



الأحياء

كتاب الطالب
المستوى الثاني عشر

BIOLOGY
STUDENT BOOK

GRADE

12

الفصل الدراسي الثاني - الجزء الأول

SECOND SEMESTER - PART 1

2020 - 2021

(نسخة تجريبية - Trial version)



© وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر

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

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

تمّ إعداد الكتاب بالتعاون مع شركة تكنولاب.

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

الترجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

الطبعة التجريبية 2020-2021 م



حضرة صاحب السمو الشيخ تميم بن حمد آل ثاني
أمير دولة قطر

النشيد الوطني

قَسَمًا بِمَنْ رَفَعَ السَّمَاءَ	قَسَمًا بِمَنْ نَشَرَ الضِّيَاءَ
قَطْرٌ سَتَبَقَى حُرَّةً	تَسْمُو بِرُوحِ الْأَوْفِيَاءِ
سِيرُوا عَلَى نَهْجِ الْأَلَى	وَعَلَى ضِيَاءِ الْأَنْبِيَاءِ
قَطْرٌ بِقَلْبِي سِيرَةٌ	عِزٌّ وَأَمْجَادُ الْإِبَاءِ
قَطْرُ الرِّجَالِ الْأَوَّلِينَ	حُمَاتُنَا يَوْمَ النَّدَاءِ
وَحَمَائِمُ يَوْمَ السَّلَامِ	جَوَارِحُ يَوْمَ الْفِدَاءِ



المراجعة والتدقيق العلمي والتربوي

إدارة تقييم الطلبة

خبرات تربوية وأكاديمية من المدارس

الإشراف العلمي والتربوي

إدارة المناهج الدراسية ومصادر التعلم

يعدّ كتاب الطالب مصدراً مثيراً لاهتمام الطلاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات التي يحتاجون إليها للنجاح في تنمية المهارات الحياتية وبعض المهارات في المواد الأخرى.

وبما أننا نهدف إلى أن يكون طلابنا مميزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثقة بقدرتهم على اتباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التقارير، وإنتاج الرسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التمرّس في التفكير الإبداعيّ.
- التمسك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.
- يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التوجّهات مثل:
- تطوير المنهج لجميع المستويات الدراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة التي تتوافق مع أعمار الطلاب، والتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطلاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) ممّا يجعل أداء الطلاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطالب.
- توزّع المعرفة والأفكار العلميّة المخصّصة لكلّ عام دراسيّ ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصمّمة لتحقيق التنوّع والتّطور.

- تعدّد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعًا جديدًا، منطلقًا ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السّابقة.
 - إتاحة الفرصة للطلّاب، في كلّ درسٍ، للتحقّق الذاتيّ من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
 - احتواء كلّ وحدة على تقويم للدّرس وتقويم الوحدة التي تمكّن الطّلاب والأهل والمدرّسين من تتبّع التّعلّم والأداء.
- العلوم مجموعة من المعارف التي تشمل الحقائق والأشكال والنّظريّات والأفكار. ولكنّ العالم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهميّة من المعرفة التي تحتويها.
- سوف يساعد هذا الكتاب الطّلاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين وليواجهوا مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنيّة المستقبلية.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

الاستقصاء والبحث



التّعاون والمشاركة



التّواصل



التّفكير الإبداعيّ والناقد



حلّ المشكلات



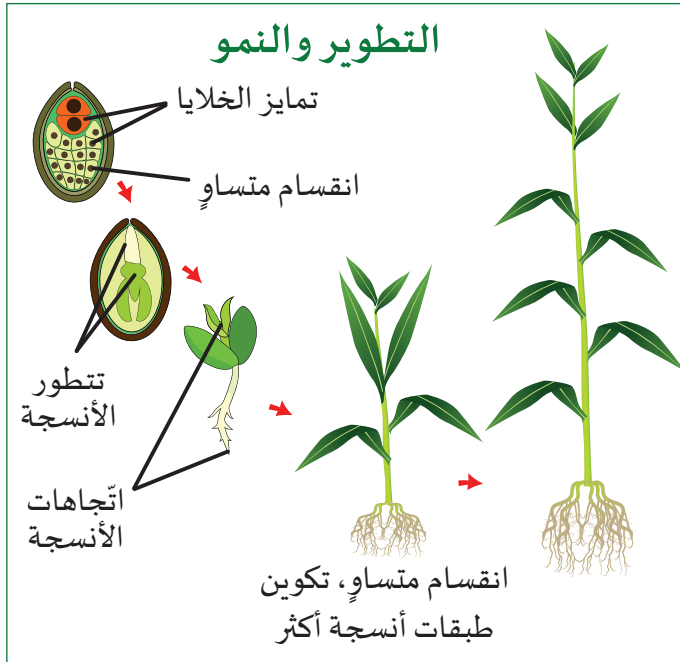
الكفاية العددية



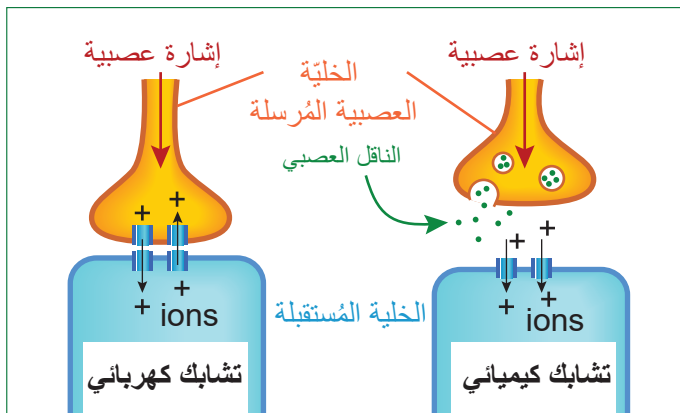
الكفاية اللغويّة



التحكم والتنظيم من أهم العمليات الحيوية التي تحصل في الكائنات الحية. فالقدرة على التحكم بجميع الأجهزة لتحقيق الاستجابة السريعة من الركائز الأساسية للمحافظة على الحياة. سوف نتعلم أكثر عن طرق استجابة النباتات للمنبهات ودور الهرمونات في مساعدتها على مجاراة التغيرات البيئية وزيادة إنتاجيتها. إذ تستخدم هذه الكائنات الحية مواد كيميائية (الأكسينات) وإشارات كهربائية لزيادة فرصها في البقاء على قيد الحياة وكذلك للنمو. كما سوف نرى كيف تستجيب النباتات لمؤثرات غير حيوية من بيئتها مثل الضوء والجاذبية وهو ما يُعرف بالانتحاء.



تستخدم النباتات الهرمونات (a) للتطوير، و (b) للنمو.



أنواع التشابكات العصبية.

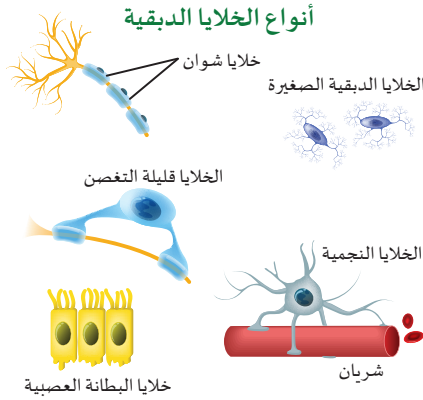
بعدها نتعلم عن وظائف التحكم والتنظيم في جسم الإنسان. يؤمن الجهاز العصبي في جسم الإنسان هذه الوظائف عبر إطلاق الإشارات الكهروكيميائية من الخلايا العصبية. تنتقل السائلات العصبية في الخلايا العصبية الطرفية مثلاً بسرعة قد تصل إلى 120 m/s وهي سرعة توصيل عصبي كبيرة تمكن الجسم من الاستجابة إلى المؤثرات والمخاطر بالسرعة المناسبة لحمايته. لكن مع الأسف، يتسبب بعض البشر بالضرر لجهازهم العصبي ولدماغهم بشكل خاص عبر تعاطي العقاقير التي تعمل على تعزيز أو اعتراض نشاط المستقبلات العصبية مما يؤثر سلباً على نشاط التشابكات العصبية الكيميائية. هذه المواد غالباً ما تسبب التعود عليها وإدمانها. من جهة أخرى، يحتوي الدماغ تراكم من الغدد الصماء تفرز الهرمونات وتنتج أيضاً الاستجابات بواسطة الإشارات الكيميائية ومنها مركز المكافآت الذي يتضمن الدافع والعاطفة ويفرز الدوبامين (هرمون السعادة). يقوم جهاز الغدد الصماء بأربع وظائف رئيسة تشمل الاتزان الداخلي والنمو والتطوير والتكاثر.

الدافع والعاطفة ويفرز الدوبامين (هرمون السعادة). يقوم جهاز الغدد الصماء بأربع وظائف رئيسة تشمل الاتزان الداخلي والنمو والتطوير والتكاثر.

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحية

المفاهيم المهمّة،
والبيانات، والأمثلة على
كلّ فكرة جديدة، مقدّمة
برسوم توضيحية مفصّلة
وبالكلمات، أيضاً.



أسئلة للمناقشة

ما هو الجسم الثفني؟
وماذا يحدث عندما
يتعرض للإصابة؟

تتيح الأسئلة للمناقشة الفرصة
لصقّك كي يتحدّث الطّلاب عن
المفاهيم والمعلومات الجديدة

شريط الأفكار المهمّة

تحدّد الأفكار النّقاط
الأساس، وتذكّر بها.

تنقل النّبّاتات الهرمونات للتواصل بين الخلايا، مما يزيد من فرص بقائها على قيد الحياة.



العلم والعلماء

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

الوحدة 5: التحكم والتنظيم

إضاءة على عالم

أ.ل. هودجكين، و.أ.ف. هكسلي، و.ج.س. إيكلس



شكل 5-61 ألان ل. هودجكين

ثلاثة علماء رائدون في إجراء البحوث حول الجهاز العصبي المركزي حصلوا على جائزة نوبل في العام 1963 في علم وظائف الأعضاء أو في الطب عن «اكتشافاتهم المتعلقة بالآليات الأيونية في استثارة وتنشيط الأجزاء الطرفية والمركزية لغشاء الخلية العصبية».

قام ألان ل. هودجكين Alan L. Hodgkin (الشكل 5-49) وأندرو ف. هكسلي Andrew F. Huxley (الشكل 5-50) بدراسة المحور العملاق في الجبار كونه من اللاقاريات التي تملك محوراً عصبياً ضخماً يزيد سمكه 1000 مرة عن المحور البشري

الأنشطة

تدريب على العمل المخبري، ومشاريع بحثية، وأنشطة أخرى تضيف معنى للأفكار الجديدة، وتنمي القدرة على التطبيق العملي.

الوحدة 4: التنظيم الهرموني في النباتات

2-4	اتجاه نمو البذور
سؤال الاستقصاء	ما الذي يؤثر في اتجاه نمو البذور النامية؟
المواد المطلوبة	أطباق بتري معقمة، أقلام تعليم، بذور فاصوليا وذرّة منقوعة مسبقاً، مناديل ورقية، مخابر مدزجة، ماء منزوع الكلور، شريط لاصق شفاف، كاميرات رقمية.

تقويم الدّرس

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

الدرس 2-5: السّيالات العصبيّة وانتقالها

تقويم الدّرس 2-5

- عند أيّ مما يأتي تحدث إزالة الاستقطاب لغشاء العصبون؟
a. عندما يصبح جهد الغشاء موجباً.
b. عندما يصبح جهد الغشاء سالباً.
c. عندما يصل جهد الغشاء إلى قيمته القصوى.
d. عندما ينخفض جهد الغشاء إلى ما دون جهد الراحة.
- اشرح الفرق بين القناة الأيونية للنقل السلي والقناة الأيونية الميوبة واستخدم الأوصاف والأمثلة.
- بيّن كيف يتم إنشاء تيار صغير عبر غشاء المحور في مخطّط بسيط.

مراجعة الوحدة

ملخص قصير في نهاية كلّ وحدة يوفر مرجعاً سريعاً للأفكار الرئيسة والمفردات.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 1-4 استجابات النباتات للمنبّهات

- يمكن لجميع الكائنات الحية أن تحسّ بمنبه Stimulus، أو تتغيّر في بيئتها، وتنتج استجابة Response، وتتفاعل.
- علم وظائف الأعضاء Physiology هو المجموع الكلي لجميع التفاعلات الكيميائية الحيوية على المستوى الخلوي، والتي ترتبط بسلوك الكائن الحي.

تقويم الوحدة

لكلّ وحدة مجموعة من أسئلة الاختيار من متعدد، وظيفتها التحضير لاختبار معياري.

تقويم الوحدة

تحضير للاختبار

- أي من هذه التراكيب الآتية ليس جزءاً من الجهاز العصبي المركزي؟
a. الدماغ
b. الجبل الشوكي
c. النخاع المستطيل
d. الخلية العصبية الحركية
- أين تقع القنطرة؟
a. في الدماغ الأمامي
c. في الدماغ الخلفي

تقويم الوحدة

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

تقويم الوحدة

- أرسم شكلاً لبادرة عشب الكناري، واذكر أسماء أجزائها، ثم لخص بإيجاز كيف أثبتت تجارب تشارلز وفرانسيس داروين أن الانحناء في اتجاه الضوء «كان بسبب تأثير نتج من قمة غمد العشب».
- اختر منظم نمو نبات وسوّج إضافته إلى الأسمدة المضافة إلى التربة غير الخصبة.
- أرسم شكلاً بسيطاً لنسيج نباتي مع مفتاح توضيحي يبيّن:
a. خليتين منتجتين للهرمون.
b. خلية واحدة منتجة للهرمون.

مخطّط المادة

الوحدة 4

التنظيم الهرموني في النباتات

تستجيب جميع الكائنات الحيّة بما فيها النباتات للمنبّهات، إلّا أننا لا نلاحظ بشكل مباشر تلك الاستجابات لأنّ النباتات لا تتحرك بسرعة كالحيوانات. معظم هذه الاستجابات تتمثل في تغيير سرعة نمو النبات وفي اتجاه نموه وتطوره باستخدام الهرمونات أو المركبات غير العضوية. إنّ اكتشاف تأثير هذه المواد يساعد في تفسير أنماط السلوك الشائعة مثل انحناء النباتات نحو الضوء ونموّ الجذور إلى الأسفل ونموّ البراعم إلى الأعلى. بعض أنواع النباتات لها استجابات غريبة ومميّزة مثل استجابة بعض الأوراق للمس أو إنتاج السموم. وقد طوّرت النباتات هذه الاستجابات للتكيف مع الظروف المتغيرة في بيئتها.

التحكّم والتنظيم

الجهاز العصبي البشري هو أهم الأجهزة البشرية وأكثرها تعقيداً. يوجّه الدماغ الأنشطة المعقّدة، مثل الذاكرة واللغة وحلّ المشكلات والنوم والأفكار الإبداعية.

ينظّم الدماغ أيضاً وظائف الجسم الرئيسة، الإرادية واللاإرادية معاً. ومع ذلك، فإن الدماغ نفسه ليس عضواً موحداً. في أدمغتنا تراكيب منفصلة تكون مسؤولة عن وظائف مختلفة، مثل الغدة النخامية التي تفرز الهرمونات، ولكنها ليست جزءاً من الجهاز العصبي.

ولأن الدماغ والجهاز العصبي يخدمان الكثير من الوظائف الحيوية، فإن الضرر المزمن أو إساءة الاستخدام يؤثّران في جميع جوانب حياتنا وفي صحتنا. يؤثّر الكحول وكثير من الأدوية المشروعة وغير المشروعة في الجهاز العصبي وفي أنظمة الغدد الصماء معاً. إنّها تؤثر في المناطق الرئيسة في الدماغ، لذلك، فهي قادرة على تغيير العادات الصحية والعلاقات والسلوك الشخصي.

الوحدة 5

جدول المحتويات

الوحدة 4

التنظيم الهرموني في النباتات 2

استجابة النباتات للمنبّهات 4 الدرس 1-1

الانتحاء في النبات 21 الدرس 2-1

الوحدة 5

التحكّم والتنظيم 44

تركيب الجهاز العصبي ووظيفته 46 الدرس 1-5

السيالات العصبيّة وانتقالها 61 الدرس 2-5

الدماغ والتحكّم الهرموني 80 الدرس 3-5



الوحدة 4

التنظيم الهرموني في النباتات

Hormonal Regulation in Plants

في هذه الوحدة

B1221

الدرس 4-1: استجابة النباتات للمنبهات

الدرس 4-2: الانتحاء في النبات

مقدّمة الوحدة

كثيرًا ما رأينا الحيوانات وهي تستجيب لمؤثرات مختلفة في بيئتها وربما رأينا بوضوح قطة تقوّس ظهرها وتصدر مواءً حادًا كلما تعرضت لخطر يهدّد حياتها. وقد يكون أحدنا شاهد صقراً ينقض من علو شاهق على طريدته من القوارض بعد أن رآها يبصره الحاد.

ومع أن النباتات تستجيب أيضًا للمنبّهات ، إلا أننا لا نلاحظ بشكل مباشر تلك الاستجابات لأن النباتات لا تتحرك بسرعة كالحيوانات. لكنّ الدراسة الدقيقة والوثيقة لأنماط سلوك النبات كشفت عن مجموعة واسعة من الاستجابات للمنبّهات. معظم هذه الاستجابات تتمثل في تغيير سرعة نمو النبات وفي اتجاه نموه وتطوره باستخدام الهرمونات أو المركبات غير العضوية. إن اكتشاف تأثير هذه المواد يساعد في تفسير أنماط السلوك الشائعة مثل انحناء النباتات نحو الضوء ونموّ الجذور إلى الأسفل ونموّ البراعم إلى الأعلى. بعض أنواع النباتات لها استجابات غريبة ومميّزة مثل استجابة بعض الأوراق للمس أو إنتاج السموم. وقد طورت النباتات هذه الاستجابات للتكيف مع الظروف المتغيرة في بيئتها.

الأنشطة والتّجارب

1-4 استجابة النباتات لتغيّرات الضوء

2-4 اتجاه نمو البذور

الدرس 1-4

استجابة النباتات للمنبّهات Plants Respond to Stimuli

اكتشف العلماء أكثر من 100 هرمون نباتي مختلف وفاعل، ويمكننا استخدام هذه الهرمونات في الوقت الحاضر لمساعدة النباتات على مجاراة التغيرات البيئية وزيادة إنتاجيتها.



شكل 1-4 الحميضة القرينية *Oxalis corniculata*.

المفردات



Stimulus	المنبه
Response	الاستجابة
Coleoptile	غمد البرعم
Hormones	الهرمونات
Plant growth regulator	منظم نمو النبات
Fertilizer	السماذ
Target	الجزء المستهدف
Receptor	المستقبل
Synergist	المؤازر
Antagonist	المناهض
Signal transduction	تحويل الإشارة
Indole acetic acid (IAA)	حمض إندول الخليك (IAA)
Auxin	الأوكسين
Apical dominance	السيادة القمية
Elongation	الاستطالة
Absciscic acid (ABA)	حمض الأبسيسيك (ABA)
Cytokinin (CK)	السايتوكاينين (CK)
Inhibitor	المثبط
Dormancy	السكون
Gibberellin (GA)	الجيبريلين (GA)
المركب العضوي المتطاير (VOC)	
Volatile organic compound (VOC)	
Ethylene	الإيثيلين

نبات الحميضة القرينية هو واحد النباتات المحلية في دولة قطر، وله العديد من الاستخدامات الطبية. تستطيع وريقات تلك النباتات أن تفتح وتغلق استجابة للضوء. (الشكل 1-4). كيف تتحكم النباتات في الحركة على الرغم من أنها لا تملك جهازاً عصبياً أو عضلات؟ (الإجابة: يكمن السر في احتواء تلك النباتات على هرمونات نباتية، وتؤثر هذه الهرمونات على نمو النبات وإنتاج المحاصيل في الظروف البيئية المختلفة). يوضح هذا الدرس كيفية انتقال الهرمونات النباتية من جزء في النبات إلى جزء آخر لتحفيز النبات على الاستجابة للمنبّهات. ويساعد تكيف النباتات مع التغيرات في بيئتها على البقاء على قيد الحياة لنقل صفات جديدة ونافعة إلى نسلها بواسطة البذور أو التراكيب الخضرية، مثل الدرنات أو الأبصال.

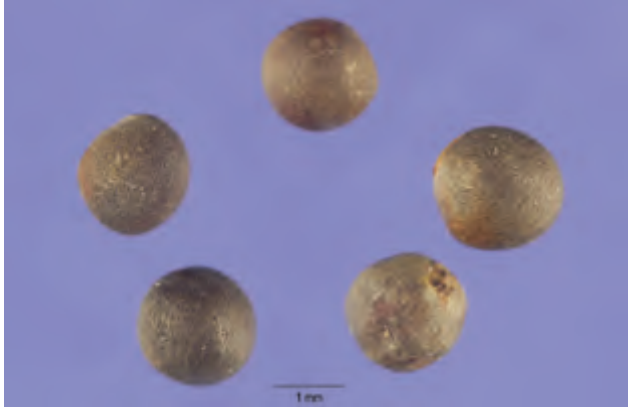
مخرجات التعلّم

B1221.2 يشرح كيف أن الهرمونات النباتية (الأوكسينات) تؤدي إلى استجابة براعم النباتات للضوء والانتحاء الضوئي وجذورها للضوء أحادي الجانب.

ملاحظة استجابات النباتات ذات دورة الحياة السريعة



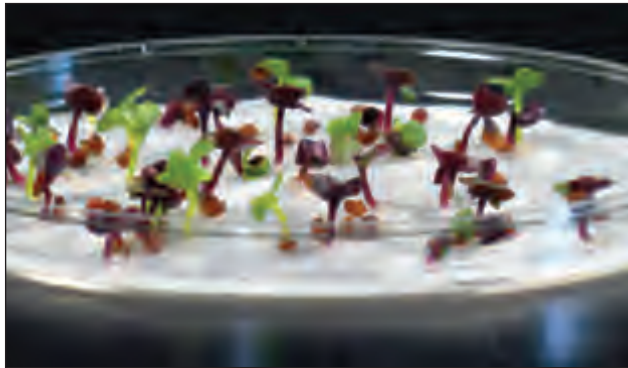
هل للنباتات حواس؟



شكل 4-2 تنبت بذور الخردل *Brassica rapa* الصغيرة بسرعة.

نحن نعلم أن البشر لديهم خمس حواس تساعدنا على كشف التغيرات من حولهم والاستجابة لها، ولكن هل تستطيع النباتات الإحساس بما يحيط بها؟ إذا كان الأمر كذلك، فكيف؟ قبل البدء، ناقش هذا مع زميلك في الصف واذكر ما تعرفه عن النباتات. للإجابة عن هذا السؤال، ستستخدم نباتاً دورة حياته سريعة يسمى الخردل *Brassica rapa* وتلاحظ بذوره على مدار ثلاثة أيام (الشكل 4-2).

- احصل على أطباق بترى وورق الألمنيوم والأقراص البذرية من معلمك.
- اتباع الإرشادات المقدمة لإعداد قرصين بذريين في طبقهما الخاص. قم بتسمية كلا الطبقين واضف الماء إليهما وفقاً لتوجيهات المعلم. الطبق رقم 1 يمثل الطبق الضابط في التجربة.
- غطّ الطبق رقم 2 بورق الألمنيوم واكشف عنه وفقاً لتوجيهات معلمك.
- في كل مرة تقوم فيها بإزالة ورق الألمنيوم عن الطبق، قم بتصوير كلا الطبقين. شارك زملاءك في مناقشة نتائجك.



شكل 4-3 طرازان مظهران من الخردل كثرهما د. وليامز.

طور الدكتور بول هـ. وليامز Dr Paul H. Williams من جامعة ويسكونسن في ماديسون في العام 1986 نباتات ذات دورة حياة سريعة كأداة بحثية لتحسين المقاومة للأمراض. ولتسريع بحثه، قام بانماء نبات الخردل لإنتاج نباتات دورات حياتها أقصر ولها طرز مظهرية متنوعة، وكانت نتائج أبحاثه النهائية نباتات قزمة. تستخدم هذه النباتات في أغراض البحث العلمي والتعليم (الشكل 4-3).

تمت تربية هذه الأنواع وغيرها من النباتات ذات دورة الحياة السريعة بنجاح للحصول على طرز مظهرية وطرز جينية معينة بما في ذلك:

- نباتات صغيرة وقزمة.
- نباتات تحتاج الى فترة زمنية قصيرة لتنمو من البذرة إلى الزهرة (من 10 إلى 12 يوماً).
- نباتات سهلة النمو عند زراعتها في وسط زراعي قياسي، وتحت إضاءة مصابيح الفلورسنت
- نباتات ذات إنتاجية عالية (نباتات متعددة وكثيفة)

منبهات النبات والاستجابة

المنبه Stimulus هو تغيير في البيئة يمكن كشفه بوساطة المستقبلات الحسية في الكائن الحي. مثال ذلك هو نبات الحميضة المثلثة *Oxalis triangularis* (الشكل 4-4). إن وجود الضوء أو انعدامه حول النبات هو المنبه الذي يثير **استجابة Response** في أوراق الحميضة. ويؤدي توافر الإضاءة لنبات الحميضة المثلثة في الصباح إلى تفتح أوراقه (الشكل 4-4a). ويؤدي انعدام الإضاءة (الليل) إلى إغلاق أوراقه (الشكل 4-4b).



شكل 4-4 (a) تُفتح أوراق الحميضة المثلثة في الفترة الصباحية، (b) وتُغلق الأوراق في الفترة المسائية.

تحدث الاستجابات الفسيولوجية للنبات على المستويات الثلاثة الآتية:

- المستوى الجزيئي، مثل حركة الأيونات عبر أغشية الخلايا.
- المستوى الخلوي، مثل زيادة الامتلاء (ضغط الماء).
- مستوى الأعضاء مثل تفتح الأوراق.

تتضمن استجابة طي أوراق نبات الحميضة المثلثة جميع المستويات الثلاثة السابقة. تتحرك الجزيئات عبر أغشية الخلايا، ما يتسبب في تحرك الماء إلى داخل الخلايا أو الخروج منها عند قاعدة الورقة فيتغير ضغط الامتلاء بها. يسبب هذا التغيير الخلوي فتح الأوراق أو إغلاقها.

تساعد استجابة طي الأوراق النبات على بقاءه. كيف يمكن لتغيير زوايا الأوراق أن يساعد الحميضة المثلثة على زيادة البناء الضوئي في النهار والحفاظ على الماء في الليل؟



شكل 5-4 شجرة سفرجل في كتاب عجائب الخلق.

الإغريق هم أول من سجل استجابة النبات، وافترضوا أن فقدان السوائل على الجانب الذي يتعرض لضوء الشمس هو السبب. وصف كتاب النبات (*Kitab al-Nabat*) للدينوري مراحل نمو النبات والزهور والثمار. وكتب زكريا القزويني (1203-1283) كتاب عجائب الخلق (*The Wonders of Creation*)، الذي احتوى على رسومات واقعية وخيالية للنباتات (الشكل 5-4).

اكتشاف الإنتحاء الضوئي

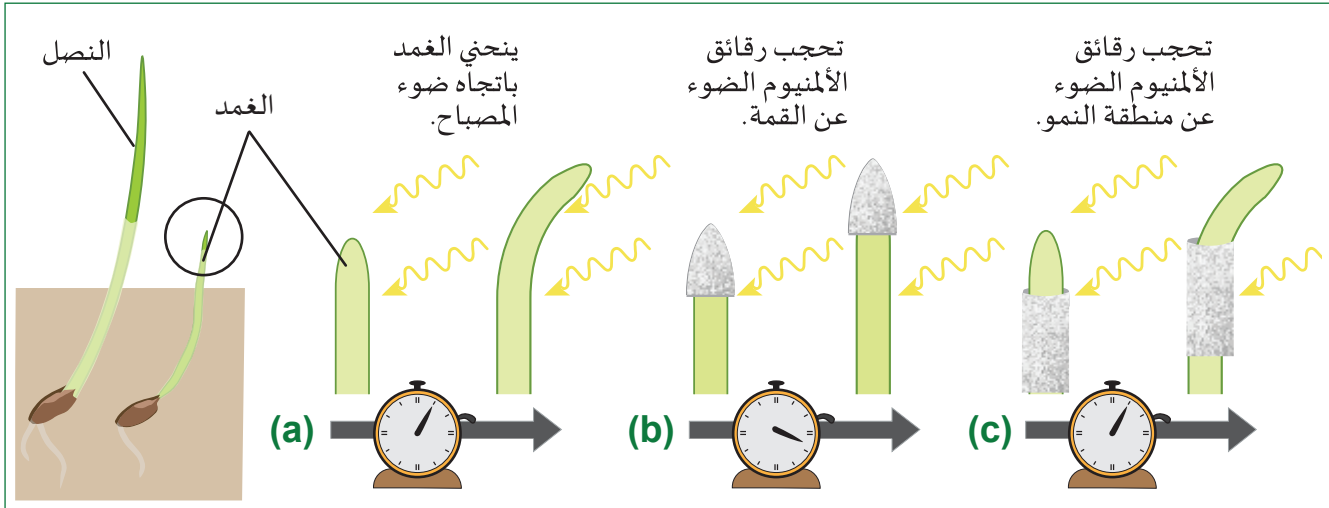
يرى العلماء أن الخلايا الموجودة في جميع الحيوانات والنباتات تقريبًا، وفي بعض الفطريات أيضًا، تستطيع أن تتواصل للكشف عن المنبهات والاستجابة لها. وتستند الأدلة إلى الملاحظات التي أجراها تشارلز وفرانسيس داروين *Charles and Francis Darwin* في سبعينيات القرن التاسع عشر حول سبب انحناء عشب الكناري نحو نافذة يدخل منها ضوء الشمس (الشكل 4-6).



شكل 4-6 رسم تخطيطي لعشب الكناري الذي تعرض لضوء داخل من الجهة العليا لنافذة بشكل مائل أخذ من كتاب «قوة الحركة في النباتات» *Power of Movement in Plants* c. 1880 للعالمين داروين.

عشب الكناري *Phalaris canariensis* نبات يستوطن منطقة البحر الأبيض المتوسط، وتتم زراعته لإنتاج بذور للطيور. تناولت تجارب العالمين داروين أجزاء مختلفة من مناطق نمو هذا العشب ليعرفا ما الذي حفز النباتات على الانحناء نحو ضوء المصباح.

عندما ينبت العشب، تكون الورقة الأولى محمية من التربة الصلبة بواسطة **غمد البرعم** *Coleoptile*، وهو غلاف يحيط بها إلى حين خروجها من التربة وظهور نصل الورقة، والذي يثقب قمة الغمد ليتعرض للضوء (الشكل 4-7a).



شكل 4-7 تجربة تشارلز وفرانسيس داروين على عشب الكناري.

- تم تنمية النبات في ضوء الشمس من غير أي تدخل، فنى النصل باتجاه الضوء. تمثل هذه النبتة المجموعة الضابطة للتجربة.
- غُطيت قمم الغمد برقائق معدنية تمنع وصول الضوء القادم. لم تنمُ الأنصال النابتة باتجاه الضوء (الشكل 4-7b). وعندما تمت إزالة الرقاقة المعدنية، نمت الأنصال مرة أخرى باتجاه الضوء.
- تم تغليف مناطق النمو في الغمد برقائق معدنية. رأى العالمان داروين أن الأغمد لا تزال تنمو باتجاه الضوء، وخلصا إلى أن النمو باتجاه الضوء كانت تتحكم فيه قمة الغمد (الشكل 4-7c).
- استنتج العالمان أن الانحناء نحو الضوء «كان نتيجة تأثير ينتج من قمة» غمد البرعم، ثم ينتقل «التأثير» من القمة إلى مناطق نمو الأنصال، ما يتسبب في انحنائها نحو الضوء.



استجابة النباتات لتغيرات الضوء

1-4

سؤال الاستقصاء	ما سرعة استجابة النباتات لتغيرات الضوء ذي الجانب الأحادي؟
المواد المطلوبة	بادرات خردل أو غيرها من البادرات ذات النمو السريع في أصص، مصادر ضوء، مخبر مدرج، ماء منزوع الكلور في قوارير الرش، كاميرات رقمية.

الخطوات



1. يزودك معلمك بمعلومات حول العناية ببادرات معينة وما إذا كنت ستعمل بشكل فردي أو ضمن فريق أو مجموعة.
2. صمم تجربة بسيطة لاختبار سؤال الاستقصاء أعلاه. إذا كنت تعمل مع آخرين ، ناقش أفكارك معهم أولاً.
 - ما المقصود بالضوء أحادي الجانب؟
 - ما المواد الإضافية التي قد تكون مطلوبة؟
 - ما الخطوات المنطقية التي ستضمن حصولك على البيانات؟
 - ما الرعاية التي ستحتاج إليها البادرات الخاصة بك لتحصل على نتائجك؟
 - كم مرة يمكن ان تحتاج فيها إلى الملاحظة للحصول على نتائج صحيحة؟
3. اكتب أفكارك في ورقة العمل الخاصة بك، واحصل على موافقة معلمك قبل إجراء تجربتك.
4. بعد الحصول على الموافقة، اجمع المواد الخاصة بك وقم بإجراء التجربة. قد يتطلب الأمر إجراء تجارب فردية في المنزل لضمان العناية المناسبة بالبادرات.
5. تأكد من تحليل النتائج والإجابة عن الأسئلة الواردة في تقريرك النهائي.

الأسئلة

- a. أي مظهر من مظاهر الضوء ذي الجانب الأحادي قمت باختباره؟
- b. صف استجابة النبات التي قمت بقياسها وقيّم سرعة الاستجابة.
- c. اشرح عاملين أثرا على صحة نتائجك.

تستخدم النباتات مواد كيميائية وإشارات كهربائية لتبقى على قيد الحياة

الإشارات الكيميائية عند النباتات

أظهرت التجارب التي أجراها العالمان داروين أن خلايا معينة في جزء محدد من النبات كانت تتواصل أو ترسل إشارات إلى خلايا في أجزاء أخرى منه. مرت عقود قبل أن يعزل العلماء أخيراً «العامل المؤثر» ويحدّدوه في طرف الغمد على أنه **هرمون** *Hormone* نباتي. الهرمون هو مركب عضوي ذو وزن جزيئي قليل ويُنتج بكمية قليلة في جزء مُحدّد من الكائن الحي وينتقل إلى جزء آخر، حيث يمكن أن يحفز استجابة مُعيّنة.

غالبًا ما يستخدم علماء الأحياء اليوم مصطلح **منظم نمو النبات** *Plant growth regulator* (بدلاً من الهرمونات) للإشارة إلى كثير من المواد العضوية وغير العضوية التي يمكن أن تنتج استجابة عند النبات. تكون استجابات النباتات أبطأ كثيراً من استجابة الحيوانات، ولكنها تستمر لفترة أطول (أيام أو أسابيع). تنتج النباتات المواد الكيميائية وتنقلها لتحقيق نمو أسرع وتجديد الأنسجة والدفاع عن النفس ضد الحيوانات المفترسة والتكاثر. كل هذا يزيد من احتمالات بقاء النبات على قيد الحياة وتمرير جيناته إلى الجيل التالي.

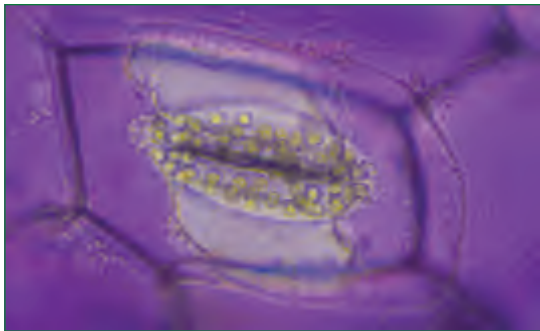
تنقل النباتات الهرمونات للتواصل بين الخلايا ، مما يزيد من فرص بقائها على قيد الحياة.



الإشارات الكهروكيميائية عند النباتات

بمجرد أن اكتُشفت الهرمونات، تم اكتشاف أدوات وتقنيات أفضل تؤكّد أن الاتصالات الكهروكيميائية بين الخلايا النباتية يمكن أن تسبب أيضاً استجابات. والمثير للدهشة أن الهرمونات النباتية كانت تؤدي وظائف مماثلة لوظائف الأجهزة العصبية وأجهزة الغدد الصماء عند الحيوانات المتطورة!

فالنباتات لا ترسل نبضات كهربائية لتحفيز خلاياها على الحركة، مثل الحيوانات. بدلاً من ذلك، يتم تكوين منحدرات كهروكيميائية على شكل اختلاف في تراكيز بعض الأيونات وبشكل أساسي أيون الهيدروجين H^+ . ثم تنتقل هذه المنحدرات عبر عدد من الأغشية. وكما هو الحال في عضلات الحيوانات، يمكن أن يؤدي النشاط الكهروكيميائي على أغشية النبات إلى حركات محدودة أكثر موضعية، مثل امتصاص الماء أو الأيونات. إن تغيير ضغط الامتلاء هو الطريقة التي يفتح بها نبات *O. triangularis* أوراقه ويغلقها كما في حركة فتح وإغلاق الثغور.



شكل 4-8 تستجيب الثغور للضوء وثاني أكسيد الكربون CO_2 المتوافرين.

تستطيع خلايا البشرة في الورقة الكشف عن زيادة شدة الضوء وانخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون في الفراغات الهوائية. تستجيب الخلايا الحارسة عن طريق تغيير حجم الفجوة الخاص بها (الشكل 4-8). عبر تكوين منحدر كهروكيميائي محفّز بالضوء عبر أغشية فجوة الخلية الحارسة لانتقال الماء إلى الداخل أو إلى الخارج، ما يؤدي إلى فتح وإغلاق الثغور. ويحتوي الدرس 4-2 على مزيد من الأمثلة على حركات النبات.

استهداف الهرمونات خلايا وأنسجة محددة

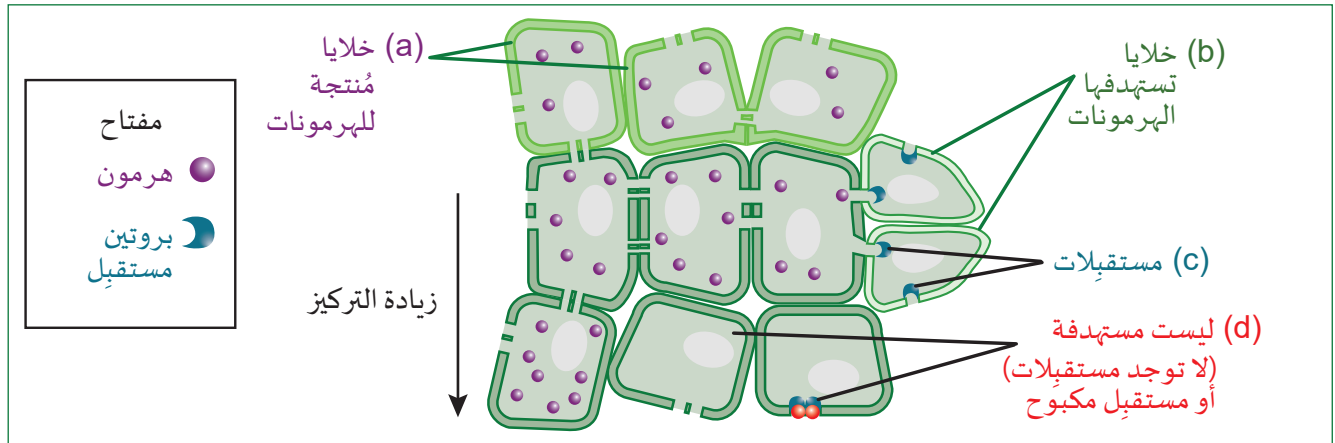
عندما درس العلماء علاقات المنبه-الاستجابة ، والتطور والنمو على مستوى الأعضاء والأنسجة والخلايا في كل من النباتات والحيوانات ، وضعوا أربعة مبادئ أساسية حول كيفية إرسال الخلايا إشارات للخلايا الأخرى.

1. تنتج الخلايا هرمونات في مكان معين (الشكل 4-9a). في النباتات تكون الهرمونات في أغلب الأحيان في القمم النامية للساق والجذر أو في البراعم. يحفز المنبه الهرمون على التحرك نحو خلايا محددة. الجزء الذي يتأثر هو الجزء **المستهدف Target** (الشكل 4-9b).

2. لكي تستجيب الخلايا المستهدفة لهرمون ما، يجب كشفها بواسطة **مستقبل Receptor** (عادة بروتين) (الشكل 4-9c). فإذا لم يكتشف، أو إذا تم كبح المستقبل، فلن تكون هناك استجابة من النبات (الشكل 4-9d).

3. يمكن أن يختلف مقدار استجابة النبات باختلاف طول فترة التحفيز أو تركيز الهرمون.

4. علاقة المنبه بالاستجابة قد تكون بسيطة أو معقدة. العلاقات البسيطة لها حالتان اثنتان فقط وهي إما أن تحصل الاستجابة أو لا تحصل وتشبه بذلك مفتاح التشغيل والتوقيف. أما في الاستجابات المعقدة فتكون الاستجابة محدودة ثم تزايد إلى أن تصل الذروة لتبدأ بعد ذلك بالتباطؤ والتضاؤل لتشبه بذلك منظم حجم الصوت.



شكل 4-9 استهداف الهرمونات النباتية خلايا تحتوي على بروتين مستقبل لها.

إن دراسة تنظيم نمو النبات تعد تحدياً لعدة أسباب: يمكن أن تكون المستويات المنخفضة جداً من هرمون واحد فعالة. ليست كل منظمات نمو النبات عبارة عن جزيئات عضوية كما لم يتم اكتشافها جميعها. تعتمد استجابة النبات على ثلاثة عوامل: موقع الهرمون وتركيزه وتفاعله مع الهرمونات الأخرى. يمكن أن تنتج نسبة من منظمي نمو معاً تأثيراً لم يُعرف قبل ذلك.

لوصف التفاعلات الهرمونية بشكل أفضل، يشير علماء الأحياء إلى العلاقات بين الهرمونات: عندما يتفاعل هرمونان ويحفزان استجابة أكبر مما لو كانا بمفردهما، فإنهما يعملان بكونهما **مؤازرين Synergists**. وعندما يتفاعل هرمونان لهما تأثيرات متعاكسة ليوازن كل منهما الآخر، ويحدد التأثير الصافي تلك الاستجابة، فإنهما يكونان **مناهضين Antagonists**.

تحويل الإشارة - نموذج تواصل الخلية

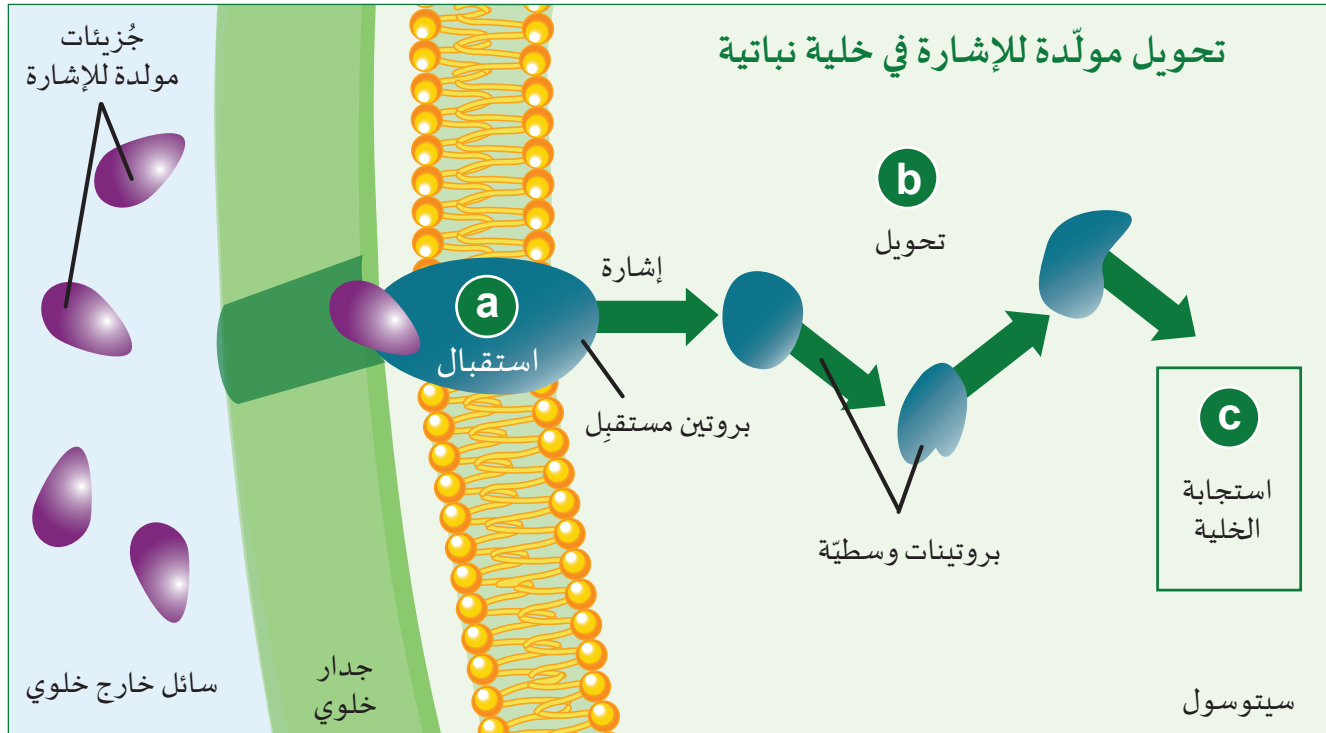
بعد التجارب الكثيرة التي أجريت على نباتات مختلفة تم تطوير نموذج يوضح آلية تواصل الخلايا النباتية فيما بينها. وسُمِّيَ **تحويل الإشارة Signal transduction**. تتبع آلية عمل الهرمونات مسارات محددة تبدأ بتنشيط مستقبل بروتيني على غشاء الخلية من قبل الجزيء مولّد الإشارة، ممّا يؤدي إلى تنشيط جين محدد، ومن ثم توليد استجابة مناسبة.

استجابات النباتات هي نتيجة تغيرات في فسيولوجيا الخلية تتضمن مسارات إشارات فريدة.



يُعرض أدناه نموذج مبسط لتحويل الإشارة (الشكل 10-4).

- يرتبط الجزيء مولّد الإشارة بمستقبل بروتيني مخصص له على سطح الغشاء الخلوي، مما يغير شكل هذا البروتين (الشكل 10-4a).
- بعد ذلك، يرسل البروتين المستقبل إشارة كيميائية إلى بروتينات أخرى في السيتوسول «لقبول الرسالة ونقلها» أو «رفضها» (الشكل 10-4b). إذا كانت الإشارة الكيميائية ضعيفة، يمكن لبروتينات وسيطة أن تضخم الإشارة، وتنقلها إلى المزيد من البروتينات في عملية تحويل الإشارة.
- تستجيب الخلية بإحدى الطرائق المتعددة، بما في ذلك: تحفيز إنزيم لتسريع تفاعل كيميائي، أو تغيير شكل الهيكل الخلوي، أو تنشيط جين معين وتوجيهه لبناء بروتين لمادة أخرى (الشكل 10-4c).



شكل 10-4 نموذج مبسط لتحويل الإشارات، يتضمن (a) مستقبل الإشارة، و (b) التحويل الذي ينتج (c) استجابة الخلية.

بعض مجموعات الهرمونات النباتية ووظائفها

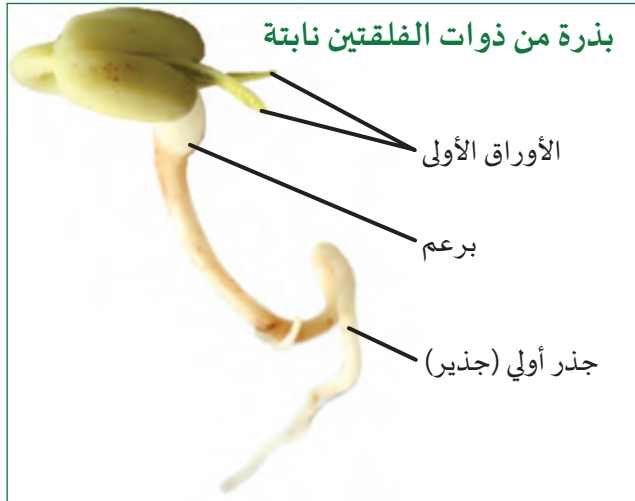
يتم إنتاج الهرمونات النباتية في أنسجة مختلفة وتنتقل إلى مناطق مختلفة في النباتات باستخدام الانتشار أو النقل النشط أو في عصارة الخشب أو اللحاء. يمكن تحريض استجابات النبات بوساطة هرمون أو مزيج من هرمون مع مادة كيميائية أخرى. تم تصنيف أكثر من 100 منظم نمو وفقًا لتركيبها الكيميائي. ويبدو أن بعض هذه المنظمات تؤدي الوظيفة نفسها. ويلخص الجدول 1-4 خمسة هرمونات شائعة ووظائفها وأماكن وجودها وإنتاجها.

جدول 1-4 بعض منظمات النمو ووظائفها الرئيسية ومواقعها.

منظم نمو النبات	الوظائف الرئيسية	أين يوجد أو يُنتج
الأكسينات مثل indole acetic acid (IAA)	تنشيط تكوين الجذور والبراعم. تمايز النسيج المرستيمي إلى أنسجة وعائية. تنظيم تطوّر الثمار. تحفيز استطالة جدار الخلية. تثبيط التفرع الجانبي.	النسيج المرستيمي القمي للجذر والساق. الثمار والبذور في مرحلة التطور.
حمض الأبسيسيك (ABA)	التحفيز على سكون البذور. التحفيز على اغلاق الثغور وقت (الجفاف). تثبيط الإنبات المبكر والنمو في الشتاء.	في جميع خلايا النبات وأنسجته وأعضائه. من المحتمل نقله في اللحاء والخشب.
السايتوكاينين (CKs)	تنشيط نمو البراعم الجانبية. تنظيم انقسام الخلايا في الجذور والسيقان. تحفيز إنبات البذور.	ينتج معظمه في الجذور، ثم ينقل إلى الساق والأوراق.
مواد عضوية مثل الإيثيلين C_2H_4	زيادة معدل هرم الأوراق. تنشيط نضج الثمار. التحريض على تساقط الأوراق. تنشيط تكوين الجذور والشعيرات الجذرية.	في معظم أنسجة النبات وأعضائه.
الجبريلينات (GAs)	تنشيط تكوين حبوب اللقاح ونمو أنبوب اللقاح في الأزهار المخصبة. تحفيز الإنبات الذي يتطلب برودة، أو تطوّر البذور والثمار. تحفيز استطالة الساق وتكوين الأفرع.	النسيج المرستيمي القمي في الساق والجذر. البذور في مرحلة تطورها.

الأكسينات

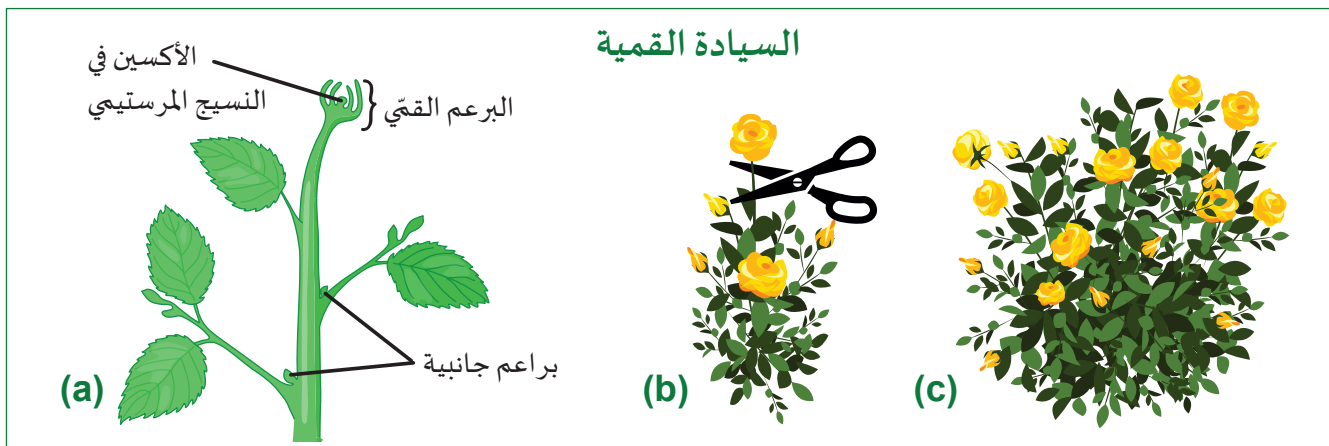
على الرغم من أنهم لم يعرفوا أهميته آنذاك، فقد حدد العالمان داروين موقع أول هرمون نباتي، وهو **حمض إندول الخليك** (IAA) **Indole acetic acid**. يكون IAA مركزاً في أجزاء النبات التي تنتج الهرمونات، كالأنسجة المرستيمية في القمم النامية للجذور والسيقان. تنتقل الهرمونات إلى أجزاء أخرى بواسطة النقل النشط.



IAA، المادة التي سببت انحناء عشب الكناري هي واحدة من خمسة **أكسينات Auxins** معروفة في الطبيعة. وفي اليونانية، تعني كلمة *auxein* «أن تنمو». والأكسينات قد تكون أهم الهرمونات. فهي تحفز الانقسامات الخلوية الأولى (الانقسام المتساوي) لأجنة النبات، وتعمل أيضاً مع الهرمونات الأخرى لتحديد الاتجاه الذي ينمو فيه الجذر الأول والساق. وهي توجه تكوين الأعضاء: الأوراق الأولى والبراعم والجذور الأولية (الشكل 4-11).

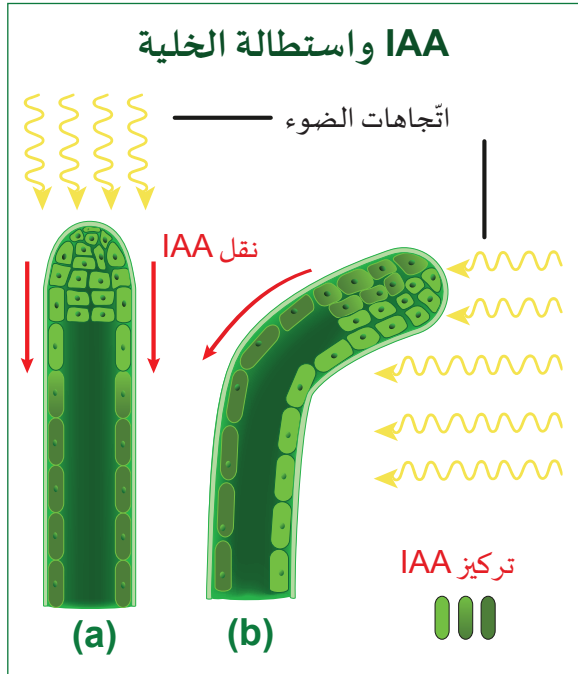
شكل 4-11 تحفز الأكسينات تكون الأجزاء النامية من الجنين.

بمجرد أن ينمو جذر أولي، يتكون منحدر تركيز لـ IAA عند أعلى نقطة في جنين النبات، قمة الساق. يستمر إنتاج الأكسينات في خلايا النسيج المرستيمي القمي، ثم توزع إلى جميع أجزاء النبات. يُسبب منحدر تركيز الأكسينات في طرف الساق **سيادة قمّية Apical dominance**، وهي ظاهرة تضمن عدم حدوث التفرع الجانبي أسفل هذه النقطة. يتم منع تكوين البراعم الجانبية بالقرب من قمة الساق بسبب التركيز العالي للأكسين (الشكل 4-12a). وبعد أن ينمو النبات إلى الارتفاع المطلوب، ستؤدي إزالة هذه القمة والقمم الأخرى التي تتكون على قمم الأغصان إلى زيادة تكوين الأفرع (الشكل 4-12b-c).



شكل 4-12 (a) تتكون السيادة القمّية في أعلى جزء من الساق حيث تنتج الأكسينات. (b) قطع قمة نبات ناضج يساعد على تكوين البراعم في أي جزء (c) وهذا يساعد على تكوين المزيد من الأفرع.

IAA (حمض إندول الخليك) واستطالة الخلية



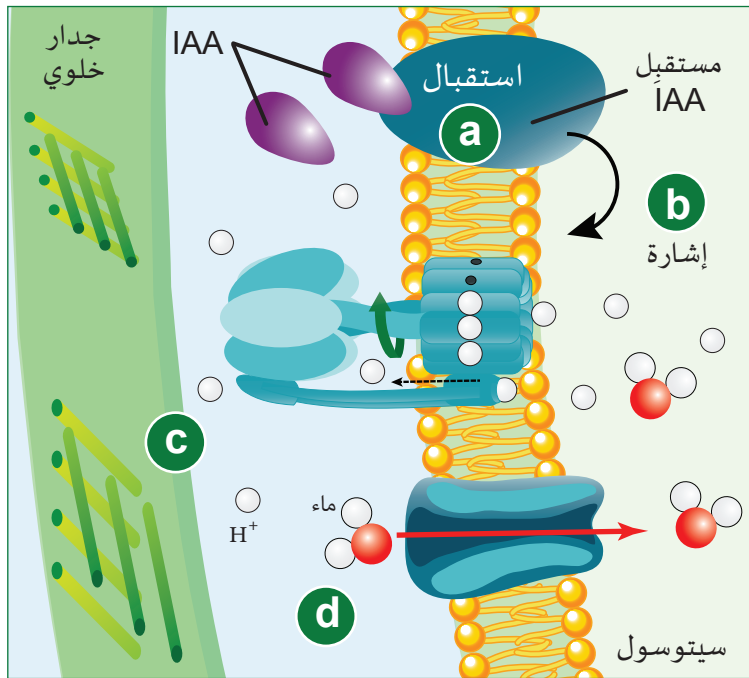
شكل 4-13 ينظم IAA كيفية استجابة خلايا الساق لاتجاه الضوء.

عندما تتعرض النباتات لضوء ذي اتجاه واحد من أعلى، ينتقل IAA بالتساوي إلى أسفل كل جانب (الشكل 4-13a). وعندما يتعرض لضوء أحادي الجانب (من جانب واحد)، يزداد تركيز IAA في الجانب غير المضاء كونه ينتقل إليه من الجانب المضاء (الشكل 4-13b).

لاحظ العلماء أن IAA يسرع ببساطة انقسام الخلايا في السيقان ويزيد عددها كما يسبب استطالتها **Elongation** على الجانب غير المضاء من النبات بشكل أسرع من الجانب المضاء بضوء الشمس لينحني النبات.

كيف ازداد طول الخلايا؟ لا تزال الإجابة غير مفهومة تمامًا، ولكنها قد تتضمن تغييرات تركيبية تحدث لجزيئات السليلوز في داخل جدر الخلايا. وباستخدام ما يعرفونه عن تحويل الإشارات، افترض العلماء الكيفية

التي يغير بها IAA تركيب جدار الخلية لتحفيز استطالة الخلايا، ويعرف هذا باسم «فرضية النمو الحمضي»، ويبدو أن IAA يخفف من ترابط ألياف السليلوز (الشكل 4-14a-d).



شكل 4-14 يضعف IAA روابط الجدار الخلوي.

a. يرتبط IAA أولاً ببروتين مستقبل غشائي.

b. ويحفز هذا مضخة البروتون على إرسال أيونات الهيدروجين (H^+) إلى الجدر الخلوية المحيطة ما يؤدي إلى تكوين منحدر تركيز.

c. يعمل منحدر التركيز على خفض الرقم الهيدروجيني في جدار الخلية، ويبدو أن هذا يضعف الروابط بين جزيئات السليلوز فيه.

d. يضغط الماء المنتقل بسبب الخاصية الأسموزية على الجدار ليغير من شكل الخلية.

حمض الأبسيسيك (ABA)

يُعد ربط السبب والنتيجة الخاطئين مشكلة شائعة في البحث العلمي: في ستينيات القرن الماضي حدّد الباحثون لأول مرة زيادات في حمض الأبسيسيك (ABA)، وتغيرات في الأنسجة حدثت قبل تساقط الأوراق من الأشجار متساقطة الأوراق مباشرة، ولاحظوا سكون براعم السيقان قبل موسم البرد. وقد استنتج العلماء خطأً أن تركيزات ABA حرضت على هذين الحدثين.

ABA له دور في حلول سكون الساق وتساقط الأوراق، ولكنه يعمل **كمثبط Inhibitor**. تمنع المثبطات الأنشطة أو تبطئها. ويعمل ABA من خلال عمل معاكس لهرمونات نمو النبات الأخرى مثل الأكسين، والساييتوكاينين، والجبريللين. يساعد ABA في حلول سكون البذور والبراعم عن طريق تثبيط الأكسينات والنمو. وهذا يؤكد أن النبات يحافظ على طاقته ويخزن الغذاء للوظائف الأساسية فقط.

ABA في البذور

يساعد ABA في حلول **سكون Dormancy** البذور عندما تمنع النباتات بذورها من الإنبات. لماذا يحدث هذا في النباتات؟ تحتاج البذور إلى ضوء جيد وماء ودرجات حرارة مناسبة حتى تنبت. يؤدي تأخير إنبات البذور أو منعه إلى تحسين فرص بقاء البذور إذا لم تتوافر هذه الشروط. يتم إنتاج ABA في النباتات قبل قدوم المواسم الباردة لمنع إنبات البذور ونمو النبات.



يسبب ABA حلول السكون عن طريق زيادة تركيزه كلما أصبح النهار أقصر. إن زيادة كميات ABA تعمل ضد تركيزات الهرمونات التي تحفز الإنبات. ويبدو أن زيادة ABA تؤدي أيضاً إلى تنشيط الجين الذي يزيد من بناء بروتينات التخزين في النبات.

يتحلل ABA ببطء خلال فصل الشتاء. وعندما تصبح الظروف ملائمة مرة أخرى في الربيع، يكون تركيز ABA قد أصبح منخفضاً، فتسيطر هرمونات النمو والإنبات ويبدأ عملها.

شكل 4-15 يمنع ABA في الأشجار النمو أو التبرعم المبكر في الشتاء.

ABA في الأوراق

تزيد درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة والرياح الشديدة والرطوبة المنخفضة من خطر الجفاف (الشكل 4-15). تتكيف النباتات مع هذه الظروف وتحمي نفسها منها عن طريق زيادة إنتاج حمض الأبسيسيك في خلايا النسيج المتوسط في الأوراق. يسبب حمض الأبسيسيك إغلاق الثغور وبالتالي منع فقدان الماء. تستجيب الجذور للجفاف قبل الأوراق، لذلك يتكوّن حمض الأبسيسيك في الجذور ويتم نقله إلى الأوراق عندما تبدأ في الذبول.

السايتوكاينين والنمو النشط

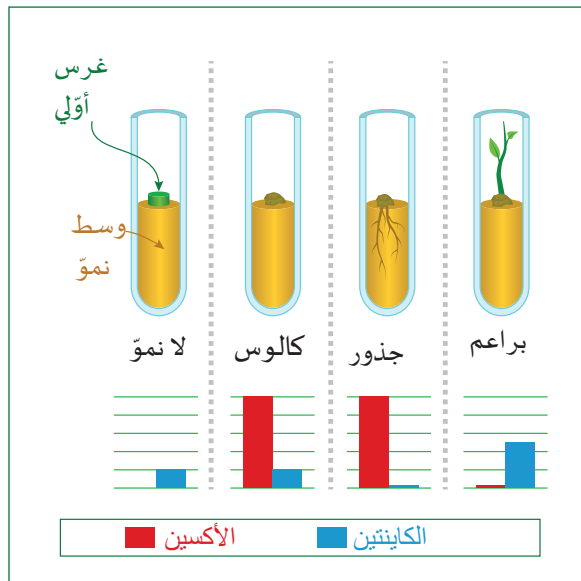
السايتوكاينينات (CKs) Cytokinins هرمونات نباتية مشتقة من الأدينين، وهي قاعدة نيتروجينية موجودة في الحمض النووي DNA. تمت تسمية السايتوكاينينات بهذا الأسم بسبب دورها في الانقسام السيتوبلازمي *cytokinesis*، وهي المرحلة الأخيرة من الانقسام الخلوي. توجد السايتوكاينينات بكثرة في الجذور والأجنة والثمار، حيث ينشط الانقسام الخلوي.

في النباتات ذوات الفلقة الواحدة، مثل الذرة (*Zea mays*)، لوحظ أن البذور الأولى تحتوي على كميات كبيرة من الزياتين *zeatin*، وهو سايتوكاينين طبيعي. الزياتين هو السايتوكاينين الأكثر شيوعاً في النباتات. عرف علماء النبات أنه عندما تنبت حبوب الذرة ينتقل الزياتين إلى قمم الجذور ليحفز الانقسام السريع للخلايا. وعندما يتم رش الزياتين على الأنسجة المرستيمية أو المولدة أثناء تطور الجذع المبكر، ينشط الزياتين تكوين البراعم الجانبية على السيقان ويزيد من التفرع، ما يؤدي إلى زيادة إنتاجية نباتات الفلقة الواحدة مثل الأرز والحبوب الأخرى.

يمكن أن تزيد الهرمونات النباتية مثل السايتوكاينينات من نمو النبات وإنتاجيته عندما تُستخدم بشكل استراتيجي.



السايتوكاينينات CKs مواد مهمة وحيوية لزراعة الأنسجة النباتية. وإذا أضيفت CKs بتركيز صحيح، وفي مرحلة التطور المناسبة، فإنها تزيد إنتاجية النبات بشكل كبير. وعلى سبيل المثال، فإنه في حالة عدم إضافة CKs، إلى وسط نمو اصطناعي، فإن الكالوس النباتي *callus* لن يواصل انقسام الخلايا لتكوين نباتات صغيرة أثناء زراعة الأنسجة.



شكل 16-4 التحكم الهرموني المتضاد في البادرات والبراعم الجانبية.

أظهرت التجارب المبكرة في التكاثر الخضري أن السيقان الأرضية الجارية والمزروعة في وسط يحتوي على سيتوكينين اصطناعي يسمى الكينتين *kinetin* تكوّن درنات، أمّا تلك التي لا تحتوي على الكينتين فإنها لم تكوّن أيّاً منها. يتم تحفيز تكوّن البرعم الجاني بوساطة الكينتين، ولكن تثبيطه يتم بوساطة الأكسينات. أمّا في البادرات يعدّ الكينتين مادة مناهضة للأكسين (الشكل 16-4).

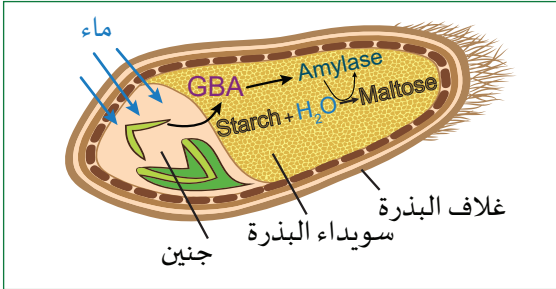
- إذا ازداد تركيز الكينتين، انخفض مستوى الأكسين وتكوّن البراعم الجانبية.
- زيادة تركيز الأكسين تؤدي إلى انخفاض الكينتين، فتتكون الجذور.

يمكن للنباتات أن تفرز من جذورها هرمونات تعمل على زيادة نمو فطريات التربة المفيدة أو لتقليل البكتيريا الضارة. أي جهاز في جسم الإنسان يؤدي وظيفة مماثلة؟



الجبريلينات في السيقان، والأوراق والجذور

تم تحديد ما يقرب من 125 نوعًا مختلفًا من **الجبريلين** (GA) **Gibberellin** حتى الآن، فبدلاً من إعطاء كل نوع اسمًا معينًا، تم تحديد أرقام لأنواع هذه الهرمونات على النحو الآتي: GA1، GA2، GA3، وأكثر الجبريلينات التي درست هو حمض الجبرليك 3 (GA3) لأنه أكثر شيوعًا من غيره.



شكل 4-17 إنتاج GA3 يحفز تفكك النشا في البذور.

يساعد GA3 بعض البذور على كسر سكونها. تحتوي البذور على جنين ونشا مخزن وهو مصدر غذاء مؤقت. يعمل الماء على تليين غلاف البذرة ويحفز جنين النبات على إنتاج GA3. ثم يقوم GA3 بتحفيز بناء إنزيم الأميليز. يحفز الأميليز تفكك النشا لتزويد البذرة بالطاقة لإنباتها (الشكل 4-17).

تبين أن استخدام GA3 على النباتات الخاضعة للرقابة الوراثية له تأثيرات مذهلة: عندما تم رش GA3 على النباتات القزمة، حفز استطالة الخلية ونمت إلى الطول الطبيعي. أصبحت النباتات العادية التي تم رشها بـ GA3 نباتات عملاقة عندما تم التحكم في جميع العوامل الأخرى. وأدرك علماء النبات أن بالإمكان تحديد وقت استخدام الهرمونات للحصول على تأثير محدد.

مصدر معظم أنواع العنب عديم البذور هو من كروم عنب يتم تنميتها وزراعتها لتقليل حجم البذور بشكل كبير أو لمنع تكون البذور فيها. (الشكل 4-18). يتم في أغلب الأحيان استخدام GAs التي تنتجها البذور لتكوين الثمار واستطالة الساق.

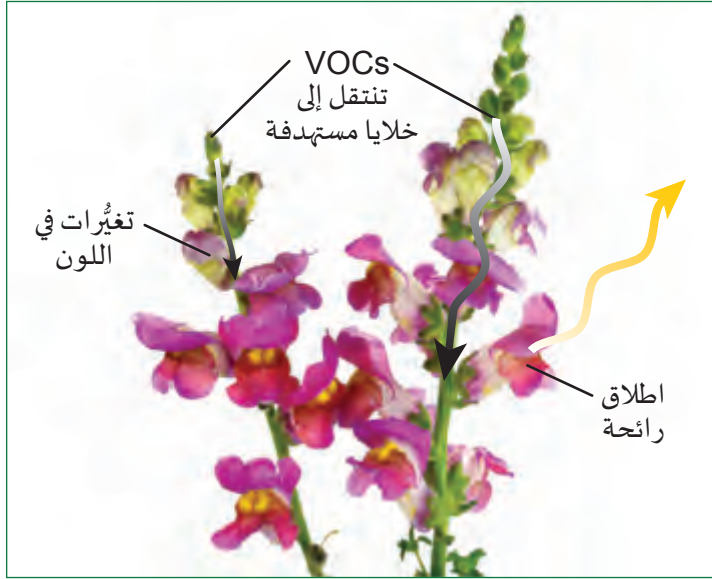


شكل 4-18 عنب عديم البذور.

- بدون إنتاج GA، ينتج العنب عديم البذور فروعًا أقصر بكثير، وعددًا أقل من عناقيد الفاكهة، وثمار عنب صغيرة.
- إذا عولجت أشجار العنب بـ GAs عندما تنضج الثمار، فإنها تنتج ثمار عنب كبيرة، وعناقيد متباعدة على السيقان الطويلة.
- هذا يحسن نوعية العنب ويقلل من إصابة العناقيد المتراصة من الثمار بالعفن الفطري.

تتطلب بعض الأزهار البرية أو الشجيرات المزروعة تعريضها لفترات برودة لكسر سكونها. وقد لوحظ أن GAs يكسر أيضًا سكون البذور في النباتات التي تتطلب التعرض لدرجات حرارة منخفضة أو شدة ضوء محددة للإنبات. يُعد التعامل مع GA مفيدًا بشكل خاص للمزارعين عندما يتم نقل النباتات من مناخ موطنها الأصلي ويجري تكثيرها في أماكن أخرى، مثل التفاح والخس.

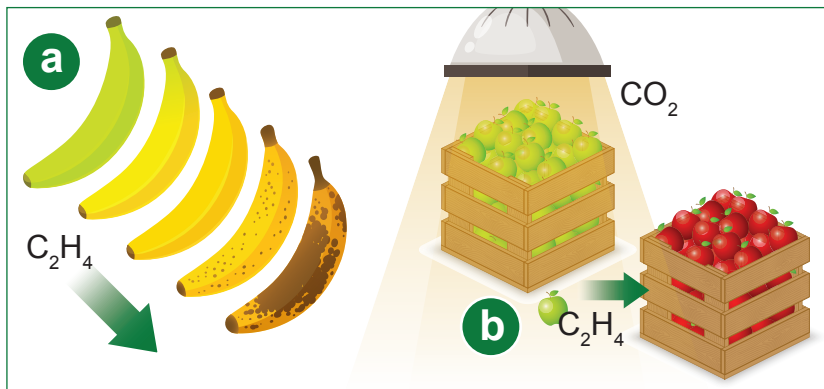
منظمات نمو النبات الأخرى



شكل 19-4 يؤدي إطلاق ميثيل بنزوات من نبات فم السمكة *snapdragons* إلى إحداث تغييرات في الزهور ما يُحسن فرص الإخصاب.

يتم إنتاج الهرمونات النباتية في السيقان أو عند قمم النمو للجذور والسيقان، أو في البراعم والبذور. وهذه المواقع مثالية لتحفيز التغيرات ذات المدى الطويل أو القصير في الخلايا بشكل فعال. وعلى سبيل المثال، فإن براعم الأزهار تنتج **مركبات عضوية متطايرة** **Volatile organic compounds (VOCs)** لإحداث تغير في لون البتلة وإطلاق روائح الأزهار (الشكل 19-4). أحد المركبات العضوية المتطايرة يسمى «ميثيل بنزوات» *methyl benzoate* وهو عبارة عن مركب ذي رائحة قوية في الزهور ويستخدم في صناعة الشامبو ومضادات التعرق وجل الاستحمام.

ينتج النبات أيضاً غاز **الإيثيلين Ethylene** (C_2H_4) وهو مركب عضوي يساعد على إنضاج الثمار لضمان انتشار البذور، ويسبب أيضاً موت الأنسجة عند تغير الفصول. عرف العلماء مؤخراً أن أزهار البيتونيا *petunia* وفم السمكة *snapdragons* يطلقان الإيثيلين لإيقاف إنتاج الميثيل بنزوات بعد التلقيح، ما يؤدي إلى وقف إنتاج الرائحة ضمن حلقة تغذية راجعة. وهنا نجد نوعين من الهرمونات النباتية يعملان متضادين للتحكم في بدء الاستجابة وإيقافها.



شكل 20-4 يساعد الإيثيلين على نضج الفاكهة. وإضافة ثاني أكسيد الكربون CO_2 إلى شحنات الفاكهة يمكن أن تمنع اكتمال نضجها إلى حين وصولها.

يؤدي الإيثيلين دوراً رئيساً في إنضاج الثمار ونجاح انتشار البذور بوساطة الحيوانات. تعمل الإنزيمات على تفكيك الخلايا في الثمار وجعل الثمرة طرية، وعلى تحليل الكربوهيدرات المعقدة إلى سكريات أبسط وأعلى (الشكل 20-4a).

التحكم في معدل نضج الفاكهة أداة قيمة للمزارعين ومصدري الفواكه. إن فهم جزيئات الإشارة التي تشارك في نسخ الجينات لإنتاج الإيثيلين يعني أن بإمكاننا تأخير النضج إلى ما بعد قطف الثمار وشحنها. يمكن أن تمنع مستويات ثاني أكسيد الكربون المرتفعة أيضاً إنتاج الإيثيلين أثناء الشحن. ويمكن أن يؤدي تخزين التفاح في حاويات الشحن المليئة بثاني أكسيد الكربون إلى تأخير النضج حتى وصول البضائع إلى الميناء (الشكل 20-4b).

تطبيقات عملية للهرمونات النباتية



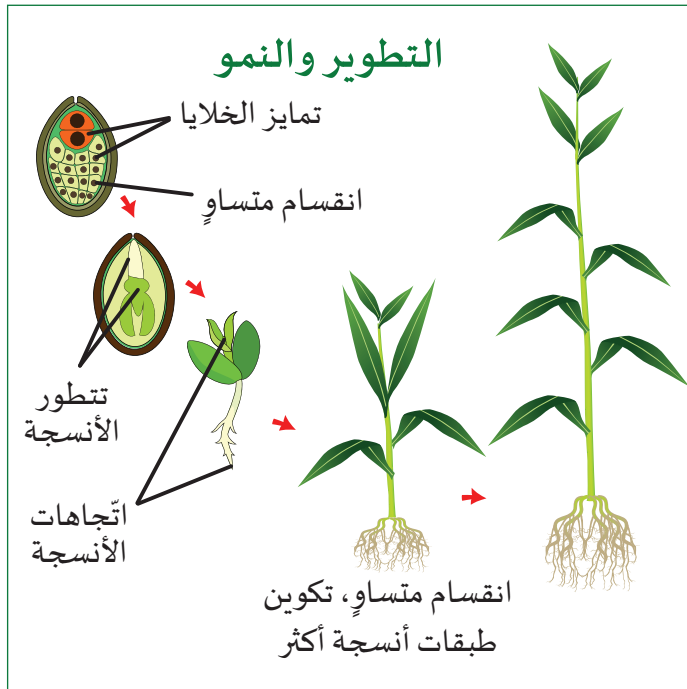
شكل 4-21 تحل الأسمدة المضافة للتربة محل المواد الغذائية للنبات.



شكل 4-22 زراعة نبتة جديدة من عقل.

اكتشفت العديد من التجارب القديمة التي أجراها الكيميائيون ورجال الأعمال في القرن التاسع عشر أن استخدام مركبات غير عضوية، مثل الجبس كمصدر للكالسيوم والديبال العضوي، يحسّن إنتاج المحاصيل. ثم اكتشفت **الأسمدة Fertilizer** وهي أيضاً مصنوعة من مواد عضوية وغير عضوية، وتُضاف إلى التربة فتزداد خصوبة النبات وإنتاجيته (الشكل 4-21). تختلف الهرمونات عن الأسمدة. يمكن أن يساعد الهرمون النبات على اكتشاف المواد الغذائية المضافة إلى التربة، ويشجع جذور النبات على النمو باتجاهها. تشكّل زراعة نباتات جديدة من العقل مثلاً جيّداً على ذلك. يتم إضافة خليط من الأكسينات إلى نهاية العقل لتحفيز نمو جذور جديدة (الشكل 4-22).

تحفز الهرمونات إحدى استجابتي أساسيتين في النباتات: التطوير أو النمو. استجابات التطوير في الكائنات الحية معقدة. سننسط في هذا الدرس استجابات النبات على المستوى الخلوي ومستوى الأعضاء.



شكل 4-23 تستخدم النباتات الهرمونات (a) للتطوير، و (b) النمو.

a. التطوير هو تغيير في شكل الخلايا أو وظيفتها عن طريق التمايز، مثل تكوين ورقة جديدة أو برعم أو بذرة (الشكل 4-22a).

b. النمو هو تغيير في الحجم، يتم الخلط في أكثر الأحيان بين النمو التطوير، لكنهما ليسا الشيء نفسه. يحدث النمو عن طريق زيادة حجم الخلايا بوساطة الماء أو عن طريق تكوين خلايا متماثلة من خلال الانقسام المتساوي في مناطق النمو، ما يؤدي إلى زيادة سُمْك الأنسجة أو إطالتها (الشكل 4-22b).

تقويم الدرس 1-4

1.  ميز بين المنبه والاستجابة في النبات. استخدم مثالاً غير مذكور في هذا الدرس.
2.  ما الذي خلص إليه تشارلز وفرانسيس داروين في تجاربهما على نباتات عشب الكناري؟ وما أهمية ذلك لعلم الأحياء؟
3.  أصل كلمة هرمون من اليونانية ، وتعني «بدء الحركة». هل يمكن أن تكون طريقة جيدة لوصف هرمون نباتي؟ ولماذا لا تكون كافية لتوضيح ما تفعله الهرمونات فعلاً في النباتات؟ ادعم مناقشتك بمثال.
4.  ما الفرق بين استخدام مصطلح «هرمون نباتي» و«منظم نمو النبات»؟
5.  اكتب جملة واحدة تستخدم فيها كل زوج من المصطلحات كمتضادين.
 - a. خلية منتجة للهرمون ؛ خلية مستهدفة بالهرمون
 - b. مؤازر، مناهض
 - c. يحفز، يثبط
6.  باستخدام رسم تخطيطي، ارسم الخطوات الثلاث لتحويل الإشارة. عيّن في رسمك التخطيطي جزئ البداية، والبروتينات المختلفة، والمواقع الأربعة (4) التي تجري الأحداث فيها.
7.  في الأسئلة من 7 إلى 11، اختر الهرمون أو المركب الذي له الدور الأكبر:

(a) IAA (b) ABA (c) CK (d) الإيثيلين (e) CO_2
8.  يحفز استطالة الخلية.
9.  يحفز نشاط البراعم الجانبية.
10.  يسبب تساقط الأوراق وسكون السيقان.
11.  يتم إطلاقه من الزهور والثمار وهو يحفز النضوج.
12.  يؤخر نضج الثمار.
13.  أَيْعَدُ تأثير الأكسجين في استطالة الخلية عملية كيميائية أم عملية كهروكيميائية؟ وضح اجابتك.
14.  تم اكتشاف ثلاث مجموعات أخرى من منظمات النمو بعد سنوات من اكتشاف الهرمونات الأخرى، وهي: البراسينوستيرويدات، الجاسمونات، والستريجولاكتون. استخدم الإنترنت لتصف بإيجاز عمل كل مجموعة من هذه الهرمونات، واعطِ مثالاً على استجابة النبات لها.

الدرس 4-2

الانتحاء في النبات Plant Tropisms



شكل 4-24 الحامول هو مجموعة نباتية طفيلية يُعدها المزارعون آفة المحاصيل الزراعية.

المفردات



Tropism	الانتحاء
Phototropism	الانتحاء الضوئي
Geotropism	الانتحاء الأرضي
Hydrotropism	الانتحاء المائي
Thigmotropism	الانتحاء اللمسي
Photoreceptor	المستقبل الضوئي
Photoperiodism	الاستجابة للفترة الضوئية
Photoperiod	الفترة الضوئية
Long – day plant	نبات النهار الطويل
Short – day plant	نبات النهار القصير
Day – neutral plant	نبات محايد النهار
Phytochrome red (Pr)	فايتوكروم الأحمر
	فايتوكروم الأحمر البعيد
Phytochrome far red (Pfr)	
Cryptochrome	الكريبتوكروم
	النظم اليومي (إيقاع الساعة البيولوجية)
Circadian rhythm	
Abscission	الانفصال
Alkaloid	شبه القلوي

بسبب عدم مقدرة النباتات على الحركة والتنقل، فإنه غالباً ما كان يعتبر دورها في بيئتها غير مؤثر وفاقد للفاعلية. ومع ذلك، فقد طوّرت النباتات مجموعة متنوعة من الاستجابات الفريدة التي تساعد على البقاء على قيد الحياة في مختلف المناخات والظروف والدفاع عن نفسها. اعتمدت هذه النباتات أساليب مذهلة منحتها القدرة على الاستجابة لاتجاه الضوء، وشدته، ولونه، والجاذبية، واللمس، والماء، والآفات.

من النباتات غير الاعتيادية الحامول *Cuscuta* (الشكل 4-24). تستطيع بعض أنواع هذا النبات القيام بعملية البناء الضوئي بشكل ضعيف وبعضها طفيلي تماماً يعتمد على نبات عائل للتغذية. لا تزال هذه النباتات تحتوي على بقايا الكلوروفيل، ويتكيف ما تبقى من أوراقها ليكون قادراً على الالتفاف حول النباتات الأخرى. وتغرز جذورها الرفيعة في أوعية النبات العائل الناقلة لتمتص ما فيها من مواد، بعد أن تكون قد غطتها بشكل كامل.

مخرجات التعلّم

B1221.1 يستقصي ويصف كيف تستجيب سيقان النباتات وجذورها للضوء والجاذبية (الانتحاء الضوئي والانتحاء الأرضي).

تنمية النباتات في الفضاء



كيف تستجيب جذور النبات وسيقانه وأوراقه في الفضاء؟



تمنح النباتات رواد الفضاء ما يضمن لهم البقاء في ظروف الجاذبية المنخفضة أثناء رحلاتهم الطويلة في الفضاء. تُسهم النباتات في الحفاظ على مستويات الأكسجين الطبيعية، وتشكل مصدرًا متجددًا زهيد الكلفة للبروتينات والكربوهيدرات. تحتاج النباتات إلى ثلاثة أشياء للنمو والبقاء على قيد الحياة: مصدر للكربون، وضوء الشمس، والماء. يتوافر ثاني أكسيد الكربون من زفير الإنسان، ويمكن بسهولة استبدال ضوء الشمس بمصابيح خاصة. أما الماء فهو ناتج ثانوي من عمليات احتراق الوقود في المحركات.



شكل 4-25 نبات قمح قزم جذوره مقيدة النمو وقد التفت سيقانه وظهرت عليه أعراض الاجهاد كالتفاف الأوراق في مدارات.

استُخدمت النباتات في رحلات الفضاء منذ العام 1960. وقد كان العلماء في البداية يرون أن نقص الجاذبية سيكون عقبة رئيسة، فالسيقان والجذور تستخدم الجاذبية في بداية نموها لتحديد اتجاهها. وعندما تظهر الأوراق، فإنها تتجه نحو الضوء. في ظروف الجاذبية المنخفضة، وبوجود مصدر ضوء من جانب واحد، تكيفت سيقان القمح وأوراقه لتنمو في اتجاه الضوء. تشابكت السيقان والتفت الأوراق، لكنها لم تنتج الأجزاء الحاملة للبذور (الشكل 4-25).

ظهرت مشكلات غير متوقعة أثرت في تجارب الفضاء المبكرة: تقليل الجاذبية يجعل الماء كثير «اللزوجة» كونه ذا طبيعة قطبية، فيلتصق بالتالي على كل سطح، ويلتفّ أحيانًا على النبات بأكمله، ليغمره ويمنع عنه تبادل الغازات ويغرقه. لا تنتشر الغازات في الفضاء. لذا، فإن المركبات العضوية المتطايرة من النبات تخنق الأوراق. مع الحفاظ على رطوبة الجذور، يصعب منع وجود البكتيريا والفطريات في التربة. ولحل هذه المشكلة، تم تصميم أوساط نمو صناعية لتكون بديلاً من التربة.



شكل 4-26 الإضاءة والمواد الغذائية هي منظم لكل تجربة.

في العام 2017، تم تزويد محطة الفضاء الدولية بموطن بيئي نباتي متقدم، وهو عبارة عن نظام آلي حلقي مغلق يسهم في التحكم في مستوى الإضاءة وفي غيره، ويزود الماء والمواد الغذائية اللازمة لنمو الجذور والسيقان آليًا بدلاً من المحاقن في «وسائد تربة»، أو في حجرات خاصة صُمّمت وقُسمت إلى مناطق منفصلة لنمو الجذور والبراعم (الشكل 4-26).

أنواع الانتحاء



شكل 4-27 سقطت هذه الشجرة، لكنها استمرت في النمو، وقد غيّر الضوء والجاذبية اتجاه النمو.

تُسمّى استجابة النبات لمنبّه غير حيوي في بيئته **الانتحاء Tropism**. تشمل المنبّهات غير الحيوية الضوء والجاذبية واللمس. وتستجيب النباتات في الغالب للمنبّهات غير الحيوية بالنمو في اتجاه المنبّه (إنتحاء إيجابي)، أو بعيداً منه (انتحاء سلبي). وقد طورت أنواع النباتات استجابات مختلفة: لذا سمّى العلماء كل انتحاء باسم «المنبّه» الذي يسبّبه. تستجيب جميع النباتات بالحد الأدنى للضوء والجاذبية (الشكل 4-27).

تتمثل أنواع الانتحاء الأكثر شيوعاً في النباتات في ما يأتي:

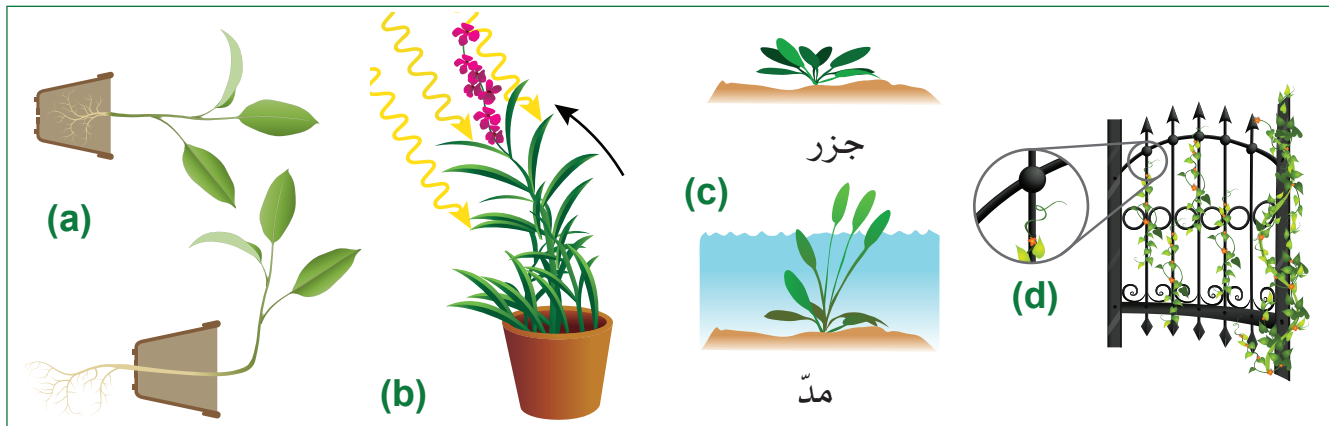
a. الانتحاء الأرضي Geotropism. الاستجابة للجاذبية الأرضية (الشكل 4-28a).

b. الانتحاء الضوئي Phototropism. الاستجابة للضوء (الشكل 4-28b).

c. الانتحاء المائي Hydrotropism. الاستجابة للرطوبة أو الماء (الشكل 4-28c).

d. الانتحاء اللمسي Thigmotropism. الاستجابة للتلامس مع جسم (الشكل 4-28d).

يفيد المصطلحان «إيجابي» و«سلبي» في وصف الانتحاءات في النبات، لأن المنبّهات تحفز هرمونات النبات على العمل بطرائق مختلفة.



شكل 4-28 أمثلة على (a) الانتحاء الأرضي السلبي (تنحني الساق نحو الأعلى) (b) الانتحاء الضوئي (تنمو ساق النبات باتجاه الشمس) (c) الانتحاء المائي (يُطيل النبات السيقان في الماء) (d) الانتحاء اللمسي (التفاف الدالية حول البوابة).

ما رأيك في نوع المنبه لكل من الانتحاءات المذكورة أعلاه؟ (في الجانب الأيمن)



بعض الانتحاءات الموجودة في النباتات أو الفطريات نادرة. وقد اكتُشفت أيضاً انتحاءات كهربائية، وانتحاءات حرارية، وانتحاءات مغناطيسية أرضية.



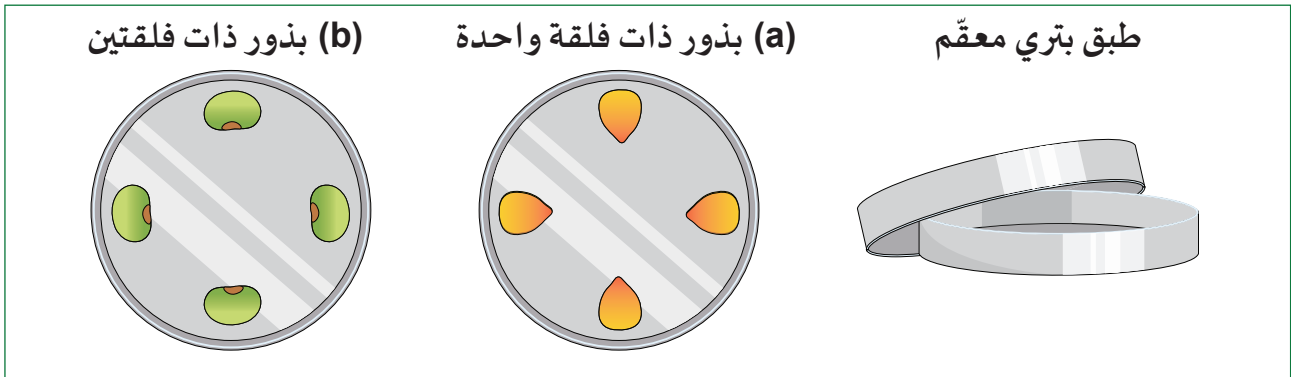
اتجاه نمو البذور

2-4

سؤال الاستقصاء	ما الذي يؤثر في اتجاه نمو البذور النامية؟
المواد المطلوبة	أطباق بتري معقمة، أقلام تعليم، بذور فاصوليا وذرة منقوعة مسبقا، مناديل ورقية، مخابر مدرّجة، ماء منزوع الكلور، شريط لاصق شفاف، كاميرات رقمية.

الخطوات

1. تقاسم ثماني (8) بذور من ذوات الفلقة الواحدة (ذرة) أو ذوات الفلقتين (فاصوليا) مع زميلك. رتب البذور في قاع الطبق كما في (الشكل 29-4).
2. اطو مناديل ورقية عدة مرات لتضعها بإحكام فوق البذور في الطبق، ثم أضف 15 mL من ماء منزوع الكلور إلى المناشف.
3. بعد 30 ثانية، تخلّص من الماء الزائد، وضع غطاء على طبق. استخدم الشريط اللاصق الشفاف لتثبيت الغطاء، وسمّ الغطاءين.
4. سيوجه المعلم الصف إلى كيفية وضع أحد الطبقين في منطقة مشمسة على الجدار، في منطقة يصلها ضوء الشمس أو تكون مضاءة بمصباح، على أن يوضع الطبق الآخر في خزانة مظلمة.
5. سجل بعض المعلومات الأساسية في ورقة العمل عن الظروف البيئية لكل طبق في الغرفة والخزانة.



شكل 29-4 إعداد طبق بتري (a) لبذور ذات فلقة واحدة أو (b) بذور ذات فلقتين.

6. أكتب في ورقة العمل ثلاثة توقعات على الأقل تتعلق بنجاح إنبات كل بذرة. واستجابتها المحتملة لظروفها.
7. انتظر 4-5 أيام ثم صوّر النتائج وسجلها.

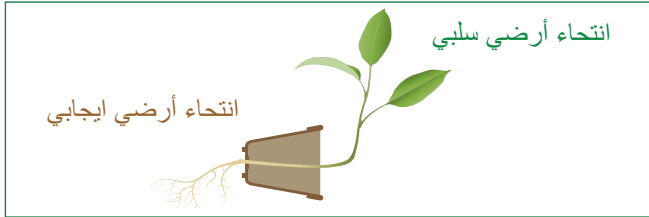
صمّم التجربة



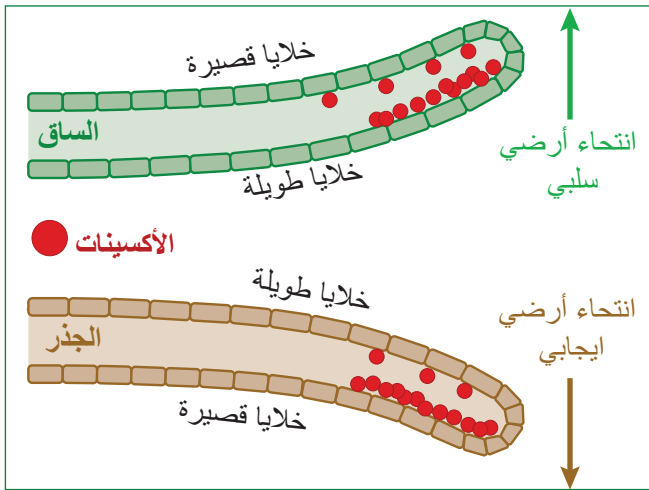
- a. اختر بذرة نابطة، واستخدم ما تعرفه عن منظّمات نمو النبات لتصميم تجربة تؤثر في نمو البذرة. صغ فرضية وأكتب الخطوات.
- b. إذا أتيح الوقت الكافي، وحصلت على موافقة معلمك، فنقذ التجربة.

الانتحاء الأرضي

تضمّن كتاب الثنائي داروين عن حركة النبات تجارب حول الانتحاء الأرضي الذي هو استجابة النبات لقوى الجاذبية الأرضية. قاما بدراسة بذور الفول *Vicia faba* وهو نوع من الفول العريض الشائع، واستنتجا أنّ قمة كل جذر أولي (جذير) هي الجزء الحساس للانتحاء الأرضي.



شكل 4-30 اتجاهات الانتحاء الأرضي.



شكل 4-31 يكون توزيع الأكسينات انتحاء أرضيًا.



شكل 4-32 مثال على الانتحاء الأرضي السلبي في شجرة.

يُعرّف الانتحاء الأرضي الإيجابي بأنه النمو إلى الأسفل مع سحب الجاذبية (الجذور). بينما الانتحاء الأرضي السلبي هو النمو إلى الأعلى، عكس سحب الجاذبية (السيقان) (الشكل 4-30).

إنّ استجابة النمو للأكسينات لدى خلايا الجذور هي معاكسة لاستجابة السيقان.

- تزيد الأكسينات من نمو واستطالة الخلايا في السيقان.
- تقلل الأكسينات من نمو واستطالة الخلايا في الجذور.

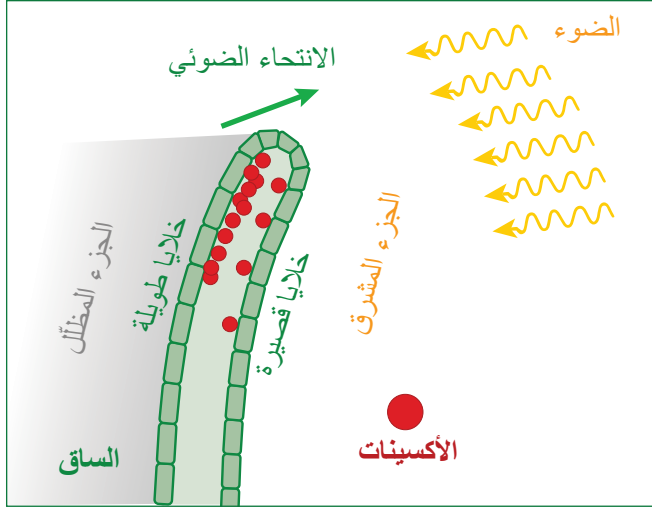
تميل الأكسينات إلى الترسّب على الجانب السفلي من الجذور والسيقان الأفقية.

في الجذر الأفقي، يمنع تركيز الأكسين المرتفع على الجانب السفلي نمو الخلايا هناك مقارنة بالخلايا الموجودة في الجانب العلوي. نتيجة لذلك، تنحني قمة الجذر نحو الأسفل (الشكل 4-31) مما يتسبب في انحناء الجذر مع اتجاه الجاذبية.

توزيع الأكسينات ذاته يتسبب في تأثير عكسي في الساق الأفقية. يتم تحفيز الخلايا في الجانب السفلي على الاستطالة أكثر مما يؤدي إلى انحناء الساق نحو الأعلى، عكس قوة الجاذبية (الشكل 4-31). يوضح الشكل 4-32 شجرة بدأت نموها بشكل أفقي لكنها نمت لاحقًا نحو الأعلى.

تتحكّم الأكسينات بالانتحاء الضوئي

يصف الانتحاء الضوئي كيف تميل النباتات إلى النمو في اتجاه الضوء الأكثر إشراقًا. الانتحاء الضوئي هو نتيجة استجابة النبات للأكسينات ذاتها التي تفسر الانتحاء الأرضي.



شكل 33-4 آلية الانتحاء الضوئي.

إذا نمت السيقان تحت ضوء متجانس، فإنها تنمو بشكل مستقيم نحو الأعلى بسبب السيادة القمية. بالمقابل، عندما يصل الضوء إلى جانب واحد من الساق النامية بكمية أكبر وبشكل مستمر، فإن الساق تنحني نحو الجانب الأكثر إشراقًا.

- ضوء الشمس يقوم بتحليل الأكسينات، وبالتالي، فإن القمة النامية للساق التي تتلقى أشعة الشمس بشكل مباشر أكثر يكون لديها تركيز أقل من الأكسينات.

- يحفز التركيز العالي للأكسين في الجانب المظلل

زيادة انقسام الخلايا واستطالتها. يؤدي هذا إلى نمو الساق باتجاه الضوء (الشكل 33-4).



شكل 34-4 نبات رشاد أذن الفأر.

إن الانتحاء الأرضي والانتحاء الضوئي كلاهما ناشطان دائماً على كوكب الأرض. بالمقابل، في بيئة محطة الفضاء حيث ينعدم الوزن، يمكن للعلماء دراسة التأثيرين بشكل منفصل.

نبات رشاد أذن الفأر *Arabidopsis thaliana* عشب صغير

موطنه أوروبا وآسيا وأفريقيا (الشكل 34-4). وكما في ذبابة

الفاكهة، فإن رشاد أذن الفأر هو النبات الأكثر شيوعاً

للدراصة، لقلة عدد جيناته، وقصر دورة حياته. تم إرسال

بادرات نبات رشاد أذن الفأر إلى مدار ذو جاذبية منخفضة وتمت مقارنته ببادرة ضابطة موجودة على كوكب الأرض.

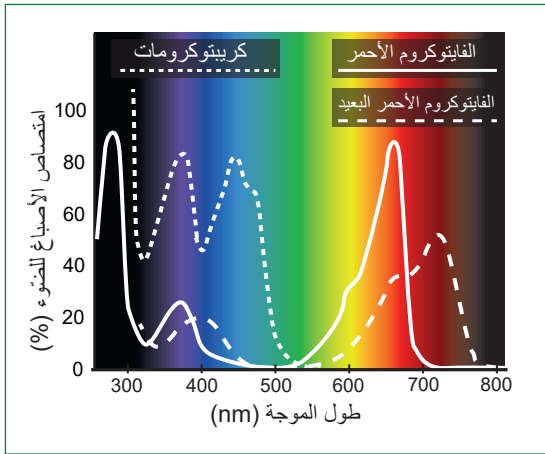
أظهرت التجارب في الفضاء أن لون الضوء يلعب دوراً أكثر أهمية من الجاذبية في توجيه الجذور والسيقان. باستخدام نبات رشاد أذن الفأر، حدّد علماء النبات ثلاث فئات أساسية من المستقبلات الضوئية أو المركبات الحساسة للضوء. توجد المستقبلات الضوئية لدى الحيوانات على شبكية العين، لكنها في النبات توجد في البراعم والأوراق والسيقان. ترتبط خمسة مستقبلات ضوئية للضوء الأحمر موجودة في نبات رشاد أذن الفأر بالانتحاءات الضوئية والانتحاءات الأرضية. بينما تؤثر مستقبلات الضوء الأزرق على استجابات النبات الأخرى مثل السيادة القمية ولكنها لم تكن مرتبطة بالانتحاء الضوئي.

إحساس النباتات بالضوء

المستقبلات الضوئية هي تراكيب تسمح للنباتات بالإحساس بالضوء. تستطيع مُختلف المستقبلات الضوئية في النباتات أن تكشف عن اتجاه الضوء وشدته وطوله الموجي (اللون). تنقسم المستقبلات الضوئية في النباتات إلى مجموعتين رئيسيتين، هما: **الفائتوكرومات (Phytochromes)** و**مستقبلات الضوء الأزرق (Cryptochromes)**. تستقبل الكريبتوكرومات الضوء الأزرق وتؤثر على تنظيم النتج وبناء الإنزيمات.

نظام الفائتوكرومات

الفائتوكرومات عبارة عن صبغات بروتينية حساسة للضوء توجد في الأوراق. ولجُزيء الفائتوكروم شكلان مختلفان، هما: الفائتوكروم الأحمر (Pr) (Phytochrome red) والفائتوكروم الأحمر البعيد (Pfr) (Phytochrome far red). يُمكن للفائتوكروم أن يتحوّل إلى أحد شكله، ثمّ عكسيًا إلى الآخر، عبر امتصاص الضوء الأحمر أو الضوء الأحمر البعيد.

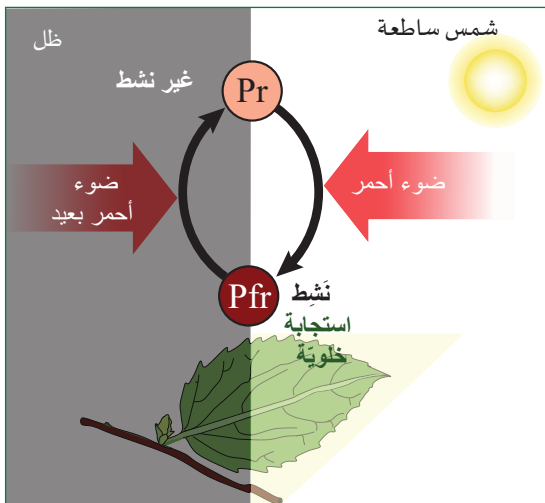


شكل 4-35 طيف امتصاص المُستقبلات الضوئية النباتية.

- يتحوّل الفائتوكروم الأحمر (Pr) إلى الفائتوكروم الأحمر البعيد (Pfr) عن طريق امتصاص الضوء الأحمر ذو طول موجة يبلغ 667 nm ~ (الشكل 4-35).
- يتحوّل الفائتوكروم الأحمر البعيد (Pfr) إلى الفائتوكروم الأحمر (Pr) عن طريق امتصاص الضوء الأحمر البعيد ذو طول موجة يبلغ 730 nm ~ (الشكل 4-35).

الفائتوكروم الأحمر البعيد (Pfr) هو محفّز للنشاط الفسيولوجي في النبات. إنّ الفائتوكروم الأحمر (Pr) غير نشط. لذلك، يؤدي التعرّض للضوء الأحمر إلى تحفيز نشاط النبات، ذلك أنّ Pr غير النشط يتم تحويله إلى Pfr نشط (الشكل 4-36).

يحتوي ضوء الشمس على ضوء أحمر أكثر من الضوء الأحمر البعيد. والعكس صحيح بالنسبة للظلام الذي يحتوي على ضوء أحمر بعيد أكثر، وضوء أحمر أقل. يتحكّم نظام $Pr \leftrightarrow Pfr$ في استجابة النبات لدورات الليل والنهار والاستجابات الأخرى التي يحفّزها الضوء، مثل تجنّب الظلّ.



شكل 4-36 يتغير الفائتوكروم الأحمر إلى الفائتوكروم الأحمر البعيد أو العكس وفقًا للون الضوء.

الاستجابة للفترة الضوئية

الكمية الإجمالية للضوء في مدة 24 ساعة تُسمى **الفترة الضوئية Photoperiod**، أو طول النهار. تختلف الفترة الضوئية وفقًا لفصول السنة وخطوط العرض. يكون النهار أطول والليالي أقصر في الصيف. ويكون النهار أقصر والليالي أطول في الشتاء.

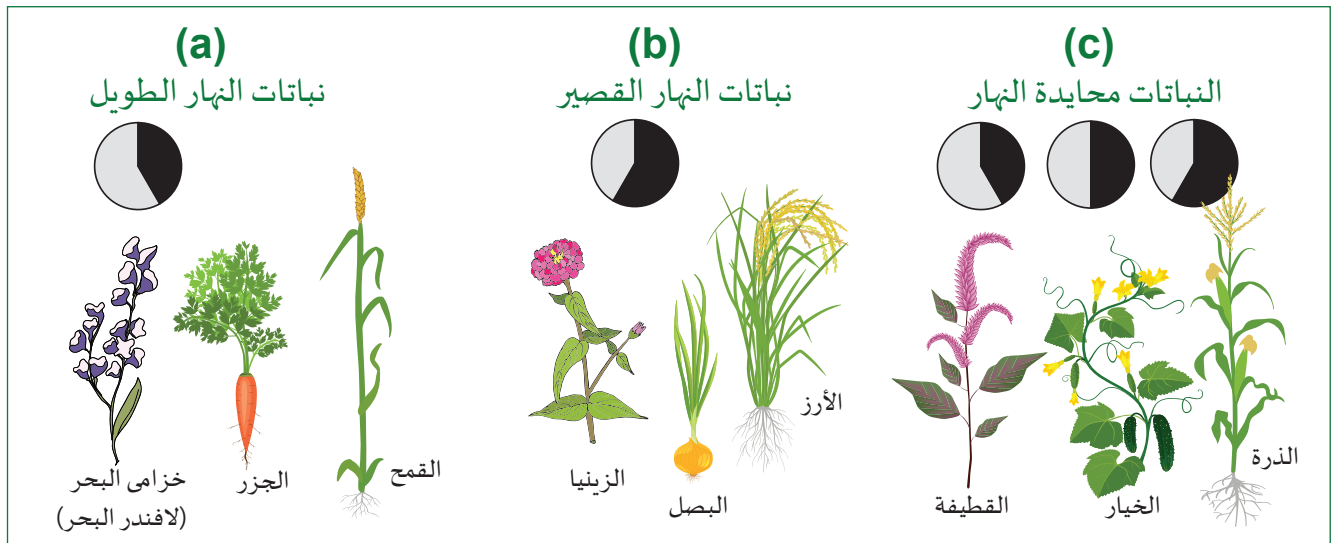
الاستجابة للفترة الضوئية Photoperiodism هي استجابة النبات لتغيير شدة الضوء (يوميًا أو فصليًا). اعتقد الناس في السابق أن النهار الطويل (ضوء شمس أكثر) يُحفّز تكوين النباتات للزهور. إلا أن التجارب بيّنت عكس ذلك تقريبًا. تحتاج العديد من النباتات إلى فترة محددة من الظلام لبدء العمليات التي تؤدي في النهاية إلى تكوين الأزهار.

يختلف سلوك الإزهار لدى النباتات استجابةً للفترة الضوئية، وللفترة المظلمة المرتبطة بها.

نباتات النهار الطويل Long – day plants تزهر في الغالب في فصل الصيف، عندما يكون الليل قصيرًا نسبيًا، والنهار طويلًا نسبيًا. ومن الأمثلة على نباتات النهار الطويل: الخس، والجزر، والبطاطس، والقمح، والشعير، والشوفان، والبازلاء (الشكل 4-37a).

نباتات النهار القصير Short – day plants تزهر في أوائل الربيع أو الخريف، عندما يكون الليل طويلًا نسبيًا، والنهار قصيرًا نسبيًا. ومن أمثلتها: الأرز، وفول الصويا، والبصل (الشكل 4-37b) ويمكن زراعة هذه المحاصيل قبل حصاد نباتات النهار الطويل أو بعده، اعتمادًا على خط العرض.

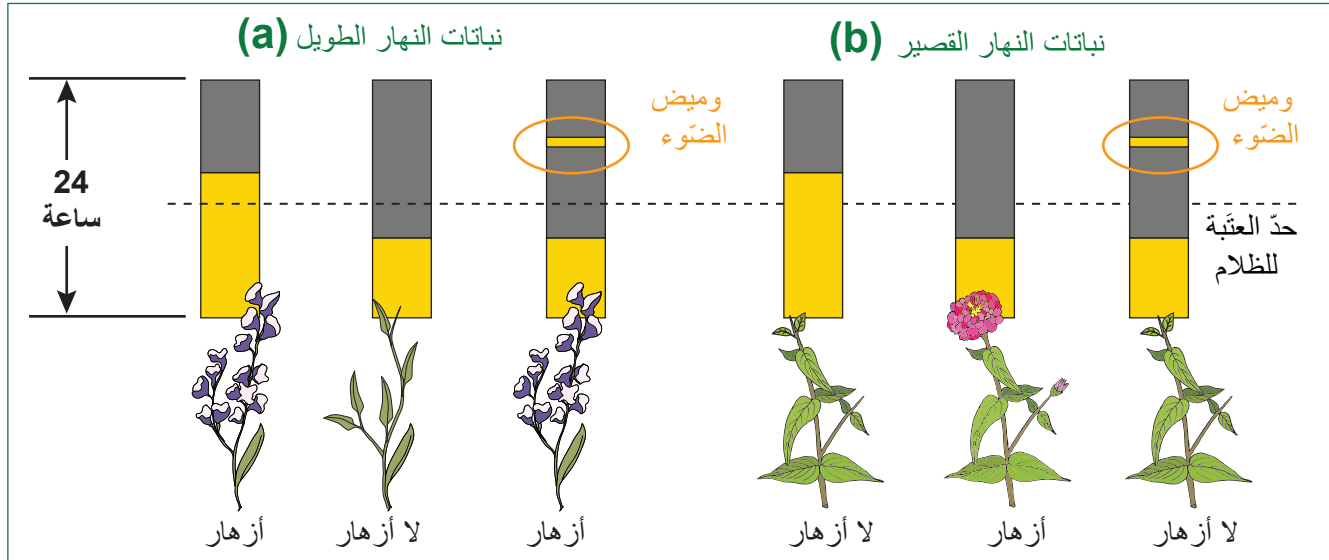
النباتات محايدة النهار Day – neutral plants تزهر بوجود الشروط الأخرى بغض النظر عن التغير في الفترة الضوئية: الطماطم، والخيار، والذرة، والفراولة، وبعض القرع أمثلة على هذه النباتات (الشكل 4-37c).



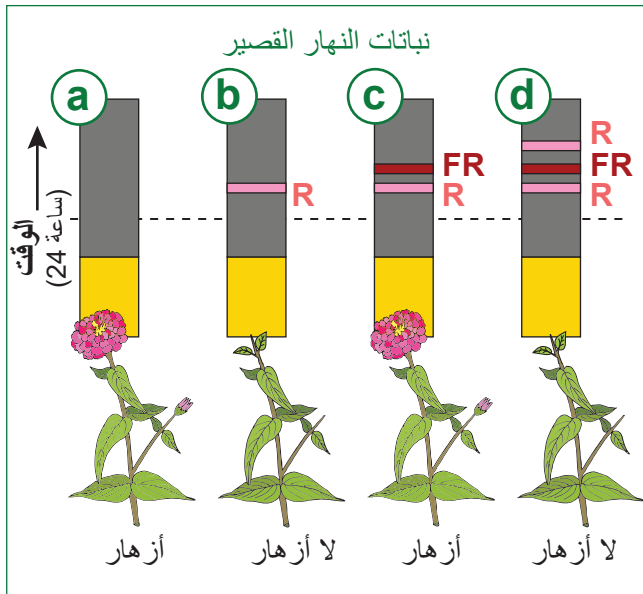
شكل 4-37 (a) تزهر نباتات النهار الطويل عند ~ 14 hrs ضوء، (b) تحتاج نباتات النهار القصير ~ 12 hrs ضوء، (c) لا تتأثر النباتات محايدة النهار بعد نضجها بالفترة الضوئية.

آلية الاستجابة للفترة الضوئية

نباتات النهار الطويل تزهر فقط عندما تقل فترة الظلام المستمر (الليل) إلى ما دون عتبة طول الوقت (الشكل 4-38a). يمكن التحايل على نباتات النهار الطويل لتزهر إذا تمّ اقتطاع ليلة طويلة، باستخدام وميض من الضوء الساطع، إلى فترات من الظلام أقل من حدّ الوقت. تتطلب نباتات النهار القصير فترة أطول من الظلام المستمر لتزهر. لن تزهر نباتات النهار القصير إذا اخترق وميض ضوء الفترة المظلمة (الشكل 4-38b).



شكل 4-38 تظهر التجارب أن الحد الأدنى من فترة الظلام المستمر تُحفّز عملية الإزهار.



شكل 4-39 تجارب باستخدام الضوء الأحمر والضوء الأحمر البعيد.

توضح النتائج الظاهرة في الشكل 4-39 أن الاستجابة للفترة الضوئية تعتمد على نظام Pfr $\leftrightarrow$ Pr. في الليل، يقوم الضوء الأحمر البعيد بتحويل Pfr النشط إلى Pr غير نشط. خلال فترة الليل، ينخفض تركيز Pfr نتيجة تكسيره. انخفاض مستوى Pfr يُحفّز الإزهار (الشكل 4-39a).

استخدام وميض ضوء أحمر بشكل متكرر كل ليلة يحوّل بعض Pr إلى Pfr. لا تزهر النبتة لأن تركيز Pfr لا ينخفض بشكل كافٍ (الشكل 4-39b).

يؤدّي استخدام وميض ثانٍ من الضوء الأحمر البعيد بعد وميض الضوء الأحمر إلى إزهار النبتة من جديد (الشكل 4-39c).

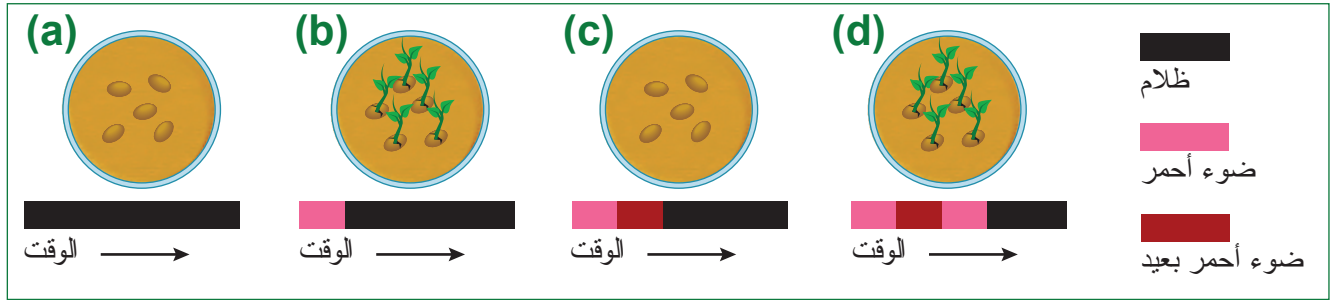
الإضافي يقوم بتكسير Pfr الذي نتج عن وميض الضوء الأحمر الأوّل. يوضح الشكل 4-39d كيف يمنع وميض ثالث من الضوء الأحمر الإزهار من جديد.

الفيتوكروم وإنبات البذور

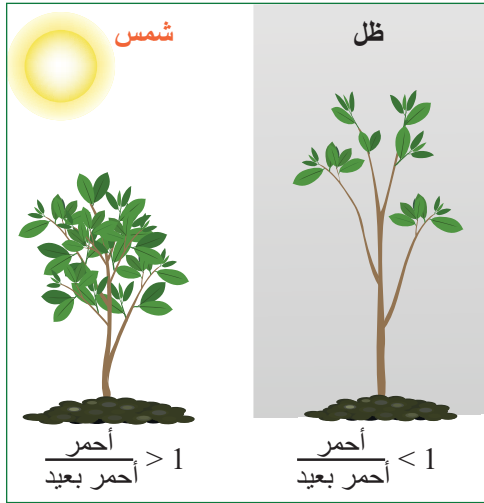
الكثير من البذور تبقى في حالة سكون حتى تتغير الظروف الضوئية. لاحظ العلماء أن الضوء الأحمر يزيد من إنبات البذور ذلك أن الضوء الأحمر يحول (Pr) إلى (Pfr) النشط. يثبط الضوء الأحمر البعيد إنبات البذور.

يوضح الشكل 4-40 تجربة إنبات لبذور الخس:

- (a) لم تُنبِت البذور المُعرّضة للظلام المُستمر.
- (b) أُنبِتت البذور عند تعريضها لضوء أحمر متبوع بظلام.
- (c) لم تُنبِت البذور عند تعريضها لضوء أحمر متبوع بضوء أحمر بعيد، ومن ثمّ ظلام.
- (d) أُنبِتت البذور عند تعريضها لضوء أحمر متبوع بضوء أحمر بعيد، ثمّ ضوء أحمر مرة أخرى، ومن بعده ظلام.



شكل 4-40 تجربة إنبات البذور.



شكل 4-41 استجابة النبات للشمس والظل.



شكل 4-42 نبات الستّ المستحيّة أو الميموزا (Albizia julibrissin).

نستنتج من التجربة أعلاه أن نوعية الضوء النهائي الذي تتعرض له البذور هو العامل المحدّد في إنباتها.

تستخدم النباتات نظام الفيتوكرومات للنمو بعيداً عن الظل ونحو الضوء. يتلقى النبات في الظل مقداراً من الضوء الأحمر البعيد أكثر من الضوء الأحمر، لذلك يتحول (Pfr) إلى (Pr). يستجيب النبات لتواجده في الظل بطرق مختلفة. على سبيل المثال، تزيد نباتات ذات الفلقتين طول الساق وتُخفّض مساحة الورقة كما هو موضح في الشكل 4-41.

تؤدي مستقبلات الضوء الأزرق وظائف عديدة؛ فهي تتحكم باستطالة السويقة تحت فلقية، وفتح الثغور، والانتحاء الضوئي. كما يؤثر الضوء الأزرق في تكوين الكلوروفيل والبلاستيدات الخضراء وبناء الإنزيمات. تشير التجارب إلى أن مستقبلات الضوء الأزرق تساعد في الحفاظ على إيقاع الساعة البيولوجية الذي هو دورة الأنشطة اليومية. وعلى سبيل المثال، فإن نبات الستّ المستحيّة أو الميموزا (*Albizia julibrissin*) يلوي أوراقه يومياً، حتى في الظلام الدامس (الشكل 4-42).

الانتحاء اللمسي



الانتحاء اللمسي Thigmotropism هو إستجابة النبات لملامسة جسم صلب. مثالاً على ذلك، تتسلق محاليق العرائش الهياكل وتنمو حولها كما يظهر في الشكل 4-43. المحاليق سيقان متحورة تسمح للنبات باستخدام دعامة من أجسام خارجية أو نباتات أخرى. تشير الأبحاث الجارية إلى أن كل من الأكسينات (IAA) والإيثيلين يلعبان دوراً في الانتحاء اللمسي.

شكل 4-43 يدعم المحلاق النمو في اتجاه الأعلى أو إلى الخارج.

الأنسجة المولدة لمعظم المحاليق حساسة للمس، وقد تؤدي لمسة خفيفة إلى استجابة التفاف سريعة.

لحدوث نمو التفاف، ترسل الخلايا الملامسة مباشرة للجسم الصلب إشارة إلى النسيج المولد ليفرز الأكسين. تنمو المحاليق بشكل عمودي حتى تلامس جسمًا صلبًا فتلتف حوله نتيجة للنمو غير المتساوي على جانبي المحاليق.

السبب الثانوي للانتحاء اللمسي هو زيادة إفراز الإيثيلين على جانب المحلاق الذي يلامس جسمًا صلبًا. يمنع الإيثيلين النمو مما يتسبب في نمو الجانب الملامس للجسم الصلب بشكل أبطأ من الجانب الآخر. يحدث تأثير الإيثيلين التفافاً في الاتجاه نفسه الذي يحدثه اختلال التوازن في الأكسينات. معاً، يكون العاملان استجابة أقوى.



شكل 4-44 تحتوي ورقة قنّاص الذباب على شعيرات تعمل ككواشف للحركة.

يستجيب نبات قنّاص الذباب *venus fly trap* بسرعة لنشاط الحشرة. الفخ فيها هو ورقة متحورة تحتوي على ثلاث خلايا شعرية على كل نصف منها تعمل ككواشف للحركة (الشكل 4-44). يمكن أن تتنبه الورقة ميكانيكياً بسبب فقدان الامتلاء، أو بتنبيه كهروكيميائي. ويبلغ متوسط سرعة إغلاق قنّاص الذباب 0.3s.

لدى نباتات أخرى طرق تكيف مختلفة تعمل بآليات مماثلة. نبات الستّ المستحيّة أو الميموزا، ويعرف أيضاً باسم «النبات الحساس»،

يمكن أن يغلق وريقاته عند لمسها أو عند تعرضها للحرارة. شجرة الكينا تكيفت مع النار، فيسقط قلفها على شكل شرائط عندما تكون كثافة الأشجار كبيرة جداً، وتنتشر النار بسرعة عند اشتعالها. ومع احتراق الأشجار، تستجيب الدرنات المختزنة تحت الأرض بالتبرعم، بعد أن تكون النار قد فتحت الطريق لنمو جديد.

استجابات النبات للإجهاد

تستجيب النباتات للعوامل الحيوية القصوى والعوامل غير الحيوية من خلال مسارات تتضمن الهرمونات أيضاً. وتشمل عوامل الإجهاد الشائعة: البرد الشديد، والتعرض الزائد للضوء، والجفاف، والآفات.

a. البرد



(a) البرد

تستخدم النباتات التي لا تموت حين تنخفض درجات الحرارة إلى درجة التجمد أو نتيجة الفصول استراتيجيتين رئيسيتين: الأشجار متساقطة الأوراق تكون قادرة على قتل الأجزاء الطرفية للحفاظ على النبات الرئيس حيًا. وأثناء الانفصال **Abscission** يُسقط النبات أوراقه أو ينضج ويفصل ثماره، كما في المكسرات (الشكل 4-45a). كان يُظن أن حمض الأبسيسيك (ABA) يحفز سقوط الأوراق، لكننا ندرك اليوم أن الأكسينات تثبطه والإيثيلين يحفّزه. يمكن للنباتات جلب الأملاح إلى السيتوبلازم والفجوات العصارية لخفض درجة الحرارة التي يتجمد الماء عندها.

b. الضوء الزائد



(b) الضوء الزائد

يُتلف الكثير من الضوء أنسجة الورقة الرقيقة (الشكل 4-45b). يمكن لنبات رشاد أذن الفأر الاستجابة بإفراز كاروتينويد يسمى «زيكسانثين»، والذي يوقف بشكل فاعل قدرة الكلوروفيل على امتصاص الفوتونات، ليبطئ البناء الضوئي.

c. الجفاف



(c) الجفاف

يرسل حمض الأبسيسيك في حالات الجفاف الشديد إشارة إلى الثغور ليبقيها مغلقة، وليبطئ كلا من البناء الضوئي وفقدان الماء. يحدث الذبول نتيجة لفقدان الامتلاء، ويمكن أن يزيد سمك الأغشية البلازمية ويخفض من انفراج الأوراق السفلية ليبطئ البناء الضوئي (الشكل 4-45c). تكون النباتات ذات الأغشية، والبشرة العليا، والكيوتيكل الشمعي السميك، أفضل تكيّفًا.

d. الآفات

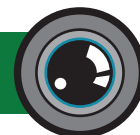


(d) الآفات

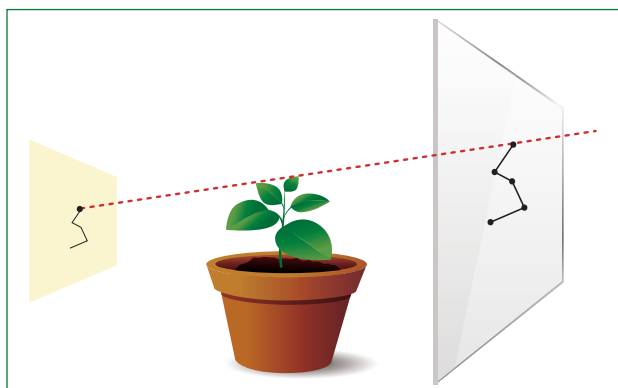
شكل 4-45 أربعة أنواع من استجابات النبات للإجهاد.

تكيفت النباتات مع خطر الماشية عن طريق الأشواك والأوراق الشوكية والشعرية، أو القلف. لكنها تنتج في الوقت نفسه مركبات عضوية متطايرة أو **أشباه القلويات Alkaloids** لتعمل كمبيدات حشرية، أو تكون ذات طعم مر. لأشباه القلويات تأثيرات دوائية في الحشرات والحيوانات الأخرى والإنسان. وهي مشتقة من الأحماض الأمينية. تشمل أشباه القلويات الكافيين، والكينين، والنيكوتين، والمورفين، والإستركنين.

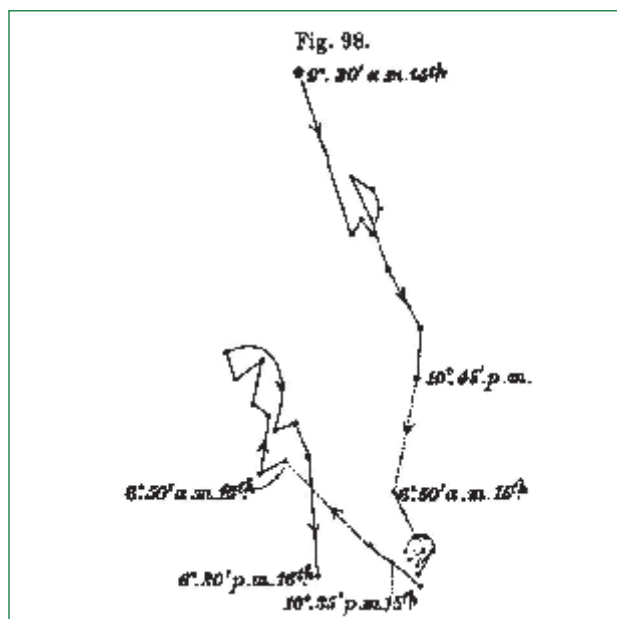
1.  أذكر الانتحاءات الرئيسة الأربعة، وأذكر مثالاً من استجابات النبات على كل منها.
2. *  اشرح التأثير المحتمل لإزالة قمة الجذر الأولي لبادرة على نمو الجذر. لماذا يُعَدُّ هذا التأثير انتحاء أرضيًّا؟
3.  أذكر سببين لاستخدام نبات رشاد أذن الفأر في تجارب الانتحاء الضوئي على الأرض وفي الفضاء.
4. *  أرسل نبات رشاد أذن الفأر لإجراء تجارب على الانتحاء في المدار. أذكر سببين لذلك (غير اللذين ذكرتهما في السؤال 3).
5. *  أجب عن كل سؤال أدناه حول الاستجابة للفترة الضوئية.
 - a. ما تعريفها؟
 - b. لماذا تكيّفت النباتات معها؟
 - c. لماذا تُعَدُّ الفئات المستخدمة لوصف الفترات الضوئية للنباتات مربكة؟
 - d. أذكر سببين يبينان أهمية معرفة الفترة الضوئية للمزارعين.
6. *  اشرح في بضع خطوات ما يحدث لنبات تحت ظل نبات آخر. استخدم المفردات: نشط، منافسة، إزهار، إنبات، فايتوكروم الأحمر البعيد، فايتوكروم الأحمر، عكسي، طول الموجة.
7.  ما هو إيقاع الساعة البيولوجية؟ وفيما يمكن أن تستخدمه النباتات؟
8.  اشرح أهمية نوعي المستقبلات الضوئية، واذكر كيف تستخدم النباتات كل نوع للبقاء.
9. *  اشرح أي المواد الكيميائية لها الدور الأكبر في التواء المحلاق وكيف تعمل هذه المواد معًا.
10. *  أي من عوامل إجهاد النبات الموصوفة في الدرس يحدث في دولة قطر؟
 - a. عدّد عوامل الإجهاد المحتملة.
 - b. استفد من الإنترنت في اختيار نباتات محلية مختلفة لكل نوع من الإجهاد، ثم اشرح تكيف النبات للاستجابة له.



تعتمد معرفتنا باستجابة النباتات للمنبهات على عدة تجارب نباتية أجراها تشارلز داروين بمساعدة ابنه فرانسيس، ونشرت في كتاب (آلية الحركة النباتية) *Plants in Motion* في العام 1880.



تجربة عشب الكناري الأكثر شهرة هي واحدة من بين كثير من التجارب لفهم تحرك النباتات. كانت معظم ملاحظات العالمين نتيجة دراسة الحركات اليومية للنباتات المختلفة باستخدام معدات لتضخيم الحركة (الشكل 4-46).



رصف داروين كُريّة من الشمع على إبرة زجاجية مثبتة على عضو نباتي (مثلاً البرعم أو الجذر أو الأوراق، وغيرها) مع نقطة ثابتة على بطاقة ووضع علامة على الزجاج. من خلال تكرار ذلك في أوقات مختلفة، قام داروين بوصف النقاط لينشئ مُرَتَسَمًا لحركة النبات. ساعد المُرَتَسَم داروين على استنتاج أن جميع أعضاء النبات تنمو بشكل لولبي، وأنّ الأشكال المختلفة للحركات الانتحائية هي أشكالاً معدلة من النموّ اللولبي. (الشكل 4-47).

من الواضح أن النتائج أذهلت العالمين. وفي إحدى الدراسات عن الانتحاء الأرضي وإنبات بذور الفول، قطعاً قمم الجذور الأولية، وكانت دهشتهما كبيرة من النتائج غير المتوقعة. «لرؤية أي شيء من هذا النوع في مملكة الحيوان، يجب أن نفترض وجود حيوان منبطح على الأرض، يقرر النهوض للسير

34

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 1-4 استجابات النباتات للمنبّهات

- يمكن لجميع الكائنات الحية أن تحسّ بمنبّه **Stimulus**، أو تغيّر في بيئتها، وتنتج استجابة **Response**، وتتفاعل.
- **علم وظائف الأعضاء Physiology** هو المجموع الكلي لجميع التفاعلات الكيميائية الحيوية على المستوى الخلوي، والتي ترتبط بسلوك الكائن الحي.
- عندما تنبت الأعشاب، فإن الورقة الأولى التي تفكّك التربة الصلبة تكون محاطة بنسيج مجوّف يُسمى **الغمد Coleoptile**.
- **الهرمون Hormone** مركب عضوي بسيط ينتج في جزء واحد من جسم الكائن الحي، وينتقل إلى جزء آخر، حيث يحفز استجابة.
- كلّ مادة عضوية أو غير عضوية تنتج استجابة في النباتات هي **منظم نمو نبات Plant growth regulator**.
- **الأسمدة Fertilizers** مواد غذائية عضوية وغير عضوية تزيد من خصوبة النبات وإنتاجيته من خلال إضافة مواد غذائية إلى التربة.
- **الخلية المستهدفة Target cell** (أو النسيج المستهدف) هي جزء من الكائن الحي يتأثر بالهرمون.
- للتعرف إلى الهرمون يجب أن يرتبط **بمستقبل Receptor**، وهو جزيء في الغشاء موجود داخل الخلية، ويكون في الغالب بروتينًا.
- إذا تفاعل هرمونان وحفزا استجابة تفوق تلك التي يحفزها كل منهما على حدة، فإن كليهما يعمل **كمؤازر Synergist**.
- عندما يتفاعل هرمونان لهما تأثير متعاكس يوازن بينهما، ويحدد صافي التأثير الاستجابة، فكل منهما هو **مناهض Antagonist** للآخر.
- أثناء **تحويل الإشارة Signal transduction**، يُنشّط جزيء إشارة فريد في مسار كيميائي مستقبلاً بروتينياً، ويحفز في النهاية جينٌ معين استجابة الكائن الحي.
- **الأكسين Auxin** مجموعة من الهرمونات النباتية التي تؤثر في الأنسجة المرستيمية القمية في ساق النبات وجذوره. المثال على الأكسين الطبيعي هو حمض إندول الخليك (IAA) المسؤول عن **السيادة القمية Apical dominance**، وهي ظاهرة نباتية ترى أنّ التفرع يحدث أسفل هذا الجزء من قمة الساق.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

- تؤدي **استطالة Elongation** الخلية في النباتات إلى استطالة جانب واحد من جذر النبات أو ساقه استجابة لمنبه.
- **حمض الأبسيسيك Abscissic acid (ABA)** مثال على هرمون نباتي يساعد النبات على الاستجابة لتغيرات البيئة. وهو يعمل **كمثبط Inhibitor** لإيقاف إنبات البذرة وتكوين الورقة أو إبطائهما.
- يُسمّى التعليق المؤقت للنمو والتطوير في النباتات **السكون Dormancy**.
- **السايتوكاينين Cytokinin** أحد أنواع الهرمونات النباتية المشتقة من القاعدة النيتروجينية أدنين، التي تحسّن إنتاجية النبات بحفز انقسام الخلايا.
- **الجبريللين Gibberellin** واحد من عدة هرمونات طبيعية وصناعية تؤثر في جوانب مختلفة من نمو النبات وقد أُعطيت أرقامًا تصنيفية.
- **المركب العضوي المتطاير Volatile organic compound** غاز يطلقه النبات لحفز التكاثر، مثل نضج الثمار، أو تغيير لون الأنسجة، أو إطلاق رائحة الزهور.

الدرس 2-4 الانتحاء في النبات

- عندما يستجيب النبات لمنبه غير حيوي في بيئته، مثل الضوء، أو الجاذبية، أو اللمس، فإن ذلك يُسمّى **انتحاء Tropism**.
- تشمل أنواع الانتحاءات **الانتحاء الأرضي Geotropism** (الاستجابة للجاذبية)، و**الانتحاء الضوئي Phototropism** (الاستجابة للضوء)، و**الانتحاء المائي Hydrotropism** (الاستجابة للماء)، و**الانتحاء اللمسي Thigmotropism** (الاستجابة للمس).
- في النباتات **مستقبلات ضوئية Photoreceptors** لكشف الضوء وهي مركبات حساسة للضوء.
- الفترة الضوئية هي طول النهار الذي يكشفه النبات، والاستجابة له تُسمّى **الاستجابة للفترة الضوئية Photoperiodism**.
- يستخدم علماء النبات عدد ساعات النهار اللازمة للإزهار لتصنيف النباتات إلى **نباتات النهار الطويل Long – day plants (14hrs)**، و**نباتات النهار القصير Short – day plants (12hrs)**.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

- يكشف نوعا الفايتوكروم في الأوراق عن التغيرات في شدة الضوء. لذلك، يمكن للنباتات الاستجابة للفايتوكروم الأحمر البعيد **Phytochrome far red (Pfr)** المنشّط وتنمو في اتجاه الضوء أو للفايتوكروم الأحمر (Pr) لتثبّط النمو في الظل. يتحوّل الفايتوكروم باستمرار بين شكله تبعاً لنوع الضوء الذي يتعرض له النبات.
- **الكريبتوكرومات Cryptochromes** هي مستقبلات الضوء الأزرق التي تساعد في حفاظ النبات على ساعة بيولوجية أو على إيقاع الساعة البيولوجية **Circadian rhythm**.
- تستجيب النباتات أيضاً لظروف البيئة القاسية، مثل التجمد، والجفاف، والآفات، بإسقاط أوراقها في عملية تُسمّى **الانفصال Abscission**. أو تغير ضغط الامتلاء في الخلايا، أو إنتاج **أشباه القلويات Alkaloids**، وهي نوع من سمّ مرّ المذاق.

تحضير للاختبار

1. ما التطبيق الصحيح لمنبّه النبات واستجابته؟
 - a. تستجيب الحميضة البرية (*Oxalis sp.*) للمس، فتفتح وريقاتها وتغلقها مرتين يوميًا.
 - b. يكشف غمد عشب الكناري الجاذبية وينحني نحوها.
 - c. يكشف غمد عشب الكناري الضوء ذا الجانب الأحادي، وتستطيل خلاياه في الجانب المظلل لينحني في اتجاهه.
 - d. يستخدم نبات الورد النامي الضغط ليؤسس السيادة القمية.
2. ماذا يحدث إذا تمت تغطية قمة الغمد في عشب الكناري برقاقة معدنية؟
 - a. يبرز الغمد بأمان من التربة.
 - b. لا ينمو الغمد في اتجاه الضوء.
 - c. تستجيب قمة الغمد بالانحناء.
 - d. تنطلق الأكسينات من القمة لتسبب استطالة الجانب المظلل من الساق.
3. ماذا يحدث إذا لُفَّت ساق غمد الكناري برقاقة معدنية؟
 - a. يبرز الغمد بأمان من التربة.
 - b. لا ينمو الغمد في اتجاه الضوء.
 - c. يستجيب جانبا الغمد بالانحناء.
 - d. تنطلق الأكسينات من القمة لتسبب استطالة الجانب المظلل من الساق.
4. أية عبارة (عبارات) أدناه تصف الهرمون بشكل صحيح؟
 - a. مركب عضوي.
 - b. تنتجه خلايا الكائن الحي أو أنسجته.
 - c. يمكنه الانتقال من مكان إلى آخر.
 - d. جميع ما سبق يصف الهرمون بشكل صحيح.
5. لماذا يُستخدم المصطلح «منظم نمو النبات» بدلا من الهرمون النباتي؟
 - a. يشمل المصطلح أيضًا مركبات غير عضوية.
 - b. يصف المصطلح المركبات المشاركة في النمو فقط.
 - c. بعضها تنتجه خلايا الكائن الحي فقط.
 - d. بعضها لا ينتقل من مكان إلى آخر.

6. أي مما يلي يحدث في الخلايا الحيوانية وليس في الخلايا النباتية؟
- تحفز الإشارات الكهروكيميائية استجابات الخلية.
 - تحفز الهرمونات استجابات الخلية.
 - تتقلص الخلايا المتخصصة بسرعة لإنتاج القوى.
 - يمكن أن تحدث الاستجابات من خلال النمو أو التغيرات الخلوية.
7. أيها منظم نمو النبات والاستجابة المتطابقين بشكل صحيح؟
- المركبات العضوية المتطايرة تحفز إطلاق لون الأزهار أو روائحها.
 - يحفز هرمون الأبسيسيك الخلايا على الاستطالة.
 - تحفز الأكسينات انفصال الأوراق.
 - يكون الجبريللين سيادة قمية في قمة الساق.
8. ما العبارة التي تلخص بشكل صحيح تحويل الإشارة بوساطة النباتات؟
- تحفز الجزيئات المولدة للأشارة تغييرات فورية في جين نباتي.
 - ترتبط الجزيئات المولدة للأشارة بجينات النبات لإنتاج استجابة.
 - ترتبط الجزيئات المولدة للأشارة ببروتينات مُرجلة تدخل الخلية.
 - تنبه الجزيئات المولدة للأشارة المستقبلات البروتينية في الغشاء لتحفيز الإنزيمات، أو تغيير الهيكل الخلوي، أو توجيه بناء البروتين.
9. أيُّ هرمون (هرمونات) نباتية تحفز استجابات لدى البذور؟
- الأكسينات.
 - الجبريللينات.
 - حمض الأبسيسيك.
 - السايتوكاينينات.
10. أي انتحاء يوصف بشكل صحيح أدناه؟
- الانتحاءات الضوئية تستجيب لمنبهات كيميائية.
 - تستجيب الانتحاءات الأرضية للمس.
 - تستجيب الانتحاءات المائية لوجود الماء.
 - تستجيب الانتحاءات اللمسية عند كشف الضوء.

11. أية عبارة تصف بشكل صحيح الانتحاء السلبي؟

- a. ينمو النبات أثناء الانتحاء الضوئي في الاتجاه المعاكس للماء.
- b. ينمو النبات أثناء الانتحاء الأرضي في الاتجاه المعاكس للجاذبية.
- c. ينمو النبات أثناء الانتحاء المائي بعيداً عن الضوء.
- d. تغلق وريقات النبات أثناء الانتحاء للمس.

12. أي مما يلي هو المسؤول الأكبر عن الاستجابة للفترة الضوئية؟

- a. الأكسينات.
- b. الفايٹوکرومات.
- c. الكلوروفيل.
- d. السايٹوکاينينات.

13. أي مما يلي سيجعل نبات النهار القصير يُزهر؟

- a. سلسلة من الليالي الطويلة.
- b. سلسلة من الليالي القصيرة.
- c. سلسلة من الليالي الطويلة، تخرقها ومضات ضوء أحمر.
- d. سلسلة من الليالي الطويلة، تخرقها ومضات ضوء أبيض.

14. في أية ظروف تزهر نباتات النهار القصير؟

- a. عندما يكون الليل أقصر من النهار.
- b. عندما يكون في اليوم أقل من 10 hrs ضوء.
- c. عندما يكون طول النهار 12 hrs تقريباً.
- d. عندما يكون النهار أطول من الليل.

أسئلة إجابات قصيرة

الدرس 1-4 استجابة النباتات للمنبهات

15. لماذا يظن معظم الناس أن النباتات غير قادرة على التحرك ذاتياً؟ 

16. استعن بالإنترنت لتوضح كيف أن استجابة كل نبات أدناه تساعد النبات على البقاء. 

- a. تطلق الحموضة البرية *Oxalis triangularis* حمض الأوكساليك.
- b. الفاصوليا *Phaseolus vulgaris* لونها أحمر فاتح.
- c. يحدد الصقلاب *Asclepias sp.* موعد إطلاق بذوره التي ينقلها الهواء في الخريف.

17. أرسم شكلاً لبادرة عشب الكناري، واذكر أسماء أجزائها، ثم لخص بإيجاز كيف أثبتت تجارب تشارلز وفرانسيس داروين أن الانحناء في اتجاه الضوء «كان بسبب تأثير نتج من قمة غمد العشب».

18. اختر منظم نمو نبات وسوّغ إضافته إلى الأسمدة المضافة إلى التربة غير الخصبة.

19. أرسم شكلاً بسيطاً لنسيج نباتي مع مفتاح توضيحي يبين:

a. خليتين منتجتين للهرمون.

b. خلية واحدة مستهدفة بالهرمون.

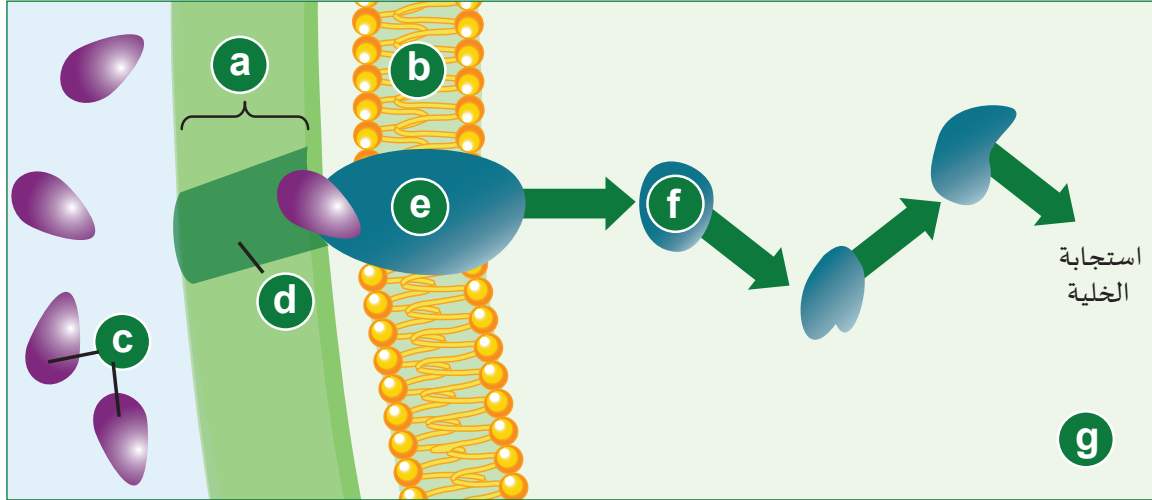
c. خليتين غير مستهدفتين.

20. استخدم المخطط أدناه لتسمية التراكيب المرقمة، وأجب عن الأسئلة المتعلقة بتحويل الإشارة.

a. اشرح السببين المحتملين لعدم ارتباط (a) مع (e).

b. ماذا يحدث بين (f) واستجابة الخلية؟ وماذا يسمى؟

c. أذكر ثلاث استجابات محتملة للخلية.



21. أذكر ثلاثة أنواع مختلفة من منظمات نمو النبات التي نوقشت في الدرس، واستجابة نبات واحدة لكل منها.

22. انسخ الجدول أدناه وأكتب «نعم» أو «لا» في كل مربع لتحديد أن منظم نمو النبات يستهدف البذرة، أو الجذر، أو الساق، أو البرعم، أو الزهرة، أو الثمرة. استعن بالإنترنت إذا لزم الأمر.

منظم نمو النبات	بذرة؟	جذر؟	ساق؟	برعم؟	زهرة؟	ثمرة؟
حمض إندول الخليك (IAA)						
حمض الأبسيسيك (ABA)						
GA3 (GA)						
إيثيلين (C ₂ H ₄)						
زياتين (CK)						

الدرس 2-4 الانتحاء في النبات

23. ارسم وسم شكلاً بسيطاً لنسيج قمة الجذر. بين كيف يمكن أن تشارك التراكيب في هذه الخلايا في الانتحاء الأرضي.

24. طابق كل انتحاء مع السلوك أو المثال. يحتمل وجود عدة إجابات.

(1) انتحاء ضوئي. (2) انتحاء أرضي. (3) انتحاء مائي. (4) انتحاء لمسي.

a. تنمو ساق بذرة الذرة إلى الأعلى وتنمو الجذور إلى الأسفل في التربة نحو الرطوبة.

b. تلتفت محاليق نبات البازلاء حول قضبان عمودية تضمن لها نمواً سليماً.

c. يغير تظليل أوراق النبات من اتجاه نموها.

d. تغلق وريقات الحميضة البرية في الليل.

e. يؤدي لمس أوراق نبات الست المستحية أو الميموزا إلى انقباضها فوراً.

25. عرّف الانتحاء الضوئي، ثم اشرح باختصار كيف ترتبط به كل من استجابات النبات أدناه مباشرة.

a. انحناء غمد عشب الكناري.

b. بروز فلقة البذرة من التربة.

c. تباطؤ النمو عندما تكون الأوراق مظلمة.

26. قام تشارلز داروين بدعم من ابنه فرانسيس بقطع قمم الجذور الأولية للفلول (الجذيرات)،

ووصفا استجابات انحناء الجذر بعد تجدد قمم الجذور. ما النسيج الموجود في هذه

المنطقة؟ وأي هرمون يمكن أن يكون مسؤولاً عن إنحناء الجذور؟

27. وضح كلاً من أنماط سلوك الحميضة البرية أدناه. استخدم كلا الدرسين والإنترنت للمساعدة.

a. تتفتح الوريقات في الصباح وتغلق في الليل.

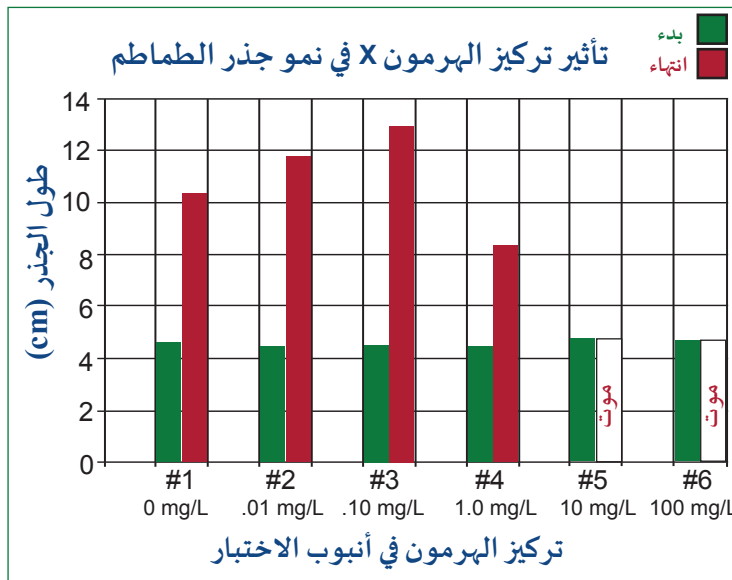
b. يتغير اتجاه كل من الساق والورقة مع تغير موضع الشمس في السماء.

c. يتطلب الإزهار 13 ساعة على الأقل.

d. تمر في حالة سكون عندما تصل درجة الحرارة إلى 26.7°C .

رابط مع الرياضيات

تفحص الرسم البياني لتأثيرات تركيز الهرمون «X» في نمو جذور الطماطم، وأجب عن الأسئلة.



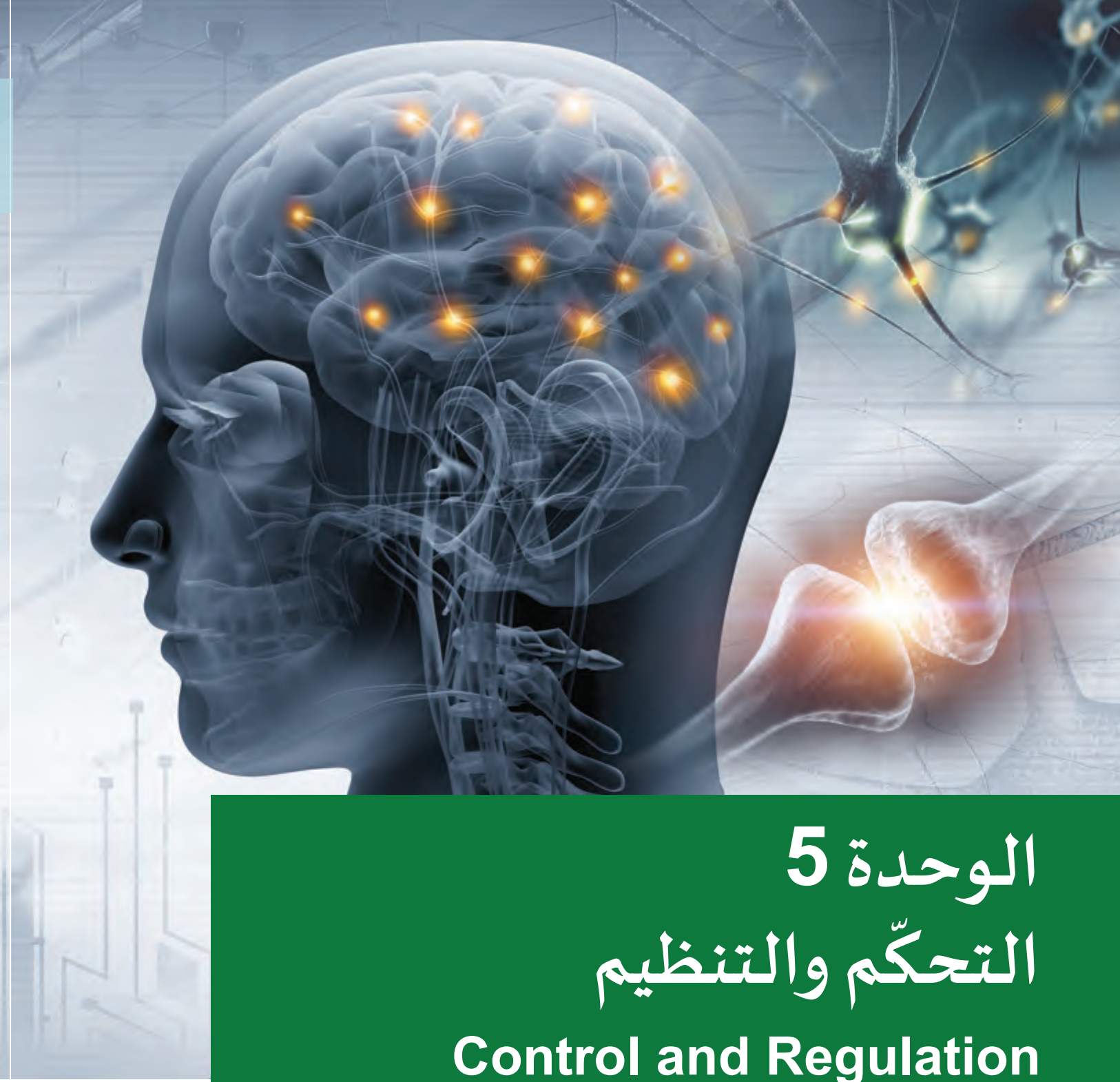
28. كيف يؤثر هذا الهرمون في نمو الجذر في الطماطم؟

29. أي تركيز (تراكينز) الهرمون كان فاعلاً؟

30. أي تركيز (تراكينز) الهرمون كان الأقل فاعلية؟

31. يمكن للنباتات تحمل المركبات المضافة، لكن ضمن حدود. أي تركيز لهذا الهرمون يتجاوز

حدود تحملها؟



الوحدة 5

التحكم والتنظيم

Control and Regulation

في هذه الوحدة

B1208

B1209

B1210

B1211

B1212

B1213

الدرس 5-1: تركيب الجهاز العصبي ووظيفته

الدرس 5-2: السيات العصبيّة وانتقالها

الدرس 5-3: الدماغ والتحكم الهرموني

مقدّمة الوحدة

يوجه الجهاز العصبي ردود أفعال أجسامنا إلى العالم، ويتحكم أيضًا في معظم وظائفنا الداخلية. تشمل هذه الوظائف النشاط الفسيولوجي، مثل حركة العضلات وضبط الجسم. وتشمل أيضًا وظائف أكثر تعقيدًا كتعلّم العلوم، مثل علم التشريح وعلم وظائف الأعضاء. كيف يستطيع الجهاز العصبي أن يدير كل هذا؟ الإجابة قد تبدو بسيطة: عن طريق إرسال إشارات كهربائية وكيميائية سريعة كالبرق بين الخلايا. ستقودك هذه الوحدة إلى سبر غور هذه الإجابة بالعمق الكاف.

الدماغ البشري ليس عضوًا متماثل التركيب. تحتوي أدمغتنا تراكيب متباينة تشريحيا ولكنها منسجمة ومتكاملة وظيفيا، تنسق فيما بينها لتنفيذ وظائف في غاية الأهمية كالغدة النخامية التي تقع في الدماغ بالرغم من كونها ليست جزءا من الجهاز العصبي.

ولأن الدماغ والجهاز العصبي يخدمان الكثير من الوظائف الحيوية، فإن إحداث ضرر مزمن فيهما أو إساءة استخدامهما عن طريق العادات السيئة يؤثران في جميع جوانب حياتنا وفي صحتنا. يؤثر الكحول وكثير من الأدوية المشروعة وغير المشروعة سلبًا في الجهازين العصبي والهرموني ووظائفهما. وحيث إنها تؤثر في المناطق الرئيسة في الدماغ، لذلك، فهي قادرة على تغيير العادات الصحية والسلوك الشخصي.

الأنشطة والتّجارب

a1-5 تشرح الخلية العصبية

b1-5 ملاحظة الفعل المنعكس والاستجابة

3-5 تأثير منبه كيميائي

الدرس 1-5

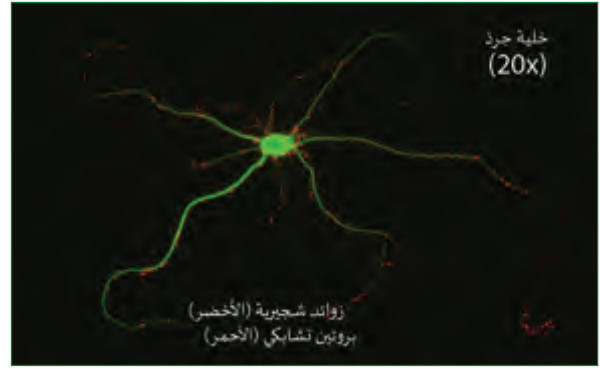
تركيب الجهاز العصبي ووظيفته Nervous System Structure and Function

يتكوّن الجهاز العصبي من أنسجة وأعضاء رخوة بعضها محميّ بالهيكل العظمي وبعضها الآخر ينتشر في الجسم. تدير خلايا عصبية متخصصة متفرعة من الجهاز العصبي جوانب مختلفة من التواصل في الجسم. يقوم الجهاز العصبي باستقبال المؤثرات الخارجية عبر أعضاء الإحساس، وينقل المعلومات بين الجسم والدماغ عبر الحبل الشوكي بشكل أساسي.

المفردات



Spinal cord	الحبل الشوكي
Central nervous system	الجهاز العصبي المركزي
Pons	القنطرة
Medulla oblongata	النخاع المستطيل
Cerebellum	المخيخ
Forebrain	الدماغ الأمامي
Hindbrain	الدماغ الخلفي
Peripheral nervous system	الجهاز العصبي الطرفي
Somatic nervous system	الجهاز العصبي الجسدي
Autonomic nervous system	الجهاز العصبي الذاتي
Neuron	الخلية العصبية (العصبون)
Axon	المحور
Tract	المسار
Dendrite	الزائدة الشجرية
Schwann cell	خلية شوان
Myelin sheath	الغمد الميلياني
Nodes of Ranvier	عقد رانفييه
Sensory neuron	الخلايا العصبية الحسية
Motor neuron	الخلايا العصبية الحركية
Interneuron	الخلايا العصبية البينية
Nerves	الأعصاب
Ganglia	العُقد العصبية
Receptor	المستقبل
Effector	المنفّذ
Reflex arc	قوس الفعل المنعكس



شكل 1-5 خلية عصبية من الجهاز العصبي المركزي (CNS) لجرد.

مخرجات التعلّم

B1208.1 يصف تركيب الجهاز العصبي المركزي والجهاز العصبي الطرفي.

B1208.2 يصف تركيب الخلايا العصبية الحركية والحسية والبينية

B1208.3 يذكر أوجه التشابه والاختلاف بين وظائف الخلايا العصبية الحركية والحسية والبينية في القوس الانعكاسي البسيط.

رسم خرائط الدماغ باستخدام PET



ابحث في الطرائق التي ساعدت بها PET العلماء على فهم الدماغ.

اشرح كيف تستشعر PET نشاط المخ.



كيف نعرف ما يجري داخل الدماغ؟

سمح التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) للأطباء والباحثين برؤية داخل الدماغ الحي. يكشف ماسح PET إشارات مميزة تنطلق من مركبات تحتوي عناصر مشعة تنتشر في الدماغ (الشكل 5-2).



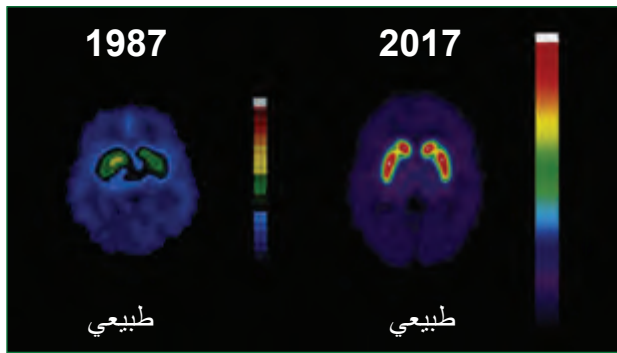
شكل 5-2 ماسح PET.

الاستخدام الشائع لـ PET هو المقارنة بين وظائف المخ الطبيعية وغير الطبيعية. هذا يساعد في تقييم فعالية العلاجات الكيميائية. يمكن للأخصائيين وسم أية مادة كيميائية بمركب إشعاعي، ثم يتبعون أثر هذا المركب داخل الجسم مع مرور الوقت.

تشمل الخطوات الطبية:

- حقن نظير مشع في الجسم يصدر إشعاعًا.
- حلقة من الكواشف التي تحيط بمنطقة الجسم، وتكون في أغلب الأحيان على الدماغ أو الصدر.
- استخدام التكنولوجيا لتحويل الإشعاع المتبع إلى صورة.

التصوير المقطعي الذي يُرمز إليه اختصارًا بـ PET هو لقطة من مستوى ثنائي الأبعاد. تظهر الصور التركيز النسبي للنظائر المشعة التي يتم تتبعها. يكتسب الكمبيوتر مجموعة من الصور في فترة تتراوح بين 5 و 6 دقائق لإعداد فيلم ثلاثي الأبعاد لنشاط الدماغ.

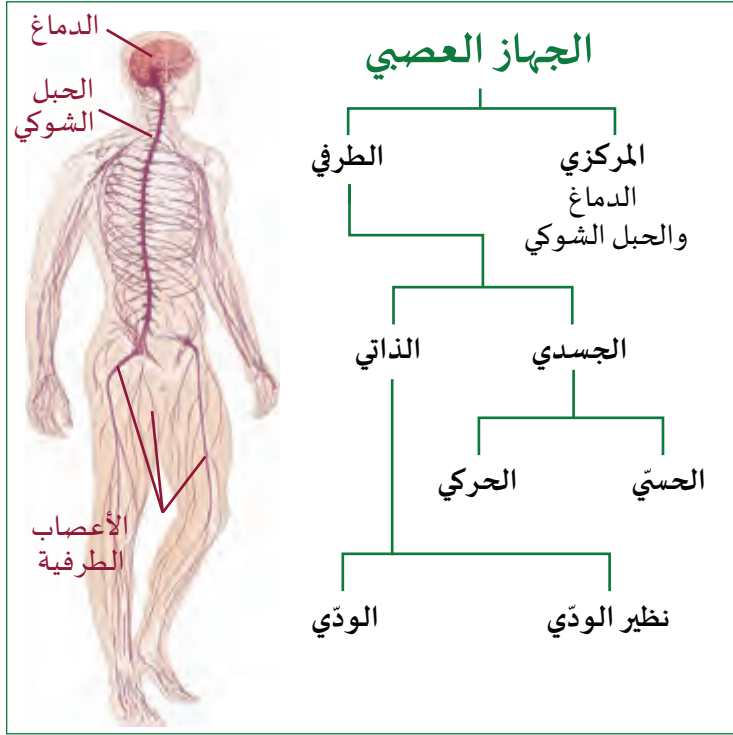


شكل 5-3 PET من 1987 بالمقارنة مع واحدة تم التقاطها في العام 2017.

تحسّنت تقنية PET بشكل كبير مع مرور الوقت (الشكل 5-3). يمكن الكشف في وقتنا الحاضر عن تغييرات أصغر كثيرًا. إنّ دقة التفاصيل تسمح لنا بأن نرى مناطق الدماغ المسؤولة عن الأنشطة الفكرية المختلفة. وعلى سبيل المثال، تمّ التوصل إلى أن معالجة اللغة تحدث في جزء مختلف من الدماغ عن جزء التصوير البصري أو التذكّر.

نظرة عامة إلى الجهاز العصبي

الجهاز العصبي هو الشبكة المركزية لمعظم عمليات الإحساس والتحكم في الجسم. يستخدم الجهاز العصبي إشارات كهروكيميائية لإيصال الرسائل مثلاً من أجل ثني العضلات أو استشعار المؤثرات الخارجية. يعمل الجهاز العصبي بالتنسيق مع جهاز الغدد الصماء الذي يستخدم الرسائل الكيميائية بدلاً من السيالات الكهربائية.



شكل 4-5 تنظيم الجهاز العصبي.

يشمل الجهاز العصبي قسمين رئيسيين كما هو موضح في الشكل 4-5.

• الجهاز العصبي المركزي (CNS)

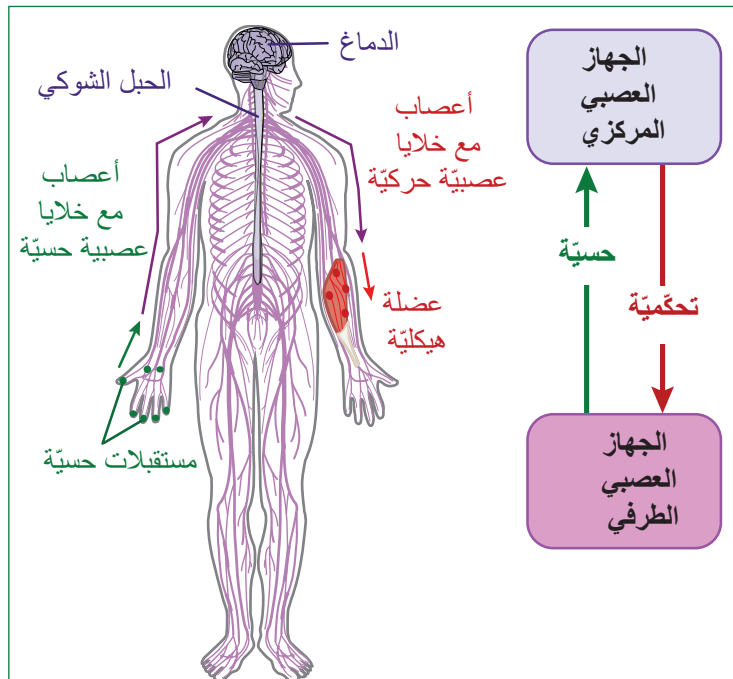
يتضمن Central nervous system

الدماغ والحبل الشوكي. تحدث كل عمليات الإدراك الواعية، ويتم اتخاذ القرارات في الجهاز العصبي المركزي.

• الجهاز العصبي الطرفي (PNS)

يتضمن Peripheral nervous system

شبكة الأعصاب الحسية والحركية التي تنقل الإشارات عبر الجسم. تتم جميع العمليات الحسية، مثل اللمس أو الشم، وجميع عمليات التحكم، مثل حركة العضلات، بواسطة الجهاز العصبي الطرفي.



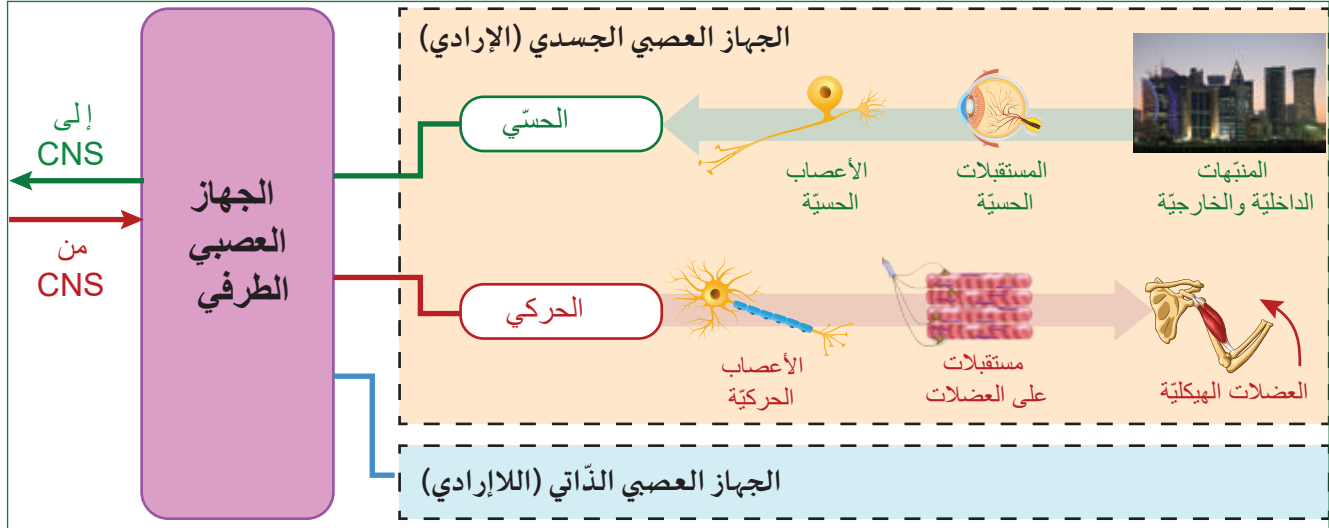
شكل 5-5 تدفق المعلومات من خلال الجهاز العصبي.

تعكس تقسيمات الجهاز العصبي تدفق المعلومات ومستوى التحكم. يوضح الشكل 5-5 العلاقة بين القسمين المركزي والطرفي (CNS و PNS).

- تنتقل الإشارات الحسية عبر الجهاز العصبي الطرفي إلى الدماغ.
- تنتقل الإشارات التحكمية في الاتجاه المعاكس، من الدماغ إلى الجسم.

القسم الجسدي من الجهاز العصبي الطرفي

يوضح الشكل 5-6 أنَّ الجهاز العصبي الطرفي يشمل قسمين رئيسيين هما الجهاز الجسدي والجهاز الذاتي. يُعتبر الجهاز العصبي الجسدي القسم "الواعي" للجهاز العصبي الطرفي. تنتقل المعلومات الحسية، مثل صورة أفق الدوحة، إلى الدماغ من خلال القسم الحسي للجهاز العصبي الجسدي. أمَّا ما تفعله، مثل ثني ذراعك، فيتم من خلال إشارات تنتقل عبر القسم الحركي للجهاز العصبي الجسدي. ينقسم الجهاز العصبي الجسدي إلى قسمين رئيسيين:



شكل 5-6 القسم الجسدي من الجهاز العصبي الطرفي.

القسم الحسي

يشمل القسم الحسي المستقبلات الحسية المنتشرة على الجلد وفي العينين والأذنين والعضلات والأعضاء للكشف عن المنبهات. ترسل هذه المستقبلات المعلومات إلى الجهاز العصبي المركزي من خلال الأعصاب الحسية. بعض الأعصاب الحسية، مثل الأعصاب البصرية والسمعية، تتصل بالدماغ مباشرة. تتصل الأعصاب الحسية الأخرى، مثل تلك المسؤولة عن الإحساس باللمس والحرارة والألم في أصابعك، بالدماغ عبر الحبل الشوكي.

القسم الحركي

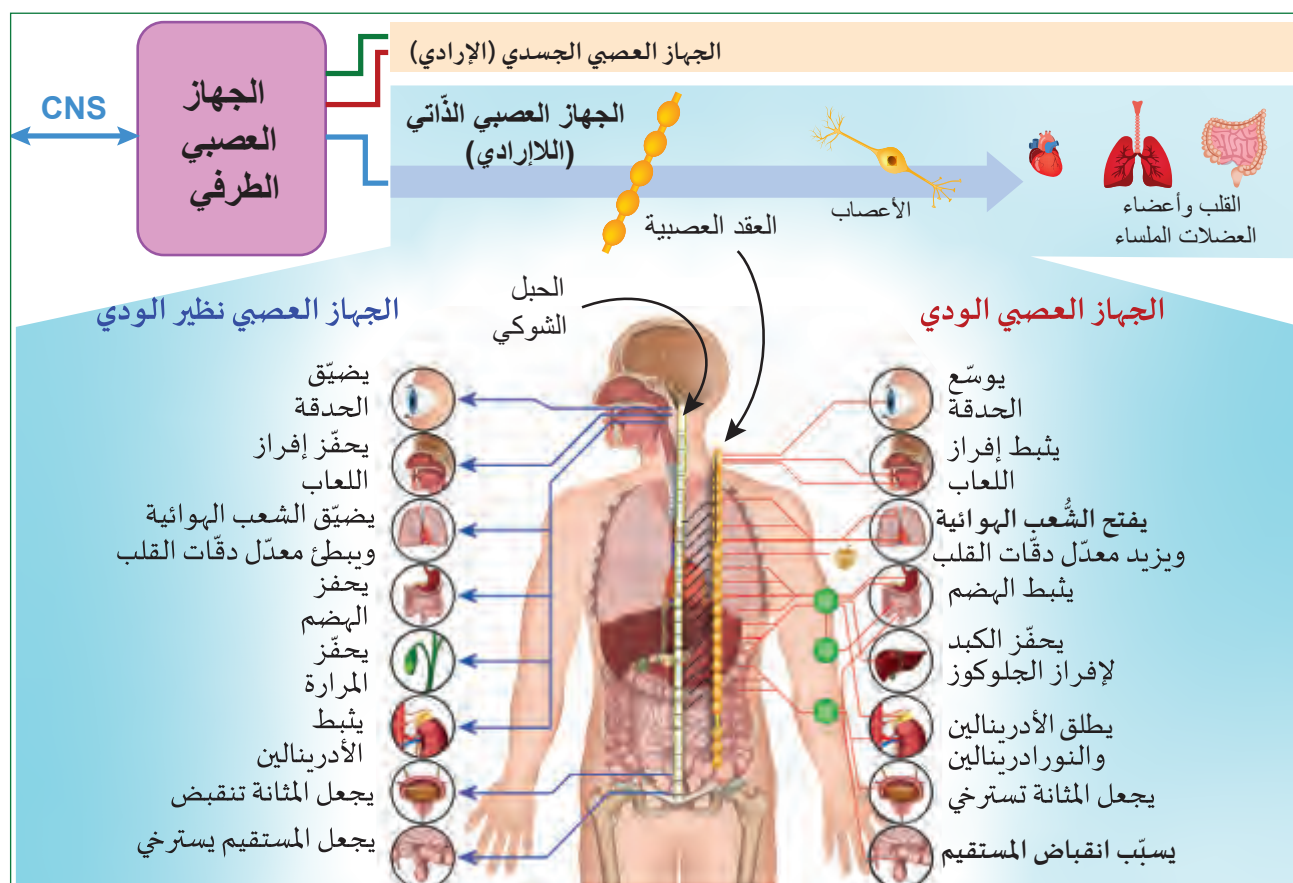
يشمل القسم الحركي الأعصاب الحركية التي تحمل إشارات التحكم من الجهاز العصبي المركزي إلى العضلات الهيكلية أو الغدد. يشمل التحكم الحركي مجموعتين من الأعصاب على الأقل. تنشأ المجموعة الأولى من الأعصاب في الدماغ، وتمتد إلى الحبل الشوكي. تنشأ المجموعة الثانية من الأعصاب في الحبل الشوكي، وتتصل بمستقبلات على عضلات فردية.

في بعض الحالات الخاصة، يمكن للأعصاب الحسية تحفيز الأعصاب الحركية مباشرة لتحريك عضلات هيكلية من دون إيعاز من الدماغ. سوف نناقش هذه الحالات الخاصة، والتي تُسمى "أقواس الأفعال المنعكسة" في هذه الوحدة.

القسم الذاتي من الجهاز العصبي الطرفي

يتحكم الجهاز العصبي الذاتي **autonomic nervous system** في أعضاء العضلات الملساء، مثل الرئتين، والقلب والجهاز الهضمي وفي الكثير من الغدد التي تفرز الهرمونات (الشكل 5-7). قد تتأثر هذه الوظائف بأفكار الفرد وحالته النفسية، ولكنها تحدث بشكل عام من دون سيطرة واعية من الدماغ.

يتشكل الجهاز العصبي الذاتي من نصفين هما: الجهاز العصبي الودي **sympathetic nervous system** والجهاز العصبي نظير الودي **parasympathetic nervous system** (الشكل 5-7).



شكل 5-7 قسما الجهاز العصبي الذاتي.

الجهاز العصبي الذاتي (ANS) هو شبكة من الأعصاب والعقد العصبية. **العقد العصبية Ganglia** عبارة عن حزم من أجسام الخلايا العصبية المرتبطة، وهي توجد في أماكن متعددة. يعمل ANS من خلال سلسلة من العقد على طول الحبل الشوكي. يستطيع الجهاز العصبي الذاتي التأثير على أجزاء مختلفة من الجسم كما هو موضح في الشكل 5-7 وذلك من خلال تأثيره على العضلات وإفرازات الهرمونات.

عند التعرّض للخطر أو في المواقف الحرجة، يتم تنشيط الجهاز العصبي الودي بأكمله، ما يُنتج تأثيرًا فوريًا واسع الانتشار يسمى استجابة "الكرّ والفرّ". يرتفع مباشرة معدل التنفس والنبض ومستوى الأدرينالين. كما يتم إرسال كميات كبيرة من الأكسجين والجلوكوز إلى العضلات. بمجرد انتهاء التهديد المُدرّك، يسيطر الجزء نظير الودّي من الجهاز العصبي الذاتي لتهئية الجسم والتعافي من الإجهاد السريع.

الخلايا العصبية

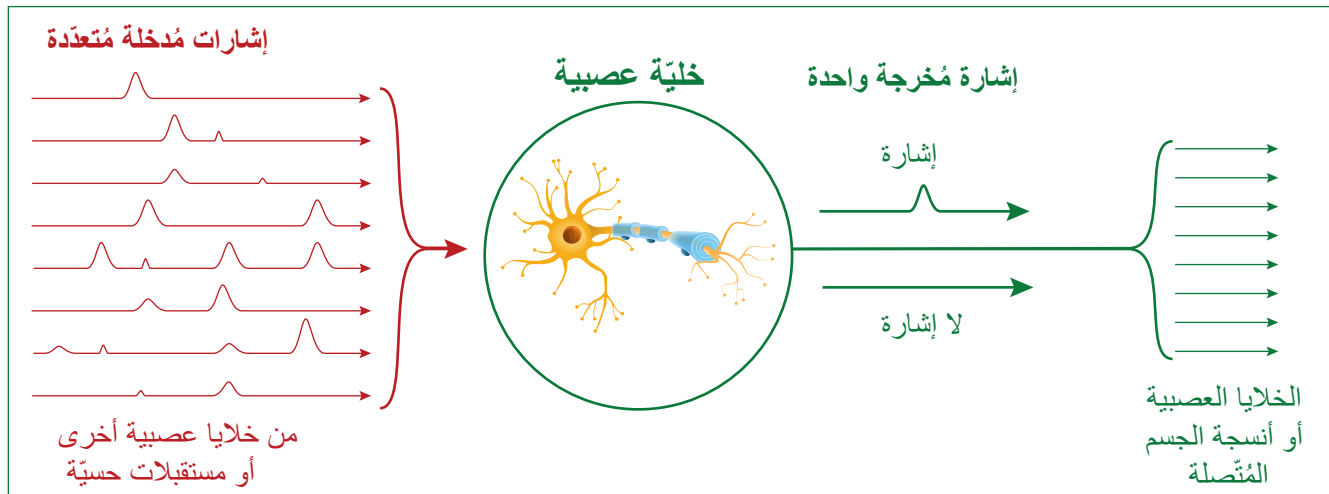
تُعتبر **الخلية العصبية (العصبون) Neuron** الوحدة الأساسية للجهاز العصبي. الخلايا العصبية هي على درجة عالية من التخصص لمعالجة الإشارات العصبية ونقلها. يحتوي دماغ الإنسان البالغ على 86 مليار خلية عصبية. تمتد الخلايا العصبية الأخرى في جميع أنحاء الجسم في الجهاز العصبي الطرفي.

الخلية العصبية نوع من الخلايا المتخصصة وهي الوحدة الأساسية للجهاز العصبي.



إنّ الخلايا العصبية، ومثلها الخلايا الأخرى في الجسم، على درجة عالية من التخصص لتؤدي وظائف اتخاذ القرار والتواصل. تقوم الخلية العصبية الواحدة بإجراء فعلين فقط كما هو موضح في الشكل 5-8.

1. استقبال الإشارات من أكثر من 1000 مصدر، مثل الخلايا العصبية الأخرى أو المستقبلات الحسية.
2. نقل إشارة مُخرجة واحدة إلى أماكن متعددة، بما في ذلك الخلايا العصبية الأخرى أو أنسجة الجسم الأخرى المتصلة بالخلية العصبية.



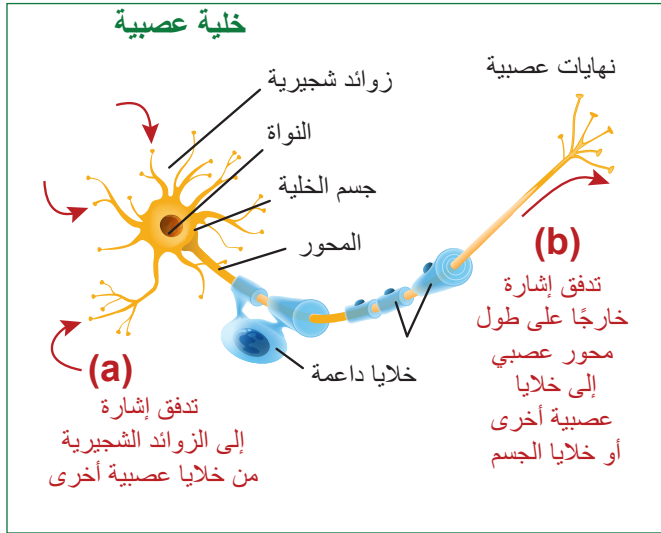
شكل 5-8 رسم تخطيطي يوضح وظيفة الخلية العصبية الأساسية.

يمكن لشبكات الخلايا العصبية أداء وظائف معقدة للغاية، مثل تأليف كتاب أو تصميم محرك سيارة. ومع ذلك، يمكن لكل خلية عصبية مفردة فقط أن ترسل أو لا ترسل إشارة بناءً على مدخلاتها في أية لحظة محددة.

تفكّر في 86 مليار خلية عصبية المتصلة كل منها بأكثر من ألف خلية عصبية أخرى. إن تعقيد الروابط المحتملة هو ما يمنح الدماغ البشري قدرته على إتمام عمليات متعددة ومتنوعة في وقت واحد. بالرغم من أنّ العلم الحالي ما زال لا يُعطي تفسيراً مفصلاً لما يحدث في الدماغ، إلا أننا نعلم أن الوظائف عالية المستوى، مثل الذاكرة، يتم إنجازها بشكل أساسي من خلال الشبكات العصبية. يتذكّر الدماغ صورة عن طريق تكوين ملايين الروابط بين الخلايا العصبية في الشبكة المعقدة داخل رأسك.

تركيب الخلية العصبية

هناك تباين واسع في أشكال الخلايا العصبية وأحجامها بسبب تنوع وظائفها وتنوع مواقعها في الجسم. يتراوح قطر جسم الخلية العصبية الواحدة من 4 إلى 400 ميكرومتر. يوضح الشكل 5-9 التركيب العام للخلية العصبية النموذجية والذي يتضمن أربعة أجزاء رئيسية.



شكل 5-9 التدفق الأساسي للإشارات في الخلية العصبية.

1. جسم الخلية.

2. الزوائد الشجيرية.

3. المحور.

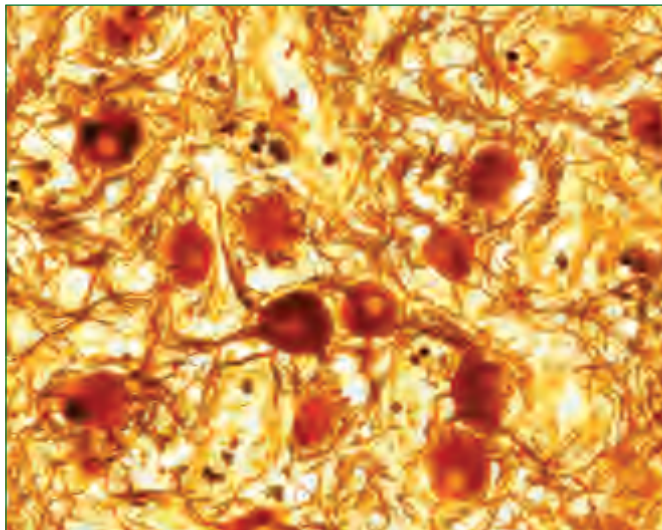
4. النهايات العصبية.

يوضح الشكل 5-9 التدفق الأساسي للإشارات في الخلية العصبية.

• تتدفق الإشارات على طول الزوائد الشجيرية. طريقة عمل الزوائد الشجيرية تشبه طريقة عمل الهوائيات لاستقبال الإشارات. قد يكون للخلية العصبية الواحدة ما يصل إلى 10000 صلة بالزوائد الشجيرية.

• تتدفق الإشارات على طول المحور العصبي وتنتقل إلى الخلايا العصبية الأخرى أو إلى أجزاء من الجسم من خلال النهايات العصبية الموجودة في نهاية المحور.

يمكن أن يكون المحور العصبي والزوائد الشجيرية أطول بكثير من حجم جسم الخلية. تكون محاور الخلايا العصبية الموجودة في الجهاز العصبي الطري رقيقة للغاية، ولكن طولها قد يزيد عن المتر. هذا يجعل الخلايا العصبية أكبر الخلايا في جسمك من حيث الطول.



شكل 5-10 الخلايا العصبية تشكل كتلة كثيفة في العقد.

جسم الخلية العصبية

يحتوي جسم الخلية على النواة والعضيات المشابهة للخلايا الأخرى مثل الريبوسومات والشبكة الإندوبلازمية وجهاز جولجي. الخلايا العصبية هي خلايا نشطة للغاية وتشمل الكثير من الميتوكوندريا. إن غشاء الخلية العصبية متخصص بقدرته على استقبال الإشارات الكهروكيميائية ونقلها.

تنقل المحاور العصبية الإشارات الخارجة

المحور العصبي Axon هو امتداد طويل يبدأ من جسم الخلية وينتهي بالأزوار التشابكية (النهايات العصبية). يُمكن أن يُعدّ المحور العصبي سلكًا يتصل بأجسام الخلايا العصبية وتراكيب الجسم الأخرى

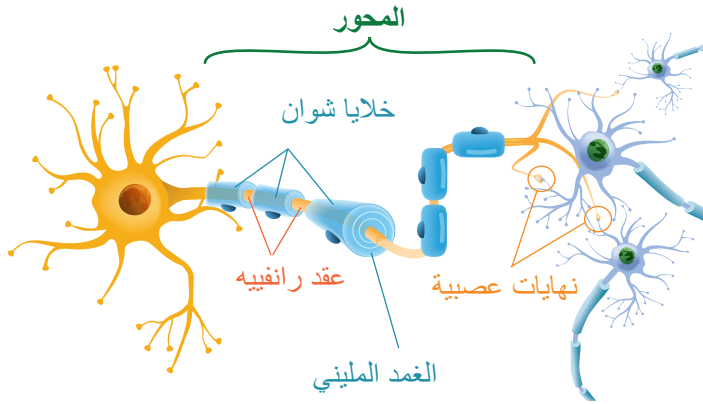
التي تتحكم فيها الخلايا العصبية. قد يبلغ طول المحاور في الخلايا العصبية الحركية مترًا.

والمحاور العصبية رقيقة جدًا ويبلغ قطرها أقل من 10 ميكرومتر. تكون المحاور الطويلة

محاطة ومحمية بخلايا داعمة تُسمى "خلايا شوان" **Schwann cells**. تنتج هذه الخلايا

مادة عازلة دهنية تُسمى "الميلين"، والتي بدورها تشكل طبقة حول المحور العصبي

تُسمى "الغمد الميليني" **Myelin sheath**.



شكل 5-11 تركيب المحور.

لا يكون "الغمد الميليني" متواصلًا، بل إنّ فيه مناطق معرّة تفصل بانتظام بين "خلايا شوان". تُسمى هذه المناطق المعرّة في الغمد الميليني "عقد رانفيليه" **Nodes of Ranvier**.

النهايات العصبية

ينتهي كل محور عصبي بنهايات متعدّدة تُسمى "النهايات العصبية" التي تنقل الإشارات إلى خلايا أخرى، بما في ذلك الخلايا العصبية الأخرى. يُمكن أن تُعدّ النهايات العصبية موصلات بين الخلايا العصبية والخلايا الأخرى. تصل الإشارة المُنتقلة عبر المحور العصبي إلى جميع النهايات العصبية.

الزوائد الشجرية

تستقبل **الزوائد الشجرية Dendrites** الإشارات العصبية من محاور الخلايا العصبية الأخرى. تمتدّ الزوائد الشجرية من جسم الخلايا العصبية كامتداد أغصان الشجرة، ذلك أنّ الزوائد الشجرية لها تراكيب متشعبة. يستطيع طرف كل تشعب من الزوائد الشجرية إدخال إشارة إلى الخلية العصبية. يختلف عدد الزوائد الشجرية باختلاف وظيفة الخلية العصبية. وعلى سبيل المثال، فقد تحتوي الخلايا العصبية في المخ (خلايا بركنجي Purkinje cells) على مئات أو آلاف من الزوائد الشجرية (الشكل 5-12).

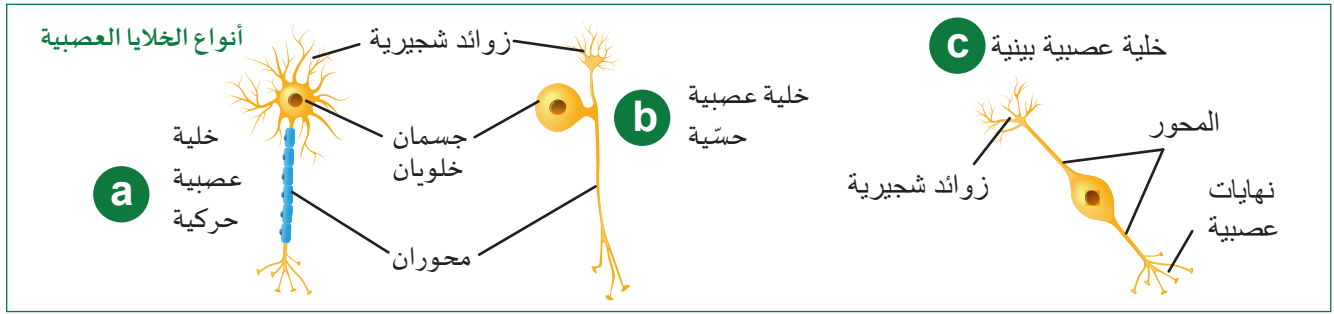


شكل 5-12 تحتوي الخلايا العصبية في المخ على الكثير من الزوائد الشجرية.

أنواع الخلايا العصبية

الخلايا العصبية لها خصائص غير عادية. إنها خلايا معمرة، يمكن لبعضها البقاء على قيد الحياة إلى أكثر من 100 عام. كل الخلايا العصبية لها العضيات نفسها، مثل الخلايا الأخرى، ولكنها تفتقر إلى المريكزات، لذلك لا تستطيع الدخول بعملية الانقسام المتساوي، وهذا يقلل من احتمالية تطور الخلايا السرطانية إن وجدت. ولأن عملية الأيض الخلوي مرتفعة للغاية، فهي تتطلب إمدادات ثابتة من الجلوكوز، وربما لا تعيش إلى أكثر من بضع دقائق بدون أكسجين (O_2).

يمكن تصنيف الخلايا العصبية وفقًا لشكلها أو وظيفتها. في الخلايا العصبية المصنّفة وفقًا للشكل، يختلف موقع جسم الخلية أو الزوائد الشجرية بالنسبة إلى المحور (الشكل 5-13). التنوع في أشكال الخلايا العصبية يجعل الجهاز العصبي أكثر كفاءة.

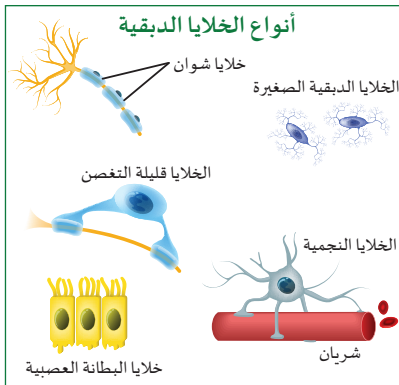


شكل 5-13 (a) خلية عصبية حركية، (b) خلية عصبية حسية، و (c) خلية عصبية بينية.

يمكن تحديد الخلايا العصبية المصنّفة وفقًا للوظيفة من خلال موقعها واتجاه سريان الرسالة العصبية فيها. **a. تحمل الخلايا العصبية الحركية Motor neurons** الإشارات من الجهاز العصبي المركزي إلى أعضاء التنفيذ كالعضلات والغدد. الخلايا العصبية الحركية لها محور عصبي واحد، وهو معزول جيدًا بالميلين (الشكل 5-13a).

b. تبدأ الخلايا العصبية الحسية Sensory neurons عند المستقبلات الحسية وتنقل الإشارات إلى الحبل الشوكي والدماغ، ولكن لديها القليل من الميلين وربما لا تحتوي عليه (الشكل 5-13b).

c. الخلايا العصبية البينية Interneurons تقع داخل الجهاز العصبي المركزي ولديها الكثير من الزوائد الشجرية، ما يمنحها المقدرة على التواصل وتكوين شبكات مع الكثير من الخلايا العصبية الأخرى (الشكل 5-13c).



شكل 5-14 الخلايا الدبقية تدعم الخلايا العصبية، لكنها ليست قابلة للاستثارة.

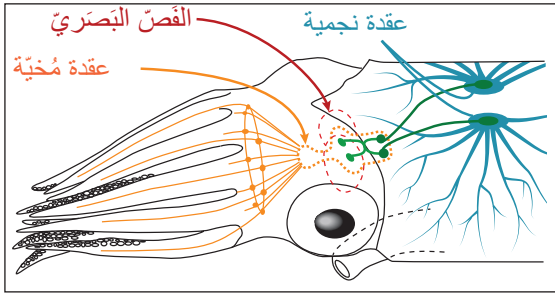
يحتوي الجهاز العصبي على خلايا غير قابلة للاستثارة تُسمى **الخلايا الدبقية Glial cells** (الشكل 5-14). تقدّم الخلايا الدبقية الدعم والحماية للخلايا العصبية. في الجهاز العصبي المركزي لدى الإنسان، تم تخصيص الخلايا الدبقية لعزل الشحنات وتثبيت الخلايا العصبية إلى الأوعية الدموية، وابتلاع الكائنات الحية الدقيقة الغازية، أو تكوين سائل يمتص الصدمات للحماية. الخلايا الدبقية الأكثر شيوعًا في الجهاز العصبي الطرفي هي خلايا شوان التي تتشكل حول المحاور. وعلى عكس الخلايا العصبية، فإن الخلايا الدبقية قادرة على الانقسام. لذا، فإن الأورام الدبقية قد تنتشر في الجهاز العصبي المركزي.



تشرح الخلية العصبية

a1-5

سؤال الاستقصاء	كيف تبدو الخلية العصبية؟
المواد المطلوبة	حبار طازج أو محفوظ، صواني ستايروفوم أو شمعية، مقصّ التشريح، الدبابيس، الملقط، مجاهر تشريحية، مجاهر ضوئية، شرائح جاهزة.



شكل 15-5 الجهاز العصبي لدى الحبار

الخطوات - الجزء 1

1. سيقدم معلمك، لك ولزميلك، العينة وأدوات التشريح. اقرأ كل التعليمات وتأمل جميع الرسوم قبل إجراء التشريح لتحاكي الأخطاء. يمكن أن يكون تحديد الخلايا العصبية للحبار والتعرف إليها أمرًا صعبًا.

2. اتبع الإرشادات الموجودة في ورقة العمل.

- حدّد الأعضاء الحسية في التركيب الخارجي للحبار واذكر أسماءها.
- قم بتشريح الحبار، ثم حدّد الأعضاء الداخلية المحددة واذكر أسماءها، ولا تنسَ كيس الحبر والعينين.
- قم بإزالة الأجهزة المحددة بعناية لفحصها تحت المجهر التشريحي.
- باستخدام المجهر التشريحي، حدّد موقع العقدة النجمية على المحور العملاق وافحصها مع الأعصاب المتصلة بالوشاح.
- أكمل جميع الخطوات ثم نظّف منطقتك واغسل يديك.

الخطوات- الجزء 2

- استخدم المجهر الضوئي لفحص الشرائح الجاهزة للخلايا العصبية تحت قوة التكبير المنخفضة والعالية.
- اذكر أسماء الأجزاء المحددة وأجب عن الأسئلة التي تلي ذلك.

أسئلة التلخيص

- ما هي الأعضاء الحسية الفريدة التي تجعل الحبار متكيفًا جيدًا مع بيئته وقادرًا على البقاء على قيد الحياة؟
- اختر عضوًا من أعضاء الحسّ عند الحبار وقارنه بأحد أعضاء الحسّ عند الإنسان.

تعلم المزيد عن الجهاز العصبي



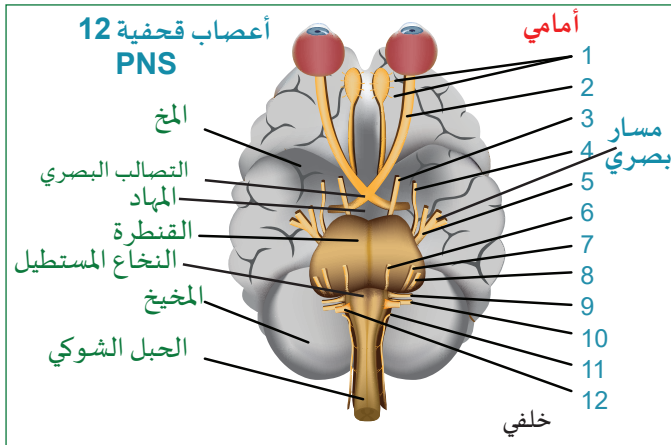
اختر حيوانًا لا فقاريًا آخر أو حيوانًا فقاريًا وابحث في جهازه العصبي، واذكر أسماء أجزائه. فيم يشبه الجهاز العصبي لهذا الحيوان الجهاز العصبي عند الإنسان، وفيم يختلفان؟

تنظيم الخلايا العصبية في مسارات أو أعصاب

يتم ترتيب الخلايا العصبية في الجهاز العصبي المركزي والجهاز العصبي الطرفي بشكل مختلف. في الجهاز العصبي المركزي، تنتظم محاور الخلايا العصبية في حزم تُسمى **المسارات Tracts**. تربط المسارات نصفي الدماغ وتقوم بإرسال الإشارات الحسية والحركية معاً داخل الدماغ. أما في الجهاز العصبي الطرفي فتنتظم محاور الخلايا العصبية في حزم تُسمى **«العصب» Nerve**. جميع المسارات والأعصاب تحتوي

مزيجاً من الخلايا العصبية الحسية والحركية المحاطة بنسيج ضام واقٍ.

يقوم الاثنا عشر زوجاً (12) من الأعصاب القحفية بالتحكم بالوظائف الحسية والحركية لمنطقتي الرأس والرقبة. وهناك 31 زوجاً من الأعصاب الشوكية تربط العقد التي على الحبل الشوكي بمناطق الجسم بوساطة الجهاز العصبي الطرفي (الشكل 5-17).



شكل 5-16 منظر بطني للدماغ تظهر فيه مسارات العصبونات والأعصاب القحفية.

يتكوّن العصب النموذجي من عدد من المحاور المتوازية المغطاة بنسيج ضام. تمتد المحاور في جميع أنحاء الجسم، أما أجسام الخلايا العصبية فتوجد في الجهاز العصبي المركزي أو في العقد العصبية.

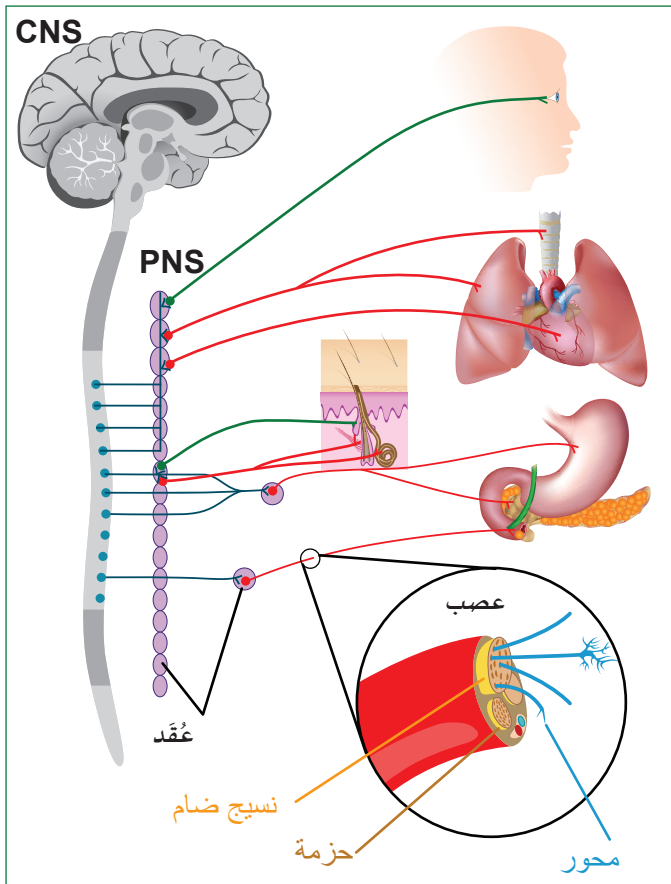
تشابه الأعصاب وكابلات الاتصالات في أنها تحتوي على ألياف تنقل المعلومات، وتكون الألياف محمية بالعزل.

قارن الأعصاب بكابلات الاتصالات.

(1) ما عدد الأسلاك الموجودة في كابل عابر للقارات؟

(2) ما عدد المحاور الموجودة في عصب رئيس نموذجي؟

(3) ما هي النسبة بين قطر الكابل وطوله مقارنة بالعصب؟



شكل 5-17 الأعصاب الشوكية في الجهاز العصبي الطرفي هي حزم من المحاور مرتبة في حزم صغيرة ومتصلة بعقد عصبية.

المستقبلات وأعضاء التنفيذ



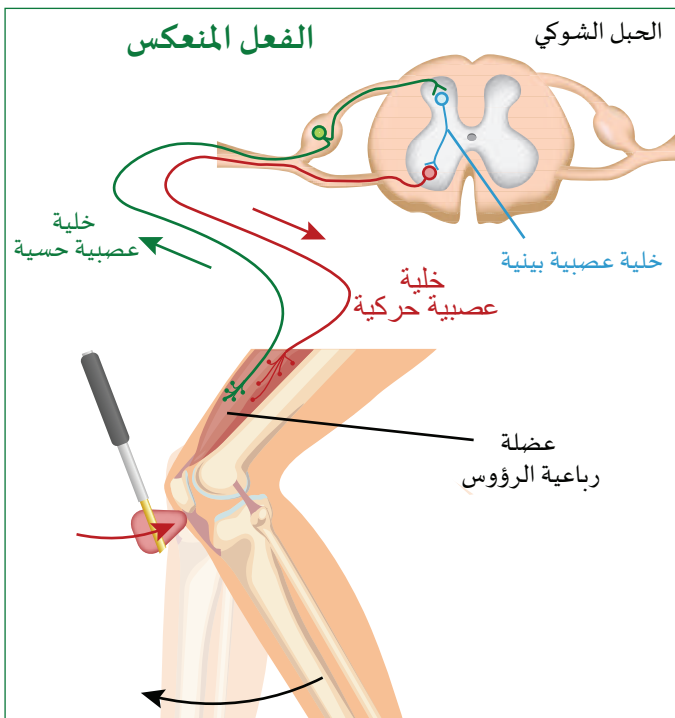
شكل 5-18 في الجلد عدة أنواع من المستقبلات الحسية.

المستقبل **Receptor** هو جزيء، أو خلية، أو مجموعة من الخلايا التي تكتشف المنبه. تعتمد كل حواس الجسد على أنواع مختلفة من المستقبلات. توجد المستقبلات الحسية البشرية في مختلف أعضاء الأحساس كالعين والأنف والفم والجلد. تتعرف المستقبلات في الجلد إلى الإحساس بالألم والضغط والحرارة واللمس (الشكل 5-18).

المنفذ **Effector** هو خلية أو مجموعة من الخلايا تنتج استجابة الجسم للمنبه. والمنفذ (عضو الاستجابة) قد يكون عضلة أو غدة.

قوس الفعل المنعكس

الفعل المنعكس استجابة لا إرادية لمنبه ما، كإبعاد يدك بسرعة عن اللهب. يتكوّن الفعل المنعكس بواسطة قوس الفعل المنعكس **Reflex arc** الذي هو تواصل عصبي مباشر بين إشارة من العصب الحسي وإشارة من العصب الحركي: مثال منعكس "نفضة الركبة". إن نقرة على الوتر تحت الرضفة تحفز عصبًا حسيًا. يتصل العصب الحسي من خلال خلية عصبية بينية في الحبل الشوكي بخلية عصبية حركية تنشط على الفور العضلة رباعية الرؤوس (الشكل 5-19).



شكل 5-19 قوس الفعل المنعكس بين خلية عصبية حسية و خلية حركية يسبب انقباض العضلة.

تسمح الأفعال المنعكسة بإجراء أفعال سريعة للغاية من دون الحاجة إلى التفكير والتحليل. الأفعال المنعكسة هي طريقة الجسم في اتخاذ قرارات سريعة لتجنب الخطر، وهي تضمن البقاء على قيد الحياة.

تنشأ الاستجابة الحركية للأفعال المنعكسة في الحبل الشوكي. معظم الخلايا العصبية الحسية لدى الفقاريات لا تتصل مباشرة بالدماغ، ولكنها تتشابك في الحبل الشوكي.

تقوم الخلايا العصبية البينية في الحبل الشوكي بتنشيط الخلايا العصبية الحركية في العمود الفقري من دون تأخير يفرضه توجيه الإشارات العصبية عبر الدماغ. ملاحظة: بعض الأفعال المنعكسة المتعلقة بالرأس والرقبة تشمل خلايا عصبية بينية في الدماغ.

المسألة 1

لنفترض أنك شعرت بحشرة تهبط على فخذك. صف المسارات العصبية وأنواع الخلايا العصبية والأجهزة المعنية.

a. في الفعل المنعكس، تنفض رجلك بردة فعل عفوية.

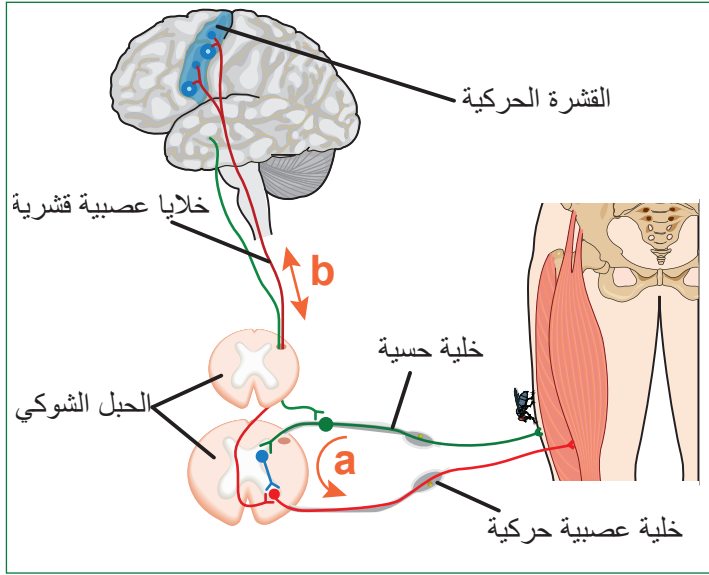
b. في الفعل الواعي، تشعر بالحشرة وتهز ساقك لتهرب الحشرة.

الحل

a. الفعل المنعكس

يحفز مستشعر في جلدك خلية عصبية حسية، فترسل إشارة إلى الحبل الشوكي. تنقل الخلايا العصبية البينية الإشارة إلى خلية عصبية حركية ترتبط بها عضلات ساقك، فتتحرك ساقك. يصدر الإحساس والاستجابة من القسم الجسدي من الجهاز العصبي الطرفي.

تذكر أن الخلايا العصبية تعمل من خلال شبكات عصبية، ما يجعلها قادرة على إرسال



شكل 20-5 إثارة العضلة الهيكلية تنطوي على قرار واعٍ.

الإشارة نفسها إلى مواقع متعددة. يرسل العصب الحسي نفسه الذي ينشط الفعل المنعكس الإشارة إلى الدماغ أيضاً عبر تشابك عصبي مختلف. هذا يسبب الاستجابة الواعية - الإدراك - التي تحدث بعد لحظات من الفعل المنعكس.

b. الفعل الواعي

الاتصالات بين المستشعر والمنفذ هي نفسها التي في الفعل المنعكس، باستثناء أن الإشارة العصبية لا تمر عبر قوس الفعل المنعكس مع خلية عصبية بينية، بل تذهب صعوداً خلال النخاع الشوكي عبر تشابكات عصبية أخرى مع الخلية الحسية إلى النخاع المستطيل ثم المهاد ومنه عبر مسارات عصبية إلى القشرة الحركية في الدماغ حيث يتم تحليل المعلومات. قد يقرر الدماغ عندها إرسال إشارة مرة أخرى عبر النخاع الشوكي وصولاً إلى الخلية العصبية الحركية نفسها التي ترتبط بعضلات ساقك، فتتحرك ساقك. يقوم الجهاز العصبي الطرفي بنقل الإحساس والاستجابة من الدماغ إلى المنفذ.



ملاحظة الفعل المنعكس والاستجابة

b1-5

سؤال الاستقصاء	ما مدى سرعة الاستجابة للأفعال المنعكسة؟
المواد المطلوبة	مصباح يدوية صغيرة، القدرة على تعقيم الغرفة، مطرقة الفعل المنعكس المطاطة، مسامير خشبية، دبابيس ملابس، أكواب بلاستيكية.



شكل 5-21 استخدام اختبارات الأفعال المنعكسة يكشف عن مرض غير مشخص.

1. سيوضح معلمك كيفية إجراء بعض الاختبارات البسيطة لتحديد مدى جودة استجابة جسمك لمنبهات مختلفة.
2. في كل نشاط، ستقوم أنت وشريكك باختبار استجابات انعكاس كل منكما. اتبع الارشادات على ورقة العمل لأداء:
 - a. اختبار استجابة حدقة العين للاقترب.
 - b. اختبار استجابة الحدقة للضوء.
 - c. اختبار استجابة حدقة العين لمصباح يدوي متأرجح.
 - d. اختبار الانعكاس الأخمصي.
 - e. قياس عدد مرّات الاستجابة الخاصة بك في «تحدي الكأس».
3. قد يطلب منك معلمك أن تشارك زملاءك في قراءة النتائج.

أسئلة التلخيص

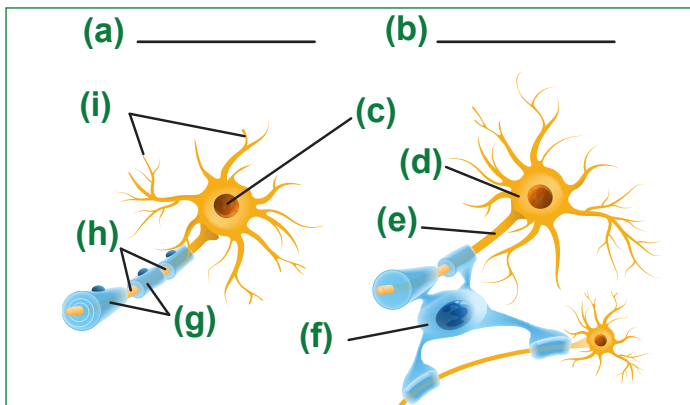
- a. هل كانت إحدى النتائج مفاجئة؟ اشرح.
- b. ما جوانب تجربة «تحدي الكأس» وجمع البيانات التي أحدثت إشكالاً في مجموعتك؟ لماذا؟
- c. تختلف أوقات استجابة الإنسان بشكل كبير وفقاً للعمر والجنس واللياقة. لماذا تُعدُّ اختبارات الحدقة والانعكاس الأخمصي اختبارات فعّالة للوظيفة الطبيعية؟

ابحث عن مرض يصيب الجهاز العصبي



- ابحث عن مرض أو اضطراب في الجهاز العصبي، وقم بإعداد عرض باستخدام التكنولوجيا، يشمل المعلومات الآتية:
- a. اسم المرض ووصفه وسببه وأعراضه.
 - b. الوقاية والعلاج.
 - c. إحصاءات بيانية (مثل: العالم مقابل قطر وفقاً للعمر والجنس...)

1. أيُّ من الجمل الآتية صحيحة؟
 - a. يشمل الجهاز العصبي الذاتي الحبل الشوكي.
 - b. ينشط الجهاز العصبي الودي عند استجابة الكرّ والفرّ.
 - c. يولّد الجهاز العصبي المركزي السيلات العصبية للفعل المنعكس.
 - d. الأعصاب الحسية جزء من الجهاز العصبي المركزي أمّا الأعصاب الحركية فهي جزء من الجهاز العصبي الطرفي.
2. صف تركيب الجهاز العصبي المركزي، وبين ما هي أجزاؤه وكيف تتشارك المعلومات.
3. اذكر ثلاث وظائف للجسم يتحكّم فيها الجهاز العصبي الذاتي.
4. كيف يعرف علم التشريح الجهاز العصبي الطرفي؟
5. * ارسم مخططًا تدفّقيًا توضّح فيه انتقال المعلومات بين الجهاز العصبي الطرفي والجهاز العصبي المركزي. قم بتضمين هذه المفردات في مخطّط التدفق الخاص بك:
 - a. الدماغ
 - b. العضلة أو الغدة أو العضو المنفذ
 - c. البيئة
 - d. القسم الحركي
 - e. الخلية العصبية الحركية
 - f. مستقبلات العضلات
 - g. الأعصاب
 - h. الحبل الشوكي
 - i. القسم الحسي
 - j. المستقبل الحسي
6. أيُّ من المصطلحات المكتوبة أعلاه يُعدُّ جزءًا من الجهاز الذاتي؟ أعطِ مثالين على الأعضاء أو الأنسجة في هذا الجهاز.
7. أيُّ من المصطلحات المكتوبة أعلاه يُعدُّ جزءًا من الجهاز الجسدي؟ اذكر اسم اثنين من المنفذات في هذا الجهاز.
8. حدّد نوع الخلية العصبية في المخطط استنادًا إلى مكان وجودها في الجهاز العصبي المركزي (CNS) أو في الجهاز العصبي الطرفي (PNS)، واذكر أسماء جميع الأجزاء المشار إليها بالحروف.
9. * قارن بين وظيفة الخلية البينية والخلية العصبية الحركية، والخلية العصبية الحسية وتركيبتها في جدول من 3 أعمدة.



الدرس 2-5

السيالات العصبية وانتقالها Nerve Impulses and Transmission

مخرجات التعلّم

B1211.1 يعد قائمة أمثلة على عدد من النواقل العصبية المختلفة بما في ذلك أستيل كولين، ونورادرينالين، وسيروتونين.

B1211.2 يصف تأثيرات عدد من العقاقير المسموح تداولها وغير المسموح تداولها في التشابكات العصبية بما في ذلك النيكوتين والكافيين والكورار وعقار النشوة (الاكستاسي)، ويربط ذلك بمشاكل تعاطي المخدرات.

B1209.1 يشرح كيف يتكون جهد الراحة من خصائص غشاء محور الخلية العصبية وحركة أيونات الصوديوم والبوتاسيوم عبر ذلك الغشاء، بما في ذلك مضخة الصوديوم/البوتاسيوم

B1209.2 يشرح كيف يتكون جهد الفعل من التغييرات في نفاذية غشاء محور الخلية العصبية، وكيف ينتقل على طول المحور العصبي، بما في ذلك إزالة الاستقطاب، ودور القنوات الأيونية، والقنوات الميوبة بالجهد، ومضخة الصوديوم/البوتاسيوم.

B1209.3 يفسر الرسومات البيانية التي تظهر مراحل جهد الفعل.

B1209.4 يصف فترة الجموح، ويشرح كيف تحد من سرعة السيل العصبي واتجاهها.

B1210.1 يصف تركيب التشابكات العصبية، وكيف تعمل لنقل السيل العصبي من خلية عصبية إلى أخرى.

B1210.2 يشرح كيف تحدد التشابكات العصبية اتجاه انتقال السيل العصبي.

B1210.3 يشرح كيف تسمح التشابكات العصبية بالتربط بين مسارات الأعصاب، بما في ذلك التشابكات المتعددة والتشابكات ذات الجهد بعد الغشائي المثبط والمحفز.

المفردات



القناة الأيونية الميوبة بالجهد

Voltage-gated ion channel

Action potential

جهد الفعل

Resting potential

جهد الراحة

Polarization

الاستقطاب

Depolarization

إزالة الاستقطاب

Refractory period

فترة الجموح

Neural pathway

المسار العصبي

Synapse

التشابك العصبي

Electrical synapse

التشابك العصبي الكهربائي

Chemical synapse

التشابك العصبي الكيميائي

Synaptic cleft

الشق التشابكي

Neurotransmitter

الناقل العصبي

الإشارات العصبية والمعلومات

ما هي الإشارة؟

كيف يتم ترميز الحروف لتُنقل بواسطة الكمبيوتر؟

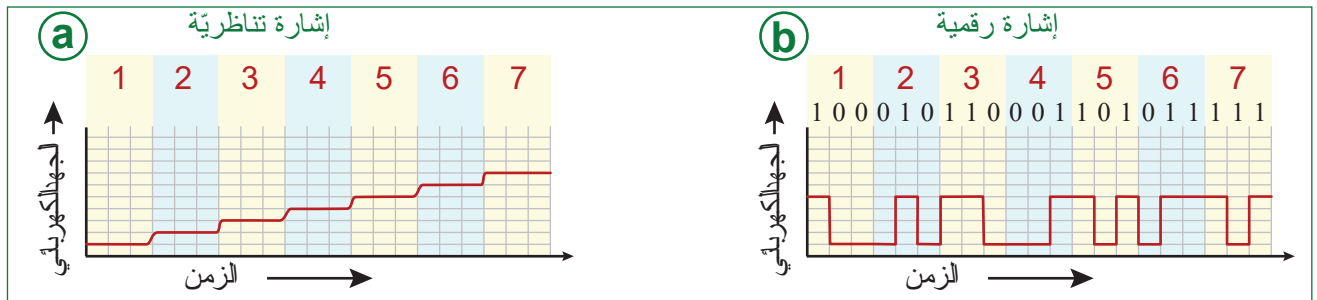
كيف يتم ترميز الصور لتُنقل بواسطة الكمبيوتر؟

كيف تقوم شاشة الكمبيوتر بتحويل البيانات إلى صور؟

كيف يتم نقل المعلومات في الإشارات؟

فيم تشبه الأعصاب دوائر بيانات الكمبيوتر؟ وفيم تختلفان؟

عندما اخترعت أجهزة الكمبيوتر، ظنَّ مُعظم النَّاس بدايةً أنها ستُستخدم بشكل رئيس في الرياضيات، ولم يتوقعوا الاستخدام المتنوع لأجهزة الكمبيوتر في يومنا هذا: أصبح نقل المعلومات، مثل الموسيقى والأفلام وصور من الإنترنت والنصوص، أمرًا عاديًا. عرف النَّاس منذ بداية عصر الكمبيوتر كيفية نقل المعلومات بالإشارة. يوجد نوعان من التقنيات الأساسية تُسمَّى الإشارات التناظرية والإشارات الرقمية (الشكل 5-22). تستخدم أجهزة الكمبيوتر الإشارات الرقمية في الغالب، أمَّا الدماغ فيستخدم غالبًا الإشارات التناظرية في أكثر الأحيان.



شكل 5-22 تسلسل الأرقام من 1 إلى 7 كإشارة تناظرية وإشارة رقمية.

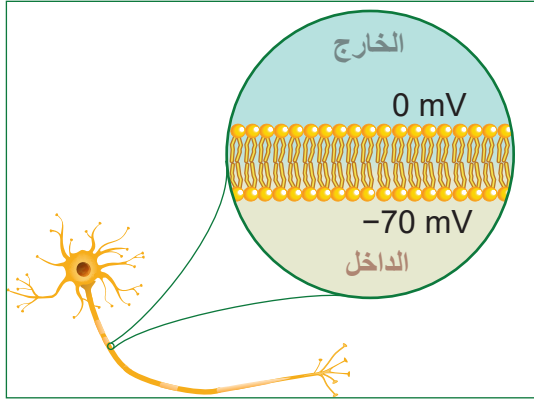
(a) التناظرية: في الإشارة التناظرية، يتم تمثيل كل قيمة بجهد كهربائي مختلف. مثالًا: قد يُمثَّل الرقم 1 مثالًا بقيمة 0.1 V، والرقم 2 سيكون 0.2 V، وغير ذلك. سنرى في هذا الدرس أن الخلايا العصبية تقوم بجمع الجهود الكهربائية التناظرية لاتخاذ القرارات. البيانات التناظرية تتغيَّر باستمرار ويمكن أن تُمثَّل قيمًا كسرية مثل 3.25.

(b) إشارة رقمية: في الإشارة الرقمية، يتم ترميز المعلومات بخطوات زمنية متساوية هي 1 بت (1 bit) من البيانات. يُمثَّل الرقم بثلاث بتات (3 bits). وعلى سبيل المثال، فإن الرقم 3 يمثَّل بثلاث بتات 011. وتعتمد أجهزة الكمبيوتر على البيانات الرقمية لتعمل، لأنَّ البيانات الرقمية لا يمكن أن تمثل القيم الكسرية بطريقة مباشرة مثل 3.25.

تشابه الأعصاب ودوائر الكمبيوتر، لأنَّ كليهما تمثِّل المعلومات بواسطة الجهد الكهربائي، وتستخدم الوقت لفصل جزء من المعلومات عن الآخر. سنرى أنَّه يتم جمع إشارتين عصبيتين تناظريتين لتصبحا إشارة مركَّبة واحدة إذا كان الفاصل الزمني بين الإشارتين أقل من عتبة زمنية مُحددة، ويتم التعامل مع إشارتين تناظريتين بينهما فاصل زمني أكبر من العتبة الزمنية المحددة على أنَّهما جزءان منفصلان من المعلومات.

أغشية الخلايا العصبية

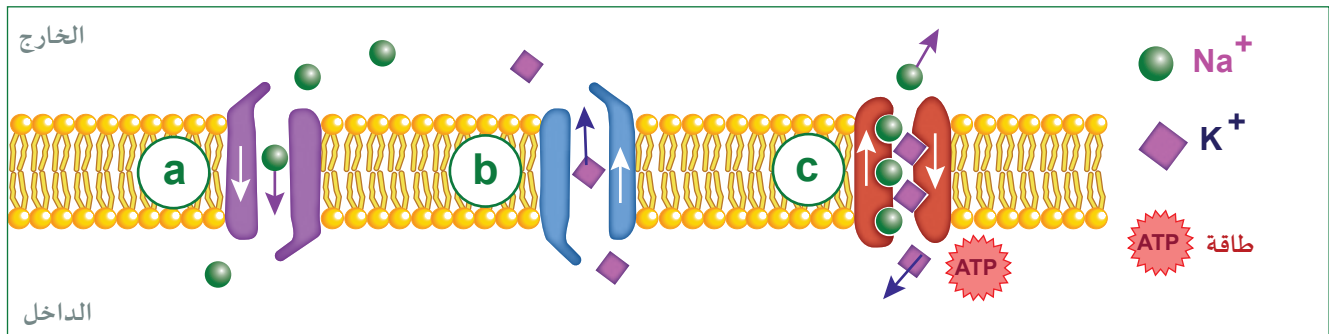
الإشارات التي تنتقل عبر الخلايا العصبية هي إشارات كهروكيميائية، تختلف في طبيعتها عن حركة الإلكترونات في موصل ما كالححاس لتشكل التيار الكهربائي. بدلاً من ذلك، يكون غشاء العصبون حاجزاً بين الأيونات الموجبة والأيونات السالبة على جانبي الغشاء الخلوي. ينشأ عن هذا الحاجز فرق جهد كهربائي على جانبي الغشاء ينتقل على امتداد غشاء المحور العصبي، ويُنتج نبضاً كهربائياً خفيفاً جداً. الإشارة هي $0.1V$ (100 mV) تقريباً أو أقل بخمس عشرة مرة من بطارية مصباح يدوي.



شكل 5-23 جهد الراحة للخلية العصبية.

في معظم الخلايا يكون فرق الجهد الكهربائي على جانبي غشاءها الخلوي قليلاً، ويكون مقداره ثابتاً لا يتغير بسبب التوزيع غير المتكافئ للأيونات الموجبة والسالبة على جانبي غشاء الخلية. يُسمّى فرق الجهد على جانبي غشاء الخلية "جهد الراحة" **resting potential**، والذي يكون سالباً وتتراوح قيمته من -50 mV إلى -200 mV وفقاً لاختلاف الخلايا. معظم الخلايا غير قادرة على تغيير جهد الراحة الخاص بها. يبلغ جهد الراحة للخلايا العصبية -70 mV تقريباً.

للخلايا العضلية والخلايا العصبية قدرة فريدة على تغيير الجهد الكهربائي على جانبي أغشية الخلايا الخاصة بها. يحتوي غشاء الخلية العصبية العديد من البروتينات الناقلة منها قنوات خاصة لتحريك أيونات البوتاسيوم (K^+) والصوديوم (Na^+) عبر غشاء الخلية (الشكل 5-24). جميع هذه القنوات هي قنوات أيونية مَبَوَّبة بالجهد ما يعني أنها تفتح وتغلق وفقاً لجهد الغشاء. التغيرات في جهد الغشاء تغير شكل البروتينات التي قد تسمح للأيونات بالمرور وقد تمنعها عن ذلك.



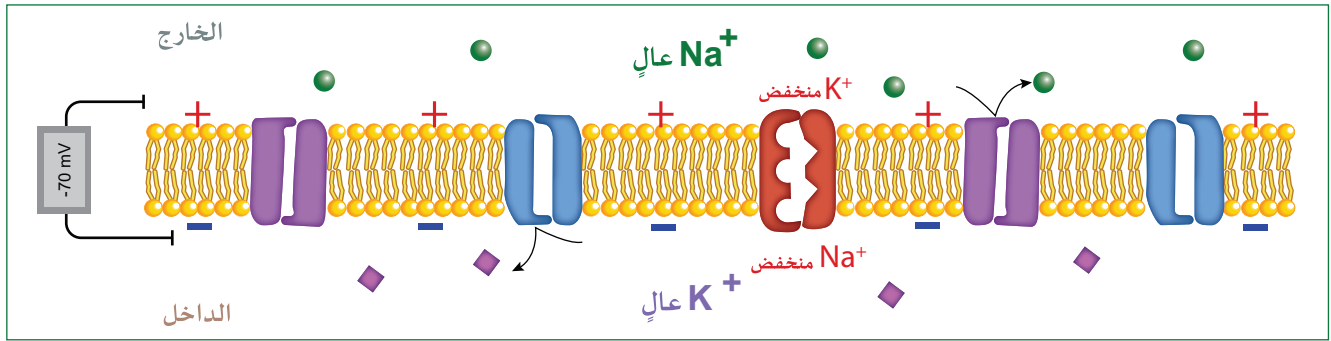
شكل 5-24 القنوات الأيونية البروتينية المَبَوَّبة بالجهد.

- تنقل قناة الصوديوم Sodium channel** بشكل سلبي أيونات الصوديوم (Na^+) إلى الداخل.
- تنقل قناة البوتاسيوم Potassium channel** بشكل سلبي أيونات البوتاسيوم إلى الخارج.
- تقوم مضخة الصوديوم-البوتاسيوم Sodium-potassium pump** بشكل نشط بنقل 3 أيونات صوديوم (Na^+) إلى الخارج لكل اثنين من أيونات البوتاسيوم (K^+) يتحركان إلى الداخل.

الاستقطاب وإزالة الاستقطاب

تستقبل الخلايا العصبية باستمرار مدخلات كهربائية متعددة من خلال زوائد شجرية. تضيف بعض المدخلات أيونات ترفع جهد الغشاء - أي إنها تجعل شحنته موجبة أكثر، أما المدخلات الأخرى فتخفض جهد الغشاء جاعلةً شحنته سالبة أكثر. تدلّ المدخلات الكثيرة التي تتغير بمرور الوقت، على أن جهد الغشاء للخلايا العصبية يستمر بالتقلب من لحظة إلى أخرى. هذه هي الفكرة الأساسية لفهم كيف "تقرر" الخلايا العصبية بناءً على مدخلاتها.

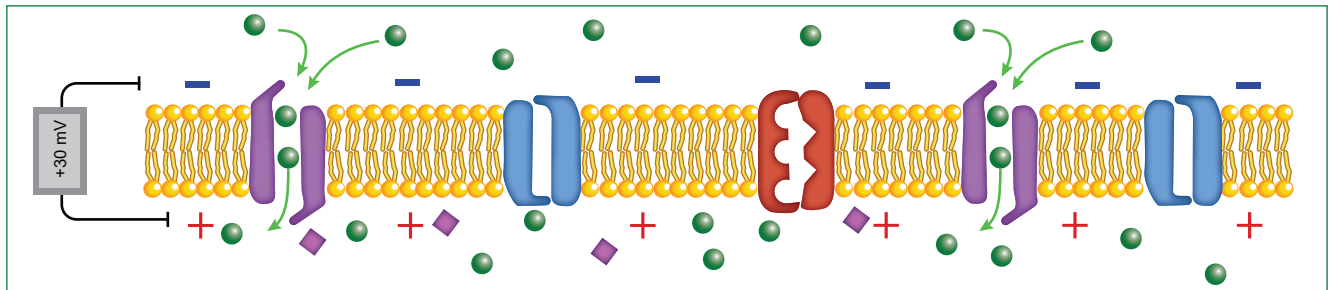
يوضح الشكل 5-25 أن غشاء المحور العصبي يكون في حالة الراحة، حيث تكون القنوات البروتينية المبوبة بالجهد مغلقة. يوجد تركيز أعلى من أيونات الصوديوم خارج الغشاء وتركيز أعلى من أيونات البوتاسيوم داخله. يوجد في الغشاء الخلوي للخلية العصبية قنوات بروتينية لانتشار أيونات البوتاسيوم، وهذه القنوات تكون دائماً مفتوحة، وهذا يوضح لماذا يكون الغشاء منفذاً لأيونات البوتاسيوم بشكل كبير. يُنشئ الفرق في تركيز الأيونات شحنة سالبة صافية لجهد الراحة تبلغ -70 mV . كما أن سيتوبلازم الخلايا العصبية يحتوي على بروتينات سالبة الشحنة وكبيرة الحجم لا تغادر السيتوبلازم أبداً وبالتالي تساهم في تكوين الجهد السالب. تُسمى هذه الحالة "الاستقطاب" **Polarization** لوجود فرق جهد كبير بين داخل الخلية وخارجها.



شكل 5-25 التوزيع الأيوني عند جهد الراحة.

تفتح قناة الصوديوم البروتينية عندما تزيد شحنة جهد الغشاء (تصبح موجبة أكثر) عن -55 mV . قد تُسبب التقلبات العادية فتح بعض قنوات الصوديوم، فإذا بقيت شحنة جهد الغشاء أقل من -55 mV ، فإنها تغلق مُجددًا ويعود الغشاء إلى جهد الراحة.

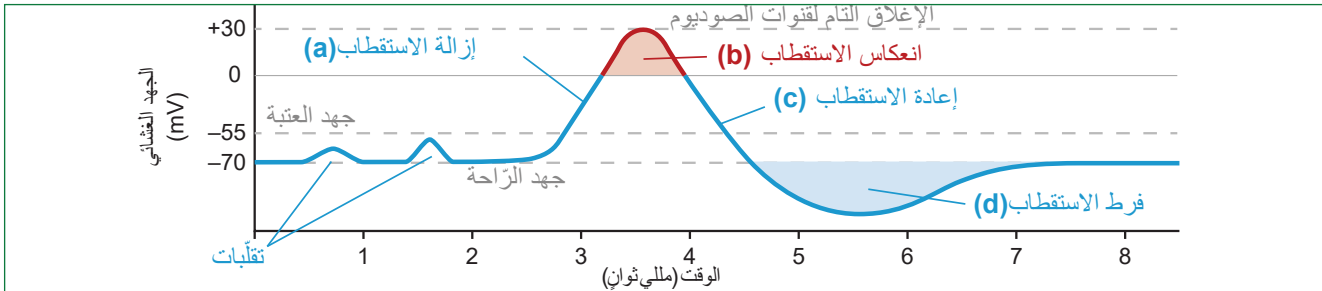
حالة الاستقطاب ليست مستقرة تمامًا: إذا حدث تقلب في جهد الغشاء وأصبحت الشحنة أكبر من جهد العتبة التي تبلغ -55 mV ، فإن جميع قنوات الصوديوم تفتح. يؤدي هذا إلى إزالة استقطاب **Depo-larization** الغشاء بسرعة، حيث تتدفق الأيونات الموجبة (Na^+) إلى الخلية العصبية. ويصبح جهد الغشاء عندها 0 mV . يستمر تدفق أيونات الصوديوم إلى داخل الخلية العصبية مما يؤدي إلى أن تصبح الشحنة داخلها موجبة وتعرف هذه الحالة بانعكاس الاستقطاب. عندما يصل فرق الجهد الكهربائي إلى $(+30 \text{ mV})$ فإن جميع قنوات الصوديوم تغلق ويتوقف تدفق الشحنات الموجبة إلى الداخل.



شكل 5-26 يسبب فتح قنوات الصوديوم إزالة الاستقطاب ومن ثم انعكاسه.

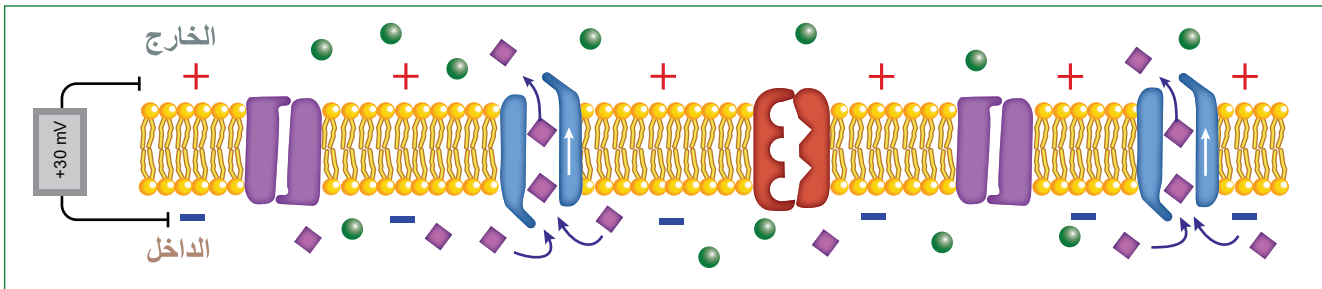
جهد الفعل

تُسمى استجابة الخلية العصبية عند إزالة الاستقطاب "جهد الفعل" **Action potential**. يتم تحفيز جهد الفعل بواسطة جهد كهربائي يتجاوز جهد العتبة التي تبلغ -55 mV (الشكل 27-5a). يستمر جهد الفعل بأكمله 5 ملي ثانية بين المنبه الأولي والعودة الكاملة إلى حالة جهد الراحة (الشكل 27-5d-a).



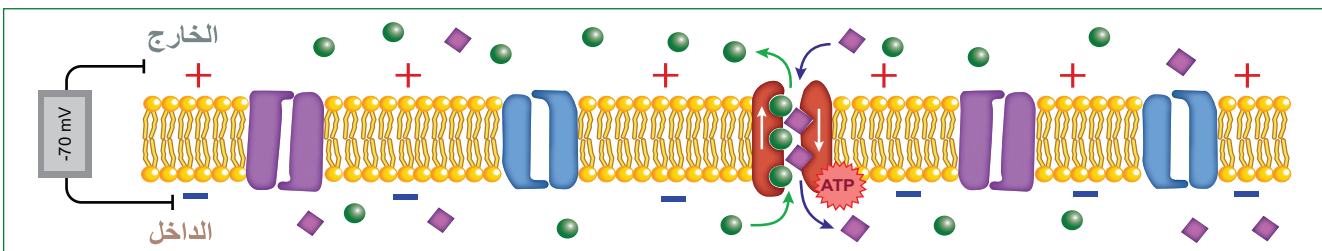
شكل 27-5 خطوات نمو واضمحلال جهد الفعل.

التدفق المستمر لأيونات الصوديوم إلى الداخل يتسبب في عكس استقطاب جهد الغشاء، فتصبح الشحنة داخل الخلية موجبة (الشكل 27-5b)، ويستمر ذلك فقط حتى تغلق قنوات الصوديوم تمامًا عند $+30 \text{ mV}$. يؤدي جهد الخلية البالغ $+30 \text{ mV}$ إلى فتح قنوات البوتاسيوم (الشكل 28-5). تخرج أيونات البوتاسيوم (K^+) بسرعة من الخلية العصبية مع فرق تركيزها، وتعود الشحنة داخل الخلية سالبة مرة أخرى. يُسمى هذا الجزء من جهد الفعل "إعادة الاستقطاب" Repolarization (الشكل 27-5c).



شكل 28-5 فتح قنوات البوتاسيوم يُعيد استقطاب الغشاء.

تستمر قنوات البوتاسيوم المحكومة بفرق الجهد مفتوحة لفترة قليلة بعد وصول جهد الغشاء إلى -70 mV مما يؤدي إلى استمرار خروج أيونات البوتاسيوم فينخفض جهد الغشاء إلى أقل من -70 mV . كما يستمر تسرب أيونات البوتاسيوم من خلال قنوات البوتاسيوم غير المبوبة بالإضافة إلى أن قنوات خاصة بالكلور (Cl^-) تفتح وتبدأ أيونات الكلور بالدخول. يُسمى الجهد الذي يبلغ أقل من -70 mV "فرط الاستقطاب" Hyperpolarization. يقوم "فرط الاستقطاب" بتنشيط مضخة الصوديوم-البوتاسيوم، فتضخ بالنقل النشط 3 أيونات Na^+ إلى خارج الخلية و 2 أيون K^+ إلى الداخل إلى أن يستعيد الغشاء جهد الراحة البالغ -70 mV (الشكل 29-5).

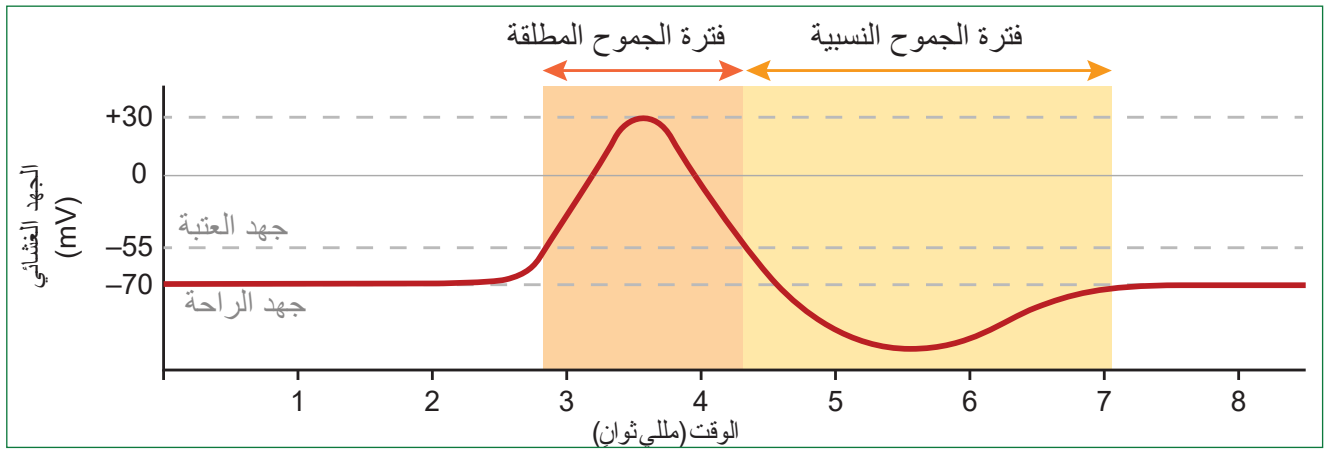


شكل 29-5 مضخة البوتاسيوم-الصوديوم تستعيد جهد الراحة.

فترة الجموح

أثناء جهد الفعل وبعده ببضعة أجزاء من الثانية، لا يستطيع غشاء الخلية العصبية الاستجابة للمدخلات الجديدة. تُسمى هذه الفترة الزمنية "فترة الجموح" **Refractory period**. بعد انقضاء فترة الجموح، يكون الغشاء جاهزاً لبدء جهد فعل جديد إذا تلقى منبهًا جديدًا غيرَه إلى أعلى من جهد العتبة -55 mV . "فترة الجموح" أساسية لفهم سبب انتقال السيالات العصبية في اتجاه واحد فقط على طول المحور العصبي.

تتكوّن فترة الجموح من مرحلتين كما يُظهر الشكل 5-30: ترتبط المرحلة الأولى بإزالة الاستقطاب وعودة الاستقطاب، أمّا المرحلة الثانية فترتبط بفرط الاستقطاب وعودة الغشاء إلى جهد الراحة.



شكل 5-30 مرحلتا فترة الجموح.

فترة الجموح المطلق يُسببها توقّف قنوات الصوديوم التي فتحت في الأصل لإزالة الاستقطاب عن الاستجابة لأي منبه جديد مهما بلغت شدته وذلك حتى يسمح لاستكمال جهد الفعل الحالي. تظل هذه القنوات مثبتة إلى أن يهبط جهد الغشاء حتى فرط الاستقطاب.

فترة الجموح النسبية تنتج عن فتح قنوات البوتاسيوم المبهوبة بالجهد. ما دامت هذه القنوات مفتوحة، فإن أيونات البوتاسيوم K^+ تتحرك بحرية مع منحدر التركيز إلى خارج الخلية. تحرك أيونات البوتاسيوم K^+ بحرية يمنع تكوّن فرق أو عدم اتزان في الشحنات بسبب أيونات الصوديوم Na^+ ، وبالتالي يغيب مصدر الطاقة اللازمة لإنشاء جهد فعل جديد، خلال هذه الفترة قد يستجيب العصبون لمنبه أقوى من المنبه الأصلي.

خلال فترة الجموح، لا يمكن للغشاء أن ينشأ به أي جهد فعل جديد.

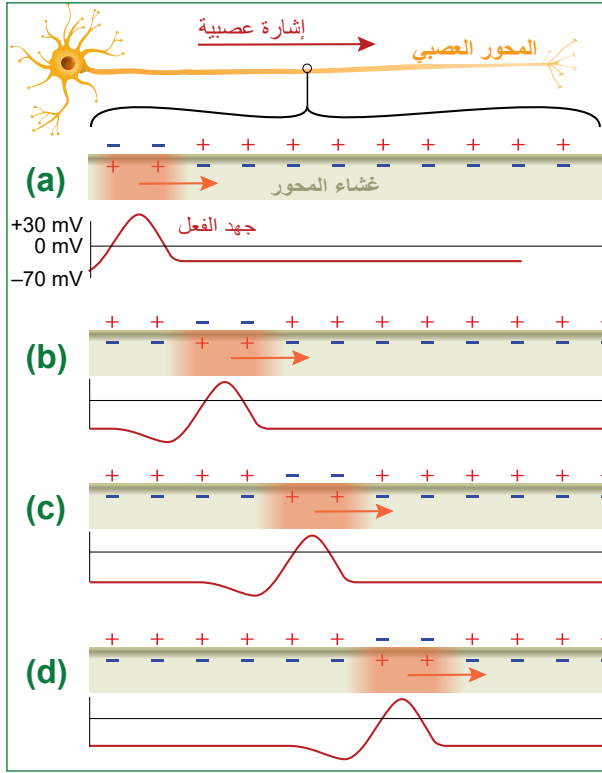


تنتهي فترة الجموح عندما تستعيد مضخة الصوديوم-البوتاسيوم تركيزات أيونات الصوديوم Na^+ والبوتاسيوم K^+ نفسها الموجودة في جهد الراحة. بمجرد إعادة ضبط هذه التركيزات، يمكن للغشاء أن يطلق في داخله جهد فعل جديدًا.

انتقال السياتات العصبية عبر المحور

تنشأ استجابة غشاء الخلية العصبية الكهروكيميائية بداية في منطقة صغيرة جداً، ولا تمتد في الخلية بأكملها. هذا يعني أن جهد الفعل يؤثر في جزء صغير فقط من المحور العصبي في لحظة مُحددة.

تنتقل السياتات العصبية عندما ينتقل جهد الفعل نحو نهاية محور الخلية العصبية.



شكل 31-5 الإشارة العصبية هي جهد الفعل الذي ينتقل على طول المحور العصبي.

ادرس جهد الفعل الذي يبدأ عندما تتخطى شحنة الجهد الغشائي لجسم خلية عصبية جهد العتبة التي تبلغ -55 mV .

a. تم تحفيز جزء من غشاء المحور العصبي حتى تتخطى جهد العتبة وأنشأ بسرعة جهد الفعل (الشكل 31-5 a).

b. تم تحفيز الجزء الذي يسبق مباشرة والجزء الذي يلي مباشرة جزء الغشاء الذي تم تحفيزه أولاً، لكن الغشاء الأقرب لجسم الخلية هو في فترة الجموح، ما يمنعه من الاستجابة الشكل (31-5 b).

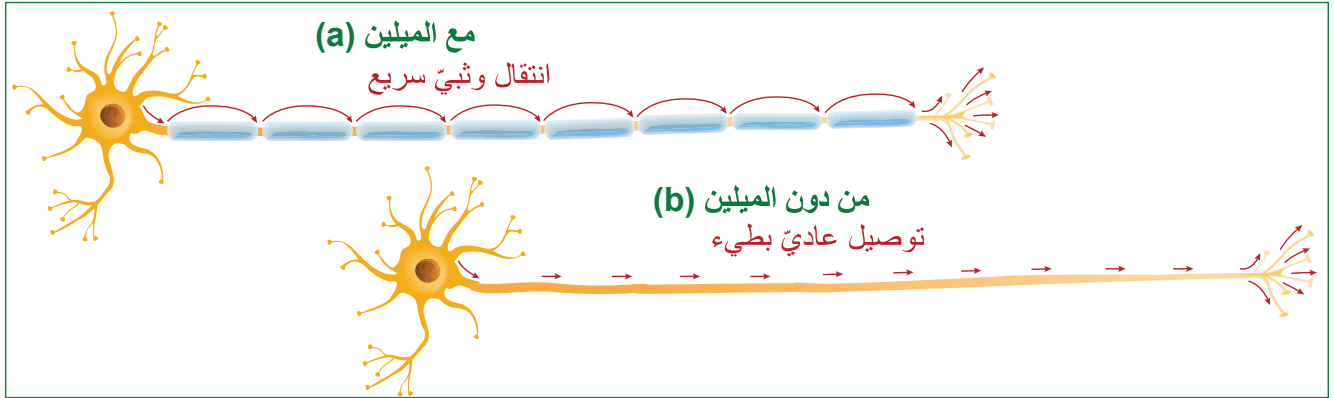
c. إنّ الجزء من الغشاء القريب من جسم الخلية يمر بإعادة استقطاب يليها حال جموح بينما يصل التحفيز للجزء الذي يليه فينشأ فيه جهد الفعل وإزالة استقطاب (الشكل 31-5 c).

d. ينتقل جهد الفعل إلى الأمام ونزولاً على امتداد المحور العصبي كما هو موضح في (الشكل 31-5 c-d). جهد الفعل هو الإشارة العصبية التي تنتقل من جسم الخلية، على امتداد المحور العصبي، إلى النهايات العصبية. إن التغير السريع لشحنة غشاء الخلية، من -70 mV إلى $+30 \text{ mV}$ والعودة إلى -70 mV من جديد، هو الإشارة الكهروكيميائية التي يمكنها إجراء أحد فعلين عند **التشابك العصبي Synapse**.

- إذا كان التشابك العصبي يتصل بزوائد شجيرية تابعة لخلية عصبية أخرى، فإن نبضة الفعل تضاف إلى إشارات أخرى من الزوائد الشجيرية الأخرى، وقد تُنشئ جهد الفعل في تلك الخلية العصبية وقد لا تُنشئ هذا الجهد.
- إذا كان التشابك العصبي يتصل بنسيج سريع الاستجابة، مثل عضلة أو غدة، فإنّه يتم تحفيز النسيج للاستجابة.

سرعة التوصيل العصبي

- تنتقل السيالات العصبية على محور معظم الخلايا العصبية الطرفية بسرعة بين 0.2 و 120 m/s. هذه السرعة تُسمى «سرعة التوصيل العصبي» Nerve conduction velocity وتعتمد على عدة عوامل:
- **القطر:** تتراوح أقطار المحاور بين 0.2 μm و 20 μm . المحور الأكبر قطرًا له سرعات توصيل عصبية أكبر. وعلى سبيل المثال، فإنَّ خلية عصبية ذات محور عصبي قطره 20 μm لها سرعة توصيل عصبي تبلغ 120 m/s، أما المحور الذي له قطر يبلغ 5 μm فله سرعة توصيل تبلغ 33 m/s فقط.
- **الميلين:** للميلين خاصية عازلة. يعزل الميلين نبضة الجهد الكهربائي الخاصةً بجهد الفعل عن السائل الخارج خلوي. يسمح هذا لجهد الفعل بالانتقال بشكل أسرع بكثير خلال أجزاء المحور العصبي المحاطة بالميلين. معظم الخلايا العصبية الطرفية عند الإنسان لها غمد ميليني. الأعصاب بدون غمد ميليني تبلغ فيها سرعات التوصيل 0.2 - 2 m/s، أي هي أبطأ ب 50 مرة تقريبًا من الأعصاب مع غمد ميليني.



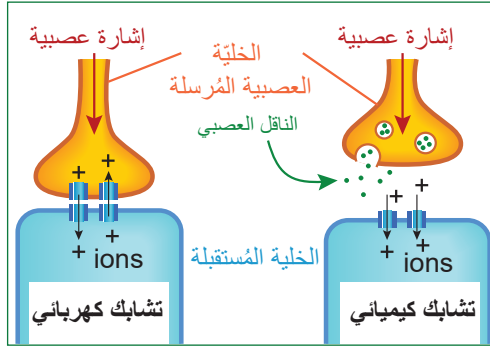
شكل 5-32 محاور (a) مع الميلين و (b) من دون الميلين.

- الغمد الميليني يجعل المناطق المعرضة للوسط المحيط من محور العصبون محصورة في عقد رانفييه، ولذلك، فإنَّ قنوات الصوديوم والبوتاسيوم المبهوبة بالجهد تتركز في هذه العقد. يؤدي نشاط الأيونات عند عقد رانفييه إلى انتشار الأيونات باتجاه العقدة التالية وإزالة استقطابها، فيبدو وكأنَّ جهد الفعل يقفز من عقدة رانفييه إلى أخرى. تُسمى هذه الحركة **الانتقال الوثني Saltatory conduction**. ينقل الانتقال الوثني جهد الفعل بشكل أسرع كثيرًا. بدون الميلين ينتشر جهد الفعل على العصب عند سرعة تبلغ 1 m/s تقريبًا. مع الميلين، يتخطى جهد الفعل خلايا شوان بمتوسط سرعة توصيل تبلغ 100 m/s.

التصلب اللويحي (MS) هو مرض معوّق يعمل عن طريق تآكل الغمد الميليني، ما يبطئ سرعة التوصيل العصبي. تشمل الأعراض المبكرة لهذا المرض صعوبة الحركة حيث إنَّ العضلات لا تتلقى الإشارات العصبية التحكّمية بالتسلسل الصحيح. في الحالات الحرجة، يصبح التوصيل العصبي بطيئًا جدًا، فيصبح المرض مُميّتًا، لأنَّ الأعضاء الحيوية لا تعمل بشكل صحيح. لم يُعرف علاج هذا المرض بعد.



التشابكات العصبية الكهربائية والكيميائية



شكل 5-33 أنواع التشابكات العصبية.

تتصل نهاية إحدى الخلايا العصبية بأخرى في **تشابك عصبي synapse**. ينقل التشابك العصبي الإشارة العصبية بين الخلايا بإحدى طريقتين (الشكل 5-33).

- تنقل التشابكات العصبية الكهربائية **Electrical synapse** الجهد بواسطة حركة الأيونات.

- تطلق التشابكات العصبية الكيميائية **Chemical synapse** مواد كيميائية مولدة للإشارة تُسمى "الناقل العصبي" neurotransmitter.



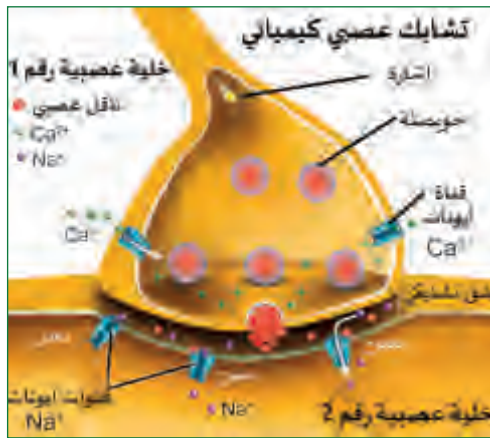
شكل 5-34 التشابك العصبي الكهربائي.

التشابكات العصبية الكهربائية

- تكون الخليتان في التشابك العصبي الكهربائي قريبتين جدًا، وتسمح القنوات الميوبة للأيونات بالتدفق مباشرة عبر مساحة صغيرة تُسمى "الموصل الفجوي" **Gap junction** (الشكل 5-34). تسمح التشابكات العصبية الكهربائية بانتقال الإشارات في كل الاتجاهات وبسرعة عالية جدًا، إلا أنها لا تستطيع إضعاف الإشارات وهي ليست مرنة. توجد التشابكات العصبية الكهربائية في الدماغ وأعضاء الحواس والحبل الشوكي.

التشابكات العصبية الكيميائية

تكون الخليتان في التشابك العصبي الكيميائي أكثر تباعدًا، ويتم نقل الإشارة العصبية كيميائيًا عبر فراغ أكبر يُسمى "الشق التشابكي" **Synaptic cleft**. تنتقل الإشارات في اتجاه واحد فقط، وهي أبطأ مما هي عليه في التشابك الكهربائي. ومع ذلك، يمكن للتشابك الكيميائي أن يحتفظ بالإشارة لفترة أطول، فيضخمها ويرسلها إلى أكثر من خلية عصبية إضافية (الشكل 5-35). تتواصل معظم الخلايا العصبية باستخدام التشابكات العصبية الكيميائية.



شكل 5-35 التشابك العصبي الكيميائي.

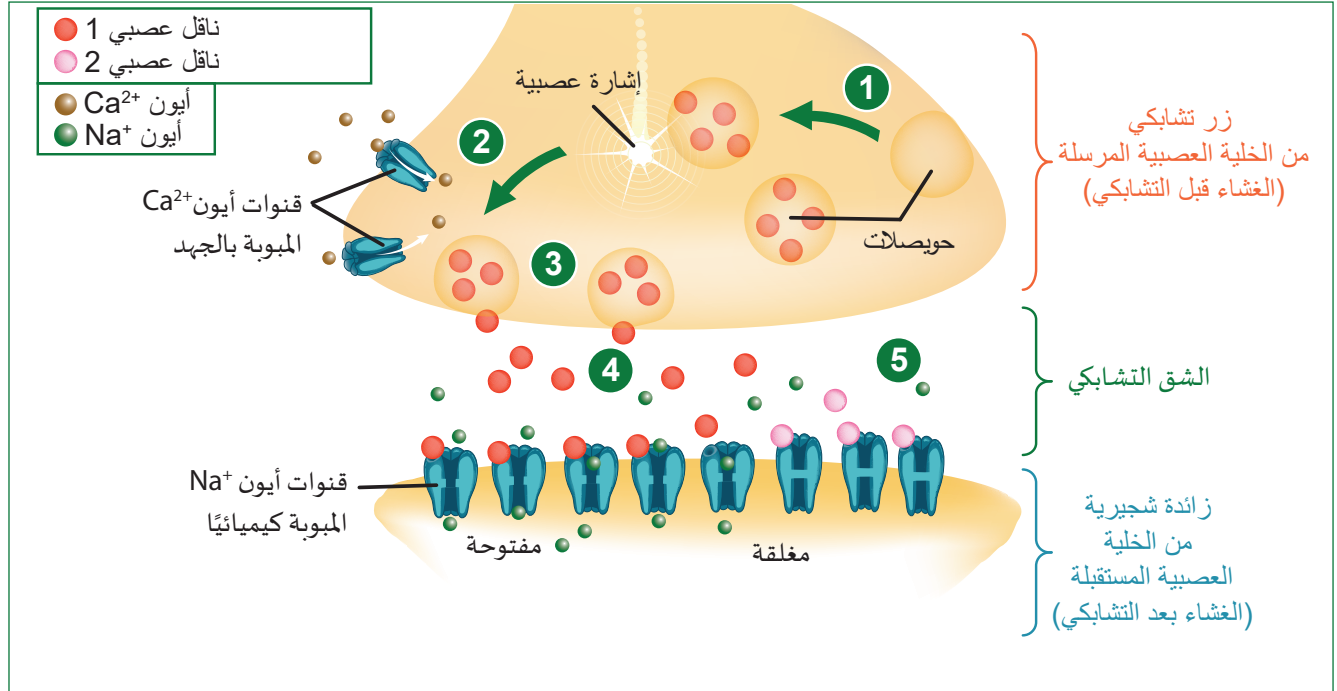
جدول 5-1 مقارنة التشابكات العصبية الكهربائية والكيميائية.

التشابك العصبي الكهربائي	التشابك العصبي الكيميائي	
معتدل	سريع جدًا	السرعة
أطول بكثير	قصيرة جدًا	مدة الاحتفاظ بالإشارة
نعم	لا	تضخيم الإشارة
20 - 40 nm	3 - 4 nm	الفجوة بين الخلايا العصبية
من الغشاء قبل التشابكي إلى بعد التشابكي	في كلا الاتجاهين	اتجاه انتقال السيات العصبي

انتقال السيال العصبي في التشابك العصبي الكيميائي

يتم استخدام التشابكات العصبية الكيميائية من قبل الجهاز العصبي الطرفي PNS للنقل والتواصل بين خلية عصبية وأخرى. يتكوّن التشابك العصبي من غشاء قبل التشابكي (أزوار تشابكية)، شق تشابكي، وغشاء بعد التشابكي. **الناقل العصبي Neurotransmitter** هو جزيء كيميائي ينقل الإشارة العصبية عبر الشق التشابكي (الشكل 5-36).

- تفرز الأزوار التشابكية في الأغشية قبل التشابكية النواقل العصبية في الشق التشابكي.
- ترتبط المستقبلات الموجودة على الخلية العصبية البعد تشابكية بالناقل العصبي.



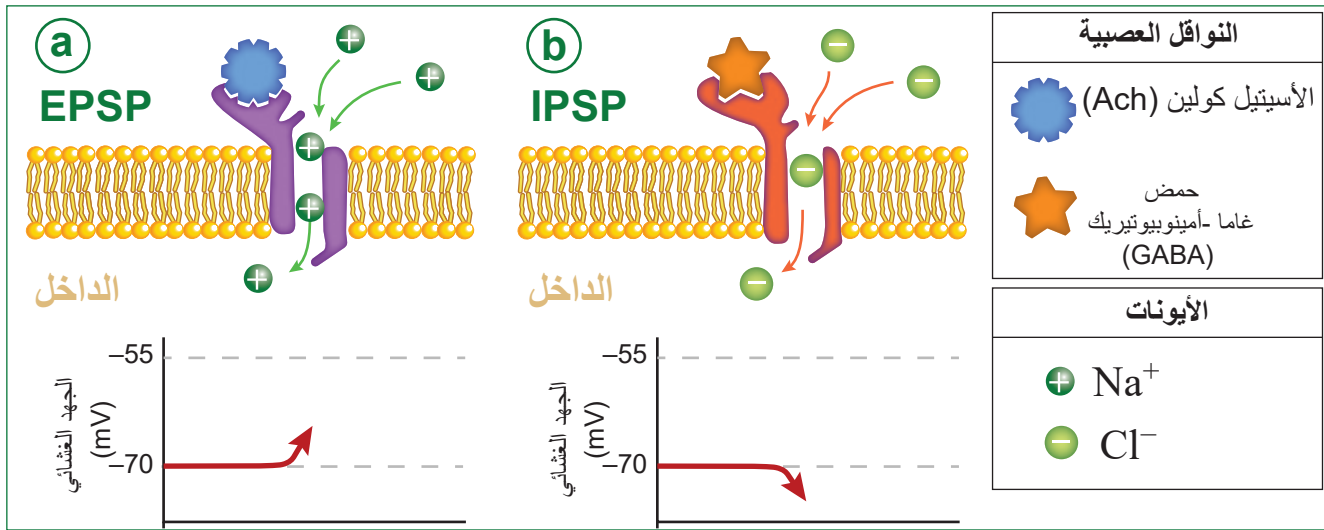
شكل 5-36 نقل الإشارات العصبية عبر الشق التشابكي.

1. يتم إنتاج النواقل العصبية وتخزينها في حويصلات تشابكية synaptic vesicles في الأزوار قبل التشابكية.
2. عند وصول السيال العصبي (جهد الفعل) إلى الزر التشابكي، تفتح قنوات الكالسيوم Ca^{2+} المبنية بالجهد فتزداد نفاذية الغشاء قبل التشابكي لأيونات الكالسيوم.
3. يتسبب التدفق المفاجئ لأيونات الكالسيوم إلى الداخل في اندماج الحويصلات التشابكية المحتوية على النواقل العصبية مع الغشاء قبل التشابكي وفي تحرير نواقلها العصبية في الشق التشابكي.
4. ينتشر الناقل العصبي عبر الشق التشابكي، ويرتبط بمستقبلات انتقائية في الخلية العصبية بعد التشابكية. تكون المستقبلات في الغالب قنوات أيونية. في الشكل 5-35، يؤدي الناقل العصبي إلى فتح قناة أيون الصوديوم (Na^+). هذا يتيح لأيونات الصوديوم أن تدخل الخلية العصبية بعد التشابكية، فتغير من جهد غشائها مسببة جهد الفعل فيها.
5. تكون المستقبلات خاصة بنواقل عصبية معينة. في بعض الحالات، قد يتم إطلاق ناقل عصبي ثانٍ بواسطة خلية عصبية مختلفة، فتثبط نقل الإشارات العصبية من خلال سدّ المستقبلات.
6. يجب إزالة النواقل العصبية بسرعة بعد كل نبضة عصبية حتى يكون التشابك العصبي جاهزاً لنقل نبضة عصبية أخرى. مثلاً، يتم تفكيك الناقل العصبي الأسيتيل كولين في التشابك العصبي بسرعة بواسطة إنزيم أستيل كولين استريز Acetylcholinesterase.

الجهود بعد التشابكية

يمكن للخلية العصبية أن تستقبل مدخلاً من التشابك العصبي في نهاية كل تشعب من كل زائدة شجرية. يُمكن للخلية العصبية الواحدة أن تحتوي على أكثر من 1000 اتصال بالزوائد الشجرية. كل منها يعطي مدخلاً واحداً. بشكل عام، لا يكون مدخل واحد كافياً لإطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية المستقبلية (بعد التشابكية)، ولكن كل مدخل منفصل يضيف شحنة صغيرة إلى جهد الغشاء بعد التشابكي، أو يطرح شحنة صغيرة منه. تُصنّف المدخلات على أنها منشّطة أو مثبطة اعتماداً على تأثيرها في جهد الغشاء بعد التشابكي.

1. تدفع مدخلات الجهد الاستثاري بعد التشابكي (EPSP) الغشاء بعد التشابكي نحو جهد العتبة اللازم لتكوين جهد الفعل - يكون الدفع نحو جهد موجب أكثر بشكل عام.
 2. تدفع مدخلات الجهد التثبيطي بعد التشابكي (IPSP) جهد الغشاء بعد التشابكي بعيداً عن جهد العتبة اللازم لتكوين جهد الفعل - يكون الدفع نحو جهد سالب أكثر بشكل عام.
- يمكن إنشاء استجابات EPSP و IPSP بواسطة آليات مختلفة ومتعددة.



شكل 5-37 استجابات (a) منشّطة و (b) مُثبّطة بعد تشابكية.

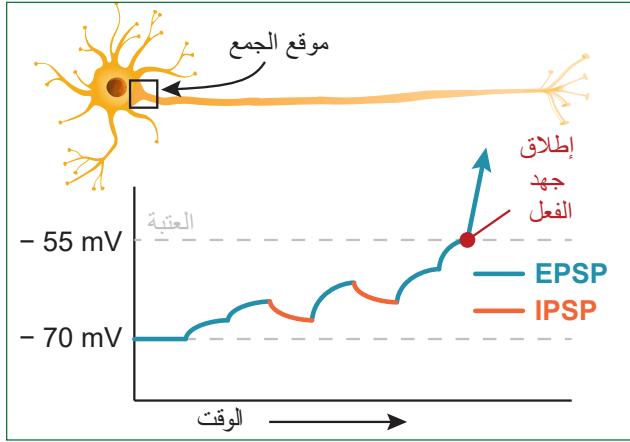
من الأمثلة على الجهد الاستثاري: عندما يتم إطلاق الناقل العصبي "أسيتيل كولين ACh" في التشابك العصبي، كما هو موضح في الشكل 5-37a. فإن ذلك يؤدي إلى فتح قنوات الصوديوم Na^+ بعد التشابكية. تدخل أيونات الصوديوم إلى الخلية بعد التشابكية وتجعل غشاء الخلية بعد التشابكية موجباً أكثر (إزالة الاستقطاب). هذا يزيد احتمال إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية بعد التشابكية.

تنشأ الاستجابة المثبطة عندما يتم إطلاق الناقل العصبي GABA (حمض غاما-أمينوبوتيريك) في التشابك العصبي. يؤدي هذا إلى فتح قنوات الكلوريد Cl^- . تدخل أيونات الكلوريد إلى الخلية وتسبب فرط الاستقطاب في الغشاء، ما يجعله سالباً أكثر، ويُخفض احتمال إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية بعد التشابكية (الشكل 5-37b).

الجمع واتخاذ القرار

تكامل الإشارة واتخاذ القرار يحدثان كيميائيًا في جسم الخلية العصبية. تتلقى الخلية العصبية مدخلات من عدد من الخلايا العصبية الأخرى من خلال الزوائد الشجرية كما هو موضح في الشكل 5-38. يحدث الجمع مكانيًا حيث يتصل المحور بجسم الخلية ويتم إطلاق جهد الفعل إذا تجاوز جهد الغشاء جهد العتبة.

- تضيف مدخلات EPSP أيونات موجبة وتدفع شحنة الخلايا العصبية نحو جهد العتبة. هذا يزيد من احتمال إطلاق جهد الفعل.
- تضيف مدخلات IPSP أيونات سالبة أو تطرح أيونات موجبة وتجعل جهد الخلايا العصبية أكثر سلبية. هذا يقلل من فرصة إطلاق جهد الفعل.

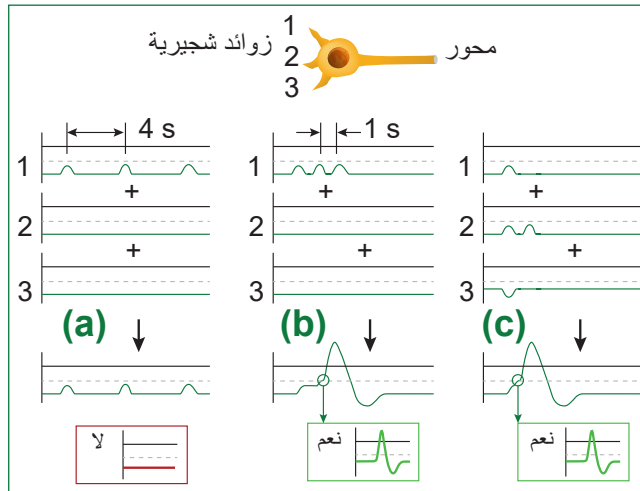


شكل 5-38 جمع المدخلات.

تطوّر الزائدة الشجرية النموذجية الكثير من الصلات أثناء نموها، ويصبح لها الكثير من التشعبات التي يكون كلٌّ منها بدوره صلة منفصلة. يتم جمع مدخلات EPSP و IPSP في الزائدة الشجرية التي استقبلتها معًا قبل أن تصل إلى جسم الخلية. أي أن السيات العصبية تصل الغشاء بعد التشابكي من مواضع مختلفة ولكن في نفس الوقت.

جمع زمني Temporal summation

تصل السيات العصبية الغشاء بعد التشابكي من نفس الموضع ولكن تفصل بينها فترة زمنية صغيرة. يؤثر وقت استقبال الإشارات العصبية المتعددة بشكل كبير في كيفية جمعها بواسطة الخلية العصبية. تستقبل الخلية العصبية بعض الإشارات العصبية EPSP أو IPSP المتعددة، التي تصل بفارق زمني بينها يتخطى الثانية الواحدة وتتعامل معها على أنها إشارات منفصلة لا يتم جمعها لأن النواقل العصبية يتم تحطيمها سريعًا لذلك لا يوجد ما يمكن جمعه. في حين إذا كان الفارق الزمني بين السيات العصبية قليلًا جدًا فإنه يمكن جمعها. لتوضيح هذه الفكرة، تخيل خلية عصبية لها ثلاث زوائد شجرية (الشكل 5-39). متى تطلق الخلية العصبية جهد الفعل (AP)؟



شكل 5-39 كيف تجمع الخلايا العصبية الإشارات.

- إشارات EPSP متعددة من الزائدة الشجرية نفسها وبفارق 4 ثوان بين الإشارة والتي تليها لا تطلق جهد الفعل AP.
- إشارات EPSP متعددة من الزائدة الشجرية نفسها وبفارق قليل جدًا تُجمع وتطلق جهد الفعل AP (جمع زمني).
- إشارات متزامنة من عدة زوائد شجرية يمكن أن تُجمع لتطلق جهد الفعل AP (جمع مكاني).

النواقل العصبية

يشمل الجهاز العصبي العديد من النواقل العصبية المختلفة من كلا النوعين: المنشط والمثبط. ستجد بعض النواقل العصبية الشائعة ووظائفها في الجدول 5-2. لكل ناقل عصبي إنزيم يقوم بتحليله أو آلية أخرى، بهدف إزالته من التشابك العصبي.

جدول 5-2 وظائف ومواقع النواقل العصبية الشائعة.

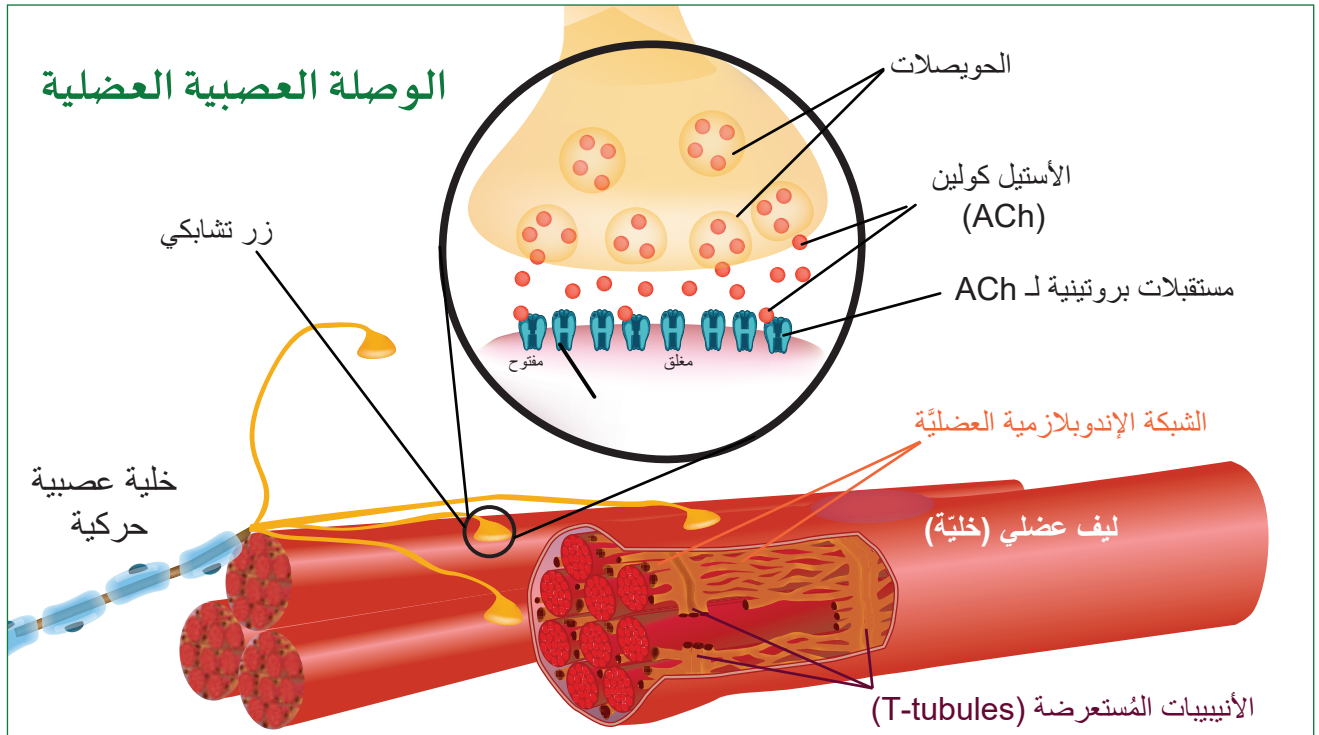
الوظيفة	موقع الاستخدام	الناقل العصبي
ينشط العضلات الهيكلية ويثبط عضلات القلب أو يستثير أعضاء الجهاز العصبي الذاتي	الجهاز العصبي المركزي والألياف العضلية	أستيل كولين
تقلل اليقظة، تخفض الألم، تبطل التنفس	الغدة النخامية	β إندورفين
ينظم السلوك الحركي ومراكز المتعة والمكافأة في الدماغ	الدماغ (nucleus accumbens)	دوبامين
يؤدي أدواراً رئيسة في استجابات الكرّ أو الفرّ، يؤثر في معدل دقات القلب وفي قطر الأوعية الدموية	الجهاز العصبي المركزي والذاتي	أدرينالين نورادرينالين
يثبط نشاط الدماغ يمكن أن يخفف من القلق يمنع تكوين الجلوكاجون (يعاكس نشاط الأنسولين)	الدماغ: الخلايا العصبية لقشرة الدماغ البنكرياس: الخلايا المنتجة للأنسولين	حمض الغاما أمينوبيوتيريك (GABA)
حمض أميني يحرض (يستثير) التشابكات العصبية وله دور في التعلم و الذاكرة.	الجهاز العصبي المركزي والطرفي	غلوتامات
ينظم عدداً من الوظائف، بما في ذلك حركة الأمعاء مع الشهية والمزاج والنوم	الجهاز العصبي المركزي والقناة الهضمية	سيروتونين

يُطلق على الغلوتامات أحياناً اسم «عامل الدماغ». فهو ينشط الأفكار والعواطف، ويمكن من تكوين الذاكرة عن طريق تقوية الروابط في التشابكات العصبية. لتحقيق التوازن في إثارة الغلوتامات، تعمل الخلايا العصبية المثبطة، مثل المكابح، لإطلاق حمض الغاما أمينوبيوتيريك (GABA) الذي يهدئ نشاط الدماغ. يفتح GABA القنوات الميوبة بأيون الكلوريد (Cl^-)، ما يجعل من الصعب على الخلايا العصبية توليد جهد فعل.

التشابكات العصبية الكيميائية في العضلات الهيكلية

تحدث الاستجابة السريعة والمنسّقة في العضلات الهيكلية نتيجة انتقال الإشارة عن طريق الخلايا العصبية الحركية إلى ملايين من خلايا العضلات الهيكلية في وقت واحد. توجد عند نهايات الخلايا العصبية الحركية على الليف العضلي حويصلات صغيرة (الشكل 5-40) ملأى بجزيئات ناقل عصبي في منطقة تُسمّى الوصلة العصبية العضلية Neuromuscular junction.

1. تؤدي السيالات التي تنقلها الخلايا العصبية الحركية إلى إطلاق الأسيتيل كولين (ACh)، وهو ناقل عصبي مخزون في الحويصلات في كل نهاية عصبية.
2. ينتقل الناقل العصبي ACh عبر نوع خاص من الشق التشابكي يُسمّى «الوصلة العصبية العضلية».
3. يرتبط ACh بمستقبلات خاصة على غشاء الخلية العضلية، ما يؤدي إلى حدوث جهد فعل. ينشر غشاء الليف العضلي (ساركولوما) جهد فعل على امتداد الغشاء عبر الليف العضلي بأكمله وعبر انغمادات غشائية تُسمّى أنابيب مستعرضة transverse tubules تمتد بين الألياف العضلية. يؤدي جهد الفعل هذا إلى إطلاق أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) التي تسبّب انقباض الليف. تطلق الإشارات المتعددة أو الإشارات المتكررة السريعة المزيد من الأسيتيل كولين، ما يؤدي إلى انقباض أسرع.



شكل 5-40 إطلاق الأسيتيل كولين (ACh) في الشقوق التشابكية مع الخلايا العصبية الحركية يحفز ألياف العضلات الهيكلية على الانزلاق والانقباض.

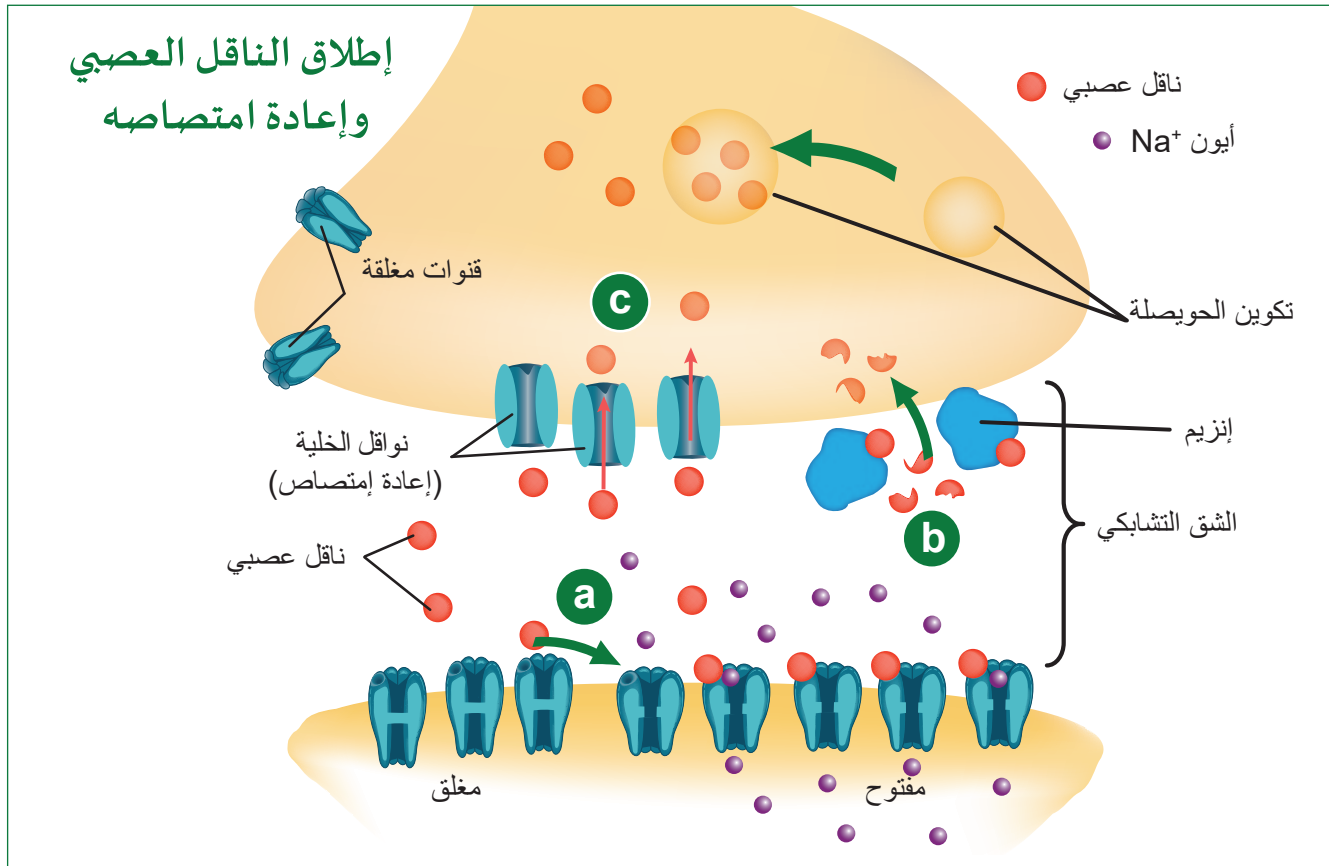
في العضلة الواحدة، تحتوي المجموعات الفردية من الألياف العضلية على مستقبلات فردية، وذلك للتحكّم في قوة استجابة العضلات. إذا وصلت الإشارة من الدماغ إلى العضلة ببذل قوة أكبر، يتم تحفيز عدد أكبر من مجموعات الألياف العضلية داخل العضلة نفسها لتنقبض. أمّا في الحركات الدقيقة التي تتطلب قوة أضعف، فيتمّ تحفيز المجموعات التي تحتوي على عدد أصغر من الألياف العضلية لتنقبض.

النواقل العصبية وإعادة الامتصاص

بمجرد مرور السيات العصبي وتفاعل الناقل العصبي مع مستقبله على الخلية العصبية المستقبلة، يكتمل اتصال الخلايا العصبية بعضها ببعض. يتم بعد ذلك تفكيك النواقل العصبية فتفقد قدرتها على الارتباط من جديد بمستقبلاتها، ما يمنع استدامة الاستثارة ويحرر بعض المستقبلات العصبية لتستقبل موجة أخرى من النواقل العصبية، وتكون جهد فعل جديدًا.

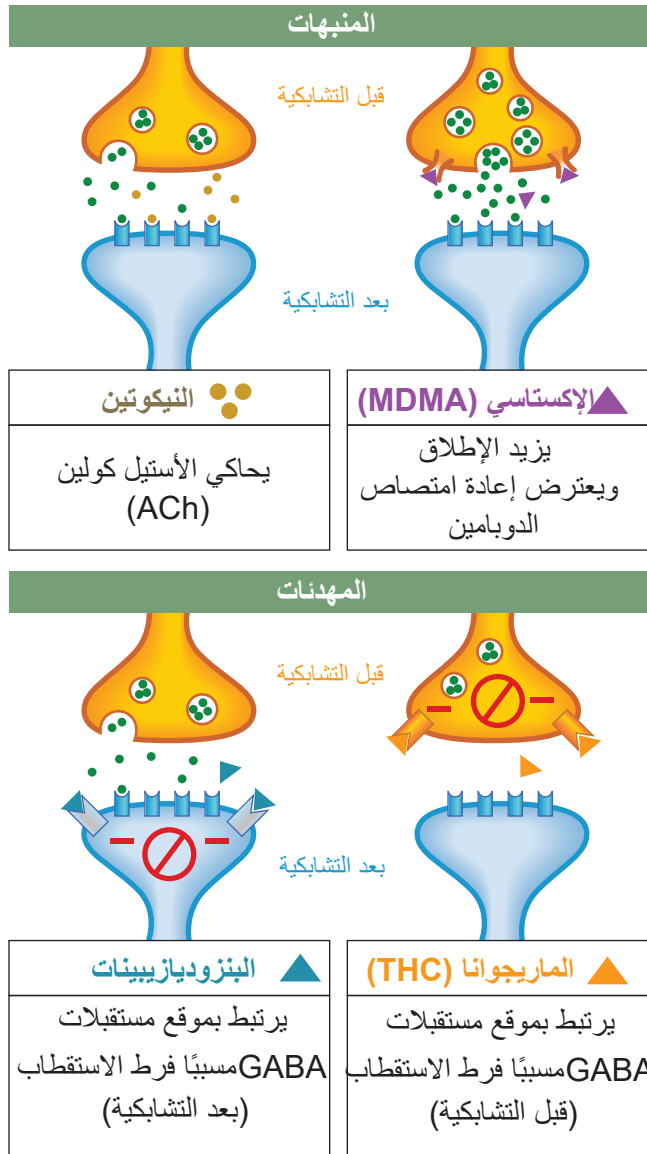
من الشق التشابكي، يمكن أن تسلك النواقل العصبية أحد الطرق الثلاثة:

- ترتبط بعض النواقل العصبية على الفور بمستقبل مفتوح آخر، والذي يسمح بإطالة وقت التواصل.
- تواجه بعض النواقل العصبية أنزيمات تفككها إلى جزيئات أصغر، كما في حالة الأسيتيل كولين (ACh)، ليعاد امتصاصها بواسطة الغشاء قبل التشابكي وتعود لتكوين نواقل عصبية جديدة.
- تدخل بعض النواقل العصبية ثانية إلى الخلايا العصبية قبل التشابكية باستخدام تركيب خاص يمتد على طول غشاء الخلية العصبية، يُسمى «الناقل». يضحّ **ناقل الخلية العصبية Neuron transporter** البروتيني جزيئات الناقل العصبي مرة أخرى إلى الخلايا العصبية قبل التشابكية. بمجرد العودة إلى داخل الخلية العصبية، تصبح جزيئات الناقل العصبي جاهزة لإعادة الإطلاق في نوبات النقل العصبي المستقبلية.



شكل 5-41 تتحرك بعض النواقل العصبية نحو مواقع مفتوحة على المستقبلات. (b) تواجه بعض النواقل العصبية إنزيمات، وتفتكك، ثم يُعاد امتصاصها. (c) تعود بعض النواقل العصبية إلى النهاية العصبية عبر بروتينات ناقلة.

تأثير العقاقير في وظائف التشابكات العصبية الكيميائية



تعمل بعض العقاقير عن طريق تعزيز مستقبلات الناقل العصبي أو اعتراضها أو امتصاص الناقل العصبي. بعض العقاقير هي ناهضات، وهي تعزز الرسائل التي تحملها النواقل العصبية، سواء أكانت منشطة أم مثبطة. العقاقير المناهضة تقلل فعالية النواقل العصبية أو تمنعها.

تتفاعل العقاقير مع الناقل العصبي بإحدى الطرائق المتعددة. يمكن للعقار:

a. زيادة إنتاج الناقل العصبي.

b. التسبب في الإطلاق المبكر للناقل العصبي مؤثراً بذلك في توقيت جهد الفعل.

c. التنافس أو الاعتراض من خلال الارتباط بموقع المستقبل.

d. التسبب في فرط الاستقطاب، ما يضعف احتمال إطلاق جهد الفعل (IPSP).

e. منع إعادة الامتصاص أو الحد منه.

يعرض الجدول أدناه ثلاث فئات من العقاقير مع أمثلة، وتأثير العقار في الجسم.

جدول 3-5 بعض فئات العقاقير وآثارها الإدمانية.

العقاقير المسببة للاكتئاب (المهدئات)		
الكحول الباربيتورات	الإدمان	تقلل من معدل دقات القلب والتنفس، تريح العضلات وتخفف التوتر
المنبهات		
الأمفيتامينات النيكوتين الإكستاسي	الإدمان	تسبب الإطلاق المفاجئ للدوبامين مسببة الرضى الشديد
المواد الأفيونية		
الكوديين الهيدروكودون المورفين الأوكسيكودون	الإدمان	تحاكي إندورفينات الدماغ تغلق مستقبلات الألم، تسبب النشوة

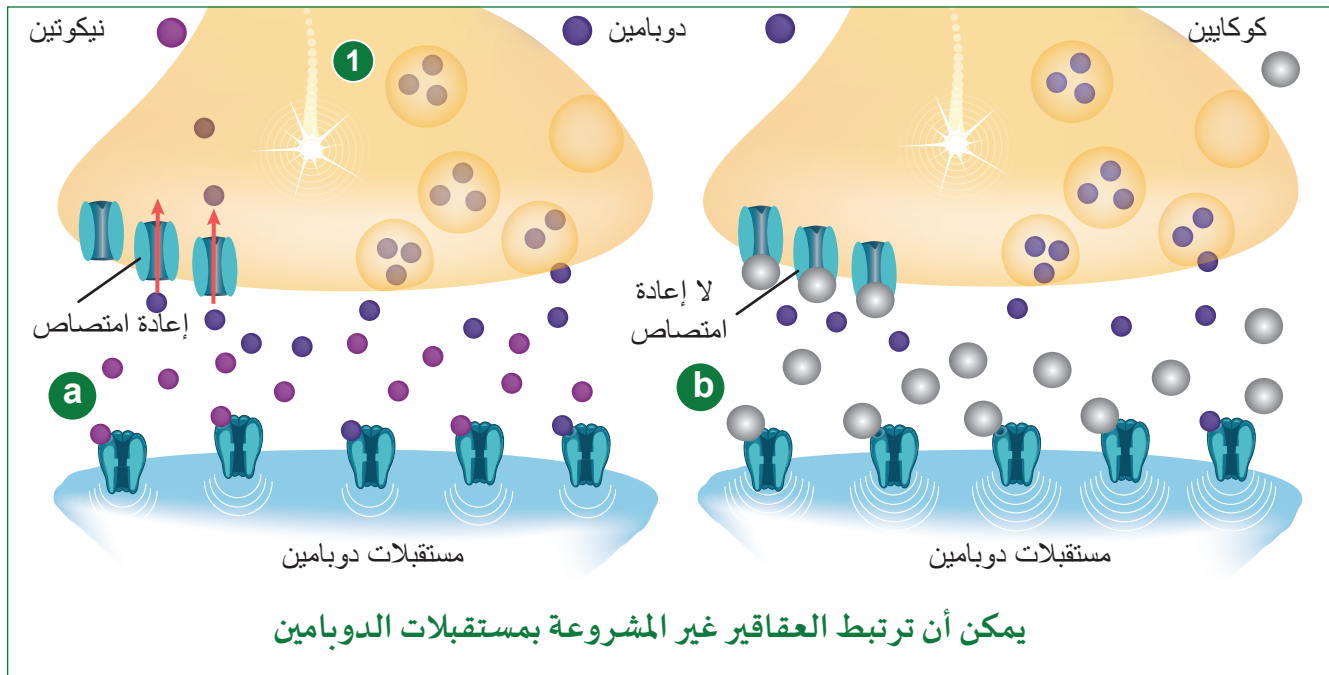
منبهات ومناهضات الدوبامين

الكافيين منبه لأنه يرتبط بمستقبلات الناقل العصبي الأدينوسين. يبطئ الأدينوسين الأيض الخلوي، ويجعلك تشعر بالنعاس. إذا ارتبطت جزيئات الكافيين بالمستقبلات، فلن تستطيع الخلايا التأثر بالأدينوسين. نتيجة لذلك، وبدلاً من التباطؤ بسبب مستوى الأدينوسين، فإن النشاط الخلوي يسرع.

الدوبامين هو ناقل عصبي في الدماغ يعمل في عدة مسارات عصبية. في أحد المسارات يرتبط بالسلوك المدفوع بالمكافأة. يزيد توقع المكافأة من مستوى الدوبامين في الدماغ. تزيد العقاقير المسببة للإدمان، مثل الكوكايين، من إفراز الدوبامين أو تمنع إعادة امتصاصه إلى الخلايا العصبية بعد إطلاقه.

النيكوتين، المادة المسببة للإدمان في السجائر، هو جزيء صغير يمكن أن يرتبط بمستقبلات الأسيتيل كولين (ACh) في الأغشية بعد التشابكية أو يحاكي مستقبلات الدوبامين في الشقوق التشابكية (الشكل 5-42a). يمكن أن يستنهمز النيكوتين مستويات عالية من الغلوتامات، فيزيد من نشاط الدماغ ويجعل المستخدم يشعر بمزيد من اليقظة. ومع ذلك، فإن تأثير العقار لا يدوم طويلاً.

الكوكايين منبه قوي له تأثيرات هي أقوى في الدماغ من معظم المنبهات الأخرى. آثار الكوكايين قوية إلى درجة يمكن عندها أن ينتج عنه شغف لا يمكن السيطرة عليه للحصول على المزيد عن طريق محاكاة الدوبامين وكبح إعادة امتصاصه (الشكل 5-42b). تصبح هناك حاجة إلى إمداد مستمر من الكوكايين للاكتفاء.



شكل 5-42 (a) يمكن للنيكوتين تقليد مستقبلات الدوبامين في مسار المكافأة. (b) يمنع الكوكايين إعادة امتصاص الدوبامين.



تأثير منبه كيميائي

2-5

سؤال الاستقصاء	كيف يؤثر الكافيين في معدل دقات القلب لدى برغوث الماء Daphnia؟
المواد المطلوبة	مزارع دافنيا (برغوث الماء) حية، مجاهر LED، زجاج مراقبة، شرائح زجاجية، أغشية شرائح، قطارات، ساعات إيقاف، محلول كافيين.

الخطوات



شكل 5-43 برغوث الماء.

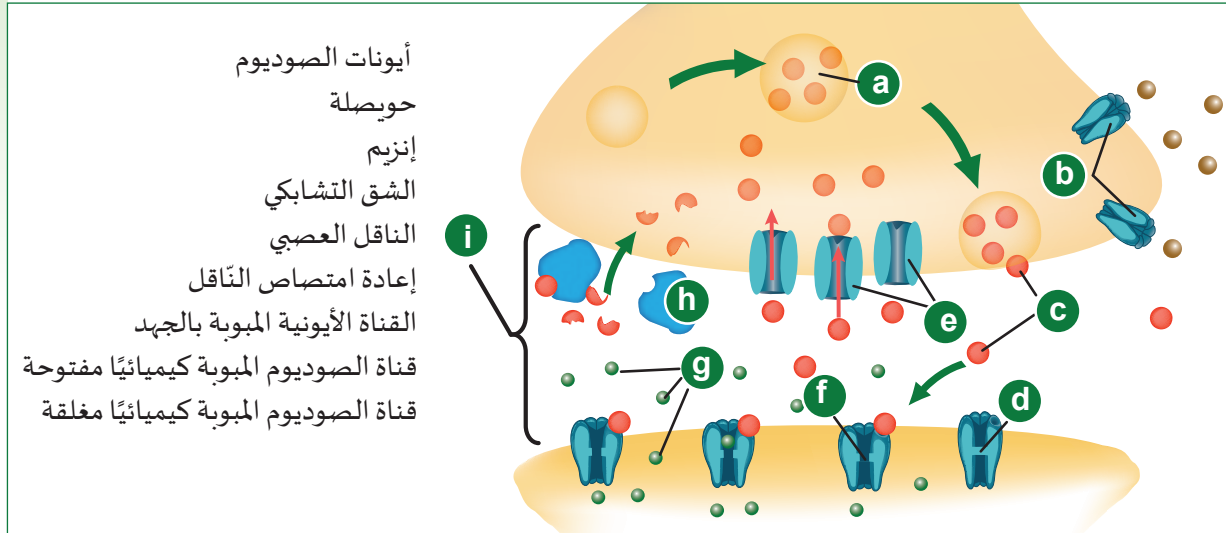
1. اعتمادًا على عدد المجاهر، قد تعمل مع زميل أو ضمن مجموعة.
2. استخدم ساعة إيقاف للتواصل مع زميلك محددًا بها بداية التواصل ونهايته. استخدم فترات من 15 ثانية. سجل المحاولات على ورقة العمل. عندما يكون متوسط خمس محاولات موقوتة في غضون 0.5 +/- ثانية، تستطيع الاستمرار.
3. استخرج بعناية بضعة براغيث ماء من عينة الصف باستخدام قطارة، وضعها على زجاج مراقبة. تأكد من بقاء الزجاج ممتلئًا باستخدام ماء من العينة الأصلية.
4. حدّد موقع برغوث واحد واعزله تحت المجهر وركّز النظر عليه تحت أقل قوة تكبير (4X-10x) لتتأكد من أنه حيّ قبل إضافة غطاء الشريحة.
5. اذكر أسماء تراكيبه وحدّد المنطقة الظهرية حيث يمكن أن ترى القلب. إذا لزم الأمر، قم بتغيير التكبير أو احصل على برغوث جديد إذا لم تتمكن من الكشف على دقات القلب.
6. عندما تكون جاهزًا، قم، بالتنسيق مع أعضاء فريقك، بعدد دقات القلب في فترات زمنية مدتها 15 ثانية، ثم اضرب في 4. معدل دقات القلب في برغوث الماء الصحي يتراوح بين 2 و 5 دقات / ثانية. سجّله في الجدول 1.
7. كرّر محاولتين، واحسب متوسط البيانات، واتبع خطوات ورقة العمل لاختبار تأثير محلول الكافيين في البرغوث نفسه.

صمّم تجربة



اختر من بين المحاليل التي قدّمها معلمك كي تصمّم تجربة أخرى لاختبار تأثير تغيير تركيزات المحلول في معدل دقات القلب لدى برغوث ماء *Daphnia* طازج. الأمثلة تشمل الإيثانول، أو كولا بلا كافيين مع السكر، أو مشروب طاقة. وإذا سمح الوقت، حاول التوقع والحصول على الموافقة، ثم قم بتجربتك.

1. عند أيّ مما يأتي تحدث إزالة الاستقطاب لغشاء العصبون؟
 - a. عندما يصبح جهد الغشاء موجبًا.
 - b. عندما يصبح جهد الغشاء سالبًا.
 - c. عندما يصل جهد الغشاء إلى قيمته القصوى.
 - d. عندما ينخفض جهد الغشاء إلى ما دون جهد الراحة.
2. اشرح الفرق بين القناة الأيونية للنقل السلبي والقناة الأيونية المبوّبة واستخدم الأوصاف والأمثلة. 
3. بيّن كيف يتم إنشاء تيار صغير عبر غشاء المحور في مخطّط بسيط. 
4. ما هي العوامل التي تزيد سرعة انتقال السيات العصبي عبر المحور؟ 
5. ما هي التراكيب المسؤولة عن التحكم في جهد الراحة الغشائي؟ ولماذا لا تتوازن الشحنات على كلا الجانبين؟ 
6. نفّذ جدولًا بسيطًا يقارن بين التشابك العصبي الكيميائي والتشابك العصبي الكهربائي. اذكر خمس خصائص على الأقل. 
7. اذكر اثنين من النواقل العصبية المنشّطة واثنين من النواقل المثبطة، و حدد مكان الخلايا العصبية التي تستخدمها. 
8. اذكر نوع التشابك العصبي وطابق الأسماء بالتراكيب المشار إليها بحرف. 



9. سؤال بحثي: تعمل بعض المبيدات الحشرية على تثبيط إنزيم أستيل استيريز في الحشرات والإنسان، ما يؤدي إلى تراكم الأسيتيل كولين في التشابكات العصبية. ما التأثير المحتمل لذلك في الحشرات والإنسان؟ 

الدرس 3-5

الدماغ والتحكم الهرموني The Brain and Hormonal Control

مخرجات التعلّم

B1212.1 يحدد المواقع والوظائف الرئيسية لكل من النخاع المستطيل، والمخيخ، والمخ (نصفي الكرة المخية)، وتحت المهاد، والغدة النخامية في دماغ الإنسان.

B1212.2 يشرح آلية عمل تحت المهاد كحلقة وصل بين الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء.

B1213.1 يتعرّف إلى أسماء ومواقع الغدد الصماء الرئيسية في جسم الإنسان ويصف وظائف الهرمونات التي تنتجها.

B1213.2 يعرف أن هناك مجموعتين رئيسيتين من الهرمونات وهي الهرمونات الستيرويدية والهرمونات الببتيدية، ويعطي أمثلة لكل منهما.

B1213.3 يشرح آليات عمل الهرمونات الستيرويدية بدخولها المباشر إلى الخلية، والهرمونات الببتيدية التي ترتبط بالمستقبلات على غشاء الخلية وتحتوي على رسول ثانٍ.

تُعدّ دراسة التأثيرات الطبية للعقاقير، مثل الهرمونات الاصطناعية، أمرًا صعبًا لأن من المستحيل رؤية التأثيرات إلا على الكائنات الحية.

يكون سمك الزيبرا المخطّط (zebrafish) في الغالب أكثر قيمة لعلم الأعصاب مما هي الفئران أو الجرذان لدراسات بعض أنواع العقاقير (الشكل 5-44). يستخدم العلماء أجنة هذه الأسماك لتحديد المستويات السامة من العقاقير الدوائية، لأن البيض يتطوّر بسرعة ويكون شفافًا، ويمكن مشاهدة تطوّر الجهاز العصبي بأكمله، من جنيني إلى بالغ. لكنّ هذا الاختبار لا يحلّ محل الاختبارات النهائية على الإنسان، إلا أنه يمكن تقييم الكثير من مركّبات العقاقير المحتملة قبل المخاطرة بالتجارب على الإنسان.



شكل 5-44 الجهاز العصبي لسمك الزيبرا المخطّط.

المفردات

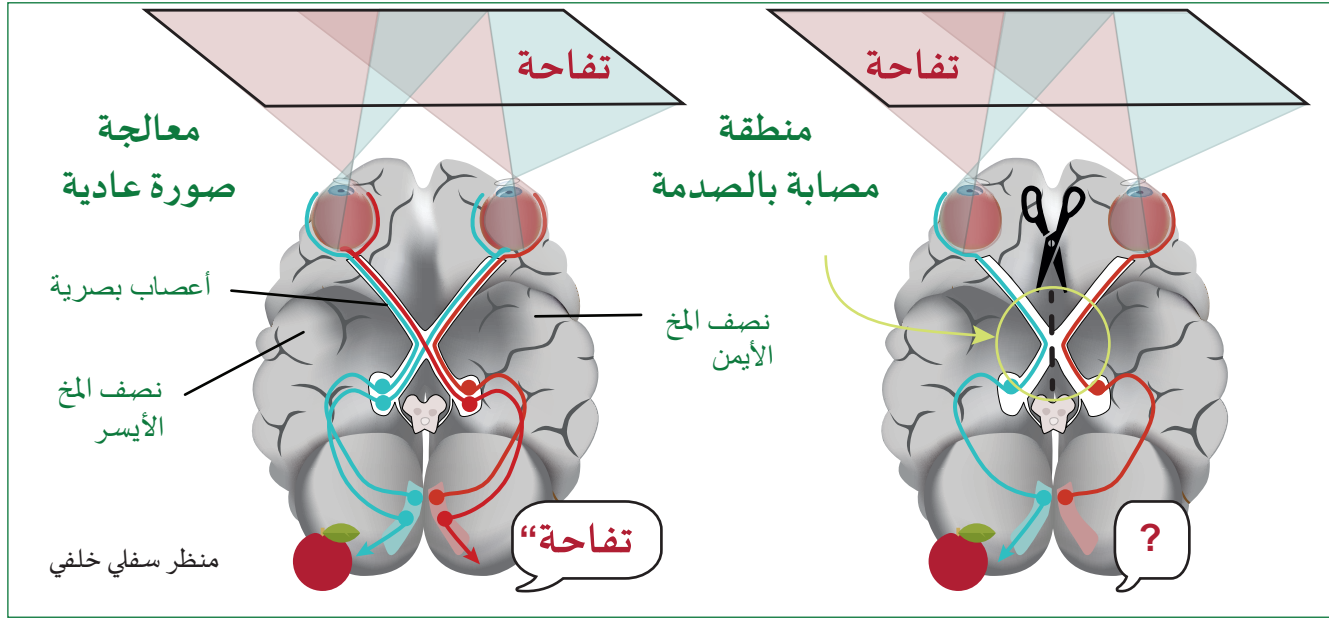


Brain lobes	فصوص الدماغ
Endocrine system	جهاز الغدد الصماء
Hypothalamus	تحت المهاد
Pituitary gland	الغدة النخامية
Steroid hormone	الهرمون الستيرويدي
Morphine	المورفين

الرجل ذو الدماغين



تؤدي الإصابات الشديدة في الدماغ في أغلب الأحيان إلى تغيير في الأفعال المنعكسة أو الاستجابات. على سبيل المثال: أصيب جندي مظلي في الحرب العالمية الثانية عُرف باسم W.J. بنوبات الصرع، بعد أن ضربه جندي ألماني على رأسه بعقب البندقية. مريض آخر مصاب في الدماغ فقد القدرة على المعالجة البصرية. إذا ظهرت كلمة "تفاحة" في أقصى الجانب الأيمن من الشاشة، فإن المريض يتعرف إليها، ويمكن له أن يقول "تفاحة". أما إذا وُضعت الكلمة نفسها في أقصى الجانب الأيسر من الشاشة، فلا يتعرف المريض إليها لينطق بها، ولكنه يستطيع رسمها (الشكل 5-45).



شكل 5-45 صدمة الرأس في الجسم الثفني لها تأثيرات غير عادية.

يستخدم مصطلح «انفصال الدماغ» في أغلب الأحيان لوصف نتيجة إجراء جراحي في الجسم الثفني، تم القيام به لأول مرة في الأربعينيات. يكون نصف الدماغ الأيمن والأيسر في الحالة الطبيعية متصلين بواسطة الجسم الثفني Corpus callosum، وهو حزمة من الأعصاب في منتصف الدماغ التي تشارك في المعلومات. تربط الأعصاب العميقة الموجودة في مركز الدماغ النصفين معاً بحيث يكون لكل منهما إمكانية الوصول إلى البيانات التي يعالجها النصف الآخر.

ما هو الجسم

الثنفي؟ وماذا

يحدث عندما

يتعرض للإصابة؟

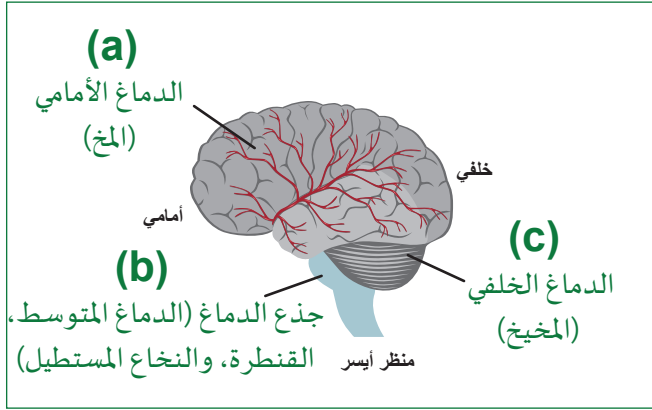


بحلول الستينيات، بات من الممكن معالجة نوبات الصرع الحادة بهذه الجراحة. عندما يُقطع الجسم الثفني، يتوقف نشاط الصرع بين نصفي الدماغ. وإذا كانت هذه العمليات الجراحية ناجحة في أغلب الأحيان، إلا أنها أزلت كل الإشارات بين نصفي الدماغ.

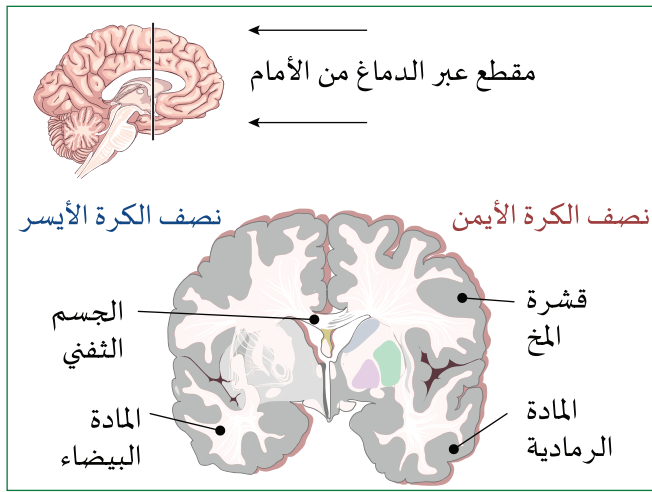
قام العالمان ر. سبيري R. Sperry و م. جازانيجا M. Gazzaniga الحائزان على جائزة نوبل بدراسة الذين خضعوا لقطع الجسم الثفني،

فبدا لهما أن قطع الجسم الثفني يجعل كل نصف من كرة الدماغ يتحكم في عملياته مستقلاً عن النصف الآخر. اليوم، نحن نظن أن كثيراً من التأثيرات هي تأثيرات مؤقتة، وأن مهام المعالجة هي أكثر شمولاً بسبب قدرة الدماغ على التكيف وإعادة التعلم.

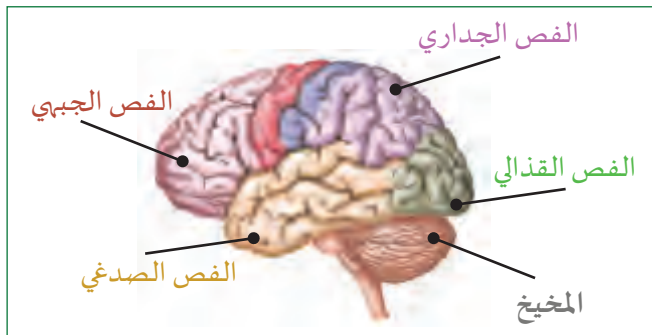
تركيب الدماغ



شكل 5-46 التراكيب الرئيسية للدماغ.



شكل 5-47 داخل الدماغ.



شكل 5-48 فصوص المخ الأربعة والمخيخ.

يبلغ وزن دماغ الإنسان في المتوسط 1500 غرام تقريبًا، ويحتوي ما يزيد على 86 مليار خلية عصبية. يتكون دماغ الإنسان من ثلاثة تراكيب رئيسة (الشكل 5-46).

- الدماغ الأمامي Forebrain:** يقع في الأمام وفي أعلى الجمجمة، ويحتوي على **المخ Cerebrum**.
- جذع الدماغ Brain stem:** يتصل بالحنبل الشوكي، ويشمل الدماغ المتوسط والبنقرة والنخاع المستطيل.
- الدماغ الخلفي Hindbrain:** يوجد خلف جذع الدماغ، ويحتوي على المخيخ.

المخ

المخ هو أكبر منطقة من الدماغ، وهو مسؤول عن الأنشطة الواعية، مثل التعلم والحكم. للمخ سطح لفائفي بالكامل يُسمى **قشرة المخ Cerebral cortex** (الشكل 5-47).

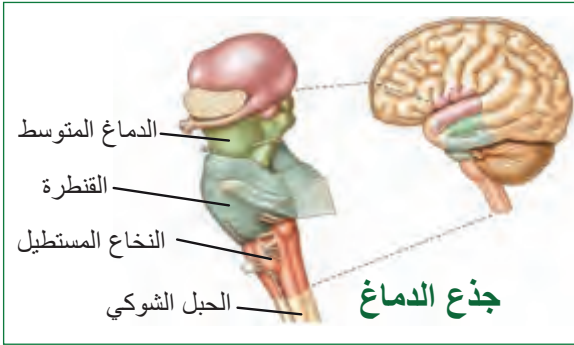
تحتوي القشرة على **المادة الرمادية Grey matter** التي هي في الغالب أجسام الخلايا العصبية، مع عدد قليل من المحاور. تأتي تحت قشرة المخ **المادة البيضاء White matter**. تتكون المادة البيضاء أساسًا من محاور مغلفة بالميلين ما يعطيها اللون الفاتح.

ينقسم المخ إلى نصفي الكرة المخية الأيمن والأيسر. يقوم نصف الكرة المخية بمعالجة المعلومات بطرائق مختلفة، ويتصلان بحزمة من المحاور تُسمى **الجسم الثفني Corpus callosum**.

يحتوي المخ على أربع مناطق رئيسة تُسمى «الفصوص»: **الفص الجبهي Frontal lobe** مهم للوظائف المعرفية والتحكم في الحركة أو النشاط الإرادي. يعالج **الفص الجداري Parietal lobe** المعلومات حول الإدراك والأحاساس بالعالم الخارجي والمهارات اللغوية والحسابية. **الفص القذالي Occipital lobe** هو المسؤول الأول عن البصر. يعالج **الفص الصدغي Temporal lobe** الذكريات ويدمجها في أحاسيس الذوق والصوت والبصر واللمس (الشكل 5-48).

المُخَيِّخ وجذع الدماغ

يقع المخيخ cerebellum خلف المخ وتحتة. يستقبل المُخَيِّخ المعلومات من الأنظمة الحسية والحبل الشوكي وأجزاء أخرى من الدماغ. ينسق المُخَيِّخ أيضًا التفاصيل الدقيقة للحركات التي يشير إليها المخ. ينسق المُخَيِّخ أيضًا بعض الحركات، مثل وضع الجسم والتوازن والتنسيق والكلام. كل الفقاريات لديها مخيخ. في معظم الحيوانات يكون المخيخ أكبر من المخ.



شكل 49-5 جذع الدماغ والحبل الشوكي.

يتصل الدماغ ببقية الجسم بوساطة جذع الدماغ. يشكل جذع الدماغ الجزء العلوي من الحبل الشوكي كما هو موضح في الشكل 49-5 ويتضمن ثلاثة تراكيب:

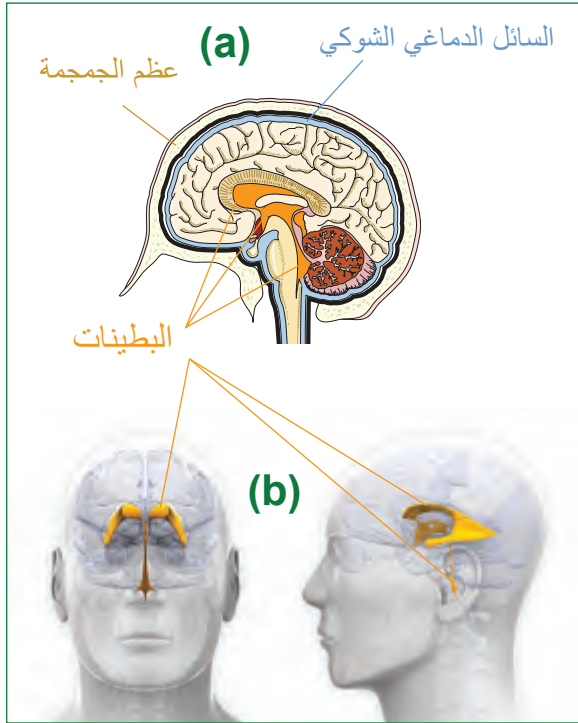
- **الدماغ المتوسط midbrain** الذي يعالج المنعكسات السمعية والبصرية.

- **النخاع المستطيل medulla oblongata** الذي ينظم من خلال الجهاز العصبي الذاتي معدل دقات القلب، وينظم قطر الأوعية الدموية ومعدل التنفس.

- **القنطرة pons** التي ترحل الإشارات بين الدماغ الأمامي والمخيخ، وتربط النخاع المستطيل بالدماغ الأوسط.

السائل الدماغي الشوكي

يُحاط كلٌّ من المخ و الحبل الشوكي بثلاث طبقات من النسيج الضام وبسائل يُسمّى **السائل الدماغي الشوكي Cerebrospinal fluid**، الذي يشكل طبقة بين النسيج العصبي والعظم (الشكل 50-5a). السائل الدماغي الشوكي يترشح من بلازما الدم إلى بطينات الدماغ من بلازما الدم، ولكنه يحتوي على بروتينات أقل بكثير، بالإضافة إلى إلكترولايتات أكثر، مثل أيونات الصوديوم. يعمل السائل الدماغي الشوكي كمادة ماصة للصدمات لحماية الأنسجة الرقيقة في الدماغ والحبل الشوكي.



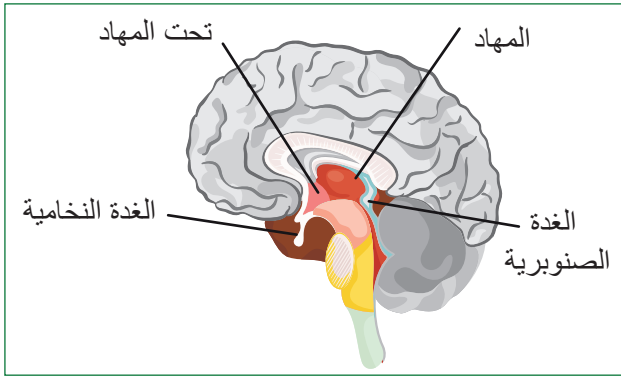
شكل 50-5 الدماغ محاط ومبطن بالسائل النخاعي.

يتكوّن السائل الدماغي الشوكي ويدور عبر **البطينات Ventricles**. البطينات هي أربعة تجاويف داخل الدماغ تحتوي على السائل الدماغي الشوكي. يوجد بطينان جانبيان: واحد على كل جانب من قشرة المخ. البطينان الجانبيان متصلان بالبطين الثالث المتصل بالبطين الرابع الذي يمتد على طول الدماغ. (الشكل 50-5b).

في الدماغ جزء من جهاز الغدد الصماء

يحتوي الدماغ على نوعين متميزين من التراكيب.

1. التراكيب التي تعالج المعلومات، وتنتج استجابات من خلال الأعصاب. هذه التراكيب هي جزء من الجهاز العصبي المركزي (CNS).
2. التراكيب التي تنتج الهرمونات، والتي تنتج الاستجابات من خلال الإشارات الكيميائية. هذه التراكيب هي جزء من جهاز الغدد الصماء.



شكل 5-51 التراكيب الغددية الصماء في الدماغ.

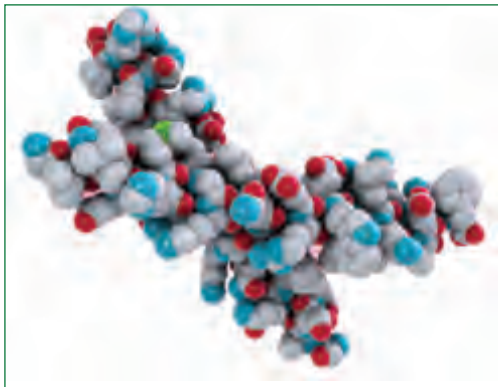
يشمل جهاز الغدد الصماء **Endocrine system** الغدد والأنسجة التي تفرز الهرمونات التي تعمل كرسول كيميائيين في الجسم. التراكيب الغددية الصماء الأربعة في الدماغ هي **تحت المهاد Hypothalamus**، **الغدة الصنوبرية Pineal gland** و**الغدة النخامية Pituitary gland** (الشكل 5-51).

تتمثل الوظائف الرئيسية لجهاز الغدد الصماء في تنظيم عملية الأيض والنمو والتطوير والتكاثر. تنظيم الأيض هو جزء من **الاتزان الداخلي Homeostasis**. يصف الاتزان الداخلي الطرائق التي يحافظ بها الجسم على بيئة داخلية ثابتة لخلايا الجسم. وجهاز الغدد الصماء هو العامل الأساسي للاتزان الداخلي الذي هو موضوع الوحدة القادمة.

جهاز الغدد الصماء أربع وظائف رئيسية تشمل: الاتزان الداخلي والنمو والتطوير والتكاثر.



يعمل جهاز الغدد الصماء من خلال **الهرمونات Hormones**. يتم إطلاق الهرمونات بواسطة الغدد الصماء في الدم أو اللمف. وكالنواتل العصبية، فإن الهرمونات هي جزيئات حيوية ترتبط بنوع محدد من المستقبلات لتحفز أنشطة خلوية. بشكل عام، فإن المستقبل خاص بهرمون واحد. ومع ذلك، يمكن لبعض الهرمونات أن تؤثر في أكثر من نوع واحد من المستقبلات لتنتج استجابات مختلفة.



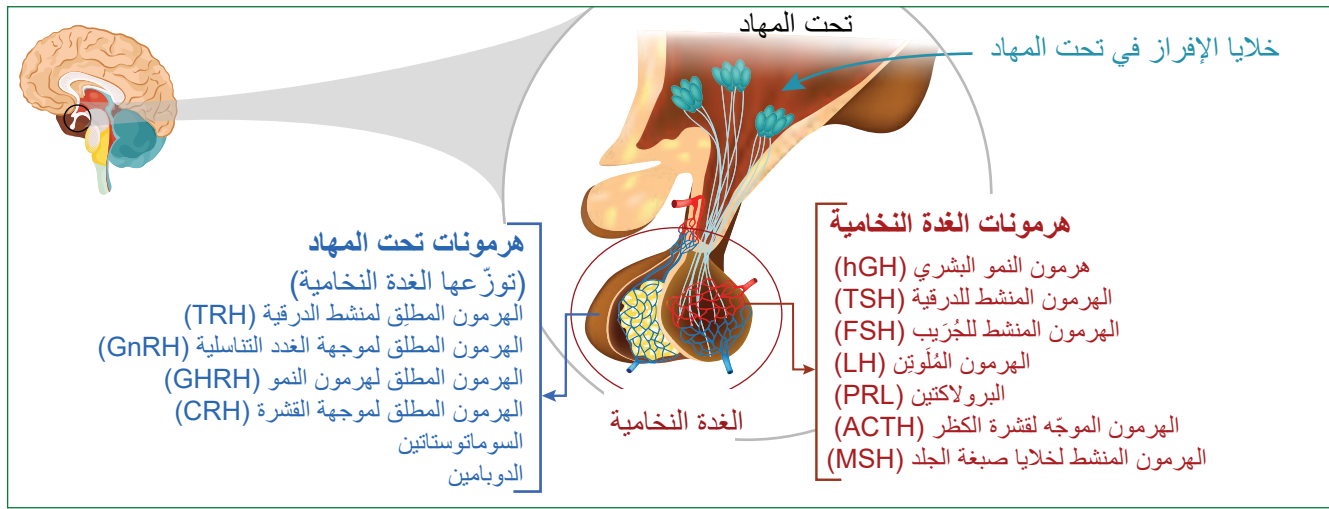
شكل 5-52 هرمون الغدة الدرقية لدى الإنسان.

الهرمونات والنواقل العصبية هي في الغالب مركبات مختلفة ذات وظائف مختلفة:

- تستهدف الهرمونات خلايا معينة في الجسم لتغيير الأيض في هذه الخلايا
- تعمل النواقل العصبية فقط عند التشابكات العصبية لزيادة السيالات العصبية أو تقليلها.
- يشكل الأدرينالين والدوبامين استثناءين، فكلاهما هرمونان وناقلان عصبيين.

تحت المهاد مركز تحكم رئيس

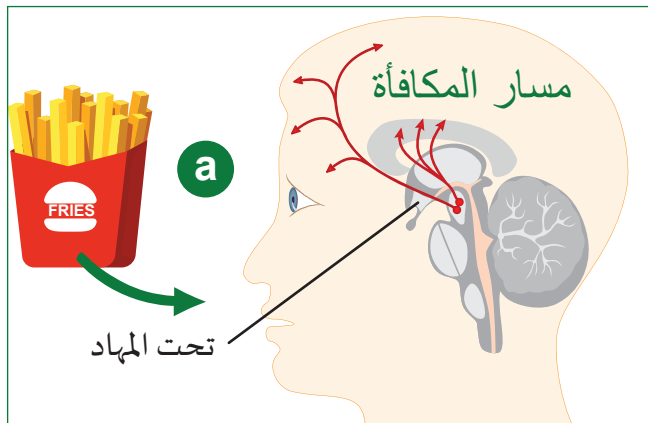
- على الرغم من صغر حجمه، فإن «تحت المهاد» هو مركز تحكم رئيس في الجسم. تتأثر معظم الأنسجة في الجسم بالوظائف الست (6) الرئيسة لتحت المهاد الذي له الوظائف الآتية:
- a.** ينظم من خلال الجهاز العصبي عمليات الهضم، **d.** ينظم دورة النوم والاستيقاظ.
 - b.** ينظم امتصاص الطعام.
 - c.** ينظم توازن الماء والعطش.
 - e.** هو مركز التحكم في العاطفة والتحفيز.
 - f.** يتحكم في الغدة النخامية من خلال هرمونات عصبية.



شكل 53-5 تنتج الغدة النخامية عددًا من الهرمونات الرئيسة.

يتم تنفيذ عدد من وظائف التحكم الخاصة بتحت المهاد بواسطة الغدة النخامية المتصلة بأسفل منطقة تحت المهاد.

- تخزين الغدة النخامية الهرمونات التي يُنتجها "تحت المهاد" وتطلقها في مجرى الدم.
- تُطلق الغدة النخامية هرمونات إضافية مثل هرمون النمو البشري (hGH).



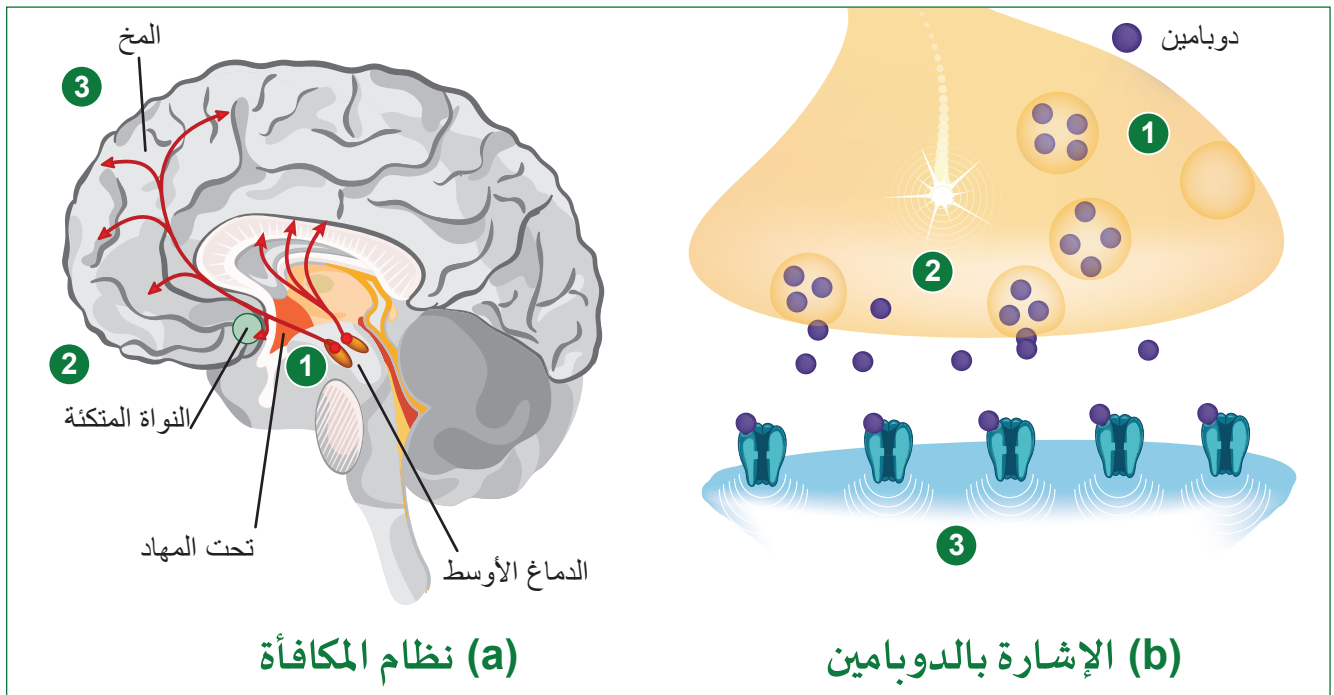
شكل 54-5 مسار نظام المكافآت في الدماغ قد يربط الغذاء (a) بإشارة تحت المهاد لإطلاق الدوبامين (b).

- لتوضيح الاتصال بين الغدة الصماء والدماغ، يحفز «تحت المهاد» الدماغ المتوسط على إنتاج الدوبامين وإطلاقه. يخلق الدوبامين الشعور بالرضا في الدماغ. تناول الطعام الذي نحبه، مثل البطاطس المقلية، ينشئ مسارًا عصبياً يربط هذا الطعام بإشارة إلى «تحت المهاد» لتحفيز الدماغ الأوسط على إطلاق الدوبامين (الشكل 54-5).

مركز المكافأة يتضمن الدافع والعاطفة

يتضمن الدافع والعاطفة مسارات عصبية معقدة للغاية ترتبط بالمخّ والأنسجة الغددية الصماء. الدافع هو تغذية راجعة داخلية تؤثر في سلوكنا الإرادي. يصعب وصف العواطف، لكن كثيرًا من الأشخاص يعبرون عنها بمقادير من الرضى أو الخوف أو اللذة أو الفرح أو الأسى أو الأذى أو الألم.

يأتي الرضا جزئيًا من إشارات جسمية بيئية داخلية ومن رسائل بيئية خارجية نكشفها، مثل تلك التي نشعر بها عند أكل طعام شهّي أو عند الحصول على مكافأة مالية. السلوكيات المرتبطة بالدافع للحصول على ذلك الرضا هي جزء من نظام المكافأة في الدماغ، يسهم فيها «تحت المهاد» والدماغ الأوسط والنواة المتكئة (الشكل 5-5a).



شكل 55-5 (a) تشارك ثلاث مناطق من الدماغ في نظام المكافأة. (b) الدوبامين هو الناقل العصبي الذي تطلقه الخلايا العصبية في الدماغ، ويمكن تضخيمه مع انتشار النقل.

الدوبامين يعمل كناقل عصبي في الجهاز العصبي المركزي، وكهرمون يفرزه الدماغ الأوسط وينشط المسار العصبي لنظام المكافأة. يتضمن المسار ثلاث خطوات أساسية:

1. يتعرّف «تحت المهاد» إلى المادة المحفزة ويربط الحافز بمسار مكافأة لإنتاج الدوبامين في الدماغ الأوسط.
2. ينتقل الدوبامين إلى النواة المتكئة لانتظار إشارة استثارة «للاطلاق» أو إشارة تثبيط «للتوقّف». المخّ هو من يحدّد إطلاقها.
3. ترسل إشارة منشطة نشاطاً في المخّ حتى ندرك الرضى. كلما ازداد الدوبامين في المسار العصبي، تضخّمت الاستجابة العصبية وازدادت شدة إدراك المكافأة.

الغدد الصماء الرئيسية

الغدد هي أعضاء تفرز موادًا. الغدد العرقية هي غدد إفراز خارجي لأنها تفرز العرق على الجلد. الكبد غدة خارجية الإفراز وغدة صماء معًا. تفرز الكبد في الاثنى عشر مادة تُسمى "الصفراء" (غدة إفراز خارجي) وتفرز ثلاثة هرمونات في مجرى الدم (غدة صماء).

جدول 4-5 مقارنة غدد الإفراز الخارجي بالغدد الصماء.

آلية الإفراز	غدد الإفراز الخارجي	الغدد الصماء
تفرز من خلال قناة على سطح نسيج طلائي مثل الجلد	تفرز مباشرة في مجرى الدم	
المخاط واللّعاب ومواد أخرى	الهرمونات	
الغدد اللعابية والغدد العرقية	الغدة النخامية والغدة الدرقية	

الغدد الصماء

يلخص الشكل 5-56 الغدد الصماء الأساسية ووظائفها.

a. الغدة الصنوبرية - تدرك النهار والليل لتنظيم دورة النوم

b. تحت المهاد/المهاد - تتحكم في الغدة النخامية عبر تغذية راجعة من الدم

c. الغدة النخامية - تفرز تسعة (9) هرمونات للتحكم في الغدد الأخرى

d. الغدة الدرقية Thyroid - تنظم عمليات الأيض

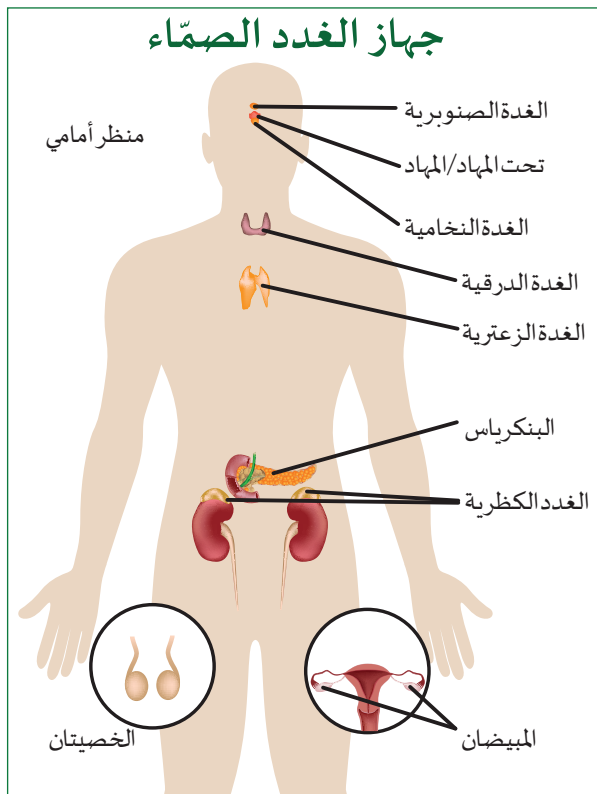
e. الغدة الزعترية Thymus - تمكن الاستجابة المناعية في مرحلة الطفولة.

f. البنكرياس Pancreas - يتحكم في مستويات الجلوكوز للطاقة بإفراز الأنسولين والجلوكاجون.

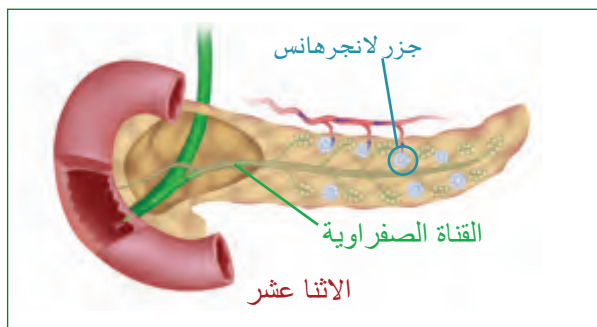
g. الغدد الكظرية Adrenals - تنظم هرمونات التوتر وتراقب مستويات الجلوكوز.

h. المبيضان Ovaries و (i) الخصيتان Testes - يتحكمان في البلوغ وفي إنتاج الأمشاج.

البنكرياس هو من الغدد الصماء وغدد الإفراز الخارجي. تفرز جزر لانجرهانس هرمون الأنسولين في الدم، وهو هرمون ينظم سكر الدم. يفرز البنكرياس أيضًا إنزيمات هضمية في القناة الصفراوية التي تؤدي إلى الاثنى عشر (الشكل 5-57).



شكل 5-56 الغدد الرئيسية لجهاز الغدد الصماء.



شكل 5-57 البنكرياس.

الهرمونات

جهازان أساسيان يساعدان الجسم على التحكم في تنظيم نفسه: الأول هو الجهاز العصبي الذي يعمل من خلال النبضات الكهروكيميائية. والثاني هو جهاز الغدد الصماء الذي يعمل من خلال الهرمونات الكيميائية. يقارن الجدول 5-5 بين هذين النظامين.

جدول 5-5 مقارنة بين الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء.

نمط الاتصال	الجهاز العصبي	جهاز الغدد الصماء
الرسول	كهروكيميائي	كيميائي
النقل	الأيونات، النواقل العصبية	الهرمونات
المدى	الاتصال المباشر بين العصب والخلية	الاتصال غير المباشر من خلال الدم
السرعة	ضيق - الخلايا المستهدفة فقط	واسع - يصل إلى خلايا كثيرة
الوقت	كبيرة	بطيئة
	قصير	طويل

يتطلب التحكم في الحركة والتفكير إشارات سريعة تصل إلى خلايا محدّدة، والجهاز العصبي مهياً جيداً لهذا الدور. يتطلب التحكم في وظائف الجسم مثل درجة الحرارة والنمو وأيض الخلايا مدًى واسعاً كي يصل إلى الخلايا في جميع أنحاء الجسم لفترات أطول، وجهاز الغدد الصماء مهياً جيداً لهذه الأدوار.

يمتلك البشر ما يقرب من 50 هرموناً مختلفاً، تنتقل في السوائل الخارج خلوية أو في الأوعية الدموية. يستهدف عدد من الهرمونات أنواعاً معينة من الخلايا، مثل الغدد التناسلية (التستوستيرون) أو الغدة الصنوبرية (الميلاتونين). تعمل الهرمونات على المستقبلات المستهدفة مباشرة، ولكن المستقبلات تقع في أماكن مختلفة، فيتغيّر أوان استجابة الخلايا ومدتها.

تؤثر الهرمونات في أربعة أنشطة أيضية في الخلايا:

1. نفاذية الغشاء 3. إفرازات الخلايا

2. تنشيط / تثبيط الإنزيم 4. بناء البروتين

تصنيف الهرمونات

تنقسم الهرمونات بشكل عام إلى فئتين: الهرمونات الستيرويدية والهرمونات الببتيدية.

• الهرمونات الستيرويدية مشتقة من الكوليسترول، وهي ذات أساس ليبيدي. الأساس الليبيدي يعني أن الستيرويدات لا تذوب في الماء، لكنها تستطيع أن تمرّ بسهولة من خلال أغشية الخلايا بسبب طبيعتها الدهنية.

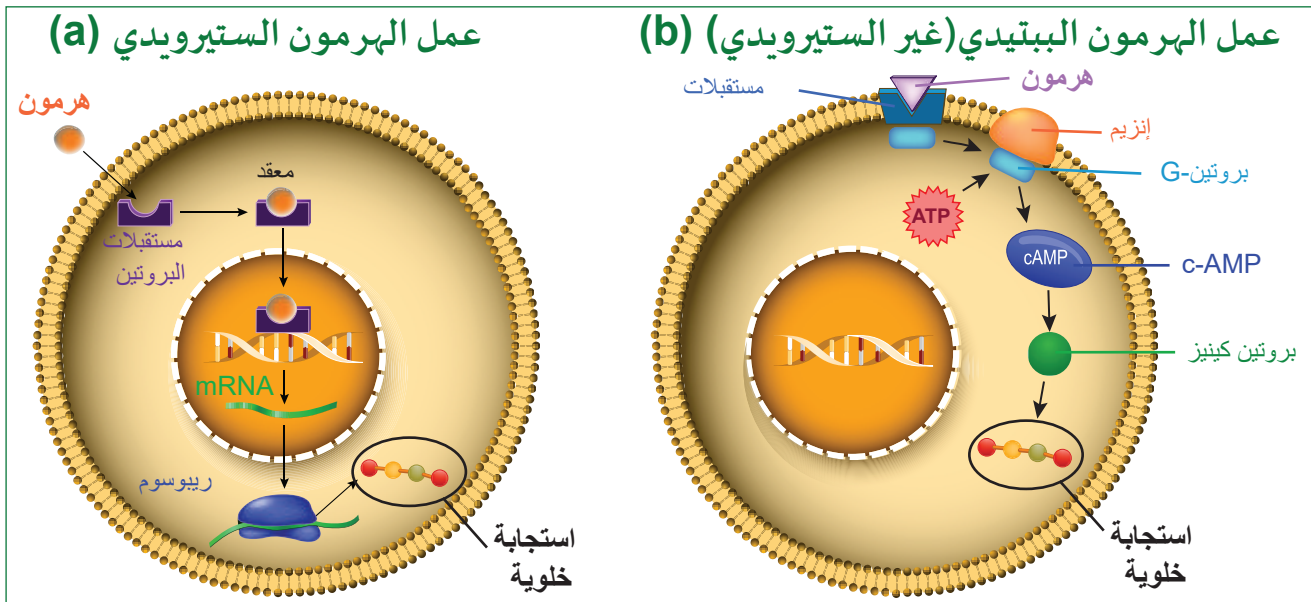
• تتركز الهرمونات الببتيدية (غير ستيرويدية) على الأحماض الأمينية، ويتراوح حجمها بين عدد قليل من الأحماض الأمينية إلى جزيئات تقترب من حجم البروتينات الصغيرة. الهرمونات الببتيدية تذوب في الماء، ولكنها لا تستطيع أن تمرّ عبر الغشاء الخلوي.



شكل 5-58 صنف الهرمونات.

آلية عمل الهرمونات في الخلايا

يقوم كلا النوعين من الهرمونات بتنشيط العمليات الخلوية لتكوين بروتينات تشكّل الاستجابة للهرمون. ومع ذلك، فإن الهرمونات الستيرويدية وغير الستيرويدية تستخدم آليات مختلفة جداً لتحقيق هذا الهدف. تحتاج الهرمونات الستيرويدية (غير قابلة للذوبان) إلى بروتينات ناقلة لتنتقل في بلازما الدم، ولكنها تمر بسهولة عبر الطبقة الدهنية الثنائية لأغشية الخلايا. عندما تصل الهرمونات الستيرويدية إلى الخلية ترتبط بالمستقبلات البروتينية الموجودة في السيتوبلازم أو في النواة لتشكيل معقد هرمون-بروتين. يقوم المعقد بعد ذلك بتنبيه جين معين لبناء بروتينات جديدة تغير نشاط الخلية المستهدفة (الشكل 5-59a). للهرمونات الستيرويدية أدوار مهمة قبل الولادة وبعدها. تشارك الهرمونات الستيرويدية، مثل الإستروجين والتستوستيرون، في نمو الجنين. الأجنة الذكور والإناث متطابقة إلى أن تتطور الخصيتان وتنتجان التستوستيرون، أو يتطور المبيضان وينتجان الإستروجين. يحدد هذان الهرمونان تطور الخلايا إلى تراكيب تناسلية ذكورية أو أنثوية.



شكل 5-59 (a) تستخدم الهرمونات الستيرويدية بروتينات ناقلة للانتقال في الدم، ولكنها تستطيع عبور أغشية الخلايا لتنشيط الجينات. **(b)** الهرمونات غير الستيرويدية قابلة للذوبان في الدم، ولكنها تعمل فقط على أسطح الأغشية لتغيير أبيض الخلية.

تنتقل الهرمونات الببتيدية (القابلة للذوبان) بسرعة إلى الخلايا، ولكنها ترتبط بالمستقبلات البروتينية على سطح الغشاء لأنها لا تستطيع عبور غشاء الخلية (الشكل 5-59b). يقوم معقد الهرمون/المستقبل بتنشيط بروتين محدد يُسمى بروتين ج (G-protein) داخل الخلية. ينشط بروتين ج الإنزيمات الموجودة على غشاء الخلية التي تقوم بتحويل ATP إلى جزيئات cAMP. تقوم جزيئات cAMP بتنشيط بروتين كيناز (protein kinase) الذي يقوم بفسفرة بروتينات أخرى داخل الخلية لتنشيطها، بما يمثل استجابة الخلية للهرمون. تتضمن الأمثلة على الهرمونات غير الستيرويدية الكالسيومونين وهرمون النمو والأنسولين والميلاتونين.

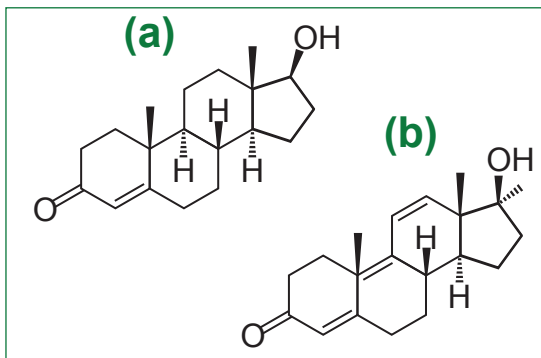
هرمونات مهمة في جسم الإنسان

يعرض الجدول 5-6 بعض الهرمونات الشائعة في جهاز الغدد الصماء والغدة أو النسيج الذي يفرزها، وتأثيرها في الأيض.

جدول 5-6 هرمونات جهاز الغدد الصماء وتأثيراتها.

الهرمون	التصنيف	الغدة/ النسيج المفرز	التأثير
كالسيتونين	ببتيدي	الغدة الدرقية	يقلل من مستويات أيون الكالسيوم Ca^{2+} في الدم
الكورتيزول الأدرينالين	ستيرويدي	الغدة الكظرية	يؤدي الأدوار الرئيسة في استجابة «الكر أو الفر»
الأستروجين البروجسترون	ستيرويدي	المبيضان	يحفز تطوّر الأنثى في سن البلوغ
الجلوكاجون الأنسولين	ببتيدي	البنكرياس	يزيد من نسبة السكر في الدم يقلل نسبة السكر في الدم
الهرمون المطلق لهرمون النمو (GHRH)	ببتيدي	تحت المهاد	يحفز إطلاق هرمون النمو النخامي
هرمون النمو (GH)	ببتيدي	الغدة النخامية	يطلق هرمون النمو
الميلاتونين	ببتيدي	الغدة الصنوبرية	ينظم دورة النوم
التستوستيرون	ستيرويدي	الخصيتان	يحفز تطوّر الذكر في سن البلوغ
الأوكسيتوسين	ببتيدي	الغدة النخامية	ينشط انقباضات الرحم وإنتاج الحليب
الهرمون المضاد لإدرار البول	ببتيدي	الغدة النخامية	يحفز امتصاص الماء في الكلى

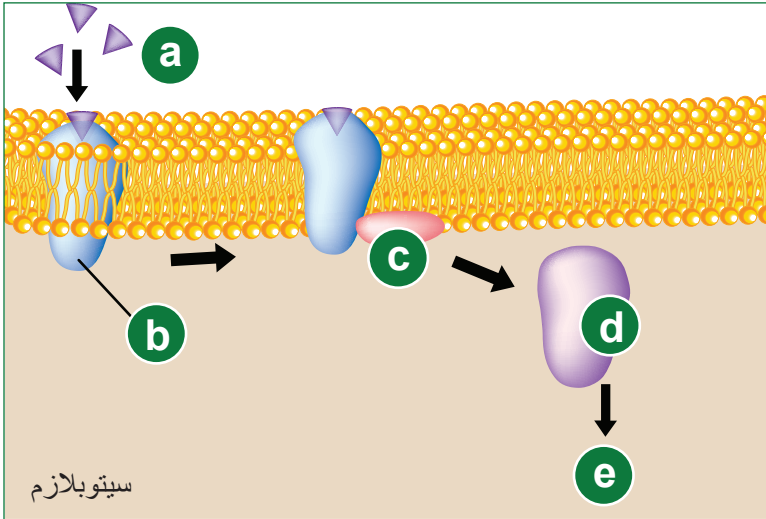
الهرمونات الاصطناعية

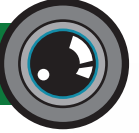


شكل 5-60 (a) التستوستيرون و (b) التستوستيرون الاصطناعي.

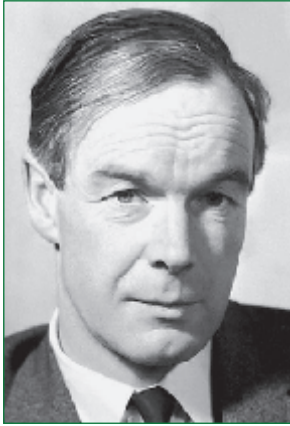
التستوستيرون هو هرمون ذكري يؤثر في نمو العضلات. تُنتج أجسام الذكور والإناث التستوستيرون الطبيعي، لكن المستوى يكون أقل عند الإناث. الستيرويدات البنائية (المنشطات البنائية) هي شكل اصطناعي من التستوستيرون، يُستخدم لتعزيز نمو العضلات الهيكلية. الستيرويدات البنائية لها استخدامات طبية مشروعة، ولكنها تستخدم أيضًا بشكل غير قانوني من قبل الرياضيين.

1. ما هي التراكيب الغدية الصماء الموجودة في الدماغ؟ وأينها يكون خارج الدماغ؟ اذكر الوظيفة الرئيسة لكل منها.
2. ما هي وظائف جهاز الغدد الصماء الأربع الرئيسة؟
3. * أعط أمثلة على ثلاث وظائف يؤديها كل من الجهاز العصبي وجهاز الغدد الصماء. اشرح كيف يؤدي الجهازان الوظائف بشكل مختلف..
4. * أجب عن الأسئلة الآتية المتعلقة بتحت المهاد.
 - a. يعمل «تحت المهاد» بشكل وثيق مع الجهاز العصبي الذاتي (ANS). ما هي الأجهزة الحيوية الثلاثة التي تتأثر به؟
 - b. ما هو الدور الذي يضطلع به «تحت المهاد» في مسار نظام المكافأة؟
 - c. لماذا تمتلك الكائنات الحية المعقدة هذه التغذية الراجعة (نظام المكافأة)؟
 - d. أعد نظام المكافآت دورة من التغذية الراجعة الإيجابية أم السلبية؟ كيف تعرف؟
5. اذكر أسماء التراكيب a-d في المخطط الذي يظهر النشاط في الخلية.
 - ما نوع الهرمون (a) وكيف يمكنك تحديد ذلك؟
 - ماذا سيحدث في (e)؟





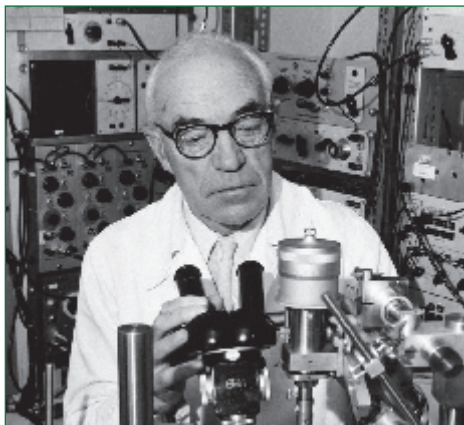
أ.ل. هودجكين، و.أ.ف. هكسلي، و.ج.س. إيكلس



شكل 5-61 آلان ل. هودجكين



شكل 5-62 أندرو ف. هكسلي



شكل 5-63 السير جون س. إيكلس في مختبره

ثلاثة علماء رائدون في إجراء البحوث حول الجهاز العصبي المركزي حصلوا على جائزة نوبل في العام 1963 في علم وظائف الأعضاء أو في الطب عن «اكتشافاتهم المتعلقة بالآليات الأيونية في استثارة وتثبيط الأجزاء الطرفية والمركزية لغشاء الخلية العصبية».

قام آلان ل. هودجكين Alan L. Hodgkin (الشكل 5-49) وأندرو ف. هكسلي Andrew F. Huxley (الشكل 5-50) بدراسة المحور العملاق في الحبار كونه من اللاقاريات التي تملك محورًا عصبيًا ضخمًا يزيد سُمكه 1000 مرة عن المحور البشري النموذجي. تم توصيل الأسلاك إلى الأسطح الداخلية والخارجية للمحور، قام هودجكين وهكسلي بقياس فرق الجهد أثناء مرور السيل العصبي على طول المحور، واكتشفا أن أيونات البوتاسيوم والصوديوم الموجبة كانت تنتقل من داخل الخلايا العصبية وإلى خارجها بسرعات مختلفة، وأن الفرق في تركيز الأيونات يخلق جهدًا ينتقل على امتداد المحور ويمكن قياسه. التدفّعات الكهربائية أو «جهود الفعل» كما أطلق عليها هودجكين وهكسلي، هي ما يمكّن الجهاز العصبي المركزي من تنسيق أفعال الكائن الحي.

عمل هودجكين وهكسلي دفع السير جون س. إيكلس John C. Eccles (الشكل 5-51)، للقيام بمزيد من البحث في المبادئ الكيميائية التي سمحت للنضبات الكهربائية بالانتقال على محاور الخلايا العصبية. أظهر إيكلس كيف أن النتائج التي توصل إليها هودجكين وهكسلي كانت مرتبطة بكيفية انتقال السيل العصبي من خلية عصبية إلى أخرى. سجّل إيكلس الاختلافات الصغيرة في الشحنات الكهربائية عند التشابكات العصبية. غيّرت هذه الشحنة اتجاهها اعتمادًا على التشابك العصبي المدروس، وقد توافق ذلك مع إطلاق مواد كيميائية.

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

الدرس 1-5 تركيب الجهاز العصبي ووظيفته

- يشمل الجهاز العصبي الجهاز العصبي المركزي **Central** و الجهاز العصبي الطرفي **Peripheral**. يتحكم الجهاز الجسدي **Somatic** في الأعصاب الحركية والحسية ويتحكم الجهاز الذاتي **Autonomic** في الوظائف اللاإرادية.
- ينقسم الجهاز الذاتي إلى قسمين: الجهاز العصبي الودي **Sympathetic** والجهاز العصبي نظير الودي **Parasympathetic**.
- الخلايا العصبية هي الخلايا الأساسية للجهاز العصبي، وهي تنقل الإشارات من الزوائد الشجرية **Dendrites** إلى النهايات العصبية **Synaptic knobs**. محور **Axon** الخلية العصبية محاط بخلايا شوان **Schwann cells** يتخللها مناطق معزلة تُسمى عُقد رانفيير **Nodes of Ranvier**.
- يتم جمع الخلايا العصبية في سُبُل **Tracts** (CNS) وأعصاب **Nerves** (PNS).
- تكتشف المستقبلات **Receptors** المنبه، تنفذ المنفذات **Effectors** أفعالاً، مثل القوس الانعكاسي **Reflex arc**.

الدرس 2-5 السيات العصبية والنقل

- الخلايا العصبية لديها جهد راحة **Resting potential** يبلغ -70 mV تقريباً، وتنقل الإشارات بجهد فعل **Action potential** تبلغ ذروته 30 mV تقريباً.
- الاستقطاب **Polarization** هو حالة الراحة. تحدث إزالة الاستقطاب **Depolarization** عندما يتجاوز المنبه جهد العتبة.
- تكون سرعة التوصيل العصبي **Nerve conduction velocity** الأعلى عندما يكون حول الأعصاب غلاف ميليني **Myelin** تصنعه خلايا شوان **Schwann cells** التي يتخللها فجوات تُسمى عُقد رانفيير **Nodes of Ranvier**.
- تعبر الإشارات بين الخلايا العصبية تشابكات كهربائية **Electrical synapses** أو كيميائية **Chemical synapses**.
- تنقل النواقل العصبية **Neurotransmitters** الإشارات عبر الشق التشابكي **Synaptic cleft**.

الدرس 3-5 الدماغ والتحكم الهرموني

- يتكون الدماغ من المخ **Cerebrum** والمخيخ **Cerebellum** وجذع الدماغ **Brain stem** والذي يتألف من الدماغ الأوسط **Midbrain**، والبنطرة **Pons**، والنخاع المستطيل **Medulla oblongata**.
- يتكوّن المخ من نصف كرة مخية **Hemisphere** أيمن ونصف كرة مخية أيسر. قشرة المخ هي مادة رمادية **Grey matter** تحتها مادة بيضاء **White matter** تضم الجسم الثفني **Corpus callosum**.
- يحيط بالدماغ والحبل الشوكي وسادة من السائل الدماغي الشوكي **Cerebrospinal fluid** الذي يتم إنتاجه وتخزينه في بطينات **Ventricles** الدماغ.
- يشتمل جهاز الغدد الصماء على المهاد **Thalamus** وتحت المهاد **Hypothalamus**، والغدة النخامية **Pituitary** والغدة الصنوبرية **Pineal** و غدد أخرى.
- الهرمونات عبارة عن رُسُل كيميائية، ويمكن أن تكون ستيرويدية أو ببتيدية.

تحضير للاختبار

1. أي من هذه التراكيب الآتية ليس جزءاً من الجهاز العصبي المركزي؟
 - a. الدماغ
 - b. الحبل الشوكي
 - c. النخاع المستطيل
 - d. الخلية العصبية الحركية
2. أين تقع القنطرة؟
 - a. في الدماغ الأمامي
 - b. في الدماغ الأوسط
 - c. في الدماغ الخلفي
 - d. في جذع الدماغ
3. يتكوّن الجهاز العصبي الطرفي من جهازين فرعيين؟
 - a. الجهاز الذاتي والجهاز الجسدي
 - b. القسم الحسي والقسم الحركي
 - c. القسم المركزي والقسم الطرفي
 - d. كلّ ما ذكر
4. ما هو المسار الصحيح للمعلومات من الجهاز العصبي الطرفي إلى الجهاز العصبي المركزي؟
 - a. خلية عصبية حركية ← الحبل الشوكي ← الدماغ
 - b. الدماغ ← الحبل الشوكي ← خلية عصبية حركية
 - c. خلية عصبية حسية ← الحبل الشوكي ← خلية عصبية حركية
 - d. خلية عصبية حسية ← عصب ← الحبل الشوكي ← الدماغ
5. أيّ من التراكيب الآتية ليس تركيباً في خلية عصبية نموذجية؟
 - a. المريكزات
 - b. زر تشابكي
 - c. محور
 - d. جسم الخلية
6. أيّ مما يأتي يصف الفرق بين الجهاز العصبي المركزي والجهاز العصبي الطرفي؟
 - a. تتّصل أعصاب الجهاز العصبي الطرفي بالحبل الشوكي، لكنّ مسارات الجهاز العصبي المركزي لا تتصل به.
 - b. أعصاب الجهاز العصبي الطرفي يمكن أن تتجدّد، أما مسارات الجهاز العصبي المركزي فلا تتجدّد.
 - c. تتّصل أعصاب الجهاز العصبي الطرفي بتراكيب حسية، لكن مسارات الجهاز العصبي المركزي ليست كذلك.
 - d. تحتوي الأعصاب على خلايا عصبية حسية وحركية معاً، لكن مسارات الجهاز العصبي المركزي ليست كذلك.

7. أيُّ من العبارات الآتية تصف الخلايا العصبية؟

- a. يتم إرسال جهد فعل لكل إشارة مدخلة.
- b. يمكن للخلية العصبية أن تنقل نصف جهد الفعل.
- c. يمكن للخلايا العصبية أن تنقل فقط جهد فعل أو لا تنقل.
- d. يمكن للخلايا العصبية أن تكرر على الفور نقل جهد الفعل.

8. أيُّ من الجمل الآتية تصف قوس الفعل المنعكس بشكل صحيح؟

- a. تقوم الخلايا العصبية الحركية بتحفيز نفسها عن طريق الاستثارة الذاتية.
- b. يمكن للخلية العصبية الحركية أن تتلقى منهاً سريعاً من الدماغ.
- c. ترسل الخلايا العصبية الحسية إشارة إلى الدماغ ليستجيب.
- d. تحفز الخلايا العصبية الحسية الخلايا العصبية الحركية من دون تدخل الدماغ.

9. ما هو أفضل وصف لمضخة الصوديوم-البوتاسيوم في الخلايا العصبية؟

- a. بروتين نشط ناقل لأيونات البوتاسيوم K^+ .
- b. بروتين مُبَوَّب بالجهد ناقل لأيون الصوديوم Na^+ .
- c. قناة نقل غير نشطة لكل من أيونات الصوديوم Na^+ والبوتاسيوم K^+ .
- d. بروتين نشط ينقل 3 من أيونات الصوديوم Na^+ إلى الداخل مقابل خروج 2 من أيونات البوتاسيوم K^+ .

10. ما هو الوصف الصحيح لجهد الراحة في غشاء محور؟

- a. جهد الغشاء يساوي دائماً صفراً في فترة الراحة.
- b. جهد الغشاء موجب.
- c. جهد الغشاء حوالي -70 mV .
- d. جهد الغشاء مع تركيزين متساويين من أيونات الصوديوم Na^+ والبوتاسيوم K^+ .

11. أيُّ من الجمل الآتية تصف الهرمون بشكل صحيح؟

- a. مادة كيميائية ترسل إشارة في التشابك العصبي.
- b. مادة كيميائية مصنوعة من سلاسل من الأحماض الأمينية.
- c. مادة كيميائية مولدة للإشارة تنتقل في الجهاز الدوراني.
- d. مادة كيميائية مثبتة توقف عمليات معينة في الجسم.

12. أيُّ من الجمل الآتية تصف السعال في خلية عصبية من الجهاز العصبي المركزي بشكل صحيح؟

- a. يمكن أن ينتقل بسرعة أكبر إذا لم يكن للخلايا العصبية غلاف ميليني.
- b. يمكنه تغيير الاتجاه في الشق التشابكي لتشابك عصبي كيميائي.
- c. ينطلق السعال العصبي عندما يصل المنبه إلى جهد العتبة.
- d. لا يمكنه القفز عبر موصل فجوي في التشابك العصبي الكهربائي.

13. أي من الجمل الآتية تحدّد الفرق الصحيح بين التشابكات العصبية الكهربائية والكيميائية؟

- a. التشابكات العصبية الكيميائية أسرع.
- b. لتشابكات العصبية الكهربائية أسرع.
- c. تسمح التشابكات العصبية الكيميائية بتدفق الإشارات العصبية في كلا الاتجاهين.
- d. تسمح التشابكات العصبية الكهربائية للأيونات بالتحرك في اتجاه واحد فقط.

14. ما هو الناقل العصبي الذي ينشط العضلات الهيكلية؟

- a. الأستيل كولين
- b. GABA
- c. الجلوتامات
- d. السيروتونين

15. أي من الجمل الآتية تصف بشكل صحيح عبور النبضة العصبية التشابك العصبي الكيميائي؟

- a. تنعكس النبضة الكهربائية من المحور العصبي.
- b. تحفز أيونات الصوديوم إطلاق أيونات Ca^{2+} .
- c. تخزن الحويصلات النواقل العصبية بعد إعادة امتصاصها.
- d. ترتبط النواقل العصبية بقنوات مُبَوَّبة كيميائيًا وتفتحها.

16. أي من الأحداث الآتية يمكن أن يقع بعد التشابك العصبي الكيميائي؟

- a. يتمّ امتصاص النواقل العصبية عند الشق التشابكي.
- b. تقوم الإنزيمات بتفكيك النواقل العصبية لإعادة امتصاصها.
- c. إطلاق أيونات Ca^{2+} يؤدي إلى إعادة امتصاص النواقل العصبية.
- d. تستخدم النواقل العصبية البروتينات الناقلة لإعادة الدخول إلى النهايات العصبية.

17. أي من الوظائف الآتية لا تُعدّ من وظائف جهاز الغدد الصماء؟

- a. موازنة سوائل الجسم
- b. الاتزان الداخلي
- c. نقل السوائل بين الخلايا
- d. حفّز تشكيل تراكيب جديدة

18. ما هي الغدة التي تفرز الهرمونات للتحكّم في الغدد الصماء الأخرى؟

- a. تحت المهاد
- b. الغدة الصنوبرية
- c. البنكرياس
- d. المبيضان / الخصيتان

19. أي مما يأتي ليس من وظائف «تحت المهاد»؟

- a. يتفاعل تحت المهاد مع الغدة النخامية
- b. ينظّم دورات النوم والاستيقاظ
- c. ينظّم امتصاص الطعام وتوازن الماء
- d. ينظّم الجهاز الجسدي

20. أية منطقة من الخلايا العصبية تستهدفها معظم العقاقير؟

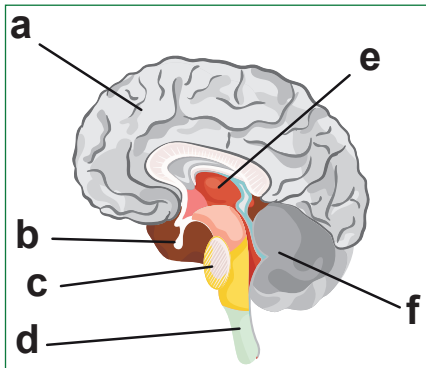
- a. نواة جسم الخلية
- b. الساركوليمما
- c. النهايات العصبية
- d. الموصلات الفجوية

21. لماذا يسبب الإكثار من العقاقير إدماناً عليها؟

- a. إنها تضخم مسار نظام المكافأة الطبيعي لدينا.
- b. تقلل الدافع.
- c. تسبب استجابة العطش في «تحت المهاد».
- d. تستهدف قشرة المخ الحركية في الدماغ.

أسئلة إجابات قصيرة

الدرس 1-5 تركيب الجهاز العصبي ووظيفته



شكل 5-64 تشرح الدماغ

22. استخدم الشكل 5-52 لإكمال الأجزاء أدناه.

- a. اكتب أسماء الأجزاء المشار إليها بالحروف من a إلى f مع ذكر وظيفة كل جزء.
- b. أي تركيب (التركيب) هو جزء من الجهاز العصبي المركزي؟
- c. أي جزء هو من جهاز الغدد الصماء؟

23. ارسم مخططات للتركيب الآتية وعيّن عليها أجزاءها.

- a. خلية عصبية حسية
- b. خلية عصبية حركية
- c. خلية عصبية بينية

24. قارن بين الأنواع الثلاثة من الخلايا العصبية في جدول بسيط. اذكر خمس خصائص على الأقل.

25. ما هي الخلايا الدبقية؟ وفيما تختلف عن الخلايا العصبية؟

26. أين توجد العقدة العصبية؟ وما هي وظيفتها؟

27. أجب عن الأسئلة المتعلقة بالآفعال المنعكسة والاستثارة.

- a. مم يتكون قوس الفعل المنعكس؟
- b. اذكر ثلاثة أماكن توجد فيها المستقبلات الحسية.
- c. أعط مثالاً على قوس الفعل المنعكس البسيط.
- d. فيما تختلف الاستثارة العضلية عن قوس الفعل المنعكس؟

28. صف في جمل قليلة الفرق بين الجهازين العصبيين الودّي ونظير الودّي.



29. صف استجابتين يسبّب الجهاز الودي في إحداهما فعلاً ويسبّب الجهاز نظير الودي في الأخرى فعلاً معاكساً.

30. صف الفرق بين المستقبل والمستجيب، وأعطِ مثالاً على كل منهما.



الدرس 2-5 السيات العصبية وانتقالها

31. اشرح الفرق بين القناة الأيونية المبوّبة بالجهد والقناة الأيونية المبوّبة كيميائياً، وأعطِ مثالاً على كلّ منهما.



32. استخدم مفهوم جهد الغشاء للإجابة عن الأسئلة أدناه.



a. ما هو جهد الغشاء؟

b. لماذا يبقى الجهد سالباً داخل الخلية العصبية الحية عند الراحة؟

c. فيمّ يختلف جهد الراحة عن جهد الفعل؟

d. ما هو متوسط فرق الجهد عبر غشاء خلية الإنسان العصبية عند الراحة؟

33. قم بتسمية الخطوات المشار إليها بأحرف في



منحنى جهد الفعل الذي يظهر على اليسار.

للأحرف d-f اشرح ما يحدث لتركيز أيونات

الصوديوم والبوتاسيوم عبر غشاء المحور.

34. ما هو المقصود بالانتقال الوثي؟ ولماذا



يرى العلماء أنه يرّحل جهد الفعل بسرعة

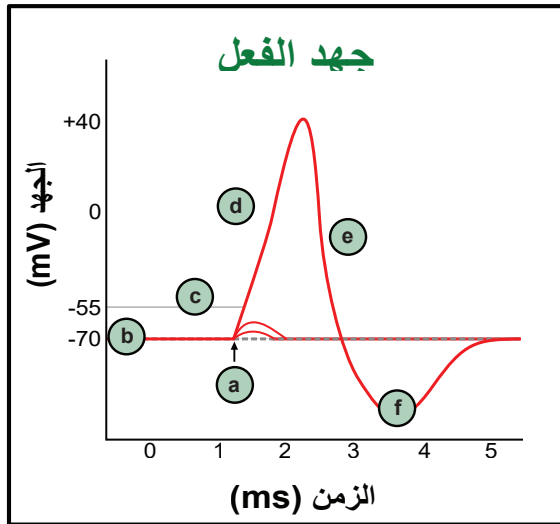
أكبر؟

35. أين توجد معظم التشابكات العصبية



الكهربائية؟ وفيمّ تختلف عن التشابكات

العصبية الكيميائية؟



36. ما هو الناقل العصبي؟ وكيف يمكن أن يؤثر في جهد الفعل؟



37. ضع قائمة بثلاثة أمثلة على النواقل العصبية، واذكر أهمية وجودها لعمل الجسم.



38. باستخدام الأستيل كولين كمثال، كيف يمكن لناقل عصبي تنشيط المنفذ، كالعضلات



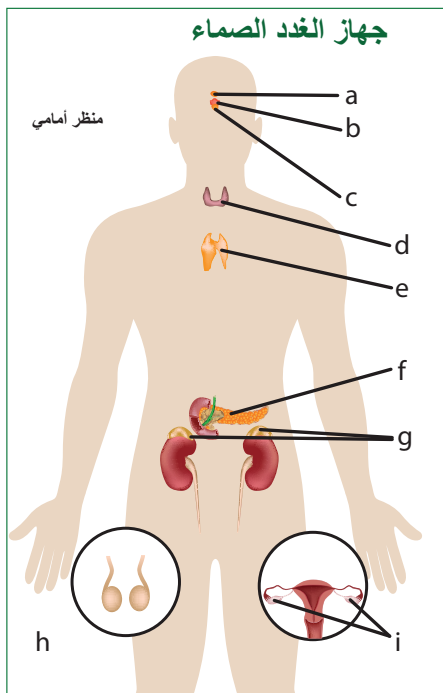
الهيكليّة مثلاً؟

الدرس 3-5 الدماغ والتحكم الهرموني

39. يمكن أن تتأثر النواقل العصبية بالعقاقير بطرائق مختلفة. عدد ثلاث طرائق يمكن أن يؤثر بها العقار في التشابك العصبي.



40. أي من التراكيب الدماغية تتفاعل مع جهاز الغدد الصماء؟ أعطِ مثالاً على التفاعل لكل تركيب.



41. يظهر المخطط جهاز الغدد الصماء. أكمل الأجزاء أدناه.

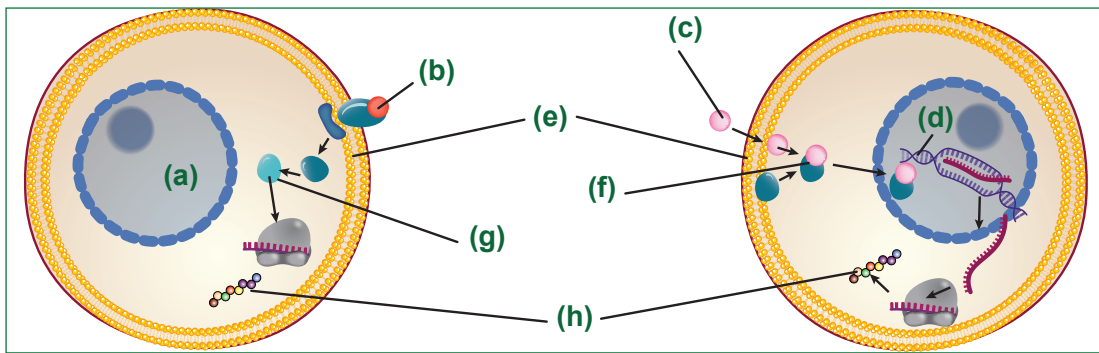
a. اذكر أسماء الأجزاء ذات الحروف من جهاز الغدد الصماء.

b. أي منها هو غدد وأي منها هو أنسجة؟ وأي منها هو أعضاء؟ استخدم الإنترنت، إذا لزم الأمر.

42. يوضح المخططان أدناه نموذجين للهرمونات في الخلايا.

a. اذكر أسماء الأجزاء ذات الحروف في كل مخطط.

b. ما هي الخاصية الكيميائية التي تحدّد المسار؟



مشروع البحث



اختر عقاراً أو مادة غير مشروعة، وقم بإعداد فيديو قصير لا تتجاوز مدته 5 دقائق باستخدام flipgrid. استخدم نموذج التقييم المقدم من معلمك للتأكد من تلبية متطلبات المشروع.

الشكر والتقدير

جميع الرسوم الفنية الواردة في هذا العمل صممتها شركة تطوير العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM) في الولايات المتحدة الأمريكية. وهي وحدها تملك الحق القانوني لإجازة استخدام تلك الرسوم.

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

RonnieChua/Shutterstock; Shyrochenko Aleksandr/Shutterstock; chrisdorney/Shutterstock; Bobx-73/Shutterstock; Lipskiy/Shutterstock; Naskky/Shutterstock; SoleilC/Shutterstock; AlexandrN/Shutterstock; Martin Bergsma/Shutterstock; Toa55/Shutterstock; ShadeDesign/Shutterstock; Caterina Belova/Shutterstock; Pavol Kmeto/Shutterstock; A7880S/Shutterstock; Corund/Shutterstock; Shannon Serpette/Shutterstock; agsandrew/Shutterstock; tankist276/Shutterstock; VectorPot/Shutterstock; Vector Tradition/Shutterstock; J10/Shutterstock; RomanVanur/Shutterstock; Garen Takessian/Shutterstock; Aldona Griskeviciene/Shutterstock; Fouad A Saad/Shutterstock; hlphoto/Shutterstock; stockcreations/Shutterstock; MAHATHIR MOHD YASIN/Shutterstock; Konoplytska/Shutterstock; Eric Isselee/Shutterstock; Maksim Safaniuk/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Daniele Pietrobelli/Shutterstock; Tichr/Shutterstock; Vladislav Havrilov/Shutterstock; Olga Zinovskaya/Shutterstock; Tatiana Foxy/Shutterstock; 3DSculptor/Shutterstock; Merlin74/Shutterstock; Eduard Kim/Shutterstock; Vadim Sadovsky/Shutterstock; Janaka Dharmasena / Shutterstock; Nasky/ Shutterstock; adike/Shutterstock; Richard Peterson/ Shutterstock; stihii/ Shutterstock; NoPainNoGain/ Shutterstock; Teguh Mujiono/Shutterstock; Improvisor/ Shutterstock; Jose Luis Calvo/ Shutterstock; Rattiya Thongdumhyu/ Shutterstock; Peter Hermes Furian/ Shutterstock; Sebastian Kaulitzki/ Shutterstock; VectorMine/ Shutterstock; bsd/ Shutterstock; Blamb/ Shutterstock; MikeMartin / Shutterstock; Photographee.eu/ Shutterstock; Jason Boyce/ Shutterstock; Maridav Eugene Onischenko/ Shutterstock; CI Photos/ Shutterstock; Sergey Nivens, Vasyl Shulga/ Shutterstock; Sea Wave, Tanya Sid/ Shutterstock; belushi/ Shutterstock; Birger Olovson, Dionisvera/ Shutterstock; sportpoint / Shutterstock; ChrisVanLennepPhoto, Jacob Lund, sattahipbeach./Shutterstock; Catalin Grigoriu/ Shutterstock; Designua/Shutterstock; Andres Garcia Martin/Shutterstock; Cagla Acikgoz/ Victor Moussa/photoworld; Aleksey Gusev/Shutterstock; Designua/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; mapichai/Shutterstock; Kitnha/ Elena11 /Shutterstock; dlhca/Shutterstock; ShotStalker/Shutterstock; Sketchart/Shutterstock; tel52/Robert Adrian Hillman/Shutterstock; rzarek/Imagine Photographer; Tomas Ragina/Shutterstock; Rainer Lesniewski/Shutterstock; Vixit/Shutterstock; Fedor Selivanov/Shutterstock; Phil Emmerson /Shutterstock; stihii/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; NASA images/Shutterstock; NickJulia/Shutterstock; ch123/Shutterstock; Cozine/ Suzanne Tucker/ Ayman Haykal /Shutterstock; Robert Adrian Hillman/Shutterstock; Sigur/ SUNISA DAENGAM/Shutterstock; Jeroen Mikkers/ Manamana /Shutterstock; duckeesue /Shutterstock; Thomas C. Altman /Shutterstock; Sara Winter /Shutterstock; MaraZe /Shutterstock; Adwo/ Tomowen Shutterstock; Rosalie Kreulen /Shutterstock; Daniel Carlson /Shutterstock; Filip Fuxa/ Fulcanelli/ Shutterstock; lembi /Shutterstock; stihii /Shutterstock; GracePhotos /Shutterstock; Mega Pixel Shutterstock; Justek16 /Shutterstock; Scottish Traveller /Shutterstock; Lori Bonati /Shutterstock; anek.soowannaphoom /Shutterstock; Lost in the Midwest /Shutterstock; B Calkins /Shutterstock; AlexussK /Shutterstock; pablofdezr /Shutterstock; fischers /Shutterstock; corbac40 /Shutterstock; CROX /Shutterstock; Africa Studio /Shutterstock; Emre Terim /shutterstock; Volodymyr Goinyk /shutterstock; Johann Helgason /shutterstock; OSweetNature /shutterstock; Kathryn Snoek/ /shutterstock; Thomas C. Altman; MateusandOlivia /shutterstock; Designua /shutterstock; Rainer Lesniewski /shutterstock; Praveen Menon /shutterstock; Mark Hall /shutterstock; Konoplytska /shutterstock; Igor Aleksander /shutterstock; Zoom Team /shutterstock; Turkey Photo /shutterstock; Dexpixel /shutterstock; Dennis O'Hara /shutterstock; Tetyana Dotsenko /shutterstock; Vadim Nefedoff /shutterstock; Designua /shutterstock; Sabelskaya /shutterstock; Rich Carey /shutterstock; Bill McKelvie/shutterstock; Andrey Burmakin/ kuruneko/ ZoranOrcik/shutterstock; Imagesines/shutterstock; Diagram/shutterstock; HelloRF Zcool/ Andrey Burmakin/shutterstock; Alex Kravtsov/shutterstock; sirtravelalot/shutterstock; Suzanna Tucker/shutterstock; Graph/shutterstock; Gwoeii/shutterstock; Graph/ Aleksii Sidorov/shutterstock; sizov/ LUKinMEDIA/shutterstock; BUY THIS/shutterstock; Stock image/shutterstock; TLaoPhotography/shutterstock; TASER/shutterstock; Roger costa morera/shutterstock; Preto Perola/ HomeArt; topimages/NDT/KKulikov/shutterstock; OSTILL is Franck Camhi/ Wikipedia; Ljupco Smokovski/Alexander Kirch/Stefan Schurr/ Jonah H/shutterstock; Brocreative/ Motion Arts; Dan Thornberg/shutterstock; faboi/ TASER; Miriam Doerr/shutterstock; Martin Frommherz/shutterstock; Bjoern Wylezich/shutterstock; Inna Bigun/shutterstock; Steven Mol/shutterstock; goffkein.pro/shutterstock; EugenePut/shutterstock; fotoliza/shutterstock; IDKFA/shutterstock; Yosanon Y/ VarnakovR/shutterstock; Rost9/shutterstock; Tyler Boyes/shutterstock; Dimarion/shutterstock; Maridav/shutterstock; Dmitry Markov152/shutterstock; Charobnica/Shutterstock; Rvkamalov/Shutterstock; Peter Hermes Furian/Shutterstock; Konstantinks/Shutterstock; Extender_01/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Miriam Doerr/Shutterstock; Martin Frommherz/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Orange Deer studio/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Olga Popova/Shutterstock; Pavel Sapozhnikov/Shutterstock; VectorMine/Shutterstock; Paramonov Alexander/Shutterstock; OSweetNature/Shutterstock; Danielz1/Shutterstock; Dafinchi/Shutterstock; Fen Deneyim/Shutterstock; Artskvortsova/Shutterstock; Nasky/Shutterstock; Adam J/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Denis Radovanovic/Shutterstock; Ipek Morel/Shutterstock; Nito/Shutterstock; Geza Farkas/Shutterstock; Albert Russ/Shutterstock; Orange Deer studio/Shutterstock; Everett Collection/Shutterstock; Mega Pixel/Shutterstock; Ihor Matsiievskiy/Shutterstock; Mahathir Mohd Yasin/Shutterstock; Liveshot/Shutterstock; MTKang/Shutterstock; Andrey Kozyntsev/Shutterstock; Gab90/Shutterstock; Olga Hofman/Shutterstock; Breck P. Kent/Shutterstock; Beker/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Frees/Shutterstock; Concept W/Shutterstock; Volha A./Shutterstock; Aliona Ursu/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; John James/Shutterstock; Photo-World/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; LeysanI/Shutterstock; ADA Photo/Shutterstock; Elena Zolotukhina/Shutterstock; Bukhta Yuri/Shutterstock; Edward Olive/Shutterstock; Maxx-Studio/Shutterstock; Peter Sobolev/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Eduardo Estellez/Shutterstock; Shishir Gautam/Shutterstock; Josep Suria/Shutterstock; Designua/Shutterstock; Izzmain/Shutterstock; Kiran Paul/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Sansanorth/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Henri Koskinen/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; Humdan/Shutterstock; ibreakstock/Shutterstock; Magnetix/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; EDU WATANABE/Shutterstock; Kristina Vor/Shutterstock; Wantando/Shutterstock;