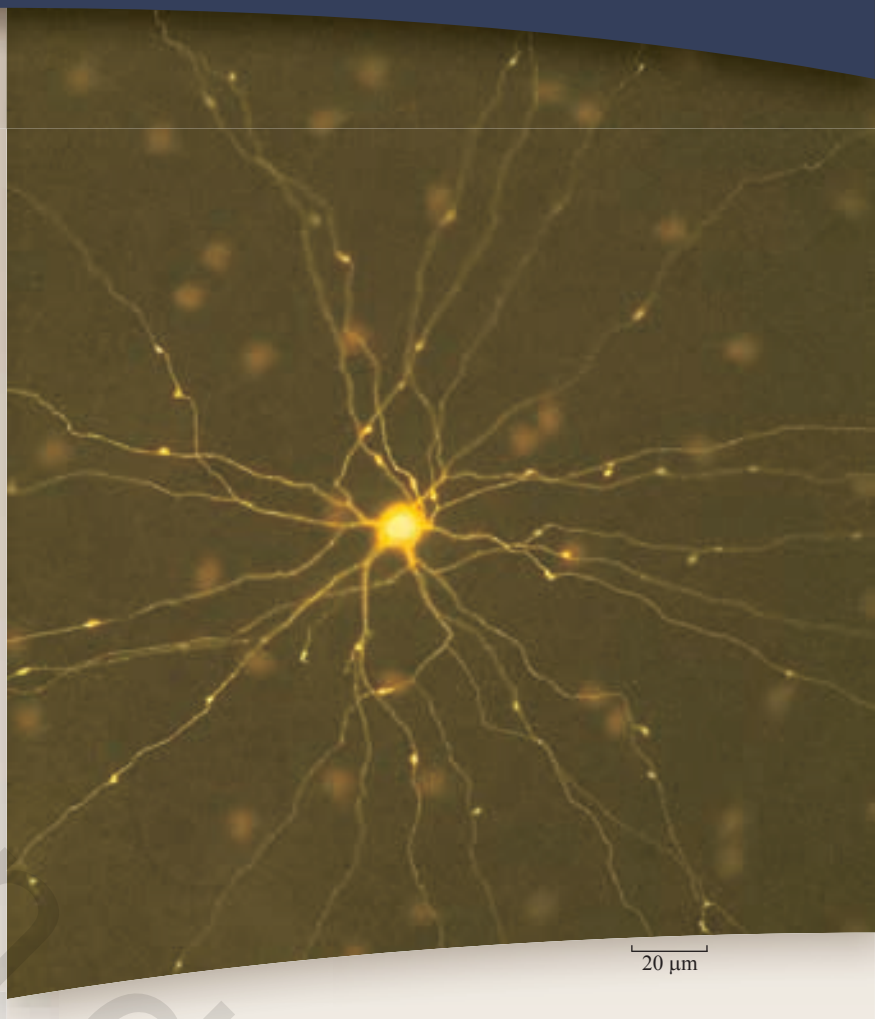
الفصل 44

الجهاز العصبي

The Nervous System



مقدّمة

تستخدم الحيوانات جميعها باستثناء الإسفنج شبكة من الخلايا العصبية لتجمع المعلومات عن ظروف الجسم والبيئة الداخلية، ولمعالجة هذه المعلومات وتكاملها، ولتصدر أوامر لعضلات الجسم وغدده. وكما رأينا في الفصل 43، فإن الاتزان الداخلي للجسم يتم عن طريق دورات التغذية الراجعة السلبية التي تحافظ على الظروف ضمن مدى ضيق. إن آليات التغذية السلبية لا تتضمن رصد المنبهات المناسبة فقط، بل نقل هذه المعلومات من أجل بدء الاستجابة. والجهازُ العصبيُّ المكون من عصبونات كالتي تظهر في الصورة المجاورة نظامٌ سريع للاتصال، ونقل المعلومات. وهو جزء من أنظمة التغذية الراجعة الكثيرة في الجسم.

موجز المفاهيم

44-1 تنظيم الجهاز العصبي

- *الجهاز العصبي المركزي هو "مركز السيطرة".*
- *الجهاز العصبي الطرفي يجمع المعلومات، وينجز الاستجابات.*
- *تركيب العصبونات يدعم وظيفتها.*
- *الخلايا الداعمة تشمل خلايا شوان وخلايا الدبق قليلة الزوائد.*

44-2 آليات انتقال السيال العصبي عبر الغشاء البلازمي

- *يوجد فرق جهد كهربائي عبر الغشاء البلازمي.*
- *الجهود المتدرجة تغيرات صغيرة تعزز أو تلغي بعضها بعضًا.*
- *يحدث جهد الفعل عندما تصل إزالة الاستقطاب حد العتبة.*
- *تسري جهود الفعل على طول محور العصبون.*
- *طريقتان لزيادة سرعة السيال العصبي.*

44-3 التشابك العصبي: حيث تتواصل العصبونات مع خلايا أخرى

- *نوعا التشابك العصبي: كهربائي وكيميائي.*
- *كثير من المركبات الكيميائية المختلفة تعمل نواقل عصبية.*
- *على العصبون بعد التشابكي أن ينسق ويكامل المعلومات الصادرة من تشابكات عصبية عدة.*
- *تؤدي النواقل العصبية دورًا في الإدمان على العقاقير.*

44-4 الجهاز العصبي المركزي: الدماغ والحبل الشوكي

- *عندما أصبحت الحيوانات أكثر تعقيدًا أصبحت أجهزتها العصبية كذلك.*
- دماغ الفقريات له ثلاثة أقسام رئيسة.
- *الدماغ الأمامي للإنسان يظهر قدرة استثنائية على معالجة المعلومات.*
- *يمكن السيطرة على الوظائف المعقدة لدماغ الإنسان في مناطق محددة منه.*
- *ينقل الحبل الشوكي الرسائل، ويسيطر على بعض الاستجابات مباشرة.*

44-5 الجهاز العصبي الطرفي: العصبونات الحسية والحركية

- *يتكون الجهاز العصبي الطرفي من جزأين: بدني وذاتي.*
- *يسيطر الجهاز العصبي البدني على الحركات.*
- *الجهاز العصبي الذاتي يسيطر على الوظائف اللاإرادية من خلال جزأيه.*
- *تتوسط بروتينات G استجابات الخلايا للإشارات الذاتية.*

1-44 تنظيم الجهاز العصبي

على الحيوان أن يكون قادرًا على الاستجابة للمنبهات البيئية. فالذبابة تهرب لمجرد اقتراب مطرقة صفع الذباب منها، وقرون استشعار القريدس تتحرى عن الغذاء، فيتحرك القريدس في اتجاهه. ولكي تُنجز هذه الوظائف، فإن على الحيوانات امتلاك **مستقبلات حسّية Sensory receptors** ترصد المنبهات، **وأعضاء مستجيبة حركية Motor effetors** تستطيع الاستجابة بها. في معظم قبائل اللافقريات، وكل طوائف الفقريات ترتبط المستقبلات الحسية بالأعضاء المستجيبة الحركية عن طريق الجهاز العصبي.

الجهاز العصبي المركزي هو "مركز السيطرة"

كما وصفنا في الفصل الـ 43، يتكون الجهاز العصبي من عصبونات وخلايا داعمة. ويبين (الشكل 44-1)أنواع العصبونات الثلاثة. ففي الفقريات، تحمل **العصبونات الحسية Sensory neurons** (أو العصبونات الواردة) سيالات من المستقبلات الحسية إلى الجهاز العصبي المركزي المكون من الدماغ والحبل الشوكي. في حين تحمل **العصبونات الحركية Motor neurons** (أو العصبونات الصادرة) سيّالات من الجهاز المركزي إلى الأعضاء المستجيبة -العضلات والغدد. هناك نوع ثالث من العصبونات موجود في الجهاز العصبي لمعظم اللافقريات وللفقريات جميعها: **العصبونات البينية Interneurons** (أو العصبونات الرابطة). توجد العصبونات البينية في الدماغ والحبل الشوكي للفقريات، حيث تساعد على إنجاز أفعال انعكاسية أكثر تعقيدًا، ووظائف ارتباطية متقدمة كالتعلم والتذكّر.

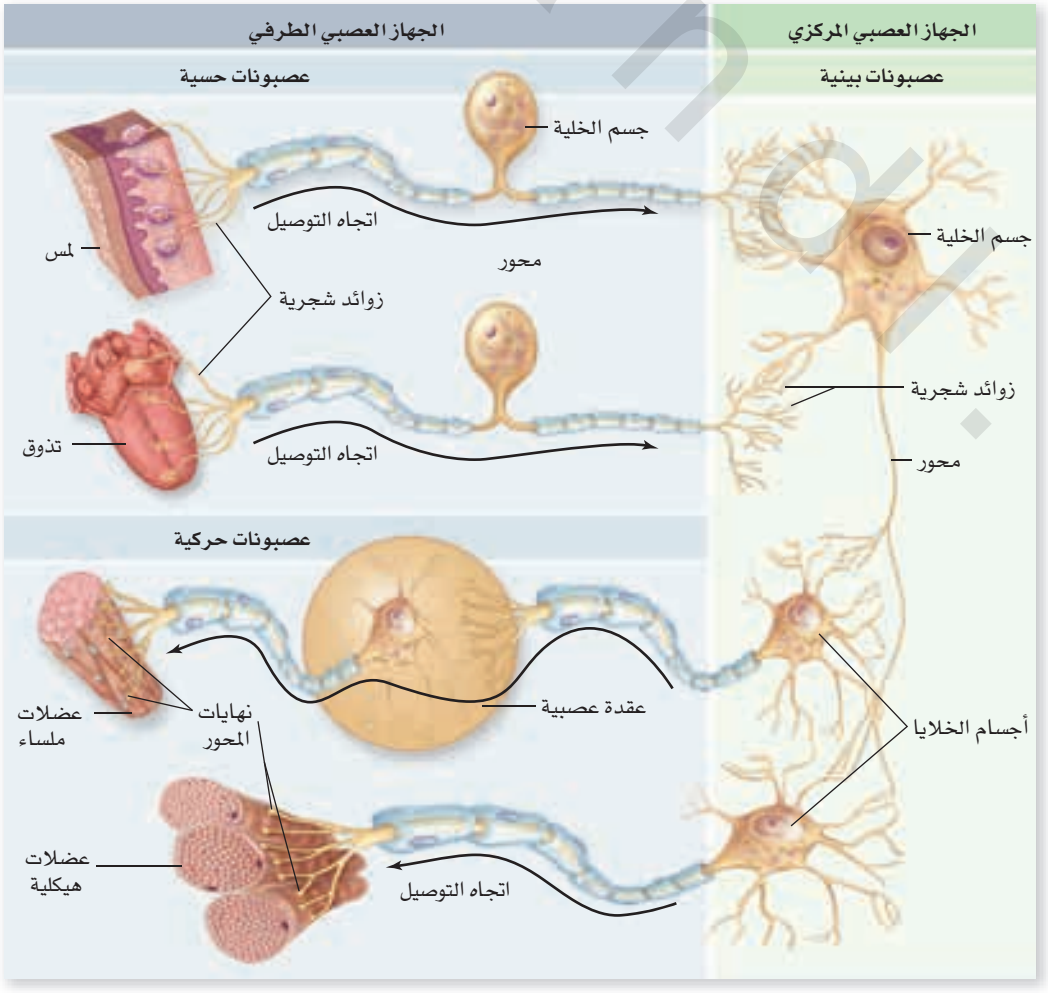
الجهاز العصبي الطرفي يجمع المعلومات وينجز الاستجابات

تشكل العصبونات الحسية والحركية معًا الجهاز العصبي في الفقريات. تشكل العصبونات الحركية التي تنبه العضلات الهيكلية للانقباض؛ **الجهاز العصبي البدني** (الجسمي) **Somatic nervous system**، أما تلك العصبونات التي تنظم نشاط العضلات الملساء والقلبية، والغدد، فتكون **الجهاز العصبي الذاتي Autonomic nervous system**.

يمكن تقسيم الجهاز الذاتي إلى قسمين أيضًا هما: **الودي Sympathetic**، **ونظير الودي Parasympathetic**. هذان القسمان يوازنان بعضهما في تنظيم كثير من الأجهزة العضوية. ويبين (الشكل 44-2) العلاقات بين أجزاء الجهاز العصبي المختلفة في الفقريات.

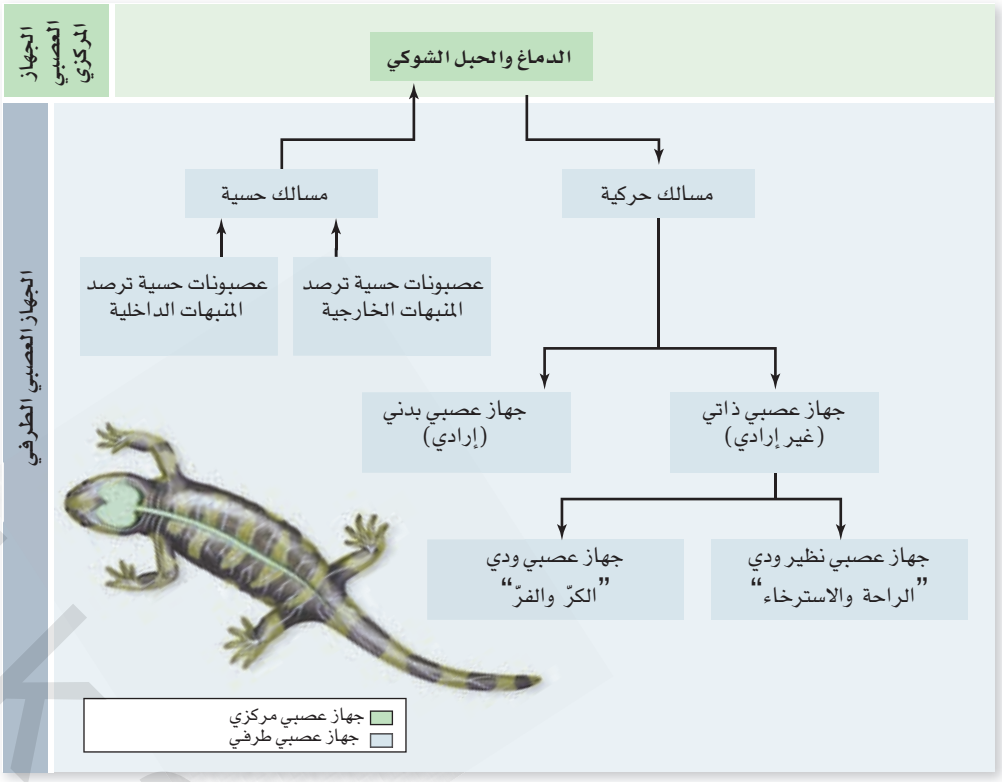
تركيب العصبونات يدعم وظيفتها

معظم العصبونات لها الهندسة الوظيفية نفسها على الرغم من مظهرها المتباين (الشكل 44-3). **فجسم الخلية Cell body** هو منطقة متوسعة من السيتوبلازم تحتوي النواة. ويمتد من جسم الخلية واحد أو أكثر من امتدادات سيتوبلازمية تدعى **الزوائد الشجرية Dendrites**. تمتلك العصبونات الحركية والبينية (الرابطة) عددًا كبيرًا من الزوائد الشجرية بالغة التفرع، فتمكن



الشكل 44-1

ثلاثة أنوع من العصبونات. يشكل الدماغُ والحبلُ الشوكي الجهازَ العصبيَّ المركزيَّ في الفقريات، في حين تشكل العصبوناتُ الحسيةُ والحركيةُ الجهازَ العصبيَّ الطرفيَّ. تنقل العصبوناتُ الحسية في الجهاز الطرفي المعلوماتِ حول البيئة إلى الجهاز المركزي. وتقدم العصبوناتُ البينية وصلاتٍ بين العصبونات الحسية والحركية. أما العصبونات الحركية للجهاز الطرفي فتنقلُ السيالات أو الأوامر إلى العضلات والغدد (المستجيبات).



الشكل 44-2

أقسام الجهاز العصبي في الفقريات. الأقسام الرئيسة هي الجهاز العصبي المركزي والطرفي. يشكل الدماغ والحبل الشوكي الجهاز المركزي، أما الجهاز الطرفي فيتكون من كل شيء خارج الجهاز المركزي، وهو يقسم إلى مسالك حسية وأخرى حركية. ترصد المسالك الحسية المنبهات الخارجية والداخلية. تقسم المسالك الحركية إلى جهاز عصبي بدني يحفز العضلات الإرادية (كتلك التي تتحكم في حركة الهيكل العظمي) وجهاز عصبي ذاتي يحفز العضلات اللاإرادية (كالعضلات الملساء التي تسيطر على حركة الغذاء في القناة الهضمية). الجهازان العصبيان الودي ونظير الودي هما جزء الجهاز الذاتي، وهما يسببان أفعالًا متعاكسة.

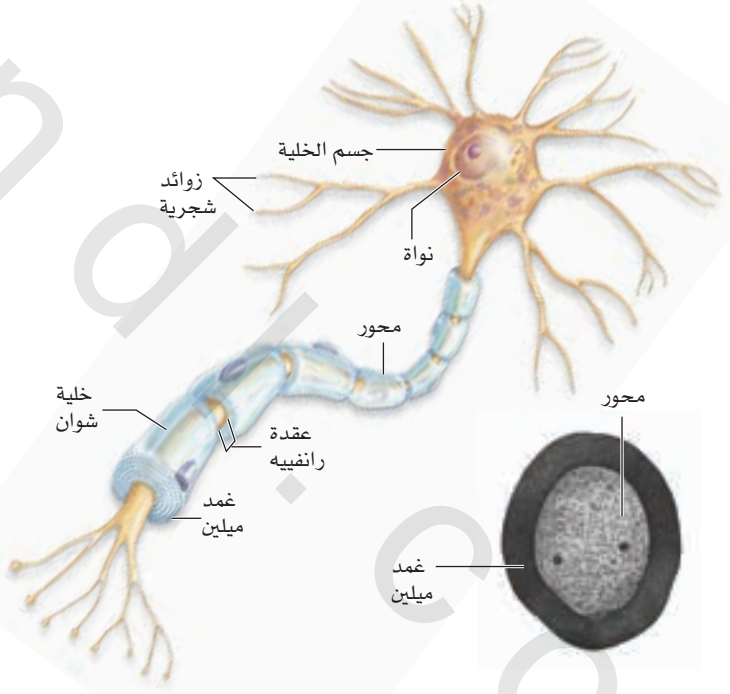
بذلك الخلية من استقبال المعلومات من مصادر مختلفة وعدة في الوقت نفسه. بعض العصبونات لها امتدادات تنبعث من الزوائد الشجرية تدعى أشواكًا شجرية *Dendritic spines* تزيد من المساحة السطحية المتوافرة لاستقبال المنبهات.

يقوم سطح الخلية بتكامل المعلومات الواردة إليه من الزوائد الشجرية، فإذا كان تهيج الغشاء من هذه المعلومات كافيًا، فإن الخلية ستطلق سيالات تنتقل بعيدًا عن جسم الخلية على طول **المحور Axon**. كل عصبون له محور واحد يغادر جسم الخلية، على الرغم من أن المحور قد يتفرع لتنبيه عدد من الخلايا. المحور قد يكون طويلًا، فالمحاور التي تسيطر على العضلات في قدم المرء يمكن أن يتجاوز طولها مترًا، والمحاور التي تمتد بين جمجمة الزرافة وحوضها يصل طولها ثلاثة أمتار.

الخلايا الداعمة تشمل خلايا شوان وخلايا الدبق قليلة الزوائد

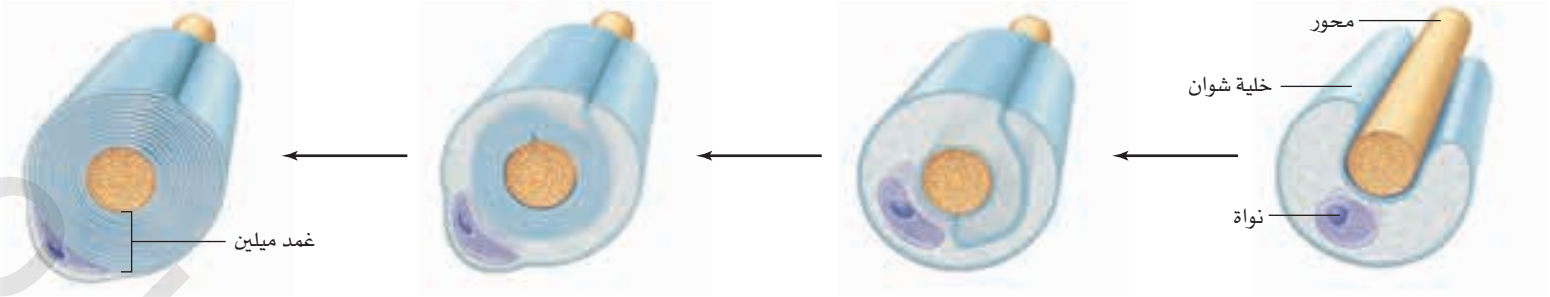
تُدعَّم العصبونات تركيبًا ووظيفيًّا عن طريق خلايا داعمة يطلق عليها اسم **خلايا الدبق العصبي Neuroglia**. هذه الخلايا التي يبلغ حجمها عشر حجم العصبونات، ويبلغ عددها عشر مرات قدر عدد العصبونات تخدم وظائف متعددة بما في ذلك تزويد العصبونات بالمواد الغذائية، وإزالة الفضلات الضارة من العصبونات، وهَدْي المحاور في أثناء هجرتها، والقيام بوظائف مناعية.

يوجد نوعان مهمان من خلايا الدبق في الفقريات هما **خلايا شوان Schwann cells** وخلايا الدبق قليلة الزوائد **Oligodendrocytes** وكلاهما يكون **الغمد الميليني Myelin sheath** الذي يحيط بمحاور كثير من العصبونات. تشكل خلايا شوان غمد الميلين في الجهاز العصبي الطرفي، في حين تشكل خلايا الدبق قليلة الزوائد غمد الميلين في الجهاز المركزي. تقوم هذه الخلايا بلف نفسها، في أثناء التكوين الجنيني مرات عدة حول كل محور لتشكل غمد الميلين، الذي يشكل غطاءً عازلًا يتكون من طبقات متعددة من الأغشية المتراصة (الشكل 44-4).



الشكل 44-3

تركيب عصبون نموذجي في الفقريات. يمتد من جسم الخلية كثير من الزوائد الشجرية التي تستقبل المعلومات، وتنقلها إلى جسم الخلية. ويوجد محور واحد ينقل السيالات بعيدًا عن جسم الخلية. كثير من المحاور مغلفة بغمد ميلين، حيث تعزل طبقات متعددة من الأغشية المحور. يتقطع الغمد بفجوات صغيرة، تدعى عقد رانفييه، على فترات منتظمة. تشكل خلايا شوان الغمد في الجهاز الطرفي (كما هو مبين لهذا العصبون) في حين تشكل امتدادات من خلايا الدبق قليلة الزوائد غمد ميلين في الجهاز المركزي.



الشكل 44-4

تكوين غمد ميلين حول محور طرفي. يتشكل غمد الميلين بالتفاف متعاقب لأغشية خلية شوان حول المحور.

تدعى المحاور التي تمتلك غمد ميلين محاور مغمدة (ذات أغماد)، في حين تدعى المحاور التي لا تمتلك الغمد (غيرَ مغمدة). تشكل المحاور المغمدة في الجهاز المركزي **المادةَ البيضاء White matter** أمّا الزوائد الشجرية وأجسام الخلايا غير المغمدة فتشكل **المادةَ الرمادية Gray matter**. تجتمع المحاور المغمدة في الجهاز الطرفي في حزم، وتجتمع الأسلاك في كابل، لتشكل **الأعصاب Nerves**.

تقطع ثغرات صغيرة تدعى **عقد رانفييه Nodes of ranvier** (انظر الشكل 44-3) غمد الميلين على فترات مقدارها 1 2- ميكرومتر. وسنناقش دور غمد الميلين في توصيل السيال في الجزء الآتي.

تشكل العصبونات وخلايا الدبق العصبي الجهاز العصبي المركزي والطرفي في الفقريات. تؤدي العصبونات الحسية والحركية والبينية أدوارًا مختلفة في الجهاز العصبي. معظم العصبونات لها مكونات وظيفية متشابهة، هي: الزوائد الشجرية، وجسم الخلية، والمحور. تساعد خلايا الدبق العصبونات على أداء وظائفها، على الأقل بتكوين غمد الميلين.

2-44 آلية انتقال السيال العصبي عبر الغشاء البلازمي

تعتمد وظيفة العصبون على النفاذية القابلة للتغير للأيونات. فعند التنبيه، تنتشر تغيرات كهربائية في الغشاء البلازمي، وتسري في جزء من الخلية إلى آخر. وتهيئ هندسة العصبون الآليات التي تُنتج، وتنشر هذه التغيرات في الجهد الكهربائي للأغشية.

تعتمد الآليات الفريدة للعصبونات بشكل أساسي على وجود بروتينات ناقلة متخصصة في الأغشية وعلى كيفية تنشيط هذه البروتينات. وسنفحص أولًا بعض الخصائص الكهربائية الأساسية المشتركة في الأغشية البلازمية لمعظم الخلايا الحيوانية، ثم لنرَ كيف تعمل هذه الخصائص في العصبونات.

يوجد فرق جهد كهربائي عبر الغشاء البلازمي

لقد تعلمت في البداية شيئًا عن فرق جهد غشاء الخلية في الفصل الـ 5؛ حيث ناقشنا آنذاك نقل الأيونات عبر غشاء الخلية. فرق جهد الغشاء شبيه بفرق الجهد الكهربائي الذي يوجد بين قطبي بطارية مصباح يد أو بطارية سيارة. فأحد القطبين موجب والثاني سالب. يوجد فرق جهد كهربائي، بصورة مماثلة، عبر كل غشاء خلية حية. وجانب الغشاء المعرض للسيتوبلازم يشكل القطب السالب، في حين يشكل الجانب المعرض للسائل خارج الخلايا القطب الموجب.

يحافظ العصبون على **فرق جهد الراحة Resting potential** عندما لا يكون منبهًا. وحيث إن الخلية صغيرة، فإن فرق جهد غشائها يكون صغيرًا أيضًا، إذ يتراوح فرق جهد الراحة لغشاء عصبونات الفقريات بين 40 - إلى 90- مليفولت، أو 0.04 إلى 0.09 من الفولت. وفي الأمثلة التي سنضربها، وفي الأشكال المستخدمة في هذا الفصل، سوف نستخدم قيمة معدل فرق جهد الراحة على أنه 70- مليفولت. والإشارة السالبة تشير هنا إلى أن داخل الخلية يكون سالبًا بالنسبة إلى خارجها.

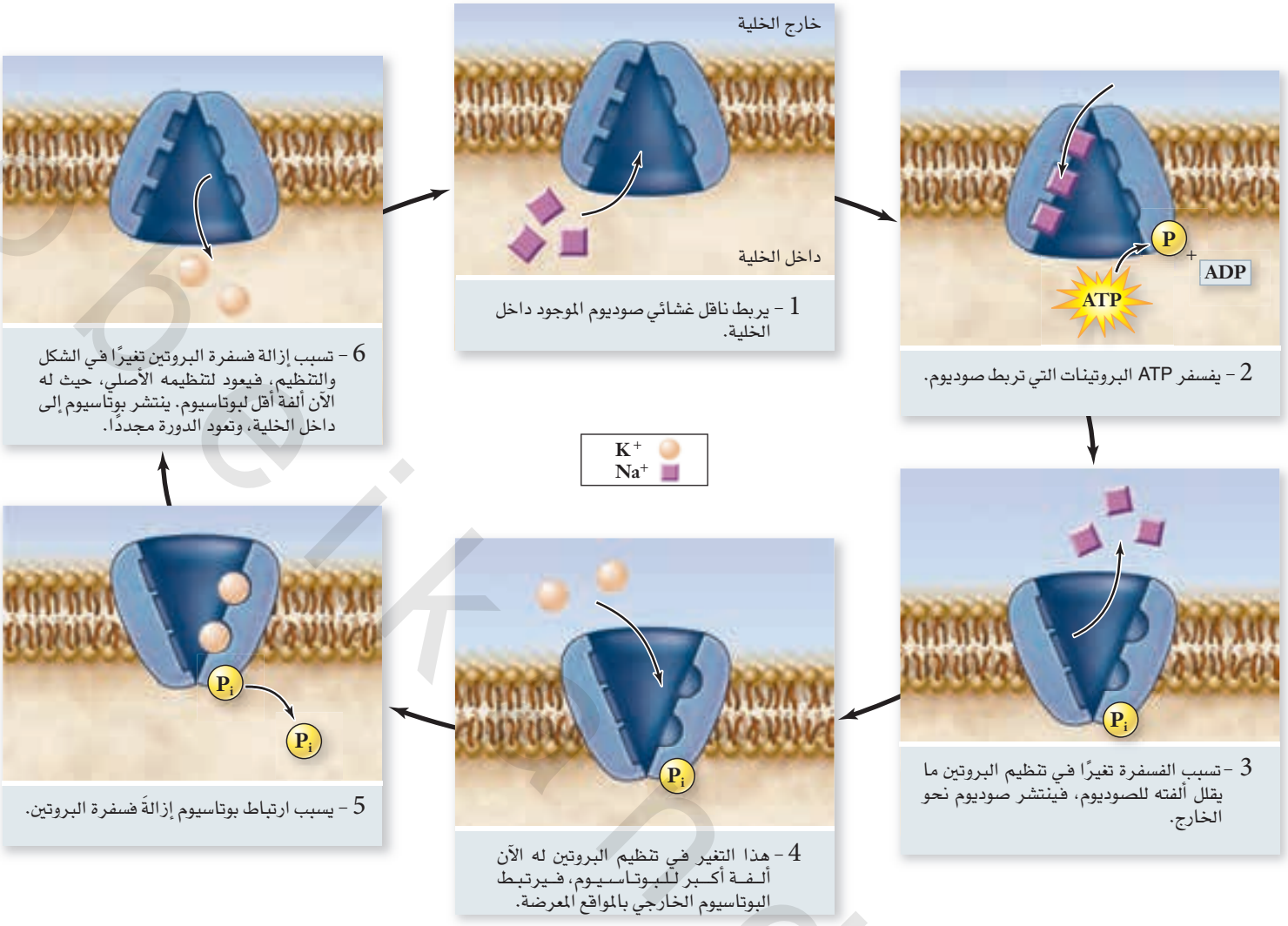
المساهمون في فرق جهد الغشاء

يكون داخل الخلية أغنى بالشحنات السالبة من خارجها بسبب عاملين:

1. **مضخة الصوديوم - بوتاسيوم**، التي وصفت في الفصل الـ (5)، تقوم بإحضار أيوني بوتاسوم إلى داخل الخلية مقابل كل ثلاثة أيونات Na^+ تضخها للخارج (الشكل 44 - 5). يساعد هذا في إقامة فرق تركيز ثم المحافظة عليه، حيث يسبب ارتفاعًا في تركيز K^+ وانخفاضًا في تركيز Na^+ داخل الخلية، ويسبب تركيزًا مرتفعًا للصوديوم ومنخفضًا للبوتاسيوم خارج الخلية.
2. **قنوات التسريب الأيونية** الموجودة في غشاء الخلية للبوتاسيوم أكثر عددًا منها للصوديوم. قنوات تسريب الأيونات هي بروتينات غشائية تشكل ثقوبًا خلال الغشاء، وتسمح بتدفق أيونات معينة (مثل K^+ و Na^+) داخل الخلية وخارجها. ونظرًا لأن هناك قنوات أيونية أكثر لأيون K^+ فإن انتشار هذا الأيون خارج الخلية هو أسهل من انتشار Na^+ إلى داخلها.

هناك قوتان تعملان على الأيونات من أجل إقامة فرق جهد الراحة:

1. فرق الجهد الكهربائي الذي ينتج بسبب التوزيع غير المتساوي للشحنات.
2. الفرق في تركيز الأيونات الذي ينتج بسبب التراكيز غير المتساوية للجزيئات بين جانبي الغشاء.



الشكل 44–5

مضخة صوديوم –بوتاسيوم. تنقل هذه المضخة ثلاثة أيونات صوديوم لخارج الخلية، وفي الوقت نفسه تنقل أيوني بوتاسيوم إلى داخلها. يتطلب هذا الناقل النشط فسفرة وطاقة من ATP.

فرق جهد الراحة: التوازن بين الفرقين

ينشأ فرق جهد الراحة بسبب فعل مضخة صوديوم –بوتاسيوم والنفاذية التفاضلية للغشاء لصوديوم وبوتاسيوم الناتجة بسبب القنوات التسربية. فالمضخة تنقل ثلاثة أيونات Na^+ إلى الخارج مقابل أيوني K^+ نحو الداخل، ما يؤدي إلى اضطراب قليل في توازن الأيونات الموجبة خارج الخلية. هذا الأمر له تأثير ضئيل فقط، لكن فرق التركيز الذي تسببه المضخة سيكون بالغ الأهمية؛ فتركيز K^+ سيكون أعلى بكثير داخل الخلية منه خارجها ما يقود إلى تسرب K^+ خلال قنوات K^+ التسربية المفتوحة. وحيث إن الغشاء غير منفذ للأيونات السالبة التي يمكن أن تعاكس وتوازن هذا التسرب (الفوسفات العضوية والأحماض الأمينية والبروتينات بشكل أساسي)، فإن ذلك سيقود إلى بناء شحنة موجبة خارج الغشاء وشحنة سالبة داخله. إن فرق الجهد الكهربائي هذا سيشكل قوة تجذب أيونات K^+ ثانية داخل الخلية. يقود التوازن بين قوة الانتشار والقوة الكهربائية إلى **فرق جهد الاتزان Equilibrium potential** (الجدول 44–1). وبأخذ الشغل الذي تنجزه كل نوع من القوى في الحسبان، فإننا نستطيع اشتقاق تعبير كمي لفرق جهد

الجدول 44-1 المكونات الأيونية للسيتوبلازم وللسائل خارج الخلايا

الأيون	التركيز في السائل خارج الخلايا (مليمول)	التركيز في السيتوبلازم (مليمول)	النسبة (خارج الخلايا: السيتوبلازم)	فرق جهد التوازن (مليفولت)
Na^+	150	15	10 :1	+ 60
K^+	5	150	1 :30	- 90
Cl^-	110	7	1 :15	- 70

التوازن يدعى معادلة نيرنست. فبافتراض وجود أيون واحد موجب وشحنته تساوي 1+ فإن معادلة نيرنست تصبح:

$$E_K = 58\ mV \log([K^+]_{out}/[K^+]_{in})$$

وسيكون فرق جهد التوازن حسابيًّا للبوتاسيوم هو 90- مليفولت (انظر الجدول 44-1)، قريبًا من القيمة المقيسة، وهي 70- مليفولت. وستكون القيمة المحسوبة لصوديوم هي 60+ مليفولت، وهي من الواضح بعيدة جدًا عن القيمة المقيسة لجهد الراحة، ولكن تسرب كميات قليلة من Na^+ إلى الخلية سيكون مسؤولًا عن انخفاض جهد الراحة للغشاء إلى 70- مليفولت، وهي القيمة الملاحظة. يمكن قياس جهد الراحة لغشاء عصبون ورؤيته وتصويره باستخدام جهاز فولتميتر، وزوج من الأقطاب يوضع أحدها خارج الخلية والآخر داخلها (الشكل 44-6).

إن تفرد العصبونات عند مقارنتها بمعظم أنواع الخلايا لا يكمن في إنتاجها لفرق جهد الراحة والحفاظ عليه، بل في الاضطراب المفاجئ والمؤقت لفرق جهد الراحة الذي يحدث استجابة للمنبهات. يمكن ملاحظة نوعين من التغيرات عند التنبيه، هما: الجهود المتدرجة، وجهود الفعل.

الجهود المتدرجة تغيرات صغيرة تعزز أو تلغي بعضها بعضًا

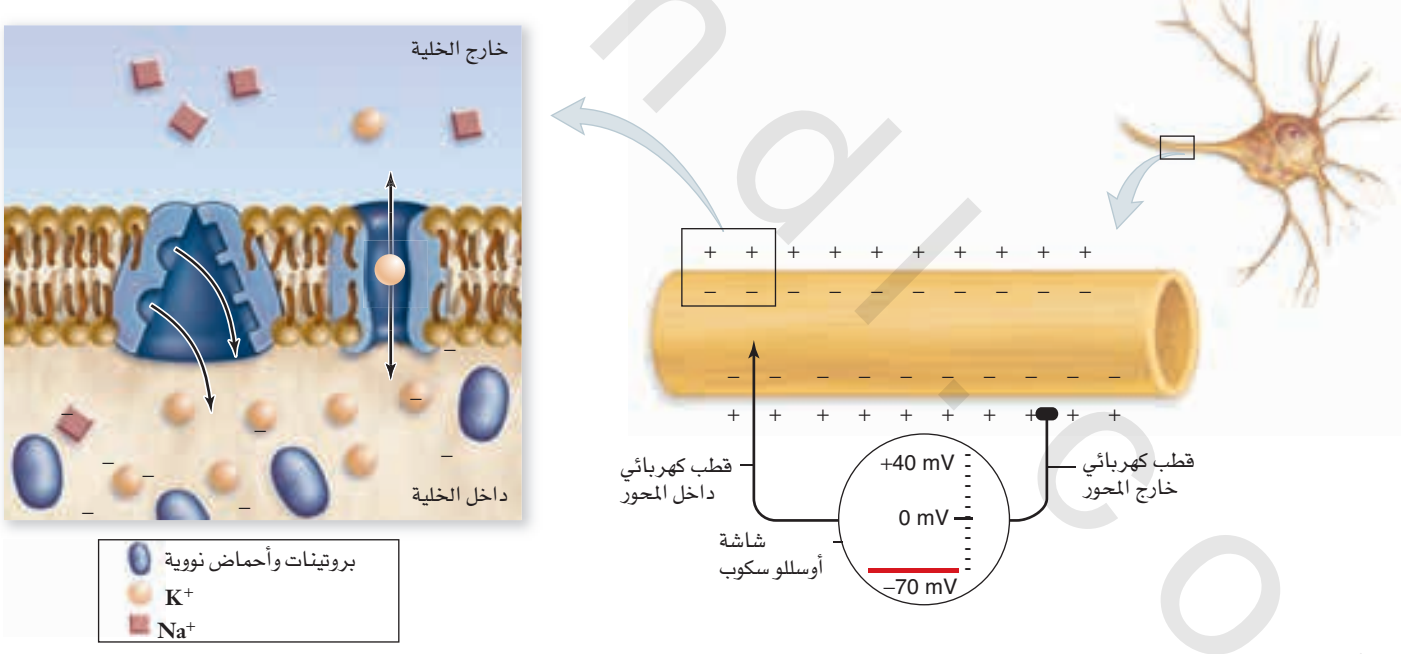
الجهود المتدرجة Graded potentials تغيرات صغيرة آنية في فرق جهد الغشاء وسببها تنشيط طائفة من بروتينات القنوات تدعى **قنوات أيونية مُبوبة Gated ion channels** وكما قدمنا في الفصل الـ(9) ، فإن القنوات المبوبة تتصرف كالباب الذي يمكن فتحه وغلقه، وليس كالقنوات التسربية التي تكون مفتوحة باستمرار. إن تركيب القنوات الأيونية المبوبة مشابه لما لو أن لها شكلين متبادلين، بحيث يمكن أن تكون مفتوحة، فتسمح بمرور الأيونات، أو أن تكون مغلقة، فلا تسمح بمرورها. كل قناة مبوبة هي انتقائية؛ لأنها تسمح بعبور نوع واحد فقط من الأيونات عندما تكون مفتوحة، وتكون معظم القنوات المبوبة مغلقة في الخلية الطبيعية في أثناء الراحة.

القنوات المبوبة كيميائيًّا

في معظم العصبونات، تستجيب القنوات الأيونية المبوبة في الزوائد الشجرية لارتباط جزيئات الترميز بها (الشكل 44-7، انظر أيضًا الشكل 44-9أ). يشار إلى هذه القنوات إنها مبوبة كيميائيًّا أو مبوبة بالرابط. والرابط هو مجموعة كيميائية يمكن أن تتعلق بجزيء أكبر لتنظيم وظيفته، أو المساهمة بها. وعندما ترتبط الروابط مؤقتًا ببروتينات الغشاء المستقبلة أو بالقنوات، فإنها تحدث تغيرًا في شكل البروتين، وهكذا تفتح القناة الأيونية. تعمل الهرمونات والنواقل العصبية كروابط؛ إذ تستحث فتح قنوات مبوبة بالرابط، وتسبب تغيرات في نفاذية الغشاء البلازمي ما يؤدي إلى تغيرات في فرق جهد الغشاء.

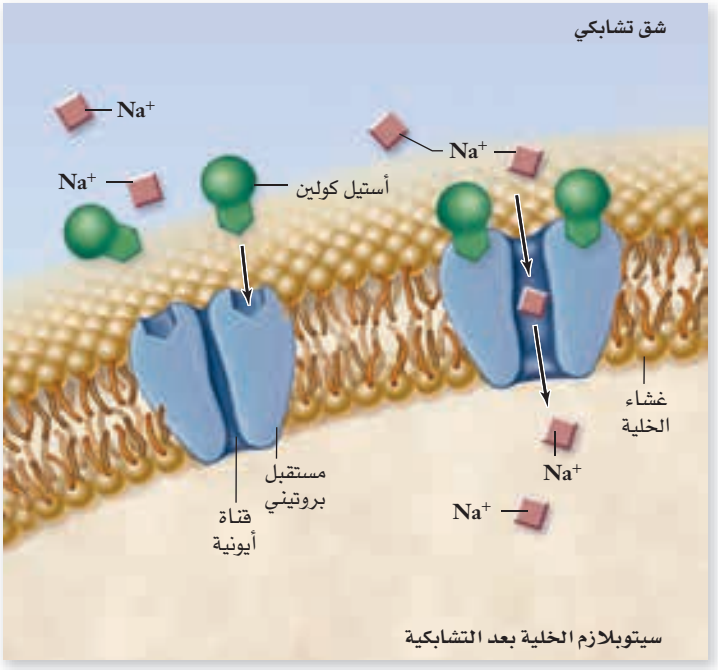
إزالة الاستقطاب وزيادته

يمكن قياس التغيرات في النفاذية على هيئة إزالة استقطاب في فرق جهد الغشاء أو زيادته. تجعل **إزالة الاستقطاب Depolarization** فرق جهد الغشاء أقل سلبية (أكبر إيجابية) أمّا **زيادة الاستقطاب Hyperpolarization** فتجعل فرق جهد الغشاء أكثر سلبية. فمثلًا، سيكون تغير فرق الجهد من 70- مليفولت إلى 65- مليفولت إزالة استقطاب، في حين يكون التغير من 70- مليفولت إلى 75- مليفولت زيادةً في الاستقطاب.



الشكل 44-6

تأسيس فرق جهد الراحة للغشاء وإدامته. يستخدم جهاز فولتميتر له قطب موضوع داخل غشاء المحور وقطب آخر خارج الغشاء. يكون فرق الجهد الكهربائي داخل الغشاء 70- مليفولت بالنسبة إلى خارجه. تغادر أيونات بوتاسيوم الخلية عن طريق قنوات تسربية بسبب الانتشار مع فرق التركيز. ولا تستطيع البروتينات والأحماض النووية المشحونة بشحنة سالبة داخل الخلية مغادرتها، بل إنها تجلب أيونات موجبة مثل K^+ من خارج الخلية. يُنتج هذا التوازن بين القوة الكهربائية وقوة الانتشار فرق جهد الراحة. وتحافظ مضخة صوديوم -بوتاسيوم على الاتزان بمعاكسة أثر تسرب أيونات صوديوم إلى الخلية، وتسهم في فرق جهد الراحة بإزالة 3 أيونات صوديوم مقابل كل أيوني بوتاسيوم ينقلان للداخل.



الشكل 44-7

قناة أيونية مبوّبة كيميائيًا. مستقبل أستيل كولين هو قناة مبوبة كيميائيًّا، تستطيع ربط الناقل أستيل كولين. يسبب ارتباط أستيل كولين فتح القناة لتسمح لأيونات الصوديوم بالتدفق إلى داخل الخلية بالانتشار.

تُنتج هذه التغيرات الصغيرة في فرق جهد الغشاء جهودًا متدرجة؛ لأن حجمها يعتمد إما على قوة المنبه، أو على كمية الرابط المتوافرة للارتباط بالمستقبلات. تتضاءل فروق الجهد هذه في مقدارها عندما تنتشر بعيدًا عن نقطة نشوئها. يمكن أن تضاف جهود إزالة الاستقطاب أو زيادته إلى بعضها لتضخم من أثر بعضها أو لتقلله، تمامًا كما يحدث عندما تجتمع موجتان معًا بتطابق لتكوّنا موجة أكبر، أو عندما تلغي إحداهما الأخرى عندما تلتقي قمة إحداهما مع قعر الأخرى. تدعى قابلية الجهود المتدرجة على الاتحاد **التجميع Summation** (الشكل 44-8). وسنعود لهذا الموضوع في الجزء الآتي بعد أن نناقش طبيعة جهد الفعل.

يحدث جهد الفعل عندما تصل إزالة الاستقطاب حد العتبة

عندما تصل إزالة الاستقطاب حدًّا معينًا (55- مليفولت في بعض محاور الثدييات) ينتج سيال عصبي أو **جهد فعل Action potential** في المنطقة التي ينشأ فيها المحور من جسم الخلية. يدعى مستوى إزالة الاستقطاب الذي تحتاج إليه الخلية لإنتاج جهد الفعل **فرق جهد العتبة Threshold potential**. تُقرِّب إزالة الاستقطاب العصبون نحو جهد العتبة، في حين تُبعد زيادة الاستقطاب العصبون عن جهد العتبة.

ينتج جهد الفعل بفعل طائفة أخرى من القنوات الأيونية؛ **القنوات الأيونية المبوبة بفرق الجهد Voltage-gated ion channels**. تفتح هذه القنوات وتغلق استجابة لتغيرات في فرق جهد الغشاء، حيث ينشئ تدفق الأيونات التي تتحكم بها هذه القنوات جهد الفعل.

توجد القنوات المبوبة بفرق الجهد في العصبونات، وفي الخلايا العضلية. وهناك قناتان مختلفتان تُستخدمان لإيجاد جهد الفعل في العصبونات، هما: **قنوات الصوديوم المبوبة بفرق الجهد voltage-gated Na^+ channels وقنوات البوتاسيوم المبوبة بفرق الجهد voltage-gated K^+ channels**.

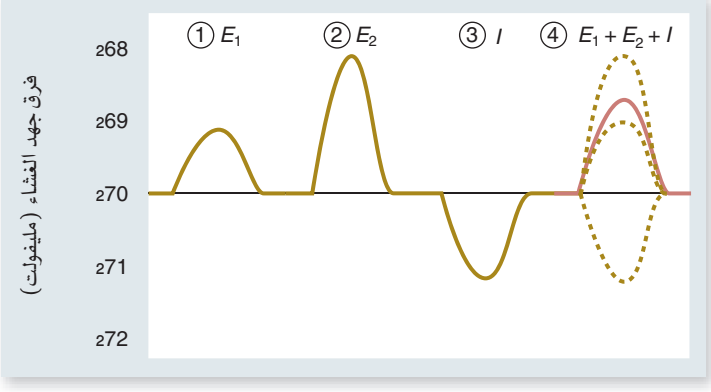
قنوات الصوديوم والبوتاسيوم المبوبة بفرق الجهد

إن سلوك قنوات الصوديوم المبوبة بفرق الجهد أكثر تعقيدًا من سلوك قنوات البوتاسيوم، ولهذا سنناقشها أولًا. للقناة بوابتان: بوابة تنشيط وبوابة تعطيل. عندما تكون الخلية في حالة راحة، تكون قناة التنشيط مغلقة، وقناة التعطيل مفتوحة. وعندما يصل فرق الجهد حد العتبة، تفتح قناة التنشيط بسرعة مؤدية إلى دخول الصوديوم إلى الخلية بسبب فرق التركيز والفرق الكهربائي. بعد مدة وجيزة جدًا، تغلق قناة التعطيل، فيتوقف تدفق أيونات Na^+ وتصبح القناة في حالة تعطيل مؤقت. تعاد القناة إلى حالة الراحة بإغلاق قناة التنشيط وفتح قناة التعطيل ثانية. ويكون نتيجة هذا السلوك تدفق لحظي مؤقت لأيونات Na^+ ما يسبب إزالة استقطاب الغشاء استجابة لفرق جهد العتبة.

أما قنوات البوتاسيوم فلها قناة تنشيط واحدة تكون مغلقة في أثناء الراحة. تفتح هذه القناة ببطء استجابة لفرق جهد العتبة. وحيث إن تركيز K^+ داخل الخلية هو عالٍ جدًا، وجهد الغشاء الآن أصبح بعيدًا عن جهد الاتزان، فإن ذلك يؤدي إلى خروج K^+ من الخلية. يعاكس تأثير الشحنة الموجبة الخارجة من الخلية أثر قنوات Na^+ ويسبب إعادة استقطاب الغشاء.

تَتَبع التغيرات في جهد الفعل

دعنا الآن نضع الأمور جميعها معًا، ونرى كيف يقود تدفق الأيونات المتغير إلى جهد الفعل. لجهد الفعل ثلاثة أطوار: الارتفاع، والهبوط، والتجاوز (الشكل 44-9).



الشكل 44-8

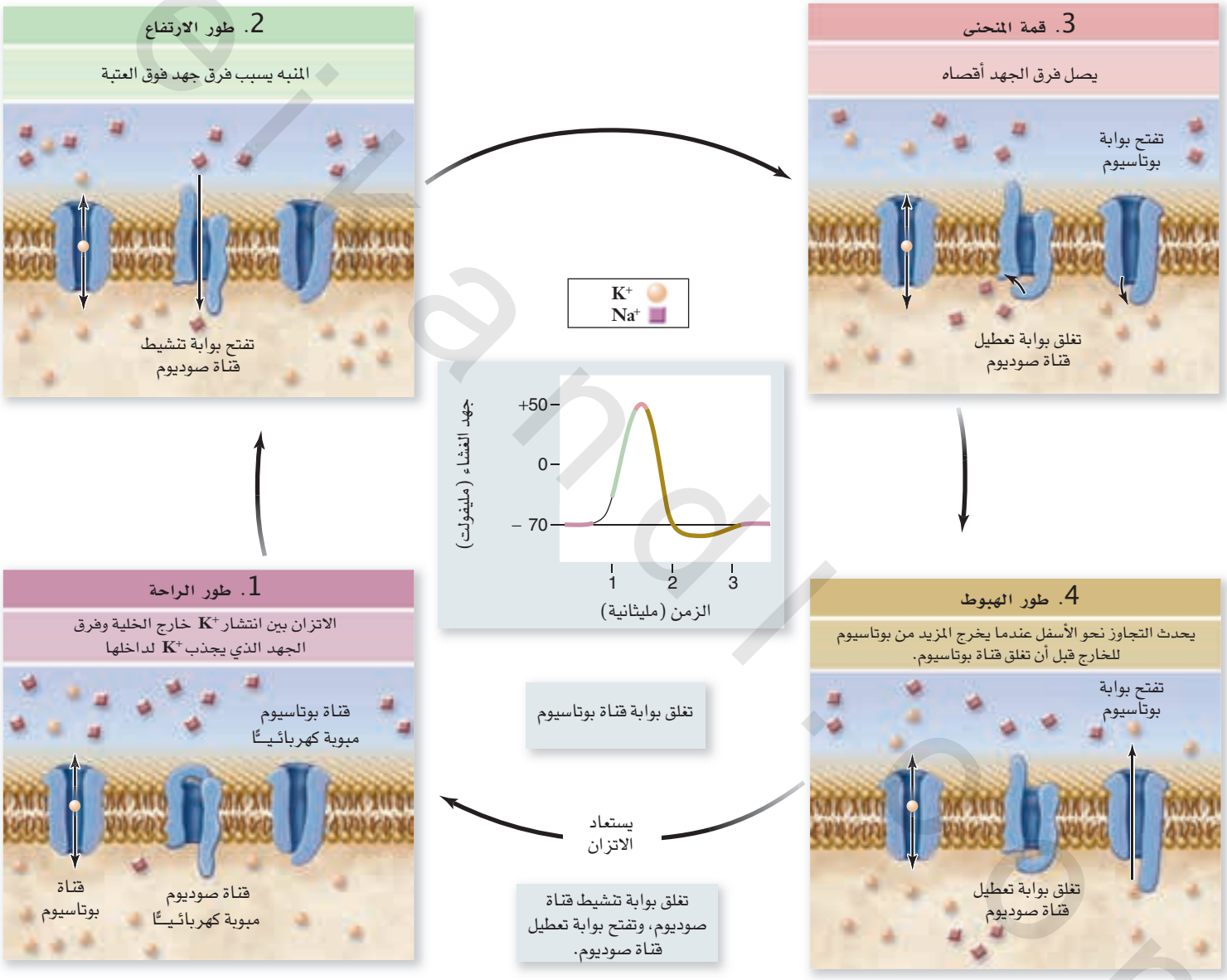
الجهود المتدرجة. تجميع لتغيرات تحت عتبوية في فرق الجهد تنتج عن فتح قنوات أيونية مختلفة مبوبة كيميائيًّا (1) منبه مهيج ضعيف (E_1) يسبب إزالة استقطاب أصغر من (2) منبه مهيج أقوى (3). (E_2) منبه مثبط (I) ينتج زيادة استقطاب. (4) إذا وقعت المنبهات الثلاثة قريبة من بعضها زمنيًّا، فإن التغير الناتج في القطبية سيكون المجموع الجبري للتغيرات الثلاثة.

عندما يصل جهد غشاء الخلية حد العتبة، فإن فتح قنوات Na^+ بسرعة يؤدي إلى تدفق Na^+ إلى الخلية ما يرفع جهد غشاء الخلية نحو جهد الاتزان للصوديوم (60+ مليفولت). وهذا يظهر على هيئة طور ارتفاع عند النظر إلى جهاز أوسللوسكوب. لكن جهد الغشاء لن يصل أبدًا إلى 60+ مليفولت؛ لأن بوابة التعطيل لقناة الصوديوم ستغلق بسرعة ما ينهي طور الارتفاع. في الوقت نفسه، يؤدي فتح قناة K^+ لتدفق K^+ خارج الخلية ما يسبب إعادة استقطاب الغشاء وظهور طور الهبوط. تبقى قنوات K^+ مفتوحة مدة أطول مما هو ضروري لإعادة فرق جهد الراحة ما يحدث بعض من التجاوز. ويستغرق تسلسل هذه الأحداث كاملة لجهد فعل واحد نحو 1 مليثانية.

طبيعة جهود الفعل

تكون جهود الفعل دائمًا منفصلة، وتوصف بأنها أحداث "كل أو عدم" وأن لها المقدار نفسه.

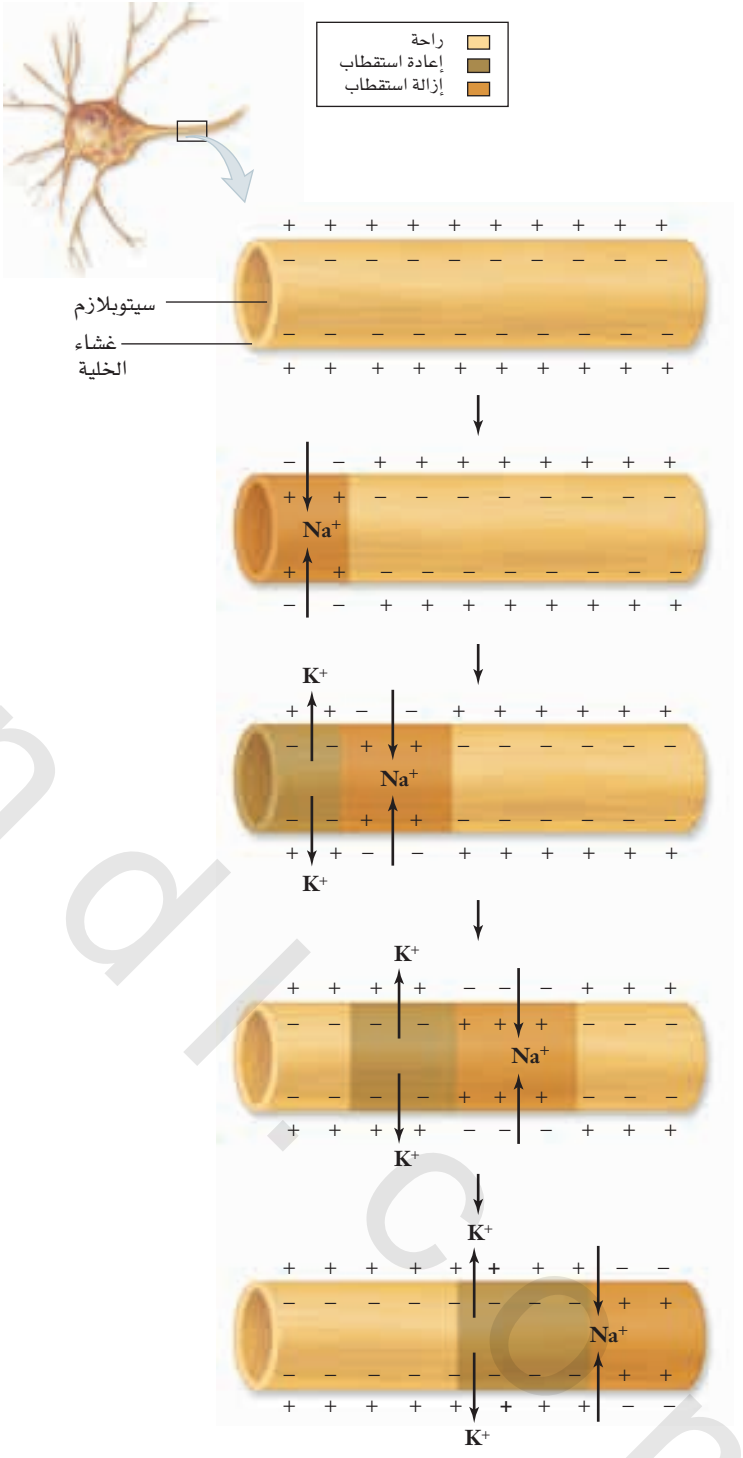
يحدث جهد الفعل عندما تصل الخلية حد فرق جهد العتبة، وليس عندما يكون الغشاء أقل من ذلك الجهد. ولا تضاف جهود الفعل لبعضها، أو يتدخل أحدها في الآخر، كما يحدث في الجهود المتدرجة. وبعدما "تنطلق" قنوات Na^+ (أي تفتح) فإنها تبقى في حالة معطلة مدة إضافية مقدارها مليثانية واحدة إلى أن يعاد فتح بوابة التعطيل، ما يمنع حدوث أي تجميع لجهود الفعل. ويستخدم الجهاز العصبي تكرار جهود الفعل، وليس مقدارها للحصول على معلومات عن شدة المنبه.



الشكل 44–9

جهد الفعل. (1) عند فرق جهد الراحة تكون القنوات الأيونية المبوبة بفرق الجهد مغلقة، ولكن هناك بعض التسرب لأيون K^+. استجابة للمنبه، تبدأ الخلية إزالة استقطاب، وعندما تصل إلى مستوى العتبة ينتج جهد الفعل. (2) تحدث إزالة استقطاب سريعة (الجزء الصاعد من المنحنى) لأن بوابات تنشيط قنوات الصوديوم تفتح سامحة للصوديوم بالانتشار داخل المحور. (3) عند قمة المنحنى، تغلق بوابة تعطيل قناة صوديوم، وتفتح قنوات بوتاسيوم المبوبة بفرق الجهد التي كانت مغلقة سابقًا. (4) عندما تفتح قنوات K^+ تحدث إعادة استقطاب بسبب انتشار K^+ خارج المحور. يحدث بعض التجاوز نحو الأسفل قبل أن يعود الغشاء إلى جهد الراحة الأصلي.

ينتج جهد الفعل بكامله بسبب الانتشار السلبي للأيونات. ومع ذلك، فإنه مع نهاية كل جهد فعل سيحتوي السيتوبلازم على كمية أكثر من Na^+، وكمية أقل من K^+ مما كان عليه في أثناء الراحة. وعلى الرغم من أن عددًا قليلًا نسبيًّا من الأيونات ينتقل مع كل جهد فعل، فإن هذا العدد القليل سيكون له تأثير مهم في النهاية. لهذا، فإن



الشكل 44-10

سريان جهد الفعل في محور غير مغمد. عندما تُنتج منطقة جهد فعل، ويحدث بها انعكاس في القطبية، فإنها تعمل بوصفها منبه إزالة استقطاب للمنطقة اللاحقة في المحور. بهذه الطريقة، يتجدد جهد الفعل عند كل منطقة صغيرة في غشاء المحور غير المغمد.

النشاط المستمر لمضخة صوديوم- بوتاسيوم يعوض عن هذه التغيرات. لذا، على الرغم من أن النقل النشط ليس مطلوبًا لإحداث جهود الفعل، فإنه مطلوب للحفاظ على فروق تركيز الأيونات.

تسري جهود الفعل على طول محور العصبون

إن حركة جهد الفعل على طول المحور لا تتم بتدفق الأيونات من قاعدة المحور حتى نهايته. فبدلًا من ذلك، ينشأ جهد الفعل عند قاعدة المحور، ثم يعاد تكوينه في القطعة المجاورة من الغشاء، وهكذا على طول المحور.

يعكس كل جهد فعل في طور ارتفاعه انعكاسًا في قطبية الغشاء. فالشحنات الموجبة الناتجة عن تدفق Na^+ للداخل تستطيع إزالة استقطاب المنطقة المجاورة من الغشاء إلى حد العتبة، ولهذا تتمكن المنطقة المجاورة من إنتاج جهد فعل خاص بها (الشكل 44-10). في أثناء ذلك، تعيد المنطقة السابقة من الغشاء الاستقطاب ثانية إلى فرق جهد الراحة. وعليه، فإن الإشارة لا تسير في اتجاه الخلف؛ لأن قنوات Na^+ التي كانت قد "أطلقت" توًّا لا تزال في حالة تعطيل، وتكون جامحة (مقاومة) للتنبيه.

إن سريان جهد الفعل يشبه حركة الجمهور في مدرج كبير، وهم يصنعون "موجة" فالأشخاص يبقون في أماكنهم المحددة عندما يقفون (إزالة استقطاب)، ويرفعون أيديهم (قمة جهد الفعل) ثم يجلسون ثانية (إعادة استقطاب) ثم تنتقل الموجة مع محيط المدرج، ولكن الأشخاص يبقون في أماكنهم.

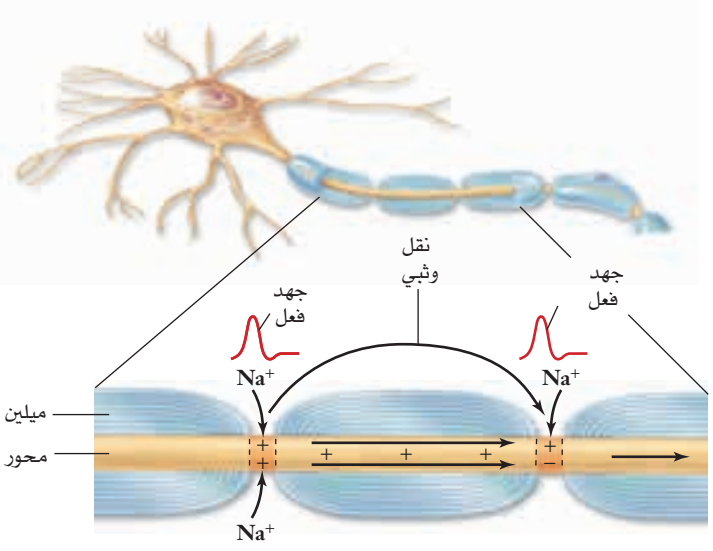
طريقتان لزيادة سرعة السيال العصبي

تنتقل جهود الفعل دون تناقص في مقدارها (ارتفاعها) بحيث إن آخر جهد فعل عند نهاية المحور سيكون له الحجم نفسه بوصفه أول جهد فعل. وقد طورت الحيوانات طريقتين لزيادة سرعة السيال العصبي. تكون سرعة نقل السيال العصبي أكبر عندما يكون قطر المحور كبيرًا، أو عندما يكون المحور مغمدًا (ذا غمد) (الجدول 44-2).

تؤدي زيادة قطر المحور إلى زيادة سرعة السيالات العصبية بسبب خاصية المقاومة الكهربائية. فالمقاومة الكهربائية تتناسب عكسيًّا مع مساحة المقطع العرضي التي تعتمد على قطر المحور. لذا، فإن المحاور ذات القطر الأكبر لها مقاومة أقل لتدفق التيار. فالشحنات الموجبة التي تحملها أيونات Na^+ تتدفق مسافة أبعد في محور ذي قطر أكبر مما يقود إلى فرق جهد أعلى من العتبة في منطقة أبعد عن نقطة تدفق Na^+ الأصلية.

الجدول 44-2 سرعات التوصيل في بعض المحاور

	قطر المحور (ميكرومتر)	الميلين	سرعة التوصيل (م/ثانية)
محاور الحبَّار العملاقة	500	لا	25
محاور حركية كبيرة لعضلات رِجل الإنسان	20	نعم	120
محاور من مستقبلات الضغط بجلد الإنسان	10	نعم	50
محاور من مستقبلات الحرارة من جلد الإنسان	5	نعم	20
محاور حركية لأعضاء الإنسان الداخلية	1	لا	2



الشكل 44-11

النقل الوثبي في محور ميليني. تنتج جهود الفعل عند عقد رانفييه في المحور المغمد فقط. إذ تسبب كل عقدة إزالة استقطاب العقدة المجاورة لها، بحيث يمكن لجهد الفعل القفز من عقدة إلى أخرى. نتيجة لهذا، فإن النقل الوثبي في المحاور المغمدة يكون أسرع من النقل في المحاور غير المغمدة.

توجد محاور ذات قطر كبير في اللافقريات بشكل رئيس. ففي الحبَّار مثلًا، يُسيطر محور عملاق على استجابة الهرب. ينقل هذا المحور الضخم السيالات العصبية أسرع من بقية محاور الحبّار الأصغر ما يسمح باستجابة هرب سريعة. وقد استخدم كل من هودجكن وهكسلي المحاور العملاقة للحبّار في دراساتهما الرائدة في بث السيال العصبي.

تنقل المحاور المغمدة السيالات بسرعة أكبر من المحاور غير المغمدة؛ لأن جهود الفعل في المحاور المغمدة تنتج فقط عند عقد رانفييه. فجهد الفعل الواحد ينبّه إزالة استقطاب لجهد فعل لاحق، ولكن إزالة الاستقطاب عند عقدة معينة تنتشر بسرعة تحت غمد الميلين لكي تسبب فتح قنوات مبوبة بفرق الجهد عند العقدة المجاورة لها. وهكذا يبدو أن السيال يقفز من عقدة إلى أخرى (الشكل 44-11) في عملية تدعى **النقل الوثبي Saltatory conduction**.

ولكي نفهم كيف يسرِّع النقل الوثبي توصيل السيال، دعنا نَعُدْ قليلًا إلى مثال المدرج والجمهور لوصف انتقال جهد الفعل؛ تنتقل الموجة عبر مقاعد مدرج مزدحم عندما يرى المشجعون الناس في المقاطع المجاورة لهم يقفون، ما يدفعهم للوقوف أيضًا. ونظرًا لأن الموجة تقفز عن الأماكن الخالية فإنها تدور حول المدرج بسرعة أكبر لو كان هناك المزيد من الأماكن المجاورة المكتظة، تمامًا كما يفعل جهد الفعل عندما يقفز عن المناطق غير الموصلة المغطاة بالميلين الواقعة بين العقد المعراة.

ينتج التوزيع غير المتساوي للشحنات عبر غشاء الخلية فرق جهد الراحة. ويكون داخل الغشاء مشحونًا بشحنة سالبة مقارنًا بخارجه (جهد فعل الراحة هو 70- مليفولت تقريبًا). الجهود المتدرجة الناتجة عن فتح قنوات أيونية مبوبة بالرابط يمكن أن تزيل استقطاب الغشاء أو تزيد استقطابه، وهذه الجهود يمكن دمجها (تجميع). يحدث جهد الفعل عندما تتجاوز إزالة الاستقطاب قيمة العتبة. جهود الفعل هي أحداث (كل أو عدم)، وهي لا تخضع للتجميع. تسري جهود الفعل على طول المحور، إذ ينبّه جهد فعل معين إزالة استقطاب لجهد الفعل اللاحق. يمكن زيادة سرعة السيالات العصبية بزيادة قطر المحور وبوجود الميلين عليه.

3-44 التشابك العصبي: حيث تتواصل العصبونات مع خلايا أخرى

يصل جهد الفعل بعد مروره على طول المحور، أخيرًا إلى نهاية المحور وإلى تفرعاته جميعها. هذه الفروع قد تشكل مفاصل مع الزوائد الشجرية لعصبونات أخرى، أو لخلايا عضلية، أو لخلايا غدية. تسمى هذه المفاصل بين الخلوية **تشابكات عصبية Synapses**. فالعصبون الذي يبث محوره جهود فعل إلى التشابك العصبي يدعى قبل تشابكي *Presynaptic* والعصبون الذي يتسلّم الإشارة على الجانب الآخر من التشابك بعد تشابكي *Postsynaptic*.

نوعا التشابك العصبي: كهربائي وكيميائي

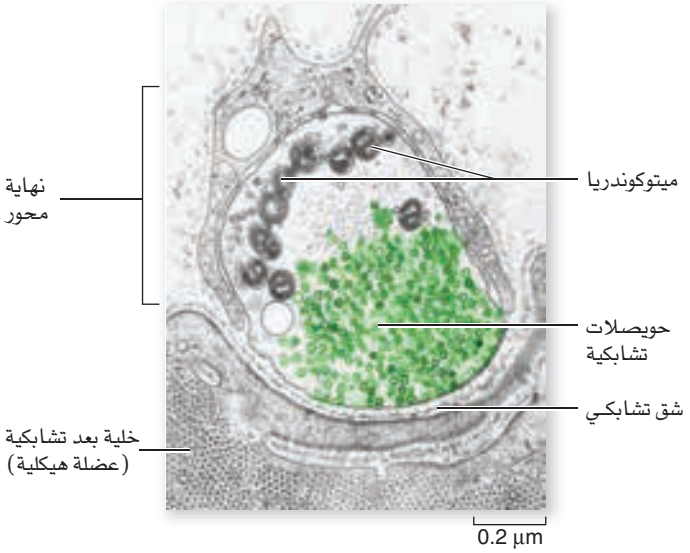
يوجد نوعان أساسيان من التشابكات في الجهاز العصبي للحيوانات: كهربائي وكيميائي. **التشابكات الكهربائية Electrical synapses** تتضمن وصلات سيتوبلازمية مباشرة تشكلها مفاصل فجوية بين العصبونات قبل التشابكية وبعد التشابكية (الفصل الـ 9، انظر الشكل 9-17). فالتغيرات في جهد الغشاء بما في ذلك جهود الفعل تمر مباشرة وبسرعة من خلية إلى أخرى خلال المفاصل الفجوية. التشابكات الكهربائية شائعة في الجهاز العصبي للافقريات، ولكنها نادرة بعض الشيء في الفقريات.

الأغلبية العظمى لتشابكات الفقريات هي **تشابكات كيميائية Chemical synapses**. عندما يُنظر إلى التشابك العصبي تحت المجهر الضوئي يبدو، وكأن الخلية قبل التشابكية والخلية بعد التشابكية تتلامسان، ولكن عندما ينظر إليه عن طريق المجهر الإلكتروني، فإن معظمها يمتلك **شقًّا تشابكيًّا Synaptic cleft** وهو حيز ضيق يفصل الخليتين (الشكل 44-12).

تكون نهاية المحور قبل التشابكي منتفخة، وتحتوي كثيرًا من **حويصلات تشابكية Synaptic vesicles**، تكون كل منها مملوءة **بناقل عصبي Neurotransmitter**. وعندما يصل جهد الفعل إلى نهاية المحور، فإنه ينبه فتح قنوات كالسيوم مبوبة بفرق الجهد ما يسبب انتشارًا سريعًا نحو الداخل لأيونات Ca^{2+}. يطلق هذا التدفق لكالسيوم سلسلة معقدة من الأحداث تقود إلى التحام الحويصلات مع الغشاء البلازمي، وإلى تحرر الناقل العصبي بعملية إخراج خلوي (الفصل الـ 5، انظر الشكل 44-13).

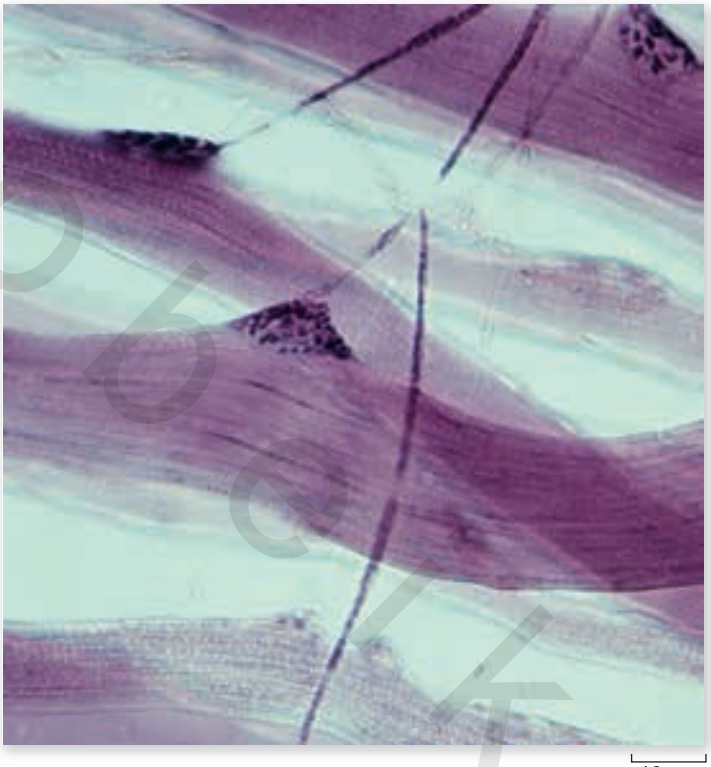
وكلما كان تكرار جهود الفعل في المحور قبل التشابكي أعلى، كان عدد الحويصلات التي تحرر محتواها من النواقل العصبية أكبر. ينتشر الناقل العصبي إلى الجانب الآخر من الشق التشابكي، ويرتبط **بمستقبلات بروتينية Receptor proteins** مبوبة كيميائيًّا، أي عن طريق الرابط، موجودة على غشاء الخلية بعد التشابكية. ينتج نشاط هذه المستقبلات جهودًا متدرجة في غشاء الخلية بعد التشابكية.

تشكل النواقل العصبية إشارات كيميائية في وسط نظام كهربائي، وبذا تتطلب سيطرة محكمة على مدة عملها. فالنواقل يجب أن تزال بسرعة من الشق التشابكي؛ لكي تُفسح المجال لنقل إشارة جديدة. وهذا يتم بآليات مختلفة، بما في ذلك



الشكل 44-12

الشق التشابكي. تبين صورة مأخوذة باستخدام المجهر الإلكتروني التشابك العصبي العضلي، وقد جرى تلوين الحويصلات التشابكية باللون الأخضر.



الشكل 44-14

المفاصل العصبية العضلية. تبين هذه الصورة المأخوذة بالمجهر الضوئي محاور تتفرع لتصنع تشابكات عدة مع ألياف عضلية مفردة متعددة.

الهضم الأنزيمي في الشق التشابكي، وإعادة تناول جزيئات الناقل من قبل العصبونات وأخذها عن طريق خلايا الدبق العصبي.

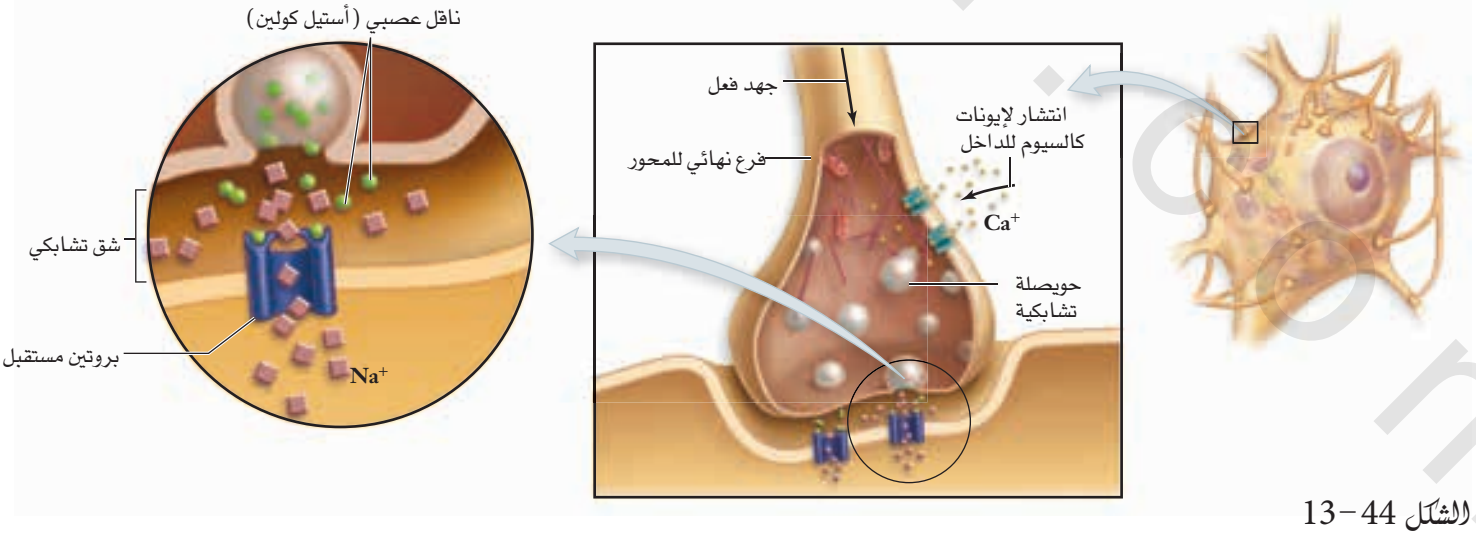
وقد أمكن تحديد هوية أنواع عدة مختلفة من النواقل العصبية التي تعمل بطرق مختلفة. وسنناقش في الجزء الآتي عمل قليل من النواقل الكيميائية المهمة.

كثير من المركبات الكيميائية المختلفة تعمل نواقل عصبية

ليست هناك صفة كيميائية واحدة تُعرف بها النواقل العصبية، على الرغم من أننا نستطيع تجميع بعض الأنواع بناءً على تماثلها الكيميائي. فبعضها، مثل أستيل كولين، له استخدام واسع في الجهاز العصبي خاصة، حيث ترتبط الأعصاب بالعضلات، أما بعض النواقل الأخرى فتوجد في أنواع محددة من المفاصل فقط، كما في الجهاز العصبي المركزي.

أستيل كولين *Acetylcholine*

أستيل كولين هو الناقل العصبي الذي يعبر التشابك بين عصبون حركي وليف عضلي. هذا التشابك يدعى **المفصل العصبي العضلي Neuromuscular junction** (الأشكال 44-13، 44-14). يرتبط أستيل كولين بمستقبلاته



الشكل 44-13

تحرر الناقل العصبي. تُسبب جهود الفعل الواصلة إلى نهاية المحور انتشار أيونات كالسيوم للداخل، ما يسبب التحام الحويصلات التشابكية مع الغشاء البلازمي، وتحرر النواقل العصبية التي بها (أستيل كولين في هذه الحالة). تنتشر جزيئات الناقل العصبي عبر الشق التشابكي، وترتبط بمستقبلات مبوبة بالرابط إلى الغشاء بعد التشابكي.

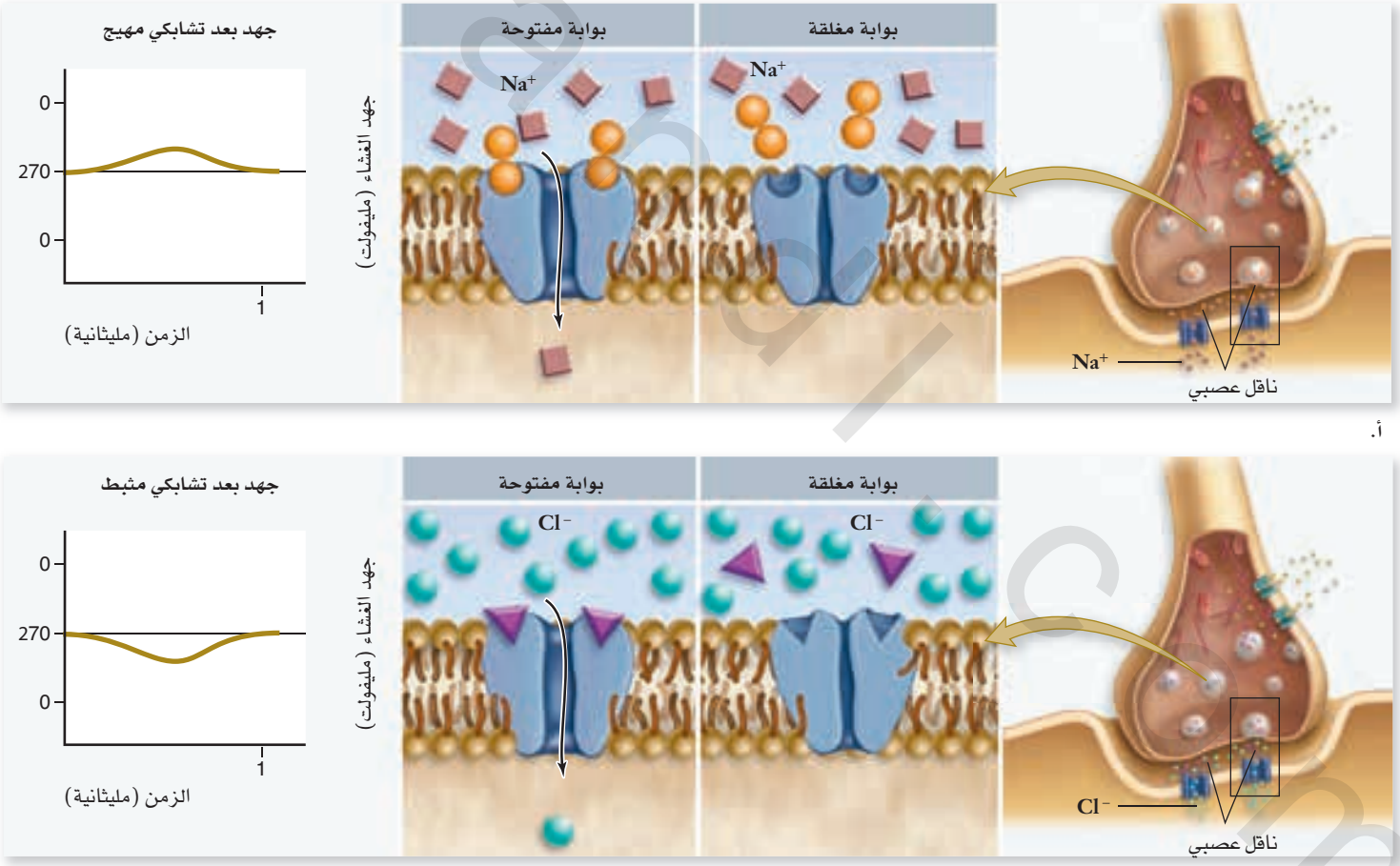
البروتينية على الغشاء بعد التشابكي، ويدفع قنوات أيونية مبوبة بالرابط، تقع ضمن هذه البروتينات، لأن تفتح (انظر الشكل 44-7). نتيجة لذلك، فإن ذلك الموقع على الغشاء بعد التشابكي ينتج إزالة استقطاب (الشكل 44-15أ) تدعى **جهدَ بَعْدَ تشابكي مهيجًا Excitatory post-synaptic potential**. عندما يكون هذا الجهد المهيج كبيرًا بما فيه الكفاية، فإنه يمكن أن يفتح قنوات صوديوم وبوتاسيوم المبوبة بفرق الجهد والمسؤولة عن إنشاء جهد الفعل. وحيث إن الخلية بعد التشابكية في هذه الحالة هي ليف عضلي هيكلي، فإن جهد الفعل الذي تنتجه ينبه انقباض العضلة خلال آليات سنناقشها في الفصل الـ (47).

ولكي تنبسط العضلة، فإن أستيل كولين يجب أن يُزال من الشق التشابكي. ويتم ذلك عن طريق أنزيم في الغشاء بعد التشابكي يُدعى أستيل كولين إستريز. يشق هذا الأنزيم، وهو من أسرع الأنزيمات المعروفة، مادة أستيل كولين إلى أجزاء غير فعالة. وتشكل غازات الأعصاب ومبيد الحشرات الزراعي باراثيون مثبطات قوية للأنزيم. ففي الإنسان، تستطيع هذه المواد أن تسبب شللًا تشنجيًّا وموتًا إذا أصاب الشلل العضلات التنفسية. وعلى الرغم من أن أستيل كولين يعمل ناقلًا عصبيًّا بين العصبونات الحركية وخلايا العضلات الهيكلية، فإن كثيرًا من العصبونات تستخدم أستيل كولين ناقلًا عند تشابكاتها مع الزوائد الشجرية، أو أجسام العصبونات الأخرى.

الأحماض الأمينية

يُعدّ **جلوتاميت Glutamate** الناقل العصبي المهيج الرئيس في الجهاز العصبي المركزي للفقريات. تعمل النواقل المهيجة على إنتاج جهود فعل عن طريق جهود بعد تشابكية مهيجة. بعض العصبونات في أدمغة المرضى الذين يعانون مرض هنتنجتون يحدث بها تغيرات تجعلهم فائقي الحساسية لجلوتاميت، ما يؤدي إلى تهتك عصبي.

حمضا **جلايسين Glycine وجابا GABA** (اختصارًا لحمض جاما أمينوبيوتيريك) هما ناقلان عصبيان مثبطان. يسبب هذان الناقلان فتح قنوات مبوبة بالرابط لأيون الكلور الذي له فرق تركيز يحبذ انتشاره إلى داخل العصبون. وحيث إن Cl^- مشحون بشحنة سالبة، فإن عبوره يجعل داخل الغشاء أكثر سلبية مما هو عليه في أثناء الراحة من 70- مليفولت إلى 85- مليفولت مثلاً (انظر الشكل 44-15ب). تدعى زيادة الاستقطاب هذه جهدًا بعد تشابكي تثبيطي، وهي مهمة جدًا للسيطرة على حركات الجسم، وعلى وظائف أخرى للدماغ، ويحدث عقار ديازيبام (الفاليوم) أثره المهدئ وغيره من الآثار بتحسينه لارتباط جابا بمستقبلاته ما يزيد من فعالية جابا عند التشابك.



الشكل 44-15

يمكن أن يكون للنواقل العصبية المختلفة تأثيرات مختلفة. أ. يسبب الناقل العصبي المهيج إزالة استقطاب، أو جهدَ بَعْدَ تشابكي مهيجًا. ب. يسبب الناقل العصبي المثبط زيادة استقطاب، أو جهدَ بَعْدَ تشابكي مثبطًا.

الأمينات الحيوية *Biogenic amines*

تضم الأمينات الحيوية هرمون إبينفرين (أدرنالين) والناقل العصبي دوبامين ونورإبينفرين وسيروتونين. يُشتق إبينفرين ونورإبينفرين ودوبامين من الحمض الأميني تيروسين، وتقع معًا في تحت مجموعة تدعى كاتيكولأمينات، أما سيروتونين فهو أمين حيوي مُشتق من حمض أميني مختلف هو تربتوفان.

يتحرر **إبينفرين Epinephrine** إلى الدم بوصفه هرمونًا. أما **نورإبينفرين Norepinephrine** فهو يتحرر عند التشابكات العصبية في الجهاز العصبي الودّي (سنناقشه لاحقًا بالتفصيل). إن آثار هذه النواقل العصبية على المستقبلات الهدف مسؤولة عن استجابتي "الكرّ أو الفرّ" اللتين تشملان نبضًا أسرع وأقوى للقلب، وارتفاعًا في تركيز جلوكوز الدم وتحويلًا لتدفق الدم نحو العضلات والقلب.

أما **دوبامين Dopamine** فهو ناقل مهم جدًا، وتستخدمه بعض مناطق الدِّماغ للسيطرة على حركات الجسم وعلى وظائف أخرى. إن تهتّك عصبونات معينة محررة لدوبامين يسبب الارتجافات العضلية التي تحدث في أثناء الراحة في مرضى الرّعاش. إن المرضى الذين يعانون الرّعاش يعالجون بمادة L-dopa (اسمها الكامل ثنائي هيدروكسي فينل ألانين) وهي المادة المنتجة لدوبامين. إضافة إلى ذلك، فإن الدراسات تشير إلى أن النشاط الزائد للعصبونات المحررة لدوبامين في مناطق أخرى من الدماغ مرتبط بحالة انفصام الشخصية. ولهذا، فإن الأدوية التي توقف إنتاج دوبامين، أو تمنع أثره مثل مادة كلوربرومازين (ثورازين) المضادة لدوبامين تساعد أحيانًا مرضى الانفصام.

يتدخل **الناقل سيروتونين Serotonin** في تنظيم النوم، وإن له دورًا في بعض الحالات العاطفية. إن النشاط غير الكافي للعصبونات المحررة لسيروتونين قد يكون أحد أسباب الاكتئاب السريري. فالعلاج المضاد للاكتئاب المسمى فلوكسيتين (بروزاك) يمنع إزالة سيروتونين من الشق التشابكي، وتدعى هذه الأدوية مثبطات إعادة تناول سيروتونين الانتقائية.

نواقل عصبية أخرى

تحرر المحاور متعددات ببتيد مختلفة عند التشابك تدعى **الببتيدات العصبية Neuropeptides**. هذه الببتيدات قد يكون لها وظيفة ناقل عصبي نموذجي أو قد يكون لها دور مُهذب وأطول أمدًا على العصبونات بعد التشابكية، وفي الحالة الأخيرة، فإنها تدعى **محورات عصبية Neuromodulators**. عادة، يحرر المحور نوعًا واحدًا من النواقل، لكن كثيرًا منها يمكن أن يحرر ناقلًا عصبيًّا ومحورًا عصبيًّا معًا.

تشكل مادة **Substance P** ببتيدًا عصبيًّا مهمًّا يتحرر عند التشابكات في الجهاز المركزي من قبل العصبونات الحسية التي تنشطها المنبهات المؤلمة. لكن إدراك الألم يمكن أن يختلف اعتمادًا على الظروف. فلاعب كرة القدم المصاب قد لا يشعر بشدة إصابته مثلًا إلا بعد خروجه من الملعب.

تعتمد شدة إدراك الألم جزئيًّا على تأثيرات ببتيدات أخرى تدعى **إنكيفالينات وإندورفينات. الإنكيفالينات Enkephalins** التي تتحرر من محاور هابطة من الدماغ على الحبل الشوكي تثبط مرور معلومات الألم نحو الدماغ. كذلك، فإن **الإندورفينات Endorphins** التي تتحرر من عصبونات في جذع الدماغ تمنع الشعور بالألم.

إن الأفيون ومشتقاته من المورفين والهيروين لها تأثير مخفف للألم؛ لأن لها من الشبه من حيث التركيب الكيميائي ما يجعلها ترتبط بشكل طبيعي بمستقبلات إنكيفالين وإندورفين. لهذا السبب، فإن إنكيفالينات وإندورفينات يشار إليها بأنها أفيونات منتجة داخليًّا (داخل الجسم).

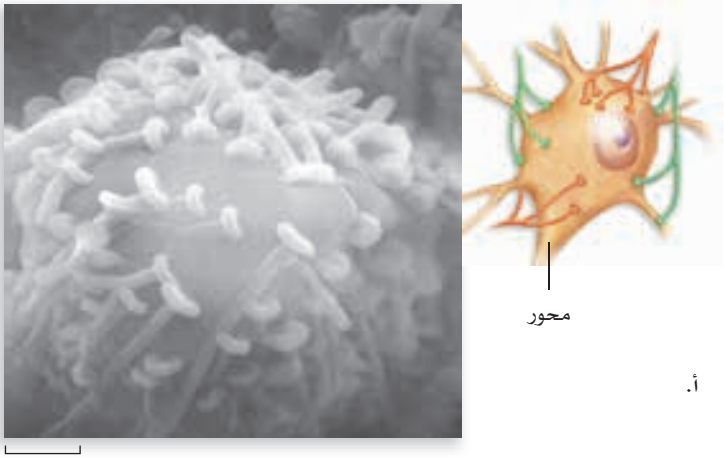
إن مادة **أكسيد النتريك Nitric oxide** هي أول غاز معروف يعمل بوصفه جزيئًا تنظيميًّا في الجسم. ولأن أكسيد النتريك غازٌ، فإنه ينتشر عبر الأغشية؛ لذا لا يمكن خزنه في حويصلات، وهو ينتج بحسب الحاجة من الحمض الأميني آرجنين. ينتشر أكسيد النتريك خارجًا من المحاور قبل التشابكية إلى الخلايا المجاورة بالمرور ببساطة عبر الأجزاء الدهنية من الأغشية البلازمية.

يتحرر أكسيد النتريك في الجهاز العصبي الطرفي من بعض العصبونات التي تغذي: القناة الهضمية، والقضيب، والممرات التنفسية، والأوعية الدموية الدماغية. هذه العصبونات الذاتية تسبب انبساطًا في العضلات الملساء لأعضائها الهدف. يمكن أن يُنتج هذا الانبساط امتلاء النسيج الإسفنجي للقضيب بالدم ما يسبب الانتصاب. ويحرر الدماغ أكسيد النتريك بوصفه ناقلًا عصبيًّا، حيث يبدو أنه يسهم في عمليات التعلم والتذكر.

على العصبون بعد التشابكي أن ينسق ويكامل المعلومات الصادرة من تشابكات عصبية متعددة

تؤثر الأنواع المختلفة من المعلومات الواردة من عدد من العصبونات قبل التشابكية في العصبونات بعد التشابكية في الدّماغ والحبل الشوكي للفقريات. فالعصبون الحركي الواحد في الحبل الشوكي، مثلًا، قد يكون لديه أكثر من 50.000 تشابك عصبي من محاور قبل تشابكية.

يتسلّم كل عصبون بعد تشابكي تشابكات مهيجة وأخرى مثبطة (الشكل 44-16). الجهود بعد التشابكية المهيجة (إزالة استقطاب) والمثبطة (زيادة استقطاب) من هذه العصبونات تتفاعل مع بعضها عندما تصل إلى جسم خلية العصبون. فالجهود المهيجة الصغيرة قد تضاف إلى بعضها لتقرب جهد الغشاء من العتبة، بينما تُطرح الجهود المثبطة من الأثر المزيل للاستقطاب للجهود المهيجة، مبعدة



أ.

ب.

الشكل 44-16

تكامل الجهود بعد التشابكية المهيجة والمثبطة يتم عند جسم الخلية العصبية. أ. التشابكات التي تصنعها بعض المحاور مهيجة (أخضر)، والمحاور التي تصنعها محاور أخرى مثبطة (أحمر). التأثير الجمعي لهذه الإشارات الواردة يقرر ما إذا كان غشاء محور الخلية بعد التشابكية قد جرت إزالة استقطابه بدرجة كافية لإنتاج جهد الفعل أم لا. ب. صورة مأخوذة باستخدام المجهر الإلكتروني لجسم عصبون، وعليه تشابكات هائلة.

بذلك جهد الغشاء عن الوصول إلى جهد العتبة. تدعى هذه العملية **التكامل التشابكي Synaptic integration**. وبسبب خاصية الكل أو العدم لجهد الفعل، فإن العصبون بعد التشابكي سيعمل بوصفه مفتاحًا كهربائيًّا؛ إما أن يدار، أو أن يبقى مغلقًا. ويجري التعبير عن المعلومات على هيئة نمط من النشاط عبر الزمن، لكن عندما يتسلّم كل عصبون إشارة إما أن يُطلق جهودَ فعل أو لا يطلق أبدًا.

إن الأحداث هي التي تقرر ما إذا كان العصبون سيطلق جهود فعل بالغة التعقيد، وقد تشمل كثيرًا من العصبونات بعد التشابكية. وهناك طريقتان يمكن لغشاء الخلية أن يصل بهما إلى فرق جهد العتبة: أن تُنتِج زوائد شجرية عدة مختلفة جهودًا بعد تشابكية مهيجة يؤدي تجميعها إلى الوصول إلى فرق جهد العتبة، أو أن تُطلقَ زائدةٌ شجريةٌ واحدةٌ عددًا متكررًا من جهود مهيجة يؤدي تجميعها إلى الوصول إلى جهد العتبة. تُدعى العمليةُ الأولى **التجميعَ المكانيَّ Spatial summation** والثانية **التجميعَ الزمانيَّ Temporal summation**.

في التجميع المكاني، تضاف الجهود بعد التشابكية المتدرجة التي تنتجها الزوائد بسبب تنبيهها بعصبونات قبل تشابكية مختلفة، التي نتجت في الوقت نفسه، إلى بعضها لتنتج فرق جهد فوق مستوى العتبة. لا يُشترط أن تكون كل هذه الإشارات القادمة بصورة جهود متدرجة مهيجة، بل يكفي أن يكون فرق الجهد الناتج عن تجميع الجهود المهيجة والجهود المثبطة أعلى من فرق جهد العتبة. وعندما يصبح الغشاء عند قاعدة المحور مُزال الاستقطاب لدرجة أعلى من العتبة، فإنه يُنتج جهد فعل، ويرسلُ سيالًا عصبيًّا على طول المحور.

أمّا في التجميع الزماني، فيمكن أن تُنتج زائدة شجرية واحدة إزالة استقطاب كافية لإنتاج جهد فعل إذا ما أنتجت جهودًا مهيجة متقاربة في الزمن لكي تجتمع معًا، وتصل إلى درجة أعلى من العتبة. إن الجهد بعد التشابكي المهيج النموذجي قد يستمر إلى 15 مليثانية تقريبًا. ولهذا، فلكي يحدث تجميع زماني يجب أن يصل السيال اللاحق في زمن أقل من هذا الزمن. فإذا أُنتجت أعداد كافية من الجهود بعد التشابكية المهيجة لترفع جهد الغشاء عند قاعدة المحور إلى ما فوق العتبة فإن السّيال سيسري.

إن التمييز بين هاتين الطريقتين من التجميع يشبه ملء حفرة في الأرض بالتراب يمكن استخدام معاول عدة تضيف التراب في الحفرة في الوقت نفسه لملئها، أو أن يُستخدم معول واحد يضيف التراب بسرعة أعلى لملء الحفرة، وعندما تمتلئ الحفرة سيطلق العصبون جهد الفعل.

تؤدي النواقل العصبية دورًا في الإدمان على العقاقير

عندما تتعرض خلايا معينة من الجهاز العصبي، بشكل ثابت، لمنبه ينتج إشارة كيميائية مدة طويلة، فإن الخلايا تفقد قدرتها على الاستجابة لذلك المنبه، وهي عملية تدعى **التعوّد Habituation**. ولعلك تألف هذا النوع من فقد الحساسية؛ فعندما تجلس على كرسي مثلًا يتضاءل وعيك بوجود الكرسي بعد مدة من الزمن.

تكون بعض الخلايا العصبية معرضة بشكل خاص أكثر من غيرها لفقد الحساسية هذا. فإذا تعرضت البروتينات المستقبلة ضمن التشابكات العصبية لمستويات من جزيئات الناقل العصبي ولمدد طويلة، فإن الخلايا بعد التشابكية غالبًا ما تستجيب بإنقاص عدد المستقبلات البروتينية في غشائها. هذه التغذية الراجعة وظيفة طبيعية في العصبونات جميعها، وهي واحدة من آليات عدة تطورت لجعل الخلية أكثر فعالية. في هذه الحالة، تعدل الخلية عدد المستقبلات بإنقاصها بسبب توافر الكثير من الناقل العصبي المنبه.

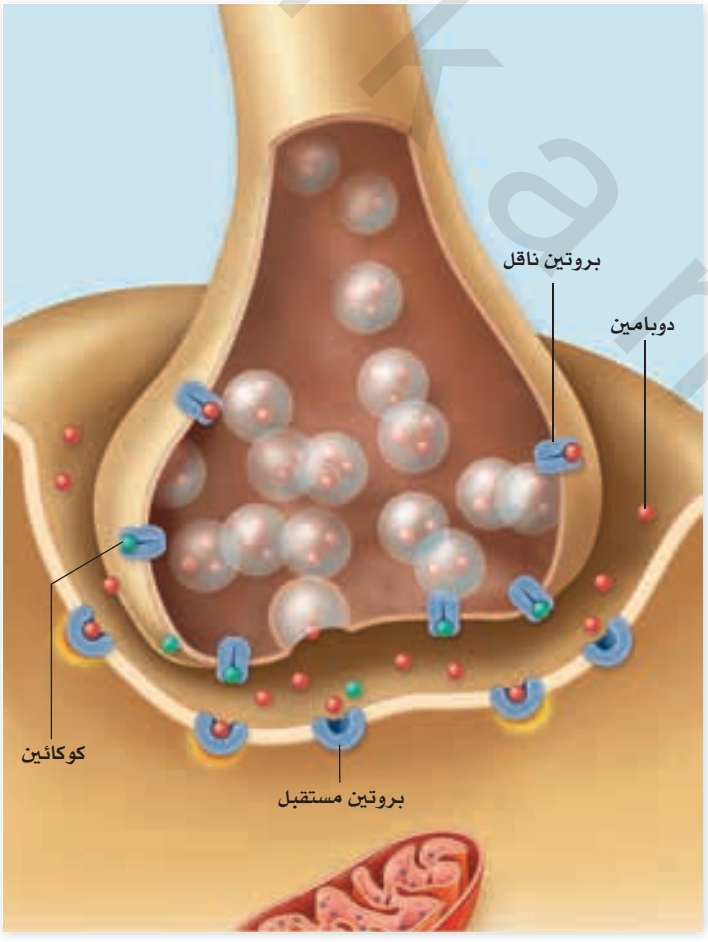
وفي حالة تأثيرات النواقل العصبية الاصطناعية التي تنتجها الأدوية، فإن استخدام الدواء مدة طويلة يعني الحاجة إلى المزيد من الدواء للحصول على التأثير نفسه.

الكوكائين *Cocaine*

يسبب عقار كوكائين تراكم كميات كبيرة بصورة غير طبيعية، من الناقل العصبي عند التشابك مدة طويلة. فهو يؤثر في عصبونات موجودة في "دوائر النشوة" في الدماغ (في الجهاز الطرفي الحَلَقي، سيوصف لاحقًا).

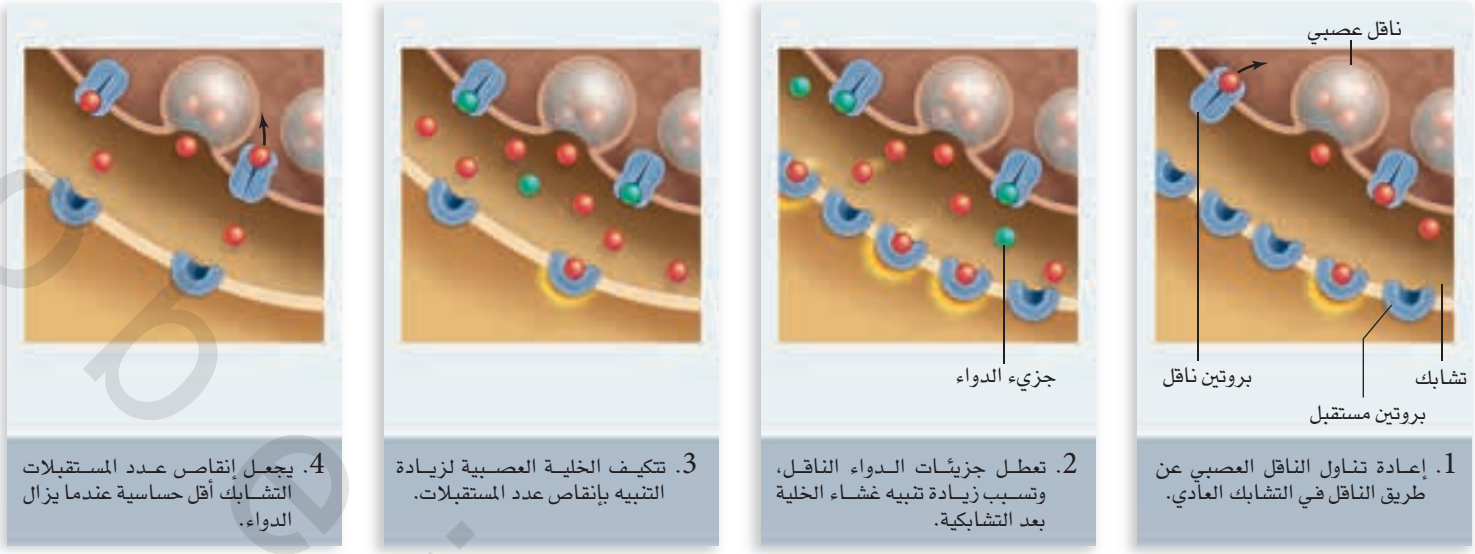
تستخدم هذه الدوائر الناقل العصبي دوبامين. يرتبط كوكائين ببروتينات ناقلة موجودة على الأغشية قبل التشابكية تزيل دوبامين من الشق التشابكي في الأحوال الطبيعية. لهذا، فإن دوبامين يبقى في الشق التشابكي مسببًا إطلاق العصبونات بشكل متكرر. وتضيف الإشارات الجديدة مزيدًا من دوبامين، ما يسبب تحفيز دوائر النشوة بشكل متكرر (الشكل 44-17).

عند التعرض المطوّل لدوبامين، تقلل عصبونات الجهاز الطرفي (الحلقي) من عدد مستقبلات دوبامين (الشكل 44-18). وهكذا يصبح من يستخدم كوكائين



الشكل 44-17

كيف يغير كوكائين الأحداث عند التشابك العصبي. عندما يرتبط كوكائين بالبروتين الناقل لدوبامين، فإنه يمنع إعادة تناول دوبامين. لهذا، فإن الناقل العصبي سيبقى مدة أطول عند التشابك، ويستمر في تنبيه الخلية بعد التشابكية. وهكذا يعمل كوكائين على تعميق الشعور بالنشوة.



الشكل 44-18

إدمان العقاقير. (1) تؤثر بعض الأدوية في العصبون بتغييرها إعادة تناول الناقل العصبي الطبيعية. (2) إذا عطّل جزيء العقار إعادة تناول الناقل العصبي، فإن الزيادة الناتجة تسبب تنبيه العصبون. (3) يتكيف الجهاز المركزي لزيادة الإطلاق بإنتاجه مستقبلات أقل في الغشاء بعد التشابكي. (4) عند إزالة الدواء، تتعافى إعادة التناول الطبيعية للناقل، وينشئ عدد المستقبلات الأقل مسلكًا عصبيًّا أقل حساسية. من ناحية وظيفية، فإن الطريقة الوحيدة كي يحافظ المرء على الوظائف الطبيعية هي تناول العقار بصورة مستمرة. أما إذا أُزيل العقار بشكل دائم ونهائي، فإن الجهاز العصبي سيتكيف أخيرًا، ويستعيد العدد الأصلي من المستقبلات.

مدمنًا، فحيث أصبح عدد مستقبلات دوبامين المتوافرة الآن قليلًا، فإن مستخدم كوكائين يحتاج الآن إلى المزيد من العقار للحفاظ على مستوى طبيعي من نشاط الجهاز الطرفي (الحلقي).

وعندما يتوقف المدمن عن استخدام كوكائين، فإنه غالبًا ما يعاني حالة إحباط مدمِّرة يصبح معها الشعور بالنشوة مستحيلًا. وتشكل الكيمياء العصبية لمدمن الكوكائين دافعًا قويًّا لكي يسعى إلى الراحة والنجدة بطلب المزيد من العقار. إن كسر هذه الحلقة صعب جدًا، إذ تبلغ نسبة النجاح 50% من الحالات فقط.

النيكوتين *Nicotine*

ليس للنيكوتين ألفة للبروتينات على الغشاء قبل التشابكي، كما للكوكائين، بدلًا من ذلك، فهو يرتبط مباشرة بمستقبلات نوعية على العصبون بعد التشابكي في الدّماغ. وحيث إن نيكوتين لا يكون موجودًا عادة في الدماغ، فلماذا نجد له مستقبلات هناك؟

وجد الباحثون أن مستقبلات نيكوتين هي طائفة من المستقبلات التي ترتبط طبيعيًّا الناقل العصبي أستيل كولين. يتكون النيكوتين في نباتات التبغ بوصفه ناتجًا ثانويًّا، وهو يؤثر في الجهاز المركزي للحشرات المتغذية على النبات، وهكذا يساعد على حماية النبات. وتُعدّ قدرة نيكوتين على الارتباط ببعض مستقبلات أستيل كولين في الإنسان مصادفة من المصادفات. فعندما يقارن علماء الأعصاب الخلايا العصبية لأدمغة المدخنين مع التي لغير المدخنين، فإنهم يجدون تغيرات في عدد مستقبلات نيكوتين، وفي مستويات RNA المستخدم في صنع هذه المستقبلات. يتكيف الدماغ للتعرض المطول والمزمن للنيكوتين باستجابة سلبية (كمن يخفف من صوت مذياع مرتفع) بطريقتين، هما: (1) بصناعة عدد أقل من المستقبلات التي يرتبط بها نيكوتين، (2) بتغيير نمط تنشيط هذه المستقبلات، أي حساسيتها تجاه التنبيه عن طريق الناقل العصبي.

بعد الاستعمال المطول، يغيِّر نيكوتين من تحرر كثير من النواقل العصبية، بما في ذلك أستيل كولين ودوبامين وسيروتونين. ويشمل التعديل كذلك حساسية المستقبلات في العصبونات بعد التشابكية وعددها. إن إزالة نيكوتين من هذا النظام المعدل (كالتوقف عن التدخين مثلًا) يسبب أعراض انسحاب فيزيائية ونفسية حادة، بما في ذلك رغبة عارمة نحو العقار. تتلاشى أعراض الانسحاب مع الزمن طالما تم تجنب النيكوتين تمامًا. فالجهاز العصبي يعيد التكيف لغياب العقار، ويستعيد وظائفه الطبيعية.

بعد أن لخصنا فسيولوجيا وكيمياء العصبونات والتشابكات، سنتجه الآن لدراسة تركيب الجهاز العصبي للفقريات ابتداءً من الجهاز العصبي المركزي، ثم الجهاز العصبي الطرفي.

التشابكات الكهربائية شائعة في اللافقريات، والكيميائية سائدة في الفقريات. تنقل التشابكات الكهربائية الإشارات عبر مفاصل فجوية. تحرر التشابكات الكيميائية نواقل عصبية تنتشر عبر شق تشابكي ضيق. تم اكتشاف كثير من النواقل العصبية ومعرفتها، مثل أستيل كولين، وإبينفرين، وجلايسين وجابا، والأمينات الحيوية. يجري تكامل لتأثيرات كثير من التشابكات والنواقل العصبية المختلفة من خلال عملية تجميع إزالة الاستقطاب وزيادته.

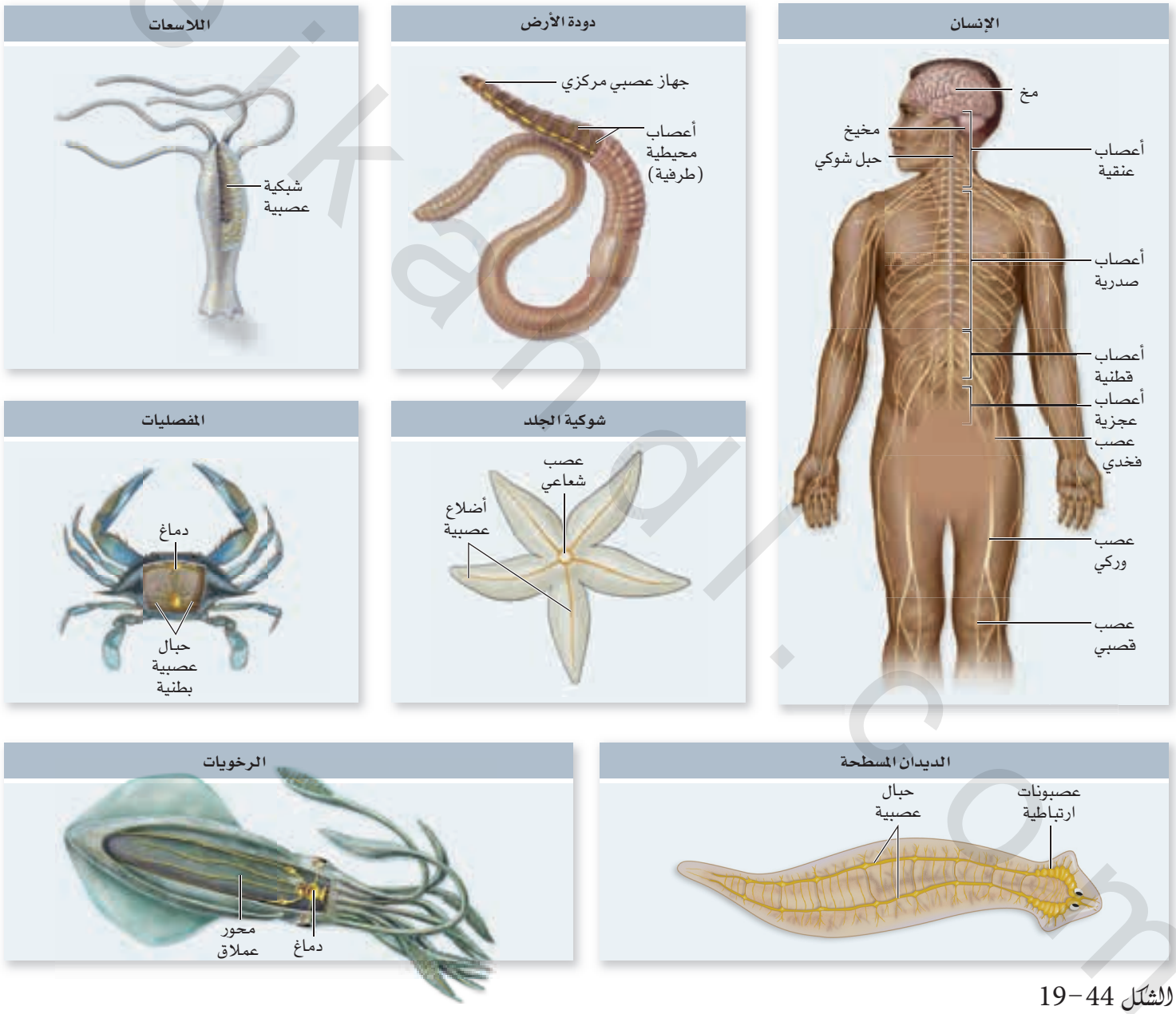
4-44 الجهاز العصبي المركزي: الدّماغ والحبل الشوكي

جهاز الفقريات العصبي المعقد له تاريخ تطوري طويل. في هذا الجزء سنصف التراكيب التي تكوّن الجهاز المركزي، أي الدماغ والحبل الشوكي. لكن من المفيد في البداية أن نراجع نشأة الجهاز العصبي للفقريات وتطوره.

عندما أصبحت الحيوانات أكثر تعقيدًا أصبحت أجهزتها العصبية كذلك

تُعدّ الإسفنجيات القبيلة الرئيسة الوحيدة من بين اللافقريات اللاسيلومية (الفصل الـ 33) التي تفتقر إلى الأعصاب. أبسط الأجهزة العصبية موجود في اللاسعات (الشكل 44-19)، حيث العصبونات بها جميعها متشابهة، وترتبط ببعضها على هيئة شبكة تدعى **شبكة عصبية Nerve net**. ليس هناك نشاط ترابطي، ولا سيطرة على أفعال معقدة، والقليل من التنسيق.

أبسط الحيوانات التي تُظهر نشاطًا ترابطيًّا في جهازها العصبي هي الديدان المسطحة حرة السباحة، أو قبيلة الديدان المسطحة، إذ يمتد على طول أجسام هذه الديدان المسطحة حبلان عصبيان يمتد منهما أعصاب طرفية نحو الخارج في اتجاه عضلات الجسم. يلتقي الحبلان العصبيان في مقدمة الجسم، فيشكلان كتلة متضخمة من النسيج العصبي تحتوي عصبونات بينية وتشابكات عصبية تربط العصبونات بعضها ببعض. هذا "الدماغ" يُعدّ جهازًا عصبيًّا مركزيًّا أثريًّا، لكنه يسمح بسيطرة عصبية على استجابات العضلات أكثر تعقيدًا مما هو ممكن في اللاسعات.



الشكل 44-19

تنوع الأجهزة العصبية. تتراوح الأجهزة العصبية في الحيوانات من شبكات عصبية بسيطة، إلى حبال عصبية مزدوجة، وأدمغة بدائية، وحتى أدمغة معقدة، وأجهزة حسية. يرتبط التماثل الجانبي الثنائي مع تركيز النسيج العصبي، والتراكيب الحسية في مقدمة الحبل العصبي. تدعى هذه العملية التطورية ظهور الرأس.

يمكن النظر إلى التغيرات التطورية اللاحقة في الجهاز العصبي كلها على أنها سلسلة من إضافة التفاصيل على الخصائص الموجودة في الديدان المسطحة. فمثلًا تُظهر دودة الأرض، وهي من اللافقريات السيلومية (الفصل الـ 34)، جهازًا مركزيًّا يرتبط عن طريق أعصاب طرفية بجميع أجزاء الجسم، وفي المفصليات، يتمركز التنسيق المركزي للاستجابات المعقدة بشكل متزايد في النهاية الأمامية للحبل العصبي. فمع تطور هذه المنطقة، أصبحت تحتوي أعدادًا متزايدة من العصبونات البينية، وتطورت مسالك عصبية تشكل الطرق الرئيسة لنقل المعلومات ضمن الدماغ.

دماغ الفقريات له ثلاثة أقسام رئيسة

يكشف شكلُ صندوق الدماغ الداخلي لمتحجرات عديمة الفكوك، وهي أسماك عاشت منذ 500 مليون سنة (الفصل الـ 35)، الكثيرَ عن المراحل التطورية المبكرة لدماغ الفقريات. فعلى الرغم من صغرها، فإن هذه الأدمغة تمتلك الأقسام الثلاثة التي تميز أدمغة الفقريات المعاصرة جميعها، هي:

(1) **الدماغ الخلفي Hind brain** أو الدماغ الملتوي (الملتف).

(2) **الدماغ الأوسط Midbrain** أو الدماغ المتوسط.

(3) **الدماغ الأمامي Froebrain** أو الدماغ القريب (الشكل 44-20 والجدول 44- 3).

الدماغ الخلفي في الأسماك

يشكل الدماغ الخلفي المكون الرئيس لهذه الأدمغة المبكرة، كما هو الحال عليه في الأسماك اليوم. يمكن اعتبار الدماغ الخلفي، المكوّن من **المخيخ Cerebellum والقنطرة Pons والنخاع المستطيل Medulla oblongata**، امتدادًا للحبل الشوكي منقطعًا بشكل أساسي للقيام بوظيفة تنسيق الأفعال الانعكاسية الحركية. تمتد مسالك تحتوي أعدادًا كبيرة من المحاور صاعدةً وهابطةً في الحبل الشوكي نحو الدماغ الخلفي، كما تمتد الكوابل. يقوم الدماغ الخلفي بدوره بتكامل الإشارات الحسية المتعددة القادمة من العضلات، ثم يُنسق أنماط الاستجابات الحركية.

الشكل 44-20

يمكن رؤية التنظيم الأساسي لدماغ الفقريات في أدمغة الأسماك البدائية. الدماغ مقسم إلى ثلاث مناطق، توجد بنسب متباينة في الفقريات جميعها. الدماغ الخلفي، وهو الجزء الأكبر في دماغ الأسماك. والدماغ الأوسط الذي ينحصر دوره في معالجة المعلومات البصرية عند الأسماك. والدماغ الأمامي مختصّ بشكل أساسي بالشم (حاسة الشم)، في الأسماك. في فقريات اليابسة، يؤدي الدماغ الأمامي دورًا أكثر فعالية في معالجة المعلومات العصبية، مما هو عليه في الأسماك.

الجدول 44-3 أجزاء الجهاز العصبي المركزي

الأجزاء الرئيسة وأقسامها	الوظيفة
الحبل الشوكي	الأفعال الانعكاسية الشوكية؛ محطة للمعلومات الحسية والحركية.
الدماغ	
الدماغ الخلفي	
النخاع المستطيل	أنوية حسية؛ الجهاز المنشط للتكوين الشبكي؛ وظائف ذاتية.
القنطرة	الجهاز المنشط للتكوين الشبكي؛ وظائف ذاتية.
المخيخ	تنسيق الحركات؛ التوازن.
الدماغ المتوسط	الأفعال الانعكاسية ذات العلاقة بالعين والأذن.
الدماغ الأمامي	
الدماغ البيني	
المهاد	محطة للمسالك الناقلة للمعلومات الحسية الصاعدة والحركية الهابطة؛ وظائف ذاتية.
تحت المهاد	وظائف ذاتية؛ السيطرة العصبية على الغدد الصماء.
الدماغ الطرفي (المخ)	
العقد القاعدية	السيطرة الحركية.
الجسم الصلب (الثفني)	يربط نصفي المخ، ومحطة للمعلومات بينهما.
الجهاز الطرفي (قرن آمون)	الذاكرة؛ العواطف.
قشرة المخ	وظائف تعرفية عليا؛ يكامل المعلومات الحسية ويفسرها؛ ينظم الأوامر الحركية.

يتم معظم هذا التنسيق في امتداد صغير من الدماغ الخلفي يدعى المخيخ. يؤدي المخيخ في الفقريات الأكثر تقدمًا دورًا متزايد الأهمية بوصفه مركزًا لتنسيق الحركات، وهو أكبر حجمًا بصورة نسبية، مما في الأسماك. يعالج المخيخ في الفقريات كلها البيانات الواردة عن وضع الجسم الراهن، وعن حركة كل طرف، ودرجة انبساط العضلات ذات العلاقة أو انقباضها، ووضع الجسم العام نسبة إلى العالم الخارجي.

الدماغان: الأوسط والأمامي في الأسماك

يتخصص بقية الدماغ في الأسماك باستقبال المعلومات الحسية ومعالجتها. فالدماغ الأوسط مكون بشكل رئيس من **السقف البصري Optic tectum** الذي يستقبل المعلومات البصرية، ويعالجها، في حين يختص الدماغ الأمامي بمعالجة المعلومات الشميَّة.

يستمر دماغ الأسماك في النمو خلال حياتها، وهذا النمو المستمر يشكل تضاربًا حادًّا مع أدمغة طوائف الفقريات الأخرى التي يكتمل تطورها عادة في مراحل الطفولة المبكرة. دماغ الإنسان مثلًا، يستمر في التطور خلال الطفولة المبكرة، ولكن لا ينتج إلا القليل من العصبونات بعد توقف التطور. أحد الاستثناءات لذلك هو قرن آمون الذي يسيطر على أي الخبرات تُخزّن في ذاكرة طويلة الأمد وأيها تُنسى. تشكل درجة إنتاج عصبونات جديدة في دماغ البالغ موضوعًا جدليًّا وبها مساحة واسعة للبحث النشط في الوقت الحاضر.

الدماغ الأمامي السائد في الفقريات الحديثة

بدءًا من البرمائيات ومرورًا بالزواحف بشكل خاصّ، تتركز معالجة المعلومات الحسية بشكل متزايد في الدماغ الأمامي. يشكل هذا النمط الميل التطوري الذي ساد في أثناء التطور اللاحق لأدمغة الفقريات (الشكل 44-21).

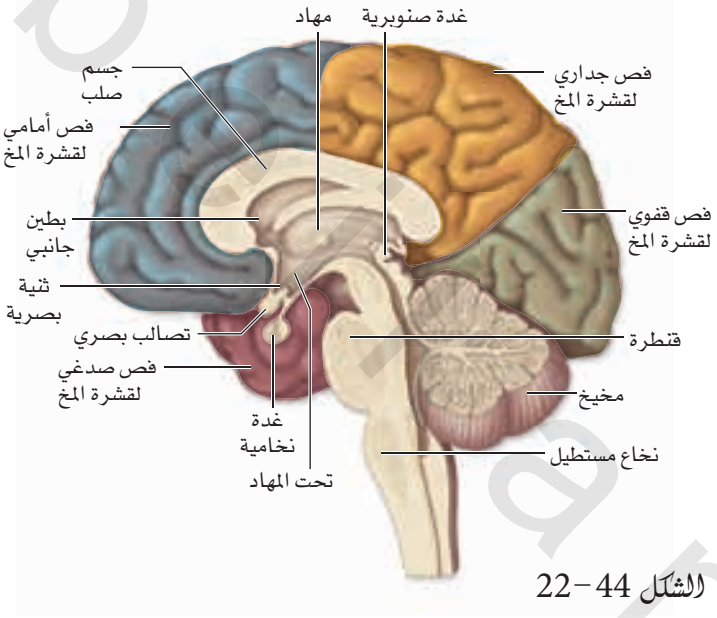
يتكون الدماغ الأمامي للزواحف والبرمائيات والطيور والثدييات من عنصرين لهما وظائف متميزة. **فالدماغ البيني Diencephalon** يتكون من المهاد وتحت المهاد. **المهاد Thalamus** هو مركز تكامل، ومحطة بين المعلومات الحسية القادمة والمخ، في حين يسهم **تحت المهاد Hypothalamus** في الدوافع الأساسية والعواطف، ويسيطر على إفرازات الغدة النخامية. يقع **الدماغ الطرفي Telencephalon** في مقدمة الدماغ الأمامي، وهو منقطع بشكل رئيس لأداء الوظائف الارتباطية. يدعى الدماغ الطرفي في الثدييات **المخ Cerebrum**. يضم الدماغ الطرفي تراكيب، سنناقشها لاحقًا عند وصف دماغ الإنسان.

توسع المخ

عندما فُحصت العلاقة بين كتلتي الدماغ والجسم في الفقريات، وُجِدَ فرقٌ ملحوظ بين الأسماك والزواحف من جانب، والطيور والثدييات من جانب آخر. فالثدييات تمتلك أدمغة ضخمة بشكل خاص نسبة إلى كتلة أجسامها، وهذا صحيح بشكل خاص في الدلافين والإنسان.

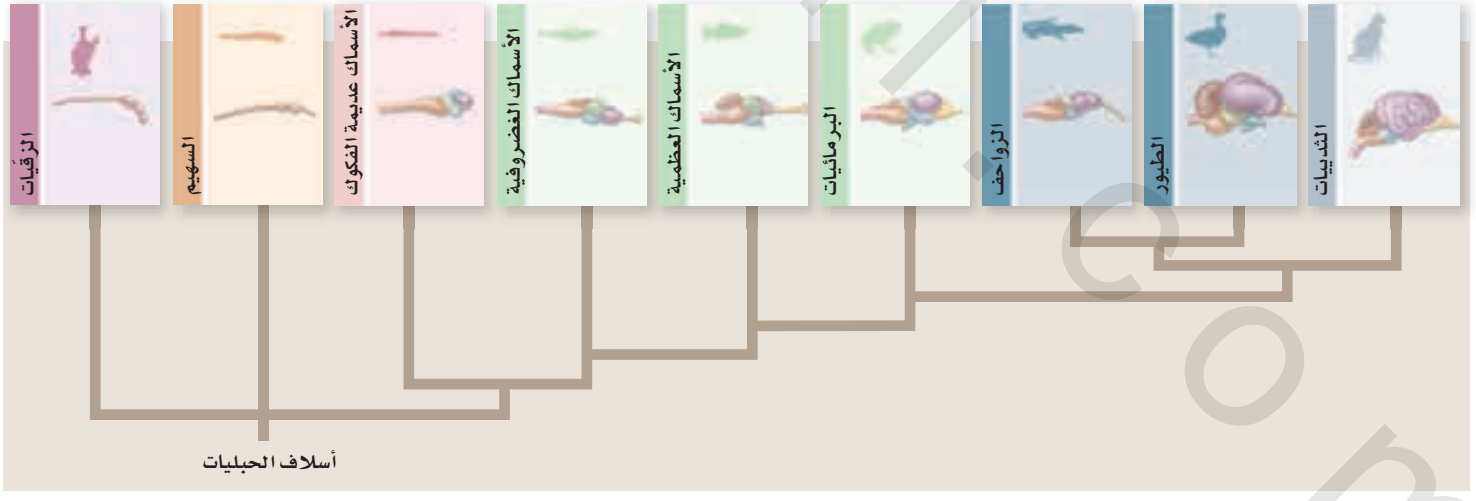
تعكس الزيادة في حجم دماغ الثدييات إلى حد كبير التضخم الكبير في المخ الذي يشكل الجزء السائد في دماغ الثدييات. يشكل المخ مركزًا لإيجاد العلاقات، والارتباط، والتعلم في دماغ الثدييات. فهو يستقبل المعلومات الحسية من المهاد، ويصدر الأوامر الحركية إلى الحبل الشوكي عبر مسالك هابطة من المحاور.

في الفقريات، يتكون الجهاز المركزي من الدماغ والحبل الشوكي (انظر الجدول 44-3). هذان التركيبان مسؤولان عن معظم عمليات معالجة المعلومات ضمن الجهاز العصبي، ويتألفان بشكل أساسي من عصبونات بينية، وخلايا دبق عصبية. تحمل المسالك الصاعدة المعلومات الحسية إلى الدماغ، في حين تحمل المسالك الهابطة سيالات من الدماغ إلى العصبونات الحركية والبينية في الحبل الشوكي



الشكل 44-22

مقطع خلال دماغ الإنسان. في هذا المقطع السهمي الذي يبين أحد نصفي كرة المخ، يظهر بوضوح الجسم الصلب الذي هو مسلك للألياف، يربط نصفي كرة المخ معًا.



الشكل 44-21

تطور دماغ الفقريات. تغير الحجم النسبي لمناطق الدماغ المختلفة بتطور الفقريات. ففي القرش والأسماك الأخرى كان الدماغ الخلفي سائد الحجم، في حين يعمل بقية الدماغ بشكل أساسي في معالجة المعلومات الحسية. وفي البرمائيات والزواحف، يكون الدماغ الأمامي أكبر حجمًا، ويحتوي مخًّا أضخم منقطعًا لأداء الوظائف الارتباطية. في الطيور التي تطورت من الزواحف، يبدو المخ أكثر بروزًا. أما في الثدييات، فإن المخ يغطي السقف البصري، وهو الجزء الأكبر من الدماغ. وتكون سيادة المخ أكبر ما يمكن في الإنسان، بحيث يغلف المخ معظم الأجزاء المتبقية من الدماغ.

للسيطرة على عضلات الجسم.

الدماغ الأمامي للإنسان يظهر قدرة استثنائية على معالجة المعلومات

يبدو مخ الإنسان كبيرًا لدرجة أنه يغلِّف كامل الدماغ. وهو مشقوق إلى **نصفي كرة مخ Cerebral hemispheres**؛ أيمن وأيسر، يرتبطان عن طريق مسلك يدعى **الجسم الصلب Corpus callosum** (الشكل 44 - 22). يُقسم كل نصف كرة مخي إلى فص؛ أمامي، وجداري، وصدغي، وقفوي.

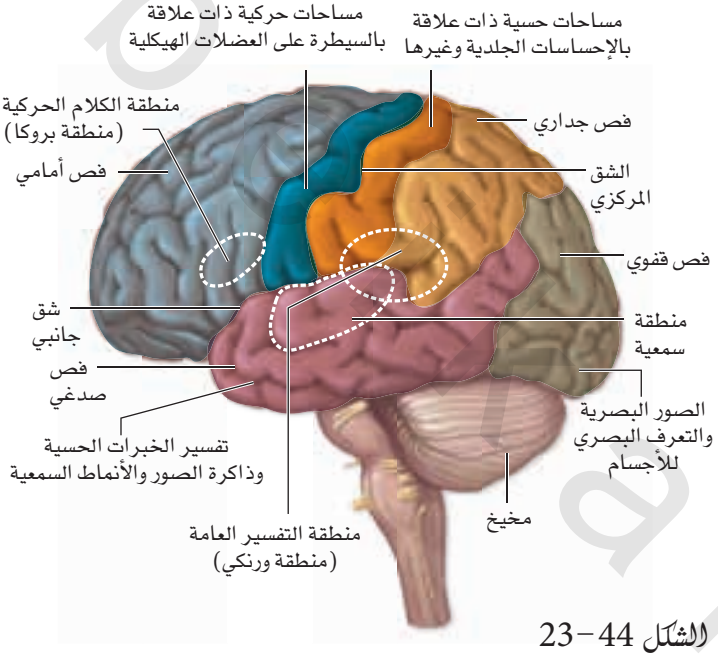
يستقبل كل نصف كرة مخ المعلومات الواردة بشكل أساسي من جانب الجسم المقابل، ويسيطر بشكل أساسي أيضًا على ذلك الجانب من الجسم. وعليه، فإن لمس اليد اليمنى يُنقل بشكل أساسي إلى نصف الكرة الأيسر، الذي قد يحدث حركة لليد اليمنى استجابة لهذا اللمس. إن تدمير أحد نصفي كرة المخ بسبب السكتة الدماغية غالبًا ما يؤدي إلى فقد الإحساس، وإلى الشلل في الجانب المقابل من الجسم.

قشرة الدماغ *The cerebral cortex*

يحدث معظم النشاط العصبي في المخ ضمن طبقة من المادة الرمادية سمكها بضعة مليمترات موجودة على السطح الخارجي. تدعى هذه الطبقة قشرة المخ، وهي ممتلئة بالعصبونات بكثافة. تحتوي القشرة في الإنسان أكثر من 10 بلايين خلية عصبية تشكل ما قيمته 10% من كل العصبونات في الدماغ. سطح قشرة الدماغ شديد الالتواءات (التلافيف)، وهذا الأمر صحيح بشكل خاص في دماغ الإنسان، حيث تزيد هذه التلافيف المساحة السطحية للقشرة بمقدار ثلاث مرات.

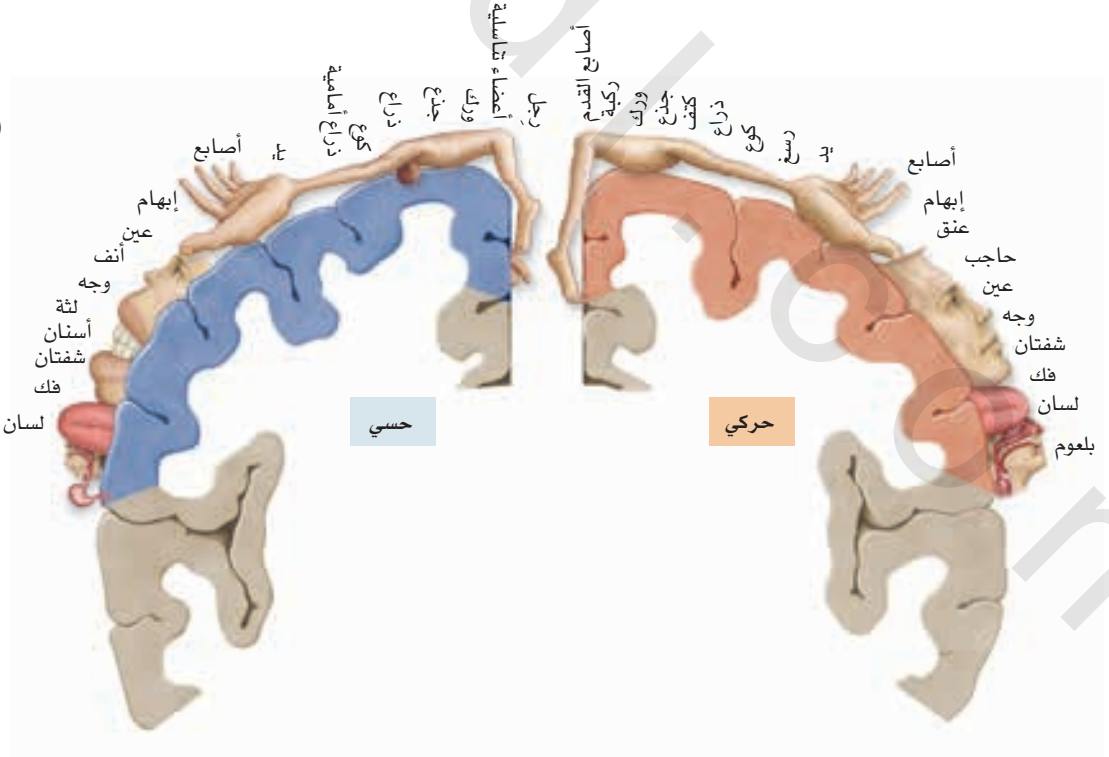
تقع أنشطة القشرة المخية في واحد من ثلاث مجموعات عامة: حركية، وحسية وارتباطية. ترتبط كل واحدة من هذه المناطق مع وظيفة محددة (الشكل 44 - 23). **فالقشرة الحركية الأساسية Primary motor cortex** تقع على طول التلفيف (الالتواء) الموجود على الحد الخلفي للفص الأمامي، أي مباشرة أمام الشق المركزي. وكل نقطة على سطح القشرة الحركية ترتبط مع حركة جزء مختلف من الجسم (الشكل 44 - 24، الأيمن).

على الحافة الأمامية للفص الجداري، وخلف الشق المركزي مباشرة تقع **القشرة الحسية البدنية الأساسية Primary somatosensory cortex** تتستلم كل نقطة من هذه المنطقة معلومات حسية واردة من مناطق معينة في الجلد والعضلات (الشكل 44 - 24، الأيسر). تتخصص مساحات واسعة من القشرة الحركية الأساسية والقشرة الحسية البدنية الأساسية بالأصابع والشفاه



الشكل 44-23

المخ. يبين هذا الرسم التخطيطي فصوص الدماغ، ويشير إلى بعض المناطق المتخصصة المعروفة.



الشكل 44-24

القشرة الحسية البدنية الأساسية (يسار) **والقشرة الحركية الأساسية** (يمين). ترتبط كل واحدة من مناطق القشرة المخية بمنطقة مختلفة من الجسم، كما تشير بذلك خريطة الجسم. فمناطق الجسم مرسومة بنسب تعكس كمية القشرة المسخرة للإحساس، أو للسيطرة الحركية. فمثلًا، الأيدي لها مساحات واسعة للسيطرة الحسية والحركية، أما البلعوم فله مساحة واسعة للسيطرة الحركية، ومساحة أقل للإحساس.

واللسان بسبب الحاجة الماسة للبراعة في استخدام الأصابع، وفي الكلام.

تقع القشرة السمعية في الفص الصدغي، وتعالج مناطق مختلفة من هذه القشرة الأصوات ذات الترددات المختلفة. في حين تقع القشرة البصرية في الفص القفوي، حيث تعالج مناطقها المختلفة المعلومات القادمة من مناطق مختلفة من الشبكية، التي تقابل نقاطًا محددة في حقل الرؤية للعينين.

يشار إلى المناطق التي لا تشغلها القشرة الحسية والحركية الأساسية بأنها **قشرة ارتباطية Association cortex**. تُعدّ هذه القشرة موقع الأنشطة العقلية العليا، وهي تصل مداها الأعظم في الرئيسيات، وخاصة الإنسان، حيث تشكل 95% تقريبًا من سطح قشرة الدماغ.

العُقَد القاعدية *Basal ganglia*

تنطمر عميقًا ضمن المادة البيضاء للدماغ تجمعات عدة من أجسام الخلايا العصبية وزوائدها ما يعطي جزءًا من المادة الرمادية. تتسلّم تجمعات أجسام العصبونات هذه، التي تعرف بالعقد القاعدية، معلومات حسية من مسالك عصبية صاعدة، وأوامر حركية قادمة من قشرة المخ ومن المخيخ.

يُرسَل ما تنتجه العقد من سيالات عبر الحبل الشوكي، حيث يسهم هناك في السيطرة على حركات الجسم. ويمكن أن يُحدث تدمير مناطق محددة من العقد القاعدية ارتجافات العضلات في أثناء الراحة التي تميز مرضى الرعاش.

المهاد وتحت المهاد *Thalamus and Hypothalamus*

المهاد هو الموقع الأساسي لتكامل المعلومات الحسية في الدماغ. فالمعلومات البصرية والسمعية والحسية البدنية ترسل إلى المهاد، حيث تتشابك المسالك الحسية مع عصبونات ارتباطية. بعد ذلك، ترسل المعلومات الحسية عبر المهاد إلى الفص القفوي والصدغي والجداري لقشرة المخ على التوالي. ويتم نقل كلٍّ من هذه الأنواع من المعلومات الحسية عن طريق تجمعات محددة من أجسام العصبونات ضمن المهاد.

تُكامِل تحت المهاد الأنشطة الحشوية؛ فهي تساعد على تنظيم درجة حرارة الجسم والجوع، والشبع، والعطش، وعبر الجهاز الطرفي (الحَلَقي) الحالات العاطفية المختلفة. تسيطر تحت المهاد أيضًا على الغدة النخامية التي تنظم بدورها كثيرًا من الغدد الصماء في الجسم. وبسبب تداخل اتصالاتها مع قشرة المخ ومع مراكز السيطرة في جذع الدماغ (تعبير يشير إلى الدماغ الأوسط، والقنطرة، والنخاع المستطيل معًا)، فإن تحت المهاد يساعد على تنسيق الاستجابات العصبية والهرمونية لكثير من المنبهات الداخلية وللعواطف.

يشكل **قرن آمون Hippocampus والأجسام اللوزية Amygdala**، إضافة إلى تحت المهاد المكونات الرئيسة **للجهاز الطرفي Limbic system** – وهو مجموعة قديمة تطوريًّا، من التراكيب التي تقع عميقًا ضمن الدماغ ومسؤولة عن الاستجابات العاطفية، كما وصفنا سابقًا. ويُعتقد أن قرن آمون مهم في تخزين الذكريات واسترجاعها.

يمكن السيطرة على الوظائف المعقدة لدماغ الإنسان في مناطق محددة منه

على الرغم من أن دراسة وظائف الدماغ صعبة، لكنها طالما أثارت اهتمام الباحثين. فالتمييز بين النوم والاستيقاظ، واستخدام اللغة واكتسابها، والتعرف المكاني، والذاكرة كلها مساحة خصبة للبحث النشط. وعلى الرغم من أنه لا يزال بعيدًا عن الفهم إلا أن تعميمًا واحدًا قد برز، وهو وجود مناطق محددة للوظائف المختلفة.

النوم والاستيقاظ *Sleep and Arousal*

يحتوي جذع الدماغ على مجموعة مبعثرة من العصبونات يشار إليها بالتكوين الشبكي. يسيطر أحد أقسام هذا التكوين الذي يدعى **النظام المحفز للتكوين الشبكي Reticular-activating system** على حالة الوعي والتيقظ. تغذي كل المسالك الحسية هذا النظام ما يسمح برصد المعلومات القادمة إلى الدماغ، ويشخص المنبهات المهمة منها. وعندما يُنبّهُ هذا النظام المحفز للتكوين للتيقظ، فإنه يزيد معدل النشاط في أجزاء متعددة من الدماغ. يتم تثبيط المسالك العصبية الواردة من التكوين الشبكي إلى قشرة الدماغ، وإلى أجزاء أخرى من الدماغ عن طريق المواد المخدرة والمنومة.

يسيطر النظام المحفز للتكوين على حالتي النوم والاستيقاظ. من السهل أن ينام المرء في غرفة مظلمة بدلًا من النوم في غرفة مضاءة؛ لأن هناك عددًا أقل من المنبهات البصرية تنبه النظام المحفز للتكوين. إضافة إلى ذلك، فإن نشاط هذا النظام يقلله الناقل سيروتونين الذي ناقشناه سابقًا. يسبب سيروتونين انخفاض مستوى نشاط الدماغ ما يجلب النعاس والنوم.

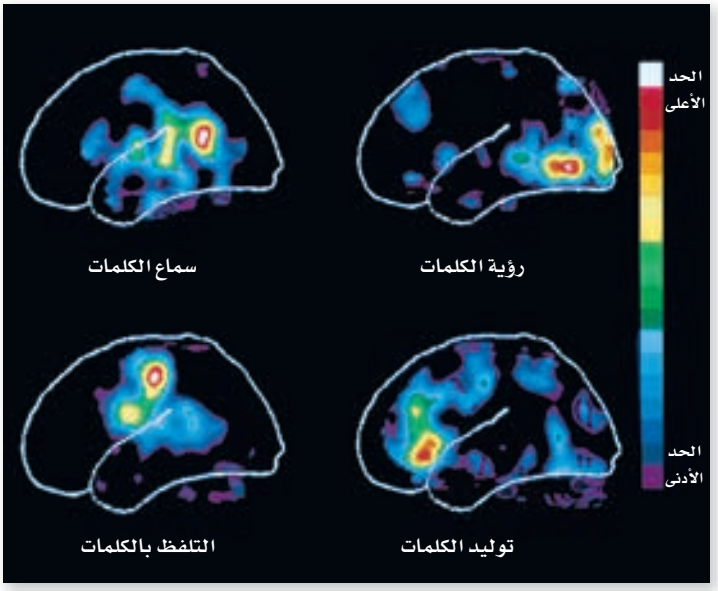
يمكن رصد حالة الدماغ عن طريق التخطيط الكهربائي للدماغ (EEG) وهو تخطيط للنشاط الكهربائي للدماغ. فالشخص المستيقظ الذي يكون في حالة استرخاء وعيونه مغلقة يظهر نمطًا مكونًا من موجات كبيرة بطيئة تدعى أمواج ألفا. وتصبح هذه الأمواج في شخص يقظ وعيونه مفتوحة أسرع (تدعى أمواج بيتا) وتكون أقل تناسقًا بسبب استقبال معلومات حسية. تحدث أمواج بيتا وأمواج دلتا في أثناء النوم، وهي أمواج بطيئة جدًا. وعندما يكون المرء في حالة النوم المصحوب بحركات سريعة للعيون REM sleep (يتميز بحركة سريعة للعيون، بينما تكون الجفون مغمضة)، يكون تخطيط الدماغ شبيهًا بذلك الذي لشخص مستيقظ في حالة استرخاء.

اللغة *Language*

على الرغم من أن نصفي كرة المخ يبدوان متشابهين تركيبيًّا، إلا أنهما مسؤولان عن وظائف متباينة. وتُعدّ اللغة المثال الذي تم استقصاؤه بصورة مفصلة لهذه الجانبية في وظائف الدماغ.

يشكل نصف الكرة الأيسر النصف "السائد" للغة في 90% من الأشخاص الذين يستخدمون اليد اليمنى، ونحو ثلثين من الذين يستخدمون اليد اليسرى. (تعني كلمة سائد هنا نصف كرة المخ الذي يتم به معظم المعالجة العصبية المرتبطة باللغة). تسيطر مناطق مختلفة في الدماغ على اللغة في نصف كرة المخ السائد (الشكل 44 - 25). فمنطقة (وَرْنِكي) الواقعة في الفص الجداري بين القشرتين السمعية والبصرية الأساسيتين مهمة لاستيعاب اللغة، وصياغة الأفكار على شكل كلام (انظر الشكل 44 - 23). ومنطقة (بروكا) الموجودة قرب ذلك الجزء من القشرة الحركية الذي يسيطر على الوجه مسؤولة عن توليد الصادر الحركي المطلوب للتواصل باللغة (لإخراج الكلام).

يمكن أن يسبب إتلاف هاتين المنطقتين من الدماغ اضطرابًا في اللغة يدعى الحَبْسَة *Aphasia*. فمثلًا إذا أتلفت منطقة ورنكي فإن كلام الشخص يكون سريعًا



الشكل 44-25

تسيطر مناطق الدماغ المختلفة على أنشطة اللغة المختلفة. يبين هذا التوضيح كيف يستجيب الدماغ في الإنسان عندما يُطلب إليه الاستماع لكلام منطوق، أو لقراءة الكلمات نفسها بصمت، أو لإعادة نطقها بصوت مسموع، أو للتلفظ بكلمة شبيهة بالأولى. المناطق ذات الألوان الأبيض، والأحمر، والأصفر تبين الدرجة الأعلى من النشاط. قارن هذا مع (الشكل 44 - 24) لترى كيف يمكن رسم خرائط لمناطق الدماغ المختلفة.

وزلقًا، لكنه يفتقر إلى المعنى، فالكلمات تُلقى بسرعة مع بعضها مشكلةً "سلطة كلمات".

التمييز المكاني *Spatial recognition*

في حين يكون نصف كرة المخ السائد للغة بارعًا في التعليل التسلسلي الذي نحتاج إليه لصياغة جملة، فإن نصف كرة المخ غير السائد (الأيمن في معظم الناس) يكون بارعًا في التعليل المكاني، وهو ذلك النوع من التعليل الذي نحتاج إليه لتجميع مكونات أحجية أو لرسم صورة - إنه أيضًا ذلك النصف من المخ الذي له علاقة بالمقدرة الموسيقية بشكل أساسي - الشخص الذي تم تدمير منطقة بروكا الخاصة بالكلام له في نصف الكرة الأيسر قد لا يكون قادرًا على الكلام، ولكنه يحتفظ بالقدرة على الغناء.

إن تدمير نصف كرة المخ غير السائد قد يقود إلى عدم قدرة على تقدير المعلومات المكانية، وقد تتعطل أنشطته الموسيقية كالغناء. وبصورة أكثر تحديدًا يؤدي تدمير القشرة الصدغية السفلى في نصف الكرة نفسه إلى عدم القدرة على تذكر الوجوه، وهو ما يعرف بعدم معرفة المرئيات. فالقراءة والكتابة والاستيعاب الشفوي يبقى طبيعيًّا، والمرضى بهذه الحالة يستطيعون تمييز معارفهم من خلال أصواتهم. كذلك، فإن نصف الكرة غير السائد مهم لدمج الذكريات من الخبرات غير اللفظية.

الذاكرة والتعلم *Memory and Learning*

يبقى أساس الذاكرة والتعلم أحد أعظم أسرار الدماغ. فالذاكرة يبدو أنها مبعثرة عبر الدماغ، إذ لم يتم تشخيص مواقع محددة في القشرة على أنها ذات علاقة بذكريات محددة؛ لأن تدميرًا واسعًا نسبيًّا للقشرة لم يلغِ الذكريات بشكل انتقائي. وعلى الرغم من أن الذاكرة تتعطل إذا ما أزيلت أجزاء من الدماغ، تحديدًا الفصان الصدغيان، إلا أنها لم تُفقد تمامًا. فكثير من الذكريات تبقى على الرغم من التدمير، ويمكن أن تتعافى القدرة على الوصول لهذه الذكريات مع الزمن.

يبدو أنه يوجد فرق أساسي بين الذاكرتين: قصير الأمد وطويلة الأمد. فالذاكرة قصيرة الأمد مؤقتة، وتستمر إلى زمن قليل فقط. هذه الذكريات يمكن مسحها بسرعة باستخدام الصدمة الكهربائية، في حين تبقى الذكريات طويلة الأمد المخزونة سابقًا دون أن تُمسّ. تقترح هذه النتيجة أن الذكريات قصيرة الأمد تُخزّنُ على هيئة تهيج عصبي مؤقّت. أما الذاكرة طويلة الأمد، في المقابل، فيبدو أنها تتضمن تغيرات تركيبية في وصلات عصبية محددة في الدماغ.

هناك جزءان في الفص الصدغي: قرن آمون، والأجسام اللوزية، لهما علاقة بالذاكرة قصيرة الأمد، وباندماجها في ذاكرة طويلة الأمد. فتدمير هذه التراكيب يعيق القدرة على تحويل الأحداث الحديثة إلى ذكريات طويلة الأمد. والتشابكات العصبية التي تستخدم بشكل مكثف مدة قصيرة تبدي بثًّا تشابكيًّا أكثر فعالية عند الاستخدام اللاحق. تُدعى هذه الظاهرة **التضخيم طويل الأمد Long-term potentiation (LTP)**. قد تحرر العصبونات قبل التشابكية خلال هذا التضخيم كميات متزايدة من الناقل العصبي مع كل جهد فعل، وقد يُصبح العصبون بعد التشابكي حساسًا بشكل متزايد للناقل. ويُعتقد أن هذه التغيرات في البث التشابكي قد تكون مسؤولة عن بعض جوانب خَزْن الذاكرة.

مرض الزهايمر: اضمحلال عصبونات الدماغ

في الماضي، كان يعرف القليل عن **مرض الزهايمر Alzheimer disease** الذي هو حالة تصبح فيها الذاكرة وعمليات التفكير في الدماغ معطلة وظيفيًّا. يختلف العلماء حول الطبيعة البيولوجية للمرض وأسبابه. فقد وُضعت فرضيتان: إحداهما تقترح أن العصبونات في الدماغ تُقتل من الخارج نحو الداخل، والأخرى تقترح أن العصبونات تُقتل من الداخل إلى الخارج.

في الفرضية الأولى تقتل بروتينات خارجية تدعى ببتيدات بيتا أميلُويد الخلايا العصبية، فحدوث خطأ في معالجة البروتين ينتج شكلًا غير طبيعي للببتيد ما يشكل تجمعات أو بقعًا تبدأ بملء الدماغ، حيث تدمر الخلايا العصبية ثم تقتلها. ولكن وُجد أن هذه البقع لأميلويد موجودة في خزعات أخذت من أناس لا يظهر لديهم مرض الزهايمر.

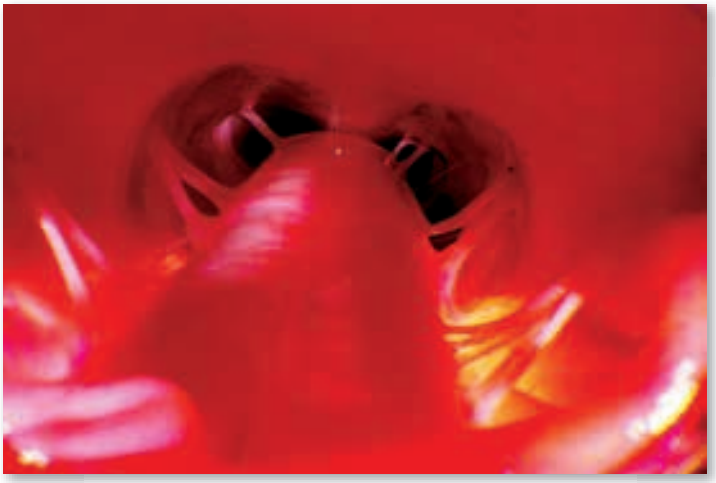
في المقابل، تؤكد الفرضية الثانية أن الخلايا العصبية يقتلها شكل غير طبيعي من بروتين داخلي. عادة، يحافظ البروتين الذي يدعى تاو (τ) على أنيبيبات دقيقة ناقلة للبروتين. تتجمع بروتينات تاو المغلوطة على هيئة قطع حلزونية تشكل كتلًا متشابكة تتدخل في الوظيفة الطبيعية للخلايا العصبية. يستمر العلماء الآن في دراسة ما إذا كانت الكتل المتشابكة أو البقع هي أسباب أم نتائج لمرض الزهايمر. وقد أدى التقدم العلمي إلى تشخيص جينات تزيد من احتمال تطور مرض الزهايمر، وجينات أخرى إن أصابتها الطفرة يمكن أن تسبب المرض. معظم مرضى الزهايمر ليس لديهم هذه الجينات الطافرة، ولكن الذين لديهم هذه الجينات تظهر لديهم أعراض مرض الزهايمر مبكرًا في أثناء الحياة.

ينقل الحبل الشوكي الرسائل ويسيطر على بعض الاستجابات مباشرة

الحبل الشوكي هو كابل من العصبونات يمتد من الدماغ نحو الأسفل عبر العمود

الفقري (شكل 44- 26). وهو مغلف ومحمي بالعمود الفقري، وطبقات من الأغشية تُدعى السّحايا التي تغلف الدّماغ أيضًا.

توجد داخل الحبل الشوكي منطقتان، هما: المنطقة الداخلية هي المادة الرمادية، وتتكون بشكل أساسي من أجسام العصبونات البينية، والعصبونات الحركية، وخلايا الدبق العصبي. أما المنطقة الخارجية، فهي المادة البيضاء التي تحتوي كوابل من المحاور الحسية في الأعمدة الظهرية، ومحاور حركية في الأعمدة البطنية. هذه المسالك العصبية تحتوي كذلك على الزوائد الشجرية لخلايا عصبية أخرى. وتنتقل الرسائل من الجسم والدماغ صاعدةً وهابطةً عبر الحبل الشوكي الذي يمثل الطريق السريع لنقل المعلومات في الجسم.



الشكل 44-26

نظرة من الأعلى للحبل الشوكي للإنسان. يمكن مشاهدة أزواج من الأعصاب الشوكية تمتد من الحبل الشوكي. يتم عبر هذه الأعصاب وكذلك عبر الأعصاب القحفية التي تنشأ من الدماغ اتصال الجهاز العصبي المركزي مع بقية الجسم.

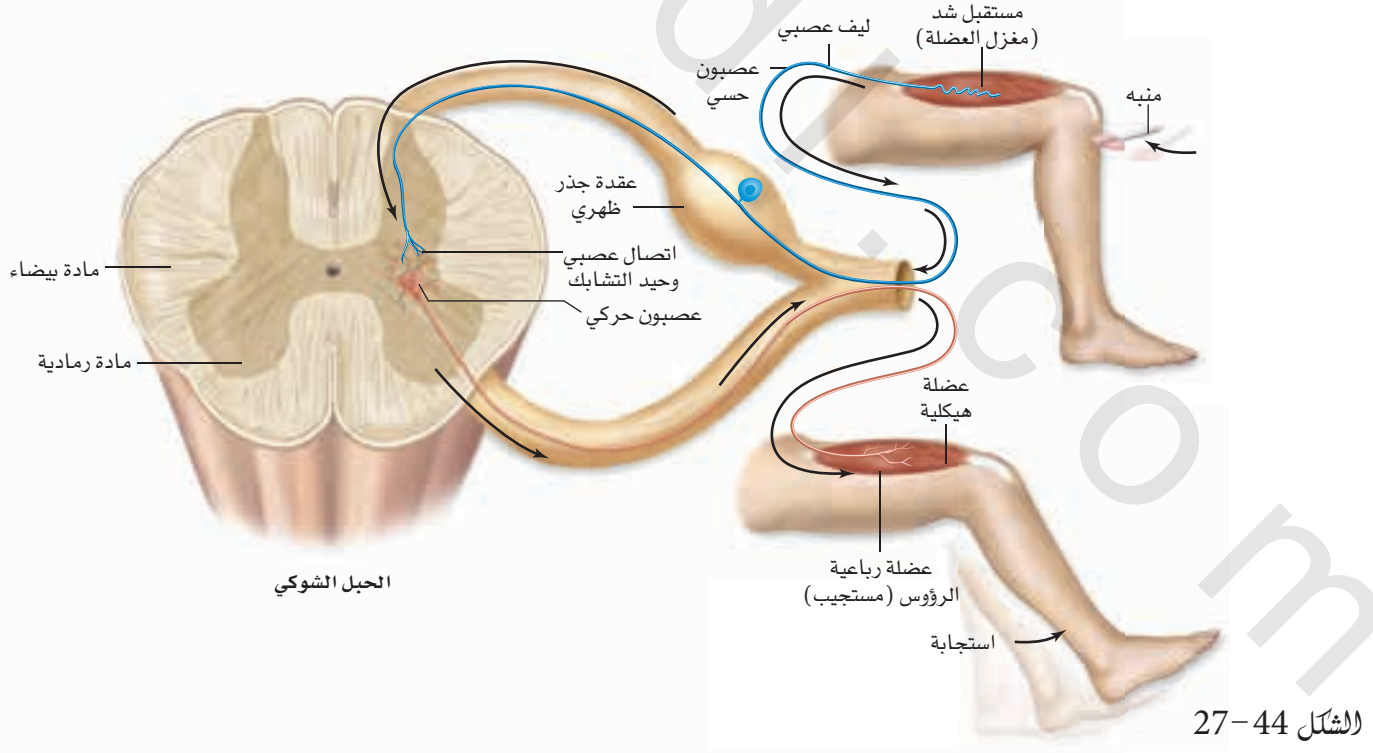
يقوم الحبل الشوكي، إضافة إلى وظيفته التوصيلية للرسائل، **بالأفعال الانعكاسية Reflexes** وهي الحركات المفاجئة، وغير الإرادية للعضلات. فالفعل الانعكاسي (المُنْعَكَس) ينتج عن استجابة حركية سريعة لمنبه ما؛ لأن عصبونًا حسيًّا يمرر معلوماته إلى عصبون حركي في الحبل الشوكي دون حاجة إلى معالجة على مستوى أعلى. أحد أكثر الأفعال الانعكاسية المعروفة في الجسم هو رَمْش العين، وهو فعل انعكاسي لحماية العين. فإذا ما اقتربت حشرة أو سحابة من الغبار من عينك، فإن الجفن يرمش قبل أن تدرك ما الذي حدث. فالفعل الانعكاسي يحدث قبل أن يعلم الدماغ أن العين في خطر.

تكون الأفعال الانعكاسية سريعة جدًا؛ لأنها تمرر المعلومات إلى عدد قليل من العصبونات فقط. فقليل من الأفعال الانعكاسية، كرَجَّة الركبة مثلًا (شكل 44 - 27)، هي أفعال انعكاسية وحيدة التشابك. في هذه الحالات، يصنع العصبون الحسي اتصالًا تشابكيًّا مباشرة مع عصبون حركي في الحبل الشوكي يغادر محوره مباشرة نحو العضلة.

ومع ذلك، فإن معظم الأفعال الانعكاسية في الفقريات تتضمن وجود عصبون بيني بين العصبونين الحسي والحركي (الشكل 44 - 28). فسحب اليد بعيدًا عن موقد ساخن أو رمش العين استجابة لنفثه من الهواء يتضمن توصيل المعلومات من العصبون الحسي خلال واحدة أو أكثر من العصبونات البينية إلى العصبون الحركي. ثم يقوم العصبون الحركي بعد ذلك بتنبيه العضلة المناسبة للانقباض. لاحظ أيضًا أن العصبون الحسي قد يصنع اتصالًا مع عصبونات بينية أخرى لإرسال الإشارة إلى الدماغ. وعلى الرغم من أنك سحبت يدك بعيدًا عن الموقد الساخن، فإنك لا تزال تشعر بالألم.

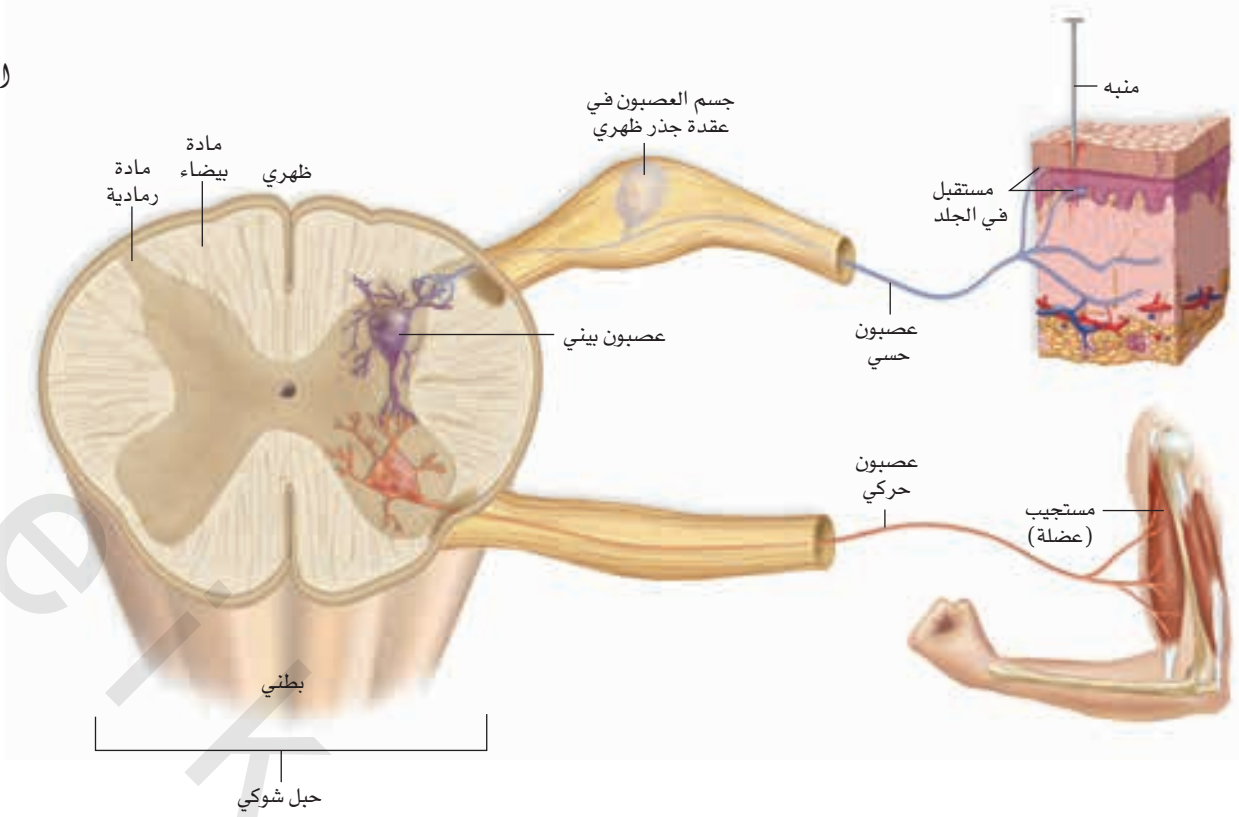
تجديد الحبل الشوكي

حاول العلماء في الماضي إصلاح الحبل الشوكي المقطوع بوضع أعصاب أخذت من أجزاء من الجسم لسد الفجوة، ولكي تعمل بوصفها مرشدًا للحبل الشوكي كي يتجدد. لكن معظم هذه التجارب باءت بالفشل. فعلى الرغم من أن المحاور تتجدد خلال العصب المزروع، لكنها تفشل في اختراق نسيج الحبل الشوكي حال خروجها من



الشكل 44-27

الفعل الانعكاسي لرَجّة الركبة. يُعدّ هذا أبسط الأفعال المنعكسة؛ إذ يتضمن عصبونًا حسيًّا وآخر حركيًّا فقط.



الشكل 44-28

فعل منعكس شوكي جلدي. هذا الفعل المنعكس أكثر تعقيدًا من رجّة الركبة؛ لأنه يتضمن عصبونات بينية إضافة إلى العصبونات الحسية والحركية. تربط العصبونات البينية العصبونات الحسية والحركية لتجعل العضلات تتقبض كما هو واضح. بعض العصبونات البينية تثبط العصبونات الحركية، فتسمح للعضلة المضادة بالانبساط.

القطعة المزروعة. كذلك، فإن عاملًا يثبط نمو الأعصاب موجود في الحبل الشوكي.

بعد اكتشاف أن عامل نمو الخلايا مولدة الألياف ينبه نمو الأعصاب، حاول علماء البيولوجيا العصبية، بالعمل على الجرذان، "إلصاق" الأعصاب من القطعة المزروعة إلى الحبل الشوكي باستخدام فايبرن الممزوج مع عامل نمو الخلايا مولدة الألياف. بعد ثلاثة أشهر، بدأت الجرذان التي حظيت بهذا الجسر العصبي بتحريك الجزء الخلفي من أجسامها. وقد أثبتت التجارب باستخدام الصبغة أن أعصاب الحبل الشوكي أعادت النمو في كلٍّ من طرفي الفجوة.

تشجع كثير من العلماء حول إمكان استخدام معالجة مماثلة في طب الإنسان. لكن معظم إصابات الحبل الشوكي في الإنسان لا تتضمن قطعًا كاملًا للحبل الشوكي، فالأعصاب تُهرسُ هرسًا غالبًا ولا تُقطع، ما يعني حدوث تدمير مختلف للنسيج. كذلك، فإنه حتى إن تمكنت الجرذان التي حظيت بالجسر العصبي من استعادة بعض القدرة على الحركة، إلا أن التجارب أشارت إلى أنها كانت بالكاد تقف أو تسير.

يتألف دماغ الفقريات من ثلاث مناطق أساسية، هي: الدماغ الأمامي، والأوسط، والخلفي. في الفقريات الأكثر تطورًا من الأسماك، تتمركز معالجة المعلومات بشكل متزايد في الدماغ الأمامي. يتكون المخ من نصفي كرة مخ. يتكون كل نصف كرة مخ من مادة رمادية تشكل القشرة المخية تقع فوق مادة بيضاء، وجزر من المادة الرمادية (أنوية) تدعى العقد القاعدية. هذه المناطق ذات علاقة بتكامل المعلومات الحسية، وبالسيطرة على حركات الجسم، وبالوظائف الارتباطية كالتعلم والتذكر. يوصل الحبل الشوكي الرسائل من الدماغ وإليه، كما يعالج بعض المعلومات مباشرة.

5-44 الجهاز العصبي الطرفي: العصبونات الحسية والحركية

يتألف الجهاز الطرفي من الأعصاب، وهي مجموعات من المحاور، كالكوابل (شكل44-29)، ومن **العقد العصبية Ganglia** وهي تجمعات لأجسام العصبونات الواقعة خارج الجهاز العصبي المركزي. وللمراجعة، فإن وظيفة الجهاز الطرفي هي تسلّم المعلومات من البيئة، ونقلها إلى الجهاز المركزي، ثم نقل الاستجابات إلى الأعضاء المستجيبة كالعضلات.

يتكون الجهاز العصبي الطرفي من جزأين: بدني وذاتي

تنفصل الأعصاب الشوكية الخارجة من الحبل الشوكي إلى مكوّن حسّي وآخر حركي. تدخل محاور العصبونات الحسية السطح الظهري للحبل الشوكي، وتشكل **الجذر الظهري Dorsal root** للعصب الشوكي، في حين تغادر محاور

الشكل 44-29

الأعصاب في الجهاز العصبي الطرفي. تبين الصورة المأخوذة بالمجهر الإلكتروني مقطعًا عرضيًّا في عصب الضفدع. العصب هو حزمة من المحاور ترتبط مع بعضها بنسيج ضام. كثير من المحاور واضحة، وكلّ منها يشبه الكعكة المثقوبة في وسطها.

الجدول 44-4	مقارنة بين الجهازين العصبيين: البدني والذاتي	
الخاصية	الجهاز البدني (الجسمي)	الجهاز الذاتي
المستجيبات	العضلات الهيكلية	العضلة القلبية
		العضلات الملساء في القناة الهضمية والأوعية الدموية والمسالك التنفسية
		الغدد خارجية الإفراز
أثره في الأعصاب الحركية	تهيج	تهيج أو تثبيط
التغذية العصبية للمستجيبات	دائمًا مفردة	مزدوجة بصورة نموذجية
عدد المستجيبات المتتالية في المسار نحو المستجيب	واحد	اثنان
الناقل العصبي	أستيل كولين	أستيل كولين ونورإبينفرين

العصبونات الحركية من السطح السفلي للحبل الشوكي وتشكل **الجذر البطني Ventral root** للعصب الشوكي. تتجمع أجسام العصبونات الحسية معًا في **عقد الجذر الظهري Dorsal root ganglia**. أما أجسام العصبونات الحركية البدنية فتقع ضمن الحبل الشوكي. لذا، فهي ليست موجودة في عقد عصبية.

وكما ذُكر سابقًا، فإن العصبونات الحركية البدنية تنبه العضلات الهيكلية للانقباض، والعصبونات الحركية الذاتية تغذي الأعضاء المستجيبة غير الإرادية، العضلات الملساء والقلبية والغدد. ويقدم لنا الجدول 44-4 مقارنة بين الجهازين العصبيين البدني والذاتي، وسوف نناقش كل قسم على حدة.

يسيطر الجهاز العصبي البدني على الحركات

تُنبه العصبوناتُ الحركية البدنية العضلاتِ الهيكلية في الجسم لتنقبض استجابة لأوامر واعية، أو وصفها جزءًا من الأفعال الانعكاسية التي لا تتطلب سيطرة واعية. تتحقق السيطرة الإرادية على العضلات الهيكلية بتنشيط مسالك من المحاور الهابطة من المخ إلى المستوى المناسب من الحبل الشوكي. تنبه بعض المحاور الهابطة عصبونات الحبل الشوكي الحركية مباشرة، أما بعضها الآخر فينبه عصبونات بينية، تنبه بدورها العصبونات الحركية في الحبل الشوكي.

عندما تُنَبّه عضلة معينة لكي تنقبض، يجب أن تُثَبَّط العضلة المضادة لها. فلكي تثني الذراع مثلًا، يجب تنبيه العضلات الثانية، وتثبيط العضلات الباسطة المضادة (الفصل الـ 47). تحدث المحاور الحركية الهابطة هذا التثبيط الضروري بأن تسبب زيادة استقطاب (جهد بعد تشابكي مثبط) للعصبونات الحركية الشوكية التي تغذي العضلات المضادة.

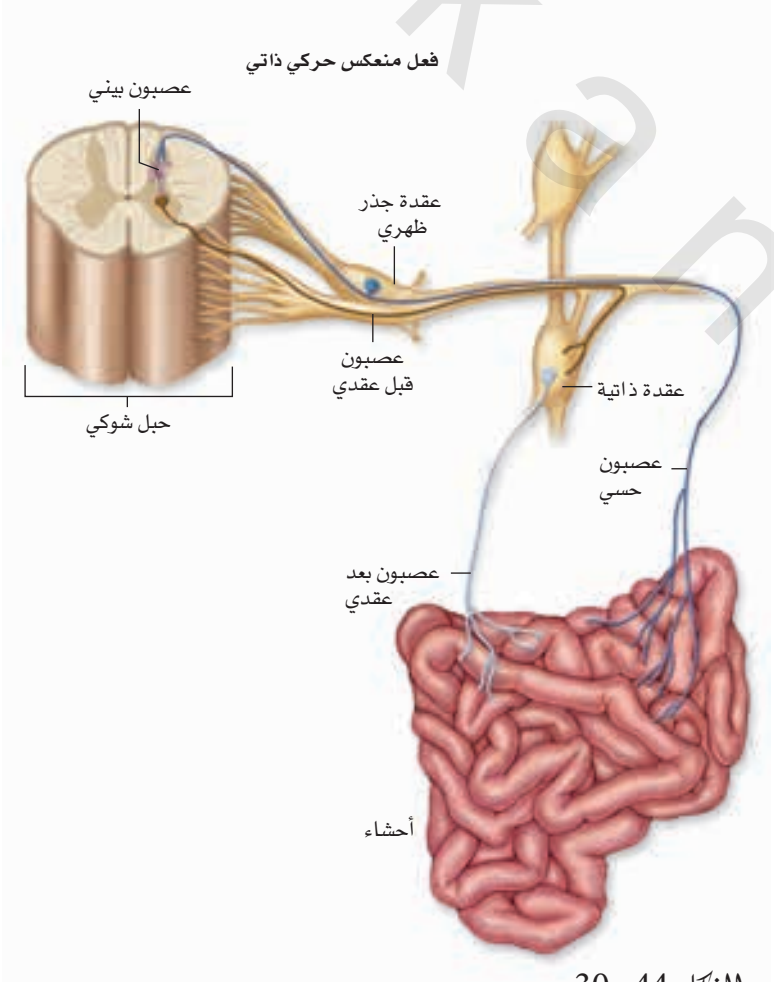
الجهاز العصبي الذاتي يسيطر على الوظائف اللاإرادية من خلال قسميه

يتكون الجهاز العصبي الذاتي من قسم ودِّي، وآخر نظير ودِّي، إضافة إلى النخاع المستطيل العائد للدماغ الخلفي، الذي ينسق نشاط هذا الجهاز. وعلى الرّغم من أن القسم الودي ونظير الودي يختلفان، إلا أنهما يتشاطران صفات عدة. ففي كليهما، يتضمن المسلك الحركي الصادر عصبونين: الأول يقع جسم خليته في الجهاز المركزي، ويرسل محوره إلى عقدة ذاتية، ويدعى عصبون قبل عقدي، وهذه العصبونات تحرر الناقل أستيل كولين عند تشابكاتها.

في حين يقع جسم خلية العصبون الثاني في العقدة الذاتية، ويرسل محورَه ليصنع تشابكًا مع العضلات الملساء والقلبية والخلايا الغدية (الشكل 44 - 30). يدعى العصبون الثاني عصبونًا بعد عقدي، وهو يحرر الناقل العصبي أستيل كولين في القسم نظير الودي، والناقل نورإبينفرين في القسم الودي.

القسم الودِّي *The sympathetic division*

تنشأ العصبونات قبل العقدية في القسم الودي من المناطق الصدرية والقطنية للحبل الشوكي (الشكل 44 - 31، الأيسر). تتشابك معظم محاور هذه العصبونات في سلسلتين متوازيتين من العقد العصبية تقعان خارج الحبل الشوكي مباشرة. تدعى هذه التراكيب عادة سلسلةَ العقد الودية. تحتوي السلسلة الودّية من العقد أجسام العصبونات بعد العقدية، أما محاور هذه العصبونات فهي التي تغذي الأعضاء الحشوية المختلفة.



الشكل 44-30

مسلك عصبي ذاتي. هناك عصبونان حركيان في المسار الصادر: الأول، العصبون قبل العقدي، يخرج من الجهاز المركزي، ويصنع تشابكًا في العقدة الذاتية. أما الثاني، العصبون بعد العقدي، فيخرج من العقدة الذاتية، وينظم المستجيبات الحشوية (العضلات الملساء أو القلبية أو الغدد).

يوجد بعض الاستثناءات لهذا النمط. إذ تمر محاور بعض العصبونات الودية قبل العقدية خلال السلسلة الودية من العقد دون أن تصنع تشابكات، وبدلًا من ذلك، فإنها تمتد لتنتهي في نخاع الغدة الكظرية (الفصل الـ 46). يُفرز نخاع الكظرية، استجابة لجهود الفعل الواصلة إليه عبر هذه المحاور هرمون إبينفرين (أدرينالين). في الوقت نفسه، يُفرَز الناقل العصبي نورإبينفرين عند تشابكات العصبونات بعد العقدية. وكما وصفنا سابقًا، فإن هذين الناقلين العصبيين يُعدّان الجسم للعمل، بزيادة الأيض وتدفق الدم.

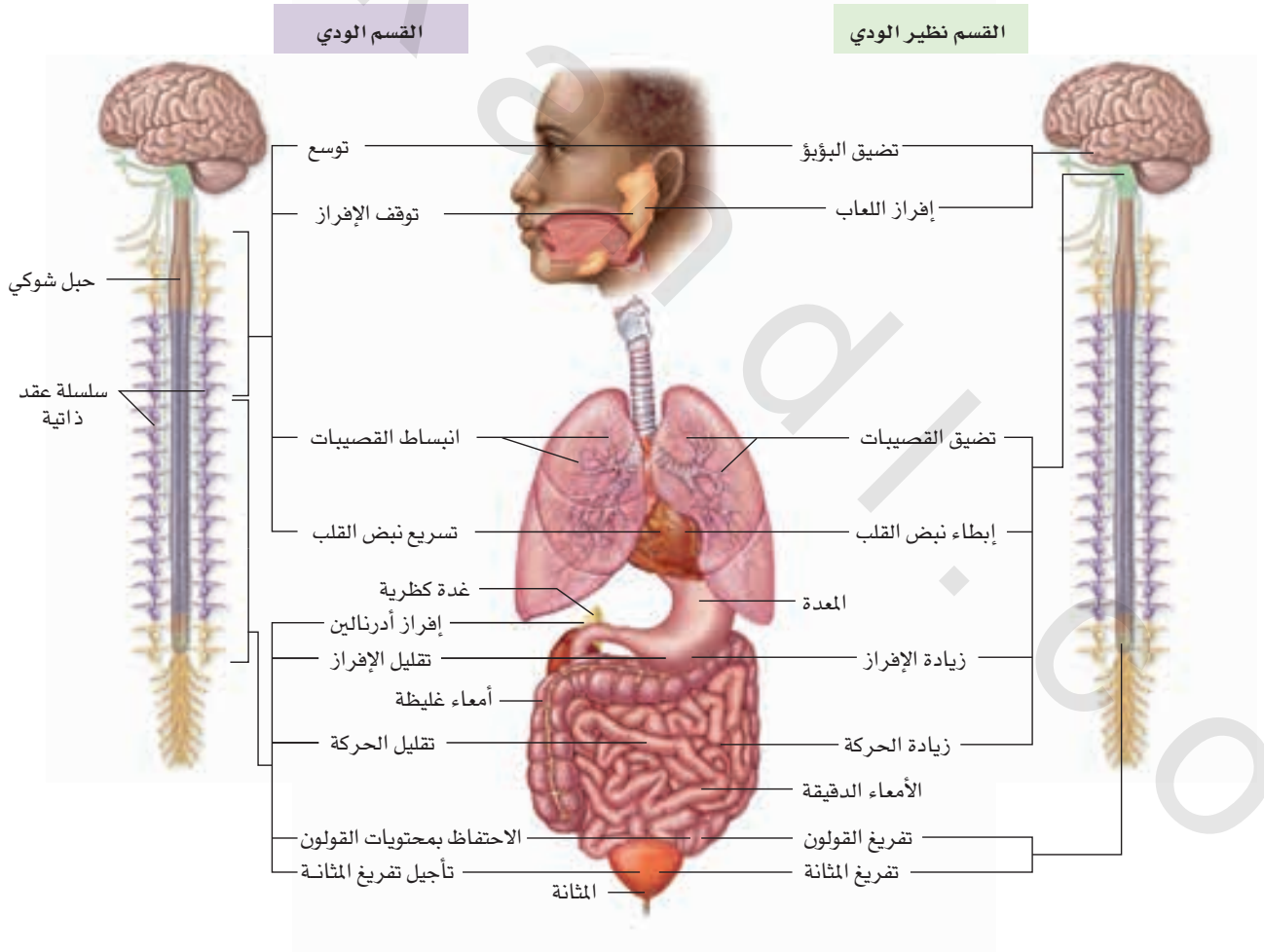
القسم نظير الودّي *The Parasympathetic division*

يُعاكس القسم نظير الودي الودي أعمال القسم الودي. تنشأ العصبونات قبل العقدية في القسم نظير الودي من الدماغ، ومن المنطقة العجزية للحبل الشوكي (انظر الشكل 44 -31، الأيمن). وبسبب هذه النشأة، لن تتكون سلاسل عقد نظير الودية مناظرة لسلاسل العقد الودية. فبدلًا من ذلك، تنتهي المحاور قبل العقدية، التي يسير كثير منها في العصب الحائر (العصب القحفي العاشر)، في عقد واقعة قرب، أو حتى ضمن الأعضاء الداخلية المستجيبة.

تُنظِّم العصبونات بعد العقدية الأعضاء الداخلية بتحرير أستيل كولين عند تشابكاتها. تشمل تأثيرات القسم نظير الودي إبطاء القلب، وزيادة إفرازات القناة الهضمية وأنشطتها. وهكذا. الجدول 44-5 يقارن بين أفعال القسمين الودي ونظير الودي.

تتوسط بروتينات G استجابات الخلايا للإشارات الذاتية

قد تتساءل كيف يؤدي تحرر أستيل كولين إلى إبطاء القلب –وهو أثر تثبيطي – في حين له آثار تهيجية في أماكن أخرى. والجواب على ذلك بسيط، فالخلايا ذات العلاقة في كل حالة لها مستقبلات أستيل كولين مختلفة ما ينتج آثارًا متباينة. ففي المفصل العصبي العضلي، كانت مستقبلات أستيل كولين قنوات صوديوم مبوّبة بالناقل، وهذه عندما تفتح تسمح بتدفق Na^+ ما يسبب إزالة استقطاب الغشاء. أما في حالة القلب، فيحدث التأثير المثبط على خلايا صانع الخطو؛ لأن مستقبلات أستيل كولين تسبب فتح قنوات بوتاسيوم K^+ ما يقود إلى انتشار K^+ خارجًا وإلى زيادة استقطاب الغشاء. هذا المستقبل هو عضو في طائفة من المستقبلات تدعى مستقبلات مزدوجة مع بروتين G.



الشكل 44-31

القسمان الودي ونظير الودي للجهاز العصبي الذاتي. تخرج العصبونات قبل العقدية للقسم الودي من المناطق الصدرية القطنية، أما في النظير الودي، فتخرج من الدماغ والمنطقة العجزية للحبل الشوكي. تقع عقد القسم الودي بالقرب من الحبل الشوكي، في حين تقع عقد القسم نظير الودي بالقرب من الأعضاء التي تغذيها. تغذى معظم الأعضاء الداخلية من قبل كلا القسمين.

الجدول 44-5	التغذية العصبية للجهاز الذاتي للأنسجة الهدف	
النسيج الهدف	التنبيه الودي	التنبيه نظير الودي
بؤبؤ العين	توسُّع	تضيُّق
الغدد		
اللعابية	انقباض الأوعية، قليل من الإفراز	توسّع الأوعية، إفراز غزير
المعدية	تثبيط الإفراز	تنبيه النشاط المعدي
الكبد	تنبيه إفراز جلوكوز	تثبيط إفراز جلوكوز
العرقية	تعرّق	لا شيء
القناة الهضمية		
العضلات العاصرة	زيادة التوتر	إنقاص التوتر
الجدار	إنقاص التوتر	زيادة الحركة
كيس الصفراء	انبساط	انقباض
المثانة البولية		
العضلات	انبساط	انقباض
العضلة العاصرة	انقباض	انبساط
عضلات القلب	زيادة معدل الانقباض وقوته	انخفاض معدل الانقباض
الرئتان	توسع القصيبات	تضيق القصيبات
الأوعية الدموية		
في العضلات	توسّع	لا شيء
في الجلد	تضيّق	لا شيء
في الأحشاء	تضيّق	توسّع

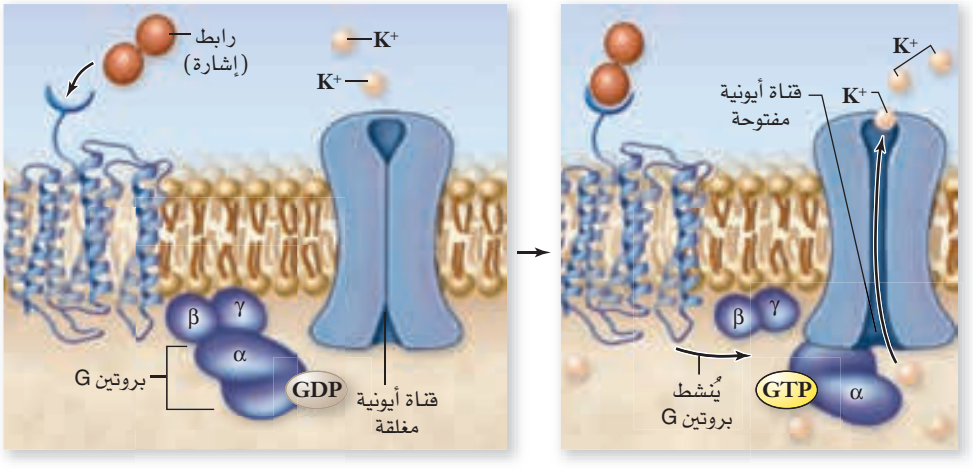
لقد تعلمت في (الفصل الـ 9) أن المستقبلات المزدوجة مع بروتين G تتكون من مستقبل في الغشاء وبروتين مستجيب يزدوجان معًا بفعل بروتين G. ينشط المستقبل عند ارتباط رابط به، والرابط في هذه الحالة هو أستيل كولين، فيحفِّز المستقبل بروتين G الذي يحفز بدوره بروتينًا مستجيبًا، وهو في هذه الحالة قناة K^+ (شكل 44- 32).

يمكن أن يقود هذا النوع من الأنظمة إلى تهيج في أعضاء أخرى إذا ما عمل بروتين G على بروتينات مستجيبة أخرى. فمثلًا، يمكن أن تسبب الأعصاب نظير الودية التي تغذي المعدة زيادة إفرازات المعدة وانقباضاتها.

يتوسط عمل المستقبلات المزدوجة مع بروتين G كذلك تأثيرات الأعصاب الودية. إذ يتطلب التنبيه عن طريق نورإبينفرين المفرَز من النهايات العصبية الودية، وإبينفرين المفرَز من نخاع الكظرية بروتينات G لتنشيط الخلايا الهدف. وسوف نصف هذه التداخلات بالمزيد من التفصيل عند دراسة عمل الهرمونات في (الفصل الـ 46).

يحتوي العصب الشوكي عصبونات حسية وأخرى حركية. يسيطر الجهاز العصبي البدني (الجسمي) على الأفعال الانعكاسية والحركات الإرادية. في حين يسيطر الجهاز العصبي الذاتي على الوظائف اللاإرادية. القسم الودي للجهاز الذاتي ونخاع الغدة الكظرية معًا يحفزان الجسم لاستجابتي الكرّ أو الفرّ، في حين يشجع القسم نظير الودي بشكل عام الاسترخاء والهضم.

عندما يغذي القسمان عضوًا مستجيبًا، يكون لهما عادة آثار متضادة. تؤدي بروتينات G دورًا وسيطًا في استجابات الجهاز العصبي الطرفي.



الشكل 44-32

تأثيرات أستيل كولين نظير الودية تتطلب عمل بروتين G. يسبب ارتباط أستيل كولين إلى مستقبله تفكك بروتين G، فتحرر بعض مكوناته، وتتحرك ضمن الغشاء لترتبط ببروتينات أخرى تشكل قنوات أيونية. يبين الشكل أثر أستيل كولين في القلب حيث تسبب مكونات بروتين G فتح قنوات K^+. يقود هذا إلى انتشار بوتاسيوم إلى الخارج، وإلى زيادة استقطاب مما يبطئ من نبض القلب.

مراجعة المفاهيم

44-1 تنظيم الجهاز العصبي

لكي يستجيب المخلوق للمنبهات يجب على الجهاز العصبي ربط المستقبلات الحسية بالمستجيبات الحركية (الشكل 44-1).

- يتألف الجهاز العصبي المركزي من الدماغ والحبل الشوكي.
- يتألف الجهاز العصبي الطرفي من عصبونات حسية تنقل السيالات إلى الجهاز المركزي، وعصبونات حركية لنقل السيالات من الجهاز المركزي (الشكل 44-2).
- يتكون الجهاز العصبي الذاتي من قسمين متضادين، هما: الودي، ونظير الودي.
- العصبون له جسم وزوائد شجرية تستقبل المعلومات، ومحور طويل ينقل السيالات من الخلية.
- تُنتج خلايا شوان وخلايا الدبق قليلة الزوائد أغمادًا ميلينة تحيط بالمحاور وتعزلها (الشكل 44-3).

44-2 آلية بث السيال العصبي عبر الغشاء البلازمي

يعتمد بث السيال العصبي على نفاذية الأعصاب للأيونات خلال قنوات أيونية مبوبة.

- تعتمد وظيفة العصب على فرق جهد الغشاء الذي ينتج بسبب الفرق في تركيز الأيونات عبر غشاء الخلية.
- تنقل مضخة صوديوم -بوتاسيوم Na^+ خارج الخلية، وتنقل K^+ إلى داخل الخلية.
- يؤدي تسرب أيونات بوتاسيوم إلى تحريك الشحنات الموجبة خارج الخلية، ما يجعل الداخل سالبًا بالنسبة إلى الخارج.
- ينتج فرق جهد الراحة من التوازن بين انتشار K^+ للخارج والشحنة السالبة التي تجذب K^+ إلى داخل الخلية (شكل 44-6).
- تُبدي العصبونات جهودًا متدرجة بسبب تنشيط قنوات أيونية مبوبة بالرابط (الشكل 44-7).
- التجميع هو القدرة على دمج الجهود المتدرجة.
- ينتج جهد الفعل عندما تصل إزالة الاستقطاب حد العتبة، وجهد الفعل هو (كل أو عدم).
- يتكون جهد الفعل من طور: ارتفاع، وهبوط، وتجاوز (الشكل 44-9).
- يُعبر عن شدة المنبه بتكرار جهود الفعل.
- يسبب تدفق Na^+ إلى الداخل الناتج عن جهد الفعل إزالة استقطاب في المنطقة المجاورة، فتنتج جهد فعل خاص بها (شكل 44-10).
- تزداد سرعة سريان السيال العصبي بزيادة قطر المحور وبالعزل عن طريق غمد الميلين، الذي يسبب النقل الوثبي (الشكل 44-11).

44-3 التشابك العصبي: حيث تتواصل العصبونات مع الخلايا الأخرى

ينتهي جهد الفعل عند نهاية المحور، وعلى المعلومات أن تعبر التشابك العصبي، وهو الفجوة بين العصبون والخلايا الأخرى.

- التشابكات الكهربائية لها مفاصل فجوية بين الخلايا قبل وبعد التشابكية في حين تستخدم التشابكات الكيميائية النواقل العصبية.
- وصول السيال العصبي يفتح قنوات كالسيوم مبوبة بفرق الجهد، ما يسبب تحرر الناقل العصبي (الشكل 44-13).
- تنتشر النواقل العصبية عبر الشق التشابكي، وترتبط بمستقبلات مبوبة بالرابط، ما يغير جهد الغشاء.
- تشمل أنواع النواقل الأحماض الأمينية، والأمينات الحيوية، والببتيدات العصبية، وغازًا هو أكسيد النتريك.
- الجهود بعد التشابكية المهيجة تزيل استقطاب الغشاء، والجهود المثبطة تزيد استقطاب الغشاء (الشكل 44-15).
- يتم إيقاف فعل النواقل العصبية بالتحليل الأنزيمي، أو بإعادة تناولها من قبل الخلية قبل التشابكية.
- يمكن تجميع الجهود المتدرجة مكانيًّا أو زمانيًّا لإنتاج جهد فعل.

44-4 الجهاز العصبي المركزي: الدماغ والحبل الشوكي

قاد تطور الجهاز العصبي إلى قدرة على نشاط ارتباطي -السيطرة على الأفعال المعقدة.

- تطور الجهاز العصبي من شبكة عصبية، مكونة من أعصاب مترابطة، إلى حبال عصبية ذات وصلات عصبية، وإلى تطور للمراكز العصبية (شكل 44-19).
- لدماغ الفقريات ثلاثة أقسام: خلفي، وأوسط، وأمامي (الشكل 44-20).
- ينسق الدماغ الخلفي الأفعال الانعكاسية الحركية.
- يستقبل الدماغ الأوسط المعلومات البصرية ويعالجها.
- يستجيب الدماغ الأمامي للشم، ويقسم إلى الدماغين: البيني والطرفي.
- يتألف الدماغ البيني من المهاد، الذي يكامل وينقل المعلومات الحسية، وتحت المهاد الذي يسيطر على إفرازات الغدة النخامية.
- الدماغ الطرفي في الثدييات يدعى المخ، وهو مركز لإيجاد العلاقات والترابط والتعلم (الجدول 44-3).
- يقسم الدماغ في الإنسان إلى نصف كرة أيمن وأيسر يرتبطان عن طريق الجسم الصلب (الشكل 44-22).
- يقسم كل نصف كرة مخ إلى فص: أمامي، وجداري، وصدغي، وقفوي (الشكل 44-23).
- يستقبل كل نصف كرة مخ معلومات حسية واردة من الجانب المقابل للجسم، ويسيطر على أنشطة ذلك الجانب نفسه.
- يحتوي المخ قشرتين: حركية أساسية، وأخرى حسية بدنية أساسية (الشكل 44-24).
- تتسلّم العقد القاعدية معلومات حسية واردة من مسالك عصبية صاعدة، وتصدر أوامر حركية عبر الحبل الشوكي.
- يتكون الجهاز الطرفي من تحت المهاد، وقرن آمون، والأجسام اللوزية. وهو مسؤول عن الحالات العاطفية.
- يمكن السيطرة على الأعمال المعقدة للدماغ في مناطق معينة منه.
- قد تخزن الذاكرة قصيرة الأمد على هيئة تهيج عصبي آني، في حين تتضمن الذاكرة طويلة الأمد تغيرات تركيبية في الوصلات العصبية.
- الأفعال الانعكاسية هي حركات غير إرادية مفاجئة للعضلات (الشكل 44-27 والشكل 44-28).

44-5 الجهاز العصبي الطرفي: العصبونات الحسية والحركية

الجهازُ العصبي الطرفي مجموعةٌ من المحاور، وتجمعات من أجسام الخلايا العصبية تدعى العقد العصبية موجودة خارج الجهاز المركزي.

- تدخل المحاور الحسية السطح الظهري للحبل الشوكي، فتشكل الجذر الظهري للعصب الشوكي.
- تغادر المحاور الحركية السطح البطني للحبل الشوكي، وتشكل الجذر البطني للأعصاب الشوكية.
- تجتمع أجسام العصبونات الحسية خارج الحبل الشوكي، وتشكل عقد الجذر الظهري.
- أجسام العصبونات الحركية تقع في الحبل الشوكي نفسه.
- تنبه العصبونات الحركية البدنية العضلات الهيكلية استجابة لأوامر واعية وأفعال انعكاسية لا إرادية.
- الوظائف اللاإرادية يسيطر عليها الجهاز العصبي الذاتي.
- تنشأ العصبونات قبل العقدية الودية من المناطق الصدرية والقطنية للحبل الشوكي، وتتشابك في عقد ذاتية خارج الحبل الشوكي (الشكل 44-30).
- تنشأ العصبونات قبل التشابكية نظير الودية من الدماغ، ومن المنطقة العجزية للحبل الشوكي، وتنتهي في عقد تقع قريبة أو داخل الأعضاء الداخلية الهدف (الشكل 44-13 والجدول 44-5).

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. الوصف الأفضل للحالة الكهربائية لعصبون وقت الراحة هو:
   أ. داخل العصبون مشحون بشحنة سالبة أكثر من خارجه.
   ب. خارج العصبون مشحون بشحنة سالبة أكثر من داخله.
   جـ. لداخل العصبون وخارجه الشحنة الكهربائية نفسها.
   د. تتسرب أيونات بوتاسيوم إلى العصبون وقت الراحة.
2. واحد مما يأتي لا يمكن السيطرة عليه بالأفكار الواعية:
   أ. العصبونات الحركية. ب. الجهاز العصبي البدني.
   جـ. الجهاز العصبي الذاتي. د. العضلات الهيكلية.
3. استجابتا الكرِّ أو الفرِّ يُسيطر عليهما عن طريق:
   أ. القسم الودي للجهاز العصبي.
   ب. القسم نظير الودي للجهاز العصبي.
   جـ. تحرر أستيل كولين من العصبونات بعد العقدية.
   د. الجهاز العصبي البدني.
4. تصور أنك تُجري تجربة على حركة الأيونات عبر الأغشية العصبية. الذي يؤدي دورًا في تقرير تركيز التوازن للأيونات عبر هذه الأغشية هو:
   أ. فروق تركيز الأيونات.
   ب. الفروق في درجة الحموضة للأيونات.
   جـ. الفروق الكهربائية للأيونات.
   د. أ + جـ.
5. مضخة صوديوم –بوتاسيوم:
   أ. ليست مطلوبة لإطلاق جهد الفعل.
   ب. مهمة لإدامة جهد الراحة على المدى الطويل.
   جـ. مهمة فقط عند التشابك العصبي.
   د. تستخدم لتحفيز الجهود المتدرجة.
6. تثبط مادة بوتوكس، وهي مشتقة من سموم البكتيريا الوشيقية المسببة للتسمم الغذائي، تحرر أستيل كولين من المفصل العصبي العضلي. يمكن لهذه المعالجة الغريبة أن تنتج آثارها التجميلية المرغوبة في:
   أ. تثبيط الفرع نظير الودي للجهاز الذاتي.
   ب. تثبيط الفرع الودي للجهاز الذاتي.
   جـ. إحداث شلل في عضلات الوجه ما يقلل تجاعيد الوجه.
   د. إحداث انقباض في عضلات الوجه، حيث يُشد الجلد بقوة، وتختفي التجاعيد.
7. فيما يأتي قائمة بمكونات التشابك الكيميائي. في واحدة مما يأتي قد يؤدي حدوث الطفرة إلى أثر في استقبال الرسائل فقط، لا على تحرر الناقل أو على الاستجابة:
   أ. بروتينات الغشاء في الخلية بعد التشابكية.
   ب. بروتينات في الخلية قبل التشابكية.
   جـ. بروتينات سيتوبلازمية في الخلية بعد التشابكية.
   د. أ + ب.
8. النواقل العصبية المثبطة:
   أ. تزيد استقطاب الأغشية بعد التشابكية.
   ب. تزيد استقطاب الأغشية قبل التشابكية.
   جـ. تزيل استقطاب الأغشية بعد التشابكية.
   د. تزيل استقطاب الأغشية قبل التشابكية.
9. افترض أنك وخزت أصبعك بدبوس حاد، وأن المنطقة المتأثرة صغيرة جدًا، بحيث أُطلق مستقبل واحد للألم، لكن المستقبل ينطلق بشكل متكرر وبمعدل سريع (مؤلم). يعد هذا مثالًا على:
   أ. تجميع زماني. ب. تجميع مكاني.
   جـ. تعوُّد. د. إعادة استقطاب.
10. هب أنك تُشرِّح جرذًا نفق بهدوء في أثناء نومه بعد تقدمه في العمر. التركيب الذي لا تتوقع وجوده في دماغ الجرذ هو:
   أ. الدماغ الأمامي. ب. الدماغ الأوسط.
   جـ. الدماغ الخلفي. د. الحبال العصبية البطنية.
11. المادة البيضاء_____ والمادة الرمادية_____
   أ. مكونة من محاور، مكونة من أجسام الخلايا وزوائدها الشجرية.
   ب. مغمدة، غير مغمدة.
   جـ. موجودة في الجهاز المركزي، أيضًا موجودة في الجهاز المركزي.
   د. كل ما ذكر صحيح.
12. الفعل الانعكاسي الوظيفي يتطلب:
   أ. عصبونًا حسيًّا، وعصبونًا حركيًّا فقط.
   ب. عصبونًا حسيًّا، ومهادًا، وعصبونًا حركيًّا.
   جـ. قشرة مخية، وعصبونًا حركيًّا.
   د. قشرة مخية، ومهادًا فقط.
13. بينما تجلس بهدوء لتقرأ هذه الجملة، يكون جزء الجهاز العصبي الأكثر نشاطًا هو:
   أ . العصبي البدني. ب. العصبي الودي.
   جـ. العصبي نظير الودي. د . لا شيء مما ذكر.
14. المستقبلات المزدوجة مع بروتين G ذات علاقة بالجهاز العصبي من حيث إنها:
   أ. تسيطر على تحرر النواقل العصبية.
   ب. تسيطر على فتح قنوات Na^+ وإغلاقها في أثناء جهد الفعل.
   جـ. تسيطر على فتح قنوات K^+ وإغلاقها في أثناء جهد الفعل.
   د. تعمل بوصفها مستقبلات للنواقل العصبية على الخلايا بعد التشابكية
15. في أثناء جهد الفعل فإن طور:
   أ. الارتفاع سببه تدفق Na^+ للداخل. ب. الهبوط سببه تدفق K^+ للداخل.
   جـ. الهبوط سببه خروج K^+ للخارج. د. أ + جـ.

أسئلة تحدٍّ

1. تغلق مادة رباعي إيثيل الأمونيوم قنوات K^+ المبوبة بفرق الجهد. ما أثر هذه المادة المتوقع في جهود الفعل التي ينتجها عصبون؟ وإذا كان ممكنًا إضافتها بشكل انتقائي لعصبون قبل تشابكي يحرر ناقلًا عصبيًّا مهيجًا، كيف ستغير المادة الأثر التشابكي لذلك الناقل العصبي في الخلية بعد التشابكية؟
2. صِف الحالة التي تكون عليها قنوات Na^+ و K^+ في كل من الأطوار الآتية: الارتفاع، والهبوط، والتجاوز.
3. صِف الخطوات المطلوبة لإنتاج جهد بعد تشابكي مهيج. كيف يمكن أن تختلف هذه الخطوات عند تشابك مثبط ؟
4. لاحظت أن صديقك الذي يحب الكافيين بدأ يشكو أخيرًا أنه مضطر إلى شرب المشروبات المحتوية على الكافيين أكثر مما اعتاد عليه. ولكونك طالبًا مُجدًّا في الأحياء، أخبرته بأنّ ذلك أمر متوقع. كيف تفسر ذلك؟

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