تعمل بها تلك البروتينات، ولكن يُعتقد أنها تفكك الروابط الهيدروجينية بين ألياف السليلوز الدقيقة وعديدة التسكر الأخرى المرتبطة بها، مثل الهيميسليلوز، في جدار الخلية. يحدث هذا التفكك لفترة وجيزة بحيث يمكن أن تتحرك ألياف السليلوز الدقيقة بمحاذاة بعضها ما يسمح للخلية بالتمدد من دون فقدان الكثير من القوة الإجمالية لجدار الخلية. وما يساعد كذلك على تمدُّد الخلية هو دخول الماء بالأسموزية عن طريق الأكوابورينات وزيادة ضغط الامتلاء داخلها.

مصطلحات علمية

بروتينات الاستطالة

Expansins: بروتينات توجد في جدران الخلايا النباتية تساعد على تفكك الروابط بين ليفات السليلوز أثناء نمو الاستطالة للخلايا النباتية.



الشكل ٥-٢٨ ارتباط الأكسين بمستقبلاته يعتقد أنه ينشط بروتينًا غشائيًا يعمل على تحفيز ضخ البروتونات (أيونات الهيدروجين) من داخل الخلية إلى خارجها وتحديدًا إلى جدار الخلية، حيث تُخفض الرقم الهيدروجيني pH وتكسر الروابط بين ألياف السليلوز الدقيقة. يتم أيضًا تحفيز قنوات أيونات البوتاسيوم لتفتح، ويؤدي فتحها إلى دخول البوتاسيوم إلى الخلية وزيادة تركيزها في السيتوبلازم. وهذا يقلل من جهد الما ء فيه ودخول الماء من خلال الأكوابورينات.

سؤال

(١٤) لخص الكيفية التي يحفز بها هرمون الأكسين نمو الاستطالة في الخلايا النباتية.

ملخّص

الغدد الصماء هي غدد لاقنوية تفرز الهرمونات في الدم. الغدد الصماء والهرمونات التي تفرزها تشكل جهاز الغدد الصماء.

الهرمونات هي مواد كيميائية تُصنع في الغدد الصماء وتُنقل عبر بلازما الدم إلى الخلايا المستهدفة، حيث ترتبط بمستقبلات معيّنة وبالتالي تؤثر على سلوكها.

تمتلك الحيوانات والنباتات أنظمة تواصل داخلية تسمح للمعلومات بالمرور بين أجزاء مختلفة من أجسامها، وبالتالي تساعدها على الاستجابة للتغيرات التي قد تحدث في بيئاتها الخارجية والداخلية.

الخلايا العصبية هي خلايا ذات تركيب ملائم للنقل السريع للنبضات العصبية. وللقيام بذلك، تمتلك هذه الخلايا امتدادات طويلة ورفيعة تسمى المحاور الأسطوانية. تنقل الخلايا العصبية الحسية النبضات العصبية من المستقبلات إلى الجهاز العصبي المركزي (الدماغ والحبل الشوكي). وتنقل الخلايا العصبية الحركية النبضات العصبية من الجهاز العصبي المركزي إلى المستجيبات. تنقل الخلايا العصبية الموصلة النبضات العصبية داخل الجهاز العصبي المركزي.

المستقبلات هي إما خلايا متخصصة أو نهايات الخلايا العصبية الحسية؛ وهي تعمل كمحوّلات للطاقة تحوّل طاقة المنبّهات إلى نبضات عصبية. هناك مستقبلات تتحسَّس المنبّهات الخارجية ومستقبلات تتحسَّس التغيرات الداخلية.

تمتلك الخلايا العصبية جهد راحة، وهو فرق الجهد الكهربائي على جانبي غشائها، حيث يكون الداخل ذا جهد (شحنة) سالب مقارنة بالخارج؛ يبلغ هذا الاختلاف في الجهد نحو -70 mV.

جهد الفعل هو انعكاس سريع لجهد الراحة، ينتج من زيادة نفاذية غشاء سطح الخلية إلى أيونات الصوديوم. دائمًا ما يكون لجهود الفعل السعة نفسها. تكرار جهود الفعل المنتجة تعطي معلومات عن قوة المنبه. تنتقل جهود الفعل على طول المحاور الأسطوانية بواسطة دوائر موضعية تعمل على إزالة استقطاب مناطق من الغشاء أمام جهد الفعل. وهذا يحفز البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية الخاصة بأيونات الصوديوم لتفتح، بحيث تزداد النفاذية لأيونات الصوديوم ويحدث جهد الفعل باستمرار باتجاه الأمام عبر المحور الأسطواني.

يتم إعادة استقطاب المحاور الأسطوانية عن طريق فتح البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية لأيونات البوتاسيوم، والتي تسمح لأيونات البوتاسيوم بالانتشار إلى خارج المحور الأسطواني. بعد فترة جموح قصيرة، عندما يتعذر فتح البروتينات القنوية المبوبة بالفولتية الخاصة بأيونات الصوديوم، يكون الغشاء قادرًا على الاستجابة مرة أخرى.

تحدد فترات الجموح الحد الأقصى لتكرار النبضات العصبية. في الثدييات، يتم عزل محاور العديد من الخلايا العصبية بواسطة الغلاف المايليني. في الخلايا العصبية المايلينية، تحدث جهود الفعل فقط في عقد رانفييه؛ وهي فجوات بين أغلفة المايلين لخلايا شوان المتجاورة. يحدث الانتقال بالقفز الوثبي في الخلايا العصبية المايلينية، وهو أسرع بكثير من الانتقال في الخلايا العصبية غير المايلينية ذات قطر المحور الأسطواني نفسه.

التشابك العصبي هو منطقة اتصال بين خليتَين عصبيتَين أو بين خلية عصبية حركية وخلية عضلية. في التشابكات العصبية الكولينية، يتم إطلاق الناقل العصبي الأستيل كولين، عند وصول جهود الفعل. تمر النبضات العصبية في اتجاه واحد فقط، لأنه يتم إطلاق الناقل العصبي عن طريق الإخراج الخلوي بواسطة الخلية العصبية قبل التشابكية، لترتبط ببروتينات المستقبل التي توجد فقط في غشاء سطح الخلية العصبية بعد التشابكية. هذه البروتينات المستقبلة تشكِّل قنوات أيونية مبوبة بالربيطة وخاصة بأيونات الصوديوم وتتحفز لتفتح بواسطة الربيطة (مادة كيميائية) وليس عن طريق تغيير فرق الجهد. الربيطة في هذه الحالة هي الأستيل كولين الذي يرتبط بهذه البروتينات، فتفتح قنواتها للسماح لأيونات الصوديوم بالانتشار في الخلايا العصبية بعد التشابكية ما يؤدي إلى إزالة الاستقطاب في أغشيتها.

تابع

يكون لعدة مئات من الخلايا العصبية على الأقل تشابك عصبي واحد مع الشجيرات العصبية وجسم الخلية لكل خلية عصبية داخل الجهاز العصبي المركزي. يسمح وجود العديد من نقاط التشابك العصبي على جسم خلية عصبية واحدة بوجود تكامل في العمل داخل الجهاز العصبي.

ينسق الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء أنشطة الجسم بطرائق مختلفة. يكون التأشير في الجهاز العصبي سريعًا جدًا حيث تنتقل النبضات مباشرة على طول الخلايا العصبية، بينما يكون التأشير في نظام الغدد الصماء أبطأ حيث تنتقل الهرمونات في أنحاء الجسم في الدم.

تتكوّن العضلات المخططة (الهيكلية) من العديد من الخلايا متعددة النوى تسمى الألياف العضلية، والتي تحتوي كل منها على العديد من الليفات العضلية. تحتوي الليفات العضلية على خيوط الميوسين السميكة، والأكتين الرفيعة وهي مرتبة بانتظام، والتي تكوّن الخطوط التي تُشاهد في العضلة. تتكوّن الخيوط السميكة من جزيئات الميوسين التي لها رأس كروي وذيل ليفي؛ ويكون الرأس بمثابة ATPase. تتكوّن الخيوط الرفيعة من الأكتين والتروبونين والتروبوميوسين. يقسم كل ليف عضلي إلى قطع عضلية بواسطة أقراص Z؛ الخيوط الرفيعة موصولة بأقراص Z ويمكن للخيوط السميكة أن تنزلق بين الخيوط الرفيعة.

ترتبط رؤوس الميوسين بخيوط الأكتين الرفيعة لتشكيل جسور متقاطعة؛ ثم تميل رؤوس الميوسين لسحب الخيوط الرفيعة معًا بحيث يتناقص طول كل قطعة عضلية مع انزلاق الخيوط بعضها فوق بعض. يحلّل ATPase بعد ذلك ATP مائيًا، الأمر الذي يوفر الطاقة لرؤوس الميوسين للانفصال عن خيوط الأكتين الرفيعة والارتداد مرة أخرى استعدادًا للارتباط مع الأكتين ثانيةً.

تنتج النباتات العديد من المواد الكيميائية المعروفة باسم منظمات نمو النبات التي تشارك في التحكم في النمو والاستجابة للتغيرات البيئية. يتم تصنيع الأكسين المسمى الإندول -3- حمض الأسيتيك (IAA) بشكل أساسي في القمم النامية للسيقان والجذور، وهو يحفز الخلايا على ضخ البروتونات في جدار الخلية لخفض الرقم الهيدروجيني. تستجيب البروتينات الموجودة في جدار الخلية، المعروفة باسم بروتينات الاستطالة (Extensins) إلى الرقم الهيدروجيني عن طريق فكّ الروابط بين ألياف السيليلوز الدقيقة والمواد المحيطة، مثل الهيميسليلوز، في جدار الخلية، بحيث تسمح للألياف الدقيقة بالانفصال عن بعضها. تمتص الخلايا النباتية الماء عن طريق الخاصية الأسموزية، ويؤدي الضغط المائي الداخلي إلى تمدد الجدران واستطالة الخلايا.

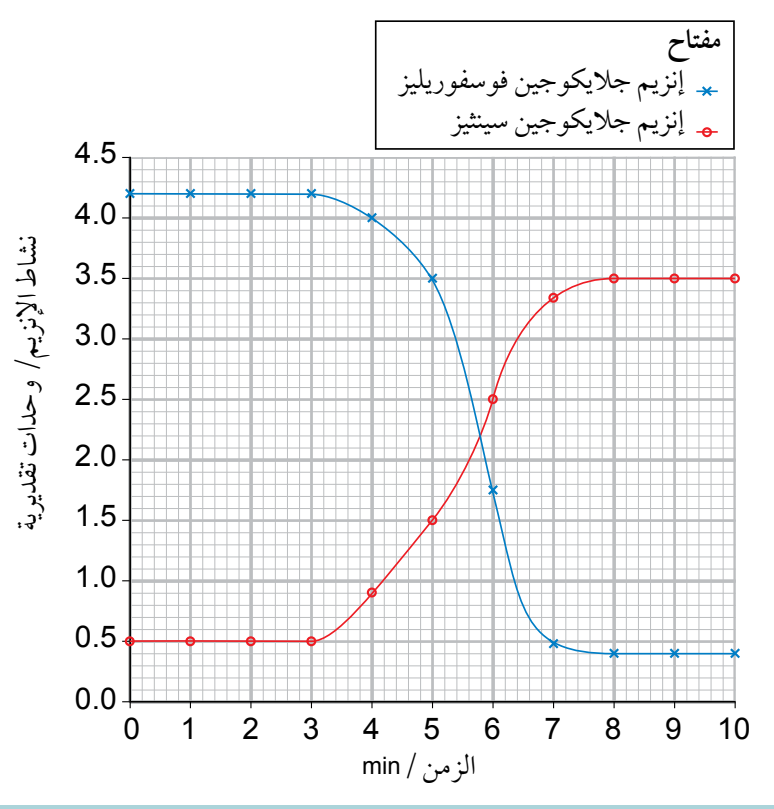
أسئلة نهاية الوحدة

١ إن الهرمون (ADH) وهرمونَي الأنسولين والجلوكاجون هي هرمونات تتحكم في جوانب مختلفة تتعلق بالاتزان الداخلي. يتكوّن جزيء (ADH) من ببتيد قصير، ويتكوّن الجلوكاجون من سلسلة عديد ببتيد واحدة، بينما يتكوّن جزيء الأنسولين من سلسلتَين من عديد الببتيد. لا تستجيب الخلايا المستهدفة لهذه الهرمونات إلا إذا كان لديها مستقبلات معيّنة على غشاء سطح الخلية.

أ. ١. اشرح: لماذا يجب أن تحتوي الخلايا المستهدفة لكل من (ADH) ولهرمونَي الأنسولين والجلوكاجون على مستقبلات تقع على غشاء سطح الخلية حتى تستجيب.

٢. اذكر الخلايا المستهدفة لكل من هذه الهرمونات الثلاثة.

ب. إنزيمان داخل خلوي يشاركان في بناء وتفكيك الجلايكوجين في خلايا الكبد هما إنزيم جلايكوجين سينثيز وإنزيم جلايكوجين فوسفوريليز. في إحدى التجارب، تمّ تعريض خلايا الكبد لمحلول يحتوي على تركيز عالٍ من سكر الجلوكوز. وتمّ قياس درجة نشاط كلا الإنزيمَين على فترات زمنية مدة كل منها 10 دقائق. يظهر التمثيل البياني نتائج التجربة.



١. بالاستناد إلى التمثيل البياني، صِف التغييرات التي حدثت لنشاط كلا الإنزيمَين.

٢. اذكر ما يحدث لكمية الجلايكوجين المخزنة في خلية الكبد في الفترة الزمنية بين 4 دقائق و 10 دقائق.

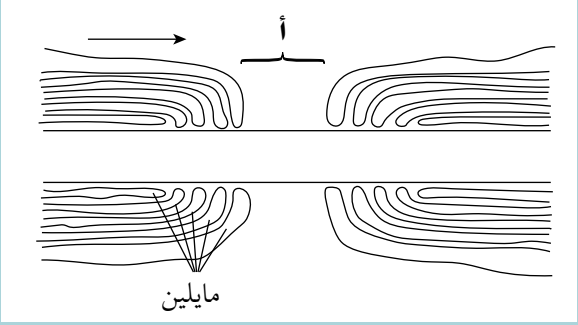
تابع

ج. سجلت نتائج مماثلة عندما تمّ تحديد نشاط الإنزيمَين داخل خلايا الكبد في جسم حيوان ثديي بعد تناوله لوجبة غنية بالنشا. اشرح سبب تغيّر نشاط هذَين الإنزيمَين بعد الوجبة.

د. يمكن للخلايا التحكم في نشاط هذَين الإنزيمَين. صف كيف يتم التحكم في نشاط إنزيم الجلايكوجين فوسفوريليز داخل الخلايا.

هـ. اشرح مزايا استخدام جهاز الغدد الصماء بدلًا من الجهاز العصبي لتنسيق عمل المستجيبات التي تتحكم في تكوين الدم.

٢ يمثل الرسم التخطيطي الآتي صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) لمقطع طولي في خلية عصبية مايلينية.



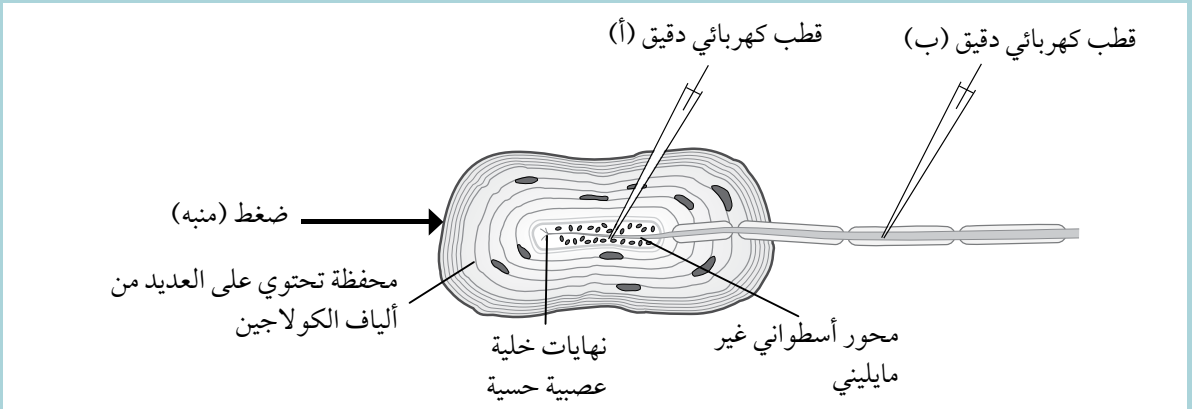
أ. ١. سمِّ المنطقة من الخلية العصبية المسماة (أ).

٢. اذكر اسم الخلية التي تصنع المايلين.

ب. اشرح دور المايلين في انتقال النبضات العصبية.

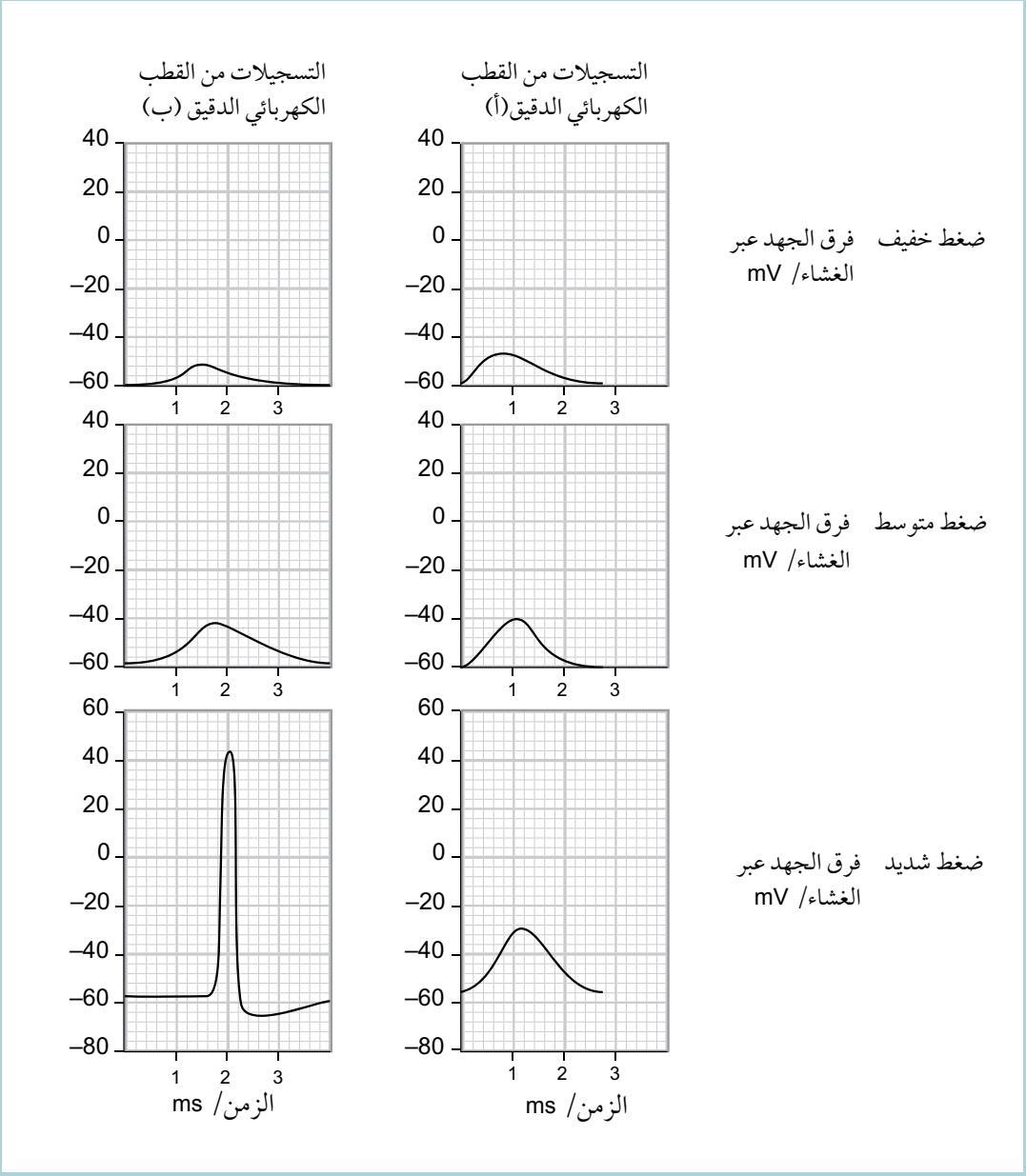
ج. لخص التغييرات التي تحدث في المنطقة (أ) أثناء مرور النبضات العصبية في الاتجاه الذي يظهره السهم.

٣ جسيمات باتشيني Pacinian corpuscle هي نوع من المستقبلات الموجودة في أدمة Dermis الجلد. تحتوي جسيمات باتشيني على نهايات خلية عصبية حسية، محاطة بعدة طبقات من نسيج ضام يسمى المحفظة. تمّ إجراء تجربة لاستقصاء نشاط جسيمات باتشيني عن طريق إدخال أقطاب كهربائية دقيقة في المحور الأسطواني للخلية العصبية الحسية المنتهية فيها، وذلك في المواضع الموضحة في الرسم التخطيطي الآتي.



تابع

تمّ الضغط على جسيمات باتشيني وتسجيل النشاط الكهربائي في المحور الأسطواني عند الأقطاب الكهربائية الدقيقة أ و ب. التمثيلات البيانية في الشكل الآتي توضح النتائج.



أ. اقترح ما حدث في المنطقة غير المايلينية من المحور الأسطواني عندما تمّ الضغط على جسيم باتشيني.

ب. اشرح نمط التسجيلات التي سجلها القطب الكهربائي الدقيق (ب) عندما زيادة الضغط على الجسيم.

ج. اشرح السبب في أن الخلايا العصبية الحسية المرتبطة بجسيمات باتشيني هي مايلينية وليست غير مايلينية.

تابع

٤ **أ.** لخص الأحداث التي تحصل عند عبور نبضة عصبية التشابك العصبي بين خليتَين عصبيتَين.

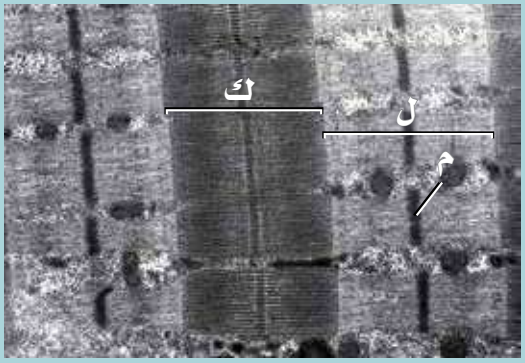
ب. يوضح الجدول الآتي خصائص أربعة من المركبات التي تعمل في التشابكات العصبية الكولينية.

المركب الكيميائي	التأثير في التشابك العصبي الكولينيي
الكورار Curare	يتنافس مع (ACh) على موقع المستقبل على البروتينات القنوية لأيونات الصوديوم المبوبة بالربيطة والتي تتحفز بها (الأستيل كولين).
الإزيرين Eserine	تتنافس مع (ACh) على الموقع النشط لإنزيم الأستيل كولين إستريز، والذي يحفز التحلل المائي لكل جزيء (ACh) إلى مادتَي الأسيتات والكولين.
ميثيل الزئبق Methylmercury	يثبط الإنزيم الذي يصنع الأستيل كولين.
النيكوتين Nicotine	ينشط بعض البروتينات القنوية لأيونات الصوديوم المبوبة والتي يتم تنبيهها للفتح بواسطة ربيطة في الأغشية بعد التشابكية.

١. اذكر واشرح تأثير كل مركب على عملية انتقال النبضات العصبية عبر التشابكات العصبية الكولينية.

٢. يمكن استخدام الإزيرين Eserine لمواجهة تأثير الكورار Curare. اشرح كيف يمكن للإزيرين أن يحدث هذا التأثير.

٥ تظهر الصورة المجهرية الإلكترونية الآتية أجزاءً من بعض الليفات العضلية في عضلة مخططة في حالة انبساط.



أ. ١. سمّ الأجزاء المسماة (ك، ل، م).

٢. كم عدد الليفات العضلية التي يمكن رؤيتها في الصورة المجهرية الإلكترونية؟ اشرح إجابتك.

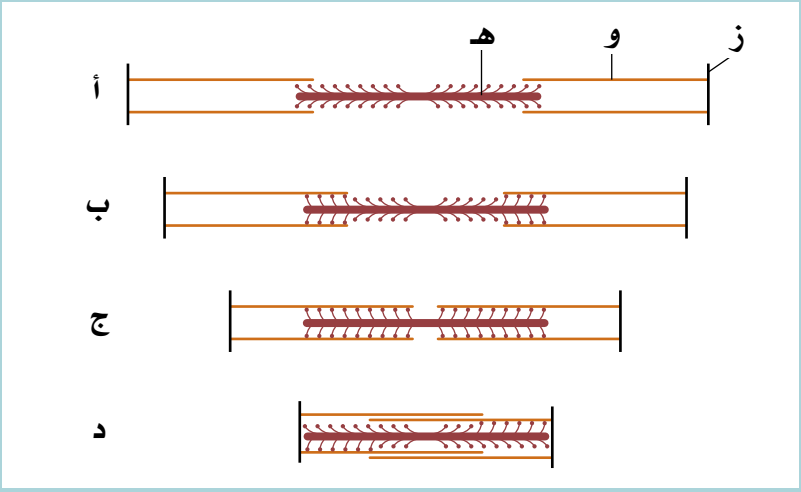
تابع

ب. ١. هناك العديد من حبيبات الجلايكوجين والميتوكوندريا مرئيّة في الصورة المجهرية الإلكترونية. اشرح سبب وجودهما هناك.

٢. صف كيف يمكنك معرفة أن هذه الصورة المجهرية الإلكترونية هي لعضلة منبسطة وليست منقبضة.

ج. يصل تكبير هذه الصورة المجهرية الإلكترونية 16000 مرة. احسب الطول الحقيقي للقطعة العضلية التي تتضمن المنطقة (ك). أعطِ إجابتك بوحدة الميكروميتر (µm).

٦ تُظهر الرسوم التخطيطية الآتية جزءًا من قطعة عضلية في حالات مختلفة من الانقباض.



أ. سمِّ الأجزاء: (هـ، و، ز).

ب. اشرح سبب عدم وجود جسور عرضية للأكتين والميوسين في الرسم التخطيطي (أ).

ج. في بعض حالات الانقباض تستطيع الألياف العضلية أن تنقبض بقوة أكبر مقارنة بحالات انقباض غيرها. اقترح أي رسم تخطيطي يوضح حالة الانقباض التي يمكنها إنتاج أكبر قوة ممكنة، واشرح أسباب اختيارك لذلك.

د. اشرح سبب عدم قدرة القطعة العضلية الموضحة في الرسم التخطيطي (د) على الانقباض أكثر.

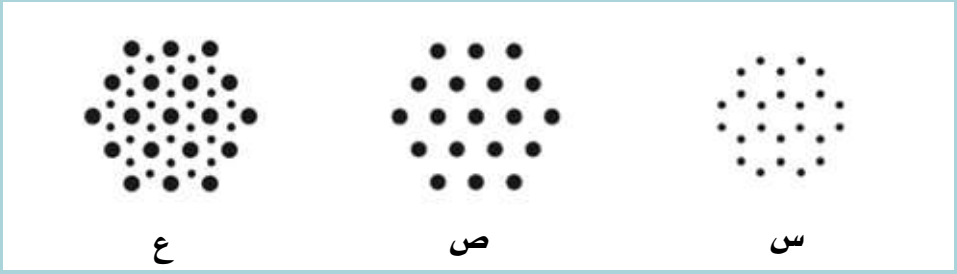
هـ. يمكن للعضلة أن تنقبض بقوة، لكنها لا تستطيع سحب نفسها إلى طولها الأصلي كما كانت في حالة الانبساط.

١. بالإشارة إلى آلية انقباض العضلات، اشرح سبب ذلك.

٢. اقترح كيف يمكن إرجاع القطعة العضلية في الرسم التخطيطي (د) إلى الحالة الموضحة في الرسم التوضيحي (أ).

تابع

٧ أُخذت خزعة من عضلة في ساق حصان سباق سليم. تمّ فصل الألياف العضلية بعضها عن بعض وأُخذت مقاطع عرضية من أحد هذه الألياف. ثم فُحصت هذه المقاطع العرضية باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ. يوضح الشكل الآتي رسومًا تخطيطية لثلاثة مقاطع عرضية مختلفة من ليف عضلي مأخوذ من ليف عضلي.



أ. اشرح الاختلافات بين المقاطع (س) و (ص) و (ع). يمكنك تنفيذ رسم تخطيطي مع مسمياته لتوضيح إجابتك.

ب. تمّ أخذ المقاطع من ليف عضلي في حالة انبساط. اقترح واشرح كيف ستظهر المقاطع الثلاثة إذا تمّ أخذها من ليف عضلي انقبض إلى أقصى حد ممكن له.

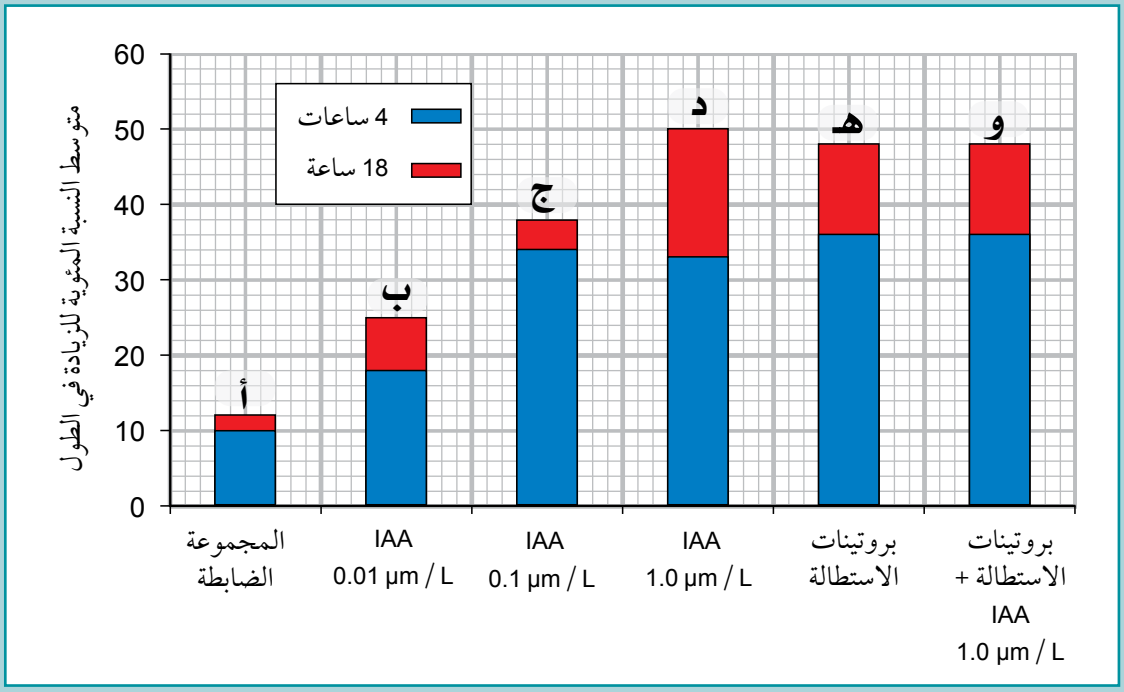
٨ بروتينات الاستطالة هي بروتينات توجد في جدران الخلايا النباتية، ويعتقد أن لها دورًا في نمو الخلايا النباتية واستطالتها. قام علماء وظائف النبات (فسيولوجيا النبات) باستقصاء تأثيرات بروتينات الاستطالة، وهرمون الأكسين (IAA) على نمو المجموع الخضري في نبات رشاد الصخر، *Arabidopsis thaliana*.

تمّ تقطيع المجموع الخضري من بادرة (شتلة) هذا النبات إلى قطع، وقسمت إلى ست مجموعات (أ، ب، ج، د، هـ، و) تحتوي كل منها على عشر قطع من المجموع الخضري. تمّ وضع القطع من كل مجموعة في طبق بتري، وعولجت على النحو التالي:

- المجموعة (أ) كانت المجموعة الضابطة.
- عولجت المجموعات (ب) إلى (د) بتراكيز مختلفة من الأكسين (IAA) .
- عولجت المجموعة (هـ) بمحلول من بروتينات الاستطالة المعزولة من جدران الخلايا.
- عولجت (و) ببروتينات الاستطالة وبأعلى تركيز من هرمون الأكسين (IAA).

تابع

تمّ قياس أطوال القطع بعد 4 ساعات وبعد 18 ساعة من بدء المعالجات (التجربة). يبيّن التمثيل البياني بالأعمدة النتائج التي تمّ الحصول عليها.



أ. اقترح معالجة مناسبة للمجموعة (أ).

ب. اقترح سبب عرض النتائج على أساس النسبة المئوية للزيادات في الطول بدلًا من القيم الفعلية للزيادات في الطول.

ج. استخدم بيانات التمثيل البياني بالأعمدة لوصف تأثير التراكيز المختلفة من الأكسين (IAA) على مقدار الزيادة في طول القطع (المجموعات من ب إلى د).

د. تظهر النتائج أنه لا يوجد فرق بين متوسط النسبة المئوية للزيادة في أطوال القطع في المجموعة (هـ) وفي المجموعة (و).

اقترح سبب تطابق النتائج على الرغم من أن كل من الأكسين (IAA) وبروتينات الاستطالة يحفزان نمو الاستطالة.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أقارن الطرائق التي تنسّق بها الثدييات استجاباتها للمنبّهات الداخلية والخارجية باستخدام جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي.	٥-١			
أصف تركيب ووظيفة الخلايا العصبية الحسية والحركية وألخص كيفية عمل كل منها.	٥-٢			
أذكر وظيفة الخلايا العصبية الموصلة.	٥-٢			
ألخص دور خلايا المستقبلات الحسية في تحسس المنبهات وتحفيز انتقال النبضات في الخلايا العصبية الحسية.	٥-٢			
أصف تسلسل الأحداث التي تؤدي إلى تكوّن جهد الفعل في الخلية العصبية الحسية، باستخدام خلية مستقبل كيميائي مثل برعم التذّوق.	٥-٢			
أصف وأشرح التغيرات في جهد غشاء الخلايا العصبية، بما في ذلك: • كيفية الحفاظ على جهد الراحة. • الأحداث التي تحدث أثناء جهد الفعل. • كيفية استعادة جهد الراحة أثناء فترة الجموح.	٥-٢			
أصف وأشرح الانتقال السريع للنبضة العصبية في الخلايا العصبية المايلينية مع الإشارة إلى النقل الوثبي.	٥-٢			
أشرح أهمية فترة الجموح في تحديد تكرار النبضات.	٥-٢			
أصف وأشرح تركيب وعمل التشابك العصبي الكوليني، بما في ذلك دور أيونات الكالسيوم.	٥-٢			
أصف التركيب الدقيق للعضلة المخططة، مع الإشارة إلى القطعة العضلية باستخدام الصور المجهرية الإلكترونية والرسوم التخطيطية.	٥-٣			
أشرح نموذج الخيط المنزلق للانقباض العضلي.	٥-٣			
أشرح دور الأكسين في نمو الاستطالة عن طريق تحفيز ضخ البروتونات المسببة لحموضة جدران الخلايا.	٥-٤			

مصطلحات

الأفعال الإجرائية

احسب Calculate: استخلص، من الحقائق المعطاة، المعلومات أو الأرقام.

اذكر State: عبّر بكلمات واضحة.

اشرح أو فسِّر Explain: اعرض الأهداف أو الأسباب/اجعل العلاقات بين الأشياء واضحة/توقّع لماذا و/أو كيف، وادعم إجابتك بأدلّة ذات صلة.

اقترح Suggest: طبّق المعرفة والفهم على المواقف التي تتضمّن مجموعة من الإجابات الصحيحة من أجل تقديم المقترحات

حدّد Identify: سمِّ، اختر، تعرّف.

صِف Describe: قدّم الخصائص والميزات الرئيسية.

علّق comment: أعطِ رأيًا مستنيرًا.

عرّف Define: ضع الخطوط العريضة أو النقاط الرئيسية.

قدّم Give: استخرج إجابة من مصدر معيّن أو من الذاكرة.

قوِّم Assess: أصدر حكمًا مفيدًا أو مستنيرًا.

قارن Compare: ح دّد أوجه التشابه و/أو الاختلاف معلّقًا عليها.

لخص Outline: ضع الخطوط العريضة أو النقاط الرئيسية.

بيّن أنّ (Show that): قدّم دليلًا منظّمًا يؤدّي إلى نتيجة معينة.

ناقش Discuss: اكتب حول الموضوع بطريقة منظمة.

المصطلحات

الاتزان الداخلي Homeostasis: الحفاظ على بيئة داخلية ثابتة نسبيًا للخلايا داخل الجسم. (ص ١٢٢)

الإجراء التصحيحي Corrective action: استجابة أو سلسلة استجابات تعيد العامل الفسيولوجي إلى المستوى الطبيعي بحيث يتم الحفاظ على بيئة ثابتة للخلايا داخل الجسم. (ص ١٢٢)

الإخصاب Fertilization: اندماج نواتي مشيجين لتكوين الزيجوت. (ص ٤٥)

أحادية المجموعة الكروموسومية Haploid: تحتوي على مجموعة واحدة من الكروموسومات، ويمكن الإشارة إليها بالرمز (n). (ص ٤٥)

أدينيليل سيكليز Adenylyl cyclase: إنزيم يحفز تكوين المرسال الثاني cAMP. (ص ١٤٢)

إزالة الاستقطاب Depolarisation: انعكاس جهد الراحة عبر غشاء سطح الخلية لخلية عصبية أو عضلية، بحيث يصبح الداخل مشحونًا بشحنة موجبة مقارنة بشحنة الخارج. (ص ١٧٤)

الارتباط بالكروموسوم الجسدي Autosomal linkage: وجود جينَين على الكروموسوم الجسدي نفسه (كل الكروموسومات ما عدا الكروموسومات الجنسية)، لذا يميلان إلى أن يورثا معًا، ولا يتوزعان بشكل مستقل. (ص ٦٦)

ازدواج القواعد المكملة Complementary base pairing: الارتباط بين A و T أو U وبين C و G بروابط هيدروجينية في الأحماض النووية. (ص ٢٥)

استحداث الجلوكوز Gluconeogenesis: تكوّن الجلوكوز في الكبد من مصادر غير كربوهيدراتية مثل الأحماض الأمينية والبيروفات واللاكتات والأحماض الدهنية والجليسرول. (ص ١٤٣)

إعادة الاستقطاب Repolarisation: إعادة فرق الجهد عبر غشاء سطح الخلية لخلية عصبية أو عضلية إلى وضعه الطبيعي الذي يتبع عملية إزالة استقطاب جهد الفعل. (ص ١٧٤)

إعادة الامتصاص الانتقائي Selective reabsorption: حركة مواد معيّنة من الراشح في النفرونات لتعود إلى الدم. (ص ١٢٨)

الأستيل كولين إستريز Acetylcholinesterase: إنزيم موجود في الشق التشابكي وبالتحديد على سطح الغشاء بعد التشابكي (من جهة الشق التشابكي)، وهو يقوم بالتحليل المائي لجزيئات (ACh) إلى جزيئات من الأسيتات والكولين. (ص ١٨٧)

الأستيل كولين (ACh) Acetylcholine: نوع من النواقل العصبية تفرزها التشابكات الكولينية. (ص ١٨٥)

الإفراز Excretion: إزالة المنتجات السامة أو فضلات الأيض من الجسم. (ص ١٢٣)

الأكتين Actin: البروتين الذي تتكوّن منه الخيوط الرفيعة في العضلات المخططة. (ص ١٩١)

الأكسين Auxin: منظم نمو النبات (الهرمون النباتي) الذي يحفز استطالة الخلايا. (ص ١٩٤)

أليل Alleles: شكل من أشكال الجين. (ص ٥١)

الأليلات المتعددة Multiple alleles: وجود ثلاثة أليلات أو أكثر لجين معيّن، مثل تحديد فصائل الدم O، B، A. (ص ٥٥)

التواء هنلي Loop of Henle: جزء من النفرون يوجد بين الأُنيبيب الملتوي القريب والأُنيبيب الملتوي البعيد. (ص ١٢٥)

إنزيم قابل للتحفيز Inducible enzyme: إنزيم يتم بناؤه فقط عند وجود مادته المتفاعلة. (ص ٧٥)

إنزيم قابل للتثبيط Repressible enzyme: إنزيم يتم بناؤه عادة، ويتم منع بنائه عند وجود مستجيب. (ص ٧٥)

إنزيمات القطع إندونيوكلييز Restriction endonuclease enzymes: إنزيمات مشتقة أصلًا من البكتيريا، تقطع في أماكن محددة داخل جزيء DNA وليس في نهايته. (ص ٨٧)

الإنسولين Insulin: هرمون ببتيدي صغير تفرزه خلايا بيتا في جُزيرات لانجرهانس في البنكرياس ليخفض من تركيز الجلوكوز في الدم. (ص ١٣٩)

الانقسام الاختزالي Meiosis: انقسام خلوي يؤدي إلى إنتاج أربع خلايا جديدة تحتوي نواة كل منها على نصف عدد كروموسومات الخلية الأصلية وأليلات معاد تنظيمها، ويحدث في الإنسان والحيوان والنبات ويؤدي إلى تكوين الأمشاج. (ص ٤٦)

الانقسام المنصف Reduction division: انقسام خلوي يؤدي إلى تنصيف في عدد الكروموسومات، الانقسام الاختزالي الأول هو انقسام منصف. (ص ٤٩)

أنيبيبات (T) T-tubules انثناءات من الساركوليما تمتد عميقًا داخل الليف العضلي وتنقل إليها النبضات العصبية. (ص ١٨٩)

الأُنيبيب الملتوي البعيد Distal convoluted tubule: جزء من النفرون يمتد من التواء هنلي إلى القناة الجامعة. (ص ١٢٧)

الأُنيبيب الملتوي القريب Proximal convoluted tubule: جزء من النفرون يمتد من محفظة بومان إلى التواء هنلي. (ص ١٢٥)

أوبرون Operon: وحدة وظيفية في عملية النسخ، وهي مجموعة من الجينات يتحكم بها المحفز نفسه. (ص ٧٤)

أوبرون *Lac* Operon Lac: هو الأوبِرون الذي يوجد في بعض البكتيريا ويتحكم في إنتاج إنزيم بيتا(β) – جالاكتوسيديز وبروتينين تركيبيين آخرَين. (ص ٧٤)

بروتينات الاستطالة Expansins: بروتينات توجد في جدران الخلايا النباتية تساعد على تفكك الروابط بين ليفات السليلوز أثناء نمو الاستطالة للخلايا النباتية. (ص ١٩٥)

بروتين كاينيز A Protein kinase A: إنزيم ينشطه AMP الحلقي، وعندما ينشط يضيف مجموعات فوسفات إلى بروتينات أخرى، بما فيها كاينيز فوسفوريليز لتنشيطها. (ص ١٤٢)

بروتين قنوي مبوب بالفولتية Voltage-gated channel protein: بروتين قنوي غائر يمتد عبر غشاء سطح الخلية يفتح أو ينغلق استجابة للتغيرات في الجهد الكهربائي عبر الغشاء. (ص ١٧٤)

البروتين القنوي المبوب بالفولتية لأيونات الكالسيوم Voltage-gated calcium ion channel protein: بروتين قنوي في أغشية الخلايا العصبية قبل التشابكية والتي تفتح استجابة لإزالة الاستقطاب للسماح بانتشار أيونات الكالسيوم مع منحدرها الكهروكيميائي. (ص ١٨٥)

بروتين مستقبل Receptor protein: بروتين على الغشاء بعد التشابكي يعمل بمثابة بروتين قنوي مبوب بالربيطة، يفتح استجابة لارتباط ناقل عصبي به (يعرف أيضًا باسم مستقبل أيونوتروبيك Ionotropic receptor). (ص ١٨٥)

بيتا (β) – جلاكتوسيديز β–galactosidase: إنزيم يحفز التحلل المائي للاكتوز إلى جلوكوز وجلاكتوز. (ص ٧٣)

DNA بوليميريز DNA polymerase: إنزيم ينسخ DNA. يمتد على طول كل شريط مفرد مضيفًا نيوكليوتيدًا مكمّلًا واحدًا في كل مرة، لترتبط بعد ذلك بواسطة إنزيم DNA لايجيز. (ص ٢٦)

تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis: تفكك الجلايكوجين بإزالة مونمرات الجلوكوز. (ص ١٤٣)

تراكيب عبورية Recombinants: الأبناء الذين يظهرون تراكيب من الصفات مختلفة عن الأبوَين. (ص ٦٩)

الترجمة Translation: مرحلة من مراحل عملية بناء البروتين يتم خلالها تحويل (ترجمة) تتابع النيوكليوتيدات في جزيء RNA المرسال (mRNA) حسب قواعد الشيفرة، إلى تتابع مقابل من الأحماض الأمينية في سلسلة عديد الببتيد، وهي تحدث في الرايبوسومات. (ص ٢٩)

الترشيح الفائق Ultrafiltration: الترشيح على النطاق الجزيئي لفصل الجزيئات الصغيرة عن الجزيئات الأكبر مثل البروتينات (مثل الترشيح الذي يحدث عند تدفق الدم عبر الشعيرات الدموية، بخاصة تلك الموجودة في كُبيبات الكُلية). (ص ١٢٨)

التروبوميوسين Tropomyosin: بروتين ليفي يشكل جزءًا من الخيوط الرفيعة في الليفيات العضلية داخل ألياف (خلايا) العضلات المخططة. يقوم التروبوميوسين بسد موقع الارتباط الخاص برؤوس الميوسين على الخيوط الدقيقة؛ وبالتالي يمنع تكوين الجسور المتقاطعة بين رؤوس الميوسين وخيوط الأكتين. (ص ١٩١)

التروبونين Troponin: بروتين مرتبط بالكالسيوم يمثل جزءًا من الخيوط الرفيعة في الليفيات العضلية في العضلات المخططة. (ص ١٩١)

تزاوج أحادي الهجين Monohybrid cross: نمط تزاوج لوراثة جين واحد. (ص ٥٦)

تزاوج ثنائي الهجين Dihybrid cross: نمط تزاوج لوراثة جينين مختلفين. (ص ٥٦)

تزاوج اختباري Test cross: تزاوج فرد بصفة سائدة مع فرد بصفة متنحية متماثلة الأليلات. يمكن أن تشير الطرز المظهرية للأبناء الناتجة ما إذا كان الطراز الجيني للفرد ذي الصفة السائدة متماثل الأليلات أم غير متماثل الأليلات. (ص ٥٨)

التضاعف شبه المحافظ Semi-conservative replication: الطريقة التي يتم خلالها نسخ جزيء DNA لتكوين جزيئَين متماثلَين يحتوي كل منهما على شريط واحد من الجزيء الأصلي وشريط واحد متكوّن حديثًا. (ص ٢٧)

التشابك العصبي الكوليني cholinergic synapse: التشابك العصبي الذي تكون فيه المادة الناقلة هي الأستيل كولين (ACh). (ص ١٨٥)

التشابك العصبي Synapse: نقطة تلتقي عندها خليتان عصبيتان، ولكنهما لا تتلامسان؛ يتكوّن التشابك العصبي من نهاية خلية عصبية قبل تشابكية، والشق التشابكي، ونهاية خلية عصبية بعد تشابكية. (ص ١٨٤)

التغذية الراجعة الإيجابية Positive feedback: عملية يؤدي تغير بعض المتغيرات فيها مثل العامل الفسيولوجي إلى عمليات تُعزِّز التغير الأولي. (ص ١٢٣)

التغذية الراجعة السلبية Negative feedback: عملية يؤدي فيها تغيير في بعض المتغيرات (مثلًا تركيز الجلوكوز في الدم) إلى حدوث عمليات تعيده إلى الوضع الطبيعي. (ص ١٢٢)

تفاعل البوليميريز المتسلسل Polymerase chain (RCP) reaction: عملية يتم فيها تضخيم أجزاء معينة من DNA آليًا باستخدام مراحل متناوبة من فصل عديد النيوكليوتيد (تمسخ DNA) وبناء DNA الذي يحفزه إنزيم DNA بوليميريز. (ص ٩٦)

التفوق الجيني Epistasis: تفاعل بين جينَين في موقعَين كروموسوميَّين مختلفَين، يؤثر أحدهما في تعبير الجين الآخر. (ص ٦٥)

التكاثر الجنسي Sexual reproduction: تكاثر يتضمن اندماج الأمشاج بعملية الإخصاب لتكوين الزيجوت. (ص ٤٥)

تكوّن الجلايكوجين Glycogenesis: بناء الجلايكوجين بإضافة مونمرات الجلوكوز. (ص ١٤١)

التليف الكيسي Cystic fibrosis (CF): مرض وراثي ينتج من أليلات متنحية من جين *CFTR* (منظم النقل عبر الغشاء في التليف الكيسي). (ص ١٠٢)

التنظيم الأسموزي Osmoregulation: التحكم في جهد الماء للدم والسائل النسيجي عن طريق التحكم في المحتوى المائي و/ أو تركيز الأيونات، بخاصة أيونات الصوديوم. (ص ١٣٥)

التوزيع الحر Independent assortment: إنتاج تراكيب جينية مختلفة من الأليلات في الخلايا الناتجة بسبب الاصطفاف العشوائي للثنائيات المتكافئة على خط استواء الخلية أثناء الطور الاستوائي الأول من الانقسام الاختزالي. (ص ٥٤)

ثنائي النيوكليوتيد Dinucleotide: نيوكليوتيدان مرتبطان معًا برابطة فوسفات ثنائية الإستر. (ص ٢٢)

الثنائيات المتكافئة Bivalent: كروموسومان متماثلان يصطفان أحدهما بجوار الآخر أثناء الانقسام الاختزالي الأول. (ص ٤٨)

ثنائية المجموعة الكروموسومية Diploid: الخلايا التي تحتوي على مجموعتين كاملتين من الكروموسومات، ويمكن الإشارة إليها بالرمز (2n). (ص ٤٥)

جُزيرات لانجرهانس Islets of langerhans: مجموعة من الخلايا في البنكرياس تفرز الجلوكاجون والإنسولين. (ص١٣٩)

الجلوكاجون Glucagon: هرمون ببتيدي صغير تفرزه خلايا ألفا في جُزيرات لانجرهانس في البنكرياس ليزيد من تركيز الجلوكوز في الدم. (ص ١٣٩)

جهد الراحة Resting potential: الفرق في الجهد الكهربائي الذي يتم الحفاظ عليه عبر غشاء سطح الخلية للخلايا العصبية عندما لا يقوم بنقل جهد فعل؛ عادة ما يكون نحو 70 mV- بالداخل ويتم الحفاظ عليه جزئيًا بواسطة مضخات الصوديوم والبوتاسيوم. (ص ١٧١)

جهاز الاستشعار الحيوي Biosensor: أداة تستخدم المادة الحيوية مثل الإنزيم لقياس تركيز مركب كيميائي. (ص ١٤٥)

جهاز الغدد الصماء The endocrine system: يتكوّن من جميع الغدد الصماء في الجسم مع الهرمونات التي تفرزها. (ص ١٦٤)

جهد العتبة Threshold potential: فرق الجهد الحرج عبر غشاء سطح الخلية لمستقبلات حسية أو لخلية عصبية والذي يجب الوصول إليه قبل بدء جهد الفعل. (ص ١٧٣)

جهد الفعل Action potential: تغيير قصير ووجيز في فرق الجهد من 70 mV- إلى 30 mV+ عبر أغشية سطح الخلية للخلايا العصبية وخلايا العضلات سببه حركة أيونات الصوديوم إلى الداخل. (ص ١٧١)

جهد المستقبل Receptor potential: تغير في جهد الراحة الطبيعي عبر غشاء خلية مستقبلة، ناتج من تأثير منبّه فيه. (ص ١٨٢)

الجيل الأول F_1 First filial generation: الأبناء الناتجون من تزاوج بين أفراد طرازهم الجيني متنح متماثل الأليلات مع أفراد طرازهم الجيني سائد متماثل الأليلات. (ص ٥٨)

الجيل الثاني F_2 Second filial generation: الأبناء الناتجون من تزاوج بين أفراد الجيل الأول. (ص ٥٨)

الجين Gene: تتابع محدد من نيوكليوتيدات DNA الذي يشفّر لعديد ببتيد أو بروتين معيّن. (ص ٢٨)

الجين التركيبي Structural gene: الجين الذي يشفر لبروتين له وظيفة في الخلية. (ص ٧٣)

الجين المنظم Regulatory gene: الجين الذي يشفر لبروتين يساعد في التحكم في تعبير جينات أخرى. (ص ٧٣)

الجينوم Genome: المجموعة الكاملة من الجينات أو المادة الجينية الموجودة في الخلية أو الكائن الحي. يحتوي جينوم حقيقية النواة على DNA في النواة والميتوكندريا، وتشمل جينومات النباتات DNA الموجود في البلاستيدات الخضراء. (ص ٨٩)

حامل Carrier: الفرد الذي يوجد لديه أليل معيّن كنسخة واحدة (من الجين) بحيث يحجب تأثيره (التعبير عنه) وجود أليل سائد، فلا تظهر الصفة المرتبطة به (مثل مرض وراثي) لكن يمكن أن تنتقل إلى الأبناء. (ص ٦٠)

AMP الحلقي (cAMP) Cyclic AMP: المرسال الثاني في مسار التأشير الخلوي. (ص ١٤٢)

الخلية الحارسة Guard cell: خلية بشرة على شكل كُلية توجد مع خلية أخرى في زوج يحيط بالثغر وينظّم فتحه أو إغلاقه. (ص ١٤٦)

خلايا رجلاء Podocytes: إحدى الخلايا التي تكوّن النسيج الطلائي لمحفظة بومان والمحيطة بالشعيرات الدموية الكُبيبية. (ص ١٢٨)

الخلية العصبية Neurone: خلية متخصصة لتوصيل النبضات العصبية. (ص ١٦٦)

الخلية العصبية الحسية Sensory neurone: خلية تنقل النبضات العصبية من المستقبلات إلى الجهاز العصبي المركزي. (ص ١٦٧)

الخلية العصبية الحركية Motor neurone: خلية عصبية يكون جسمها في الدماغ أو الحبل الشوكي أو في عقدة عصبية (منطقة منتفخة في العصب)، وتنقل النبضات العصبية إلى مستجيب مثل العضلات أو الغدد. (ص ١٦٧)

الخلية العصبية بعد التشابكية Postsynaptic neurone: الخلية العصبية الموجودة على الجانب الآخر من التشابك العصبي للخلية العصبية التي يصل إليها جهد الفعل. (ص ١٨٤)

الخلية العصبية قبل التشابكية Presynaptic neurone: خلية عصبية تنتهي عند التشابك العصبي الذي منه يتم إطلاق ناقل عصبي عند وصول جهد فعل الخلية العصبية بعد التشابكية. (ص ١٨٤)

رابطة فوسفات ثنائية الإستر Phosphodiester bond: رابطة تربط نيوكليوتيدَين معًا. ثمّة رابطتا إستر؛ تربط كل واحدة منهما مجموعة الفوسفات المشتركة بجزيئَي السكر على جانبَيها. (ص ٢٢)

الزيجوت Zygote: خلية تنتج من اندماج نواتَي مشيجَين. معظم الزيجوتات ثنائية المجموعة الكروموسومية. (ص ٤٥)

سائد Dominant: الأليل السائد له التأثير نفسه على الطراز المظهري، سواء وجد أليل آخر أو لم يوجد. (ص ٥٥)

السايتوبلازم Sarcoplasm: سيتوبلازم الليف العضلي (الخلية العضلية). (ص ١٨٩)

السارکولیما Sarcolemma: غشاء سطح الليف العضلي. (ص ١٨٩)

سم Bt: سم مبيد للحشرات تنتجه البكتيريوم العصوية التورنجية *Bacillus thuringiensis*. ينقل الجين الذي يشفر للسم إلى نباتات المحاصيل لتصبح مقاومة للآفات الحشرية. (ص ١٠٨)

سيادة مشتركة Codominant: يؤثر كل من أليلَي السيادة المشتركة في الطراز المظهري عند وجودهما معًا. (ص ٥٦)

الشبكة الساركوبلازمية (SR) Sarcoplasmic reticulum: الشبكة الإندوبلازمية في الليف العضلي. (ص ١٨٩)

الشريط المتأخر Lagging strand: أثناء تضاعف DNA، يَنسخ الشريط الأصلي 5′ إلى 3′ نفسه لإنتاج شريط متأخر. (ص ٢٦)

الشريط المتقدم Leading strand: أثناء تضاعف DNA، يَنسخ الشريط الأصلي 3′ إلى 5′ نفسه لإنتاج شريط متقدم. (ص ٢٦)

الشريّن الوارد Afferent arteriole: شريّن يحمل الدم إلى الشعيرات الدموية للكُبيبة. (ص ١٢٧)

الشريّن الصادر Efferent arteriole: شُريّن يحمل الدم بعيدًا عن الشعيرات الدموية للكُبيبة. (ص ١٢٧)

الشق التشابكي Synaptic cleft: فجوة صغيرة جدًا بين خليتَين عصبيتَين عند التشابك العصبي؛ تنتقل النبضات العصبية عبر الشقوق التشابكية بواسطة مواد تسمى النواقل العصبية. (ص ١٨٤)

الطراز الجيني Genotype: الأليلات التي توجد في الكائن الحي. (ص ٥٥)

الطراز المظهري Phenotype: الصفات الملحوظة في الكائن الحي، وهي تتأثر بالجينات وبالبيئة. (ص ٥٥)

طفرة انزياح الإطار Frame - shift mutation: نوع من الطفرات الجينية يحدث بسبب إدخال أو حذف نيوكليوتيد واحد أو أكثر، والذي يؤدي إلى قراءة غير صحيحة لتتابع الثلاثيات بسبب انزياح إطار القراءة. (ص ٣٥)

الطفرة الجينية Gene mutation: تغيير في تتابع القواعد في جزيء DNA. (ص ٣٤)

الطفرة الكروموسومية Chromosome mutation: تغيير عشوائي غير متوقع في تركيب أو عدد الكروموسومات في الخلية. (ص ٣٤)

عامل النسخ Transcription factor: جزيء بروتيني يؤثر إما بتنشيط نسخ الجين أو تثبيطه. (ص ٧٥)

العبور Crossing over: تبادل الأليلات بين الكروماتيدات غير الشقيقة للكروموسومات المتماثلة أثناء الانقسام الاختزالي الأول. (ص ٤٩)

عديد النيوكليوتيد Polynucleotide: شريط من النيوكليوتيدات مرتبطة معًا بروابط فوسفات ثنائية الإستر. (ص٢٠)

العضلة المخططة Striated muscle: نوع من الأنسجة العضلية في العضلات الهيكلية (وفي العضلة القلبية)، وتحتوي الألياف العضلية على خطوط عرضية منتظمة عند النظر إليها ورؤيتها تحت المجهر الضوئي. (ص ١٨٨)

عقدة رانفييه Node of Ranvier: فاصل أو فجوة قصيرة جدًا بين خلايا شوان حيث تكون المحاور الأسطوانية العصبية المايلينية غير مغطاة بالمايلين لذا تكون مكشوفة للسائل النسيجي. (ص ١٧٠)

الغدة الصماء Endocrine gland: عضو يفرز الهرمونات مباشرة في الدم؛ تُعرف الغدد الصماء أيضًا باسم الغدد اللاقنوية. (ص ١٦٤)

غير متماثل الأليلات Heterozygous: وجود أليلَين مختلفين لجين معيّن. (ص ٥٥)

فترة الجموح Refractory period: فترة زمنية تتعافى خلالها الخلية العصبية من جهد الفعل للعودة إلى وضع جهد الراحة، ولا يمكن خلالها حدوث جهد فعل آخر. (ص ١٧٦)

الفحص الجيني Genetic screening: فحص الجنين أو حديث الولادة أو الطفل أو البالغ لمعرفة ما إذا كان أليل معيّن موجودًا. (ص ١٠٢)

فرق الجهد Potential difference: الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتَين بشكل عام؛ وفي الجهاز العصبي، هي فرق الجهد بين داخل وخارج غشاء سطح الخلية مثل الغشاء الذي يحيط بالمحور الأسطواني. (ص ١٧١)

الفصل الكهربائي الهلامي Gel electrophoresis: فصل الجزيئات المشحونة (مثلًا DNA) بالحركة المتفاوتة عبر هلام في مجال كهربائي. تعتمد درجة الحركة على كتلة أجزاء DNA. (ص ٩٨)

الفيروسات آكلة البكتيريا (الفاجات) Bacteriophages-Phages: نوع من الفيروسات يهاجم البكتيريا. تكون المادة الجينية للفاجات على شكل جزيء DNA مزدوج. (ص ٨٧)

قانون «الكل أو العدم» All-or-none law: تنقل الخلايا العصبية والخلايا العضلية النبضات إذا كان المنبّه الأولي كافيًا لزيادة جهد غشاء الخلية فوق جهد العتبة. (ص ١٨٣)

القطعة العضلية Sarcomere: الجزء من الليف العضلي الذي يقع بين قرصي Z. (ص ١٩١)

القناة الجامعة Collecting duct: أنبوبة في نخاع الكُلية تنقل البول من الأُنيبيبات الملتوية البعيدة لعدة نفرونات إلى حوض الكُلية. (ص ١٢٧)

كاينيز فوسفوريليز Phosphorylase kinase: إنزيم من تتالي الإنزيمات التي تعمل استجابة للجلوكاجون. ينشط الإنزيم جلايكوجين فوسفوريليز بإضافة مجموعة فوسفات. (ص ١٤٣)

الكُبيبة Glomerulus: مجموعة من الشعيرات الدموية داخل محفظة بومان في قشرة الكُلية. (ص ١٢٥)

الكائن الحي المعدل جينيًا (GMO) Genetically modified organism: أي كائن حي تمّ تغيير DNA فيه بطريقة لا تحدث طبيعيًا أو بالتكاثر الانتقائي وقد يكون مصدر DNA من كائن حي من نوع آخر أو من النوع نفسه. (ص ٨٦)

الكروموسومات الجنسية Sex chromosomes:
الكروموسومات التي تحدد الجنس. وهي في الإنسان X و Y. (ص ٥٩)

الكروموسومات المتماثلة Homologous chromosomes:
كروموسومان يحملان الجينات نفسها وفي المواقع نفسها. (ص ٤٥)

كودون Codon: تتابع من ثلاث قواعد على جزيء mRNA الذي يشفّر لحمض أميني معيّن أو شيفرة إيقاف أو شيفرة بدء. (ص ٣١)

الكودون المضاد Anticodon: تتابع من ثلاث قواعد غير مزدوجة Unpaired على جزيء tRNA ترتبط مع الكودون على mRNA. (ص ٣١)

الكيازما Chiasma (جمعها الكيازماتا **Chiasmata**): الموضع الذي تتقاطع فيه الكروماتيدات غير الشقيقة من الكروموسومات المتماثلة. (ص ٤٨)

DNA لايجيز DNA ligase: إنزيم يحفز ربط نيوكليوتيدَين معًا بروابط تساهمية فوسفات ثنائية الإستر أثناء تضاعف DNA. (ص ٢٦)

الليف العضلي Myofibril: واحد من عدة حزم أسطوانية مكوّنة من خيوط بروتينية سميكة (ميوسين) وخيوط بروتينية رفيعة (أكتين) تنتظم داخل الليف العضلي. (ص ١٨٩)

المايلين Myelin: مادة عازلة تحيط بالمحاور الأسطوانية للعديد من الخلايا العصبية؛ يتكون المايلين من طبقات من أغشية سطح الخلية تكوّنها خلايا شوان، وهي غنية جدًا بالدهون المفسفرة وبالتالي فهي غير منفذة للماء والأيونات في سوائل الأنسجة. (ص ١٦٩)

متماثل الأليلات Homozygous: وجود أليلَين متطابقَين من الجين. (ص ٥٥)

مُتنحٍّ Recessive: الأليل المتنحي يؤثر فقط في الطراز المظهري في غياب الأليل السائد. (ص ٥٥)

محفز Promoter: جزء من DNA يتضمن موقع ارتباط لإنزيم RNA بوليميريز حيث يبدأ نسخ الجين أو الجينات. تحتوي المحفزات أيضًا في حقيقية النواة على مواقع لارتباط عوامل النسخ. (ص ٩٥)

محفظة بومان Bowman's capsule: جزء النفرون الذي له شكل كوب ويحيط بكُبيبة ويجمع راشح الكُبيبة من الدم. (ص ١٢٥)

مخطط جيني Genetic diagram: طريقة معيارية يمكن من خلالها التنبؤ بنتائج التزاوج الجيني وتفسيره. (ص ٥٦)

مربع بانيت Punnett square: جزء من المخطط الجيني يستنبط فيه الطرزالجينية للأبناء من الطرز الجينية للأمشاج. (ص ٥٧)

مرتبط بالجنس Sex- linked: جين يوجدعلى منطقة من كروموسوم جنسي. توجد معظم الجينات المرتبطة بالجنس عند الإنسان على الكروموسوم X. (ص ٦٠)

المستجيب Effector: نسيج أو عضو يقوم بعمل استجابة للمنبّه مثل العضلات والغدد الصماء. (ص ١٢٢)

المستقبل Receptor: خلية أو نسيج يتحسس لمنبّهات محددة ويتواصل مع مركز تحكم لتوليد نبضات كهربائية أو إرسال مرسال كيميائي. (ص ١٢٢)

المستقبل الكيميائي Chemoreceptor: خلية مستقبلة تستجيب للمنبهات الكيميائية؛ توجد المستقبلات الكيميائية في براعم التذوق على اللسان، وفي الأنف (الشم)، وفي الأوعية الدموية حيث يمكنها تحسّس التغيرات في تركيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون. (ص ١٨٠)

مُستقبل أسموزي Osmoreceptor: نوع من المستقبل يتحسّس التغيّرات في جهد الماء للدم. (ص ١٣٥)

المشيج Gamete: خلية جنسية. وهي غالبًا أحادية المجموعة الكروموسومية. (ص ٤٥)

DNA معاد التركيب (rDNA) Recombinant DNA: DNA يتم تكوينه اصطناعيًا بربط قطع من DNA من كائنين حيين من النوع نفسه أو نوعَين مختلفَين أو أكثر. (ص ٨٦)

منبّه Stimulus (جمعها منبّهات **Stimuli**): تغيّر في البيئة الخارجية أو الداخلية يتحسسه المستقبل وقد يسبب حدوث استجابة. (ص ١٢٢)

المنحدر الكهروكيميائي Electrochemical gradient: منحدر عبر غشاء سطح الخلية يشمل الفرق في تركيز الأيونات وفرق الجهد. (ص ١٤٩)

منظم نمو النبات Plant growth regulator: أي مادة كيميائية تنتجها النباتات وتؤثر على نموها وتطورها (مثل الأكسينات والسيتوكينين وحمض الأبسيسيك ABA. (ص ١٩٤)

موقع كروموسومي Locus: (جمعها مواقع كروموسومية **Loci**) موقع الجين على الكروموسوم. (ص ٥١)

الميوسين Myosin: البروتين الذي يشكل الخيوط السميكة في العضلات المخططة. تقوم الرؤوس الكروية لكل جزيء بتحليل جزيئات ATP وتحتوي على إنزيم ATPase. (ص ١٩١)

ناقل Vector: وسيلة لإيصال الجينات إلى الخلية المستخدمة في التقنية الجينية؛ على سبيل المثال، البلازميدات والفيروسات. (ص ٨٦)

الناقل العصبي Neurotransmitter: مادة كيميائية يتم إطلاقها في التشابكات العصبية لتقوم بنقل النبضات العصبية بين الخلايا العصبية أو بين خلية عصبية حركية وليف عضلي. (ص ١٨٤)

النبضة العصبية Nerve impulse: موجة من إزالة الاستقطاب الكهربائي على جانبي غشاء سطح الخلية العصبية وتنتقل عبر هذه الخلايا. (ص ١٦٦)

نزع الأمين Deamination: تحطيم الأحماض الأمينية الفائضة في الكبد، بإزالة مجموعة الأمين، على شكل أمونيا، التي تتحوّل إلى يوريا. (ص ١٢٤)

النسخ Transcription: نسخ المعلومات الجينية في جزيء DNA وتحويلها إلى شريط مكمل من mRNA، ويستخدم شريط. واحد من شريطيّ DNA كقالب أثناء عملية النسخ (يسمّى شريط القالب أو شريط النسخ)، والتي يقوم بها إنزيم RNA بوليميريز. (ص ٢٩)

النفرون Nephron: الوحدة التركيبية والوظيفية للكُلية، تتكوّن من محفظة بومان وأنبوبة مقسمة إلى ثلاث مناطق: الأُنيبيب الملتوي القريب، والتواء هنلي، والأُنيبيب الملتوي البعيد. (ص ١٢٥)

النقطة المرجعية Reference point: القيمة المثالية للعامل الفسيولوجي التي يتحكم فيها الجسم في الاتزان الداخلي. (ص ١٢٣)

النقل الوثبي Saltatory conduction: انتقال جهد الفعل على طول محور أسطواني مايليني، حيث «يقفز» جهد الفعل من عقدة رانفييه إلى العقدة التالية. (ص ١٧٨)

نموذج الخيط المنزلق Sliding filament model: آلية انقباض العضلات. داخل كل قطعة عضلية، تتحرك الخيوط الرفيعة لتقترب من بعضها بفعل رؤوس الميوسين في الخيوط السميكة ما يسبب تقصر الطول الإجمالي لكل ليف عضلي. (ص ١٩٢)

النمط الأبوي Parental type: الأبناء الذين يظهرون التراكيب نفسها لصفات الأبوَين. (ص ٦٨)

النورأدرينالين Noradrenaline: نوع من النواقل العصبية، والتي تفرزها أيضًا الخلايا في الغدد الكظرية كهرمون. (ص ١٨٥)

نيوكليوتيد Nucleotide: جزيء يتكوّن من قاعدة نيتروجينية وسكر خماسي، ومجموعة فوسفات. (ص٢٠)

الهرمون Hormone: مادة تفرزها غدة صماء تنتقل في بلازما الدم إلى جزء آخر من الجسم حيث يكون لها تأثير. (ص ١٢٣)

الهرمون المانع لإدرار البول Antidiuretic hormone (ADH): هرمون تفرزه الغدة النخامية الخلفية. وهو يزيد إعادة امتصاص الماء في الكلى ويقلل بالتالي من فقد الماء في البول. (ص ١٣٣)

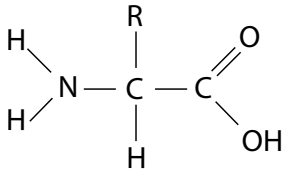
الهندسة الجينية Genetic engineering: أي إجراء يتضمن تغيير المعلومات الجينية في كائن حي عن طريق إدخال جين من كائن حي آخر، يسمّى هذا الكائن الحي كائنًا حيًّا معدلًا جينيًّا (GMO). (ص ٨٦)

الوصلة العصبية العضلية Neuromuscular junction: تشابك عصبي بين خلية عصبية حركية وألياف عضلية. (ص ١٨٧)

اليوريا Urea: ناتج إفرازي نيتروجيني يتكوّن في الكبد من نزع مجموعة الأمين من الأحماض الأمينية. (ص ١٢٣)

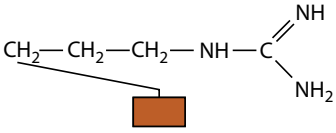
الملحق رقم ١

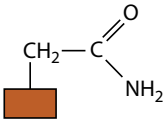
مجموعات R في الأحماض الأمينيّة

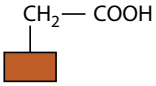


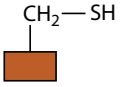
يظهر التركيب العام للحمض الأميني أعلاه. في القائمة أدناه، يتم عرض مجموعة R في كل حمض أميني فقط ويتم تمثيل باقي الجزيء بكتلة مستطيلة بنية.

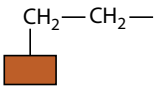
ألانين (Ala)

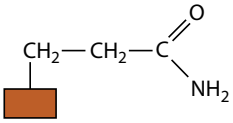

أرجنين (Arg)


أسبارجين (Asn)

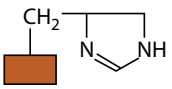

حمض الأسبارتيك (Asp)

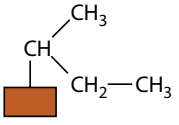

سيستين (Cys)

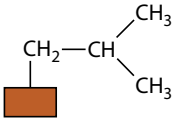

حمض الجلوتاميك (Glu)

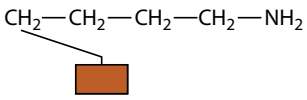

جلوتامين (Gln)

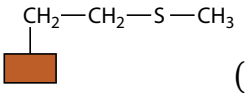
جلايسين (Gly)

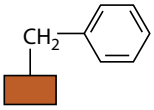

هستيدين (His)

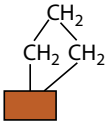

آيزوليوسين (Ile)

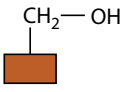

ليوسين (Leu)

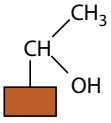

لايسين (Lys)

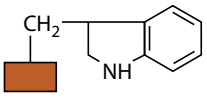

مثيونين (Met)

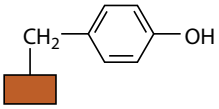

فينيل ألانين (Phe)

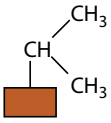

برولين (Pro)


سيرين (Ser)


ثريونين (Thr)


تربتوفان (Trp)


تيروسين (Tyr)


فالين (Val)

الملحق رقم ٢

الشيفرة الثلاثية لـ DNA و RNA

يظهر الجدول ٢-١ جميع الثلاثيات القاعدية الممكنة في جزيء DNA وماذا يشفر كل رمز منها. الاختصار لكل حمض أميني المكون من ثلاثة أحرف باللغة الانجليزية هو في معظم الحالات الأحرف الثلاثة الأولى من الاسم الكامل له (الملحق ١).

القاعدة الأولى	القاعدة الثانية				القاعدة الثالثة
	A	G	T	C	
A	Phe فينيل ألانين Phe Leu ليوسين Leu	Ser سيرين Ser Ser Ser	Tyr تيروسين Tyr إيقاف إيقاف	Cys سيستين Cys إيقاف Trp تربتوفان	A G T C
G	Leu ليوسين Leu Leu Leu	Pro برولين Pro Pro Pro	His هستيدين His Gln جلوتامين Gln	Arg أرجنين Arg Arg Arg	A G T C
T	Ile آيزوليوسين Ile Ile Met مثيونين	Thr ثريونين Thr Thr Thr	Asn أسبارجين Asn Lys لايسين Lys	Ser سيرين Ser Arg أرجنين Arg	A G T C
C	Val فالين Val Val Val	Ala ألانين Ala Ala Ala	Asp حمض الأسبارتيك Asp Glu حمض الجلوتاميك Glu	Gly جلايسين Gly Gly Gly	A G T C

جدول ٢-١ ثلاثيات DNA.

يظهر الجدول ٢-٢ يظهر جميع الكودونات الممكنة من القواعد في جزيء (mRNA) وماذا يشفر كل منها.

القاعدة الأولى	القاعدة الثانية				القاعدة الثالثة
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	إيقاف	إيقاف	A
	Leu	Ser	إيقاف	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

جدول ٢-٢ كودونات RNA.

شكر وتقدير

يتوجه المؤلفون والناشرون بالشكر الجزيل إلى جميع من منحهم حقوق استخدام مصادرهم أو مراجعهم. وبالرغم من رغبتهم فى الإعراب عن تقديرهم لكل جهد تم بذله، وذكر كل مصدر تم استخدامه لإنجاز هذا العمل، إلا أنه يستحيل ذكرها وحصرها جميعًا. وفي حال إغفالهم لأي مصدر أو مرجع فإنه يسرهم ذكره في النسخ القادمة من هذا الكتاب.

Images in order of appearance:

Cover Photo: XH4D/Getty Images

Stocktrek Images/Superstock; Wichyanan Limparungpatthanakij/Getty Images; Wichyanan Limparungpatthanakij/Getty Images; Donaldson Collection/GI; SPL/GI; Universal History Archive/GI; Equinox Graphics/SPL; Mary Jones; Biophoto Associates from «The Use of Grasshopper Chromosomes to Demonstrate Meiosis» in Tuatara: Journal of the Biological Society of Victoria University of Wellington, 18 (1), 1970, by J. M. Martin http://nzetc.victoria.ac.nz/tm/scholarly/Bio18Tuat01-fig-Bio18Tuat01_007a.html; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Ed Reschke/Getty Images; Friedrich Stark/Alamy Stock Photo; KTSDESIGN/SCIENCE PHOTO LIBRARY/GI; Westend61/GI; ; Dr. Charles Mazel/ Visuals Unlimited, Inc/SPL; Philppe Psaila/SPL; Ministry of Education, Oman; GUNILLA ELAM / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Saturn Stills/SPL; Scott Sinklier/Agstockusa/SPLl; Ithinksky/GI; Nigel Cattlin/Alamy Stock Photo; AquaBounty Technologies; John Hyde/GI; Richard Fosbery Kage Mikrofotografie Gbr/SPL; Image Source/GI; STEVE GSCHMEISSNER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Getty Imges; Dennis Kunkel Microscopy/SPL; Steve Gschmeissner/SPL; Sciepro/GI; JIM VARNEY / SCIENCE PHOTO LIBRARY.

رقم الإيداع

٢٠٢٣/٦٥٤٦

طبع بالمطابع العالمية - سلطنة عمان - ت : ٢٤٨١٥٧٧١

الأحياء - كتاب الطالب

يساعد البحث المكثف على تلبية الاحتياجات الحقيقة للطلبة الذين يدرسون مادة الأحياء. حيث تضمن الأسئلة الواردة في نهاية كل وحدة الشعور بالثقة أثناء عملية التقييم، وفرصًا أكثر للتفكير، و تساعد قوائم المراجعة الخاصة بالتقييم الذاتي؛ على أن تصبح مسؤولاً عن عملية التعلم.

يؤمّن كتاب الطالب مجموعة من أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية وأسئلة المناقشة، والتي تساعدك على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

- بعض الميزات مثل «قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة»، والملخصات، وكيفية التعلم النشط، وبناء المهارات، تمنح فرصًا للتفكير.
- ميزات «العلوم ضمن سياقها»، من تفسير الأفكار ضمن سياق العالم الواقعي، إضافة إلى مناقشة المفاهيم مع الطلبة الآخرين.
- تعمل الأسئلة ذات الجزئيات المتعددة الموجودة في نهاية كل وحدة على التحضير لخوض الامتحانات بثقة.
- تساعد أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية والعمل ضمن مجموعات، وأسئلة المناقشة، على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

يشمل منهج الأحياء للصف الثاني عشر من هذه السلسلة أيضًا:

- كتاب التجارب العملية والأنشطة
- دليل المعلّم

www.moe.gov.om

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS