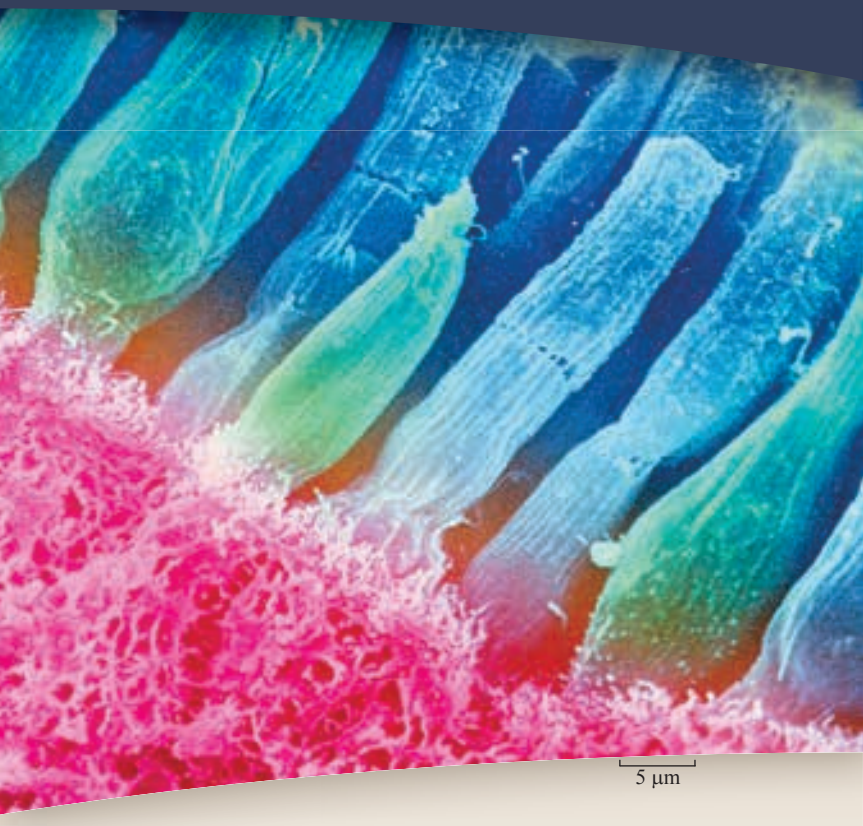
الفصل 45

الأجهزة الحسّيّة
Sensory Systems



مقدّمة

تصل الإشارات الواردة من العصبونات الحسّيّة جميعها إلى الجهاز العصبي المركزي بالشّكل نفسه، أيّ على شكل جهود فعل. وتتسلَّم العصبونات الحسّيّة الإشارات الواردة من تشكيلة مختلفة الأنواع من الخلايا المستقبلة الحسّيّة كالْعِصِيّ والمخاريط الموجودة في عيون الْفقريّات الموضحة في صورة المجهر الإلكتروني المبينة جانبًا. تقود عصبونات حسية مختلفة إلى مناطق مختلفة من الدّماغ، ولهذا فهي مرتبطة بإحساسات مختلفة. تعتمد شدة الإحساس على تكرار جهود الفعل التي تنقلها العصبونات الحسّيّة. ويميز الدّماغ غروب الشّمس، من سيمفونية موسيقية، من ألم يتلاشى، فقط بدلالة هوية العصبون الحسّيّ الذي ينقل جهود الفعل ومن تكرار هذه السّيّالات. وهكذا، فإذا نُبه العصب السمعي بصورة اصطناعية، فإنّ الدّماغ يدرك هذا التنبيه على أنه صوت. ولكن إذا نبّه العصب البصري اصطناعيًّا بالطريقة وبالدرجة نفسها، فإنّ الدّماغ يدرك ذلك على أنه ومضة من ضَوء.

في هذا الفصل، سنتناول الأجهزة الحسّيّة في الْفقريّات بشكل أساسي. ونقارن بعض هذه الأجهزة مع نظيراتها في اللافقريات أيضًا.

موجز المفاهيم

45-1 نظرة عامة على المستقبلات الحسّيّة

- *ترصد المستقبلات الحسّيّة الْمنبِّهات الْخارجيّة والدّاخليّة.*
- *يمكن تصنيف المستقبلات في ثلاث مجموعات.*
- *تُنقل المعلومات الحسّيّة في عملية ذات خطوات أربع.*
- *يتضمن تحويل الإشارة الحسّيّة قنوات أيونية مبوبة.*

45-2 المستقبلات الآلية: اللّمس والضّغط

- *تحذر مستقبلات الألم الجسم من أذى وقع، أو على وشك الوقوع.*
- *ترصد مستقبلات مختلفة اللّمس بناء على شدته.*
- *ترصد المستقبلات الخاصة طول العضلة ودرجة توترها.*
- *مستقبلات الضّغط ترصد ضغط الدم.*

45-3 السّمع والاهتزاز ورصد وضع الجسم

- *يرصد الخط الجانبي في الأسماك الاهتزازات منخفضة التردد.*
- *تركيب الأذن متخصص في رصد الاهتزاز.*
- *يحدث تحويل الإشارة السمعية في القوقعة.*
- *بعض الْفقريّات لديها القدرة على الملاحة عن طريق الصّوت.*
- *وضع الجسم وحركته ترصدها أجهزة مرتبطة بأجهزة السّمع.*

45-4 المستقبلات الكيميائية: الذّوق والشّم ودرجة الحموضة (درجة الأسّ الهيدروجيني)

- *يرصد التّذوّق الغذاء المحتمل ويحلله.*
- *يستطيع الشّم أن يتعرف عددًا كبيرًا من الجزيئات المعقدة.*
- *ترصد المستقبلات الكيميائية الدّاخليّة درجة الحموضة (pH) وخصائص أخرى.*

45-5 الرؤية

- *ترصد الرؤية الضّوء وتغيراته من على بعد.*
- *مستقبلات الضّوء في الْفقريّات هي خلايا الْعِصِيّ وخلايا المخاريط.*
- *تُعالج المعلومات البصرية في القشرة المخية.*

45-6 تنوع الخبرات الحسّيّة

- *بعض الأفاعي لها مستقبلات قادرة على رصد الأشعة تحت الحمراء.*
- *بعض الْفقريّات تستطيع الإحساس بالتيارات الكهربائية.*
- *ترصد بعض المخلوقات الحقول الْمغناطيسيّة.*

1-45 نظرة عامة على المستقبلات الحسّيّة

عند التفكير في المستقبلات الحسّيّة، يتبادر إلى الذهن حواس البصر، والسّمع، والتّذوّق، والشّم، واللّمس – أو الحواس التي تزودنا بمعلومات عن بيئتنا. المعلومات الْخارجيّة هي بالتأكيد مهمة للبقاء، ولنجاح الحيوانات – لكن المستقبلات الحسّيّة تزودنا أيضًا بمعلومات عن البيئة الدّاخليّة، مثل درجة شدّ العضلات، ووضع الجسم وضغط الدم. وسنلقي نظرة عامة، في هذا الجزء على أنواع المستقبلات وكيفية عملها.

الجدول 1-45 تحويل الإشارات الحسّيّة في الْفقريّات

المنبه	المستقبل	الموقع	التركيب	عملية تحويل الإشارة
الاستقبال الحسّيّ الداخلي				
درجة الحرارة	مستقبلات حرارة ومستقبلات برودة.	الجلد، تحت المهاد	نهايات عصبية حرة	التّغيّر في درجة الحرارة يفتح أو يغلق قنوات أيونية في الغشاء.
اللّمس	حويصلات ميسنر، مستقبلات جراب الشعر، خلايا ميركلّ، حويصلات روفيني.	طلائية الجلد	نهايات عصبية مع محفظة مطاطة	التّغيّر السريع أو الممتد في الضّغط يُغير شكل الغشاء.
الاهتزاز	حويصلات باسيني	عميقة ضمن الجلد	نهايات عصبية مع محفظة مطاطة	التّغيّر الحاد في الضّغط يغير شكل الغشاء.
الألم	مستقبلات الألم	في كلّ الجسم	نهايات عصبية حرة	المواد الكيميائية أو التّغيّرات في الضّغط أو في درجة الحرارة تفتح أو تغلق قنوات أيونية في الغشاء.
شدّ العضلات	مستقبلات الشدّ	ضمن العضلات	نهايات عصبية حلزونية ملتفة حول مغزل العضلة	شدّ المغزل يؤدي إلى تغير في شكل الغشاء.
ضغط الدم	مستقبلات الضّغط	الأفرع الشريانية	نهايات عصبية فوق طبقة رقيقة من جدار الشريان	يؤدي شدّ جدار الشريان إلى تغير شكل الغشاء.
الاستقبال الْحسّيّ الخارجي				
الجاذبية	حويصلات التّوازن	الحجرات الْخارجيّة للأذن الدّاخليّة	حصى الأذن وخلايا شعرية	يُغير حصى الأذن من شكل الخلايا الشعرية.
الحركة	الكؤيس	القنوات نصف الهلالية في الأذن الدّاخليّة	مجموعة من الخلايا الشعرية	حركة السائل تغير في شكل الخلايا الشعرية.
	عضو الخط الجانبي	ضمن تجاويف على سطح جسم السمكة	مجموعة من الخلايا الشعرية	حركة السائل تغير في شكل الخلايا الشعرية.
التّذوّق	خلايا براعم التّذوّق	الفم، جلد الأسماك	مستقبلات كيميائية: خلايا طلائية ذات خملات دقيقة	ترتبط المواد الكيميائية بمستقبلات في الغشاء.
الشّم	عصبونات شمية	الممرات الأنفية	مستقبلات كيميائية: عصبونات مهدبة	ترتبط المواد الكيميائية بمستقبلات في الغشاء.
السمع	عضو كورتي	قوقعة الأذن الداخلية	خلايا الشعر بين الغشاء القاعدي والغشاء السقفي	تحرك أمواج الصوت في السائل الشعر وتسبب انثناء الأغشية.
البصر	خلايا الْعِصِيّ والمخاريط	شبكية العين	تشكيلة من الصبغات الحساسة للضوء	يحفِّز الضّوء عملية تؤدي إلى غلق قنوات أيونية.
الحرارة	عضو النقرة	وجه الأفعى	مستقبلات درجة الحرارة في حجرتين	مستقبلات تقارن درجة حرارة السطح مع الحجرتين الداخليتين.
الكهرباء	حويصلات لورنزيني	ضمن جلد الأسماك	حويصلات مغلقة ذات توزيع غير متناظر للأيونات	تغير الحقول الكهربائية توزيع الأيونات على الأغشية.
الْمغناطيسيّة	غير معروفة	غير معروف	غير معروف	يحفِّز الانحراف في المجال المغناطيسي سيالات عصبية.

obeikandl.com

ترصد المستقبلات الحسّيّة المُنبِّهات الخارجيّة والدّاخليّة

المستقبلات الخارجيّة Exteroceptors هي المستقبلات التي تحس بالمُنبِّهات التي تنشأ في البيئة الخارجيّة. نشأت حواس الفقريّات الخارجيّة جميعها تقريبًا في الماء قبل أنْ تغزو الفقريّات اليابسة. نتيجة لذلك، فإنّ كثيرًا من حواس فقريات اليابسة تدرك وتؤكد المُنبِّهات التي تنتقل جيدًا في الماء، وذلك باستخدامها لمستقبلات احتفظت بها عند الانتقال من المحيط إلى اليابسة. فالسّمع في الفقريّات مثلًا، يحوّل المُنبِّهات المحمولة بالهواء إلى منبهات محمولة بالماء باستعمالها مستقبلات شبيهة بتلك التي نشأت أصلًا في الماء.

هناك القليل فقط من الأنظمة الحسّيّة للفقريات التي تعمل جيدًا في الماء، كالأعضاء الكهربائية في الأسماك، لا تستطيع العمل في الهواء، ولا توجد بين فقريات اليابسة. في المقابل، فإنّ بعض الفقريّات التي تقطن اليابسة لها أنظمة حسية لا تستطيع العمل في البيئة المائية، كرصد الأشعة تحت الحمراء مثلًا.

ترصد **المستقبلات الدّاخليّة Interoceptors** المُنبِّهات التي تنشأ من داخل الجسم. ترصد المستقبلات الدّاخليّة هذه المُنبِّهات ذات العلاقة بطول العضلات، ودرجة توترها، ووضع أطراف الجسم، والألم، وكيمياء الدم، وحجم الدم وضغطه، ودرجة حرارة الجسم. كثير من هذه المستقبلات أبسط من تلك التي ترصد البيئة الخارجيّة، ويُعتقد أنها أكثر شبهًا بالمستقبلات الحسّيّة البدائية. فيما تبقى من هذا الفصل، سوف نناقش الأنواع المختلفة من المستقبلات الخارجيّة والدّاخليّة بناءً على نوع المنبه الذي تخصّص كلّ منها في رصده (الجدول 45-1).

يمكن تصنيف المستقبلات في ثلاث مجموعات

تختلف المستقبلات الحسّيّة بالنسبة إلى طبيعة المنبه البيئي الذي يحفِّز نهاياتها الشجرية بأفضل صورة. وبشكل عام، يمكننا تمييز ثلاث مجموعات من المستقبلات:

1. **المستقبلات الآلية Mechanoreceptors** التي تنبهها القوى الآلية مثل الضّغط. وهذه تشمل مستقبلات اللّمس، والسّمع، والتّوازن.
2. **المستقبلات الكيميائية Chemoreceptors** التي ترصد المواد الكيميائية أو التغيرات الكيميائية، فحواس الشّم والتّذوّق تعتمد على هذا النوع من المستقبلات.
3. **المستقبلات التي ترصد الطاقة Energy - detecting receptors** وتستجيب للطاقة الكهرومغناطيسية وللحرارة. فمستقبلات الضّوء في العين ترصد طاقة الضّوء، وكذلك مستقبلات الحرارة التي توجد في بعض الزّواحف.

أبسط المستقبلات الحسّيّة هي نهايات عصبية حرة تستجيب لانثناء أو لشد غشاء العصبون الحِسّيّ نتيجة للتغيرات في درجة الحرارة، أو في المواد الكيميائية، كالأكسجين في السائل خارج الخلايا. هناك مستقبلات حسية أخرى أكثر تعقيدًا تتضمن ارتباطًا بين العصبونات الحسّيّة وخلايا طلائية متخصصة.

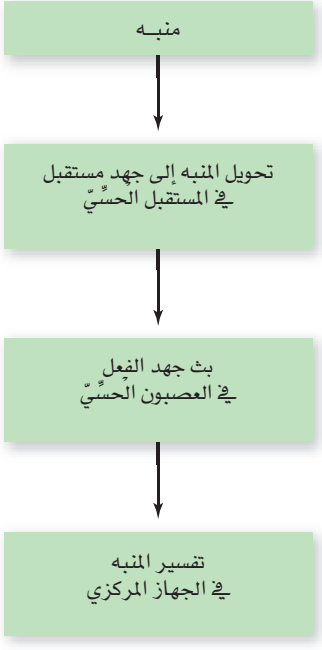
تُنْقَلُ المعلوماتُ الحسّيّة في عملية ذات خطوات أربع

تنقل المعلومات الحسّيّة التي تلتقطها العصبونات الحسّيّة إلى الجهاز العصبي المركزي، حيث يتم إدراك السّيّالات في عملية تتضمن أربع خطوات (الشكل 45 - 1):

1. التنبيه. يقع المنبه الفيزيائي على عصبون حسّيّ، أو على مستقبل حسّيّ يرتبط معه، ولكنه منفصل عنه.
2. التّحويل. تتحول طاقة المنبه إلى جهود متدرجة في الزوائد الشجرية للعصبون الحِسّيّ.
3. البثّ. تتطور جهود فعل في محور العصبون الحِسّيّ، ثم تنقل إلى الجهاز المركزي عبر مسلك عصبي وارد.
4. التّفسير. ينشئ الدّماغ إدراكًا حسيًّا من الأحداث الكهروكيميائية التي تنتج عن التنبيه الوارد. ونحن ندرك الحواس الخمس بأدمغتنا، وليس بأعضاء الإحساس.

يتضمن التّحويل الإشارة الحسّيّة قنوات أيونية مبوبة

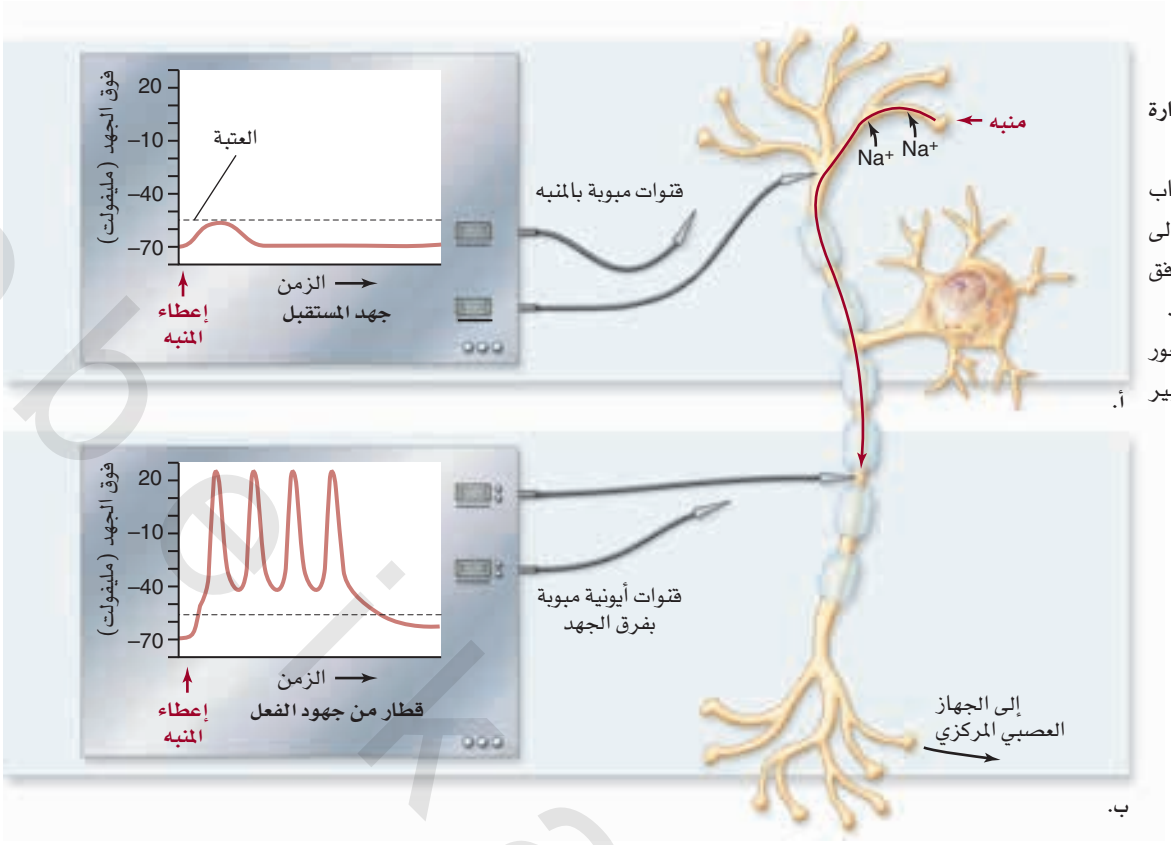
تستجيب الخلايا الحسّيّة للمنبهات؛ لأنها تمتلك **قنوات أيونية مبوبة بالمنبه Stimulus-gated ion channels** في أغشيتها. فالمُنبِّهات الحسّيّة تجعل هذه القنوات الأيونية تفتح أو تغلق بناء على النظام الحِسّيّ ذي العلاقة. في معظم الحالات، يُنتج المنبه الحِسّيّ إزالة استقطاب في خليّة المستقبل مناظرة للجهد بعد التشابكي المهيج (وُصِف في الفصل الـ 44) الذي ينتج في الخليّة بعد التشابكية استجابة لناقل عصبي. تدعى إزالة الاستقطاب التي تحدث في المستقبل الحِسّيّ



الشكل 45-1

الطريق الذي تسلكه المعلومات الحسّيّة. تُحول المُنبِّهات الحسّيّة إلى جهد المستقبل الذي يستطيع أن يطلق جهود فعل من العصبون الحِسّيّ تنتقل إلى الدّماغ، حيث تُفسر.

Obeikandl.com



الشكل 45-2

الأحداث في أثناء تحويل الإشارة الحسّيّة.

أ. تؤدي إزالة استقطاب النهايات العصبية الحرة إلى جهد مستقبل ينتشر بتدفق موضعي للتيار نحو المحور.

ب. تنتج جهود الفعل في المحور استجابة لجهد مستقبل كبير بما فيه الكفاية.

عند **التنبيه جهد المستقبل Receptor potential** (الشكل 45-2أ).

جهدُ المستقبل متدرِّجٌ، مثله مثل الجهد بعد التشابكي المهيج؛ فكلما كان المنبه الْحسِّيّ أكبر كانت درجة إزالة الاستقطاب أكبر. كذلك يتضاءل حجم جهد المستقبل بالابتعاد عن مصدر التنبيه، وهذا يمنع الْمنبِّهات الصغيرة ليست ذات العلاقة من الوصول إلى جسم الخليّة الحسّيّة. وإذا كان جهد المستقبل أو تجميع جهود المستقبل كبيرًا بدرجة كافية لإنتاج إزالة استقطاب تصل حد العتبة، فإنّ جهد فعل ينتج ويسري على طول محور العصبون الْحسِّيّ إلى الجهاز المركزي (الشكل 45-2ب).

وكلما كان المنبه الْحسِّيّ أقوى، كانت درجة إزالة استقطاب جهد المستقبل أكبر، وكان تكرار جهود الفعل الناتجة أعلى (تذكر أنَّ تكرارَ جهود الفعل، وليس تجميعها مسؤولٌ عن نقل معلومات عن شدة المنبه).

وبشكل عام، توجد علاقة لوغاريتمية بين شدة المنبه وتكرار جهد الفعل، فمثلا يُنتج منبه حسي معين أقوى بعشر مرات من منبه حسي آخر جهود فعل تكرارها ضعف تلك التي ينتجها المنبه الأضعف. تسمح هذه العلاقة للجهاز العصبي المركزي بتفسير قوة المنبه الْحسِّيّ بناء على تكرار الإشارات القادمة.

تنقل المستقبلات الحسّيّة المعلومات عن البيئة (المستقبلات الْخارجيّة) وعن حالة الجسم الداخلية (المستقبلات الدّاخليّة). يمكن تقسيم نوعي المستقبلات إلى مستقبلات آلية، وكيميائية، ومستقبلات ترصد الطاقة. تكرار جهود الفعل الصادرة من المستقبلات الحسّيّة يُعلم الجهاز المركزي عن شدة المنبه.

2-45 المستقبلات الآلية: اللّمس والضّغط

على الرّغم من أن المستقبلات الموجودة في الجلد، وتدعى **مستقبلات جلدية Cutaneous receptors** تُصنّف على أنها مستقبلات داخلية، إلا أنها تستجيب لمنبهات على الحدود بين البيئتين الْخارجيّة والدّاخليّة. تخدم هذه المستقبلات بوصفها أمثلة جيدة على تخصص المستقبل في التركيب والوظيفة، حيث تستجيب للحرارة، والبرودة، والألم، واللّمس، والضّغط. وسنناقش هنا الألم واللّمس والضّغط التي ترصدها المستقبلات الجلدية الآلية. أما الحرارة والبرودة فستُناقَشُ في جزء لاحق.

تحذّر مستقبلاتُ الألم الجسمَ من أذى وقع، أو على وشك الوقوع

يُدرَك المنبه الذي يسبب أو على وشك التسبب في أذى للأنسجة على أنه ألم. وتُدعى المستقبلاتُ التي تنقل سيالات تُدرك على أنها ألم **مستقبلات الألم Nociceptors** حيث سميت هكذا لأنها حساسة للمواد المؤذية والمؤلمة إضافة إلى تهتك الأنسجة. وعلى الرّغم من وجود مستقبلات ألم نوعية، فإنّ كثيرًا من المستقبلات الحسّيّة تستطيع أن تنتج إدراكًا للألم في الدّماغ إذا ما نُبِّهَتْ بقوة كبيرة.

تتكون معظم مستقبلات الألم من نهايات عصبية حرة تنتشر في الجسم، وبشكل خاص قرب السطوح، حيث يكون احتمال وقوع الأذى كبيرًا. قد تستجيب مستقبلات ألم مختلفة لدرجات الحرارة المتطرفة، وللتنبيه الآلي الشديد جدًا مثل اصطدام قوي، ولمواد كيميائية محددة في السائل خارج الخلوي، بما في ذلك بعض المواد التي تحررها الخلايا المصابة. تختلف عتبة هذه الخلايا الحسّيّة؛ فبعض مستقبلات الألم حساسة فقط لتهتك الأنسجة الفعلي، في حين يستجيب بعضها الآخر قبل حدوث تلف الأنسجة.

القنوات الأيونية الآنية لجهد المستقبل

يمكن أن يعزى بعض أنواع تلف الأنسجة إلى درجات الحرارة المتطرفة، وفي هذه الحالة، أصبحت التفاصيل الجزيئية لكيفية إحداث الْمنبِّهات المؤذية لإحساس الألم واضحة لدينا، إذ يمكن تنبيه طائفة من بروتينات القنوات الأيونية الموجودة في مستقبلات الألم، تُدعى قنواتٍ أيونية آنية لجهد المستقبل، بدرجة الحرارة ما ينتج تدفقًا للأيونات الموجبة نحو الداخل، صوديوم وكالسيوم بشكل أساسي. يُسَبِّبُ تيارُ إزالة الاستقطاب هذا إطلاقَ جهود فعل من العصبون الْحسِّيّ، ما يؤدي إلى تحرر الناقل العصبي جلوتاميت، وإلى حدوث جهد بعد تشابكي تهيجي في العصبونات في الحبل الشوكي، ويسبب استجابة الألم في النهاية.

وجدت قنوات أيونية آنية لجهد المستقبل تستجيب للحرارة والبرودة، ووجدت فروق في حساسية هذه القنوات الآنية لدرجة التّغيّر في الحرارة، فبعضها يستجيب فقط لتغيرات في الحرارة تتلف الأنسجة، والآخر يستجيب لتغيرات طفيفة. وهكذا، فإننا نستطيع الاستجابة للإحساس بالحرارة والبرودة، إضافة إلى شعورنا بالألم الذي قد يصاحب الحرارة والبرودة المتطرفتين.

أولى القنوات الآنية لجهد المستقبل التي عُرفت تستجيب لمادة كابسيسن الموجودة في الفلفل الحار، وتستجيب للحرارة. ويفسر هذا سبب إحساسنا بالحرارة عندما نتناول الفلفل الحار إضافة إلى شعورنا بالألم. تستجيب كذلك قنوات آنية حساسة للبرودة لمادة المنثول، ما يفسر إحساس البرودة الذي نشعر به عند تناول هذه المادة (أقراص النعناع). يستطيع تنبيه القنوات الآنية لجهد المستقبل أنْ يُقَلِّلَ استجابة الجسم للألم بإضعاف حساسية العصبون الْحسِّيّ. تُفسر استجابة قتل الألم هذه سبب وجود مادة المنثول في شراب تخفيف السّعال (الكحة).

ترصد مستقبلاتُ الحرارة التغيراتِ في الحرارة

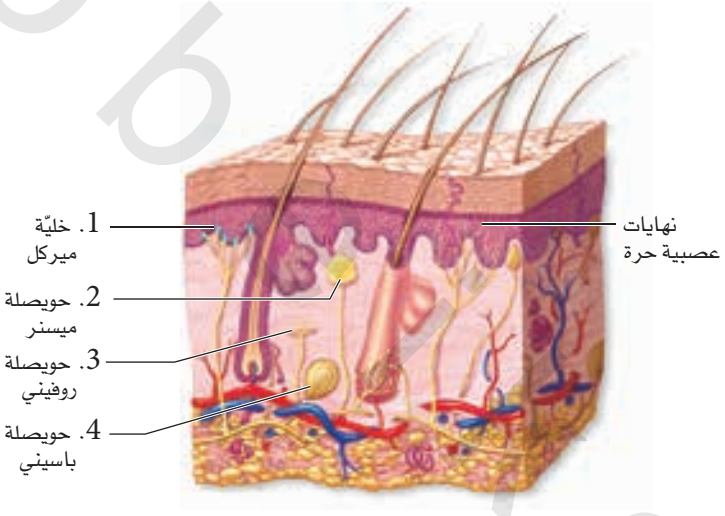
يحتوي الجلد على مجموعتين من **مستقبلات الحرارة Thermoreceptors** التي هي نهايات شجرية معراة للعصبونات الحسّيّة التي تكون حساسة للتغيرات في درجة الحرارة (مستقبلات الألم شبيهة بها في أنها تتكون من نهايات عصبية حرة). تحتوي مستقبلات الحرارة على قنوات أيونية آنية لجهد المستقبل تستجيب للحرارة والبرودة.

تُنبّه مستقبلات البرودة بانخفاض درجة الحرارة، وتثبط بالتسخين، في حين تُنبّه مستقبلات الدفء بارتفاع درجة الحرارة، وتُثبّط بالتبريد. تقع مستقبلات البرودة تحت البشرة مباشرة، وهي أكثر عددًا من مستقبلات الدِّفء بثلاث إلى أربع مرات. تقع مستقبلات الدِّفء بشكل نموذجي في الأدمة الأعمق.

توجد مستقبلات الحرارة كذلك ضمن تحت المهاد في الدّماغ، حيث ترصد درجة حرارة الدم الواصل إليها، ولهذا فهي تزود الجهاز المركزي بمعلومات عن درجة حرارة داخل (لبّ) الجسم، وتغير المعلومات القادمة من مستقبلات الحرارة في تحت المهاد من أيض الجسم، وتنبه استجابات تزيد أو تقلل من درجة حرارة لبّ الجسم بحسب الحاجة.

ترصد مستقبلات مختلفة اللّمس بناءً على شدته

توجد أنواع عدة من المستقبلات الآلية في الجلد، بعضها في الأدمة، والآخر في الأنسجة تحت الجلدية الواقعة تحتها (الشكل 45-3). تحتوي هذه المستقبلات على خلايا حسية بها قنوات أيونية تفتح استجابة لحدوث تشوه (إزاحة) آلي في الغشاء. وترصد المستقبلات أشكالًا مختلفة من الاتصال الفيزيائي المعروف **بحاسة اللّمس Touch**.



1. خليّة ميركل

مستقبلات مستمرة تقع بالقرب من سطح الجلد، وهي حساسة لضغط اللّمس ولطول مدة بقائه.

2. حويصلة ميسنر

مستقبلات حساسة للمس الخفيف، وتتركز في الجلد الحاف (ليس فيه شعر).

3. حويصلة روفيني

مستقبلات مستمرة تقع قرب سطح الجسم، وهي حساسة لضغط اللّمس ولطول مدة بقائه.

4. حويصلة باسيني

مستقبلات حساسة للضغط تقع عميقًا تحت الجلد، في الأنسجة تحت الجلدية.

الشكل 45-3

المستقبلات الحسّيّة في جلد الإنسان. المستقبلات الجلدية قد تكون نهايات عصبية حرة، أو زوائد شجرية حسية ترتبط مع تراكيب داعمة أخرى.

تتركز مستقبلات متخصصة مورفولوجيًّا تستجيب للمس الرقيق في مناطق كأطراف الأصابع والوجه. وهي تُستخدم لتحديد موقع المُنبِّهات الجلدية بدقة بالغة. يمكن أن تكون هذه المستقبلات آنية (تُحفز بشكل متقطّع) أو مستمرة (تحفز بشكل مستمر). أما المستقبلات الآنية، فتشمل مستقبلات جراب الشعرة، وحويصلات ميسنر التي توجد على سطوح لا تحتوي شعرًا كالأصابع، وراحة اليد، وحلمة الثّدي.

تتألف المستقبلات المستمرة من حويصلات روفيني في البشرة، ونهايات قبة اللّمس (أقراص ميركل) الواقعة قرب سطح الجلد. ترصد هذه المستقبلات طول مدة اللّمس، والدرجة التي يسلط بها. تقع مستقبلات آنية حساسة للضغط تدعى حويصلات باسيني عميقًا في الأنسجة تحت الجلدية. تتألف كلّ من هذه المستقبلات من نهاية محور وارد محاطة بمحفظة من طبقات متبادلة من خلايا نسيج ضام وسائل خارج خلوي. وعندما يُسَلَّطُ ضغطٌ مستمرٌّ على الحويصلة، فإنّ المحفظة المطاطية تمتصّ معظم الضّغط، فيتوقف المحور عن إنتاج سيالات. وهكذا ترصد حويصلات باسيني بداية الضّغط وانتهاءه فقط، كما قد يحدث بشكل متكرر عندما يُوضعُ جسمٌ متذبذبٌ على الجلد.

ترصد المستقبلاتُ الخاصة طولَ العضلة ودرجة توتُّرَها

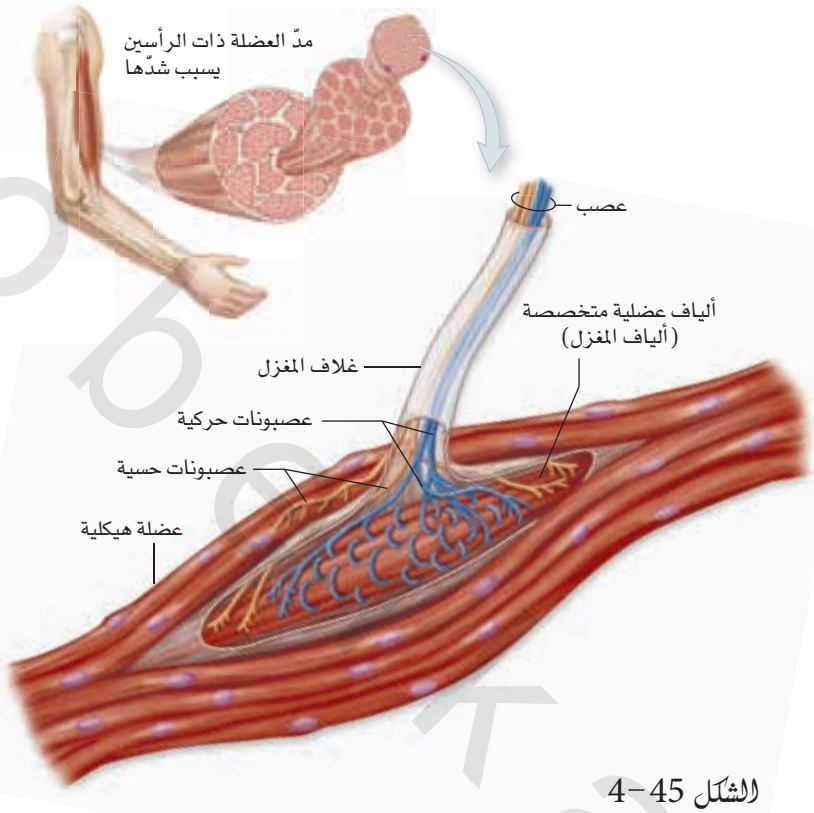
ينغرس **مغزل العضلة Muscle spindle** داخل العضلات الهيكلية للفقريات جميعها باستثناء الأسماك العظمية، وهو مستقبل شدّ حسي يمتد موازيًا لبقية ألياف العضلة (الشكل 45–4). يتألف كلّ مغزل من ألياف عضلية عدة رفيعة مغلقة معًا، ويغذيها عصبون حسّيٌّ يحفز عندما تشد العضلة، والمغزل بالضرورة.

يُدعى مغزلُ العضلة والمستقبلات الأخرى في الأوتار **والمفاصل المستقبلاتِ الخاصةَ Proprioceptors**. تقدّم هذه المستقبلات الحسّيّة معلومات عن الوضع النسبي، وعن حركة أجزاء جسم الحيوان. ينقل العصبون الْحسِّيّ جهود فعل إلى الحبل الشوكي، حيث يتشابك مع عصبون حركي جسمي يغذي العضلة نفسها. يشكل هذا المسلك **الفعل الانعكاسي لشد العضلة Muscle stretch reflex** وهو يشمل الفعل الانعكاسي لرجّة الركبة الذي وصفناه في (الفصل الـ 44). فعندما تُشَدُّ العضلةُ مدة قصيرة بضرب رباط صابونة الرِّجْلِ بمطرقة مطاطية فإنّ جهاز مغزل العضلة يُشَدُّ. ينغمر جهاز المغزل داخل العضلة، وهو يشد كما تُشد ألياف العضلة خارج المغزل. وتكون النتيجة حدوث جهد فعل يحفِّز العصبون الحركي الجسمي، ويجعل الرِّجْلَ تنتفض.

عندما تنقبض العضلة تسلط توترًا على الأوتار المتصلة بها. ويرصد **عضو جولجي في الوتر Golgi tendon organ**، وهو نوع آخر من المستقبلات الخاصة، هذا التوتر. فإذا أصبح التوتر عاليًا، فإنها تبدأ فعلًا انعكاسيًّا يثبط العصبون الحركي الذي يغذي العضلة. هذا السّلوك يضمن عدم انقباض العضلة بقوة كبيرة تؤدي إلى تلف الأوتار المرتبطة بها.

مستقبلاتُ الضّغط ترصد ضغطَ الدّم

يُرصَد ضغط الدم في موقعين رئيسين في الجسم: أحدهما في الجيب السباتي، وهو توسع للشريان السباتي الداخلي الأيمن والأيسر الذي يزود الدّماغ بالدم. أما الموقع الآخر فهو في القوس الأبهري، وهو ذلك الجزء من الأبهر القريب من نقطة خروجه من القلب. تحتوي جدرانُ الأوعية الدموية في كلا الموقعين شبكةً بالغة التفرع من عصبونات حسية واردة تدعى **مستقبلات الضّغط Baroreceptors** وهي ترصد توترَ أو درجةَ شدّ جدران الأوعية.



الشكل 45–4

كيف يعمل مغزل العضلة. مغزلُ العضلة مستقبلُ شَدٍّ مغمور داخل العضلة الهيكلية. يُطيل شدّ العضلة ألياف المغزل، وينبه النهايات الشجرية الحسّيّة الملتفة حوله. يدفع هذا العصبون الْحسِّيّ لإرسال سيالات إلى الجهاز العصبي المركزي، حيث تتشابك مع عصبونات بينية، وفي بعض الأحيان مع عصبونات حركية.

عندما ينخفض ضغط الدم، ينقص تكرار السّيّالات التي تنتجها مستقبلات الضّغط. يستجيب الجهاز المركزي لهذا الانخفاض في الإشارات الواردة بأنّ يحفِّز القسم الودي للجهاز العصبي الودي، مسببًا زيادة في معدل نبض القلب، وتضيقًا في الأوعية الدموية. يؤدي كلا الأثرين إلى رفع ضغط الدم ما يدعم الاتزان الداخلي. وتؤدي زيادة ضغط الدم إلى زيادة السّيّالات في مستقبلات الضّغط التي تقلل نشاط القسم الودي، وتنبه بصورة معاكسة نشاطَ القسم نظير الودي ما يقلل معدل نبض القلب، ويخفض ضغط الدم.

التشويه (الانحراف) الآلي للغشاء البلازمي للمستقبلات الآلية ينتج سيالات عصبية. تستجيب مستقبلات جلدية مختلفة للمس والضّغط والألم. بعض هذه المستقبلات هي نهايات عصبية معراة، وأخرى لها تراكيب داعمة. تُنبه القنوات الأيونية الآنية لجهد المستقبل عن طريق الحرارة والبرودة، فيزال استقطاب العصبون الْحسِّيّ. توجد هذه القنوات أيضًا في مستقبلات الحرارة في الجلد وفي مواقع أخرى. ترصد مستقبلات الحرارة هذه التغيرات في طاقة الحرارة، وتُنتج استجابات لاستعادة الاتزان الداخلي. ترصد المستقبلات الخاصة طول العضلة، فتمنع زيادة شدها. ومستقبلات الضّغط ترصد ضغط الدم ضمن الشرايين.

3-45 السّمع، والاهتزاز، ورصد وضع الجسم

يتـمّ رصد أمواج الصّـوت **أو السّمع Hearing** بصورة أفضـل في الماء منه في الهـواء؛ لأنّ المـاء ينقل أمواج الضّغـط بصورة أكثر كفاءة. وعلـى الرّغم من هذا القصور، فإنّ السّمع يُستخدمُ بشكل واسع من قِبَلِ حيوانات اليابسة لرصد بيئاتها، وللتواصـل مع أفـراد النـوع وتحرّي مصـادر الخطـر المحتملة. تنتقـل الْمنبِّهات الصوتيـة مسافـة أبعد وبسرعـة أكبر مـن الْمنبِّهـات الكيميائية. لكـن الْمنبِّهات السّمعيّة وحدها لا تقدم الكثير من المعلومات عن المسافات.

ينتج الصّوت من اهتزاز أو أمواج تنتقل خلال وسط ما كالماء أو الهواء. ويصبح رصد أمواج الصّوت ممكنًا من خلال عمل مستقبلات آلية متخصصة كانت قد تطورت أصلًا في المخلوقات المائية. وإن الخلايا ذات العلاقة برصد الصّوت ترتبط تطوريًّا بأنظمة الإحساس بالجاذبية التي سنناقشها في نهاية هذا الجزء.

يرصدُ نظام الخطّ الجانبيّ في الأسماك الاهتزازاتِ منخفضةَ التّردّد

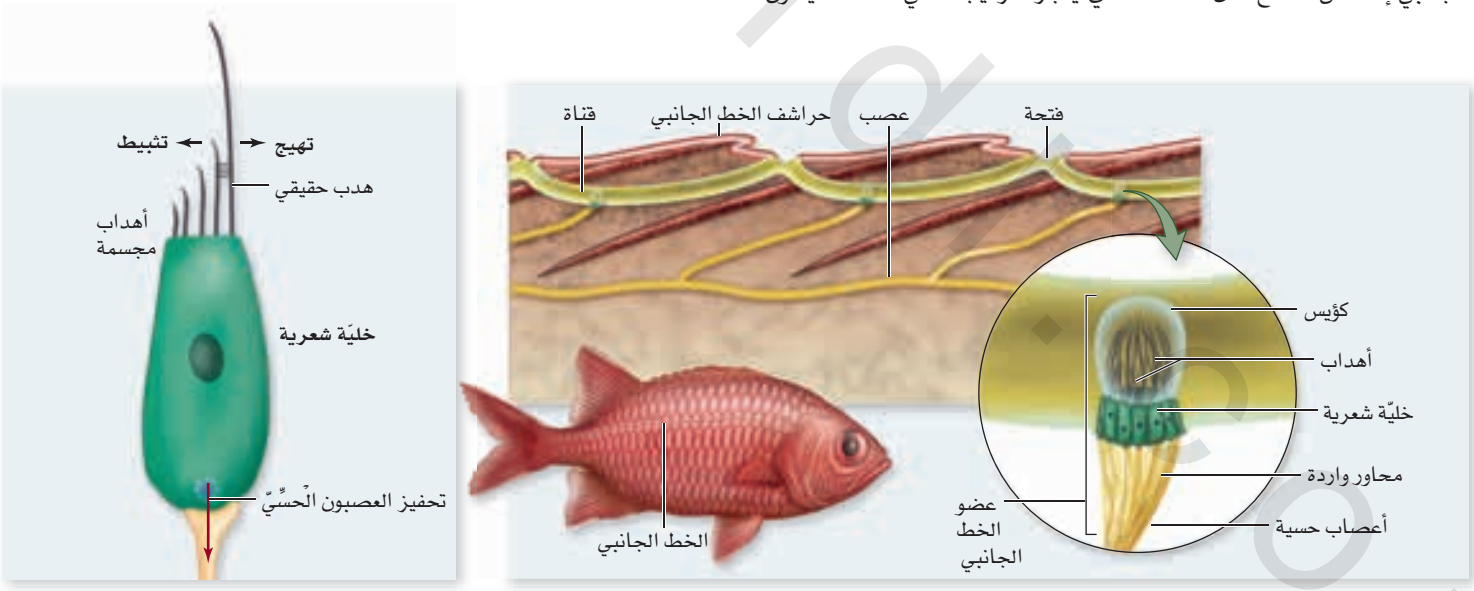
يقدم **نظام الخط الجانبي Lateral line system** في الأسماك، إضافة إلى السّمع، نوعًا من «اللّمس البعيد» فيمكنها من الإحساس بالأجسام التي تعكس أمواج الضّغط والاهتزازات منخفضة التردد. يمكّن هذا السمكةَ من رصد فريستها، ومن السباحة بتناغم مع بقية «قطيعها» مثلًا. ويمكّن سمكة الكهوف العمياء من الإحساس ببيئتها برصد التغيرات في نمط تدفق الماء الذي يمرّ على مستقبلات الخط الجانبي.

يوجد نظام الخط الجانبي في يرقات البرمائيات، ولكنه يُفْقَدُ في أثناء التّحوّل، وهو لا يوجد في أيّ من فقريات اليابسة. يكمل الإحساس الذي يقدمه نظام الخط الجانبي إحساس السّمع لدى السمكة الذي يُنجزه تركيبٌ حسيٌّ مختلف. يتكون نظام الخط الجانبي من خلايا شعرية ضمن قناة طولية موجودة في جلد السمكة، وتمتد على طول كلّ جانب من جانبي الجسم وضمن مجموعة قنوات في الرأس (الشكل 45-5أ). تمتد الزوائد السطحية للخلايا الشعرية إلى داخل غشاء جيلاتيني يُدعى الكؤيس *Cupula*. وتغذى الخلايا الشعرية بعصبونات حسية تنقل سيالات إلى الدّماغ.

الخلايا الشعرية لها زوائد عدة تشبه كلّ منها الشعرة، ولها تقريبًا الطول نفسه، تُدعى **الأهدابَ الصلبة المجسمة Sterocilia**، وإنّ لها زائدة واحدة أطول تُدعى **الهدبَ الحقيقيّ Kinocilium** (الشكل 45-5ب). الأهداب الصلبة المجسمة هي في الحقيقة خملات دقيقة تحتوي ألياف أكتين، أما الهدب الأطول فهو هدب حقيقي، ويحتوي أنيبيبات دقيقة. تنتقل الاهتزازات خلال بيئة السمكة، فتنتج حركةً في الكؤيس ما يسبب انثناء الزوائد. فعندما تنثني الزوائد في اتجاه الهدب الحقيقي، فإنّ الخليّة الحسّيّة تنبه، وتنتج جهدَ مستقبلٍ. نتيجة لذلك، فإنّ تكرار جهود الفعل الناتجة عن العصبون الْحسّيّ تزداد. في المقابل، إذا انثنت الأهداب المجسمة في الاتجاه المعاكس، فإنّ نشاط العصبون الْحسّيّ يتمّ تثبيطه.

تركيب الأذن متخصص في رصد الاهتزازات

يسمح تركيب الأذن بتحويل أمواج الصّوت إلى سيالات عصبية اعتمادًا على خلايا حسية آلية كتلك الموجودة في نظام الخط الجانبي. وسوف نناقش أولًا تركيب الأذن في الأسماك، الذي له علاقة بنظام الخط الجانبي الذي يرصد أمواج الضّغط في الماء. ثم سنناقش كيف يسمح تركيب أذن فقريات اليابسة برصد أمواج الضّغط في الهواء.

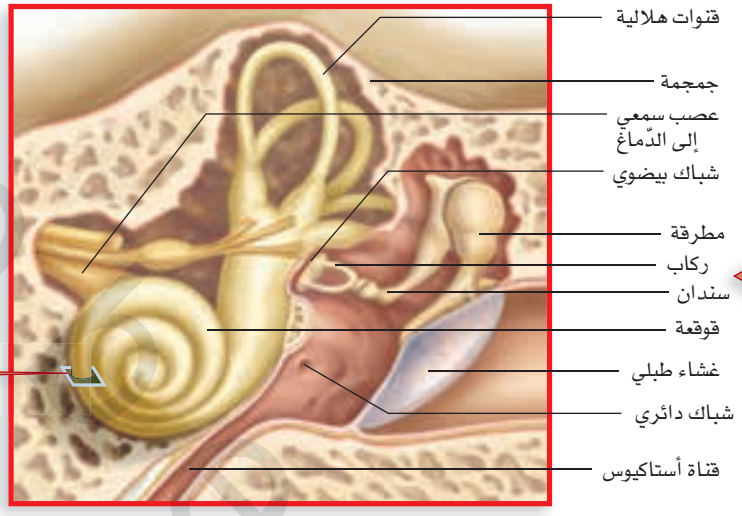


أ. ب.

الشكل 45-5

نظام الخط الجانبي. أ. يتكون هذا النظام من قنوات تمتد على طول جسم السمكة وتحت سطح جلدها. يوجد ضمن هذه القنوات تراكيب حسية تحتوي خلايا شعرية لها أهداب تبرز في الكؤيس الجيلاتيني. تنتقل أمواج الضّغط خلال الماء إلى داخل القنوات، فتسبب انثناءً في الأهداب، وإزالة استقطاب العصبونات الحسّيّة المرتبطة مع الخلايا الشعرية. ب. الخلايا الشعريةُ مستقبلاتٌ آليةٌ ذات أهداب تشبه الشعرة تندفع خلال غشاء جيلاتيني. تمتلك الخلايا الشعرية لنظام الخط الجانبي (والتيه الغشائي في أذن الْفقريّات الدّاخليّة) عددًا من أهداب أصغر تدعى الأهداب المجسمة، وهدبًا واحدًا أكبر يدعى الهدب الحقيقي. عندما تنثني الأهداب في اتجاه الهدب الحقيقي، تفرز الخليّة الشعرية ناقلًا كيميائيًّا يزيل استقطاب العصبون الْحسّيّ المرتبط بها. أما انثناء الأهداب في الاتجاه المعاكس فيعطي تأثيرًا مثبطًا.

أ.



ب.

الشكل 45-6

تركيب أذن الإنسان ووظيفتها. تركيب أذن الإنسان مبين في تكبيرات متلاحقة لتوضيح الأجزاء الوظيفية (أ-د). تمر أمواج الصّوت خلال قناة الأذن، فتنتج اهتزازًا في غشاء الطبلة ما يسبب حركة في عظيمات الأذن الوسطى (المطرقة والسندان والركاب) ضد غشاء داخلي (الشباك البيضوي). ينشئ هذا الاهتزاز أمواج ضغط في السائل الموجود في القنوات الدهليزية والطبلية بالقوقعة. تسبب أمواج الضّغط هذه انثناء أهداب الخلايا الشعرية ما يُنتج إشارات في العصبونات الحسّيّة.

تراكيب السّمع في الأسماك

تنتقل أمواج الصّوت خلال جسم السمكة بالسهولة نفسها التي تنتقل بها خلال الماء المحيط؛ وذلك لأنّ جسم السمكة مُكَوَّنٌ من الماء بشكل أساسي. ولكي يتم رصد الصّوت، فإننا نحتاج إلى جسم ذي كثافة مختلفة. في كثير من الأسماك، يقوم بهذه الوظيفة تركيب يدعى **حصى الأذن Otoliths** مُكَوَّنٌ من بلّورات كربونات الكالسيوم. يوجد حصى الأذن في عضو حصى الأذن في **التيه Labyrinth** الغشائي الذي هو نظام من حجرات وأنابيب مملوءة بالسائل، ويوجد في فقريات أخرى. عندما يهتز حصى الأذن فوق الخلايا الشعرية الموجودة في عضو حصى الأذن، تنتج جهود فعل. وتدعى **الخلايا الشعرية Hair cells** بهذا الاسم؛ لأن أهدابًا مجسمة تبرز من سطحها.

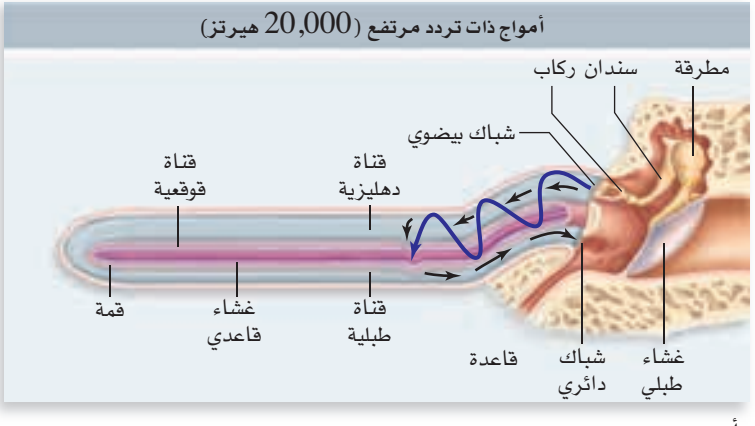
في أسماك القط، والمَنْوَه، والماصة، يقوم بهذه الوظيفة مثانة السباحة المملوءة بالهواء التي تهتز مع أمواج الصّوت. ثم تقوم سلسلة من عظام صغيرة تدعى عظيمات وبَر **Weberian ossicles** بنقل الاهتزازات إلى الخلايا الشعرية للتيه في بعض هذه الأسماك.

تراكيب السّمع في فقريات اليابسة

يمكن توجيه الاهتزازات في الهواء، في أذن فقريات اليابسة، خلال قناة الأذن نحو طبلة الأذن أو غشاء الطبلة. تشكل هذه التراكيب جزءًا من **الأذن الْخارجيّة Outer ear**. تسبب اهتزازات غشاء الطبلة حركة لثلاث عظام صغيرة (عظيمات) هي: **المطرقة Malleus والسّندان Incus والرّكاب Stapes**، وكلها موجودة في تجويف عظمي يُدعى **الأذن الوسطى Middle ear** (الشكل 45-6أ، ب). تناظر عظيمات الأذن الوسطى عظيمات وبَر في الأسماك.

تتصل الأذن الوسطى بالحنجرة عن طريق **أنبوب أستاكيوس Eustachian tube** الذي يدعى أيضًا أنبوب السّمع، وهو يساوي ضغط الهواء بين الأذن الوسطى والبيئة الْخارجيّة. ويمثل صوت حركة الهواء الذي نشعر به عند إقلاع الطائرة، أو عند القيادة صعودًا إلى قمة جبل مرتفع مساواة للضغط على جانبي طبلة الأذن.

يهتز الركاب فوق غشاء مرن هو الشباك البيضوي *Oval window* الذي يعود إلى **الأذن الدّاخليّة Inner ear**. وحيث إنّ الشباك البيضوي أصغر قطرًا من غشاء

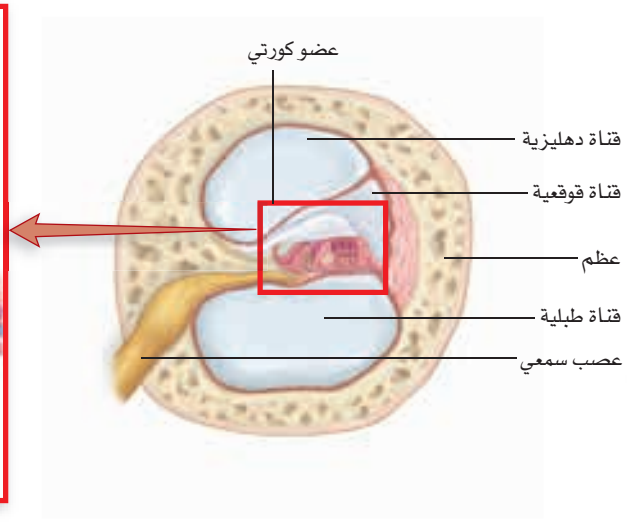


أ.

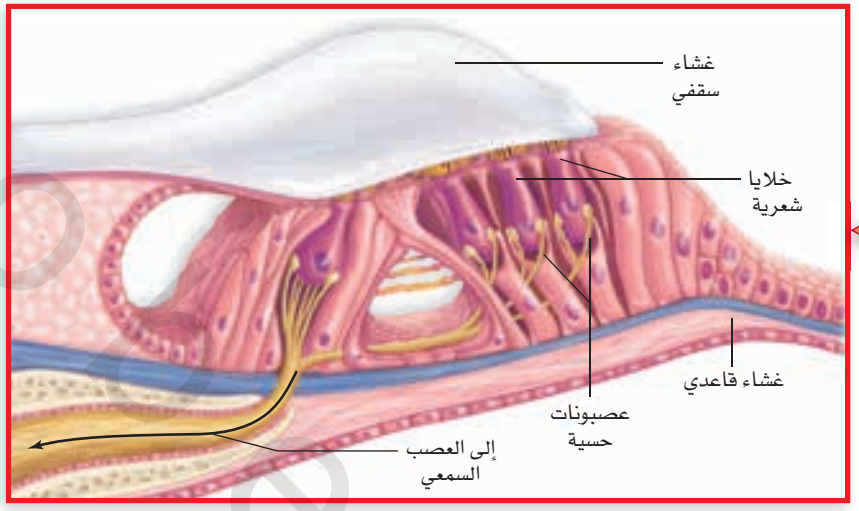
الشكل 45-7

تحديد موقع التردد في القوقعة. القوقعة مبينة هنا، وقد فُردت لفاتها، بحيث يُرى طول الغشاء القاعدي. تهتز الألياف ضمن الغشاء القاعدي استجابة للترددات المختلفة للصوت المرتبطة بحدة الصّوت. وهكذا، فإنّ المناطق المختلفة للغشاء القاعدي تبدي أقصى اهتزاز استجابة لترددات الصّوت المختلفة.

أ. لاحظ أن الأصوات ذات التردد (والحدة) المرتفع تسبب اهتزاز الغشاء القاعدي قريبًا من قاعدته، ولكن الترددات المتوسطة (ب) والترددات المنخفضة (ج) تسبب اهتزازًا أقرب إلى القمة.



جـ.



د.

الطبلة، فإنّ اهتزاز الركاب فوقه الذي ينتج قوة أكبر على وحدة المساحة، ينتقل إلى الأذن الدّاخليّة. تتألف الأذن الدّاخليّة من **قوقعة Cochlea** وهي تركيب يحتوي جزءًا من التيه الغشائي يدعى قناة القوقعة *Cochlear duct*. تقع قناة القوقعة في مركز القوقعة، والمساحة الواقعة فوق قناة القوقعة هي قناة الدهليز *Vestibular duct* أما المنطقة الواقعة تحتها فتدعى قناة الطبلة *Tympanic duct* (الشكل 45-6 جـ). تمتلئ الحجرات الثلاث بالسائل، ويفتح الشباك البيضوي في قناة الدهليز العليا، ولهذا فعندما يسبب الركاب تذبذب الشباك البيضوي، فإنه يُنتج أمواج ضغط في السائل. تنتقل أمواج الضّغط لتصل إلى قناة الطبلة، فتدفع غشاء مرنًا آخر هو الشباك الدائري *Round window* الذي يبثّ الضّغط ثانية في تجويف الأذن الوسطى.

يحدث تحويل الإشارة السمعية في القوقعة

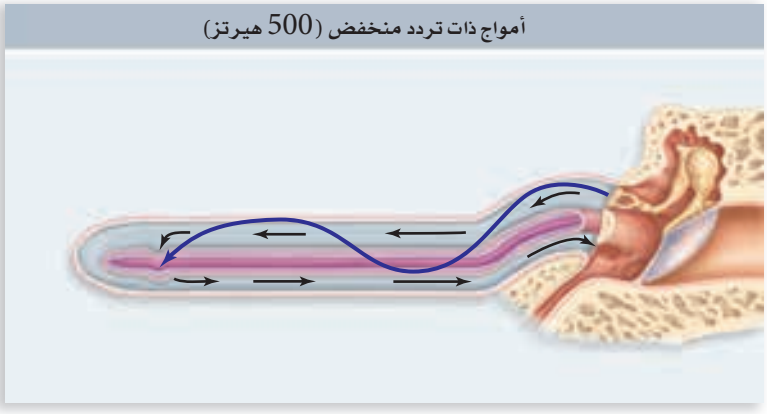
بينما تُبثّ أمواج الضّغط عبر القوقعة نحو الشباك الدائري، فإنها تسبب اهتزازًا في قناة القوقعة. تتشكل قاعدة قناة الطبلة من غشاء مرن جدًا يدعى الغشاءَ القاعديّ *Basilar membrane* الذي يهتز الآن استجابة لأمواج الضّغط هذه. يحتوي سطح الغشاء القاعدي على خلايا شعرية حسية. وتندفع الأهداب الصلبة المجسمة للخلايا الشعرية هذه في غشاء جيلاتيني عالق فوقها يُدعى الغشاءَ السقفي *Tectorial membrane*. يعرف هذا الجهاز الْحسِّيّ المكون من الغشاء القاعدي، والخلايا الشعرية، وما يرتبط بها من عصبونات حسية، والغشاء السقفي معًا **بعضو كورتي Organ of Corti** (الشكل 45-6د).

عندما يهتز الغشاء القاعدي، فإنّ أهداب الخلايا الشعرية تنثني استجابة لحركة الغشاء القاعدي بالنسبة إلى الغشاء السقفي. يسبب انثناءُ هذه الأهداب المجسمة في اتجاه ما إزالةَ استقطاب في الخلايا الشعرية، في حين يسبب انثناؤها في الاتجاه المعاكس إعادة استقطاب، وربما زيادة استقطاب الغشاء. تحفز الخلايا الشعرية بدورها إنتاج جهود فعل في العصبونات الحسّيّة التي تنقل نشاطها إلى الدّماغ، فيفسره على أنه أصوات.

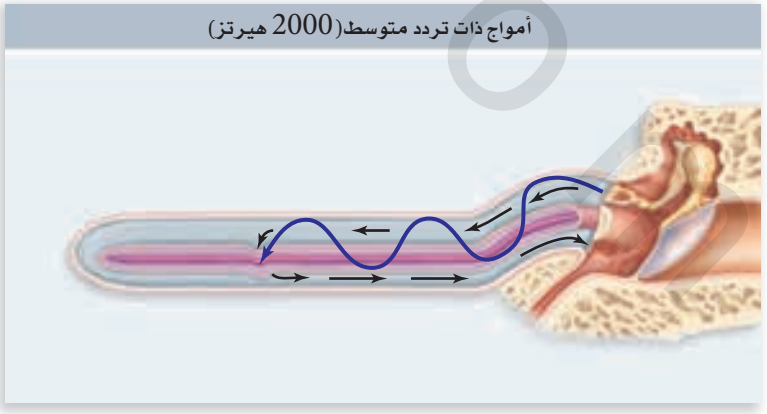
تحديد موقع تردد الأصوات في القوقعة

يتكون الغشاء القاعدي في القوقعة من ألياف مطاطية بدرجات متفاوتة من الطول والصلابة، فيشبه بذلك أوتار أداة موسيقية، تنغمر في مادة جيلاتينية. تكون الألياف عند قاعدة القوقعة (قرب الشباك البيضوي) قصيرةً وصلبةً، لكنها تكون عند الطرف البعيد للقوقعة (قمة القوقعة) أطول بخمس مرات، وأكثر مرونة بمئة مرة. لهذا، فإنّ تردد الرنين للغشاء القاعدي سيكون أعلى عند القاعدة مما هو عليه عند القمة، فالقاعدة تستجيب لأصوات ذات حدة أو تردد أعلى. أمّا القمة، فإنها تستجيب لأصوات منخفضة التردد.

عندما تدخل موجة من طاقة الصّوت إلى القوقعة من الشباك البيضوي، فإنها تبدأ حركة علوية وسفلية تنتقل على طول الغشاء القاعدي. تنقل هذه الموجة معظم طاقتها إلى الغشاء القاعدي في المنطقة التي يكون ترددها قريبًا من تردد أمواج الصّوت، ما ينتج أكبر إزاحة للغشاء القاعدي عند تلك النقطة (الشكل 45-7). نتيجة لذلك، فإنّ إزالة استقطاب الخليّة الشعرية هناك ستكون أعلى ما يمكن،



جـ.



ب.

وستُنبه المحاور الحسّيّة من تلك المنطقة أكثر من أيّ منطقة أخرى. وعندما تصل جهود الفعل هذه إلى الدّماغ، فإنها تُفَسَّرُ على أنها أصوات ذات تردد معين، أو ذات حدة معينة.

مدى السّمع في فقريات اليابسة

تحدد مرونة الغشاء القاعدي مدى تردد السّمع في الإنسان ليقع بين 20 و 20,000 موجة في الثانية (هيرتز) في الأطفال. وتتناقص قدرتنا على سماع الأصوات عالية التردد تدريجيًّا في وسط العمر. وتستطيع فقريات أخرى أنْ ترصد أصواتًا ذات تردد أقل من 20 هيرتز، وأعلى بكثير من 20,000 هيرتز. فالكلاب مثلًا، تستطيع رصد أصوات ترددها 40,000 هيرتز، ما يمكنها من سماع صوت صفارة الكلاب ذات التردد العالي، التي تبدو صامتة لأذن الإنسان، حيث لا يسمعها.

تُغذى الخلايا الشعرية أيضًا بمحاور صادرة إليها من الدّماغ، والسّيّالات القادمة في هذه المحاور تجعل الخلايا الشعرية أقل حساسية. تمكن هذه السيطرة المركزية لحساسية المستقبلات من زيادة قدرة الفرد على التركيز على إشارة صوتية معينة (صوت واحد مثلًا) في وسط خلفية صاخبة يتم طمسها بشكل فعال عن طريق محاور صادرة.

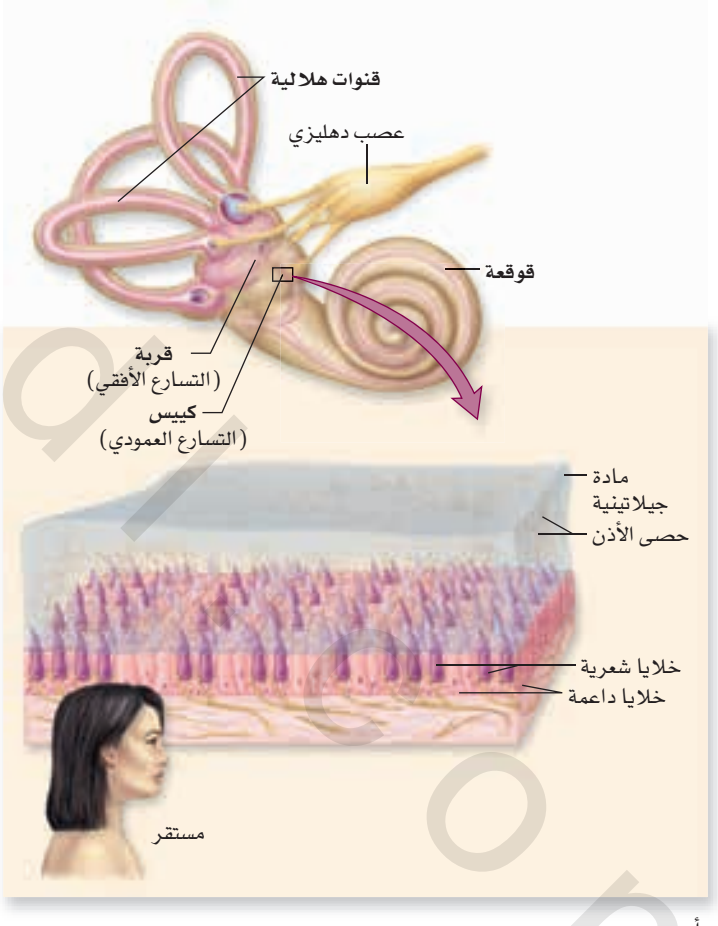
بعض الْفقريّات لديها القدرة على الملاحة عن طريق الصّوت

نظرًا لأنّ لفقريات اليابسة أذنين تقعان على جانبي الرأس، فإنّ المعلومات التي يقدمها السّمع يمكن أنْ تستخدم في تحديد اتجاه مصدر الصّوت بدرجة من الدقة. تختلف مصادر الصّوت في قوتها، وإنّ الأصوات تضعف وتنعكس بدرجات مختلفة بحسب الأجسام التي تعترضها في البيئة. لذا، فإنّ مجسات السّمع لا تشكل مقياسًا للمسافة يُعْتَمَدُ عليه.

تمكنت بعض مجموعات من الثدييات التي تعيش، وتحصل على غذائها في بيئة مظلمة من الإحاطة بنواحي القصور التي يشكلها الظلام. فالخفاش الذي يطير في غرفة مظلمة تمامًا يستطيع بسهولة أن يتجنب الاصطدام بالأشياء التي توضع في طريقة، حتى إن كانت سلكًا قطره أقل من مليمتر واحد. وتستخدم الزَّبَّابة شكلًا مماثلًا من «الرؤية دون ضوء» تحت الأرض، كما تفعل ذلك الحيتان والدلافين تحت الماء. هذه الثدييات جميعها قادرة على إدراك وجود الأشياء، وبُعدها باستخدام الصّوت.

ترسل هذه الثدييات أصواتًا، ومن ثم تقرر الزمن الذي تحتاج إليه هذه الأصوات لكي تصل إلى عائق ما، ثم تعود إلى الحيوان. وتُدعى هذه العمليةُ **تحديدَ الموقع بالصدى Echolocation**. فالخفاش يصدر طقطقة تستمر 2-3 مليثانية، ويكررها بضع مئات من المرات في الثانية الواحدة. تتحقق صورة ثلاثية الأبعاد بالغة التعقيد باستخدام هذا النظام الصّوتيّ السّمعيّ.

إنّ القدرة على الرؤية في الظلام فتحت أمام الخفاش موئلًا بيئيًّا كان مقتصرًا بشكل أساسي على الطّيور؛ لأن على الطّيور أن تعتمد على الرؤية. ليس هناك طيور ليلية المعيشة حقًّا، حتى البوم فهو يعتمد على الرؤية لكي يصطاد، وهو لا يستطيع الطيران في الليالي حالكة الظلمة.



أ.

ب.

الشكل 45-8

تركيب القربة والكييس ووظيفتهما. أ. المواقع النسبية للقربة والكييس ضمن التيه الغشائي للأذن الدّاخليّة للإنسان. يبين التكبير المادة الجيلاتينية التي تحتوي حصى الأذن، وتغطي الخلايا الشعرية. ب. عندما ينحني رأسك إلى الأمام، فإنّ الجاذبية تغير من شكل المادة الجيلاتينية وفي اتجاه الحركة. يجعل هذا الأهداب المجسمة في الخلايا الشعرية تنثني منبهة بذلك العصبونات الحسّيّة.

ولأنّ الخفاش قادر على النشاط والفعالية في الظلام الدامس، فإنه واحد من أكثر رتب الثدييات تعددًا وانتشارًا. إنّ اختراع الإنسان لنظام السونار (الملاحة وتحديد المدى عن طريق الصّوت) يعتمد على مبادئ تحديد الموقع بصدى الصّوت للملاحة تحت الماء وفي إيجاد مواقع الأجسام.

وضع الجسم وحركته ترصدها أجهزة مرتبطة بأجهزة السمع

سمحت الإستراتيجية التطورية المتمثلة في استخدام بلّورات كربونات كالسيوم داخليًّا بوصفها طريقة لرصد الاهتزازات، بتطور أعضاء الإحساس التي ترصد وضع الجسم في الفراغ وحركاته مثل التسارع.

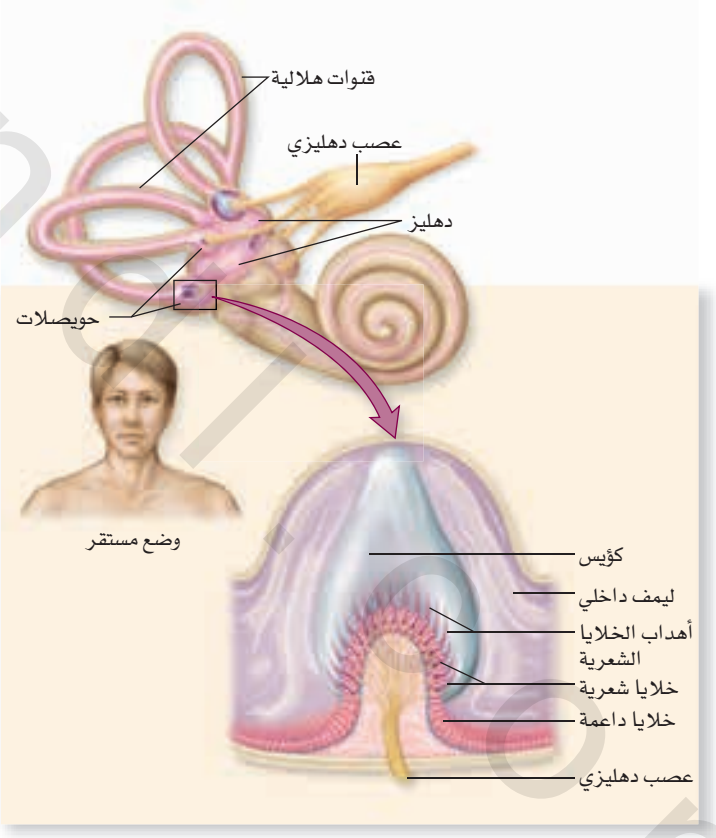
يمكن لمعظم اللافقريات توجيه نفسها بالنسبة إلى الجاذبية عن طريق تركيب يدعى **كيس التّوازن Statocyst**. يتكون كيس التّوازن بشكل عام من خلايا شعرية مدببة تنغمر أهدابها في غشاء جيلاتيني يحتوي بلّورات من كربونات الكالسيوم. هذه الحصى؛ **حصى التّوازن Statoliths**، تزيد كتلة الغشاء الجيلاتيني، بحيث يستطيع ثني الأهداب عندما يغير الحيوان وضعه. فإذا مال الحيوان نحو اليمين مثلًا، فإنّ الغشاء والحصى تثني الأهداب نحو اليمين، ويحفِّز بذلك العصبونات الحسّيّة ذات العلاقة.

يوجد تركيب مماثل في التيه الغشائي للأذن الدّاخليّة للفقريات. يحاط هذا التيه بعظم وبالليمف الخارجي الذي يشبه في تركيبه تركيب سائل الأنسجة. وعلى الرّغم من تعقيده، فإنّ التركيب بكامله في الإنسان صغير، ويصل إلى حجم حبة البازيلاء فقط.

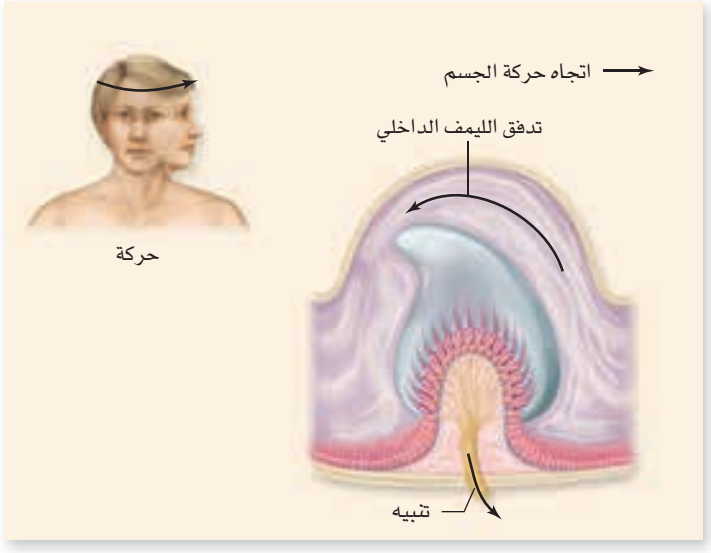
تركيب التيه والقنوات نصف الهلالية

تتكون مستقبلات الجاذبية في الفقريّات من حجرتين في التيه الغشائي تدعيان **القربة Utricle والكييس Saccule** (الشكل 45-8). في هذين التركيبين، خلايا شعرية ذات أهداب صلبة مجسمة وهدب حقيقي طويل شبيه بتلك الموجودة في نظام الخط الجانبي في الأسماك. وتنغمر الزوائد التي تشبه الشّعر ضمن غشاء جيلاتيني، هو غشاء الحصى الذي يحتوي بلّورات كربونات الكالسيوم. وحيث إنّ عضو حصى الأذن موجّه بشكل مختلف في القربة عنه في الكييس، فإنّ القربة أكثر حساسية للتسارع الأفقي (كما في سيارة متحركة) والكييس أكثر حساسية للتسارع العمودي (كما في مصعد كهربائي). في كلتا الحالتين يسبب التسارع انثناء الأهداب المجسمة، فينتج بالضرورة جهود فعل في العصبونات الحسّيّة ذات العلاقة.

يتصل التيه الغشائي في القربة والكييس مع ثلاث قنوات **نصف هلالية Semicircular canals** موجهة في مستويات مختلفة، بحيث ترصد التسارع الزاوي (الذي يحدث بزاوية معينة) في أيّ اتجاه (الشكل 45-9). يوجد في نهايات القنوات حجرات منتفخة تدعى حويصلات تبرز بها أهداب مجموعة أخرى من الخلايا الشعرية. تنغمر قمم الأهداب ضمن مادة جيلاتينية تشبه الشراع تدعى الكؤيس (يشبه الكؤيس في الخط الجانبي للأسماك) وتبرز في سائل الليمف الداخلي لكلّ قناة نصف هلالية.



أ.



ب.

الشكل 45-9

تركيب القنوات الهلالية. مواقع القنوات الهلالية بالنسبة إلى بقية الأذن الدّاخليّة. أ. تكبير لمقطع في إحدى الحويصلات، مبينا كيف تنغرز أهداب الخلايا الشعرية في الكؤيس. ب. التسارع الزاوي في مستوى القنوات الهلالية يسبب انثناء الكؤيس، فتنبه بذلك الخلايا الشعرية.

عمل الجهاز الدهليزي

عندما يدور الرأس، يندفع السائل داخل القنوات نصف الهلالية ضد الكؤيس، ويسبب انثناء في الأهداب. يسبب الانثناء إزالة استقطاب أو إعادة استقطاب للخلايا الشعرية بناءً على الاتجاه الذي تنثني به الأهداب. ويشبه هذا إلى حد كبير الطريقة التي يعمل بها نظام الخط الجانبي في الأسماك. فإذا انحنت الأهداب المجسمة في اتجاه الهدب الحقيقي، ينتج جهد مستقبل ينبه إنتاج جهود فعل في العصبونات الحسّيّة المتصلة. تُدعى القربةُ، والكييسُ، والقنواتُ الهلالية معًا **الجهازَ الدّهليزيّ Vestibular system**. يزودنا كلٌّ من الكييس والقربة بإحساس للتسارع الخطي. أمّا القنوات الهلالية، فتزودنا بإحساس للتسارع الزاوي. ويستخدم الدّماغ المعلومات القادمة من الجهاز الدهليزي عن وضع الجسم في الفراغ للمحافظة على التّوازن والاتزان.

تهتز عظيمات الأذن الوسطى استجابة لأمواج الصّوت ، فتُحدِث اهتزازًا في السائل داخل الأذن الدّاخليّة. يسبب هذا الاهتزاز انثناء الخلايا الشعرية ما يحوّل طاقة الصّوت إلى جهود فعل. الغشاء القاعدي أكثر استجابة للترددات المرتفعة عند قاعدته، وللترددات المنخفضة عند قمته، فيسمح بذلك بتمييز الأصوات ذات الترددات المختلفة. تستخدم بعضُ الثدييات كالخفاش الصّوت لمعرفة موقعها وموقع الأجسام الأخرى بطريقة تحديد الموقع بصدى الصّوت. ترصد الخلايا الشعرية في عضو الخط الجانبي في الأسماك حركات الماء. تعطي الخلايا الشعرية في الجهاز الدهليزي لفقريات اليابسة إحساسًا بالتسارع وبالتّوازن.

4-45 المستقبلات الكيميائية: الذّوق، والشّم، ودرجة الحموضة (درجة الرقم الهيدروجيني)

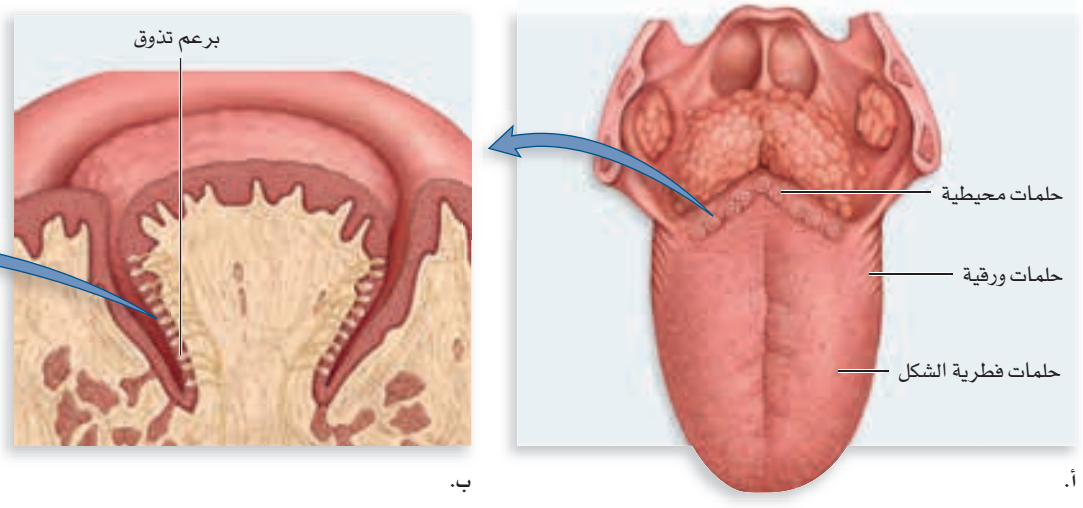
تحتوي بعضُ الخلايا الحسّيّة، التي تدعى المستقبلات الكيميائية، بروتيناتٍ غشائيةً تستطيع الارتباط بمواد كيميائية معينة، أو برابط في السائل خارج الخلايا. واستجابة لهذا التفاعل الكيميائي، فإنّ استقطاب غشاء العصبون الْحسّيّ يُزالُ، ويُنتج جهود فعل. تُستخدم المستقبلات الكيميائية في الإحساس بالتّذوّق وبالشّم، وإنها مهمة في رصد التركيب الكيميائي للدم وللسائل الدماغي الشوكي.

يرصدُ التّذوّق الغذاءَ المحتملَ ويحلّلُه

إنّ إدراكَ التّذوّق، مثله مثل إدراك اللون؛ مزيجٌ من عوامل فيزيائية ونفسية. ويقسم هذا بصورة عامة إلى خمس مجموعات: الحلو، والحامض، والمالح، والمرّ، والشهيّ *Umami* (إدراك طعم جلوتاميت، وأحماض أمينية أخرى). تتوسط براعم التّذوّق – وهي مجموعات من خلايا طلائية حساسة كيميائيًّا، وتتصل مع عصبونات حسية – حاسةَ الذّوق في الْفقريّات. في الأسماك تكون براعم التّذوّق مبعثرة فوق سطح الجسم، وهي أكثر المستقبلات الكيميائية المعروفة في الْفقريّات حساسية، فهي حساسة بشكل خاص للأحماض الأمينية، إذ إنها تستطيع أنْ تميز في سمكة القط مثلًا بين حمضين أمينيين مختلفين بتركيز أقل من 100 جزء في البليون (1 جرام، في 10,000 لتر من الماء) ! إن القدرة على تذوق الماء المحيط مهمة جدًا للأسماك التي تعيش على القعر، حيث يمكنها الإحساس بوجود الغذاء في بيئة ضبابية غالبًا.

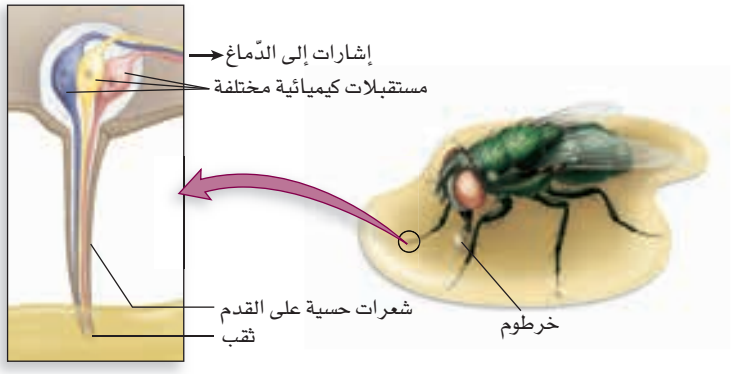
تقع براعم التّذوّق لفقريات اليابسة جميعها في طلائية اللسان والتجويف الفمي ضمن مناطق مرتفعة تدعى حلمات *Papillae* (الشكل 45 - 10). وبراعم التّذوّق هي تراكيب شكلها كالبصل، وتضم 50-100 خليّة تذوق، وكلّ خليّة لها نتوءات إصبعية تدعى خملات دقيقة تبرز من خلال فتحة عند قمة برعم التّذوّق تدعى ثقب التّذوّق *Taste pore* (الشكل 45-10 ج). تذوب المواد الكيميائية من الغذاء في اللعاب، وتصبح في تلامس مع خلايا التّذوّق عن طريق ثقب التّذوّق.

تعمل المواد الكيميائية التي تنتج طعمًا مالحًا وطعمًا حامضيًّا، ضمن براعم التّذوّق، مباشرة عبر قنوات أيونية. والنمط التذوقي المالح النموذجي يُعزى إلى أيونات Na^+ التي تنتشر عبر قنوات صوديوم إلى داخل الخلايا في الخلايا المستقبلة في براعم التّذوّق. يزيل دخول الصوديوم هذا استقطاب الغشاء، فيسبب تحرر الناقل العصبي من الخليّة المستقبلة ما يحفّز العصبون الْحسّيّ الذي يرسل سيالًا إلى الدّماغ. وتعمل الخلايا التي ترصد التّذوّق الحامضي بطريقة مماثلة فيما عدا أنها ترصد تركيز أيون هيدروجين (H^+). يرتبط التّذوّق الحامضي بزيادة تركيز البروتونات التي تستطيع أن تزيل استقطاب الغشاء عندما تنتشر خلال قنوات أيونية.



الشكل 45-10

التّذوّق. أ. يمتلك لسان الإنسان نتوءات تدعى حلمات تحمل براعم التّذوّق. تتموضع أنواع مختلفة من براعم التّذوّق على مناطق من اللسان. ب. تنغمر مجموعات من براعم التّذوّق ضمن الحلمة الواحدة. جـ. براعمُ التّذوّق المفردة مجموعاتٌ من المستقبلات الكيميائية ذات شكل بصلي، وتفتح نحو الفم عن طريق ثقب. د. صورة بالمجهر الضوئي لبراعم التّذوّق في إحدى الحلمات.

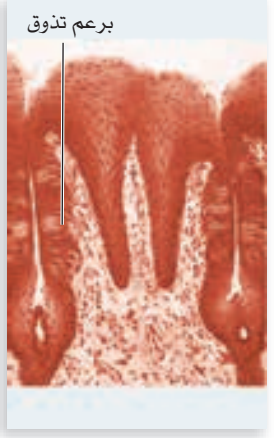


الشكل 45-11

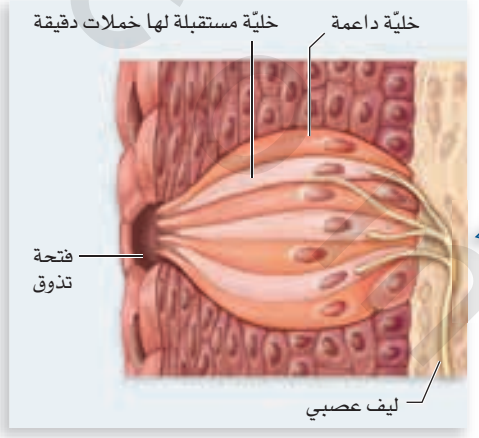
تتذوق كثير من الحشرات بأقدامها. في الذبابة السرؤ المبينة هنا، تمتد المستقبلات الكيميائية في الشعرات الحسّيّة على القدم. ترصد المستقبلات الكيميائية المختلفة الأنواع المختلفة من جزيئات الغذاء. وعندما تحط الذبابة على مادة غذائية، فإنها تستطيع تذوق جزيئات الغذاء المختلفة، ثم تمد خرطومها من أجل التغذية.

تكون آليةُ رصد التّذوّق الحلو، والمر، والشهي غيرَ مباشرة. في هذه الحالة تستطيع المواد التي تقع ضمن هذه المجموعات الارتباط بمستقبل مرتبط ببروتين G (الفصل الـ 9) يكون نوعيًّا لكلّ مجموعة. إنّ طبيعة هذه المستقبلات وتوزيعها تشكل مساحة واسعة للاستقصاء النشط، لكن البيانات الحديثة تشير إلى أنّ الخلايا المستقبلة المفردة في براعم التّذوّق تترجم نوعًا واحدًا فقط من المستقبل. يقود هذا إلى خلايا لها مستقبلات للحلو، أو للمر، أو للشهي. عندئذ، فإنّ تنشيط أيّ من هذه المستقبلات المرتبطة ببروتين G سيلتقي عند مسلك ترميز واحد يقود إلى تحرر ناقل عصبي من الخلايا المستقبلة لتنشيط عصبون حسي، وإرسال سيال إلى الدّماغ. هناك ستتفاعل هذه السّيّالات مع عصبونات حسية أخرى تحمل معلومات ذات علاقة بالرائحة (سنصفها لاحقًا). في هذا النموذج، فإنّ الأذواق المختلفة تُشفَّر إلى الدّماغ بناء على أيّ خليّة حسية جرى تحفيزها.

كثير من المفصليات لها مستقبلات كيميائية للتذوق كما للفقريات. فالذبابة مثلًا، وبسبب طريقة بحثها عن الطعام، لها مستقبلات تذوق في شعيرات حسية واقعة على أقدامها. تحتوي الشعيرات الحسّيّة تشكيلة من المستقبلات الكيميائية القادرة على تذوق السكر والملح، وغيرها بتكامل الْمنبِّهات من هذه المستقبلات الكيميائية (الشكل 45-11). فإذا ما وَطِئَتْ الذبابة على غذاء محتمل، فإنّ خرطومها (جهاز التغذية الأنبوبي) يمتد للتغذية.



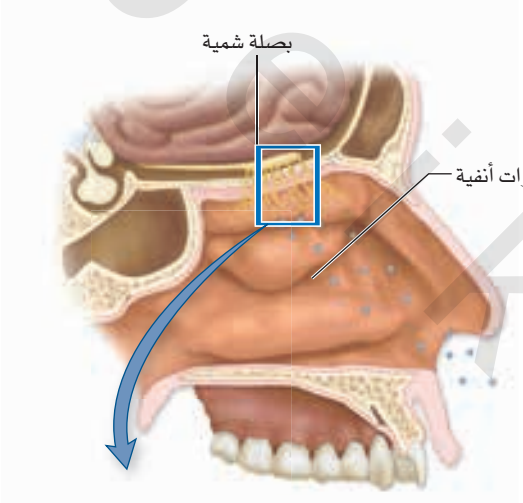
د.

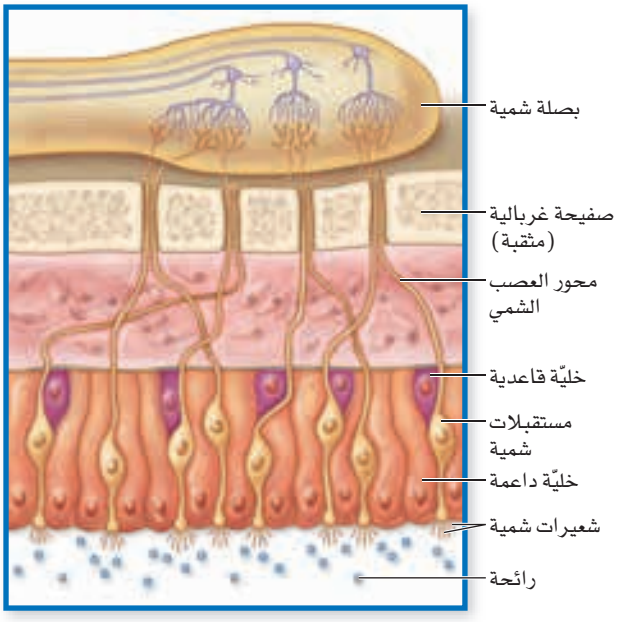


جـ.

يستطيع الشّم أن يتعرف عددًا كبيرًا من الجزيئات المعقدة

تضم **حاسة الشّم Smell (olfaction)** في فقريات اليابسة مستقبلات كيميائية واقعة في الجزء العلوي من الممرات الأنفية (الشكل 45-12). تبرز هذه المستقبلات، التي تنتهي زوائدها الشجرية بذؤابة من الأهداب، في مخاطية الأنف، وتنتهي محاورها مباشرة في القشرة المخية. تستعمل فقريات اليابسة حاسة الشّم بالطريقة نفسها التي تستخدم بها الأسماك حاسة التّذوّق، أيّ لفحص عينات من البيئة الكيميائية حولها.





الشكل 45-12

الشّم. يرصد الإنسان الروائح عن طريق عصبونات شمية (خلايا مستقبلة) تقع في بطانة الممرات الأنفية. تنقل محاور هذه العصبونات سيالات مباشرة إلى الدّماغ عبر العصب الشمي. تجدد الخلايا القاعدية عصبونات شمية جديدة لتحل محل الخلايا الميتة أو المتهتكة. تعيش العصبونات الشمية نحو شهر واحد بصورة نموذجية.

وحيث إنّ فقريات اليابسة محاطة بالهواء، فإنّ حاسة الشّم لديها أصبحت متخصصة في رصد الدقائق المحمولة بالهواء، لكن هذه الدقائق يجب أنْ تذوب أولًا في السائل خارج الخلايا قبل أنْ تحفز مستقبلات الشّم. يمكن أنْ تكون حاسة الشّم حادة في كثير من الثدييات لدرجة أن جزيئًا واحدًا من المادة الكيميائية هو كلّ ما تحتاج إليه لتحفيز المستقبل.

وعلى الرّغم من أنّ الإنسان يستطيع رصد أربعة أنماط من التّذوّق، فإنه يستطيع أنْ يميز آلافًا من الروائح المختلفة. وتشير البحوث الحديثة إلى وجود نحو 1000 جين مختلف قد يشفّر كلّ منها بروتينًا مستقبلًا مختلفًا للشم. أما مجموعة العصبونات الشّمية المحدودة التي تستجيب لرائحة معينة، فإنها قد تعمل «كبصمة إصبع» يستخدمها الدّماغ للتعرف إلى المادة.

ترصد المستقبلات الكيميائية الدّاخليّة درجة الحموضة (pH) وخصائص أخرى

ترصد المستقبلاتُ الحسّيّة ضمن الجسم تشكيلةً من الخصائص الكيميائية للدم أو للسوائل المشتقة منه، بما في ذلك السائل الدماغي الشوكي. من هذه المستقبلات، **المستقبلات الكيميائية الْخارجيّة** (المحيطية) **Peripheral chemoreceptors** الموجودة في الأجسام الأبهرية والسباتية التي تكون حساسة بشكل أساسي لدرجة حموضة البلازما، **والمستقبلات الكيميائية المركزية Central chemoreceptors** الموجودة في النخاع المستطيل في الدّماغ التي هي حساسة لدرجة حموضة السائل الدماغي الشوكي. عندما يكون معدل التنفس منخفضًا يزداد تركيز ثاني أكسيد الكربون في البلازما منتجًا المزيد من حمض الكربونيك ومسببًا انخفاضًا في درجة حموضة الدم. يستطيع ثاني أكسيد الكربون أنْ يدخل السائل الدماغي الشوكي، ويخفض درجة الحموضة، وبذا ينبه المستقبلات المركزية. يؤثّر هذا التنبيه بشكل غير مباشر في مركز السيطرة التنفسي الموجود في جذع الدّماغ، ما يسبب زيادة معدل التنفس. تستطيع الأجسام الأبهرية أيضًا أنْ تستجيب لانخفاض تركيز أكسجين الدم، لكن هذا التأثير لا يكون عادة مهمًّا ما لم يصعد الفرد إلى ارتفاعات شاهقة، حيث يكون الضّغط الجزئي للأكسجين منخفضًا.

المستقبلات التي ترصد المواد الكيميائية التي تأتي من خارج الجسم مسؤولة عن حاستي التّذوّق والشّم. تساعد المستقبلات الكيميائية الدّاخليّة على رصد المواد الكيميائية، وبشكل خاص توازن الأحماض داخل الجسم، وهي مطلوبة لتنظيم التنفس.

5-45 الرؤيـة

إنّ القدرة على إدراك الأجسام من على بُعد مهمة لمعظم الحيوانات. فالمفترس يحدد موقع الفريسة، والفريسة تتجنب المفترس اعتمادًا على طرق الإحساس عن بعد الثلاث: السّمع والشّم والإبصار. يستطيع الإبصار، من بين هذه الطرق، أنْ يعمل عن بعد كبير، فبالعين المجردة يستطيع الإنسان رؤية النجوم من على بُعد آلاف السنوات الضوئية، ويكفي فوتون واحد لتنبيه خليّة في الشبكية لتعطي جهد فعل.

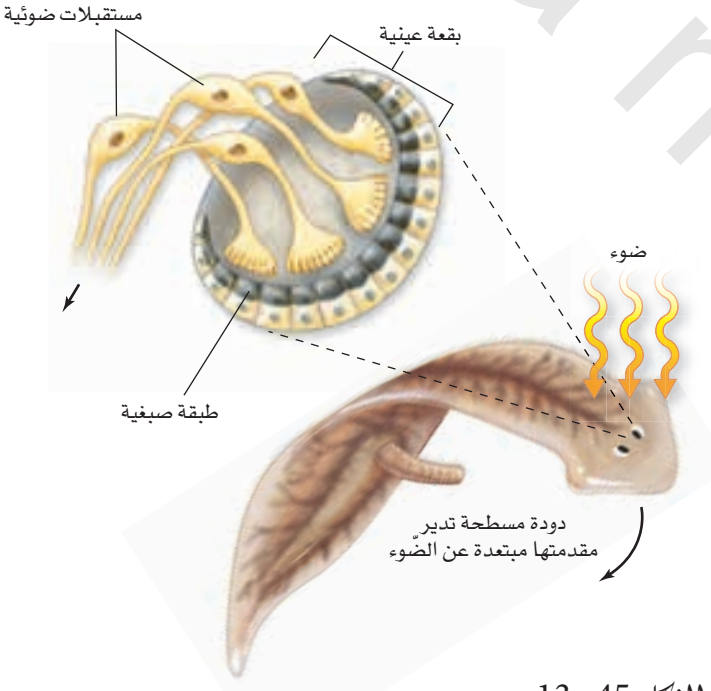
ترصد الرؤية الضّوء وتغيراته من على بُعد

تبدأ **الرؤية Vision** باقتناص طاقة الضّوء عن طريق **مستقبلات ضوئية Photoreceptors**. وحيث إنّ الضّوء ينتقل في خطوط مستقيمة، ويصل إلى مسافات على الأرض آنيًا تقريبًا، فإنّ المعلومات البصرية يمكن أنْ تُستخدم لتحديد اتجاه جسم ما وبُعْدِه. ولا يوجد منبه آخر يقدم لنا معلومات أكثر تفصيلًا.

عيون اللافقريات

تمتلك كثير من اللافقريات أنظمة رؤية بسيطة، حيث تتجمع المستقبلات الضوئية في بقعة عينية. البقع العينية البسيطة يمكن أنْ تصبح حساسة لاتجاه مصدر الضّوء بإضافة طبقة من الصبغة تظلل أحد جانبي العين.

فالديدان المسطحة لها طبقة ذات صبغة، وتعمل كستارة على الجوانب الدّاخليّة والخلفية من كلتا البقعتين العينيتين لها، ما يسمح بتنبيه الخلايا المستقبلة للضوء القادم من أمام الحيوان (الشكل 45-13). والدودة المسطحة تستدير، وتسبح في الاتجاه الذي تكون فيه مستقبلات الضّوء أقل تنبيهًا. وعلى الرّغم من أنّ البقعة العينية تدرك اتجاه الضّوء، لكنها لا تستطيع أنْ تُكوِّنَ صورة بصرية.



الشكل 45-13

البقع العينية البسيطة في الديدان المسطحة. ترصد البقع العينية اتجاه الضّوء؛ لأن الطبقة الصبغية على أحد جانبي البقعة العينية تحجب الضّوء القادم من خلف الحيوان. ولهذا فإنّ الضّوء يرصد بدقة أكثر إذا ما جاء من أمام الحيوان، تستجيب الدودة المسطحة بالاستدارة بعيدًا عن مصدر الضّوء.

الشكل 45-14

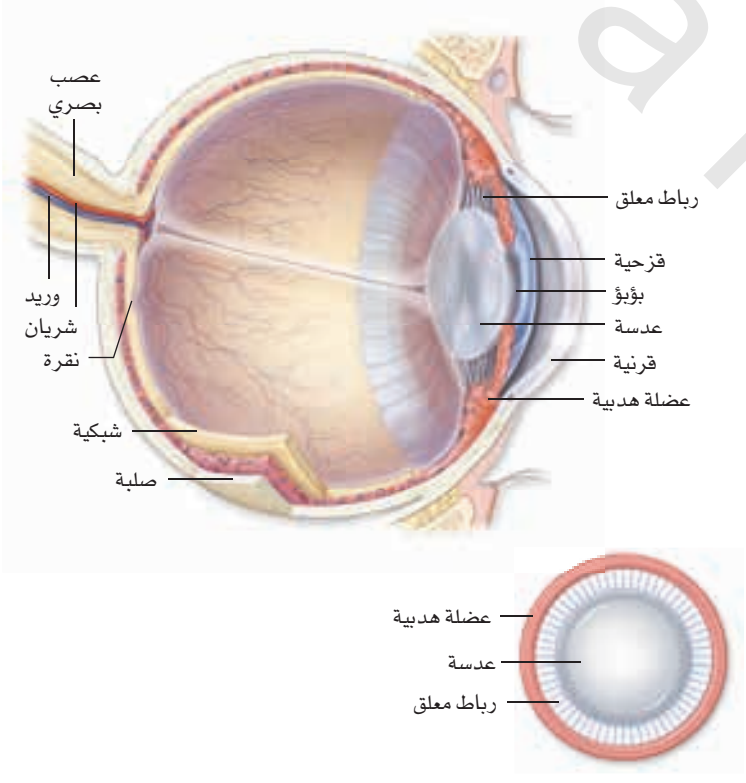
العيون في ثلاث قبائل من الحيوانات. على الرّغم من أنها تتشابه ظاهريًّا، إلاّ أنّ هذه العيون تختلف كثيرًا في تركيبها، وهي غير متماثلة. لقد تطور كلّ منها بشكل منفصل على الرّغم من التعقيد التركيبي الظاهري، وقد تمّ هذا التّطوّر من تراكيب أبسط.

أفراد القبائل الأربع: الحلقيّات، والرّخويّات، والمفصليّات، والحبليّات طورت عيونًا قادرة على تكوين صور بصرية. وعلى الرّغم من التشابه المدهش في التركيب، فإنه يُعتقد أنّ العيون التي تُكَوِّنُ صورًا في هذه القبائل تطورت بشكل مستقل، وهذا مثال على التطور الالتقائي (الشكل 45-14). ومن المثير للاهتمام أنْ نجد المستقبلات الضوئية لهذه العيون المكونة للصور جميعًا تستخدم الجزيء نفسه القادر على اقتناص الضّوء ما يقترح أنه لا يوجد الكثير من الجزيئات البديلة لتؤدي هذا الدور.

تركيب عين الْفقريّات

تُعدّ عين الإنسان مثالًا نموذجيًّا لعيون الْفقريّات (الشكل 45-15). فبياض العين هو الصلبة **Sclera** المكونة من نسيج ضام صلب. يدخل الضّوء إلى العين من خلال القرنية **Cornea** الشفافة التي تبدأ بتجميع الضّوء. يحدث تجميع الضّوء بسبب انكساره عندما ينتقل إلى وسط مختلف الكثافة. الجزء الملون من العين هو **القزحية Iris**، ويؤدي انقباض عضلات القزحية في الضّوء الساطع إلى تقليل حجم فتحتها، أيّ البؤبؤ. يمر الضّوء خلال البؤبؤ إلى **العدسة Lens** وهي تركيب شفاف يكمل عملية تجميع الضّوء وتركيزه في بؤرة على الشبكية الواقعة عند مؤخرة العين. ترتبط العدسة عن طريق رباط معلق *Suspensory ligament* إلى العضلات الهدبية.

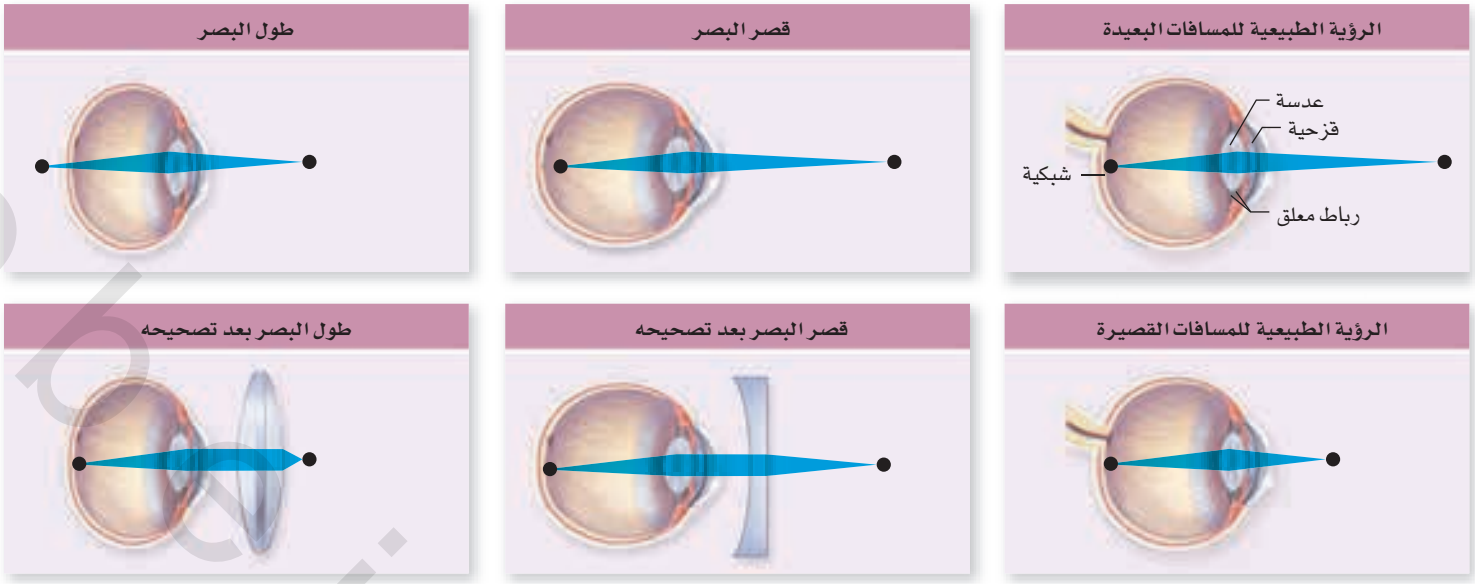
يتأثّر شكل العدسة بكمية التّوتّر في الرّباط المعلّق الذي يحيط بالعدسة، ويعلقها بالعضلة الهدبية الدائرية. عندما تتقلص العضلة الهدبية، فإنها ترخي الرباط المعلق، وتصبح العدسة أكثر استدارة وتكورًا، وتكسر الضّوء بقوة أكبر، وهذا التّكَوُّر مطلوب لرؤية الأشياء القريبة. ولرؤية الأشياء البعيدة، تنبسط العضلات الهدبية، وتبتعد عن العدسة، فتشد بذلك الرباط المعلق. وهكذا تصبح العدسة أكثر تفلطحًا وانبساطًا، فتكسر الضّوء بدرجة أقل. وعليه، تحافظ على الصورة مركزة على الشبكية. والأشخاص الذين هم قصيرو النظر، أو طويلو النظر، لا يستطيعون



الشكل 45-15

تركيب عين الإنسان. تُرَكِّزُ القرنيةُ الشفافةُ والعدسةُ الضّوء على الشبكية الموجودة في مؤخرة العين، وتحتوي المستقبلات الضّوئيّة (الْمِصِيّ والمخاريط). يتم تركيز منتصف الحقل البصري لكلّ عين في النقرة. يتم تركيز الضّوء وتبئيره عن طريق انقباض العضلة الهدبية وانبساطها، حيث تضبط، وتعدل درجة تكوّر العدسة.

openkandil.com



الشكل 45-16

التبئير في عين الإنسان. أ. في الأشخاص ذوي الرؤية الطبيعية، تبقى الصورة مركزة (مبؤرة) عند النظر إلى أجسام قريبة أو بعيدة بسبب التغيرات التي تحدث في درجة تَكَوُّرِ العدسة. فعندما يقف شخص ذو بصر طبيعي على بعد 20 قدمًا أو أكثر من جسم ما، فإنّ العدسة تكون في أقل درجة من التَّحَدُّبِ، وتُركز الصورة على الشبكية. ب. في الأشخاص قصيري النظر، يتم تركيز الصورة أمام الشبكية؛ ولهذا تظهر الصورة مشوشة. جـ. في الأشخاص طويلي النظر تكون الصورة مركزة خلف الشبكية؛ لأن المسافة بين العدسة والشبكية قصيرة جدًا. تقوم عدسات بضبط زاوية دخول الضّوء إلى العين، ما يركزه على الشبكية تمامًا.

تركيز (تبئير) الصورة على الشبكية (الشكل 45-16). ومن المثير للاهتمام أنّ عدسة البرمائيات أو الأسماك لا تغير شكلها، فهذه الحيوانات في المقابل تركز الصور، وتوضحها بتحريك العدسة إلى الأمام أو إلى الخلف تمامًا كما تفعل عند استخدام الكاميرا.

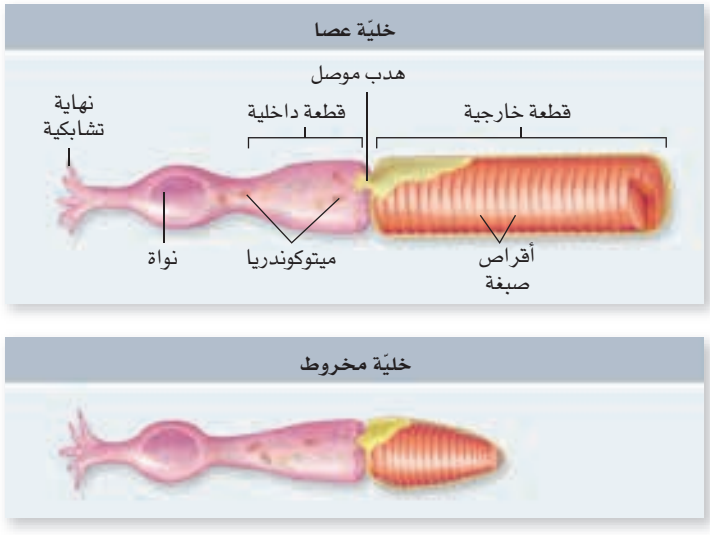
مستقبلات الضوء في الْفقريّات هي خلايا الْعِصيّ وخلايا المخاريط

تحتوي شبكية الْفقريّات نوعين من خلايا المستقبلات الضوئية هما: الْعِصيّ والمخاريط (الشكل 45 - 17). **والْعِصيّ Rods** التي استمدت اسمها من شكل قطعتها الْخارجيّة مسؤولة عن الرؤية البيضاء والسوداء عندما تكون الإضاءة منخفضة. في المقابل، فإنّ **المخاريط Cones** مسؤولة عن حدة الإبصار العالية وعن رؤية الألوان، ولها قطعة خارجية مخروطية الشكل. لدى الإنسان نحو 100 مليون من خلايا الْعِصيّ، ونحو 3 ملايين من المخاريط في كلّ شبكية. تتركز معظم المخاريط في المنطقة المركزية من الشبكية المسماة **الحفرة Fovea** حيث تشكل العيون الصور الأكثر وضوحًا للأجسام. وتخلو النقرة تقريبًا تمامًا من الْعِصيّ.

تركيب الْعِصيّ والمخاريط

للعصي والمخاريط التركيب الخلوي الأساسي نفسه. فهناك قطعة داخلية غنية بالميتوكوندريا، وتحتوي حويصلات عدة مملوءة بجزئيات الناقل العصبي. وهذه القطعة تتصل عن طريق عنق إلى قطعة خارجية مملوءة بمئات من أقراص مسطحة مكدسة واحدها فوق الآخر. وتقع الجزئيات القابضة للضوء أو الصبغات الضوئية على أغشية هذه الأقراص (انظر الشكل 45-17).

تُدعى الصبغة الضوئية في خلايا الْعِصيّ **رودوبسين Rhodopsin** وهي تتكون من بروتين أوبسين مرتبط به جزيء من *Cis- retinal* وهو ينتج من فيتامين أ (A). يشتق فيتامين أ من الكاروتين، وهو صبغة للتمثيل الضوئي في النباتات. تُدعى الصبغات الضوئية للمخاريط **فوتوبسين Photopsins** وهي شبيهة جدًا من ناحية تركيبة برودوبسين. يمتلك الإنسان ثلاثة أنواع من المخاريط، كلّ منها



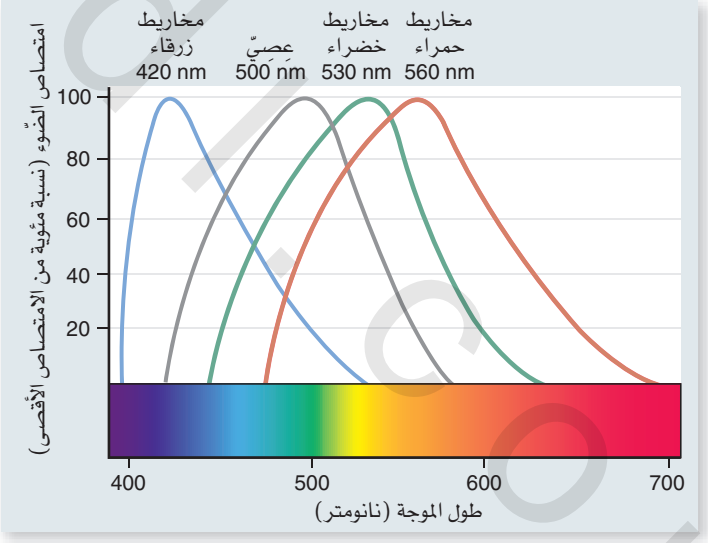
الشكل 45-17

الْعِصيّ والمخاريط. تكون القطعة الْخارجيّة المحتوية على الصبغة لكلّ من هذه الخلايا مفصولة عن بقية الخليّة بحاجز يخترقه ممر ضيق فقط يُدعى الهدبَ الموصل.

يمتلك صبغة فوتوبسين مكونة من رتنال مرتبط ببروتين له تعاقب مختلف قليلًا من الأحماض الأمينية. تغير هذه الاختلافات البسيطة الامتصاص الأقصى للصبغة، أيّ تلك المنطقة من الطيف الكهرومغناطيسي التي تمتصها الصبغة بأقصى درجة (الشكل 45 - 18). فالامتصاص الأقصى لرتنال في رودوبسين هو عند 500 نانومترٍ، وفي المقابل، فالامتصاص الأقصى لصبغات الأنواع الثلاثة من المخاريط هو: 420 نانومترًا (الممتص للأزرق)، 530 نانومترًا (الممتص للأخضر)، 560 نانومترًا (الممتص للأحمر). هذه الاختلافات في خصائص امتصاص الضّوء من قبل الصبغات الضوئية مسؤولة عن الحساسية المختلفة للألوان في الأنواع الثلاثة من المخاريط، التي يشار إليها غالبًا ببساطة بأنها مخاريط زرقاء، وخضراء، وحمراء.

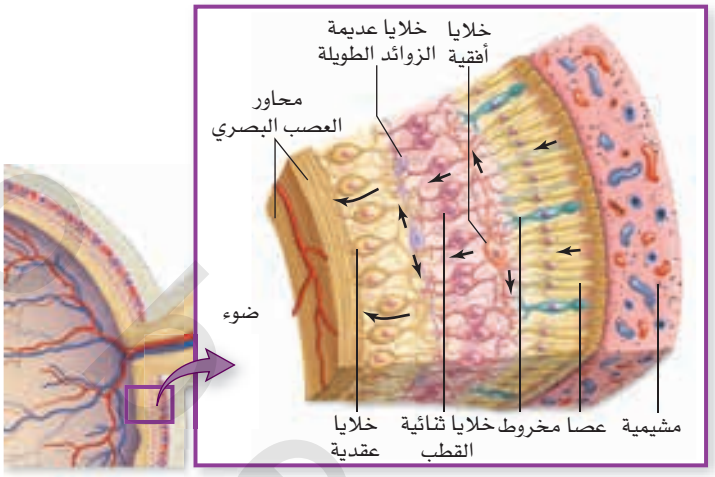
السطح الداخلي للعين، أيّ **الشبكية Retina**، مكون من ثلاث طبقات من الخلايا (الشكل 45-19): وتتألف الطبقة الأقرب إلى السطح الخارجي لكرة العين من الْعِصِيّ والمخاريط، وتحتوي الطبقة التي تليها **الخلايا ثنائية القطب Bipolar cells**، أما الطبقة الأقرب إلى تجويف العين فَمُكَوَّنَة من **خلايا عُقدية Ganglion cells**. لهذا، فإنّ الضّوء يجب أنْ يمرّ أولًا عبر الخلايا العقدية والخلايا ثنائية القطب، من أجل الوصول إلى المستقبلات الضوئية. تتشابك الْعِصِيّ والمخاريط مع الخلايا ثنائية القطب، وهذه بدورها تصنع تشابكًا عصبيًّا مع الخلايا العقدية التي تنقل السّيّالات إلى الدّماغ عبر العصب البصري. الخلايا العقدية هي العصبونات الوحيدة في الشبكية القادرة على إرسال جهود فعل إلى الدّماغ. ولهذا، فإنّ تَدَفُّقَ المعلومات الحسّيّة في الشبكية معاكسٌ لمسار الضّوء خلال الشبكية.

تحتوي الشبكية نوعين إضافيين من العصبونات هما: الخلايا الأفقية *Horizontal cells* والخلايا عديمة الزوائد الطويلة *Amacrine cells*. يمكن أنْ يؤدي تنبيه الخلايا الأفقية عن طريق المستقبلات الضوئية الموجودة عند مركز بقعة ضوء إلى تثبيط استجابة المستقبلات الضوئية الواقعة عند محيط هذا المركز. هذا التثبيط الجانبي يُحَسِّنُ من تضارب الصورة ودرجة وضوحها.



الشكل 45-18

رؤية الألوان. الامتصاص الأقصى لرتنال في صبغة رودوبسين في الْعِصِيّ هو 500 نانومترٍ. امتصاص المخاريط الزرقاء الأقصى للضوء 420 نانومترًا، أمّا امتصاص المخاريط الخضراء الأقصى للضوء فهو 530 نانومترًا، في حين امتصاص المخاريط الحمراء 560 نانومترًا. يدرك الدّماغ الألوان الأخرى جميعها من النشاط المشترك لهذه المخاريط الثلاثة.



الشكل 45-19

تركيب الشبكية. لاحظ أن الْعِصِيّ والمخاريط تقع في مؤخرة الشبكية، وليس في مقدمتها. يمر الضّوء خلال أربعة أنواع أخرى من الخلايا (العقدية، وعديمة الزوائد الطويلة، وثنائية القطب، والأفقية) في الشبكية قبل أن يصل إلى الْعِصِيّ والمخاريط. عندما تحفّز المستقبلات الضّوئيّة، فإنها تنبّه الخلايا ثنائية القطب التي تنبّه بدورها الخلايا العقدية. لهذا، فإنّ تدفقَ المعلومات الحسّيّة في الشبكية معاكسٌ لاتجاه مرور الضّوء.

تمتلك معظم الْفقريّات، خاصة تلك النهارية منها (التي تنشط خلال النهار) رؤية للألوان، كما هو حال كثير من الحشرات. ويستطيع نحل العسل أنْ يرى الضّوء في مدى قرب اللون فوق البنفسجي الذي لا يكون مرئيًّا لدى عين الإنسان. تتطلب رؤية الألوان وجود أكثر من صبغة ضوئية واحدة في خلايا المستقبلات الضوئية المختلفة، لكن ليس للحيوانات جميعها التي ترى الألوان نظام المخاريط الثلاثي المميز للإنسان ولرئيسيات أخرى. فالأسماك والسلاحف والطّيور مثلًا، لها أربعة أو خمسة أنواع من المخاريط، والمخاريط «الإضافية» هذه تمكنها من الرؤية قرب اللون فوق البنفسجي. وكثير من الثّدييّات كالسنجاب مثلًا، لها نوعان من المخاريط فقط.

تحويل الإشارة الحسّيّة في المستقبلات الضوئية

يتبع تحويل طاقة الضّوء إلى سيالات عصبية تسلسلًا يعاكس الطريقة العادية التي يتمّ بها رصد الْمنبّهات الحسّيّة. ففي الظلام تُحَرِّرُ خلايا المستقبلات الضوئية ناقلًا عصبيًّا مثبطًا يزيد استقطاب العصبونات ثنائية القطب. يمنع هذا العصبونات ثنائية القطب من تحرير ناقلها العصبي المهيج نحو الخلايا العقدية التي ترسل الإشارات إلى الدّماغ. أما بوجود الضّوء، فتتوقف خلايا المستقبلات الضوئية عن إطلاق الناقل العصبي المثبط، ما يؤدي بالنتيجة إلى تنبيه الخلايا ثنائية القطب. وتنبه الخلايا ثنائية القطب بدورها الخلايا العقدية، فتنقل جهود فعل إلى الدّماغ.

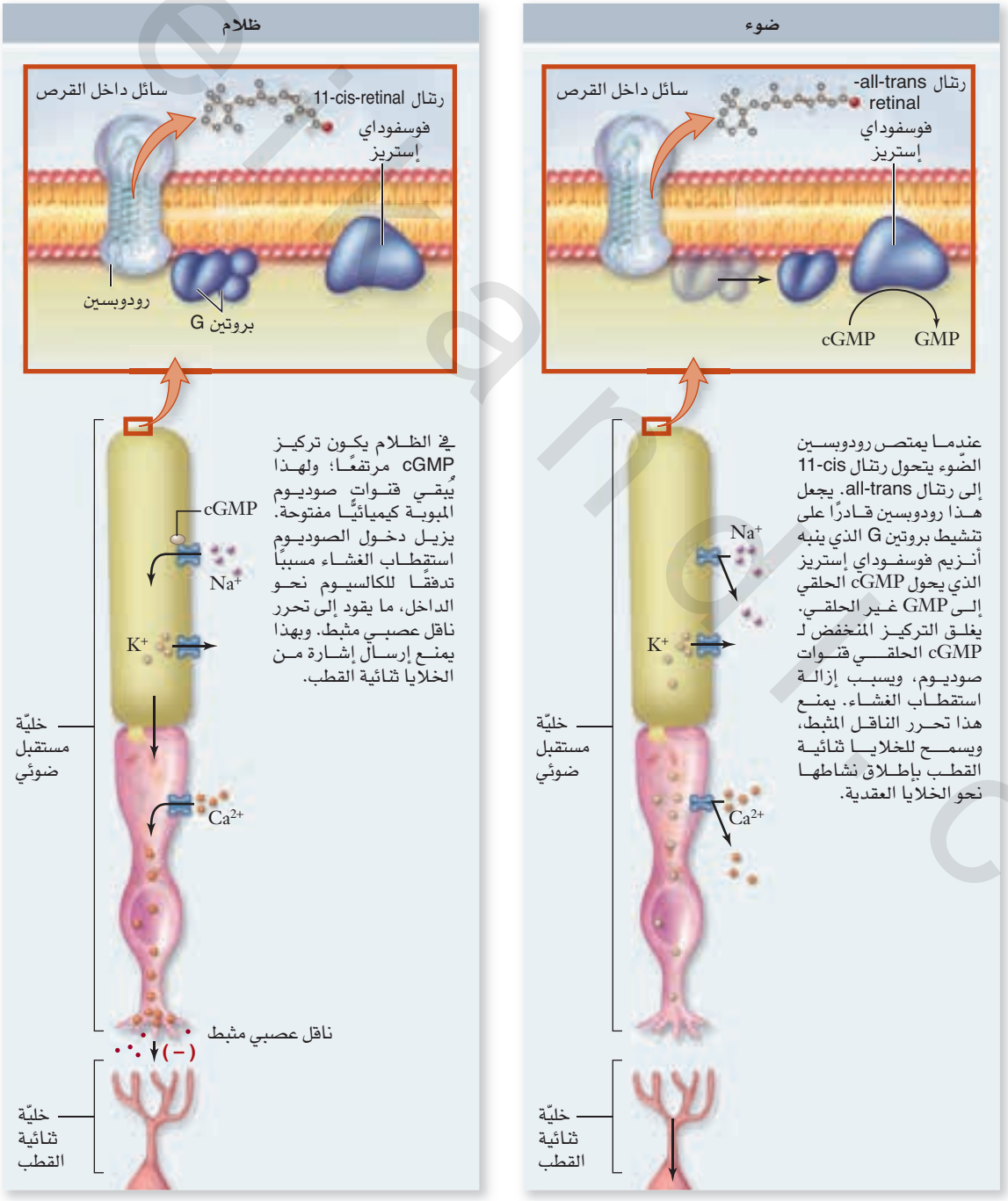
يعزى إنتاج المستقبلات الضوئية للناقل العصبي المثبط إلى وجود قنوات صوديوم مُبوبة بالرابط. ففي أثناء الظلام يكون كثير من هذه القنوات مفتوحًا ما يسمح بتدفق الصوديوم إلى الداخل. ويدعى تدفق الصوديوم هذا بغياب الضّوء، تيار الظلام، وهو يزيل استقطاب الخلايا ثنائية القطب. أما بوجود الضّوء، فتغلق قنوات صوديوم في المستقبلات الضوئية بسرعة، ما يقلل تيار الظلام، ويسبب زيادة استقطاب المستقبلات الضوئية. وفي هذه الحالة لا تُنتج الخلايا ناقلها العصبي المثبط. وبغياب التثبيط، يُزال استقطاب الخلايا ثنائية القطب ما يسبب تحريرها لناقلها العصبي المهيج نحو الخلايا العقدية.

يعتمد تنظيم تيار الظلام على الرابط الذي تستخدمه قنوات صوديوم في خلايا المستقبلات الضوئية، ألا وهو النيوكليوتايد **أحادي فوسفات جوانوسين الحلقي Cyclic guanosine monophosphate (cGMP)**. يكون تركيز cGMP في الظلام مرتفعًا، وتكون القنوات مفتوحة. يصبح النظام حساسًا للضوء بسبب طبيعة الصبغات الضوئية وتركيبها. فالصّبغات الضوئية في العين هي مستقبلات بروتينية مزدوجة مع بروتين G يتم تحفيزها عند امتصاص الضّوء. فعندما تمتص الصبغة الضوئية ضوءًا، يتحول رتنال إلى نظير آخر، وينفصل عن المستقبل البروتيني في عملية تسمى تفاعل التبييض (القصر). يتغير شكل المستقبل البروتيني نتيجة لهذا الانفصال، فيحفز بروتين G المزدوج معه. يُحفِّز بروتين G المُحفَّز بروتينًا مستجيبًا هو الأنزيم فوسفودي إستريز الذي يشق cGMP ويحوله إلى GMP غير حلقي. يسبب فقدان cGMP إغلاق قنوات صوديوم المبوبة بـ cGMP، ما يقلل تيار الظلام (الشكل 45-20). يرتبط كلّ أوبسين مع أكثر من 100 بروتين G منظم التي تطلق، عند تحفيزها، تحت وحدات تحفز مئات من جزيئات الأنزيم فوسفودي إستريز. ويستطيع كلّ جزيء من الأنزيم أنْ يُحَوِّلَ آلافًا من cGMP الحلقي إلى GMP غير حلقي، فيغلق بذلك قنوات الصوديوم بمعدل يصل إلى 1000 في الثانية، وعليه يثبط تيار الظلام.

يؤدي امتصاص فوتون واحد من الضّوء إلى منع دخول أكثر من مليون أيون صوديوم دون تغير في نفاذية الأغشية لبوتاسيوم، فالمستقبل الضوئي يصبح زائد الاستقطاب، ويتحرر منه ناقل مثبط أقل. وعندما تتحرر الخلايا ثنائية القطب من هذا التثبيط، فإنها تحفز الخلايا العقدية التي ترسل سيالات إلى الدّماغ (الشكل 45 - 21).

الشكل 45-20

تحويل الإشارة في عين الفقريات. بغياب الضّوء، يُبقي cGMP الحلقي قنوات صوديوم مفتوحة مما يسبب دخول صوديوم، ويقود إلى تحرر ناقل عصبي مثبط. عند امتصاص الضّوء من قِبَلِ رتنال في رودوبسين يتغير تركيبه. يجعل هذا رودوبسين يرتبط مع بروتين G ويحفزه لينبه أنزيم فوسفودي إستريز الذي يحول الشكل الحلقي cGMP إلى الشكل غير الحلقي GMP. يؤدي فقدان الشكل الحلقي cGMP إلى إغلاق قنوات صوديوم ويمنع تحرر الناقل العصبي المثبط الذي يجعل الخلايا ثنائية القطب تنبه الخلايا العقدية.



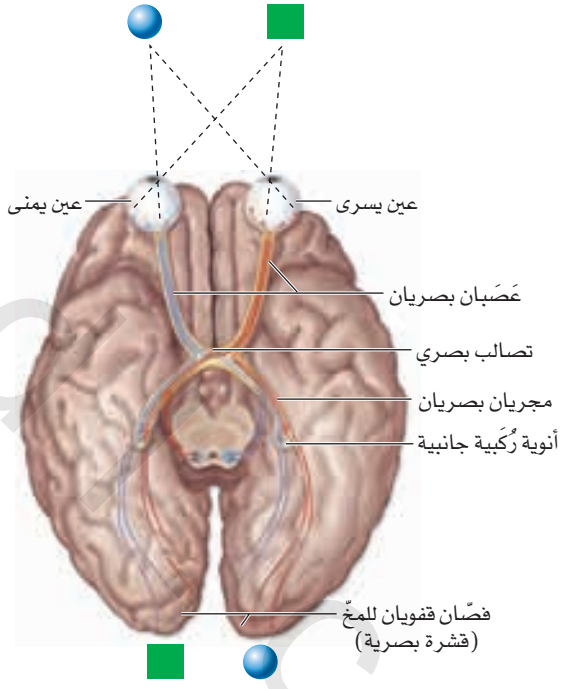
تُعالج المعلومات البصرية في القشرة المخية

تحط جهود الفعل المنقولة في محاور الخلايا العقدية في تراكيب تدعى **النواة الرُّكَبية الجانبية Lateral geniculate nucleus** في المهاد، ثمّ تنتقل بعد ذلك إلى الفصّ القفوي للقشرة المخية (انظر الشكل 45-21). هناك يفسر الدّماغ هذه المعلومات على أنها ضوء في منطقة محددة من حقل استقبال العين. إنّ نمط النشاط في الخلايا العقدية عبر الشبكية يشفّر خريطة مفصلة لكلّ نقطة في حقل الاستقبال، سامحًا بذلك للشبكية وللدماغ برؤية الأجسام في الْحَيِّز البصري المتاح.

يقدم تكرار السّيّالات في كلّ خليّة عُقدية معلومات عن شدة الضّوء عند كلّ نقطة. وفي الوقت نفسه، فإنّ النشاط النسبي للخلايا العقدية المرتبطة (عبر الخلايا ثنائية القطب) مع أنواع المخاريط الثلاثة يقدم معلومات عن اللون.

حِدّةُ الإبصار

تختلف العلاقة بين المستقبلات والخلايا ثنائية القطب والخلايا العقدية في الأجزاء المختلفة من الشبكية. ففي النقرة يتصل كلّ مخروط مع خليّة ثنائية القطب (بنسبة 1:1) وكلّ خليّة ثنائية القطب تتشابك بدورها مع خليّة عقدية واحدة. وتُعدّ العلاقة 1:1 هذه مسؤولة عن حدة الإبصار المرتفعة في النقرة.



الشكل 45-21

مسلك المعلومات البصرية. تحط جهود الفعل المنقولة بالأعصاب البصرية من الشبكية في النواتين الرُّكبتين الجانبيتين، ومن هناك تنقل إلى القشرة البصرية للفصين القفويين. لاحظ أنّ نصف الأعصاب البصرية (الألياف الدّاخليّة الناشئة من الجزء الداخلي للشبكة) تعبر إلى الجانب الآخر عند التصالب البصري، بحيث إنّ كلّ نصف كرة من المخ يستقبل معلومات من كلّ من العينين.

أما خارج النقرة، فإنّ كثيرًا من الْعِصبيّ تلتقي مع خليّة ثنائية القطب مفردة. ويسمح هذا الالتقاء بتجميع النشاط العصبي ما يجعل ذلك الجزء من الشبكية الواقع خارج النقرة أكثر حساسية للضوء الخافت من النقرة نفسها، ولكن على حساب حدة الإبصار وإدراك الألوان. لهذا، فإنّ الأجسام غير المضاءة جيدًا، مثل نجم خافت في الليل، يمكن أن تُرى بصورة أفضل ليس بالنظر إليها مباشرة، بل بالنظر قربها. ولقد قيل: إن محيط العين يعمل كراصد، في حين تعمل النقرة كمفتش.

يُعزى **عمى الألوان Color blindness** إلى فقد وراثي لنوع أو أكثر من أنواع المخاريط. فالأشخاص ذوو الرؤية الطبيعية للألوان هم ثلاثيو الألوان؛ لأن لديهم المخاريط الثلاثة كلها. أما من لديهم نوعان فقط فهم ثنائيو الألوان. فمثلًا؛ الأشخاص الذين لديهم عمى ألوان للونين الأحمر والأخضر قد يفقدون المخاريط الحمراء، ويكون لديهم صعوبة في تمييز الأحمر من الأخضر. يُوَرَّث عمى الألوان كصفة متنحية مرتبطة بالجنس (انظر الفصل الـ 13)، وهي غالبًا ما تظهر في الذكور.

الرؤية ثنائية العينين *Binocular Vision*

تمتلك الرّئيسيّات (بما فيها الإنسان) ومعظم المفترسات عينين تقعان على جانبي الوجه. وعندما توجه العينان على جسم واحد، فإنّ الصورة التي تراها كلّ عين تختلف قليلًا عن تلك التي تراها الأخرى. هذه الإزاحة البسيطة للصور (تأثير يدعى الزيغان) تمكننا من **الرؤية ثنائية العينين Binocular vision**، وهي القدرة على إدراك الصور ثلاثية الأبعاد والإحساس بالعمق. وقد عَظَّم توجه كلتا العينين نحو الأمام حقل التداخل الذي تحدث معه الرؤية المجسمة.

في المقابل، فإنّ الحيوانات الفرائس عادة ما تكون عيناها واقعتين على جانبي الرأس ما يمنع الرؤية ثنائية العينين، ولكنه يوسع حقل الاستقبال الإجمالي. ويبدو أنّ الانتخاب الطبيعي قد حابى رصد المفترس المحتمل على عمق الإدراك في كثير من أنواع الفرائس. فعينا ديك الشجر الأمريكي *Scolopax minor* مثلًا واقعتان في موقعين متقابلين تمامًا على الجمجمة، بحيث إن له حقل إبصار مقداره 360° دون أن يدير رأسه بتاتًا.

تمتلك معظم الطّيور عيونًا موضوعة على الجانبين. من أجل تَكَيُّفِها، فإنّ لها نقرتين في كلّ شبكية: النقرة الأولى، تقدم رؤية أمامية حادة كالنقرة الوحيدة الموجودة في الثدييات، أما النقرة الثانية، فتقدّم رؤية جانبية حادة.

طورت الحلقيات والرخويات والمفصليات والحبليات عيونًا تُكَوِّنُ الصورة، بصورة مستقلة. تسمح عين الْفقريّات للضوء بالمرور من خلال البؤبؤ، ثم تقوم بتركيزه عن طريق عدسة قابلة للضبط على الشبكية في مؤخرة العين. تحتوي الْعِصيّ والمخارط صبغة ضوئية هي ريتنال، التي تتفكك استجابة للضوء، وتحفّز بصورة غير مباشرة عصبونات ثنائية القطب، ثم عصبونات عقدية. تنقل الخلايا العقدية جهود فعل إلى المهاد الذي ينقل بدوره المعلومات البصرية إلى الفص القفوي للدماغ. تعطي النقرة في الشبكية حدة إبصار مرتفعة، في حين تعطي المنطقة خارج النقرة حساسية عالية للضوء الخافت. الرؤية ثنائية العينين بوجود حقلي إبصار متداخلين تعطي إدراكًا للعمق.

6-45 تَنَوُّعُ الخبرات الحسّيّة

الإبصار هو الحاسة الأساسية التي تستخدمها الْفقريّات جميعها التي تعيش في بيئة يملؤها الضّوء، لكن الضّوء المرئي ليس هو الجزء الوحيد من الطّيف الكهرومغناطيسيّ الذي تستخدمه الْفقريّات بالضرورة لِتَحَسُّسِ بيئاتها.

بعض الأفاعي لها مستقبلات قادرة على رصد الأشعة تحت الحمراء

الإشعاعات الكهرومغناطيسية ذات طول موجي أطول من الضّوء المرئي، تكون طاقتها منخفضة لدرجة أنه لا يمكن رصدها من قبل المستقبلات الضوئية. تشكل الإشعاعات من الجزء تحت الأحمر من الطيف ما نعدّه عادة أنه إشعاع حراري.

تشكل الحرارة منبهًا بيئيًّا رديئًا جدًا في الماء؛ حيث إنّ الماء يمتص الحرارة بيسر. في المقابل، فإنّ الهواء له سعة حرارية منخفضة، ولهذا يمكن أن تُشَكِّلَ الحرارة في الهواء منبهًا مفيدًا محتملًا. والْفقريّات الوحيدة المعروفة بقدرتها على رصد الأشعة تحت الحمراء هي الأفاعي التي تُسمّى أفاعي النقرة الخبيثة.

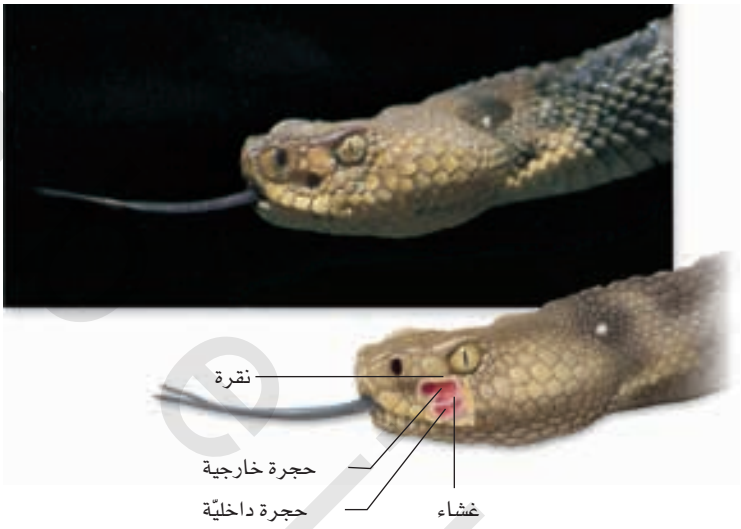
تمتلك أفاعي النقرة زوجًا من **أعضاء النقرة Pit organs**، التي ترصد الحرارة، وتقع على كلّ من جانبي الرأس بين العين وفتحة المنخر (الشكل 45-22). تحدد هذه المستقبلات الْخارجيّة موقع مصادر الحرارة في البيئة، وهي تمكِّن الأفعى المجلجلة من أن تحدد موقع فريستها، وتنقض عليها في الظلام، كما في جحر تحت الأرض، أو في كهف، أو في الليل.

يتكون كلّ عضو نقرة من حجرتين مفصولتين بغشاء. تسقط الأشعة تحت الحمراء على الغشاء، وترفع درجة حرارته، فتُنبه مستقبلات حرارية على هذا الغشاء. لا تُعْرَفُ طبيعة هذه المستقبلات، ويُحْتَمَلُ أنّها تتكون من عصبونات حساسة للحرارة تغذي كلتا الحجرتين. ويبدو أنّ وجود زوج من الأعضاء يقدم معلومات مجسمة تحدد الاتجاه بطريقة مماثلة للطريقة التي تعمل بها العيون. وفي الحقيقة، فإنّ المعلومات المنقولة من أعضاء النقرة في الأفاعي تُعالج في الدّماغ من قِبَلِ تراكيب مماثلة للمركز البصري في فقريات أخرى.

بعض الْفقريّات تستطيع الإحساس بالتيارات الكهربائية

على الرّغم من أنّ الهواء لا يوصل بيسر التيارات الكهربائية، فإن الماء موصِّل جيد. تولِّد الحيوانات المائية جميعها تيارات كهربائية من انقباضات عضلاتها. يستطيع عدد من المجموعات المختلفة من الأسماك رصد هذه التيارات الكهربائية. تستطيع السمكة المعروفة بالسمكة الكهربائية، إنتاج تفريغ كهربائي من أعضاء كهربائية متخصصة. تستطيع هذه السمكة أنْ تستخدم تفريغًا كهربائيًّا ضعيفًا لتحديد موقع فريستها وشريك تزاوجها، وأنْ تبني صورة ثلاثية الأبعاد للبيئة التي تعيش فيها، حتى إنْ كانت عكرة وضبابية.

تمتلك الأسماك مطاطية الخياشيم (القرش، والراي، والوَرْنَك) مستقبلات كهربائية تدعى **حويصلات لورنزيني Ampullae of Lorenzini**. تقع الخلايا المستقبلة في أكياس تفتح عن طريق قنوات مملوءة بالهلام في ثقوب على سطح جسم. يشكل الهلام موصلاً جيدًا. وهكذا، فإنّ شحنة سالبة عند فتحة القناة يمكن أنْ تزيل استقطاب المستقبل عند قاعدته ما يسبب تحرر ناقل عصبي وزيادة في نشاط العصبونات الحسّيّة. يسمح هذا لسمك القرش مثلًا أنْ يتحرى الانقباضات العضلية لفريسته. وعلى الرّغم من أنّ حويصلات لورينزيني قد فقدت في أثناء تطور الأسماك العظمية (معظم الأسماك العظمية) فإن الاستقبال الكهربائي عاد للظهور مجددًا في بعض مجموعات الأسماك العظمية التي طورت تراكيب حسية مناظرة. ونشأت المستقبلات الكهربائية مرة أخرى بشكل مستقل في منقار البط، وهو ثديّ يضع بيضًا. فالمستقبلات في منقاره تستطيع رصد التيارات الكهربائية التي تولدها العضلات المنقبضة للجمبري وللأسماك ما يمكن الحيوان من رصد فريسته، حتى خلال الليل وفي مياه عكرة.



الشكل 45-22

رؤية الحرارة. يفتح الانخفاض الواقع بين المنخر والعين في هذه الأفعى المجلجلة في عضو نقرة. في الجزء الذي يبدو فيه المقطع في الرسم السفلي، تستطيع أن ترى العضو المكون من حجرتين مفصولتين بغشاء. أفاعي النقرة السامة، لها القدرة الفريدة على الإحساس بالأشعة تحت الحمراء (الحرارة).

ترصد بعض المخلوقات الحقول الْمغناطيسيّة

يبدو أنّ الحنكليس، والقرش، والنّحل، وكثيرًا من الطّيور توجه نفسها ملاحيًّا على طول خطوط المجال المغناطيسي للأرض. حتى إنّ بعض البكتيريا تستخدم هذه القوى لتوجيه نفسها.

فالطّيور التي حُبست في أقفاص مغطاة، وليس لديها دليل بصري يوجهها، تنقر وتحاول أنْ تتحرك في الاتجاه الذي تتخذه عادة عند الهجرة في الوقت المناسب من السنة. لكنها لا تفعل ذلك عندما يعزل القفص عن الحقول الْمغناطيسيّة باستخدام الفولاذ. إضافة إلى ذلك، فإنه عندما يحرف المجال المغناطيسي للقفص بزاوية مقدارها $120°$ مع اتجاه عقارب الساعة باستخدام مغناطيس اصطناعي، فإنّ الطائر الذي كان يتجه بصورة طبيعية نحو الشمال سيتجه الآن نحو الشرق وجنوب الشرق.

ولا تزال طبيعة هذه المستقبلات الْمغناطيسيّة في هذه الْفقريّات موضوعًا للكثير من التكهن، والآليات تبقى عسيرة الفهم.

تستطيع أفاعي النقرة السامة تحديد موقع فريستها باستخدام الأشعة تحت الحمراء (الحرارة)، وتستطيع كثير من الْفقريّات المائية أن تحدد موضع فريستها، وتحدد معالم بيئتها عن طريق مستقبلات كهربائية. المستقبلات الْمغناطيسيّة قد تساعد على هجرة الطّيور.

مراجعة المفاهيم

45 - 1 نظرة شاملة على المستقبلات الحسّيّة

تزوّدنا المستقبلات الحسّيّة بمعلومات عن البيئة الدّاخليّة والْخارجيّة التي تُعَدُّ مهمة للبقاء والنجاح (الجدول 45-1).

- ترصد المستقبلات الْخارجيّة الْمنبِّهات القادمة من البيئة الْخارجيّة، في حين ترصد المستقبلات الدّاخليّة الْمنبِّهات من البيئة الدّاخليّة.
- هناك ثلاث مجموعات من المستقبلات: الآلية والكيميائية والمستقبلات التي ترصد الطاقة.
- تُنقل المعلومات الحسّيّة في خطوات أربع: التنبيه، وتحويل الإشارة، والبثّ، والتّفسير (الشكل 45-1).
- يتضمن تحويل الإشارة الحسّيّة قنوات أيونية مبوبة بالمنبه تُنتج جُهْدَ مُستقبلٍ متدرج.
- إذا كان جهد المستقبل أو مجموع الجهود الناتجة عن المستقبل فوق حد العتبة، فإنها تنتج جهد فعل (الشكل 45-2).
- توجد علاقة لوغاريتمية بين شدة المنبه وتكرار جهود الفعل.

45 - 2 المستقبلات الآلية: اللّمس والضّغط

تُنَبِّهُ المستقبلات الآلية بقوى آلية كالضغط.

- مستقبلاتُ الألم نهاياتٌ عصبيةٌ حرّة تقع في الجلد، وتستجيب للمنبهات المؤذية، وتدركها على أنها ألم.
- يمكن أنْ تؤثّر درجات الحرارة المتطرفة في القنوات الأيونية الآنية لجهد المستقبل، وتسبب إزالة استقطاب نتيجة لتدفق الصوديوم والكالسيوم إلى الداخل.
- المستقبلاتُ الحراريةُ هي نهاياتٌ شجريةٌ عارية للعصبونات الحسّيّة تحتوي أيضًا قنوات أيونية آنية لجهد المستقبل، وتستجيب للبرودة أو الحرارة.
- تنتج حاسة اللّمس من عمل مستقبلات مختلفة موجودة في الجلد، وتستجيب للإزاحة الميكانيكية للغشاء (الشكل 45-3).
- ترصد المستقبلاتُ الخاصة طولَ العضلة.
- ترصد مستقبلاتُ الضّغط، الواقعة في الجيب السباتي والقوس الأبهر، ضغطَ الدم.

45 - 3 السّمع والاهتزاز ورصد وضع الجسم

يعمل السّمع، وهو رصد الأصوات وأمواج الضّغط، بصورة أفضل في الماء، ويزودنا بمعلومات عن الاتجاه.

- تتحول أمواج الضّغط إلى سيالات عصبية بانثناء الخلايا الشعرية ما ينتج جهود فعل.
- يرصد نظام الخط الجانبي في الأسماك أمواج الضّغط والاهتزازات منخفضة التردد (الشكل 45-5).
- تستخدم أذن السمكة حصى أذنية، وهي بلّورة من كربونات الكالسيوم تهتز فوق خليّة شعرية لتحويل إشارة الصّوت.
- تجمع الأذن الْخارجيّة لفقريات اليابسة الاهتزازات في الهواء، وتوجهها نحو طبلة الأذن، أو غشاء الطبلة (الشكل 45-6).
- تنتقل أمواج الصّوت من الطبلة عبر المطرقة والسندان والركاب إلى الشباك البيضوي. وتحول أمواج الصّوت في القوقعة عن طريق عضو كورتي.
- يتألف الغشاء القاعدي في القوقعة من ألياف تستجيب لترددات مختلفة من الأصوات (الشكل 45-7).
- يسمح تحديد الموقع بالصدى لبعض الأنواع بالملاحة عن طريق الصّوت.
- يُحدد موضع الجسم عن طريق كيس الاتزان، وهو خلايا شعرية مهدبة مغمورة في مادة جيلاتينية تحتوي حصى التّوازن (الشكل 45- 8).
- تُرصد حركةُ الجسم عن طريق خلايا شعرية موجودة في الكيس والقربة، بحيث يمكن رصد التسارع الزاوي (الشكل 45-9).

45-4 المستقبلات الكيميائية: الذوق والشّم ودرجة الحموضة (درجة الأس الهيدروجيني)

تحتوي المستقبلات الكيميائية بروتينات غشائية ترتبط برابط محدد ما يقود إلى إزالة استقطاب، وإلى تكوين جهود فعل.

- إدراكُ التّذوّق مزيجٌ من العوامل الفيزيائية والنفسية.
- براعمُ التّذوّق تجمعاتٌ من خلايا طلائية حساسة كيميائيًّا، وتقع على الحلمات (الشكل 45-10).
- يمكن تقسيم أنماط الذّوق إلى: حلو، وحامض، ومالح، ومرّ، وشهي.
- تعمل المواد الكيميائية المالحة والحامضية مباشرة خلال قنوات أيونية. في حين، تعمل المواد الأخرى بشكل غير مباشر بالارتباط بمستقبلات مرتبطة ببروتين G.
- يتضمن الشّم مستقبلات كيميائية واقعة في الجزء العلوي للممرات الأنفية (الشكل 45-12).
- تنتهي الزوائد الشجرية للمستقبلات الكيميائية بخصلة من الأهداب تندفع مباشرة في مخاطية الأنف، وتذهب محاورها مباشرة إلى القشرة المخيّة.
- ترصد المستقبلات الكيميائية المحيطية الدّاخليّة في الأبهر التغيرات في درجة حموضة الدم، والمستقبلات الكيميائية المركزية في النخاع المستطيل حساسة لدرجة حموضة السائل الدماغي الشوكي.

45 - 5 الرؤية

تسمح المستقبلات التي ترصد الطاقة للحيوانات إدراك الأجسام من على مسافات بعيدة.

- يبدأ الإبصار باقتناص طاقة الضّوء.
- طَوَّرَتْ أربع قبائل: الْحلقيّات، والرّخويّات، والمفصليّات، والحبليّات باستقلال عن بعضها عيونًا تشكل صورًا (الشكل 45-14).
- يدخل الضّوء في عين الْفقريّات، خلال قرنية شفافة، وتتحكم القزحية في شدة الضّوء. وتركز العدسة الضّوء على شبكية موجودة في مؤخرة العين (الشكل 45-15).
- تسيطر العضلة الهدبية على شكل العدسة وتكيفها للرؤية القريبة والبعيدة.
- هناك نوعان من المستقبلات الضّوئيّة في الْفقريّات هما الْعِصِيّ، وترصد الأبيض والأسود، والمخاريط، وهي ضرورية لحدة الإبصار ولرؤية الألوان (الشكل 45-17).
- في الشبكية، تتشابك المستقبلات الضّوئيّة مع الخلايا ثنائية القطب التي تتشابك بدورها مع خلايا عقدية ترسل جهود فعل إلى الدّماغ (الشكل 45-19).
- في غياب الضّوء، يُبقي cGMP قنوات الصوديوم مفتوحة، ما يسبب دخول الصوديوم الذي يدعى تيار الظلام، والذي يسبب تحرر ناقل عصبي مثبط.
- يحفِّز الضّوء الذي تمتصه المستقبلات الضّوئيّة بروتين G الذي ينبه أنزيم فوسفوداي إستريز الذي يشق cGMP ويعطل عمله.
- يمنع فقدان cGMP دخول الصوديوم وتحرر الناقل العصبي المثبط تبعًا لذلك. هذا الأمر يسبب تحفيز الخلايا العقدية عن طريق الخلايا ثنائية القطب (الشكل 45-20).
- تُعالج المعلومات البصرية في الفص القفوي من القشرة المخية (الشكل 45-21).
- النقرة المسؤولة عن حدة الإبصار المرتفعة هي منطقة في الشبكية، حيث يتصل كلّ مخروط بخليّة واحدة من ثنائية القطب / والخلايا العقدية.
- في الضّوء الخافت، تنخفض حدة الإبصار بسبب التقاء عِصِيّ عدة عند خليّة ثنائية قطب واحدة، وخلايا عدة ثنائية قطب عند خليّة عقدية واحدة.
- للرئيسيات ومعظم المفترسات رؤية ثنائية العينين، تتداخل الصور من كلّ عين لإنتاج صورة ثلاثية الأبعاد.

45 - 6 تنوع الخبرات الحسّيّة

الضّوء المرئيّ ليس هو الجزء الوحيد من الطيف المغناطيسي الكهربائي الذي تستخدمه الْفقريّات لرصد بيئاتها.

- ترصد الأفاعي ذات النقرة الأشعةَ تحت الحمراء باستخدام أعضاء نقرة تتحرى الحرارة.
- الأسماك مطاطية الخياشيم ومنقار البط لها مستقبلات كهربائية ترصد التيارات الكهربائية.
- كثير من المخلوقات يبدو أنها تتوجه ملاحيًّا مع خطوط الحقل المغناطيسي، لكن آليات عملها تبقى غير مفهومة جيدًا.

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. أيّ من الآتي لا يُعَدّ طريقة تستقبل بها المستقبلات الحسّيّة معلومات من البيئة الدّاخليّة أو الْخارجيّة:
   أ. تغيرات في الضّغط.
   ب. تغيرات في الضّوء أو الحرارة.
   جـ. تغيرات في تركيز الجزيئات.
   د. كلّ هذه تستخدمها المستقبلات الحسّيّة.

2. الترتيب الصحيح لخطوات الإدراك هو:
   أ. التفسير، التنبيه، التحويل، البث.
   ب. التنبيه، التحويل، البث، التفسير.
   جـ. التفسير، التحويل، التنبيه، البث.
   د. التحويل، التفسير، التنبيه، البث.

3. وقف أحد أقاربك فجأة عندما كان في مناسبة اجتماعية، ثم أغمي عليه. لدى معاينة الطبيب له قال: إن لديه مشكلة في مستقبلات الضّغط. وظيفة هذه المستقبلات هي:
   أ. رَصْدُ التّغيّر في ضغط الدم.
   ب. رَصْدُ انقباض العضلات وحركة الأطراف.
   جـ. مستقبلات خارجية.
   د رَصْدُ التغيرات في كيمياء الدم.

4. المستقبلات الحسّيّة جميعها قادرة على تكوين سيالات عصبية بفتح أو غلق:
   أ. قنوات أيونية مبوبة بفرق الجهد.
   ب. مستقبلات خارجية.
   جـ. مستقبلات داخلية.
   د. قنوات أيونية مبوبة بالمنبه.

5. في حكاية «الأميرة النائمة» تستسلم الأميرة للنوم بعد وخز إصبعها. نوع المستقبلات التي تستجيب لهذا النوع من الْمنبِّهات المؤلمة مستقبلات:
   أ. آلية.
   ب. ألم.
   جـ. حرارة.
   د. لمس.

6. ترصد الأذن الأصوات عن طريق حركة:
   أ. الغشاء القاعدي.
   ب. الغشاء السقفي.
   جـ. قناة أوستاكيوس.
   د. السائل في القنوات الهلالية.

7. يعرف صديقك مدى خوفك من الأفاعي، فأخبرك بأنّ عليك أن تلف نفسك بمادة عازلة للحرارة عندما تذهب إلى الغابة. تدرك الآن بعد قراءتك لهذا الفصل أنه كان محقًّا إلى حد ما؛ لأن الأفاعي تستخدم:
   أ. مستقبلات ضوئية.
   ب. قوقعة.
   جـ. قنوات هلالية.
   د. أعضاء النقرة.

8. الخلايا الشعرية في الجهاز الدهليزي في فقريات اليابسة:
   أ. تقيس التغيرات في درجة الحرارة ضمن الجسم.
   ب. ترصد الصّوت في مدى منخفض من السّمع.
   جـ. تقدم إحساسًا بالتسارع والتّوازن.
   د. تقيس التغيرات في ضغط الدم.

9. عند التفكير في وجبة الغداء التي تناولتها، فإنّ القدرة على تذوق الطعام تعتمد على مستقبلات:
   أ. كيميائية خارجية.
   ب. كيميائية داخلية.
   جـ. شمية.
   د. ألم.

10. المشترك بين الأجهزة الحسّيّة للحلقيات والرخويات والمفصليات والحبليات هو:
    أ. تستخدم جميعها الْمنبِّهات نفسها من أجل التّذوّق.
    ب. تستخدم جميعها عصبونات لرصد الاهتزازات.
    جـ. لديها عيون تكون صورًا، وقد تطورت باستقلال عن بعضها.
    د. تستخدم مستقبلات كيميائية في الجلد لرصد الغذاء.

11. لو كنت تقضي شهر العسل في بورنيو، وعثرت على نوع من الثدييات لم يتم التّعرّف إليه سابقًا، ثم قمت بإخبار زوجتك التي كانت تستمع على مضض أن وضع العينين على الجهة نفسها من الرأس (أيّ على الوجه مثلًا) بحيث تتداخل حقول الرؤية هو:
    أ. موجود في الرئيسيات والمفترسات.
    ب. يدعى الرؤية ثنائية العينين.
    جـ. يسمح بإدراك العمق.
    د. كلّ ما ذكر.

12. استيقظتَ على يوم جميل، وبعد فتح جفونك، فإنّ التراكيب التي تسمح للضوء بالدخول إلى العين هي:
    أ. الشبكية.
    ب. النقرة.
    جـ. البؤبؤ.
    د. العدسة.

13. _____ هي الصبغة الضّوئيّة التي تحتويها الْعِصِيّ والمخاريط في العين.
    أ. كاروتين.
    ب. رتنال Cis-retinal.
    جـ. صبغة ضوئية.
    د. كلوروفيل.

14. واحد مما يأتي ليس طريقة تستخدمها الْفقريّات لجمع معلومات عن بيئتها:
    أ. الأشعة تحت الحمراء.
    ب. الحقول الْمغناطيسيّة.
    جـ. التيارات الكهربائية.
    د. كلّ هذه طرق تستخدم للاستقبال الْحسّيّ.

15. فص الدّماغ الذي يتعرف إلى المعلومات البصرية، ويفسرها هو الفصّ:
    أ. القفوي.
    ب الأمامي.
    جـ. الجداري.
    د. الصدغي.

أسئلة تحدٍّ

1. عندما تنخفض درجة الحموضة والقاعدية كثيرًا، تحدث حالة قد تكون مميتة تدعى الحموضة. من بين استجابات الجسم المتعددة لهذه الحالة، تغيير الجسم لمعدل تنفسه. كيف يحس الجسم بهذا التّغيّر؟ كيف يتغير معدل التنفس؟ كيف يرفع ذلك من درجة الحموضة؟

2. إن وظيفة عين الْفقريّات غير عادية عند مقارنتها بالعمليات الأخرى ضمن الجسم. فالاتجاه الذي تتدفق به المعلومات الحسّيّة مثلًا هو عكس الاتجاه الذي يسلكه الضّوء خلال الشبكية. فسر تتابع الأحداث المتعلقة بحركة الضّوء وبالمعلومات خلال تراكيب العين، واشرح لماذا يتحركان في اتجاهين متعاكسين.

3. كيف يمكن أن تستجيب أعضاء حصى الأذن في رائد الفضاء، عندما تكون الجاذبية صفرًا؟ هل سيستمر رائد الفضاء في تكوين انطباع غير موضوعي عن الحركة؟ هل تستطيع القنوات الهلالية رصد التسارع الزاوي بالكفاءة نفسها عند جاذبية مقدارها صفر؟

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™