الفصل 50

درجة الحرارة والتّنظيم الأسموزيّ والجهاز البوليّ

Temperature, Osmotic Regulation, and the Urinary System

موجز المفاهيم

1-50 تنظيم درجة حرارة الجسم

- Q_{10} هو مقياس الحساسية للحرارة.
- تُحدَّد درجة الحرارة بعوامل داخليّة وخارجية.
- تُقسَّم المخلوقات الحية اعتمادًا على مصدر الحرارة.
- تُنظِّم المخلوقاتُ خارجية الحرارة درجةَ حرارة جسمها بالسُّلوك.
- المخلوقات داخليّة الحرارة تنتج حرارة أيضية داخليّة للمُحافظة على درجة حرارة الجسم، أو للتخلص منها.
- في الثّدييّات، يتحكم تحت المهاد في التّنظيم الحراري.

2-50 المولارية الأسموزيّة والتّوازن الأسموزيّ

- الضّغطُ الأسموزيّ مقياسُ فرق التّركيز.
- المخلوقات المُتطابقة مَعَ بيئتها أسموزيًّا تعيش في بيئات بحرية.
- المخلوقات المُنظِّمة للأسموزية تتحكم في المولارية الأسموزيّة داخليًّا.

3-50 الأعضاء المُنظِّمة للأسموزية

- تستخدم اللافقريات خلايا وأنيبيبات خاصة.
- تمتلك الحشرات جهاز تنظيم أسموزيًّا فريدًا.
- تقوم كِلية الفقريّات بعمليات التّرشيح، ومن ثم إعادة الامتصاص.

4-50 تطور كِلية الفقريّات

- الأسماك التي تعيش في الماء العذب يجب أن تُحافظ على تركيز الأيونات المُذابة، وتتخلص من الماء الزائد للخارج.
- على الأسماك العظمية التي تعيش في مياه البحر المحافظة على الماء وإخراج المواد الإلكتروليتية الزائدة.
- تضخُّ الأسماك الغضروفية المواد الإلكتروليتية إلى الخارج، وتمتص البولينا، وتحتفظ بها.
- تمتلك البرمائيات والزّواحف تكيُّفات أسموزية لبيئتها.
- تستطيع الثّدييّات والطّيور طرح بول مُركز، وتُحافظ على الماء.

5-50 الفضلات النيتروجينية: الأمونيا، واليوريا (البولينا)، وحمض اليوريك (البوليك)

- الأمونيا مُركب سام يجب التّخلص منه بسرعة.

مقدّمة

في يوم شتاء بارد، تكون درجة الحرارة في كثير من المناطق مُقاربة لدرجة التّجمد. وعند مغادرتك المنزل، فإنَّ درجة حرارة جسمك لا تنخفض بشكل مُباشر. يعود السبب في ذلك إلى قدرتك على إنتاج حرارة من الدّاخل، وإلى امتلاكِك أيضًا مُنظِّم حرارة في الدِّماغ يعمل وفق درجة حرارة مُحدَّدة مُسبقًا. إضافة إلى ذلك، فإنَّ مُعظمَ وزن الجسم ماءٌ، وأنت توجد في بيئة جافة بالمُقارنةً مَعَ تركيب جسمك. تستطيع المُحافظة على ذلك بسبب امتلاكك آليات مُحكمة ودقيقة تُساعدك في الحفاظ على الماء، وتنظيم القوة الأسموزيّة لدمك، والسوائل بين الْخلويّة. إنَّ تنظيم الحرارة الدَّاخليّة، وتنظيم السّائل الدَّاخلي ومكوناته، تُعَدُّ أمثلة على الاتزان الدَّاخلي، وهي قدرة المخلوقات الحيّة في المُحافظة على الظروف الدَّاخليّة ضمن المدى الأمثل. في هذا الفصل، سوف نُناقش هذين النَّوعين من التّنظيم. تمتلك الحيوانات عددًا من التّكيّفات لتساعدها على تنظيم درجة الحرارة، من ضمنها السُّلوك الحيواني مثل ما يفعله الفيل في الصورة. سنصف أيضًا أجهزة التّنظيم الأسموزيّ لعدد من الحيوانات، ومن ضمنها الجهاز البوليّ في الثّدييّات. هذه الأجهزة تُحافظ على الماء والتّوازن الأيوني للسوائل في الجسم.

- البولينا وحمض البوليك أقل سُمِّيَّة، لكن لهما ذائبية مُختلفة.

6-50 الْكلية في الثّدييّات

- النيفرون (الوحدة الأنبوبية الكلوية) هي وحدة الترشيح في الْكِلية.
- الماء، وبعض المواد الغذائية، وبعض الأيونات يُعاد امتصاصها؛ جزيئات أُخرى يتمُّ إفرازها.
- التَّخلص من المواد السّامة والأيونات الزائدة يُحافظ على الاتزان الدَّاخلي.
- كل جزء من الوحدة الأنبوبية الكلوية في الثّدييّات ينجز وظيفة نقل خاصة.

7-50 السَّيطرة الهرمونية للتَّنظيم الأسموزيّ

- الهرمون المانع لإدرار البول يُحافظ على الماء.
- تتحكم هرمونات الألدوستيرون والعامل الأُذيني المُدر للصوديوم في تركيز أيونات الصوديوم.

1-50 تنظيم درجة حرارة الجسم

تُعدّ درجة الحرارة من أهم مظاهر البيئة التي تواجهها المخلوقات الحية. وكما سنرى، فإنَّ بعض المخلوقات الحية تمتلك درجة حرارة جسم تتطابق مَعَ درجة حرارة البيئة وبعض آخر من هذه المخلوقات تُنظِّم درجة حرارة أجسامها. في البداية، دعنا نتكلم عن أهمية درجة الحرارة.

Q_{10} هو مقياس الحساسية للحرارة

إنَّ مُعدل أي تفاعل كيميائي يتأثر بدرجة الحرارة؛ حيث يزيد هذا المُعدل بزيادة درجة الحرارة، ويقل بنقصانها. بالنِّسبة إلى التَّفاعلات التي تُحفَّز بالأنزيمات فإنها تُبدي الشيء نفسه، إضافة إلى أنَّ الأنزيمات نفسها أيضًا تتأثر بالحرارة.

يُمكن التَّعبير عن هذا الاعتماد الحراري كميًّا عن طريق دراسة مُعدَّل التَّفاعل على درجتي حرارة مُختلفتين. إنَّ النِّسبة بين هذين المُعدَّلين على هاتين الدَّرجتين من الحرارة اللتين تختلفان بمقدار 10°س تُسمّى Q_{10} لهذا الأنزيم:

$$Q_{10} = R_{T+10}/R_T$$

تتراوح قيمة Q_{10} لمُعظم الأنزيمات حول 2، وذلك يعني أنّه كلما زادت درجة الحرارة بمقدار 10 درجات، فإنَّ مُعدَّل التَّفاعل يتضاعف. من الواضِّح أنَّ هذا لا يستمر إلى ما لانهاية، حيث تؤثر درجات الحرارة العالية في تركيب الأنزيم، وتجعله غير فعّال.

يُمكن تطبيق مفهوم Q_{10} على مُعظم عمليات الأيض في الجسم. تبقى المُعادلة في هذه الحالة مُشابهة لما سبق، ولكن بدلًا من حساب مُعدَّل التَّفاعل لتفاعل واحد، يحسب مُعدَّل التَّفاعل لكلّ عمليات الأيض. عندما يتمُّ حساب ذلك، وجد أن مُعظم المخلوقات الحية تمتلك Q_{10} لمُعدَّلات الأيض يتراوح بين 2 إلى 3. هذه المُلاحظة تدل على أنَّ التأثير الحراري عادةً ما يكون على الأنزيمات التي تدخل في عمليات الأيض.

في الحالات النادرة – مثلًا، بعض اللافقريات التي تعيش في المناطق القريبة من الشاطئ يكون Q_{10} قريبًا من 1. وهذا يعني أنَّ مُعدَّلات الأيض لا تتغير بتغيُّر درجة الحرارة. في حالة هذه اللافقريات، فهي تتعرض إلى تذبذب كبير في درجات الحرارة خلال عملية طوفانها المُتعاقب، حيث تُغمر بالماء البارد، ومن ثم تتعرض إلى أشعة الشمس المُباشرة، والهواء ذي درجة الحرارة العالية. تكيَّفت هذه المخلوقات الحية لتتعامل مَعَ هذا التَّذبذب الكبير في درجة الحرارة، من خلال تطوير أنزيمات مُختلفة لمسار أيضي واحد، بحيث تمتلك هذه الأنزيمات درجات حرارة مثالية مُتباينة. وهذا يسمح لأنزيم ما أن يُعوِّض أنزيمات أُخرى قلَّ نشاطها عند درجة حرارةٍ مُعينة.

تُحدّد درجة الحرارة بعوامل داخليّة وخارجية

تتأثر درجة حرارة الجسم بعدد كبير من المُتغيرات. هذه المُتغيرات تضم عوامل داخليّة وخارجية، وسلوكية أيضًا. كما تتذكَّر من (الفصل الـ 7)، فإنَّ القانون الثاني للدِّيناميكا الحرارية يُشير إلى أنَّه لا يوجد تحوُّل للطّاقة فعّال 100%. ولهذا، فإنَّ التفاعلات التي تُشكِّل الأيض تُنتج حرارة بشكل مستمر بسبب عدم الكفاءة هذه. هذه الحرارة يجب أن تنتشر وتُشتَّت، أو أن تُستخدم لرفع درجة حرارة الجسم.

بشكل عام، فإنَّ مُعدَّل الأيض ودرجة حرارة الجسم على درجة كبيرة من التَّداخل. فمثلًا، لا يسمح انخفاض درجة حرارة الجسم بمُعدَّل أيض عالٍ بسبب اعتماد الأنزيمات في عملها على درجة الحرارة، كما ذُكِر سابقًا. بالعكس من ذلك، فإنَّ ارتفاع مُعدَّلات الأيض يُسبِّب ارتفاعًا غير مقبول في درجة حرارة الجسم، وهذا يحتاج إلى تبريد.

في الوقت نفسه، تؤدي درجات الحرارة الخارجية دورًا. فمثلًا، تخيَّل بيئة باردة جدًا تتسبَّب في فقدان حرارة كبيرة من الجسم. في حالة انخفاض درجة حرارة الجسم، من الصَّعب توليد حرارة أيضيَّة لرفع درجة حرارته.

لهذا، يجب على المخلوقات الحية التَّعامُل مَعَ العوامل الخارجية والدَّاخليّة التي لها علاقة بدرجة حرارة الجسم، وبعمليات الأيض، والبيئة. إنَّ أبسط وأدقّ نموذج لدرجة حرارة الجسم، هو:

درجة حرارة الجسم = الحرارة الناتجة + (الحرارة المُكتسبة – الحرارة المفقودة).

يمكن تبسيط هذه المعادلة أكثر إلى:

درجة حرارة الجسم = الحرارة الناتجة + الحرارة المنقولة.

لاحظ أنَّ الحرارة المنقولة يمكن أن تكون موجبة أو سالبة، أي إنها تُستخدم للتَّسخين أو للتبريد.

هناك أربع آليات لنقل الحرارة ذات علاقة بالأنظمة البيولوجية، هي: الإشعاع، والتَّوصيل والحمل، والتبخير (الشكل 50-1).

- **الإشعاع Radiation**. انتقال الحرارة عن طريق الإشعاع الكهرومغناطيسي، مثل انتقال الحرارة من الشمس، دون الحاجة إلى الاتصال المُباشر. تنتقل الحرارة من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة عن طريق الإشعاع.
- **التَّوصيل Conduction**. يُسمّى انتقال الحرارة المُباشر بين جسمين التَّوصيل. وهو يعني حرفيًّا انتقالًا مباشرًا للطاقة الحركية بين جزيئات جسمين على اتصال مَعَ بعضهما. تنتقل الحرارة من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة.
- **الحمل Convection**. نقل الحرارة من خلال حركة الغازات أو السوائل. هذه الحركة يمكن أن يكون سببها خارجيًّا (الرِّياح) أو بسبب اختلاف الكثافة التي لها علاقة بالسخونة والبرودة- مثلًا، الهواء الدافئ له كثافة أقل، ويرتفع إلى أعلى؛ وينطبق الشيء نفسه على الماء.
- **التبخير Evaporation**. مُعظم المواد تمتلك درجة حرارة تتبخر عندها، أي كمية الطّاقة التي تحتاج إليها لتتحوَّل من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. مثلما درسنا في (الفصل الـ 2)، فإنّ الماء، يمتلك حرارة تبخُّر عالية، تستخدمها حيوانات كثيرة مصدرًا لتبريد أجسامها بسبب هذه الخاصية.

عوامل أُخرى

يعتمد انتقال الحرارة بالطُّرق السابقة على عدد من العوامل التي تُؤثر في هذه العمليات الفيزيائية. تتضمَّن هذه العوامل مساحة السّطح، والاختلاف في درجة حرارة الجسم، والحرارة النَّوعية للتوصيل. وبأخذ هذه العوامل بالتَّرتيب، فإنه كلما زادت مساحة السّطح بالنسبة إلى الحجم الكلي للمخلوق، زاد التّوصيل الحراري. ولهذا، تمتلك المخلوقات الحية الصغيرة مساحة سطح كبيرة نسبيًّا مقارنة مَعَ كتلتها، ومن ثم تفقد وتكتسب الحرارة بشكل أكبر من البيئة المُحيطة بها وإليها. هذا يمكن أن يتأثر، ولو بدرجة قليلة بتغيُّر وضع الجسم، وسحب الأطراف أو مدّها.

إن اختلاف درجة الحرارة مهم أيضًا؛ فكلما زاد الفرق بين درجة حرارة البيئة ودرجة حرارة الجسم، انتقلت الحرارة بشكل أكبر. وكلما اقتربت درجة حرارة الحيوان من درجة حرارة البيئة، فقد الحيوان أو اكتسب حرارة أقل.

openkan.com

أخيرًا، فإنَّ الحيوانات التي تمتلك توصيلًا حراريًّا عاليًا، تكون درجة حرارة جسمها قريبة من درجة البيئة المُحيطة بها. أمّا الحيوانات التي تُنظِّم درجة حرارتها، فإنَّ تغليف الجسم بمادة لها توصيل حراري منخفض يُعَدُّ ذا فائدة: حيثُ تعمل بوصفها عازلًا. المواد العازلة التي لها هذه الخصائص هي: الرِّيش، والفرو، ودهن الحوت. أمّا الحيوانات التي تُنظِّم درجة حرارتها عن طريق السلوك، فإنَّ التَّوصيل الحراري العالي لديها يستطيع زيادة نقل الحرارة إلى الحد الأقصى.

تُقسَّم المخلوقات الحية اعتمادًا على مصدر الحرارة

منذ سنوات عدة، قَسّم علماء وظائف الأعضاء الحيوانات إلى حيوانات قادرة على المُحافظة على درجة حرارة أجسامها ثابتة، وأخرى قادرة على تغيير درجة حرارة جسمها بحسب البيئة المُحيطة بها. الحيوانات التي تُنظِّم درجة حرارة جسمها حول نقطة مُعينة سُميَّت حيوانات داخليّة الحرارة *Homeotherms*. في حين تُسمى الحيوانات التي تسمح بتغيُّر درجة حرارة جسمها لتتطابق مَعَ البيئة المُحيطة حيوانات مُتغيرة الحرارة *Poikilotherms*.

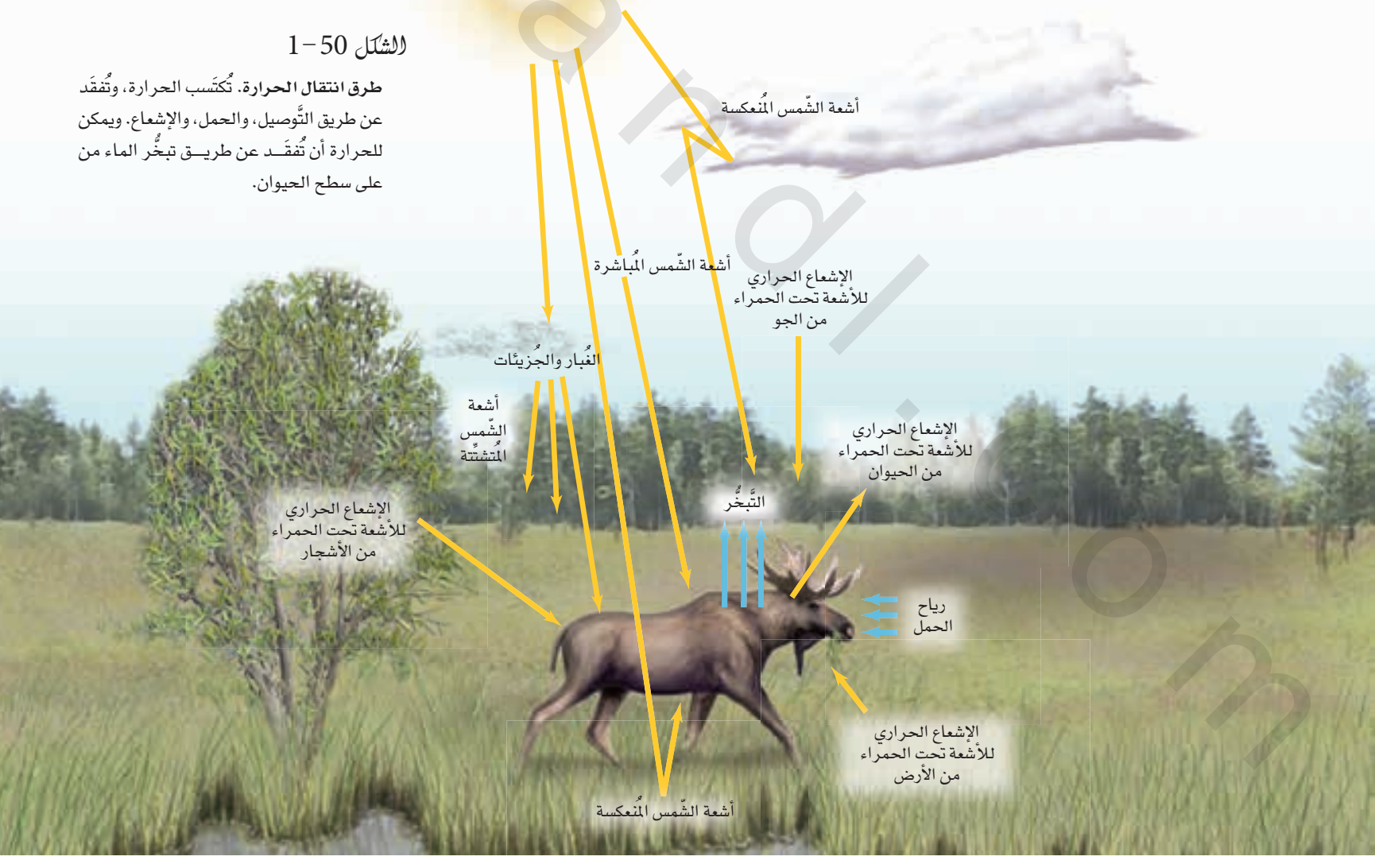
ولأنَّ المخلوقات داخليّة الحرارة تُحاول المُحافظة على درجة حرارة جسمها فوق درجة حرارة البيئة المُحيطة، فإنها تُسمّى ذوات «الدَّم الحار»، وتُسمّى الحيوانات مُتغيرة الحرارة ذوات «الدَّم البارد». إنَّ المُشكلة في هذه التَّسمية هي أنَّ الحيوانات مُتغيرة الحرارة في بيئة مُستقرة من ناحية درجة الحرارة (مثلًا، أنواع عدة من أسماك أعماق البحار) تمتلك ثباتًا في درجة حرارة جسمها أكثر من الحيوانات داخليّة الحرارة.

قادت هذه المُحدِّدات لهذا التَّصنيف الثُّنائي، اعتمادًا على تنظيم درجة الحرارة، إلى رؤية جديدة اعتمادًا على كيفية توليد حرارة الجسم. فالحيوانات التي تستخدم عمليات الأيض لتولِّد حرارة الجسم، وتحافظ عليها فوق درجة حرارة البيئة المُحيطة بها سُميَّت حيوانات **داخليّة الحرارة Endotherm**. أما الحيوانات التي تمتلك مُعدَّل أيض قليلًا نسبيًّا، ولا تستخدم عمليات الأيض لإنتاج الحرارة، وتمتلك درجة حرارة جسم مُتطابقة مَعَ البيئة المُحيطة، فتُسمّى **حيوانات خارجية الحرارة Ectotherm**. تمتلك الحيوانات داخليّة الحرارة توصيلًا حراريًّا مُنخفضًا بسبب آليات العزل التي تمتلكها، أما الحيوانات خارجية الحرارة فتمتلك توصيلًا حراريًّا عاليًا، وتفتقر إلى العزل.

يُمثل هذان المُصطلحان النهايتين المثاليتين لطيف التّنظيم الحراري الفسيولوجي وللتَّكيُّفات. إنَّ كثيرًا من الحيوانات تقع بين هاتين النِّهايتين، ويمكن اعتبارها حيوانات **متباينة الحرارة Heterotherms**. إنها مسألة حكم كيف يُصنَّف حيوان مُعيَّن إذا امتلك خصائص من كلتا المجموعتين.

تُنظِّم المخلوقات خارجية الحرارة درجة حرارة جسمها بالسّلوك

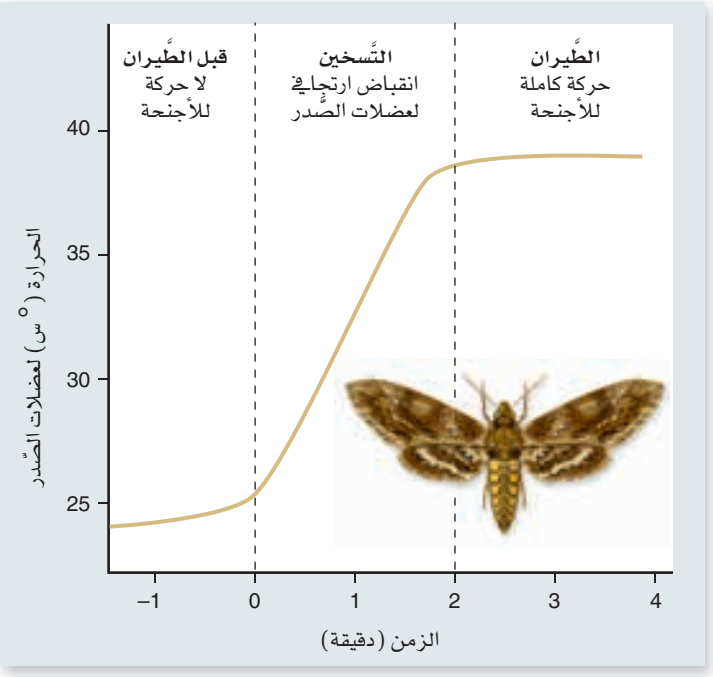
على الرغم من أنَّ المخلوقات الحية خارجية الحرارة تمتلك مُعدلات أيضية مُنخفضة، فإنها قادرة على تنظيم درجة حرارة جسمها من خلال السّلوك. تستخدم مُعظم اللافقريات السّلوك لتُعدِّل درجة



الشكل 50-1

طرق انتقال الحرارة. تُكتَسب الحرارة، وتُفقَد عن طريق التَّوصيل، والحمل، والإشعاع. ويمكن للحرارة أن تُفقَد عن طريق تبخُّر الماء من على سطح الحيوان.

openkandil.com



الشكل 50–2

التّنظيم الحراري في الحشرات. بعض الحشرات، مثل العث المجنح، تعمل على انقباض عضلات الصّدر لتسخّن جسمها (الإحماء) من أجل الطَّيران.

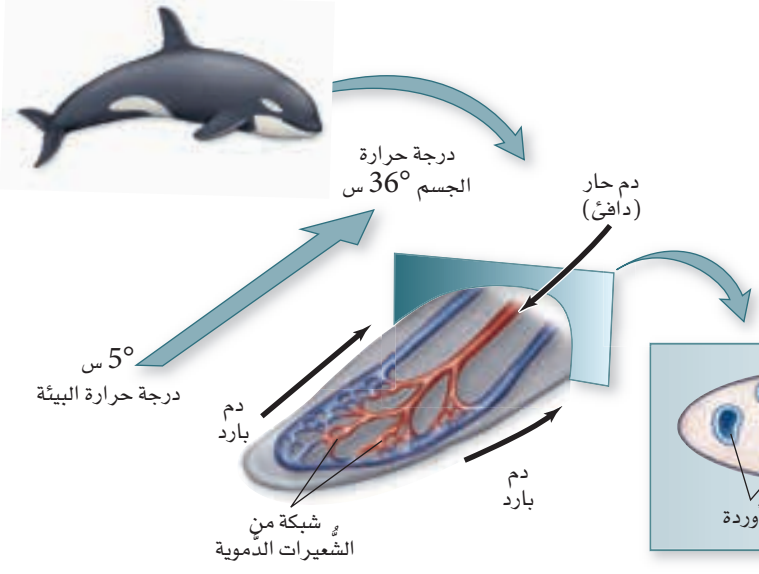
استقصاء

لماذا تتوقف الزّيادة في حرارة العضلات بعد دقيقتين؟

حرارة جسمها. فالكثير من الفراشات، مثلًا، يجب أن تصل درجة حرارة جسمها إلى درجة حرارة مُعينة قبل أن تكون قادرة على الطّيران. في الصّباح عندما تكون درجة الحرارة مُنخفضة، توجّه الفراشات أجسامها مُحاولةً امتصاص أكبر ما يمكن من أشعة الشّمس. تستخدم الفراشات والكثير من الحشرات ردّ الفعل الارتجافي لتُسخّن عضلات الصّدر المُستخدمة في الطّيران؛ لتمكنها من عملية الطّيران (الشكل 50–2).

الشكل 50–3

التّبادُل الحراري باستخدام التّيار المُتعاكس. الكثير من الحيوانات البحريّة، مثل هذا الحوت القاتل، يحدّ من فقدان الحرارة إلى الماء البارد باستخدام التّبادُل الحراري عن طريق التّيار المُتعاكس. يُضخّ الدّم الدافئ من داخل الجسم (مركز الجسم) إلى الشّرايين التي تفقد الحرارة إلى الدّم البارد القادم من الجلد (أطراف الجسم) عن طريق الأوردة. يُسخّن هذا الدّم الوريدي القادم من الجلد، ولهذا، فإنّ مركز الجسم يبقى مُحافظًا على درجة حرارة ثابتة على الرغم من الماء البارد المُحيط بالجسم، ويعمل على تبريد الدّم الشّرياني. ولهذا، فإنّه يفقد حرارة أقل عندما يصل هذا الدّم الشّرياني إلى قمم الأطراف.



الفقريّات من غير الثّدييّات والطّيور هي أيضًا خارجية الحرارة، ومن ثم تعتمد درجة حرارة أجسامها بشكل كبير أو قليل على درجة حرارة البيئة المُحيطة بها. هذا لا يعني أنّ هذه الحيوانات لا تستطيع المُحافظة على درجة حرارة عالية وثابتة لأجسامها، ولكن يجب عليها أن تستخدم سلوكا مُعيّنًا لعمل ذلك. كثير من الفقريّات خارجية الحرارة لديها القدرة على المُحافظة على ثبات درجة حرارتها، ومن ثم تُعَدُّ حيوانات ذاتية الحرارة ذات دم بارد Homeothermic ectotherms.

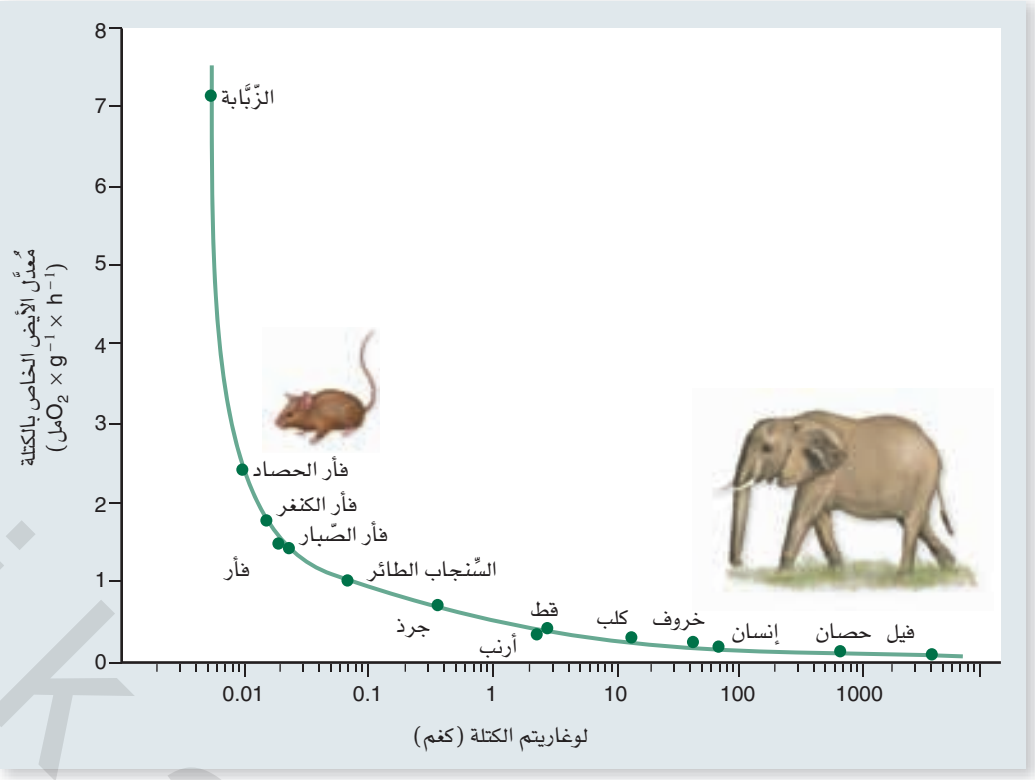
فمثلًا، بعض الأسماك الكبيرة، مثل التونا، وسمك السيف، وبعض أنواع سمك القرش، تستطيع المُحافظة على أجزاء من جسمها على درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الماء. تقوم بذلك عن طريق التّبادُل الحراري باستخدام **التّيار المُتعاكس Countercurrent heat exchange**. هذا الدّوران التّكيُّفي، يسمح للدّم البارد في الأوردة أن يسخن من خلال الإشعاع الحراري الصّادر من الدّم الدافئ الموجود في الشّرايين المُجاورة لهذه الأوردة. تحمل الشّرايين دمًا أكثر سخونة قادمًا من مركز الجسم (الشكل 50–3).

تُحاول الزّواحف المُحافظة على درجة حرارة الجسم ثابتة من خلال مجموعة من الوسائل السّلوكية- بوضع أنفسها في أماكن تسقط عليها أشعة الشمس، أو في أماكن فيها ظل. تستطيع بعض الزّواحف زيادة تأثير التّنظيم السلوكي عن طريق التّحكُّم في تدفّق الدّم. تستطيع الحيوانات البحريّة زيادة أو تقليل مُعدَّل ضربات القلب، وتوسيع أو تضييق الأوعية الدّموية لتنظيم كمية الدّم المُتوافرة لنَّقل الحرارة عن طريق التّوصيل. إنّ زيادة مُعدَّل ضربات القلب، وتوسيع الأوعية الدّموية، يسمح لهذه الحيوانات بزيادة درجة الحرارة، عندما تكون على اليابسة، في حين يقلّل نقصان مُعدَّل ضربات القلب وانقباض الأوعية الدّموية، من فقدان الحرارة عند قيام الحيوان بالغوص من أجل الغذاء.

بشكل عام، تمتلك المخلوقات خارجية الحرارة مُعدَّل أيض مُنخفضًا، الذي يُعَدُّ ذا فائدة لها، حيث يتطلّب كمية أقل من الطّاقة المُتناولة (الغذاء). لقد قُدّر أن السّحالي (خارجية الحرارة) تحتاج فقط إلى 10% من الغذاء مُقارنةً مَعَ الفئران (داخليّة الحرارة) المُشابهة لها في الحجم. لكن ثمن ذلك هو عدم قدرتها على القيام بنشاط يحتاج إلى طاقة كبيرة مدة طويلة.

المخلوقات داخليّة الحرارة تنتج حرارة أيضية داخليّة للمُحافظة على درجة حرارة الجسم أو للتّخلص منها

تستخدم المخلوقات داخليّة الحرارة الحرارة الأيضيَّة الدّاخليّة لرفع درجة حرارة المخلوق إذا كان الجسم باردًا، وتمثل مصدر حرارة يجب تبديده عند درجة الحرارة العالية.



الشكل 50-4

العلاقة بين كتلة الجسم ومُعدَّل الأيض للثدييات. الحيوانات الصغيرة تمتلك مُعدَّل أيض عاليًا لكلّ وحدة من كتلة الجسم مُقارنة بالحيوانات الكبيرة. في الشكل، مُعدَّل الأيض الخاص بالكتلة (يُعبَّر عنه بكمية استهلاك الأكسجين لكلّ وحدة كتلة) رُسِمَت مُقابل كتلة الجسم. لاحظ أنَّ محور كتلة الجسم هو بمقياس اللوغاريتم.

استقصاء

ماذا تستنتج من هذا الرَّسم بالنِّسبة للتَّحديات المُختلفة التي تُواجهها الثَّدييّات الصغيرة مُقابل الثَّدييّات الكبيرة في البيئات الحارة (الدَّافئة) والباردة؟

إنَّ أبسط استجابة تؤثّر في نقل الحرارة هي تنظيم كمية الدَّم المُتدفِّق إلى سطح الحيوان. توسُّع الأوعية الدَّموية يزيد من كمية الدَّم المُتدفِّق إلى السطح، الذي يزيد بدوره التَّبادُل الحراري، ويُبدِّدُ الحرارة. على العكس من ذلك، يقلّل انقباض الأوعية الدَّموية من كمية الدَّم المُتدفِّق إلى السّطح، ويُقلِّل من التّبادُل الحراري، مُقللًا بذلك كمية الحرارة المفقودة بسبب التّوصيل.

عندما ترتفع درجة حرارة البيئة المُحيطة، يستفيد الكثير من الحيوانات داخليّة الحرارة من عملية التَّبريد التَّبخيري على شكل تعرُّق، أو نفث البخار في أثناء اللَّهث. يوجد التَّعرُّق في بعض الثّدييّات، ومن ضمنها الإنسان، ويشتمل على الإخراج النَّشط للماء من الغُدد العرقية إلى سطح الجسم. عندما يتبخر الماء، يبرد الجلد، وهذا الانخفاض ينتقل بدوره إلى داخل الجسم عبر الشُّعيرات الدَّموية الموجودة عند سطح الجلد. إنَّ نفثَ البخار في أثناء اللَّهث آليةٌ تكيُّف مُشابهة تُستخدم من قبل بعض الثّدييّات والطّيور التي تعتمد على السطوح التَّنفسية لعملية التبريد التَّبخيري. يجب على الحيوان أن يتحمَّل فقدان الماء ليكون التَّبريد التَّبخيري فعّالًا.

إنَّ من فوائد حالة داخليّة الحرارة منح القدرة على القيام بنشاط يحتاج إلى طاقة كبيرة مدة طويلة. أما الثمن الذي تدفعه هذه المخلوقات الحية، فهو أنَّ مُعدَّل الأيض العالي يحتاج إلى أخذ كمية كبيرة من الطاقة (الغذاء) وبشكل مستمر.

حجم الجسم والعزل

الحجم من أهم العوامل التي تؤثّر في وظائف الحيوان. إنَّ التَّغيُّر في حجم الجسم يمتلك تأثيرًا كبيرًا في مُعدَّل الأيض. فالحيوانات الصغيرة تستهلك كمية أكبر من الطّاقة لكلّ وحدة حجم مُقارنة بالحيوانات الكبيرة. هذه العلاقة ملخصة في منحى «الفأر إلى الفيل» الذي يُبيِّن العلاقة بين مُعدَّل الأيض وحجم الثّدييّات (الشكل 50-4).

تكون مساحة سطح المخلوقات الصغيرة، التي تمتلك مُعدَّل أيض عاليًا، كبيرة مقارنةً بحجمها. يُشكِّل هذا الأمر، في البيئة الباردة، مُشكلة كبيرة لهذه الحيوانات، حيث لا تتمكَّن من إنتاج كمية كافية من الحرارة الدَّاخليّة لتُعادل كمية الحرارة المفقودة بالتَّوصيل عبر مساحة جسمها الكبيرة. لهذا، فإنَّ الحيوانات داخليّة الحرارة الصغيرة في البيئة الباردة تحتاج إلى عزل كبير؛ للمُحافظة على درجة حرارة جسمها. إنَّ كمية العزل يُمكن أن تتغير فصليًّا أو جغرافيًّا؛ حيث تزيد كثافة الغطاء على أجسام الحيوانات في الشمال وفي فصل الشتاء.

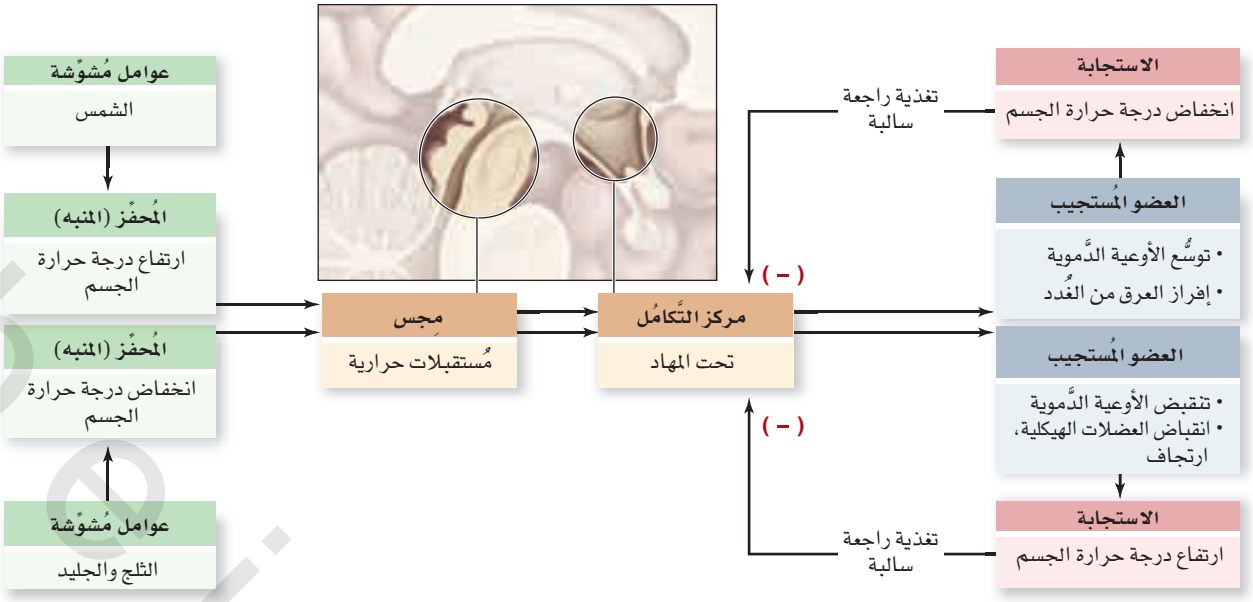
على العكس من ذلك، فإن الحيوانات الكبيرة في البيئات الحارة لديها عكس هذه المُشكلة. على الرغم من أنَّ مُعدَّل الأيض مُنخفض، فإنها تُنتج كمية كبيرة من الحرارة مَعَ امتلاكها مساحة سطح صغيرة تستخدمها لتبديد الحرارة عن طريق التَّوصيل. لهذا، فإنَّ الحيوانات الكبيرة (داخليّة الحرارة) في البيئات الحارة تمتلك القليل من العزل، وتستخدم السّلوك من أجل فقدان الحرارة، تمامًا مثل ما يقوم به الفيل من عملية تحريك للأذنين لزيادة فقدان الحرارة بالحمل.

التَّوليد الحراري

عندما تصل درجة الحرارة إلى أقل من شدة العتبة الحرجة، فإنَّ الاستجابات التي تقوم بها الحيوانات داخليّة الحرارة تكون غير كافية لرفع درجة حرارة جسم الحيوان. في مثل هذه الحالة، تلجأ الحيوانات إلى ما يُسمّى **التَّوليد الحراري Thermogenesis**، أو استخدام عمليات الأيض الطّاقية العادية لإنتاج الحرارة. يأخذ التَّوليد الحراري شكلين: التَّوليد الحراري الارتجافي والتَّوليد الحراري غير الارتجافي.

في التَّوليد الحراري غير الارتجافي، تتحول عمليات أيض الدُّهون لإنتاج الحرارة بدلًا من إنتاج أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP). يحدث هذا النَّوع من التَّوليد الحراري في أنحاء الجسم المُختلفة، لكن في بعض الثّدييّات، هناك بعض المُستودعات الدُّهنية الخاصة التي تُسمّى الدُّهون البنية، حيث تُستخدم لهذا الهدف. تُخزَّن هذه الدُّهون البنية في أماكن صغيرة في الرَّقبة وبين الكتفين، وتكون عالية التَّروية الدَّموية، وتسمح بنقل فعّال للحرارة من أماكن إنتاجها.

في حين يستخدم التَّوليد الحراري الارتجافي العضلات لتوليد الحرارة دون إنتاج شغل مُفيد. يحدث هذا النَّوع في بعض الحشرات، كما ذُكر سابقًا في المثال الخاص بتسخين عضلات الطّيران في الفراشة، وفي الفقريّات من نوع الحيوانات داخليّة الحرارة. يتضمَّن الارتجاف استخدام عضلات مُتضادّة لإنتاج مُحصلة حركة قليلة، لكن هذا يُحدِث تحلُّلًا لجزيئات أدينوسين ثلاثي الفوسفات، وبذلك تُنتج الحرارة اللازمة للتَّسخين.



الشكل 50-5

التَّحكُّم في درجة حرارة الجسم عن طريق تحت المِهاد. المُستقبلات الحرارية المركزية في الدِّماغ وفي البطن الأمامي تجس التَّغيُّر في درجة حرارة الجسم. هذه المُستقبلات الحرارية تصنع شقًّا تشابكيًّا (اتصالًا) مَعَ الأعصاب في تحت المِهاد، الذي يعمل بوصفه مركز تكامل للمعلومات وتجميع لها. يتحكّم تحت المهاد بعد ذلك في الأعضاء المُستجيبة مثل الأوعية الدَّموية والغُدد العرقية عن طريق الأعصاب الودّية. أيضًا، يُسبِّب تحت المهاد إطلاق هرمونات تحفِّزُ الغُدَّة الدَّرقية لإنتاج الثيروكسين الذي يُنظِّم عمليات الأيض في الجسم.

في الثّدييّات، يتحكم تحت المهاد في التّنظيم الحراري

تحتاج الثّدييّات التي تُحافظ على ثبات نسبي لدرجة حرارتها إلى جهاز تحكُّم (مُلخَّص في الشكل 50-5). يعمل هذا النظام مثل نظام التدفئة / التبريد في منزلك، الذي يمتلك جهاز تحكُّم في الحرارة (ثيرموست) مُتصل مَعَ الفرن المُنتج للحرارة، وجهاز التَّكييف الخافض للحرارة. يُحافظ مثل هذا الجهاز على درجة حرارة المنزل حول نقطة مُعيَّنة مُحدَّدة مُسبقًا، وذلك بالتبادل بين التسخين والتبريد كلما كان الأمر ضروريًّا.

عندما تزيد درجة حرارة الدم على 37° س، ترصد الخلايا العصبية الموجودة في تحت المهاد هذا التغيُّر في درجة الحرارة (انظر الفصلين الـ 44 و 46). يؤدي هذا إلى تنبيه مركز فقدان الحرارة *Heat-losing center* في تحت المهاد. تقوم الأعصاب الودّية الصادرة من هذه المنطقة بتوسيع الأوعية الدَّموية الطرفية، جالبةً دمًا أكثر إلى السّطح للمُساعدة على تبديد الحرارة وفقدانها. تُحفز أعصاب ودية أُخرى إنتاج العرق، حيث يعمل هذا العرق على القيام بالتَّبريد التَّبخيري. يحدث هنا أيضًا تثبيطًا للهرمونات المُحفِّزة للتَّفاعلات الأيضية.

عندما تنخفض درجة حرارتك إلى أقل من 37° س، يقوم تحت المهاد بعمل مجموعة من العمليات المُضادة. تكون هذه العمليات تحت سيطرة مركز تحفيز الحرارة *Heat-promoting center*، الذي يملك أعصابًا ودّية تقوم بعمل انقباض للأوعية الدَّموية لتُقلِّل بذلك من فقدان الحرارة، وتُثبِّط عملية التَّبريد التَّبخيري الناتج عن التَّعرُّق. ويقوم أيضًا بتحفيز نُخاع الغدة الكظرية لإفراز إبينيفرين، والجزء الأمامي للغدة النخامية لإفراز الهرمون المُحفِّز لإفراز هرمون الغُدَّة الدَّرقية (TSH)، حيث يحفِّز هذان الهرمونان عمليات الأيض. في حالة TSH، يتم هذا بشكل غير مُباشر، حيث يحثّ هذا الهرمون الغُدَّة الدَّرقية على إفراز الثيروكسين، الذي يقوم بدوره بتحفيز عمليات الأيض (انظر الفصل الـ 46). يُحفِّز إبينفرين والأعصاب الودّية النَّسيج الدُّهني لإنجاز التَّوليد الحراري لإنتاج حرارة داخليّة أكثر. ومـــرةً أُخرى، عندما تعود درجة الحرارة لترتفع، تحدث هناك تغذية سالبة راجعة إلى تحت المهاد لتُقلِّل من الاستجابات التي تُنتِج الحرارة.

الحُمّى

تُسمّى المواد التي ترفع درجة الحرارة **مولدات الحمى Pyrogens**، وهي تُسبِّب حالة تُسمّى **الحُمّى Fever**. تنتُج الحُمّى نتيجة تغيُّر في النُّقطة المُحدَّدة مُسبقًا للحرارة (النقطة المرجعية) Set point الطبيعية في الجسم إلى درجة أعلى. إنَّ كثيرًا من البكتيريا سالبة جرام تمتلك أجزاء في جدارها الخلوي تُسمّى السّمّ الداخلي (إندوتوكسين) وتعمل مثل مولدات الحمى. بعض المواد التي تُفرز من خلايا الدم البيضاء أيضًا تعمل مثل مولدات الحمى. تعمل مولدات الحمى على تحت المهاد لتزيد من درجة الحرارة المُحدَّدة مُسبقًا.

تبدو القيمة التّكيّفية للحُمّى أنها ترفع من درجة الحرارة لتُقلِّل من نمو البكتيريا. إنَّ الأدلة على ذلك جاءت من مُلاحظة أنَّ بعض الحيوانات مُتغيرة الحرارة تستجيب أيضًا لمولدات الحمى. عندما تُحقن الإيجوانة الصحراوية بالبكتيريا المُنتجة لمولدات الحمى، فإنها تقضي وقتًا أطول في الشمس، رافعةً بذلك درجة حرارة جسمها؛ ولهذا يُقال: إنها أنجزت حُمّى سلوكية.

هذه المُلاحظات قادتنا إلى إعادة التَّفكير في النظر إلى الحُمّى على أنها حالة يجب مُعالجتها طبيًّا. فالحُمّى تُعَدُّ استجابة طبيعية للعدوى، والعلاج لتخفيف الحُمّى ربما يعمل عكس هذا النِّظام الدِّفاعي الطبيعي. إنَّ الحُمّى العالية جدًا، على الرغم من ذلك، يمكن أن تكون خطيرة جدًا، وتُسبِّب أعراضًا تمتد من تشنُّجات إلى هلوسة.

السُّبات

تستطيع الحيوانات داخليّة الحرارة تقليل مُعدَّل الأيض ودرجة حرارة الجسم عن طريق دخولها في حالة من السُّكون تُسمّى **السُّبات Torpor**. تسمح هذه الحالة للحيوان بتقليل الحاجة إلى الغذاء، وذلك بتقليل العمليات الأيضية. بعض الطّيور، مثل الطائر الطَّنان تسمح لدرجة الحرارة في جسمها بالهبوط إلى 20° س في الليل. هذه الإستراتيجية موجودة في الحيوانات الصغيرة داخليّة الحرارة؛ الحيوانات الكبيرة تمتلك كتلة كبيرة من الصَّعب أن يتمّ لها تبريدٌ سريع كهذا.

البيات الشَّتوي Hibernation هو حالة قصوى من السُّبات الذي يصل إلى عدد من الأسابيع، أو حتى عدد من الأشهر. في هذه الحالة، تنخفض درجة حرارة الحيوان 20° س أقل من الدَّرجة المرجعية الطَّبيعية مدة طويلة من الوقت. الحيوانات التي تُمارس البيات الشَّتوي تمتلك حجمًا متوسطًا، أما الحيوانات الصَّغيرة داخليّة الحرارة فتستهلك الطاقة بسرعة أكبر مما تستطيع تخزينها، حتى لو قلَّلت من مُعدَّلات الأيض لها.

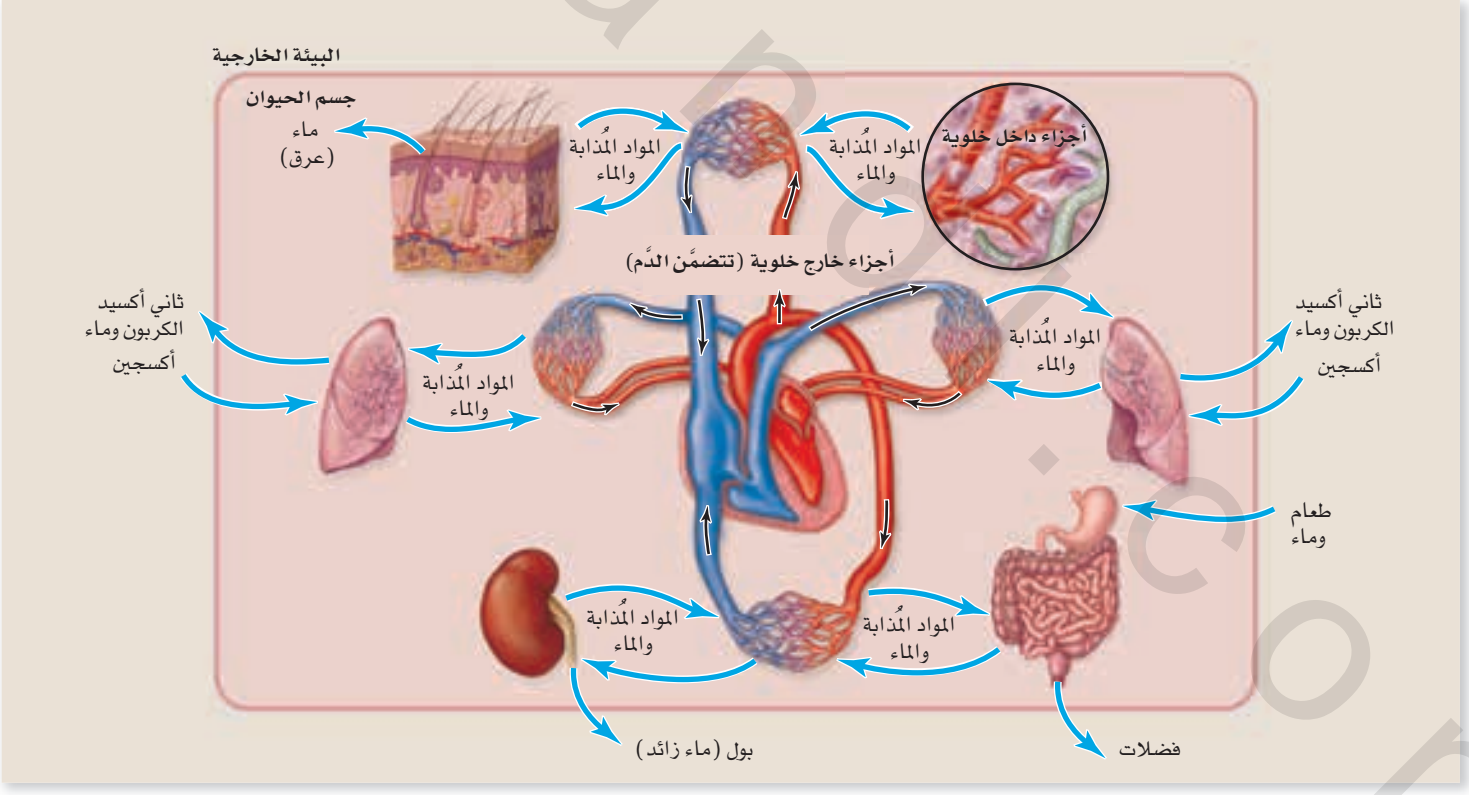
الثّدييّات الكبيرة جدًا لا تقوم ببيات شتوي. وقد اعتقد النّاس زمنًا طويلًا أنَّ الدّببة تنجز البيات الشتوي، ولكن درجة حرارتها تنخفض في الحقيقة بضع درجات. ولذلك، فهي تقوم بنوم شتوي طويل. وبسبب كتلتها الحرارية الكبيرة، وقلة مُعدَّل فقدان الطّاقة لديها، فإنها لا تحتاج إلى توفير الطّاقة الإضافية التي تستخدمها الحيوانات في البيات الشّتوي.

حرارة الجسم تُساوي الحرارة الناتجة إضافة إلى الحرارة المنقولة. تنتقل الحرارة عن طريق التَّوصيل، والحمل، والإشعاع، والتَّبخر. المخلوقات الحية التي تُولِّد طاقة، وتستطيع الحفاظ على درجة حرارة جسمها فوق درجة حرارة البيئة المُحيطة تُسمّى حيوانات داخليّة الحرارة. أما المخلوقات الحية التي تُطابق درجة حرارتها درجة حرارة البيئة المُحيطة فتُسمّى حيوانات خارجية الحرارة. هذان النَّوعان يستطيعان تنظيم درجة حرارة أجسامهما، لكن الحيوانات خارجية الحرارة تستخدم سلوكها بشكل رئيس لتقوم بذلك. تُحافظ التّدييّات على درجة حرارة جسمها ثابتة من خلال عمليات تنظيم يتحكم فيها تحت المهاد. تُستخدم دورتان من التَّغذية الراجعة السالبة لرفع درجة حرارة الجسم أو خفضها بحسب الحاجة.

2-50 المولارية الأسموزيّة والتّوازن الأسموزيّ

يتوزع الماء في المخلوقات متعددة الخلايا بين الأجزاء داخل الْخلويّة وخارج الْخلويّة (الشكل 50-6). للمُحافظة على التّوازن الأسموزيّ، يجب أن يكون الجزء الخارجي من جسم الحيوان (بما في ذلك بلازما الدَّم) قادرًا على أخذ الماء من البيئة المُحيطة، أو إفراز الماء الزَّائد إلى البيئة المُحيطة. يجب أن يتم تبادل الأيونات غير العضوية أيضًا بين سوائل الجسم خارج الْخلويّة والبيئة الخارجية للمُحافظة على الاتزان الداخلي. يحدث تبادُل المواد الإلكتروليتية بين الجسم والبيئة الخارجية عبر خلايا طلائية مُتخصِّصة، وفي مُعظم الفقريّات، من خلال عملية التَّرشيح في الكليتين.

تحافظ مُعظم الفقريّات على الاتزان الداخلي بالنِّسبة إلى مجموع تركيز المواد المُذابة في السَّائل خارج الخلوي، وتركيز بعض الأيونات الخاصّة. الصوديوم (Na^+) هو الأيون الموجب الرّئيس في السوائل خارج الْخلويّة، والكلور (Cl^-) هو الأيون السالب الرّئيس في السوائل خارج الْخلويّة. الأيونات الموجبة ثنائية الشّحنة،



الشكل 50-6

التَّفاعلات بين الأجزاء بين الْخلويّة وخارج الْخلويّة للجسم والبيئة الخارجية. يُكتسب الماء إلى داخل الجسم من البيئة أو يُفقد إلى البيئة. يتم تبادُل الماء والمواد المُذابة بين السوائل خارج الْخلويّة من الجسم والبيئة، ويحدث هذا عبر الخلايا الطِّلائية، ويمكن أن تُرشَّح جزيئات الماء والمواد المُذابة إلى خارج الجسم عن طريق الكليتين. بشكل عام، يجب أن تكون كمية الماء والمواد المُذابة الداخلة للجسم والخارجة منه مُتعادلة؛ كي نُحافظ على الاتزان الداخلي.

مثل الكالسيوم (Ca^{2+}) والماغنسيوم (Mg^{2+}) وأيون البوتاسيوم (K^{+}) أُحادي الشّحنة الموجب، وأيونات أُخرى، أيضًا تمتلك وظائف مُهمة، ويجب المُحافظة عليها ضمن مستوى ثابت.

الضّغط الأسموزيُّ مقياسُ فرقِ التركيز

لقد درست في (الفصل الـ 5) أنَّ **الخاصية الأسموزيّة Osmosis** هي انتشار الماء عبر غشاء شبه مُنفِّذ. تحدث الخاصّية الأسموزيّة من المحلول المُخفَّف (يحتوي على تركيز قليل من المُذاب) إلى محلول أقل تخفيفًا (يحتوي على تركيز عالٍ من المُذاب). **والضّغطُ الأسموزيّ للمحلول Osmotic pressure** هو مقياسُ ميل المحلول لأخذ الماء عن طريق الخاصية الأسموزيّة، وهو مقدار الضّغط المُتولد من حركة الماء.

المحلول الذي يمتلك تركيزًا عاليًا من المُذاب يمتلك ضغطًا أسموزيًّا مرتفعًا. يُقاس هذا **بالمولارية الأسموزيّة للمحلول Osmolarity**، وهي عدد المولات النَّشيطة أسموزيًّا للمُذاب لكلّ لتر من المحلول. لاحظ أنَّ المولارية الأسموزيّة يمكن أن تختلف عن التَّركيز المولي (الجزيئي) Molar concentration إذا كان المُذاب قادرًا على التَّفكك في المحلول إلى أكثر من جزيء نشط أسموزيًّا. فمثلًا، محلول من السكروز تركيزه المولي يساوي 1 له مولارية أسموزية تساوي 1 أوسمول Osmolar. لكن محلول NaC1 الذي تركيزه المولي يساوي 1 له مولارية أسموزيّة تساوي 2 أوسمول، حيث يتحلَّل إلى أيونين نشطين أسموزيًّا.

التَّوترية Tonicity للمحلول هي مقياس قدرة هذا المحلول على تغيير حجم الخليّة عن طريق الخاصية الأسموزيّة. إذا وُضِعت الخليّة الحيوانية في محلول ذي **تركيز عالٍ من المُذاب Hypertonic** فإنها تفقد الماء للمحلول المجاور، وتنكمش. بالمُقارنة، إذا وُضعت الخليّة الحيوانية في محلول ذي **تركيز قليل من المُذاب Hypotonic** فإنها تكتسب الماء، وتتمدَّد. ولكن إذا وُضعت الخليّة الحيوانية في **محلول مُتعادل Isotonic** فلا تكون هناك مُحصِّلة لحركة الماء. في العلاجات الطِّبية، تُستخدم المحاليل المُتعادلة مثل المحلول الملحي و 5% ديكتروز لغمر الأنسجة المكشوفة، وتُعطَّى أيضًا بوصفها محاليل في الأوردة مُباشرةً.

المخلوقات المُتطابقة مَعَ بيئتها أسموزيًّا

تعيش في بيئات بحرية

في مُعظم اللافقريات الْبحريّة، تكون المولارية الأسموزيّة للسوائل في أجسامها مُشابهة لمياه البحر (على الرغم من أنَّ تركيز بعض الأيونات، مثل الماغنسيوم، غير متساوٍ). وحيث إنَّ السوائلَ خارج الْخلويّة مُتعادلةٌ مَعَ ماء البحر، فلا يوجد فرق أسموزي، ولهذا لا يوجد ميل للماء لمُغادرة أو دخول أجسام هذه المخلوقات. تُدعى هذه المخلوقات الحية المخلوقات **مُتطابقة الأسموزية Osmoconformers**، وهي مُتعادلة أسموزيًّا مَعَ البيئة المُحيطة بها.

من بين الفقريّات، تُعدّ أسماك الجرِّيث البدائية وحدها من المخلوقات مُتطابقة الأسموزية مَعَ بيئتها. أسماك القرش وأقاربها في طائفة الغضروفيات (الأسماك الغضروفية) تمتلك محاليل مُتعادلة مَعَ ماء البحر، حتى لو أنَّ مستوى كلوريد الصوديوم في دمها أقل من ماء البحر؛ هذا الاختلاف في المولارية الأسموزيّة الْكلية يُعوَّض بتجميع البولينا، كما سيُناقش لاحقًا.

المخلوقات المُنظِّمة للأسموزية

تتحكم في المولارية الأسموزيّة داخليًّا

الفقريّات الأخرى كلها مخلوقات **مُنظِّمة للأسموزية Osmoregulators** أي إنَّها قادرة على الحفاظ على المولارية الأسموزيّة ثابتة تقريبًا للدَّم على الرغم من الاختلاف في التَّركيز مَعَ البيئة المُحيطة. هذه القُدرة مَكَّنت الفقريّات من اكتشاف مناطق بيئية مُختلفة والدخول إليها. لكن تحقيق هذا الثَّبات يحتاج إلى تنظيم مُستمر.

فقريات المياه العذبة تمتلك تركيزًا عاليًا من المُذاب في سوائل جسمها مُقارنةً مَعَ الماء المُحيط. بمعنى آخر، تُعَدّ ذات تركيز عالٍ بالنِّسبة إلى مُحيطها. وحيث إنَّ خلاياها تمتلك ضغطًا أسموزيًّا مرتفعًا، فإنّ الماء يميل للدُّخول إلى داخل أجسامها. تبعًا لذلك، تكيَّفت هذه المخلوقات الحية لمنع الماء من الدُّخول إلى أجسامها قدر المُستطاع، وللتَّخلص من الماء الداخل. إضافة إلى ذلك، تفقد الفقريّات التي تعيش في المياه العذبة أيونات غير عضوية إلى بيئتها المُحيطة، ولهذا يجب أن تُعيدها إلى أجسامها عن طريق النَّقل النَّشط.

في المقابل، تكون مُعظم الفقريّات الْبحريّة ذات تركيز قليل من المُذاب مقارنةً مَعَ البيئة المُحيطة؛ تمتلك سوائل أجسام هذه المخلوقات ثُلث المولارية الأسموزيّة الموجودة في مياه البحر المُحيطة تقريبًا. لهذا، فإنَّ هذه المخلوقات تعيش تحت خطر فقدان الماء بالخاصيّة الأسموزيّة، لذلك كيَّفت هذه المخلوقات نفسها للحفاظ على الماء لمنع جفاف أجسامها. للحفاظ على الماء. تشرب هذه المخلوقات ماء البحر، وتتخلَّص من الأيونات الزَّائدة من خلال الكليتين والخياشيم.

تحتوي سوائل الجسم في الفقريّات التي تعيش على اليابسة كمية أكبر من الماء مُقارنة مَعَ الهواء المُحيط بها. لهذا، فهي تفقد الماء إلى الهواء المُحيط عن طريق الجلد والرئتين عن طريق التَّبخر. تواجه الزَّواحف والطّيور والثّدييّات جميعها، وكذلك البرمائيات خلال وجودها على اليابسة هذه المشكلة. لقد طورت هذه المخلوقات الأجهزة البولية / المُنظِّمة للأسموزية لمُساعدتها في الحفاظ على الماء.

اللافقرياتُ الْبحريّةُ مخلوقاتٌ حيةٌ مُتطابقةٌ مَعَ بيئتها من النَّاحية الأسموزيّة، وتكون سوائل جسمها مُتعادلة مَعَ بيئتها. مُعظمُ الفقريّات مخلوقاتٌ مُنظِّمةٌ للأسموزية؛ إذ تكون السوائل في جسمها ذات تراكيز عالية أو مُنخفضة من المُذاب بالنِّسبة إلى البيئة المُحيطة. تُساعد الآليات الفسيولوجية مُعظم الفقريّات للمُحافظة على ثبات أسموزية الدَّم وتركيز الأيونات فيه.

3-50 الأعضاء المُنظِّمة للأسموزية

نشأت آليات مُختلفة في الحيوانات لمُجابهة التّوازن المائي. في كثير من الحيوانات، تكون إزالة الماء أو الأملاح من أجسامها مُترافقة مَعَ إزالة الفضلات الأيضية من خلال جهاز الإخراج، تمتلك الطلائعيات أُحادية الخليّة الفجوات المُنقبضة لهذا الغرض، مثلها مثل الإسفنجيات. الحيوانات الأُخرى مُتعدِّدة الخلايا تستخدم جهازًا للإخراج مُكوَّنًا من أُنيبيبات إخراجية تطرح السائل والفضلات من الجسم. إضافة إلى ذلك، هناك أجهزة دقيقة مُحكمة أُخرى موجودة في اللافقريات؛ الجهازُ الْبوليُّ في الفقريّات مُعقَّدٌ للغاية.

تستخدم اللافقريات خلايا وأُنيبيبات خاصة

في الدِّيدان المفلطحة، تتفرع أُنيبيبات تُسمّى **النفريديا الأولية Protonephridia** في أنحاء الجسم كلّه لتكون **خلايا لهبية Flame cells** تشبه الجزء الزجاجي من المصباح الكهربائي (الشكل 50-7). على الرغم من أنَّ هذه التراكيب الإخراجية البسيطة تفتح إلى خارج الجسم، فإنها لا تفتح إلى الداخل، بل تعمل حركة الأهداب في داخل الخلايا اللهبية على سحب السائل من الجسم إلى داخلها. يتم امتصاص الماء والمواد الأيضية بعد ذلك، وما تبقى، يُطرح إلى الخارج من خلال ثغور إخراجية.

تمتلك لافقريات أُخرى جهازًا من الأنيبيبات تفتح على خارج الجسم وفي داخله. في دودة الأرض، تُعرف هذه الأُنيبيبات **بالنفريديا Nephridia** (التَّركيب البرتقالي اللَّون في الشَّكل 50-8). تحصل النفريديا على السائل من التَّجويف الجسمي من خلال عملية ترشيح المواد إلى التَّركيب الشَّبيه بالقُمع والمُسمّى فم النفريديا *Nephrostome*. استُخدِم مُصطلح التَّرشيح هنا؛ لأنّ السائل يتكون تحت ضغط، ويمر من خلال فتحات صغيرة. ولهذا، لا تمرُّ جزيئات أكبر من حجم مُعيَّن. يُعَدُّ الراشح مُتعادلًا مَعَ السائل الموجود في تجويف الجسم السيلومي، وعندما يمرُّ هذا السائل بعد ذلك في الأُنيبيبات، تُزال جزيئات كلوريد الصوديوم بفعل عمليات النَّقل النَّشط.

إنَّ المُصطلح العام لعملية نقل المواد من الأُنيبيبات إلى السائل الجسمي المُحيط يُسمّى **إعادةَ الامتصاص Reabsorption**. وبسبب إعادة امتصاص الأملاح من الرَّاشح، يكون البول الخارج مخففًا أكثر من سوائل الجسم – أي إنَّ البول يحتوي على تركيز قليل من المواد المُذابة. تُنتج كليتا الرخويات والأعضاء الإخراجية في القشريات (المُسماة بغدد قرون الاستشعار *Antennal glands*) البولَ بعملية التَّرشيح، وتعود وتأخذ بعض الأيونات من الرَّاشح بعملية تُسمّى إعادةَ الامتصاص.

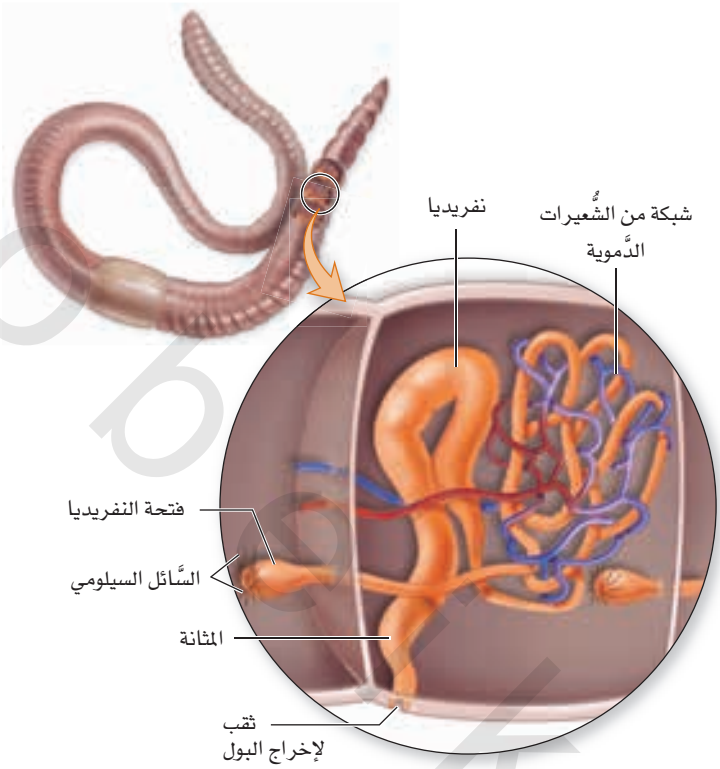
تمتلك الحشرات جهاز تنظيم أسموزيًّا فريدًا

الأعضاء الإخراجية في الحشرات تُسمّى **أنابيب ملبيجي Malpighian tubules** (الشكل 50-9)، وهي امتدادات للقناة الهضمية تتفرع من أمام المعدة الخلفية. لا يتكون البول هنا بعملية التَّرشيح في هذه الأُنيبيبات، حيث لا يوجد فرق في الضّغط بين الدَّم في تجويف الجسم والأُنيبيبات. بدلًا من ذلك، تُفرَز جزيئات الفضلات وأيونات البوتاسيوم إلى الأُنيبيبات من التَّجويف عن طريق النَّقل النَّشط.

الإفرازُ Secretion عمليةٌ مُعاكسةٌ لعملية إعادة الامتصاص- حيث تنتقل الأيونات والجزيئات من السائل الجسمي إلى الأُنيبيبات. إنَّ إفراز K^+ يُنتج فرقًا

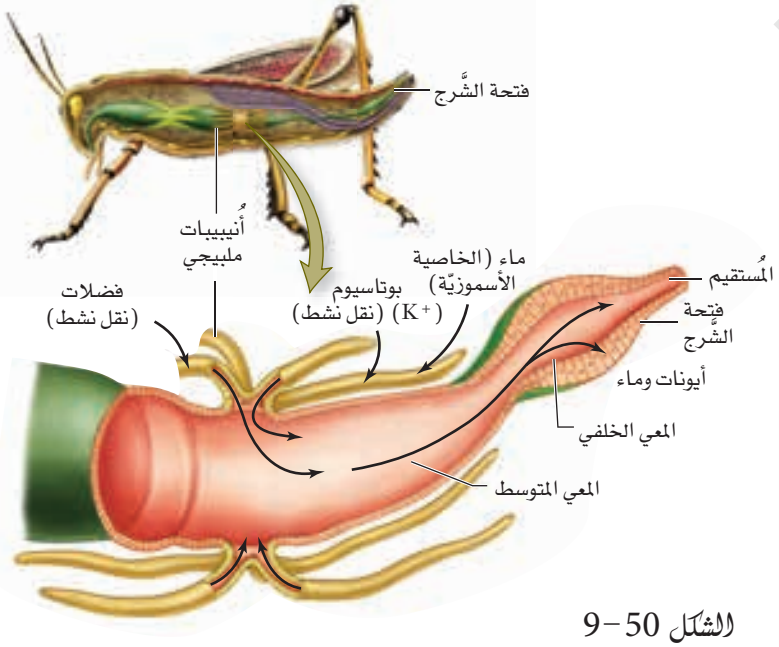
الشكل 50-7

النفريديا الابتدائية في الدِّيدان المُفلطحة. نظام من الأنابيب المُتشعِّبة، وخلايا لهبية تُشبه الجزء الزُّجاجي من المصباح، وثقوب إخراجية تُشكِّل النفريديا الابتدائية في الدِّيدان المفلطحة. الأهداب في داخل الخلايا اللهبية تسحب السوائل من الجسم إلى داخل الأنابيب بسبب حركتها. بعد ذلك، يتمُّ طرح المواد وإخراجها من خلال الثقوب التي تفتح خارج الجسم.



الشكل 50-8

النفريديا في الدِّيدان. مُعظم اللافقريات، مثل دودة الأرض المُبيَّنة هنا، تمتلك النفريديا (البرتقالي). تتكوَّن هذه النفريديا من أُنيبيبات تستقبل الرَّاشح من السائل السيلومي الذي يدخل عن طريق فتحة النفريديا التي تُشبه القمع. تتمّ إعادة امتصاص الأملاح من هذه الأُنيبيبات، والسائل الذي يتبقّى؛ البول، يتمّ طرحه من خلال فتحات إلى البيئة الخارجية.



الشكل 50-9

أُنيبيبات ملبيجي في الحشرات. أُنيبيباتُ ملبيجي هي امتداداتٌ للقناة الهضمية التي تجمَع الماء والفضلات من الجهاز الدَّوري في جسم الحشرة. يُفرز أيون البوتاسيوم إلى داخل هذه الأُنيبيبات، ويسحب معه الماء إلى داخلها عن طريق الخاصية الأسموزيّة. مُعظم هذا الماء (الأسهم) تتمّ إعادة امتصاصه عبر جدار المعي الخلفي.

أسموزيًّا يُسبِّب دخول الماء إلى الأُنيبيبات عن طريق الخاصية الأسموزيّة من الجهاز الدَّوري المفتوح. بعد ذلك، يُعاد امتصاص مُعظم الماء وأيونات البوتاسيوم إلى الجهاز الدَّوري من خلال المعدة الخلفية، فتتخلّف أجزاء صغيرة ونواتج الفضلات ليتِّم طرحُها من خلال المُستقيم مَعَ البُراز. تزوِّد أنابيب ملبيجي الحشرات بأداة فعالة جدًا للحفاظ على الماء.

تقوم كِليةُ الفقريّات بعمليات التَّرشيح ومن ثمَّ إعادة الامتصاص

كليتا Kidneys الفقريّات لا تُشبه أُنيبيبات ملبيجي في الحشرات، بل تُشكِّل سائلًا أنيبيبيًّا عن طريق عملية ترشيح الدَّم تحت الضّغط. إضافة إلى نواتج الفضلات والماء، يحتوي الرَّاشح على الكثير من الجزيئات الصغيرة، مثل الجلوكوز، والأحماض الأمينية، والفيتامينات، التي لها قيمة للحيوان. يُعاد امتصاص هذه الجزيئات، ومُعظم الماء من الأُنيبيبات إلى الدَّم، في حين تبقى الفضلات في الرَّاشح. يمكن أن تُفرز فضلات أُخرى إلى الأُنيبيبات، وتُضاف إلى الرَّاشح، ومن ثم يتمّ التَّخلص من البول المحتوي على نواتج الفضلات.

4-50 تطور كِلْية الفقريّات

الكِليةُ عضوٌ مُعقدٌ مكوَّن من آلاف وحدات متكررة تُدعى **الوحدات الأنبوبية الكلوية Nephrons**، كلّ واحدة منها تمتلك التواء يمتد إلى نخاع الكِلية (موضَّح بالرَّسم في الشكل 50-10). يدفع ضغط الدَّم السائل في الدَّم إلى الخروج من مجموعة من الشُّعيرات الدَّموية تُدعى الكُبَّة *Glomerulus* إلى داخل محفظة بومان *Bowman's capsule*، وهي بداية جهاز الأُنيبيبات. تسمح هذه العملية بترشيح الدَّم لتُكوِّن الراشح الذي يُعدَّل عند مروره بباقي الوحدة الأنبوبية الكلوية. تُحافظ الكبة على خلايا الدَّم، والبروتينات، والجزيئات الكبيرة المُفيدة الأُخرى، وتبقيها في الدَّم، إلا أنها تسمح للماء، والجزيئات الصغيرة والفضلات. عندما يمر الراشح في الوحدة الأنبوبية الكلوية، يتم إعادة امتصاص المواد الغذائية والأيونات من الراشح عن طريق آليات النقل النَّشط والنقل السلبي، تاركةً الماء والفضلات الأيضية في الأنبوب لتخرج مَعَ البول. (تفاصيل هذه العملية ستُناقش في الجزء المقبل).

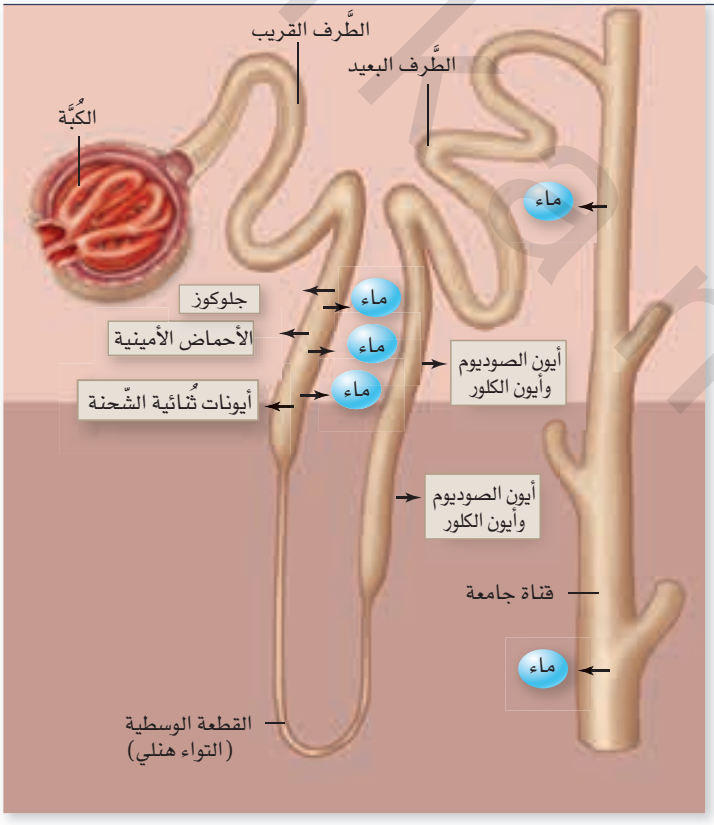
على الرغم من أنَّ كِلَى مُعظم الفقريّات مُتشابهة في تصميمها، فإن هناك بعض التغيُّرات والتعديلات التي حدثت في بعض الفقريّات. ولأنَّ الرَّاشحَ مُتعادلٌ من النّاحية الأسموزيّة مَعَ الدَّم، فإنَّ مُعظم الفقريّات تستطيع إنتاج بول مُتعادل التوتر مَعَ دمها عن طريق إعادة امتصاص الأيونات والماء بالتّساوي. أو، أنها قادرة على إنتاج بول قليل التَّركيز من المادة المُذابة مُقارنة بالدَّم -مخفف مقارنة مَعَ الدم- عن طريق إعادة امتصاص جزء قليل من الماء. تستطيع الطّيور والفقريّات فقط إعادة امتصاص ماء كافٍ من الراشح لإنتاج بول عالي التركيز من المواد المذابة مُقارنة مَعَ الدَّم، عن طريق إعادة امتصاص جزء كبير من الماء.

الأسماك التي تعيش في الماء العذب يجب أن تُحافظ على تركيز الأيونات المُذابة وتتخلص من الماء الزائد للخارج

يُعتقد أنّ الكِلْيَةَ قد نشأت في الأسماك العظمية التي تعيش في المياه العذبة. وحيث إنَّ سوائلَ جسم الأسماك التي تعيش في المياه العذبة عاليةُ التَّركيز بالمواد المُذابة مُقارنةً مَعَ الماء المُحيط، فإنّ هذه الحيوانات تواجه مشكلتين جادتين: الأولى، دخول الماء من الخارج إلى أجسامها، والثانية خروج المواد المُذابة من أجسامها إلى الماء المحيط.

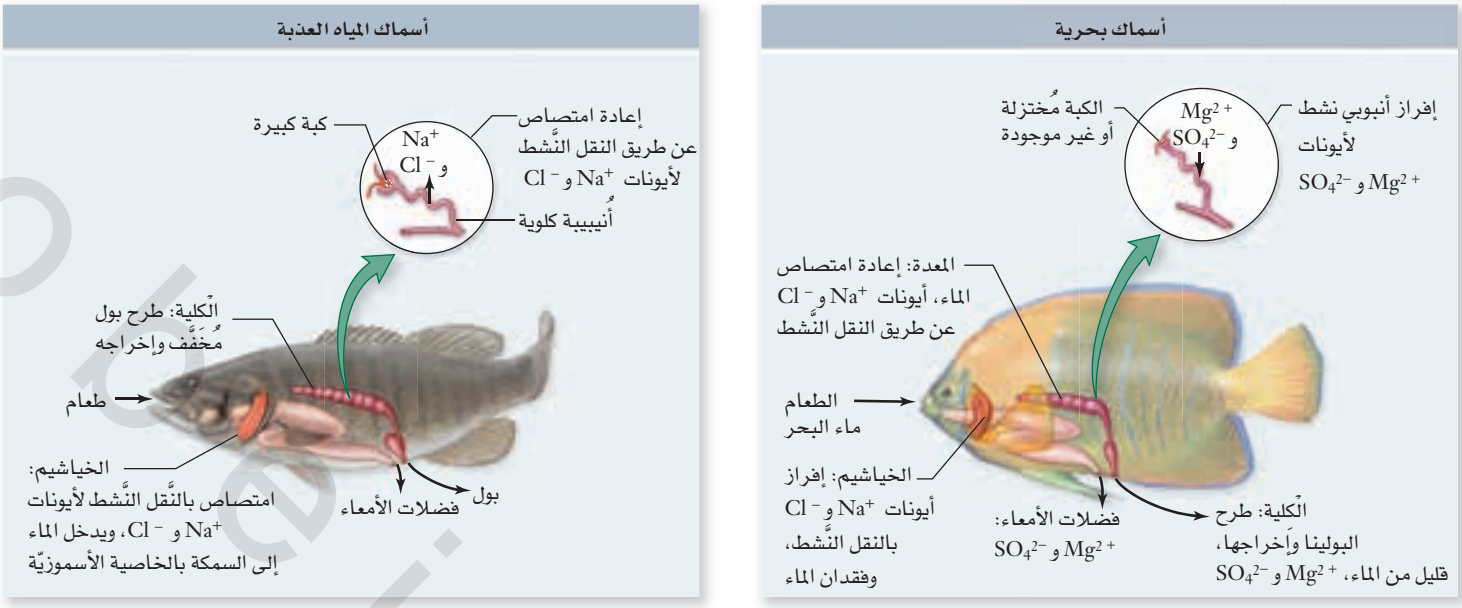
قد يبدو شاذًّا أن تقوم الكِلية في الفقريّات بترشيح كلّ شيء في بلازما الدَّم (ما عدا البروتينات، التي تمتلك حجمًا كبيرًا) ومن ثمَّ تُنفق الطّاقة لإعادة امتصاص المواد التي يحتاج إليها الجسم. إلا أنَّ عملية إعادة الامتصاص المُتخصِّصة تُعطي مرونة أكبر. وهناك مجموعات مُتنوِّعة من الفقريّات طوَّرت القُدرة على إعادة امتصاص جزيئات مُهمة من بيئتها التي تعيش فيها. هذه المرونة في عملية إعادة الامتصاص مكَّنت الفقريّات من العيش في بيئات مُختلفة كثيرة. فيما تبقى من هذا الفصل، سنُركِّز دراستنا على الكِلَيَةِ في الفقريّات وكيفية تخلُّصها من الفضلات، وخاصةً المُركبات النيتروجينية.

كثير من الفقريّات تُرشِّح السائل باستخدام نظام من الأُنيبيبات، ومن ثم تقوم بعمليات إعادة امتصاص للأيونات والماء، تاركةً نواتج الفضلات لطرحها إلى الخارج. تُصنِّع الحشرات السائل الإخراجي عن طريق إفراز أيونات البوتاسيوم ونواتج الفضلات إلى داخل الأُنيبيبات، ويتبع ذلك دخول الماء إلى الأُنيبيبات بالخاصّية الأسموزيّة. تُنتِج كِلْيَةُ الفقريّات الرَّاشح الذي يدخل الأُنيبيبات، ومن ثم يُعدَّل ليُكوّن بعد ذلك مادة البول.



الشكل 50-10

تنظيم الوحدة الأنبوبية الكلوية في الفقريّات. الوحدة الأنبوبية الكلوية هي تصميم تمَّ المُحافظة عليه في كلى الفقريّات المُختلفة. السُّكر، والأحماض الأمينية، والماء، والأيونات أُحادية الشّحنة، والأيونات ثنائية الشحنة يُعاد امتصاصها من خلال الطَّرف القريب؛ الماء والأيونات أُحادية الشحنة مثل الصوديوم والكلور تتمّ إعادة امتصاصها من خلال التواء هنلي؛ كمية مختلفة من الماء والأيونات أحادية الشحنة (الصوديوم، الكلور) يمكن امتصاصها من خلال الطَّرف البعيد والقناة الجامعة، اعتمادًا على تأثير الهرمونات.



الشكل 50-11

تواجه أسماك المياه العذبة والأسماك الْبحريّة مشكلات أسموزية مُختلفة. أسماكُ المياه العذبة ذات تركيز عالٍ من المواد المُذابة مُقارنةً مَعَ المياه التي تعيش فيها، أما الأسماك الْبحريّة، فهي ذات تركيز مُنخفض من المواد المُذابة مقارنةً مَعَ المياه التي تعيش فيها. لتعوِّض أسماك المياه العذبة ميلها لأخذ الماء إلى داخلها وفقدان الأيونات للخارج، عملت على طرح بول مُخفَّف، وعدم شرب الماء، وإعادة امتصاص الأيونات عبر أُنيبيبات الوحدة الأنبوبية الكلوية. لتعوِّض الأسماك الْبحريّة فقدان الماء بالخاصية الأسموزيّة، تشرب مياه البحر، وتزيل الأيونات الزائدة من خلال النقل النَّشط عبر الخلايا الطِّلائية في الخياشيم والْكِلية.

لمعالجة المُشكلة الأولى؛ تقوم الأسماك التي تعيش في المياه العذبة بعدم شرب الماء وإخراج كميات كبيرة من بول مُخفَّف يكون قليل التَّركيز للمواد المُذابة بالمقارنة مَعَ سوائل الجسم. ولمعالجة المُشكلة الثانية؛ قامت هذه الأسماك بإعادة امتصاص الأيونات من الرَّاشح في أثناء مروره بأُنيبيبات الوحدة الأنبوبية الكلوية وإعادتها إلى الدَّم. إضافة إلى ذلك، فهي تنقل الأيونات باستخدام النقل النَّشط عبر سطح الخياشيم من الماء المُحيط في اتجاه الدَّم (الشكل 50-11، يسار).

على الأسماك العظمية التي تعيش في مياه البحر المحافظة على الماء، وإخراج المواد الإلكتروليتية الزائدة

على الرغم من أنَّ مُعظم المجموعات الحيوانية نشأت في البداية في البحر، فإن الأسماك العظمية الْبحريّة ربما نشأت من أسلاف كانت تعيش في المياه العذبة. واجهت هذه الأسماك نوعًا جديدًا من المشكلات في عملية انتقالها من المياه العذبة إلى البحار؛ لأنها تمتلك سوائل قليلة التَّركيز للمواد الذائبة مُقارنة مَعَ مياه البحر. نتيجة لذلك، يُغادر الماء من أجسامها عن طريق الخاصية الأسموزيّة من خلال الخياشيم، وتفقد ماءً عن طريق البول. لتعويض هذا الفقدان في الماء، تشرب الأسماك الْبحريّة هذه كمية كبيرة من ماء البحر (الشكل 50-11، يمين).

إنَّ كثيرًا من الأيونات الموجبة ثنائية الشحنة (خاصةً، الكالسيوم والماغنسيوم) الموجودة في ماء البحر الذي تشربه الأسماك يبقى في الجهاز الهضمي، ويتمُّ التَّخلص منه عن طريق فتحة الشرج. على الرغم من ذلك، فإنَّ بعضها يتمُّ امتصاصه إلى الدَّم، إضافة إلى الأيونات أُحادية الشحنة مثل؛ البوتاسيوم، والصوديوم، والكلور. تنتقل مُعظم الأيونات أحادية الشحنة بالنَّقل النَّشط من الدَّم إلى الخارج عبر سطوح الخياشيم، في حين يتمُّ إفراز الأيونات ثنائية الشحنة التي دخلت الدَّم إلى الوحدة الأنبوبية الكلوية، ويتمُّ التَّخلص منها بعد ذلك عن طريق البول. باستخدام هاتين الطريقتين، تتخلص الأسماك العظمية الْبحريّة من الأيونات التي تحصل عليها من ماء البحر الذي تشربه. يكون البولُ الخارج من هذه الأسماك مُتعادلًا أسموزيًّا بالمُقارنة مَعَ سوائل الجسم لهذه الأسماك. ويكون هذا البول أكثر تركيزًا من البول الخارج من الأسماك التي تعيش في المياه العذبة، ولكنّه ليس مركزًا كما هو الحال في الطّيور والثّدييّات.

تضخُّ الأسماك الغضروفية المواد الإلكتروليتية إلى الخارج، وتمتص البولينا وتحتفظ بها

تُعَدُّ أسماك غضروفية الخياشيم، التي تضم أسماك القرش، وسمك شيطان البحر، أكثر تحت طائفة مشهورة من طائفة الأسماك الغضروفية. قامت أسماك غضروفية الخياشيم بحل مُشكلة الأسموزيّة التي تفرضها عليها البيئة الْبحريّة التي تعيش فيها بطريقة مُختلفة. بدلًا من أن تمتلك سوائل جسمية عالية التَّركيز من المواد المُذابة مقارنةً مَعَ ماء البحر، حيث يحتم عليها هذا أن تستمر في شرب ماء البحر وضخّ الأيونات عن طريق النَّقل النَّشط، فإنّ أسماك غضروفية الخياشيم تمتصُّ البولينا من أُنيبيبات الوحدة الأنبوبية الكلوية إلى الدَّم، وتُحافظ على تركيز البولينا في الدَّم أكثر 100 مرة مما هو في الثّدييّات.

تجعل إضافة البولينا دم أسماك غضروفية الخياشيم تقريبًا مُتعادل التَّركيز للمواد المُذابة مُقارنة مَعَ ماء البحر المُحيط. وبسبب عدم وجود محصلة انتقال للماء بين محلولين مُتعادلين من ناحية التَّركيز، فإنَّ فقدان الماء في هذه الحالة يكون معدومًا. نتيجةً لذلك، لا تحتاج هذه الأسماك إلى شرب ماء البحر للمُحافظة على التّوازن الأسموزيّ، ولا تزيل الخياشيم والكليتين في هذه الحيوانات كمية كبيرة من الأيونات من أجسامها. إن أنسجة الأسماك الغضروفية وأنزيماتها قادرة على تحمل التَّراكيز العالية للبولينا.

تمتلك البرمائيات والزواحف تكيفات أسموزية لبيئتها

البرمائياتُ أولُ الفقريّات التي عاشت على اليابسة. كِلْيةُ البرمائياتِ مُشابهةٌ لكِلْيَةِ الأسماكِ التي تعيش في المياه العذبة. لا غرابة في هذا؛ لأنَّ البرمائيات تقضي جزءًا من وقتها في المياه العذبة، وعندما تكون على اليابسة، فهي تبقى في الأماكن المُبلَّلة

والرَّطبة. تُنتج البرمائيات بولًا مخففًا جدًا، وتعوِّض ما تفقده من أيونات الصوديوم عن طريق نقل الصوديوم من الماء المُحيط عبر الجلد باستخدام النَّقل النَّشط.

من جهة أُخرى، تعيش الزواحف في بيئات متنوعة. الزواحف التي تعيش بشكل رئيس في المياه العذبة تعيش في بيئة مُشابهة للأسماك والبرمائيات التي تعيش في المياه العذبة، ومن ثم تمتلك كِلَيَةً مشابهة لهما. أما الزواحف الْبحريّة التي تضم بعض التماسيح، والزواحف المائية، والأفاعي الْبحريّة، ونوعًا واحدًا من السحالي، فإنها تمتلك كِليةً تُشبه ما تمتلكه أقاربها في المياه العذبة، إلا أنها تواجه مُشكلة مُعاكسة، حيث تميل لفقدان الماء وأخذ الأملاح إلى داخلها. ومثلها كمثل الأسماك العظمية الْبحريّة، فهي تشرب ماء البحر، وتطرح بولًا مُتعادلًا من النَّاحية الأسموزيّة. تتخلص الزواحف الْبحريّة من الأملاح الزائدة من خلال غُدد ملحية تقع بالقرب من الأنف أو العين.

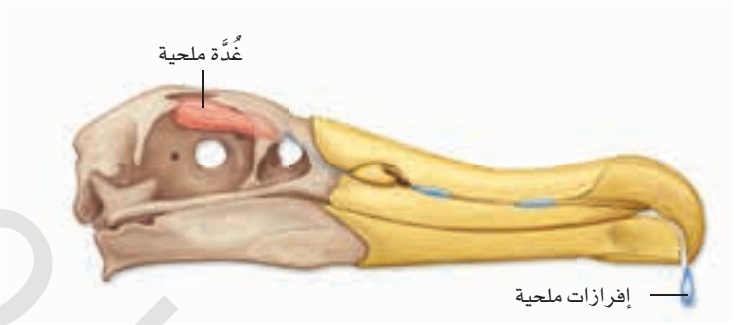
تقوم الْكِلْيتان في الزواحف التي تعيش على اليابسة أيضًا بإعادة امتصاص كثير من الأملاح والماء الى داخل أنيبيبات الوحدة الأنبوبية الكلوية، مُحافظةً بذلك على حجم الدَّم في البيئات الجافة. وهي كالأسماك والبرمائيات، لا تستطيع إنتاج بول أكثر تركيزًا من بلازما الدم؛ على الرغم من ذلك، فهي لا تفرز بولًا في الحقيقة، بل تطرح نواتج الكليتين في المذراق أو المجمَع (مخرج مشترك بين الجهاز الهضمي والْبوليّ)، حيث يُعاد امتصاص الماء مرة أخرى، وتخرج الفضلات مَعَ البراز.

تستطيع الثّدييّات والطّيور طرح بول مُركَّز وتحافظ على الماء

الطّيور والثّدييّات هي الفقريّات الوحيدة القادرة على إنتاج بول له تركيز أسموزي عالٍ مُقارنةً مَعَ سوائل الجسم. لهذا تكون هذه الثّدييّات قادرة على طرح نواتج فضلاتها مَعَ كميات قليلة من الماء، وتُحافظ بذلك أكثر على الماء في أجسامها.

تستطيع كِلْيةُ الإنسان إنتاج بول يكون تركيزه 4.2 أضعاف تركيز بلازما الدَّم، لكن كِلْيتي بعض الثّدييّات الأُخرى أكثر فعالية في حفظ الماء. فمثلًا، الجِمال والجرابيع والفئران من نوع *Perognathus* تستطيع إنتاج بول تركيزه 8، 14، 22 ضعف تركيز بلازما الدَّم لديها، على التَّوالي. إنَّ كليتي الجرذ الكنغاري (من نوع *Dipodomys*) فعّالة جدًا؛ لأنه لا يشرب ماء؛ ويستطيع الحصول على ما يريده من ماء من الطعام، ومن الماء الذي ينتُج عن عملية التَّنفس الخلوي الهوائي.

إنَّ إنتاج بول ذي تركيز عالٍ من المواد المُذابة يُنجَز عن طريق التواء هنلي *Henle loop* التّابع للوحدة الأنبوبية الكلوية (الشكل 50-10 و50-16)، والموجود فقط في الطّيور والثّدييّات. تعتمد درجة تركيز البول على طول التواء هنلي؛ تمتلك مُعظم الثّدييّات وحدات أنبوبية كلوية قصيرة (التواء هنلي قصير) وأُخرى ذات التواء هنلي طويل. مَعَ ذلك، تمتلك الطّيور عددًا قليلًا، أو لا تمتلك وحدات أنبوبية كلوية لها التواء هنلي طويل، لهذا فهي لا تنتج بولًا ذا تركيز عالٍ مُشابهًا لما تُنتجه الثّدييّات. في أقصى الحدود، تستطيع إعادة امتصاص ماء كافٍ لإنتاج بول ذي تركيز مُضاعف مُقارنةً بتركيز دمها. حلَّت الطّيور الْبحريّة مُشكلة فقدان الماء بشرب ماء مالح، ومن ثمَّ طرح الزَّائد من هذه الأملاح عن طريق غدد ملحية قريبة من العيون (الشكل 50-12).



الشكل 50-12

كيف تتخلَّص الطّيور الْبحريّة من الملح الزائد. تشرب الطّيور الْبحريّة مياه البحر، ومن ثم تطرح الملح الزائد من خلال الغُدد الملحية. السائل الملحي الشَّديد الذي يُطْرحُ من خلال هذه الغُدد يمرّ على طول المنقار إلى الخارج.

يذهب البول متوسط التَّركيز بالمواد المُذابة إلى المذراق بعد طرحه من الكليتين ليختلط مَعَ المواد البُرازية القادمة من القناة الهضمية. وإذا اقتضت الحاجة، فإنَّ كمية ماء إضافية يتم امتصاصها من خلال جدران المذراق، لينتج بعد ذلك بول على شكل مادة معجونية بيضاء شبه صلبة، أو على شكل حبيبات، يتمُّ التَّخلص منها إلى خارج الجسم.

الكليتان في الأسماك التي تعيش في المياه العذبة تطرح كمية وافرة من البول المُخفَّف جدًا؛ تشرب الأسماك العظمية الْبحريّة ماء البحر، وتطرح بولًا مُتعادلًا أسموزيًّا. إنَّ التصميم الأساسي، ووظيفة الوحدة الأنبوبية الكلوية للأسماك التي تعيش في الماء العذب حُوفظ عليها في الفقريّات التي تعيش على اليابسة. بعض التَّعديلات، مثل وجود التواء هنلي، سمحت للثدييات والطّيور بإعادة امتصاص ماء أكثر، وإنتاج بول ذي تركيز عالٍ بالمواد المذابة مُقارنة مَعَ سوائل الجسم.

5-50 الفضلات النيتروجينية: الأمونيا، واليوريا (البولينا)، وحمض اليوريك (البوليك)

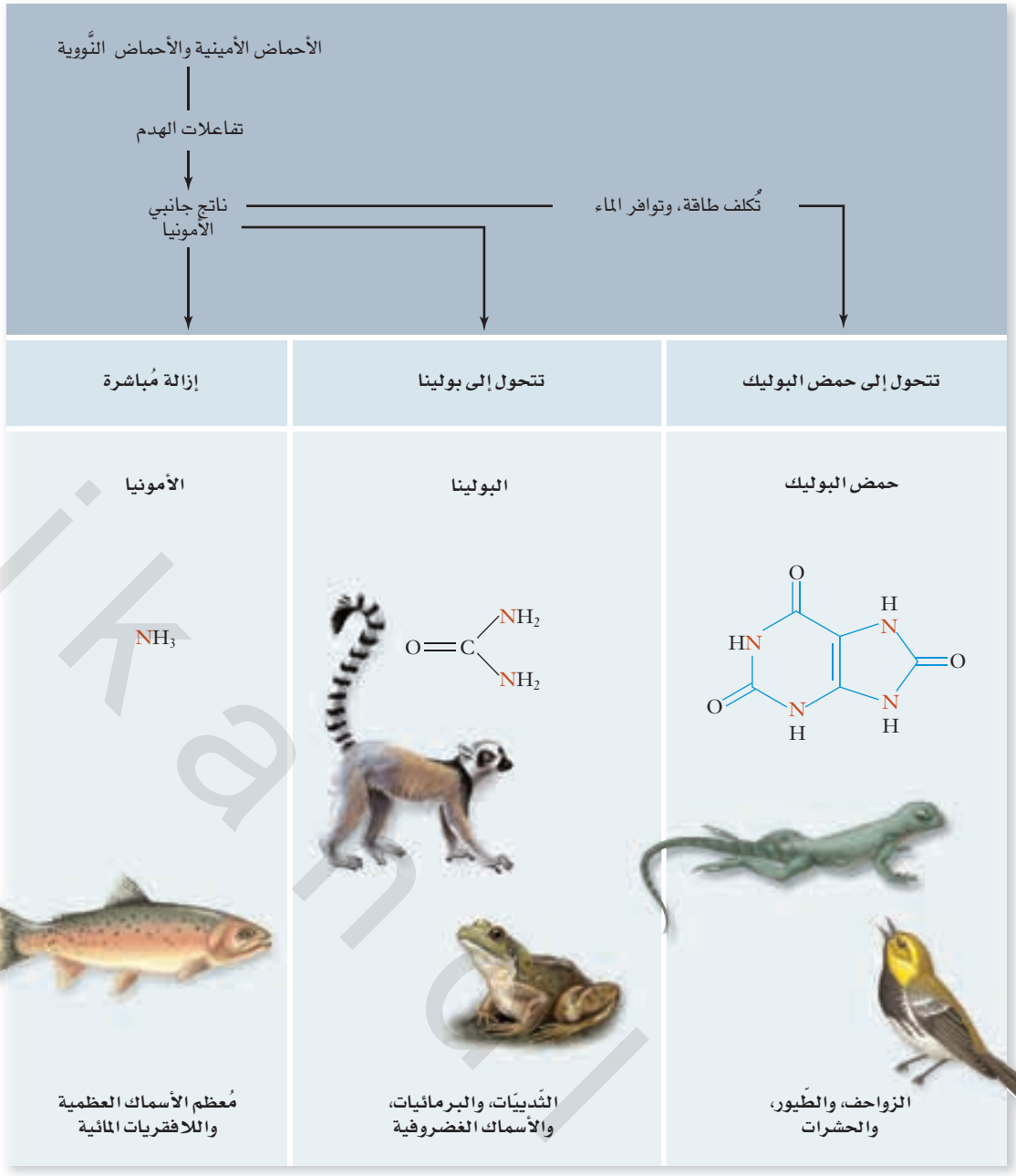
الأحماض الأمينية والأحماض النووية جزيئاتٌ مُحتوية على النيتروجين. عندما تحطّم بعض الحيوانات هذه الجزيئات لإنتاج طاقة، أو تحويلها إلى كربوهيدرات، أو دهون، فإنَّها تُنتِج نواتج جانبية مُحتوية على النيتروجين تُسمّى **الفضلات النيتروجينية Nitrogenous wastes** (الشكل 50-13) التي يجب على الجسم التخلص منها.

الأمونيا مُرَكَّبٌ سام يجب التخلُّص منه بسرعة

إنَّ أولَ خطوة في عمليات أيض كلٍّ من الأحماض الأمينية والأحماض النووية، هي إزالةُ مجموعة الأمين ($—NH_2$)، ومن ثمَّ اتحادها في الكبد مَعَ أيون الهيدروجين (H^+) لتكوين **الأمونيا Ammonia** (NH_3). الأمونيا سامة جدًا للخلايا، ولهذا فهي آمنةٌ فقط عندما يكون تركيزها قليلًا جدًا. إنَّ التخلُّص من الأمونيا ليس مُشكلة في الأسماك العظمية واليرقات البرمائية، حيث تتخلص منها عن طريق الانتشار من خلال الخياشيم وبدرجة أقل عن طريق البول المُخفَّف جدًا.

البولينا وحمض البوليك أقل سُميَّة. لكن لهما ذائبية مُختلفة

في الأسماك غضروفية الخياشيم، والبرمائيات البالغة، والثّدييّات، يتم التخلُّص من الفضلات النيتروجينية على شكل مُركّب أقل سُميَّة، وهو **البولينا Urea**.



الشكل 13–50

الفضلات النيتروجينية. عنـــدما تتمُّ عمليات الأيض على كلٍّ من الأحماض الأمينية والنَّووية، فإنَّ النَّواتج الجانبية لهذه التَّفاعلات تُكوِّن مُركب الأمونيا، الذي يُعَدُّ مركبًا سامًّا، لكن الأسماك تستطيع التَّخلُّص منه عن طريق الخياشيم. تحوّل الثّدييّات الأمونيا إلى بولينا، التي هي أقل سمية من الأمونيا. تحوّل الطّيور والزواحف التي تعيش على اليابسة الأمونيا إلى حمض البوليك، الذي يكون غير ذائب في الماء. إنتاج حمض البوليك أكثر الفضلات النيتروجينية كلفة إلا أنَّه يوفر ماء أكثر.

ذائبية البولينا جيدةٌ في الماء، ومن ثم يُمكن طرحها بكميات كبيرة في البول. يتمُّ حمل البولينا في مجرى الدَّم من الكبد، وهو مكان تصنيعها، إلى الْكِلية، ومكان طرحها إلى الخارج.

تتخلَّص الزواحف، والطّيور، والحشرات من الفضلات النيتروجينية على شكل **حمض البوليك Uric acid**، الذي هو قليل الذائبية في الماء. نتيجةً لقلة ذائبية حمض البوليك، فإنَّه يترسب، ويتمُّ التخلُّص منه بوجود كمية قليلة من الماء. يُشكِّل حمض البوليك المادة المعجونية البيضاء في بُراز الطّيور التي تُسمّى جوانو *Guano*. يُنفق الحيوان طاقة أكثر عند تصنيع حمض البوليك، لكن هذا الأمر يُعوَّض بالمُحافظة على الماء.

إنَّ القدرة على تصنيع حمض البوليك في هذه المجموعات من الحيوانات مهم؛ لأن بيوض هذه الحيوانات تُحاط بقشرة، ويتمُّ تجميع الفضلات النيتروجينية مَعَ نمو الجنين داخل البيضة. على الرغم من أنَّ تكوين حمض البوليك زاد في طول عملية التَّصنيع التي تحتاج إلى كمية أكبر من الطّاقة، إلا أنّه أنتج مُركبًا بلّوريًّا مُترسبًا.

إن حمض البوليك، بوصفه مادة صلبة مُترسبة، غير قادر على التّأثير في تطور الجنين حتى لو تمَّ تجميعه داخل البيضة. تنتج الثّدييّات أيضًا قليلًا من حمض البوليك، إلا أنَّه يكون ناتجًا بسبب عملية تحطيم البيورينات التابعة للنيوكليوتيدات، وليس من الأحماض الأمينية. تمتلك مُعظم الثّدييّات أنزيمًا يُسمّى يوريكيز *Uricase*، الذي يحوِّل حمض البوليك إلى مادة أكثر ذائبية تُسمّى **ألانتوين Allantoin**. الإنسان، والقرود، وبعض أنواع الكلاب التي تفتقر لهذا الأنزيم يجب أن تتخلَّص من حمض البوليك. في الإنسان، تسبب زيادة تراكم حمض البوليك في المفاصل مرضًا يُعرف بالنُّقرس *Gout*.

إنَّ التحطّيم الأيضي لكلٍّ من الأحماض الأمينية والنووية يُنتج الأمونيا بوصفها ناتجًا جانبيًا. يتمُّ التخلُّص من الأمونيا في الأسماك العظمية والبرمائيات ذات الخياشيم على هيئتها، ولكن في الفقريّات الأُخرى، تتحول الفضلات النيتروجينية إلى بولينا وحمض البوليك اللّذين يُعدّان أقل الفضلات النيتروجينية سُميَّة.

6-50 الْكِليةُ في الثّدييّات

الْكِليةُ في الإنسان هي ذلك العضو الذي يكون في حجم اليد، ويقع في أسفل الظهر. تستقبل كلّ كِلْيةٍ دمًا من الشِّريان الكلوي، ومن هذا الدَّم يتكوَّن البول. يُصبّ البول من كلّ واحدة من الكليتين في **الحالب Ureter**، الذي يحمل البول إلى **المثانة Urinary bladder**. يمرُّ البول إلى الخارج عن طريق **الإحليل Urethra** (الشكل 50-14).

في داخل الْكِلْيةِ، يتوسّع فم الحالب ليُكوِّن تركيبًا شبيهًا بالقمع، يُعرف **بحوض الْكلية Pelvis**. يمتلك حوض الْكِلية، امتدادات تُشبه الكؤوس تستقبل البول من النَّسيج الكلوي. يُقسَّم النَّسيج الكلوي إلى طبقة خارجية تُسمّى **القشرة الكلوية Renal cortex** وطبقة داخليّة تُسمّى **النُّخاع الكلوي Renal medulla**.

تمتلك الْكِليةُ ثلاث وظائف أساسية مُلخَّصة في الشَّكل 50-15، هي:

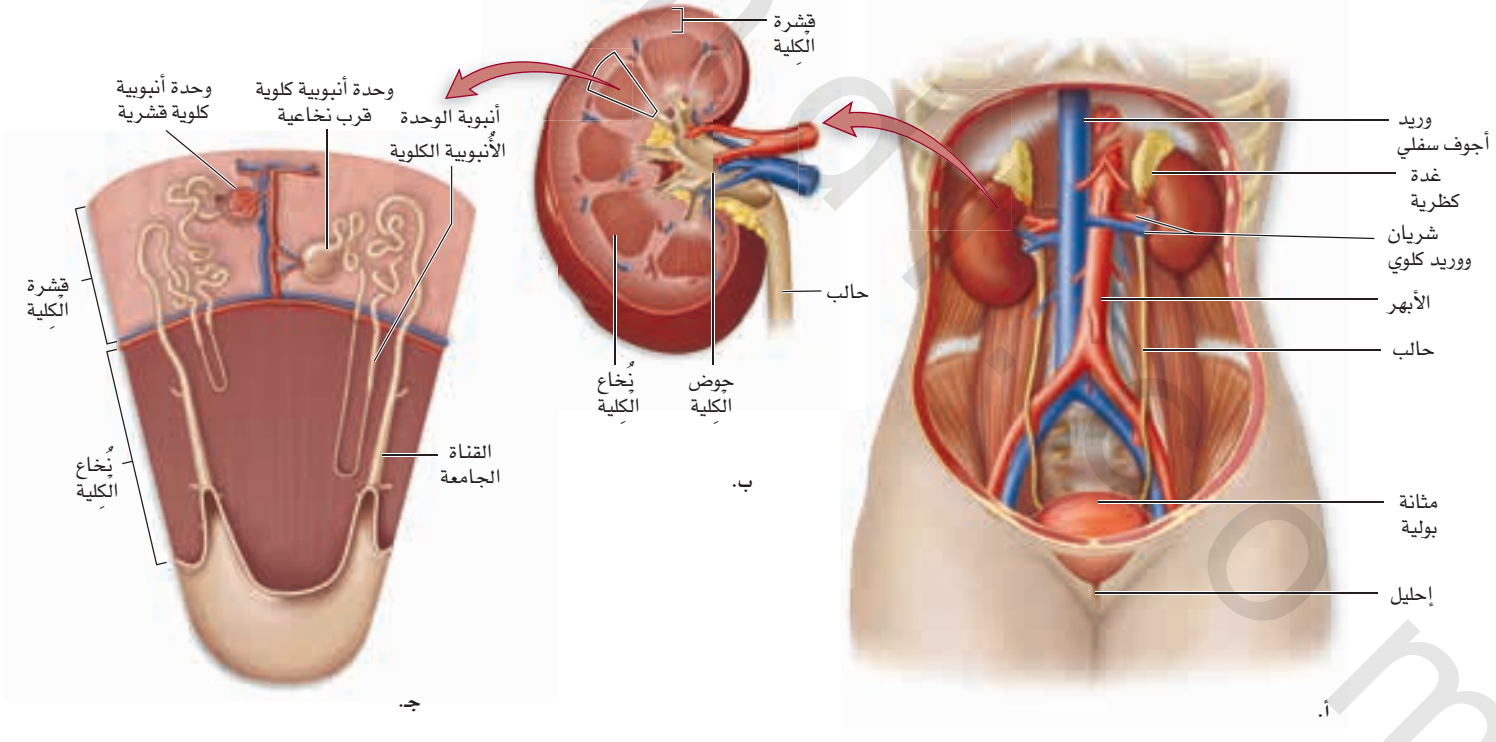
- التَّرشيح *Filtration*: يُرشَّح السائل الموجود في الدَّم إلى داخل نظام من الأُنيبيبات، تاركًا الخلايا والبروتينات الكبيرة في الدَّم. يتكون الرَّاشح من الماء وبعض المواد المُذابة في الدَّم. تتمُّ بعض التغيُّرات والتعديلات على الرَّاشح عن طريق ما تبقى من أجزاء الْكِلية لإنتاج البول لإخراجه.
- إعادة الامتصاص *Reabsorption*: حركةٌ انتقائيةٌ للمواد المُذابة المُهمّة مثل الجلوكوز والأحماض الأمينية، وأنواع متنوعة من الأيونات غير العضوية، خارج الرَّاشح في نظام الأُنيبيبات ونحو السائل خارج الخلوي، ومن ثمَّ عودتها إلى مجرى الدَّم عن طريق الشُّعيرات حول الأُنيبيبية. يُستخدم هنا النَّقل النَّشط أو السّلبي بحسب المواد المُذابة. يُعاد امتصاص الماء أيضًا، ويمكن التحكُّم في ذلك لتحديد كمية الماء المفقودة.
- الإفرازُ *Secretion*: حركةُ المواد من الدَّم إلى السائل خارج الخلوي، ومن ثمَّ إلى الرَّاشح في نظام الأُنيبيبات. على العكس من إعادة الامتصاص التي تُحافظ على المواد في الجسم، يقوم الإفراز بإضافة مواد إلى ما سيتم التخلُّص منه، ويمكن استخدام الإفراز أيضًا لإزالة المواد السامة.

النفيرون (الوحدةُ الأُنبوبيةُ الكلويةُ) هي وحدةُ الترشيح في الْكِلية

على المستوى المجهري، تحتوي الْكِلية على ما يُقارب مليون وحدة أنبوبية كلوية *Nephron*. تحتوي الْكِليةُ على مزيج من الوحدات الأُنبوبية الكلوية قرب **النُّخاعية Juxtamedullary nephrons**، التي تمتلك التواء هنلي طويلًا يهبط عميقًا في النُّخاع، **والوحدات الأُنبوبية الكلوية القشرية Cortical nephrons** التي تمتلك التواء هنلي قصيرًا. سنوضح أهمية طول هذه الالتواءات لاحقًا.

إنتاج الرَّاشح

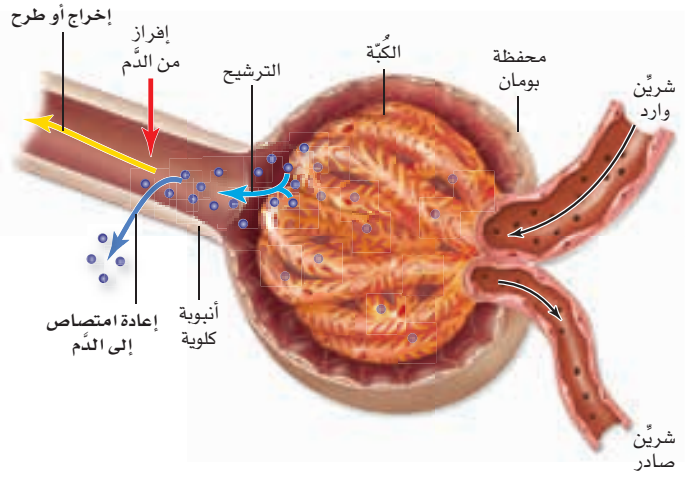
تتكون الوحدة الأُنبوبية الكلوية من أنبوبة طويلة إضافةً إلى الأوعية الدَّموية الصغيرة المُلحقة (الشكل 50-16). أولًا، يُحمل الدَّم عن طريق شُريِّنات صغيرة واردة *Afferent arterioles* إلى مجموعة الشُّعيرات الدَّموية في قشرة الْكِلية، أو



الشكل 50-14

الجهاز الْبوليّ في الإنسان. أ. مواقع أعضاء الجهاز الْبوليّ. ب. مقطع في الْكِلية يُبيِّن التَّركيب الداخلي. جـ. موقع الوحدات الأُنبوبية الكلوية في كِلية الثّدييّات. الوحدات الأنبوبية الكلوية القشرية تقع بشكل كامل في قشرة الْكِلية؛ في حين تمتلك الوحدات الأنبوبية الكلوية قرب النخاعية التواء هنلي طويلًا يمتد عميقًا إلى نُخاع الْكِلية.

obeikandl.com

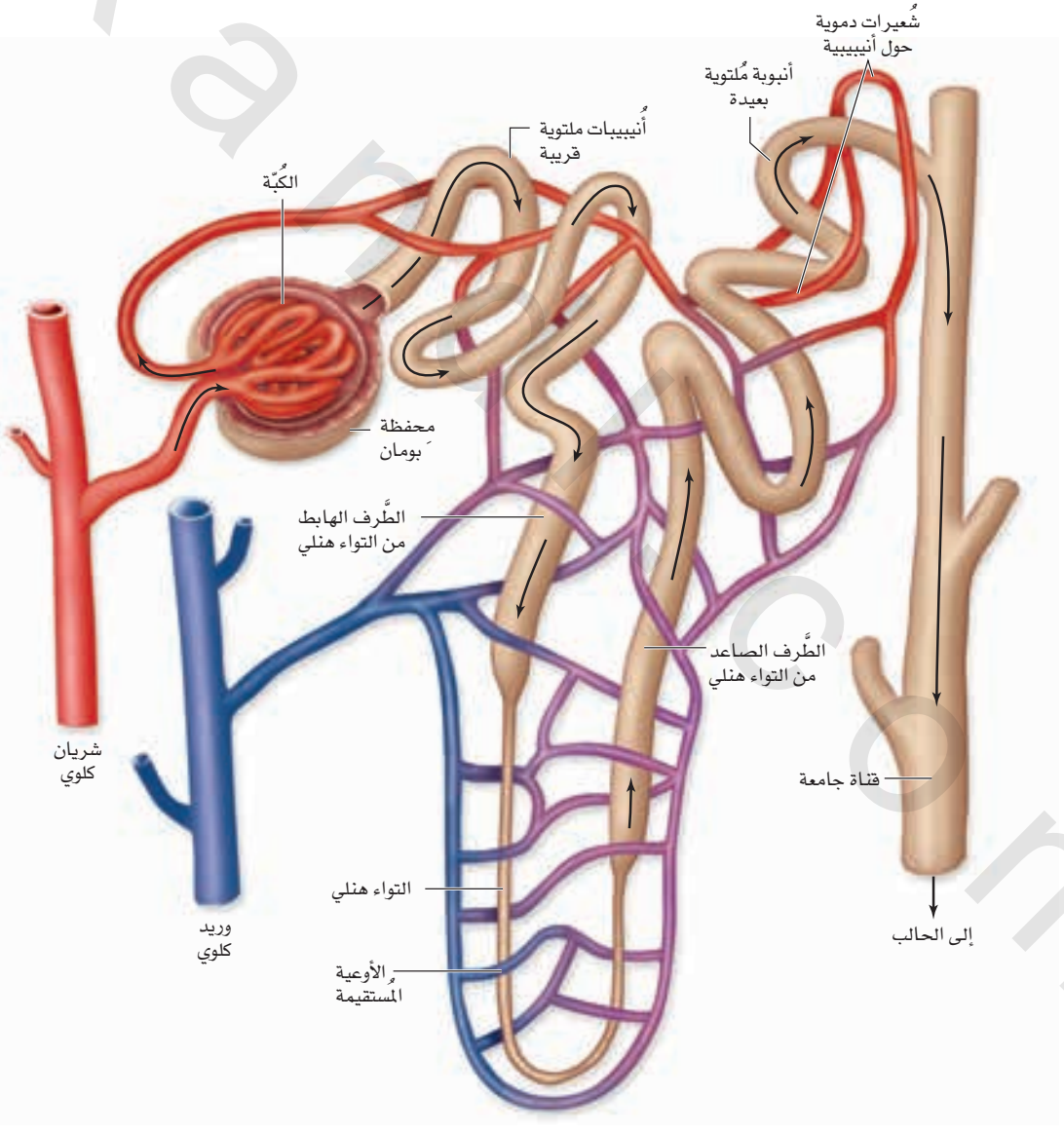


الشكل 50–15

أربع وظائف للكلية. تدخل الجزيئات البول عن طريق عملية التَّرشيح في الكُبّة وعملية الإفراز إلى الأُنيبيبات من الشُّعيرات الدَّموية حول الأنيبيبية. بعض الجزيئات الموجودة في الرَّاشح تعود إلى الشُّعيرات الدَّموية حول الأنيبيبية عن طريق عملية إعادة الامتصاص. تتخلص الكِلية من السائل المُتبقي في الأُنيبيبات عن طريق طرحه إلى الخارج من خلال الحالب، ومن ثم إلى المثانة.

الكُبّة Glomerulus. هنا يحدث التَّرشيح؛ لأنَّ ضغط الدَّم يُجبر السائل على المرور من خلال ثقوب جدران الشُّعيرات. يَصْعُبُ على خلايا الدَّم وبروتينات البلازما الدُّخول إلى الرَّاشح والخروج من الشُّعيرات؛ الدَّموية بسبب كِبر حجمها، لكن كمية كبيرة من البلازما، المُكوَّنة من الماء والجزيئات الذائبة، تُغادِر الجهاز الوعائي. في هذه الخطوة، يدخل الرَّاشح مُباشرةً إلى أول جزء من الوحدة الأُنبوبية الكلوية. هذه المنطقة، **محفظة بومان Bowman's capsule**، تُغلِّف الكبة، مثل بالون كبير يُحيط بيدك، عندما تضغط عليه بقبضة اليد. تمتلك المحفظة شقوقًا تُمكِّن الرَّاشح من الدُّخول إلى الوحدة الأُنبوبية الكلوية.

أجزاء الدم التي لم يحدث لها ترشيح (خروج) من الدَّم إلى محفظة بومان، تُصبّ في الشُّريِّنات الصَّغيرة الصادرة *Efferent arterioles*، التي تصبُّ محتواها بعد ذلك في مجموعة أُخرى من الشُّعيرات الدَّموية تُسمّى **الشُّعيرات حول الأُنيبيبية Peritubular capillaries** التي تُحيط بالأُنيبيبات. هذا أحد المواقع في الجسم التي بها مجموعتان من الشُّعيرات الدَّموية على التّوالي. في الوحدات الأُنبوبية الكلوية قرب النُّخاعية، تغذي الشُّريِّنات الصَّغيرة الصادرة والشعيرات حول **الأُنيبيبية الأوعية المُستقيمة Vasa recta** التي تُحيط بالتواء هنلي. وكما سيوصف لاحقًا، فإننا نحتاج إلى الشُّعيرات حول الأُنيبيبية لعمليتي إعادة الامتصاص والإفراز.



الشكل 50–16

الوحدة الأُنبوبية الكلوية في كلية الثَّدييّات. تُحاط الوحدة الأنبوبية الكلوية بالشُّعيرات حول الأنيبيبية في قشرة الكِلية، والأوعية المُستقيمة تُحيط بالتواء هنلي المُمتد إلى نُخاع الكِلية. تنقل هذه الأوعية الأيونات والمواد الأُخرى التي تمَّ إعادة امتصاصها من الرَّاشح.

obeikandl.com

بعد أن يدخل الرَّاشح إلى محفظة بومان، يذهب إلى جزء آخر من الوحدة الأُنبوبية الكلوية يُسمّى **الأُنيبيبات الملتوية القريبة Proximal convoluted tubules**، الموجودة في قشرة الْكِلية. في الوحدات الأُنبوبية الكلوية القشرية، يتدفَّق السائل بعد ذلك إلى **التواء هنلي Loop of Henle** الذي يهبط قليلًا إلى النُّخاع قبل أن يصعد مرة أُخرى إلى القشرة. في الوحدات الأُنبوبية الكلوية قرب النُّخاعية، يمتد التواء هنلي إلى النُّخاع قبل أن يعود، ويصعد إلى القشرة. يُعاد امتصاص كمية أكبر من الماء من خلال الوحدات الأُنبوبية الكلوية قرب النُّخاعية مُقارنةً مَعَ الوحدات الأُنبوبية الكلوية القشرية. بعد ذلك يمرُّ السائل عميقًا إلى النُّخاع، ومن ثَمَّ يعود مُجدّدًا إلى القشرة في التواء هنلي. وكما ذُكر سابقًا، فإنّ كليتي الثّدييّات والطّيور فقط تمتلك التواء هنلي، وهذا هو السبب وراء قُدرة الثّدييّات والطّيور على امتلاك بول مُركَّز.

تجميع البول

بعد مُغادرة الالتواء، يُصبُّ السائل في **الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة Distal convoluted tubules** في القشرة، ومن ثَمَّ يُصَبُّ في **القناة الجامعة Collecting duct** تهبط القناة الجامعة إلى النُّخاع، وهناك تتَّحد مَعَ قنوات جامعة أُخرى لتصب بعد ذلك محتوياتها، المُسماة الآن البول، في حوض الْكِلية.

الماء، وبعض المواد الغذائية، وبعض الأيونات يُعاد امتصاصها؛ جزيئات أخرى يتمُّ إفرازها

مُعظم الماء والمواد المُذابة الموجودة في الرَّاشح يجب أن تُعاد للدَّم عن طريق عملية إعادة الامتصاص، وإلاّ فسيقوم الحيوان بعملية التَّبول حتى الممات تقريبًا. في الإنسان، مثلًا، يمر 2,000 لتر تقريبًا من الدَّم عبر الكليتين كلّ يوم، ويغادر 180 لترًا من الماء الدَّم لتدخل إلى الرَّاشح.

الماء

لأنّ الإنسان يمتلك حجم دم كلي يساوي 5 لترات تقريبًا، وينتج لترًا إلى لترين من البول يوميًّا، فإنّه من الواضح أنَّ كلّ لتر من الدَّم يرشح مرات عدة في اليوم الواحد، وأن مُعظم الماء الرَّاشح يُعاد امتصاصه. يُعاد امتصاص الماء من الرَّاشح عن طريق الأُنيبيبات المُلتوية القريبة، في أثناء مروره بالجُزء الهابط من التواء هنلي ومن القناة الجامعة. إنَّ سبب إعادة الامتصاص الانتقائية في القناة الجامعة هو فرق التَّركيز الأسموزيّ الذي كوَّنه التواء هنلي، كما سَيُشرح بعد قليل.

الجلوكوز ومواد غذائية أُخرى

يُعاد امتصاص الجلوكوز، والأحماض الأمينية، وكثير من الجزيئات التي يحتاج إليها الجسم عن طريق نواقل النَّقل النَّشط والنَّقل النَّشط الثّانوي (النّقل المُترافق). مثل كلّ أنواع النّقل الذي يتمُّ بمساعدة النواقل، فإنَّ مُعدَّلًا أقصى من النَّقل يتمُّ الوصول إليه عندما تُشبع النّواقل جميعها (انظر الفصل الـ 5).

في حالة نواقل الجلوكوز في الأُنيبيبات المُلتوية القريبة، يحدث الإشباع لها عندما يُساوي تركيز الجلوكوز في الدَّم (وبطبيعة الحال في الرَّاشح) 180 مليجرامًا/100 مليلتر من الدَّم. إذا وصل تركيز الجلوكوز في الدَّم إلى هذا التَّركيز أو أكثر، كما يحدث في حالة عدم مُعالجة السكري، يبقى الجلوكوز في الرَّاشح، ولا يتم امتصاصه بكمية كافية، ويخرج مَعَ البول. وفي الحقيقة، يُستخدم وجود الجلوكوز في البول بوصفه تشخيصًا لمرض السُّكري.

إفراز الفضلات

تتضمن عملية إفراز الجزيئات الغريبة وبعض نواتج الفضلات في الجسم نقل هذه الجزيئات عبر الأغشية الْخلويّة للشُّعيرات الدَّموية وأُنيبيبات الْكِلية إلى الرَّاشح. هذه العملية شبيهة بإعادة الامتصاص، إلا أنّها تحدث في الاتجاه المُعاكس.

يتمُّ التخلُّص من بعض المواد المفرزة إلى البول بسرعة كبيرة، حيث تزالُ من الدَّم مَعَ أول مرور للدَّم في الكليتين. هذه الإزالة السّريعة تُفسِّر وجوب إعطاء البنسلين الذي يتمُّ التخلُّص منه عن طريق الأُنبوبية الكلوية، للجسم بتراكيز عالية مرات عدة في اليوم.

التخلُّص من المواد السامة والأيونات الزائدة يُحافظ على الاتزان الدّاخلي

إنَّ الوظيفة الرّئيسة للكِلية هي التخلُّص من كثير من المواد الضارة التي يأكلها الحيوان ويشربها. إضافة إلى ذلك، يحتوي البول على فضلات نيتروجينية، كما ذكرنا سابقًا، التي هي نواتج تحطُّم الأحماض الأمينية والنَّووية. يحتوي البول أيضًا على البوتاسيوم، والهيدروجين، وأيونات أُخرى زائدة تُزال من الدَّم.

يحافظ التَّركيز العالي لأيونات الهيدروجين (درجة حموضة 5 - 7) على التّوازن القاعدي – الحمضي للدَّم في مدى ضيق (درجة الحموضة 7.35 – 7.45). إضافة إلى ذلك، فإنَّ التخلُّص من الماء إلى البول يُسهم في الحفاظ على حجم الدَّم وضغطه (الفصل الـ 49)؛ فكلما زاد حجم البول الذي يتمُّ التخلُّص منه، يقل حجم الدم.

ولهذا، فإنَّ أهمَ وظيفة للكِلية هي حفظُ التّوازن الداخلي؛ حيث تشترك الكليتان في المُحافظة على البيئة الدّاخليّة. عندما تُصاب الْكِلية بمرض، سيتسبب ذلك في زيادة تركيز نواتج الفضلات النيتروجينية في الدَّم، وفي خلل في المواد الإلكتروليتية وخلل في التّوازن القاعدي – الحمضي، وفشل في تنظيم ضغط الدَّم. هذه التغيُّرات التي يمكن أن تكون قاتلة تُشير إلى أهمية الكليتين في أداء وظائف أعضاء الجسم المُختلفة.

كل جزء من الوحدة الأُنبوبية الكلوية في الثّدييّات يُنجز وظيفة نقل خاصة

كما ذُكر سابقًا، يدخل ما يقارب 180 لترًا من الرَّاشح مُتعادل التَّركيز إلى محافظ بومان في كليتي الإنسان كلّ يوم. بعد مرور هذا الرَّاشح فيما تبقى من أُنيبيبات الوحدة الأُنبوبية الكلوية، وإذا لم يتم إعادة امتصاص جزء منه إلى الدَّم، فإنه سيخرج على شكل بول. من الواضح استحالة إنتاج هذه الكمية الكبيرة من البول، إذا علمنا أنَّ الماء يستطيع الانتقال بالخاصية الأسموزيّة، وأنَّ الخاصية الأسموزيّة لا يمكن أن تحدث بين محلولين متساويين في التَّركيز. لهذا، يجب أن تكون هناك آلية لإيجاد تدرُّج أسموزي بين الرَّاشح والدَّم، ليسمح بإعادة امتصاص الماء.

الأُنيبيبات القريبة المُلتوية

يُعاد امتصاص مُعظم المواد الغذائية تقريبًا من الرَّاشح إلى الدَّم عن طريق الأُنيبيبات المُلتوية القريبة. إضافة إلى ذلك، يُعاد امتصاص ثلثي (3/2) أملاح كلوريد الصوديوم والماء الموجودين داخل محفظة بومان عبر الجدران المُكوِّنة للأُنيبيبات القريبة المُلتوية بشكل مباشر.

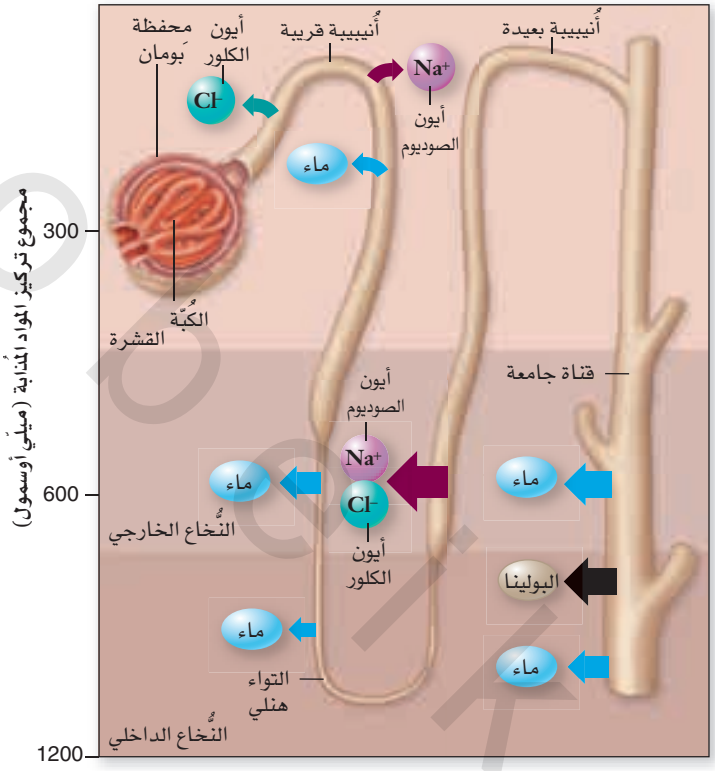
يقود إعادة الامتصاص هذه نقل أيون الصوديوم بآلية النَّقل النَّشط من الرَّاشح في اتجاه الشُّعيرات حول الأُنيبيبية. يتبع أيون Cl^- أيون Na^+ عن طريق النَّقل السالب بسبب التجاذُب الكهربائي، ومن ثمَّ يتبعهما الماء عن طريق الخاصية الأسموزيّة. وحيث إنَّ كمية NaCl والماء التي تتمّ إعادة امتصاصهما من الراشح متساوية، فإنَّ الرَّاشح المُتبقي في الأُنيبيبات يبقى متعادلًا من حيث التَّركيز مُقارنة مَعَ بلازما الدَّم.

على الرغم من أنَّ الرَّاشح المُتبقي بعد عملية إعادة امتصاص أملاح كلوريد الصوديوم والماء يبلغ ثلث كمية الرَّاشح في البداية، فإن هذه الكمية كبيرة (60 لترًا من أصل 180 لترًا في البداية). من الواضح، عدم وجود حيوان يستطيع القيام بطرح هذا الكم من البول، ولهذا فيجب أيضًا أن يُعاد امتصاص مُعظم هذا الماء. يتمُّ هذا الامتصاص بشكل رئيس من خلال القناة الجامعة.

التواء هنلي *Henle loop*

إنَّ وظيفةَ التواء هنلي إيجاد تركيز أسموزي يتزايد بشكل تدريجي من القشرة في اتجاه نخاع الْكِلية. يسمح هذا بإعادة امتصاص الماء عند مروره هابطًا في اتجاه نُخاع الْكِلية في القناة الجامعة بجانب التواء هنلي. يختلف الطَّرف الهابط عن الطَّرف الصاعد التابعين لالتواء هنلي من ناحية التَّركيب، وفي مدى نفاذية كلّ منهما للأيونات والماء. يُسبِّب هذا تكوُّن تدرُّج أسموزي مُتزايد من القشرة إلى النخاع (الشكل 50-17). إنَّ تركيب التواء هنلي يشكل مثالًا آخر على نظام التّيار المُتعاكس، في هذه الحالة، يعمل هذا النِّظام على زيادة المولارية الأسموزيّة للسائل بين الخلوي. لفهم وظيفة التواء هنلي، من الأفضل والأسهل البدء في الطَّرف الصاعد:

1. الطَّرف الصاعد بكامله غير مُنفِّذ للماء، ينقل الجزءُ الغليظ من الطَّرف الصاعد أيونات الصوديوم من الأُنيبيبات إلى الخارج عن طريق النَّقل النَّشط، ويتبعه أيون الكلور بالنَّقل السالب. أما الجزء الرَّقيق من الطَّرف الصاعد فهو منفذ لأيونات الصوديوم والكلور اللذين يتحركان إلى الخارج عن طريق الانتشار.
2. الطَّرف الهابط من التواء هنلي رقيق ومُنفِّذ للماء، وليس لكلوريد الصوديوم. وبسبب خروج Na^+ و Cl^- من الطَّرف الصاعد، فإنَّ المولارية الأسموزيّة للسائل بين الخلوي تكون أكثر حول الطَّرف الهابط، ولهذا يخرج الماء من الطَّرف الهابط عن طريق الخاصية الأسمـوزيّة. تزيد المـولارية الأسموزيّة للسائل في الأُنيبيبات أيضًا في أثناء نزوله إلى القاع والتفافه للصعود عبر الطَّرف الصاعد، حيث يفقد أيضًا NaCl عن طريق الانتشار، كما ذكرنا سابقًا.
3. إنَّ فقدان الماء عن طريق الطَّرف الهابط يُضاعف تركيز السائل الذي يمكن تحقيقه عند كلّ مستوى من التواء هنلي عن طريق النَّقل النَّشط لأيونات الصوديوم (حيث يتبعها أيون الكلور بالنَّقل السالب) عن طريق الطَّرف الصاعد فقط. كلما زاد طول التواء هنلي، تزيد المنطقة التي يتم فيها التَّفاعل بين كلّ من الطَّرف الهابط والصاعد، ومن ثم يزيد من تركيز الرّاشح الذي يمكن الحصول عليه. في كِلية الإنسان، يكون تركيز الرّاشح عندما يدخل التواء هنلي 300 ميلي أوسمول (mOsm)، وهذا التَّركيز يتضاعف إلى أكثر من 1200 ميلي أوسمول عند قاع أطول التواء من التواءات هنلي في نُخاع الْكِلية.



الشكل 50-17

إعادة امتصاص الأملاح والماء في كِلية الثَّدييّات. النَّقل النَّشط لأيونات الصوديوم خارج الأُنيبيبة القريبة يتبعه انتقال الماء وأيونات الكلور بالنَّقل السالب. إنَّ النَّقل النَّشط لكلوريد الصوديوم من الطَّرف الصاعد لالتواء هنلي يصنع تدرُّجًا أُسموزيًّا نحتاج إليه لعملية إعادة امتصاص الماء من خلال الطَّرف الهابط لالتواء هنلي، ومن خلال القناة الجامعة. يُشكِّل طرفا التواء هنلي نظام التَّيار المُتعاكس المُضاعف الذي يزيد من التدرُّج الأسموزيّ. إنَّ التَّغيُّر في المولارية الأسموزيّة من قشرة الْكِلية إلى النُّخاع مُشار إليه على يسار الشَّكل.

4. يُعاد امتصاص NaCl المنضوح خارج الطَّرف الصاعد من التواء هنلي من السائل بين الخلوي إلى الأوعية المُستقيمة، ولهذا ينتشر NaCl من الدَّم الذي يغادر النخاع إلى الدَّم القادم إليه. لهذا، تعمل الأوعية المُستقيمة عمل التّيار المُتعاكس، وهذا شبيه لما يحدث للأكسجين عندما يتدفَّق الماء والدَّم بشكل تدفق مُتعاكس في خياشيم الأسماك (انظر الفصل الـ 44). تعمل الأوعية المُستقيمة، على منع إزالة التَّدرُّج الأسموزيّ الذي ينشأ عن طريق التواء هنلي عندما يتدفق الدَّم خلال الشُّعيرات الدَّموية. لهذا، فإنَّ الدَّم يُمكن أن يُغذّي هذه المنطقة من الْكِلية دون أن يُؤثّر في قدرة إعادة امتصاص الماء في اتجاه القناة الجامعة.

ولأنَّ السائل يمر في اتجاهين مُتعاكسين في طرفي التواء هنلي، فإنّ هذا الالتواء يصنع نخاعًا كلويًّا عالي التَّركيز بالمواد المُذابة. ويُعرف هذا **بنظام التَّيار المُتعاكس المُضاعف Countercurrent multiplier system**. هذا التدرُّج الأسموزيّ المُتكوِّن أكبر بكثير مما يُمكن إنتاجه عن طريق النَّقل النَّشط للأملاح وحدها خارج نظام الأُنيبيبات.

إنَّ سبب التَّركيز العالي للمواد المُذابة في النُّخاع الكلوي هو تجمع NaCl الناجم عن نظام التَّيار المُتعاكس المُضاعف. تشترك البولينا أيضًا في تكوين المولارية الأسموزيّة للنُّخاع الكلوي. يُعَدُّ الطَّرف الهابط من التواء هنلي والقناة الجامعة منفذين للبولينا التي تُغادر هذه المناطق عن طريق الانتشار.

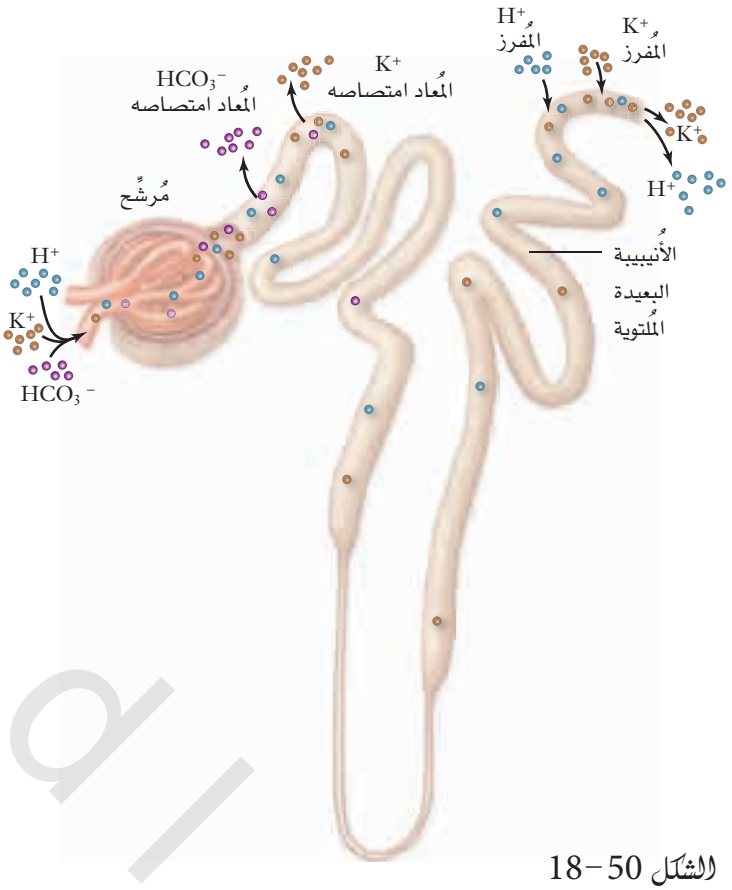
الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة

بسبب أنَّ NaCl يُضخّ من الطَّرف الصاعد لالتواء هنلي، فإنَّ الرَّاشح الذي يصل إلى الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة في قشرة الْكِلية يكون قليل التَّركيز بالمواد المُذابة (100 ميلي أوسمول). تحمل القناة الجامعة السائل المُخفَّف إلى نُخاع الْكِلية. ونتيجة للسائل بين الخلوي عالي التَّركيز بالمواد المُذابة الموجود في نُخاع الْكِلية، يُستخلص الماء من القناة الجامعة إلى الأوعية الدَّموية المُحيطة بسبب التَّدرُّج الأسموزيّ بينهما.

التَّدرُّجُ الأسموزيُّ حولَ الأُنيبيبات الملتوية البعيدة والقناة الجامعة ثابتٌ، لكن نفاذية هذه الأُنيبيبات للماء مُتغيرة عن طريق الهرمون المانع لإدرار البول *Antidiuretic hormone*، الذي تمَّ ذكره في (الفصلين الـ 46 و 49). عندما يرغب الحيوان في الحفاظ على الماء، فإنّ الغُدّة النخامية الخلفية تفرز المزيد من الهرمون المانع لإدرار البول. يزيد هذا الهرمون عددَ قنوات الماء في الغشاء البلازمي للخلايا المُكوِّنة للقناة الجامعة. يزيد هذا نفاذية القناة الجامعة للماء. وبسب ذلك، يُعاد امتصاص ماء أكثر من الرَّاشح. يُؤدي هذا إلى إخراج بول ذي تركيز عالٍ من المواد المُذابة.

إضافة إلى تنظيم توازن الماء، تنظم الكليتان توازن المواد الإلكتروليتية في الدَّم عن طريق إعادة الامتصاص والإفراز. فمثلًا، تعيد الْكِلية امتصاص أيونات البوتاسيوم عن طريق الأُنيبيبات المُلتوية القريبة، وتُفرز كمية من أيونات البوتاسيوم بحسب الحاجة من أجل الحفاظ على الاتزان الداخلي إلى الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة (الشكل 50-18). تحافظ الكليتان أيضًا على التّوازن الحمضي – القاعدي عن طريق إفراز أيونات الهيدروجين إلى البول وإعادة امتصاص HCO_3^-.

تعتمد إعادة امتصاص NaCl من خلال الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة على حاجة الجسم، وهي تحت سيطرة هرمون الألدوستيرون *Aldosterone*. يؤثِّرُ كلّ من الألدوستيرون والهرمون المانع لإدرار البول في الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة، على الرغم من أنَّ الألدوستيرون له تأثير أكبر في إعادة امتصاص NaCl. سنُناقش التّنظيم الهرموني للإخراج في الجُزء المقبل.



الشكل 50-18

التَّحكُّم في التّوازن الملحي. تتحكم الوحدة الأنبوبية الكلوية في كمية أيونات K^+، H^+، و $HCO3^-$ المُفرزة إلى البول. يُعاد امتصاص K^+ بشكل كامل في الأُنيبيبة البعيدة، ومن ثمَّ تُفرَزُ بكميات مُنظَّمة هرمونيًّا إلى الأُنبوبة البعيدة. يتمُّ ترشيح $HCO3^-$ إلا أنَّه يُعاد امتصاصه بشكل كامل. يتمُّ ترشيح H^+ ويُفرز أيضًا إلى الأُنبوبة البعيدة، بحيث يكون البول النِّهائي حمضيًّا من حيث درجة الحموضة.

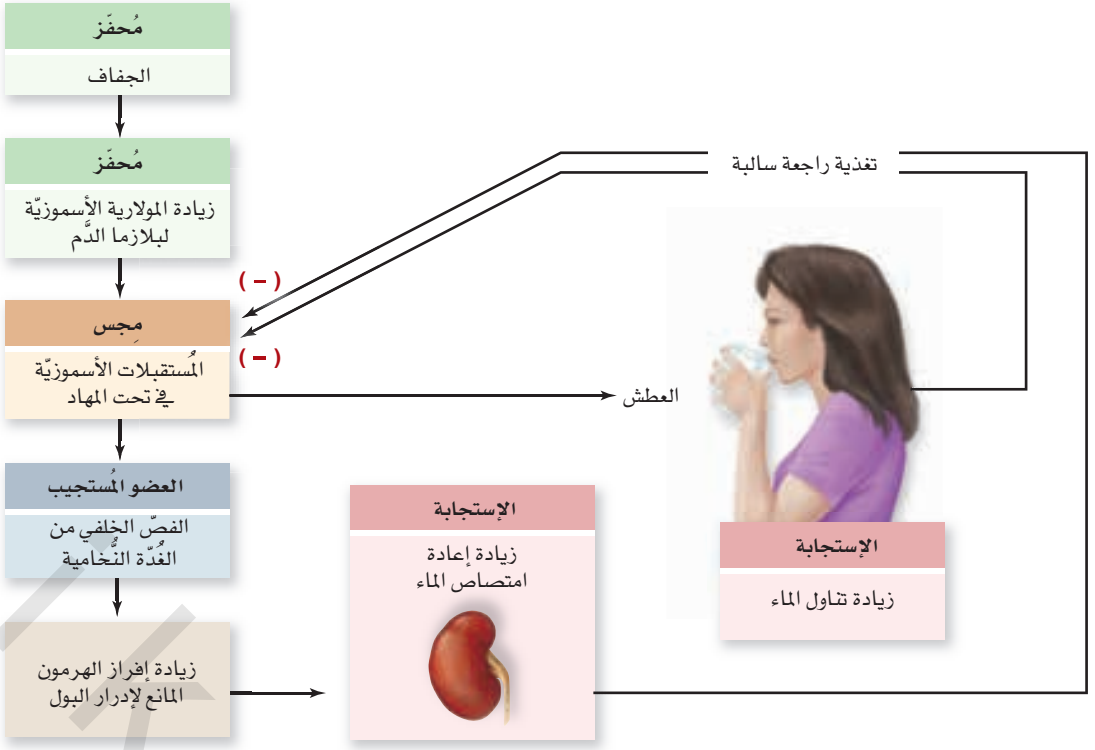
تُقسَّم الْكِلية عند الإنسان إلى القشرة والنُّخاع، وتحتوي على ملايين من الوحدات الوظيفية تُدعى الوحدات الأُنبوبية الكلوية. تستقبل أُنيبيبات الوحدة الأُنبوبية الكلوية الدَّم الرَّاشح من الْكِلية، ومن ثم يطرأ عليه بعض التَّعديلات لإنتاج البول، الذي يُطرح في حوض الْكِلية، ومن ثمَّ إلى الحالب.

يصنع التواء هنلي نخاعًا كلويًّا عالي التَّركيز نتيجة لإخراج NaCl بالنَّقل النَّشط من الطَّرف الصاعد والتَّفاعل مَعَ الطَّرف الهابط. ويسحب النُّخاع الكلوي عالي التَّركيز بالمواد المُذابة الماء بالخاصية الأسموزيّة من الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة، التي لها القُدرة على تمرير الماء تحت تأثير الهرمون المانع لإدرار البول.

7-50 السيطرة الهرمونية للتَّنظيم الأسموزيّ

في الثّدييّات والطّيور، تختلف كمية الماء المطروحة في البول، أي تركيز البول، بحسب التغيُّرات التي يحتاج إليها الجسم. تطرح الكليتان بولًا عالي التَّركيز عندما يريد الجسم المُحافظة على الماء، باستخدام الآلية التي سَنُناقشها لاحقًا. إذا شرب الحيوان ماء كثيرًا، فإنَّ الكليتين تطرحان بولًا ذا تركيز مُنخفض بالمواد المُذابة.

نتيجة لذلك، فإنَّ حجم الدَّم، وضغط الدَّم، وأسموزية بلازما الدَّم يُحافظ عليها ثابتة عن طريق الْكِلية، بغض النَّظر عن كمية الماء التي تشربها. تُنظِّم الكليتان أيضًا تركيز أيونات البوتاسيوم والصوديوم ودرجة حموضة الدَّم ضمن مدى ضيق جدًا. تُنظّم هذه الوظائف للمُحافظة على الاتزان الداخلي للكِلية عن طريق الهرمونات.



الشكل 50-19

الهرمون المانع لإدرار البول يُحفِّز إعادة امتصاص الماء من خلال الكِلية. هذا الفعل يُكمل دورة التَّغذية الرَّاجعة، ويُساعد في المُحافظة على الاتزان الداخلي لحجم الدَّم وضغطه.

الهرمون المانع لإدرار البول يُحافظ على الماء

ينتج **الهرمون المانع لإدرار البول Antidiuretic hormone (ADH)** من تحت المِهاد، ويُفرز من الفصّ الخلفي للغُدّة النُّخامية. إنَّ المُحفِّز الرّئيس لإفراز ADH هو زيادة المولارية الأسموزيّة لبلازما الدَّم. عندما يُصاب الشخص بالجفاف، أو يتناول طعامًا مالحًا، فإنَّ المولارية الأسموزيّة تزيد في البلازما (تركيز الأملاح في بلازما الدَّم يزيد). ترصد المُستقبلات الأسموزيّة الموجودة في تحت المِهاد هذا الارتفاع في المولارية الأسموزيّة في الدَّم، وتقوم بإرسال سيالات عصبية إلى مركز التَّكامل (الموجود في تحت المهاد أيضًا). إنَّ تنشيط هذا المركز يُعطي إحساسًا بالعطش، ويزيد من إفراز ADH (الشكل 50-19).

يعمل ADH على زيادة نفاذية جدران الأُنيبيبات الملتوية البعيدة والقناة الجامعة للماء. توجد قنوات لنقل الماء تُدعى الأكوابورينات (الفصل الـ 5) في حويصلات داخل الخلايا الطِّلائية لهذه القنوات المُلتوية والقناة الجامعة؛ يُحفِّز ADH اندماج هذه الحويصلات مَعَ الغشاء، بشكل يُشبه عملية الإخراج الخلوي. يُسبِّب هذا زيادة في عدد القنوات في جدران هذه الأُنيبيبات والقنوات الجامعة. إنَّ زيادة هذا العدد يسمح للماء بالتدفق من الرَّاشح إلى خارج الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة بفعل التدرُّج الأسموزيّ في نخاع الكِلية. بعد ذلك، يُعاد امتصاص الماء إلى الدَّم.

عندما يقل إفراز ADH، فإنّ الغشاء البلازمي ينغمد نحو الداخل لتتكون بعد ذلك حويصلات داخل الخليّة تحتوي على الأكوابورينات، ولهذا يُصبح الغشاء البلازمي محتويًا على قنوات ماء قليلة، ويصبح أقل نفاذية للماء. ويخرج مُعظم الماء في هذه الحالة على هيئة البول.

في حالة الإفراط في إفراز ADH، يُخرج الشَّخص بولًا عالي التَّركيز يُقارب حجمه 600 مل كلّ يوم. يعاني الشَّخص المُصاب بتلف في الغُدَّة النُّخامية نقصًا في ADH ويُصاب بمرض يُدعى السُّكري المائي أو السُّكري عديم الطعم *Diabetes insipidus* ويخرج كميات كبيرة من البول المُخفَّف بشكل مُستمر. هذا الشخص يكون في حالة خطر، حيث يُعاني جفافًا شديدًا، وانخفاضًا كبيرًا في ضغط الدَّم.

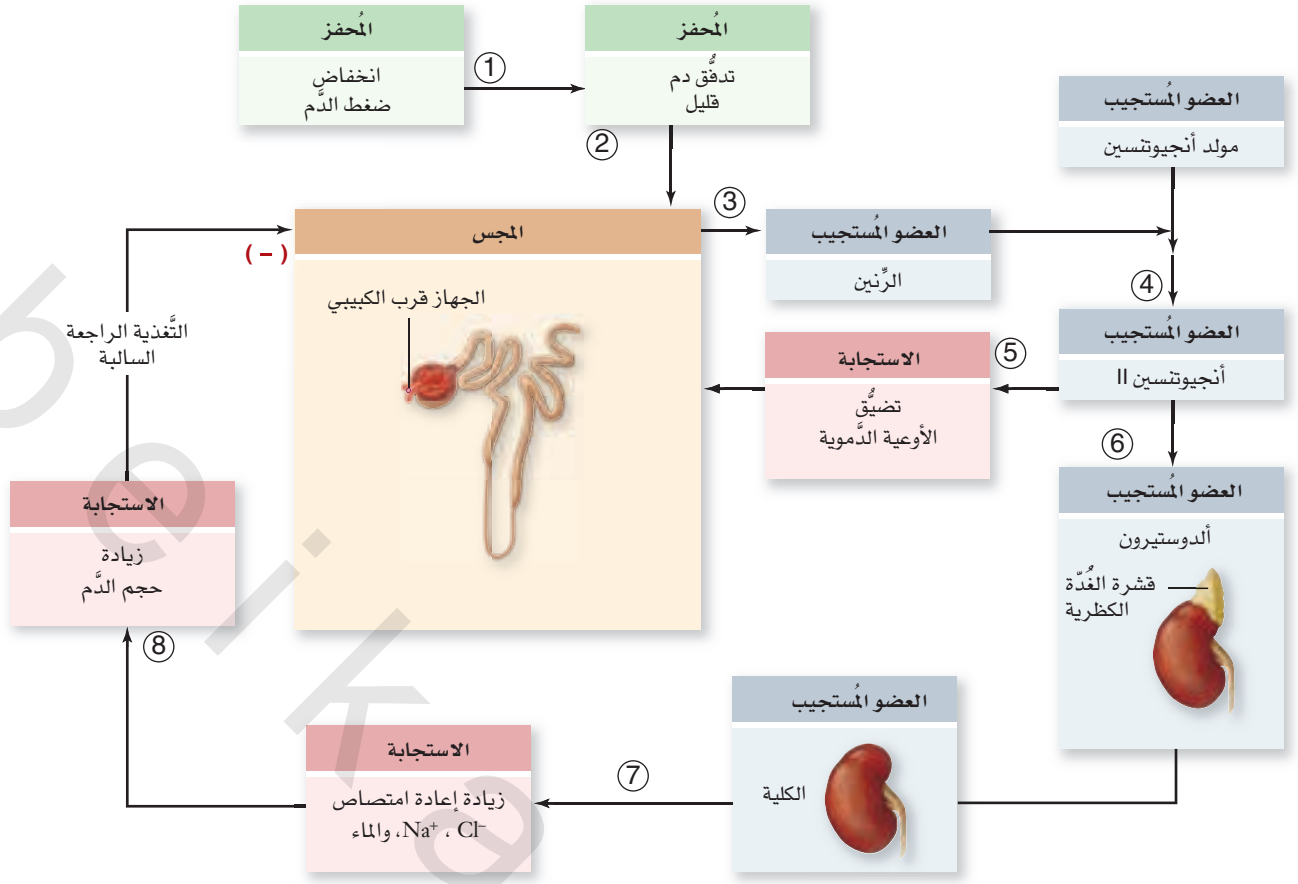
تتحكَّم هرمونات الألدوستيرون والعامل الأُذيني المُدِّر للصوديوم في تركيز أيونات الصوديوم

يُعَدُّ أيون الصوديوم المُذاب الرّئيس في بلازما الدَّم. عندما يقل تركيز الصوديوم في الدَّم، يقل الضّغط الأسموزيّ للدَّم. يُثبط هذا الانخفاض في الضّغط الأسموزيّ في الدَّم إفراز الهرمون المانع لإدرار للبول، مُسبِّبًا زيادة في كمية السائل المُتبقية في القناة الجامعة (يُقلِّل من إعادة امتصاص الماء) وبذلك يخرج هذا السائل مَعَ البول ما يُسبِّب نُقصًا في حجم الدَّم وضغطه.

إنَّ نقص أيونات الصوديوم خارج الخلوي يُسبِّب أيضًا امتصاص الماء إلى الخلايا بالخاصة الأسموزيّة، هذا يُلغي جزئيًّا انخفاض الضّغط الأسموزيّ في الدَّم، ولكنه يُنقص حجم الدَّم وضغطه. وإذا كان نقص أيونات الصوديوم شديدًا، فإنَّ نقص حجم الدَّم يكون كبيرًا، ويؤدي إلى ضغط دم غير كافٍ لبقاء الشخص حيًّا. لهذا السبَّب، فإنَّ الملح ضروري للحياة. كثير من الحيوانات تمتلك "جوعًا للملح" وتبحث عنه بنشاط، مثلما تفعل الغزلان في أماكن لعق الملح.

إنَّ الهبوط في تركيز أيونات الصوديوم في الدَّم يُعوَّض عادة بالكليتين تحت تأثير هرمون **الألدوستيرون Aldosterone**، الذي يُفرز من قشرة الغُدّة الكظرية. يُحفِّز ألدوستيرون الأُنيبيبات القريبة المُلتوية والقناة الجامعة على امتصاص أيونات الصوديوم، ومن ثم، يُقلِّل من إفراز أيونات الصوديوم في البول. في حالة الإفراز الشّديد لألدوستيرون، يختفي الصوديوم بشكل كامل من البول. إنَّ إعادة امتصاص أيون الصوديوم عادةً ما يتبعه إعادة امتصاص أيون الكلور والماء، ولهذا يمتلك ألدوستيرون تأثيرًا مُحفِّزًا للحفاظ على الماء والأملاح. ولهذا، فإنه يحافظ على حجم الدم، والمولارية الأسموزيّة، وضغط الدَّم.

إنَّ إفراز ألدوستيرون استجابةً إلى نقصان مستوى أيونات الصوديوم في الدَّم يتم بشكل غير مُباشر. وحيث إنَّ نُقصان تركيز الصوديوم في الدَّم يكون مصحوبًا بنقصان حجم الدَّم، فإنَّ مرور الدَّم بجانب مجموعة من الخلايا المُسماة الجهاز قرب الكبيبي juxtaglomerular apparatus يقل. يقع هذا الجهاز في الكليتين بالقرب من الأُنيبيبات المُلتوية القريبة والشُّريِّن الوارد (الشكل 50-20).



الشكل 50–20

انخفاض حجم الدَّم يُنشِّط نظام رنين - أنجيوتنسين - ألدوستيرون. (1) انخفاض حجم الدَّم ومستوى أيونات الصوديوم في الدَّم يُقلِّل من ضغط الدَّم. (2) انخفاض تدفُّق الدَّم من خلال الجهاز قرب الكبيبي يُنبِّه (3) إفراز الرِّنين إلى الدَّم، الذي يُحفِّز إنتاج أنجيوتنسين I من مولد أنجيوتنسين. (4) أنجيوتنسين I يُحوَّل إلى شكل أنشط، يُسمّى أنجيوتنسين II (5) يعمل أنجيوتنسين II على انقباض الأوعية الدَّموية و (6) إفراز ألدوستيرون من قشرة الغُدّة الكظرية. (7) يُحفِّز ألدوستيرون إعادة امتصاص أيونات الصوديوم من الأُنيبيبات الملتوية البعيدة. زيادة إعادة امتصاص أيونات الصوديوم يتبعه إعادة امتصاص أيونات الكلور والماء. (8) يُسبِّب هذا زيادة في حجم الدَّم. إنَّ زيادة حجم الدَّم ربما تُنبِّه إفراز الهرمون الأُذيني المُدرّ للصوديوم، الذي يُثبِّط إفراز ألدوستيرون. هذان النِّظامان يحافظان على الاتزان الداخلي.

عندما يقل تدفُّق الدَّم، يستجيب الجهاز قرب الكبيبي لذلك بإفراز أنزيم الرِّنين *Renin* إلى الدَّم. يُحفِّز أنزيم الرنين إنتاج الأنجيوتنسين I عديد الببتيد من البروتين المولد لأنجيوتنسين. يُحوَّل أنجيوتنسين I عن طريق أنزيم آخر إلى أنجيوتنسن II، الذي يُحفِّز الأوعية الدَّموية على الانقباض، ويحفز إفراز ألدوستيرون من قشرة الغُدّة الكظرية. ولهذا، يُحافظ على الاتزان الداخلي لحجم الدَّم وضغطه عن طريق تنشيط نظام الرِّنين – أنجيوتنسين – ألدوستيرون. إضافة إلى إعادة امتصاص أيونات الصوديوم، يحفّز ألدوستيرون إفراز أيون البوتاسيوم إلى الأُنيبيبات المُلتوية القريبة والقناة الجامعة. نتيجةً لذلك، يقلُّ ألدوستيرون تركيزَ أيونات البوتاسيوم في الدَّم، مُحافظًا بذلك على مستوى ثابت لأيونات البوتاسيوم في مُواجهة التَّغيُّرات التي قد تحصل نتيجة تغيُّر كمية أيونات البوتاسيوم في الغذاء. والأشخاص الذين لديهم نقص في إفراز ألدوستيرون سيموتون إذا لم يُعالجوا بسبب الفقدان الشّديد للماء والأملاح في البول، وتراكُم أيونات البوتاسيوم في دمهم.

إنَّ عمل ألدوستيرون في المُحافظة على الأملاح والماء يُخالف عمل هرمون آخر، هو **العامل الأُذيني المُدرّ للصوديوم Atrial natriuretic hormone**، الذي ذُكِرَ في (الفصل الـ 49). يُفرز هذا الهرمون من الأُذين الأيمن للقلب استجابةً لزيادة حجم الدَّم، الذي يسبب تمدُّد الأُذين. في هذه الظروف، ينخفض إفراز ألدوستيرون من قشرة الغُدّة الكظرية، ويزيد إفراز العامل الأُذيني المُدرّ للصوديوم، وهذا يُحفِّز إخراج الأملاح والماء مَعَ البول، ويُقلِّل حجم الدَّم.

الهرمون المانع لإدرار البول يُحفِّز زيادة عدد قنوات الماء في الغشاء البلازمي للخلايا المُكوِّنة للأُنيبيبات المُلتوية القريبة والقناة الجامعة، جاعلًا هذه التَّراكيب أكثر نفاذية للماء. لهذا، يُحفِّز الهرمون المانع لإدرار البول عملية إعادة امتصاص الماء وإخراج بول ذي تركيز عالٍ بالمادة المُذابة. يُحفِّز ألدوستيرون عملية إعادة امتصاص أيونات الصوديوم، والكلور، والماء عبر الأُنيبيبات المُلتوية البعيدة والقناة الجامعة، ويُحفِّز إفراز أيونات البوتاسيوم إلى الأُنيبيبات أيضًا. العامل الأُذيني المُدرّ للصوديوم يُقلِّل إعادة امتصاص أيونات الصوديوم والكلور.

50-1 تنظيم درجة حرارة الجسم

درجةُ الحرارة من أهم مظاهر البيئة التي يواجهها المخلوق الحي.

- Q_{10} هي نسبة مُعدَّل التَّفاعل عند درجتي حرارة تختلفان بمقدار 10 درجات سيلسيوس. للتَّفاعلات الكيميائية Q_{10} يساوي تقريبًا 2.
- تُحدَّد درجة حرارة الجسم عن طريق العوامل الداخليّة مثل عمليات الأيض والعوامل الخارجية التي تؤثّر في انتقال الحرارة.
- تنتقل الحرارة من البيئة إلى الجسم عن طريق أربع آليات، هي: الإشعاع، والتَّوصيل، والحمل، والتَّبخير (الشكل 50-1).
- يعتمد انتقال الحرارة على نسبة السّطح إلى الحجم، واختلاف درجة الحرارة بين جسمين، والحرارة النَّوعية.
- تُقسَّم المخلوقات الحية بحسب مصدر الحرارة إلى: داخليّة الحرارة (ذوات الدَّم الحار) وهي القادرة على توليد حرارتها، ومُتغيرة الحرارة (ذوات الدَّم البارد) التي تعتمد على البيئة.
- مُتغيرة الحرارة (خارجية الحرارة) لها مُعدَّل أيضي مُنخفض، وتنظِّم حرارة أجسامها عن طريق تغيرات سلوكية (أشكال 50-2، 50-3).
- داخليّة الحرارة (ذوات الدَّم الحار) تستطيع تنظيم درجة حرارة جسمها عن طريق تغيير مُعدَّل الأيض لديها، ومُعدَّل تدفُّق الدَّم الطَّرفي، والتَّعرُّق أو اللهاث.
- التَّوليد الحراري غير الارتعاشي يولِّد حرارة عن طريق عمليات أيض الدُّهون، أما التَّوليد الحراري الارتعاشي فيستخدم الانقباضات العضلية.
- يتحكم تحت المهاد في التّنظيم الحراري للثدييات (الشكل 50-5).
- مولدات الحمى تُحفِّز الحُمّى، وزيادة درجة الحرارة المُحدَّدة مُسبقًا (المرجعية).
- السُّباتُ نقصٌ في مُعدّلات الأيض، يسمح بتقليل تناول الطعام. تُسمّى الفترةُ الطويلة من السُّبات البياتَ الشتوي.

50-2 المولارية الأسموزيّة والتّوازن الأسموزيّ

للحفاظ على التّوازن الأسموزيّ، يجب أن يكون جسم الحيوان قادرًا على أخذ الماء أو التخلُّص منه إلى البيئة المُحيطة، وقادرًا أيضًا على تنظيم الأيونات.

- الضّغطُ الأسموزيُّ مقياسٌ لقدرة المحلول على أخذ الماء عن طريق الخاصية الأسموزيّة.
- تُعرَّف المولارية الأسموزيّة بأنها المولات المُذابة في لتر من المحلول.
- تفقد الخليّة الماء إذا وضعت في محلول عالي التَّركيز من المواد المذابة، أما في محلول قليل التركيز من المواد المذابة، فإنها تكتسب الماء. وفي محلول مُتعادل لا يحدث تغيير في حجم الخليّة.
- المُتطابقاتُ الأسموزيّةُ مُتعادلةٌ من النَّاحية الأسموزيّة مَعَ بيئتها، أما المُنظِّمات الأسموزيّة، فإنها تتحكم في المولارية الأسموزيّة لسوائل أجسامها.
- فقريات المياه العذبة تحتوي سوائل عالية التَّركيز من المواد المُذابة بالنِّسبة إلى البيئة المُحيطة، أما الفقريّات البحريّة فتحتوي سوائل قليلة التَّركيز من المواد المُذابة مُقارنةً مَعَ بيئتها.

50-3 الأعضاء المُنظِّمة للأسموزية

مُعظم المخلوقات، ومن ضمنها المخلوقات أُحادية الخليّة، طوَّرت آلية لتتعامل مَعَ مشكلات التّوازن المائي.

- الدِّيدان المُسطحة تستخدم أنابيب النيفريديا الابتدائية المُتَّصلة مَعَ الخلايا اللّهبية التي تسحب السائل من داخل الجسم في اتجاهها (الشكل 50-7).
- اللافقريات الأُخرى تمتلك نفريديا تفتح من الطّرفين إلى داخل الجسم وخارجه، حيثُ تحدث ترشيحًا لسوائل الجسم، ومن ثمَّ إعادة امتصاص للأملاح قبل طرح الفضلات إلى الخارج (الشكل 50-8).
- تمتلك الحشرات أنابيب ملبيجي التي يُفرز من خلالها حمض البوليك وفضلات أُخرى إلى عضو الإخراج، ويُعاد امتصاص الماء والأملاح قبل طرحها إلى الخارج (الشكل 50-9).
- تمتلك الفقريّات الكلى التي تُنتج البول عن طريق الترشيح، والإفراز، وإعادة الامتصاص.

50 – 4 تطوُّر الْكلية في الفقريّات

تتكون الْكِلية من آلاف الوحدات المُسماة الوحدات الأُنبوبية الكلوية، التي تُنظِّم سوائل الجسم.

- تتكون الوحدة الأُنبوبية الكلوية من الكُبّة، ومحفظة بومان، والأُنيبيبات الملتوية القريبة، والتواء هنلي، والأُنيبيبات الملتوية البعيدة، والقناة الجامعة (الشكل 50-10).
- تمتلك أسماك المياه العذبة سوائل ذات تراكيز عالٍ من المواد المُذابة بالنِّسبة إلى البيئة. وتُخرجُ كمية كبيرة من الماء وتمتصُّ الأيونات (الشكل 50-11).
- تمتلك أسماك المياه المالحة سوائل ذات تراكيز منخفضة من المواد المُذابة بالنِّسبة إلى البيئة. تمتص كمية كبيرة من الماء، وتطرح الأيونات إلى الخارج عبر الخياشيم عن طريق النَّقل النَّشط. تطرح هذه الأسماك بولًا مُتعادل التّركيز بالنِّسبة إلى الدَّم.
- الأسماك الغضروفية تمتلك سوائل ذات تراكيز مُتعادلة مَعَ البيئة؛ لأنها تحتفظ بالبولينا، وتَضخُّ المواد الإلكتروليتية عن طريق النَّقل النَّشط، وتفرزُ بولًا متعادلًا من ناحية التَّركيز مَعَ الدَّم.
- تتصرف برمائيات المياه العذبة وزواحفها كتصرف أسماك المياه العذبة، وعمل كلى الزَّواحف الْبحريّة كعمل كلى الأسماك العظمية الْبحريّة.
- الزَّواحف البرية (التي تعيش على اليابسة) لا تستطيع إنتاج بول ذي تركيز عالٍ من المواد المُذابة.
- تستطيع النّدييّات والطّيور طرح بول ذي تركيز عالٍ من المواد المُذابة، وتستطيع الاحتفاظ بالماء (الشكل 50-12).

50-5 الفضلات النيتروجينية: الأمونيا، واليوريا (البوليا)، وحمض اليوريك (البوليك)

عندما تحطِّمُ الحيوانات كلاًّ من الأحماض الأمينية والنووية فإنها تنتجُ فضلات نيتروجينية سامة (الشكل 50-13).

- الأمونيا سامة جدًا، وتحتاج إلى كمية كبيرة من الماء للتخلُّص منها عن طريق الجسم، أو من خلال الخياشيم في حالة الأسماك.
- البولينا أقل سمية من الأمونيا، وتحتاج إلى ماء أقل للتخلُّص منها، وتحتاج إلى طاقة لتصنيعها.
- حمض البوليك هو أقلها سُميّة، ويحتاج إلى كمية أقل من الماء للتخلُّص منه، وأكثرها إنفاقًا للطاقة عند تصنيعه.

50-6 الكِلية في الثّدييّات

تُعالج كِلية الإنسان 180 لترًا من الرَّاشح كلّ يوم، وتُنتِج بولًا يُطرح من خلال الإحليل (الشكل 50-14).

- تمتلك الْكِلية ثلاث وظائف أساسية: التَّرشيح، وإعادة الامتصاص، والإفراز (الشكل 50-15).
- تحدث عملية التَّرشيح في الكُبّة، حيث يُزال كلّ شيء من الدَّم ما عدا الخلايا والبروتينات الكبيرة، وجزيئات أُخرى كبيرة.
- إعادةُ الامتصاص حركةٌ انتقائيةٌ للمواد الغذائية، والأيونات، والماء، من الرَّاشح إلى الدَّم.
- الإفرازُ عمليةُ حركةِ المواد من الدَّم إلى الرَّاشح.
- يمرّ الرَّاشح من محفظة بومان إلى الأُنيبيبات الملتوية القريبة، ثمّ التواء هنلي، ومن ثمّ إلى الأُنيبيبات الملتوية البعيدة، ومن هناك إلى القناة الجامعة (الشكل 50-16).
- يمرّ الدَّم من الشِّريان الصغير الوارد إلى الكُبّة، ومن ثمّ إلى الشِّريان الصغير الصادر منها، ومن هناك إلى الشُّعيرات حول الأنيبيبة، وأخيرًا إلى الأوعية المُستقيمة.
- تتخلَّص الْكِلية من كثير من المواد المُضرة، مثل الفضلات النيتروجينية، والأيونات الزائدة، والسُّموم.
- يُحدث التواء هنلي تدرجًا أسموزيًّا متزايدًا من قشرة الْكِلية في اتجاه نُخاعها.
- كلما زاد طول التواء هنلي، تمَّ إنتاج بول مُركَّز أكثر (الشكل 50-17).
- تُنظِّم الْكِلية مستوى المواد الإلكتروليتية عن طريق إعادة الامتصاص والإفراز.

50-7 السيطرة الهرمونية للتّنظيم الأسموزيّ

تحافظ الْكِلية على حجم الدَّم، وضغطه، والضّغط الأسموزيّ لبلازما الدَّم، وتُنظِّم جميعها بفعل الهرمونات (الشكل 50-19).

- ينتُج الهرمون المانع لإدرار البول من تحت المهاد، ويُحافظ على الماء في الجسم عن طريق زيادة نفاذية القناة الجامعة للماء (الشكل 50-19).
- يُثبِّط انخفاض مستويات أيون الصوديوم إفراز الهرمون المانع لإدرار البول، ويحفِّزُ الألدوستيرون تناول أيونات الصوديوم من الأُنيبيبات الملتوية البعيدة، وإرسالها إلى الدَّم.
- الهرمون الأُذيني المُدر للصوديوم له فعل مُعاكس لعمل الألدوستيرون.
- يُنشِّط انخفاض حجم الدم نظام رنين – أنجيوتنسين – ألدوستيرون (الشكل 50-20).

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. إحدى هذه الطُّرق لا تستخدم للحفاظ على البيئة الداخليّة ثابتة في الجسم:
   أ. تغيُّرات سلوكية.
   ب. التَّغذية الراجعة السالبة.
   جـ. تأثيرات هرمونية.
   د. التَّغذية الراجعة الموجبة.
2. التَّشابه بين الأجهزة الإخراجية في الفقريّات واللافقريات يتضمن:
   أ. ترشيح السّائل الجسمي.
   ب. استخدام الأُنيبيبات لاحتواء الرَّاشح.
   جـ. إعادة امتصاص الأيونات والماء.
   د. كلّ ما ذُكر.
3. إذا قرّر أستاذك في البحث عمل مشروع على فعالية ترشيح أنابيب ملبيجي. فإنك ستدرس:
   أ. النمل.
   ب. الطّيور.
   جـ. الثّدييّات.
   د. ديدان الأرض.
4. يُعَدُّ دم أسماك القرش مُتعادلًا أسموزيًّا مَعَ مياه البحر بسبب إعادة امتصاص _____ إلى دمها.
   أ. الأمونيا.
   ب. حمض البوليك.
   جـ. البولينا.
   د. كلوريد الصوديوم.
5. من أهم وظائف جهاز الإخراج التخلُّص من النيتروجين الزائد الناتج عن عمليات الأيض. أحد هذه المخلوقات الحية أكثر فعالية في تغليف أو معالجة النيتروجين لطرحه إلى الخارج:
   أ. الضفدع.
   ب. أسماك المياه العذبة.
   جـ. الإيجوانا.
   د. الجمل.
6. من وظائف الكِلية:
   أ. إزالة المواد الضارة من الجسم.
   ب. إعادة امتصاص الماء لاستخدامه من جديد.
   جـ. تنظيم مستوى الأملاح في الدَّم.
   د. كلّ ما ذكر.
7. إذا أصابك التهاب (عدوى) وكان ذا تأثير في عملية إعادة امتصاص الأيونات من الرَّاشح، فإنّ هذه الإصابة ستسبب إصابة خلايا تقع في:
   أ. محفظة بومان.
   ب. الكُبّة.
   جـ. الأُنيبيبات الكلوية.
   د. القناة الجامعة.
8. يُفرز الإنسانُ الزائدَ من الفضلات النيتروجينية على شكل:
   أ. حمض البوليك البلّوري.
   ب. مركبات تحتوي على البروتين.
   جـ. الأمونيا.
   د. البولينا.
9. الجملة غير الصحيحة هي:
   أ. الهرمون المانع لإدرار البول يجعل القناة الجامعة أكثر نفاذية للماء.
   ب. تحتوي الجوانو على تركيز عالٍ من حمض البوليك.
   جـ. يُفرز الألدوستيرون من تحت المهاد استجابةً إلى مستويات عالية من أيونات الصوديوم في الدَّم.
   د. حمض البوليك أقل الفضلات النيتروجينية ذائبية.
10. الفرق الرئيس بين الحيوانات داخليّة الحرارة ومتغيرة الحرارة بالنِّسبة إلى المُحافظة على درجة حرارة الجسم هو:
   أ. تعتمد الحيوانات مُتغيرة الحرارة بشكل كبير على الظروف البيئية لتحديد درجة حرارة الجسم.
   ب. الحيوانات داخليّة الحرارة لا تتأثر بالظروف البيئية.
   جـ. تعتمد الحيوانات مُتغيرة الحرارة بشكل كبير على التّكيّفات السلوكية أكثر من الحيوانات داخليّة الحرارة.
   د. الحيوانات داخليّة الحرارة أكبر من الحيوانات متغيرة الحرارة.
11. المخلوقات المُنظِّمة للضَّغط الأسموزيّ تكون بها السوائل الداخليّة _____ بالمُقارنة مَعَ البيئة المُحيطة.
   أ. مُتعادلة.
   ب. تحتوي على الكثير من المواد المُذابة.
   جـ. تحتوي على القليل من المواد المُذابة.
12. إذا كان الإنسان من ذوات الدَّم الحار (داخليّة الحرارة)، فإن سبب نقص درجة حرارة الجسم أو زيادتها، هو:
   أ. الآليات التي تتحكم في حرارة الجسم غير كافية، وتسمح بتغيرات كبيرة في درجة الحرارة.
   ب. حرارةُ الجسم هي مجموعُ الحرارةِ الناتجة عن تفاعلات الأيض والحرارة المنقولة من البيئة.
   جـ. مُعدَّلات وتفاعلات الأيض يمكن أن تتغير بسبب المرض أو مستوى النَّشاط.
   د. (ب) و (جـ).
13. أنت وزميلك في الدِّراسة تريدان رسم المسار المُتحكِّم في عملية إعادة امتصاص أيونات الصوديوم عندما ينخفض ضغط الدَّم. التسلسل الصحيح للأحداث هو:
   1. يُفرز الألدوستيرون.
   2. أُنيبيبات الكِلية تُعيد امتصاص أيونات الصوديوم.
   3. يُفرز الرِّنين.
   4. يقوم الجهاز القريب من الكُبَّة برصد انخفاض ضغط الدَّم.
   5. يتم إنتاج الأنجيوتنسين II.
   أ. 1، 3، 5، 2، 4.
   ب. 4، 2، 3، 1، 5.
   جـ. 4، 3، 5، 2، 1.
   د. 2، 4، 3، 1، 5.

أسئلة تحدٍّ

1. على أي من أجزاء الوحدة الأُنبوبية الكلوية تعمل هذه الهرمونات، صِف متى وكيف تقوم الهرمونات بعملها.
   أ. الهرمون المانع لإدرار البول
   ب. الألدوستيرون
   جـ. العامل الأُذيني المُدرّ للصوديوم
2. الدكتور المُعالج لجميلٍ مهتم، ويتوقع أن كِليته لا تعمل بالشَّكل الصحيح. وهو يريد أن يُحدِّد ما إذا كان حجم الدَّم الذي يتدفَّق من خلال الكِلية (يُسمّى مُعدَّل تدفُّق الدَّم في الكِلية) يقع ضمن المدى (المُعدَّل) الطبيعي. احسب مُعدَّل تدفق الدَّم "الطبيعي" في الكِلية اعتمادًا على المعلومات الآتية:
   وزن جميل 90 كجم. افترض أنَّ حجم الدَّم الكلي طبيعي، ويساوي 80 مل / كجم من وزن الجسم، وكمية الدَّم التي يضخّها القلب / دقيقة (الناتج القلبي) كانت طبيعية. افترض أنَّ مُعدَّل تدفُّق الدَّم للكِلية 21% من الناتج القلبي.
3. لماذا يخرج الفيل في حديقة الحيوانات في يوم بارد إلى الخارج، في حين تبقى الثّدييّات الصغيرة الأُخرى مثل الفئران في الداخل؟

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™