الفصل 49

الجهازان: الدّوريّ والتّنفّسي
The Circulatory and Respiratory Systems

موجز المفاهيم

49-1 الأجهزة الدورية في اللافقريات
- *الأجهزة الدورية المفتوحة تُحرِّك السَّوائل في اتجاه واحد.*
- *الأجهزة الدورية المُغلقة تدفع السَّوائل أو تحركها في دورة مُغلقة.*

49-2 الأجهزة الدورية في الفقريات
- *طوَّرت الأسماك جهازًا دوريًّا فعَّالًا بالتَّزامن مع وجود الخياشيم.*
- *في البرمائيات ومعظم الزَّواحف، احتاجت الرئة إلى دورة دموية مُنفصلة.*
- *تمتلك الثَّدييات، والطُّيور، والتَّماسيح دورتين دمويتين منفصلتين تمامًا.*

49-3 القلب رباعي الحُجرات والأوعية الدّمويّة
- *تقود الدَّورة القلبية الجهاز القلبي الوعائي.*
- *تتشعب الشَّرايين والأوردة من مناطق الجسم المُختلفة وإليها.*
- *يمكن قياس ضغط الدَّم الشِّرياني.*
- *انقباض عضلات القلب ينشأ من خلايا ذات إثارة ذاتية الإيقاع.*

49-4 خصائص الأوعية الدّمويّة
- *الأوعية الدّمويّة الكبيرة مُكونة من أربع طبقات.*
- *الشَّرايين والشُّريَّنات تطورت لتحمُّل الضَّغط.*
- *تُشكِّل الشُّعيرات الدّمويّة شبكة ضخمة لتبادل المواد.*
- *تمتلك الأوردة والوريدات عضلات أقل في جدرانها.*
- *الجهازُ الليمفاوي مفتوحٌ في اتجاه واحد.*
- *الأمراض القلبية الوعائية تُؤثر في جهاز النقل.*

49-5 تنظيم تدفُّق الدَّم وضغطه
- *الجهاز العصبي يُسرِّع أو يبطئ مُعدَّل ضربات القلب.*
- *يزيد الناتج القلبي مع الإجهاد.*
- *منعكَس مُستقبلات الضَّغط يحافظ على الاتزان الدَّاخلي لضغط الدَّم.*
- *تنظيم حجم الدَّم عن طريق الهرمونات.*

49-6 أجزاء الدَّم (مكونات الدم)
- *بلازما الدَّم هي السائل بين الخلوي.*
- *تتضمن العناصر المُشَكَّلَة الخلايا والصَّفائح الدّمويّة.*
- *العناصر المُشكلة تُنتَج من خلايا جذعية.*
- *تخثُّر الدَّم مثالٌ على سلسلة من التَّفاعلات الأنزيمية (الشَّلال الأنزيمي).*

49-7 تبادل الغازات عبر السّطوح التَّنفسية
- *يتضمن تبادُل الغازات انتشارها عبر الأغشية.*
- *عظَّمت إستراتيجيات تطورية انتشار الغازات.*

49-8 الخياشيم، والتَّنفس الخلوي، وأجهزة القصبات الهوائية
- *الخياشيم الخارجية موجودة في الأسماك والبرمائيات غير النَّاضجة.*
- *الحجرات الخيشومية تحمي الخياشيم في بعض اللافقريات.*
- *خياشيم الأسماك العظمية مُغطاة بالغطاء الخيشومي.*
- *يحتاج التَّنفس عبر الجلد إلى ترطيبه بشكل مُستمر.*
- *نظام القصبات الهوائية الموجودة في مفصليات الأرجل.*

49-9 الرئتان
- *التَّنفس بالهواء يستفيد من الضَّغط الجزئي للغازات.*
- *رئاتُ البرمائيات والزَّواحف امتداداتٌ مُتخصِّصةٌ من القناة الهضمية.*
- *الرئتان في الثَّدييات زادت مساحة السَّطح بشكل كبير.*
- *جهازُ التَّنفس في الطُّيور جهازُ تدفُّق عالي الكفاءة.*

49-10 تراكيب التَّهوية وآلياتها
- *تركيب الرِّئة ووظيفتها تدعم الدَّورة التَّنفسية.*
- *تعتمد فعالية التَّهوية على السِّعة الرِّئوية ومُعدَّل التَّنفس.*
- *التَّهوية تحت سيطرة الجهاز العصبي.*
- *الأمراض التَّنفسية التي تعيق تبادل الغازات.*

49-11 نقل الغازات في سوائل الجسم
- *الصَّبغات التَّنفسية ترتبط بالأكسجين لنقله.*
- *يُشكِّل الهيموجلوبين احتياطيًّا جيِّدًا من الأكسجين.*
- *يتأثر عشق الهيموجلوبين للأكسجين بكل من درجة الحموضة والحرارة.*
- *ينتقل ثاني أكسيد الكربون بشكل رئيس على هيئة أيون البيكربونات.*

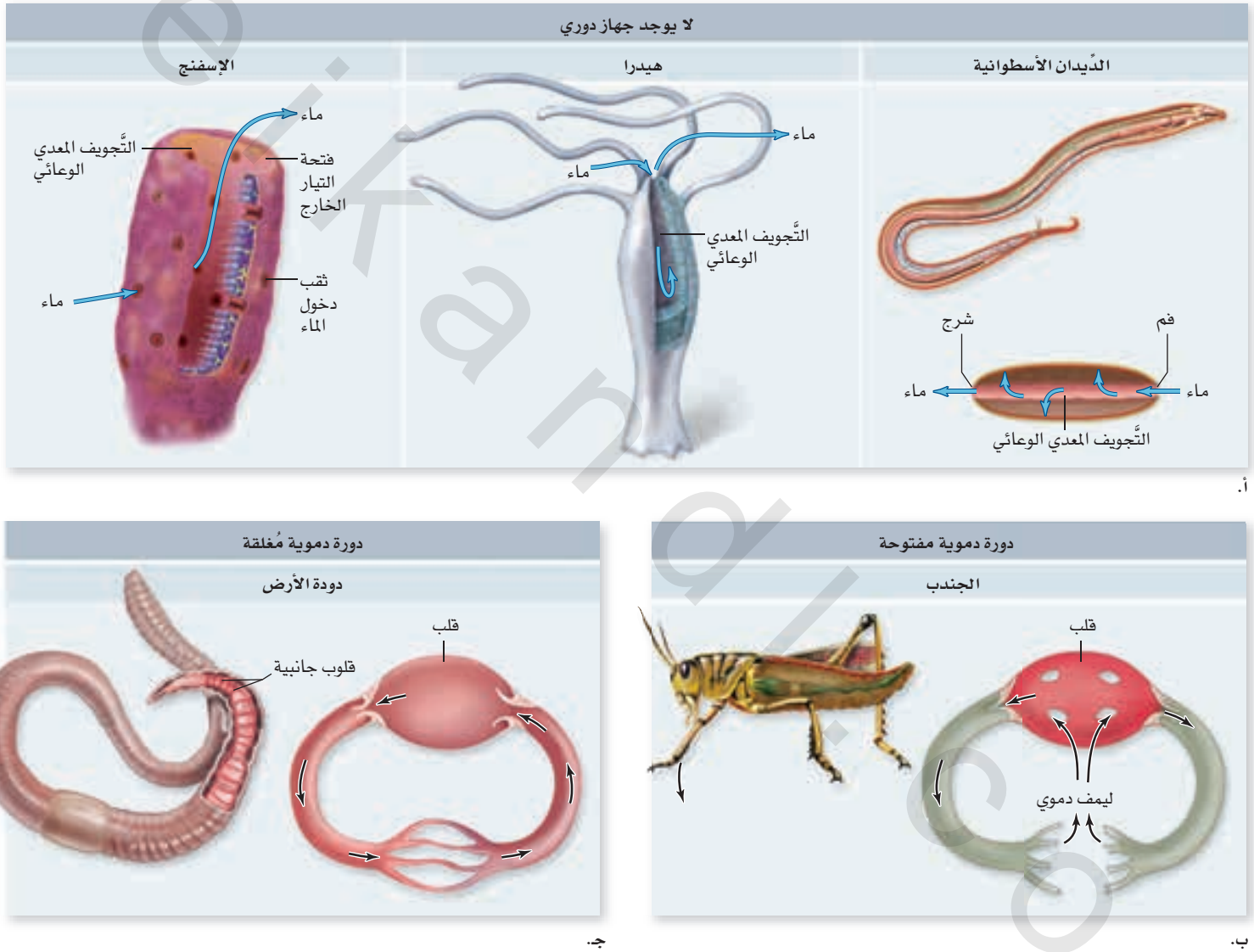
مقدّمة

كلّ خليّة في جسم الحيوان يجب أن تتبادل المواد الغذائية مع البيئة المُحيطة. في المخلوقات أُحادية الخليّة، يحدث هذا التَّبادل مُباشرة عبر الغشاء الخلوي مع البيئة الخارجية. أما في المخلوقات الحيَّة متعددة الخلايا، فتكون مُعظم الخلايا غير مُتَّصلة مع البيئة الخارجية. ولهذا، يجب أن تعتمد على أجهزة مُتخصِّصة للنَّقل والتَّبادل. وعلى الرَّغم من أنَّ هذه الأجهزة تُساعد على نقل كمياتٍ كبيرةٍ، فإن خصائص النَّقل عبر الغشاء تبقى كما هي. كثير من التَّكيفات البنائية والتَّركيبية زادت مساحة السَّطح المُستخدم في عملية النَّقل في المملكة الحيوانية. ولهذا، يتم إشباع حاجات الخلايا جميعها. إنَّ السَّطح البيني الواقع بين الهواء من البيئة الخارجية والدَّم في رئة الثَّدييات يُعطي مثالًا جيدًا على زيادة الفعالية مع زيادة مساحة السَّطح. عند حدوث التّنفس، تنتقل بلايين جُزيئات الأكسجين عبر 80 مترًا مُربعًا من أغشية الحويصلات إلى الشُّعيرات الدّمويّة. في هذا الفصل، سنناقش الجهازين الدّوريّ والتّنفسيّ، وهما الجهازان اللذان يعملان على الدَّعم المُباشر لأجهزة الجسم الأُخرى وأنسجته.

1-49 الأجهزة الدورية في اللافقريات

تعتمد طبيعة الجهاز الدّوريّ في اللافقريات على حجم المخلوق وتعقيده وطبيعته. فـي الإسفنجيات ومُعظم اللاسعـات، يُستخدم الماء من البيئـة الخارجية بوصفه سائـلًا دوريًّـا، حيـث تُمـرِّر الإسفنجيـات المـاء عبر مجموعـة من القنـوات في أجسامهـا، وتقوم الهيـدرا واللاسعات الأُخرى بتدوير المـاء من خلال **التَّجويف المعـوي الوِّعائـي Gastrovascular cavity** (الشـكل 49-1أ). وحيث إنَّ الجـدار المُكوِّن لجسم الهيـدرا يتكون من طبقتين من الخلايا، فإنَّ كلّ طبقة تكون على اتصال إما مع البيئة الخارجية، أو مع التَّجويف المعوي الوِّعائي.

تستخدم الحيوانات اللافقرية كاذبة السيلوم (الدِّيدان الأسطوانية، والعجيليات) السَّوائل الموجودة في تجويف الجسم للنَّقل. إنَّ مُعظم هذه اللافقريات صغيرة، أو طويلة ونحيفة. ولهذا، تحدث عندها عملية دوران جيِّدة عن طريق حركة أجسامها ضدَّ هذه السَّوائل، التي تكون على اتصال مُباشر مع الأنسجة والأعضاء الدَّاخلية. أما الحيوانات الكبيرة التي تمتلك أنسجة يبلغ سمكها عددًا من الطَّبقات، فإنَّ كثيرًا من هذه الخلايا تكون بعيدة عن السطح أو التَّجويف الهضمي، لتستطيع عمل تبادل للمواد بشكل مُباشر. بدلًا من ذلك، فقد طوَّرت هذه الحيوانات جهازًا دوريًّا يحتوي على سائل داخلي ينقل الأكسجين والمواد الغذائية من البيئة الخارجية والتَّجويف الهضمي إلى خلايا الجسم المُختلفة.



أ.

ب.

جـ.

الشكل 49-1

الأجهزة الدورية في المملكة الحيوانية. أ. الإسفنجيات (الجزء الأيسر) لا تمتلك جهازًا دوريًّا مُنفصلًا. تستخدم المياه الدَّائرة عددًا من الثُّقوب لدخول الماء وثقبًا واحدًا لخروج الماء. التَّجويف المعدي الوِّعائي للهيدرا (الجزء الأوسط) يُستخدم بوصفه جهازًا هضميًّا ودوريًّا، يوصل هذا التَّجويف المواد الغذائية مُباشرة إلى الخلايا النسيجية عن طريق الانتشار من التَّجويف الهضمي. الدِّيدان الأسطوانية (الجزء الأيمن) رفيعةٌ بما يكفي لتجعل القناة الهضمية تُستخدم أيضًا بوصفها جهازًا دوريًّا. تحتاج الحيوانات الكبيرة إلى جهاز منفصل لنقل المواد الغذائية إلى الأنسجة والفضلات بعيدًا عنها. ب. في الدَّورة الدّمويّة المفتوحة للحشرات، يُضخ الليمف الدموي من القلب الأُنبوبي إلى تجاويف في جسم الحشرة؛ ثم يعود الليمف الدموي إلى الأوعية الدّمويّة ليُعاد ضخُّه. جـ. في الدَّورة الدّمويّة المُغلقة لدودة الأرض، يبقى الدَّم الذي يضخه القلب داخل مجموعة من الأوعية التي تُعيده إلى القلب. تمتلك الفقريات كلها جهازًا دوريًّا مُغلقًا.

الأجهزة الدورية المفتوحة تحرك السَّوائل في اتجاه واحد

يُقسم الجهاز الدّوريّ إلى جهازين دوريين: مفتوح، ومُغلق. في **الجهاز الدّوريّ المفتوح Open circulatory system** مثل الأجهزة الموجودة في الرَّخويات، ومفصليات الأرجل (49-1ب)، لا فرق بين السَّائل الدّوريّ والسَّائل خارج الخلوي في الأنسجة. هذا السَّائل يُطلق عليه **الليمف الدموي** (هيموليمف) **Hemolymph**.

في الحشرات، يَضُخُّ أُنبوب عضلي، أو **القلب Heart**، الليمف الدموي خلال شبكة من القنوات والتَّجاويف في الجسم. يُصبُّ هذا السَّائل بعد ذلك في التَّجويف المركزي.

الأجهزة الدورية المُغلقة تدفع السَّوائل أو تحركها في دورة مُغلقة

في **الجهاز الدّوريّ المُغلق Closed circulatory system**، يوجد الدَّم، أو السَّائل الدّوريّ، دائمًا في أوعية دموية تنقله من القلب وإليه (الشكل 49-1جـ).

بعض اللافقريات، مثل رأسيات القدم الرَّخوية والدِّيدان (انظر الفصل الـ 34)، ومُعظم الفقريات تمتلك جهازًا دوريًّا مُغلقًا.

في الدِّيدان الحلقية مثل دودة الأرض، ينقبض الوعاء الظَّهري بشكل مُتناغم ومُستمر، ليعمل عمل مضخة، فيُدفع الدَّم من خلال خمسة شُريِّنات صغيرة، التي تعمل أيضًا بوصفها مضخات، إلى الوعاء البطني الذي ينقل بدوره الدَّم إلى النَّاحية الخلفية حتى يعود في النِّهاية إلى الوعاء الظَّهري. يتفرع من كلّ شريان أوعية صغيرة تُزوِّد أنسجة دودة الأرض بالأكسجين والمواد الغذائية، وتخلصها من نواتج الفضلات.

لقد أدَّت حاجات المخلوقات الكبيرة والمُعقَّدة إلى نقل المواد الغذائية والفضلات من الخلايا جميعها وإليها، إلى تطور أجهزة دورية. في اللافقريات، تضُخ الأجهزة الدورية المفتوحة الليمف الدموي إلى الأنسجة، حيث يصبّ بعد ذلك في تَّجويف مركزي. تقوم أجهزة الدَّوران المُغلقة بتحريك السَّائل الدّوريّ في حلقة مُغلقة من المنطقة الضَّاخة وإليها، مثل القلب.

2-49 الأجهزة الدورية في الفقريات

أدَّت زيادة حجم الجسم وتعقيده الفسيولوجي في الحيوانات، إلى الحاجة لزيادة مساحة السَّطح لاستقبال المواد الغذائية والأكسجين، ولإزالة الفضلات وثاني أكسيد الكربون من الأنسجة ذات الكتلة المتزايدة. لقد طوّرت الفقريات تكيُّفات كبيرة، حيث ربطت ما بين الجهازين الدّوريّ والتّنفسيّ، وبذلك سمحت بتطور أجسام كبيرة قادرة على العيش على اليابسة.

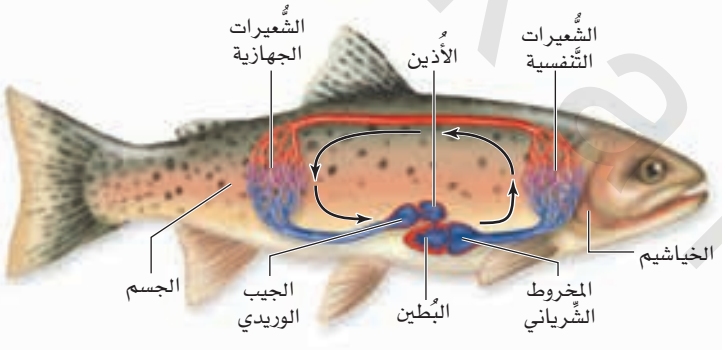
طورت الأسماك جهازًا دوريًّا فعّالًا بالتَّزامن مع وجود الخياشيم

يُعتقد أن أُصول الفقريات من الحبليات كانت تمتلك قلبًا أُنبوبيًّا كبيرًا، مُشابهًا لذلك الموجود الآن في السُّهيم (انظر الفصل الـ 35). لقد كان القلب عبارة عن منطقة مُتخصِّصة من الشريان البطني تحتوي على عضلات أكثر من بقية الشَّرايين؛ وتنقبض هذه المنطقة بشكل أمواج انقباضية دودية بسيطة.

إنَّ تطور الخياشيم لدى الأسماك يحتاج إلى مضخة أكثر فعالية. ولهذا، فإنَّ الأسماك طوَّرت قلبًا ذا غُرف حقيقية قابلة للانقباض. يتكون قلب السَّمكة بشكل رئيس من أُنبوب يحتوي على أربعة تراكيب مُرتبة واحدة تلو الأُخرى، لتُشكِّل هذه التَّراكيب غرفتين أو حجرتين (الشكل 49-2). إنَّ التَّركيبين الأوليين – **الجيب الوريدي Sinus venosus والأذين Atrium** – شكَّلا الحجرة الأولى؛ في حين شكّل الاثنان المُتبقيان، **البُطين Ventricle والمخروط الشِّرياني Conus arteriosus**، الحجرة الثَّانية. يبدأ الانقباض بداية بالجيب الوريدي، ثم الأذين، ثم البُطين، ثم المخروط الشِّرياني.

على الرغم من تغيُّر مواقع هذه التَّراكيب في الفقريات، فإن تسلسل الانقباضات يبقى ثابتًا. في الأسماك، تبدأ السّيالات الكهربائية الانقباض في الجيب الوريدي؛ في الفقريات الأُخرى، وتبدأ السّيالات الكهربائية في تركيب مُشابه له يُدعى العقدة الجيبية الأذينية **Sinoatrial node (SA)**.

بعد انتقال الدَّم من المخروط الشَّرياني ينتقل إلى الخياشيم، وهناك يُزود بالأكسجين. يُغادر الدَّم بعد ذلك الخياشيم من خلال شبكة من الشرايين إلى باقي الجسم، ليعود إلى الجيب الوريدي. هذه الحلقة البسيطة تمتلك مُحدِّدًا واحدًا هو هبوط ضغط الدَّم بشكل كبير عند مروره في الشُّعيرات الدّمويّة في الخياشيم.



الشكل 49-2

القلب والدَّورة الدَّمويّة للأسماك. رسم تخطيطي لقلب السَّمكة، يبيِّن التَّراكيب على التَّوالي: (جيب وريدي؛ أُذين؛ بُطين؛ مخروط شِّرياني) التي تُشكِّل حجرتي ضخ. يُضخ الدَّم عن طريق البُطين إلى الخياشيم، ومن ثمَّ إلى الجسم. الدَّم الغني بالأكسجين يظهر باللَّون الأحمر؛ والدَّم قليل الأكسجين يظهر باللَّون الأزرق.

يؤدي هذا إلى بُطء اندفاع الدَّم من الخياشيم إلى بقية أجزاء الجسم، ومن ثم يُقلِّل من توصيل الأكسجين إلى الأنسجة.

في البرمائيات ومعظم الزَّواحف، احتاجت الرِّئة إلى دورة دموية مُنفصلة

إنَّ وجود الرِّئة في البرمائيات تطلَّب وجود تغيُّر في طبيعة الدَّورة الدّمويّة فيها، حيث طوَّرت هذه المخلوقات دورة أخرى. بعد أن يتم ضخ الدَّم من القلب خلال الشرايين الرِّئوية إلى الرِّئة، فإنها لا تذهب مُباشرة إلى أنسجة الجسم المُختلفة، ولكنها تعود عن طريق الأوردة الرِّئوية إلى القلب. يُغادر الدَّم القلب مرة أُخرى ليذهب إلى الأنسجة المُختلفة. يُدعى هذا النِّظام **الدَّورة المُزدوجة Double circulation**: حيث تضم **الدَّورة الرِّئوية Pulmonary circulation**، وهي حركة الدَّم بين القلب والرِّئة، **والدَّورة الجهازية Systemic circulation**، وهي حركة الدَّم بين القلب وبقية أجهزة الجسم.

الدّورة الدّمويّة في البرمائيات

إن أفضل تصميم، هو انتقال الدَّم المحمل بالأكسجين من الرِّئة مُباشرة إلى الأنسجة، بدلًا من أن يتمَّ خلطُه في القلب مع الدَّم غير المحمل بالأكسجين العائد من الجسم. للتَّقليل من هذا الخلط؛ طوَّرت البرمائيات تركيبين للحدّ من ذلك (الشكل 49-3). أولًا، لقد تمَّ فصل الأُذين إلى حجرتين: الأُذين الأيمن يستقبل الدَّم غير المحمل بالأكسجين من الدَّورة الدّمويّة الجهازية، والأُذين الأيسر يستقبل الدَّم المحمل بالأكسجين من الرِّئة. ومن ثم، فإنَّ هذين النَّوعين من الدَّم لا يتم اختلاطهما.

ولأنّ قلب البرمائيات يحتوي على بُطين واحد، فإنَّ فصل الدَّورة الرِّئوية عن الدَّورة الجهازية يكون غير كامل. يقلل من هذا الاختلاط في البُطين قنوات داخلية تصنعها نتوءات في جدار البطين. لقد تمَّ فصل المخروط الشِّرياني جزئيًّا عن طريق حاجز يوجِّهُ الدَّم غير المحمّل بالأكسجين إلى الشريان الرِّئوي، والدَّم المحمّل بالأكسجين إلى الشريان الأبهر، أي الشريان الرّئيس في الدَّورة الجهازية.

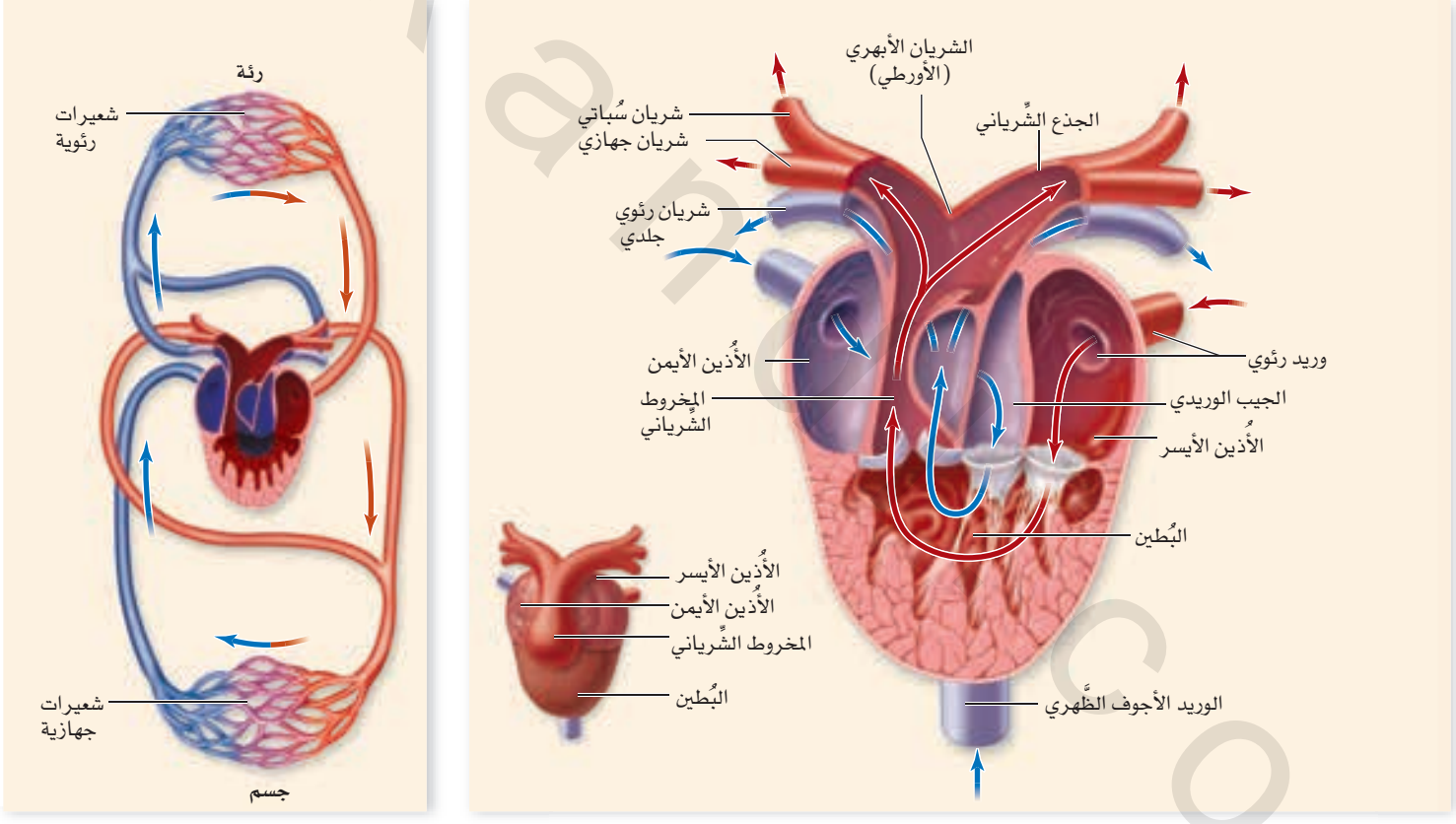
تستطيع البرمائيات التي تعيش في الماء الحصول على أكسجين إضافي عن طريق الجلد. ومن ثم، تمتلك هذه البرمائيات دورة رئوية-جلدية *Pulmocutaneous* تُرسل الدَّم إلى الرِّئة والجلد. يوجد التَّنفس الجلدي أيضًا في الكثير من الزَّواحف المائية، مثل السَّلاحف المائية.

الدّورة الدّمويّة في الزَّواحف

لقد أُضيفت تعديلات أُخرى إلى القلب للتَّقليل من خلط الدَّم المحمّل بالأكسجين، وغير المحمل بالأكسجين في الزَّواحف. إضافة إلى احتواء الزواحف على أذينين مُنفصلين، فإنها تمتلك حاجزًا يقسم البُطين جزئيًّا إلى قسمين. يكون هذا الفصل كاملًا في واحدة من رتب الزواحف، التَّماسيح، التي تمتلك بطينين مُنفصلين تمامًا (انظر الجزء اللاحق). ومن التَّغيُّرات الأُخرى على الدَّورة الدّمويّة في الزَّواحف، اندماجُ المخروط الشِّرياني في جذوع الشَّرايين الكبيرة المُغادرة من القلب.

تمتلك الثَّدييات والطُّيور والتَّماسيح دورتين دمويتين منفصلتين تمامًا

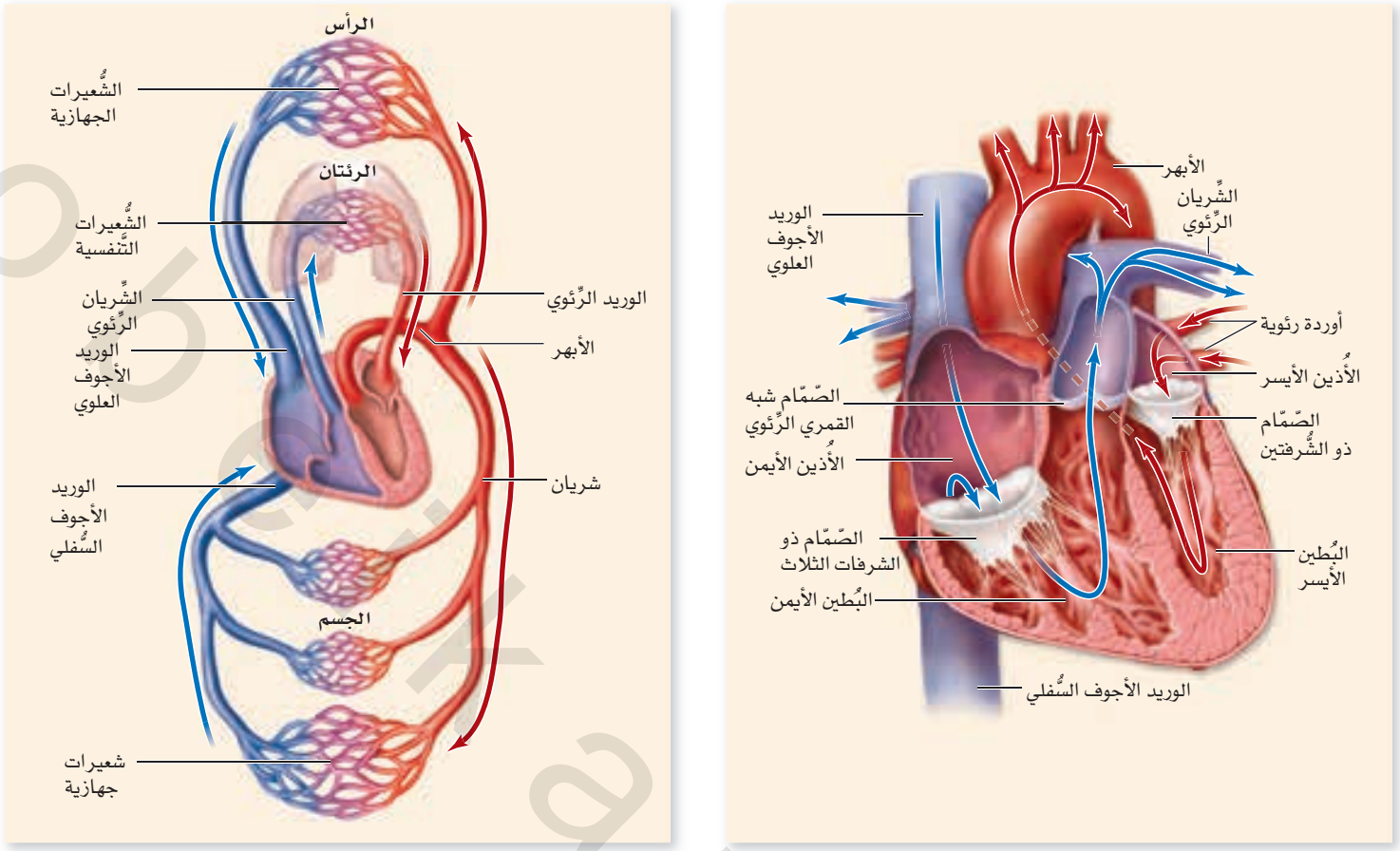
تمتلك الثَّدييات، والطُّيور، والتَّماسيح قلبًا بأربع حُجرات، يكون فيها كلّ من الأذينين والبطينين مُنفصلين تمامًا (الشكل 49-4). يستقبل الأُذين الأيمن الدَّم غير المحمّل بالأكسجين من أنحاء الجسم المُختلفة، ويصبُّه في البُطين الأيمن، حيث يضخّه البُطين الأيمن إلى الرِّئة. يستقبل الأُذين الأيسر الدَّم المحمل بالأكسجين من الرِّئة، ويصبُّه في البُطين الأيسر، الذي يضخّه بدوره إلى بقية الجسم.



أ. ب.

الشكل 49-3

القلب والدَّورة الدّمويّة للبرمائيات. أ. يمتلك الضفدع قلبًا ذا ثلاث حجرات: أُذينين وبُطين واحد، وهو يضخُّ الدَّم إلى الرئتين والجسم. ب. على الرغم من احتمالية الخلط، فالدَّم المحمل بالأكسجين وغير المحمل بالأكسجين (الخطوط الحمراء والزرقاء، على التَّوالي) يختلط بشكل قليل عند ضخّه إلى الرئتين والجسم. يحدث تزويد الدَّم بالأكسجين أيضًا عن طريق تبادل الغازات عبر الجلد.



ب.

أ.

الشكل 49-4

القلب والدَّورة الدَّمويّة في الثَّدييات والطُّيور. أ. طريق مرور الدَّم خلال القلب ذي الأربع حجرات. ب. يستقبل الجزء الأيمن من القلب الدَّم منزوع الأكسجين، ويضُّخه إلى الرئتين؛ في حين يستقبل الجزء الأيسر من القلب الدَّم المحمل بالأكسجين، ويضُّخه إلى الجسم. بهذه الطريقة، تبقى الدَّورة الدّمويّة الرِّئوية مُنفصلة بشكل كامل عن الدّورة الجهازية.

القلب في هذه الفقريات ذات الدورتين. يمتلئ الأذينان بالدَّم، وينقبضان معًا في وقت واحد، طارحين ما يملكانه من الدَّم إلى البُطينين. ينقبض أيضًا البُطينان في الوقت نفسه دافعين الدَّم إلى الدَّورة الرِّئوية والدَّورة الجهازية.

يُعتقد أنَّ وجود جهاز دوري يمتلك دورتين دمويتين في الثَّدييات والطُّيور مهم لتطوُّر الحيوانات ذات الدَّم الحار، حيث تحتاج إلى دورات ذات كفاءة عالية لدعم مُعدَّلات الأيض المُرتفعة التي تحتاج إليها هذه الحيوانات للحفاظ على درجة حرارة أجسامها الدَّاخلية ثابتة حول نقطة مُعينة.

بقي الجيب الوريدي، خلال عملية تطور قلب الفقريات، يعمل بوصفه صانع خطو، وهو مكان تَكوُّن السّيالات العصبية التي تُسبِّب نبضات القلب. وعلى الرغم من أنَّ الجيب الوريدي شكَّل حُجرة رئيسة بقلب الأسماك، فقد اختُزِل من ناحية الحجم في البرمائيات، واختُزِل أكثر في الزَّواحف. لا يوجد الجيب الوريدي على شكل حُجرة منفصلة في الطُّيور والثَّدييات، على الرغم من بقاء أجزاء من أنسجته في جدار الأُذين الأيمن. هذه الأنسجة، أي العُقدة الجيبية الأذينية، لا تزال المكان الذي تنشأ منه نبضات القلب، كما سَيُوضَّح هذا لاحقًا.

تمتلك مُعظم الفقريات جهازًا دوريًّا مُغلقًا. يُعَدُّ قلب السَّمكة أنبوبًا مُعدَّلًا، يتكون من حُجرتين، حيث يُضخ الدَّم من القلب إلى الخياشيم، ثم يُوزَّع إلى بقية الجسم. تمتلك البرمائيات والزَّواحف دورتين - دورة رئوية وأخرى جهازية - تُرسِل الأولى الدَّم إلى الرِّئة، في حين تُرسل الأُخرى الدَّم إلى بقية أنحاء الجسم. وحيث إنَّ هذه الفقريات تمتلك بُطينًا واحدًا، فإنَّ بعض الخلط يحدث بين الدَّم المحمّل بالأكسجين وغير المحمّل بالأكسجين. في الطُّيور والثَّدييات والتَّماسيح، يتمُّ فصل البطينين بشكل كامل، ولا يحدث خلط بين الدَّم المحمل بالأكسجين وغير المحمل بالأكسجين.

3-49 القلب رباعي الحُجرات والأوعية الدّمويّة

كما ذكرنا سابقًا، يمر القلب في الثّدييات، والطُّيور، والتّماسيح بدورتين انقباضيتين: انقباض أحد الأُذينين لإرسال الدَّم إلى البُطين، وانقباض أحد البُطينين لإرسال الدَّم إلى الدَّورة الرِّئوية أو الجهازيَّة. هذان الانقباضان، إضافة إلى فترة الرَّاحة بينهما، يُشكِّلان **الدَّورة القلبية Cardiac cycle** التي تُشكِّل النَّبضة القلبية.

تقود الدَّورة القلبية الجهاز القلبيّ الوعائيّ

يمتلك القلب زوجين من الصمامات (الشكل 49-5). أحد هذه الأزواج، **الصمامات الأُذينية البُطينية Atrioventricular (AV) valves**، تُحافظ على اتجاه تدفُّق الدَّم من الأذينين إلى البطينين. يُدعى الصّمام الأُذينيُّ البُطينيُّ الموجودُ على الجهة اليُمنى من القلب **الصّمام ثُلاثيَّ الشُّرفات Tricuspid valve**، والصّمام الموجود على الجهة اليُسرى **الصّمام ثنائي الشُّرفات Bicuspid or Mitral valve**. الزَّوج الآخر من الصمامات، يُسمّى **الصمامات نصف القمرية Semilunar valves** (أو نصف هلالية)، تسمح بمرور الدَّم من البُطينين إلى الأنظمة الشِّريانية. **الصّمام الرِّئوي Pulmonary valve** يقع عند مخرج البُطين الأيمن، **أمّا الصّمام الأبهري Aortic valve** فيقع عند مخرج البُطين الأيسر. تُفتَح هذه الصّمامات، وتُغلَق عند مرور القلب بالدَّورة القلبية. يُسبِّب إغلاق هذه الصّمامات صوت القلب "لَبْ دَبْ" الذي يُسمع باستخدام سمّاعة الطبيب.

يعود الدَّم إلى القلب المُستريح من خلال أوردة تُصب في الأُذينين الأيمن والأيسر. عندما يمتلئ الأُذينان، يرتفع الضَّغط الدَّاخلي، ويُسبِّب ذلك فتح الصّمامات الأُذينية البُطينية، ويتدفق الدَّم إلى البُطينين. يؤدي هذا إلى امتلاء البطينين بما يقارب 80%. إنَّ انقباض الأُذينين بعد ذلك يُكمِّل الـ 20% المُتبقية من الثمانين ملليترًا، في المُعدَّل، التي يستطيع كلّ من البطينين استقبالها في حالة الرَّاحة للشَّخص. تتم هذه الأحداث عندما يكون البُطينان في حالة الانبساط، وتُسمّى هذه الفترة من الرَّاحة **الانبساطَ البُطينيّ Diastole**.

بعد فترة تلكؤ قليلة، ينقبض البُطينان، وتُسمّى هذه الفترة من الانقباض **الانقباضَ البُطينيَّ Systole**. إنَّ الانقباض في كلّ بطين يزيد من الضَّغط الدَّاخلي في كلّ حجرة، مُسبِّبًا إغلاقًا قويًّا للصّمامات الأُذينية البُطينية (صوت «لَبْ»)، مانعًا الدَّم من الرُّجوع إلى الأذينين. بعد إغلاق الصّمامات الأُذينية البُطينية مباشرةً، يرتفع الضَّغط في البُطينين مُسبِّبًا فتح الصّمامات نصف القمرية ليخرج الدَّم إلى الأنظمة الشِّريانية. بعد ارتخاء البُطينين، يمنع إغلاقُ الصّمامات نصف القمرية رجوعَ الدَّم إلى البُطينين (صوت «دَبْ»).

تتشعب الشَّرايين والأوردة من مناطق الجسم المُختلفة وإليها

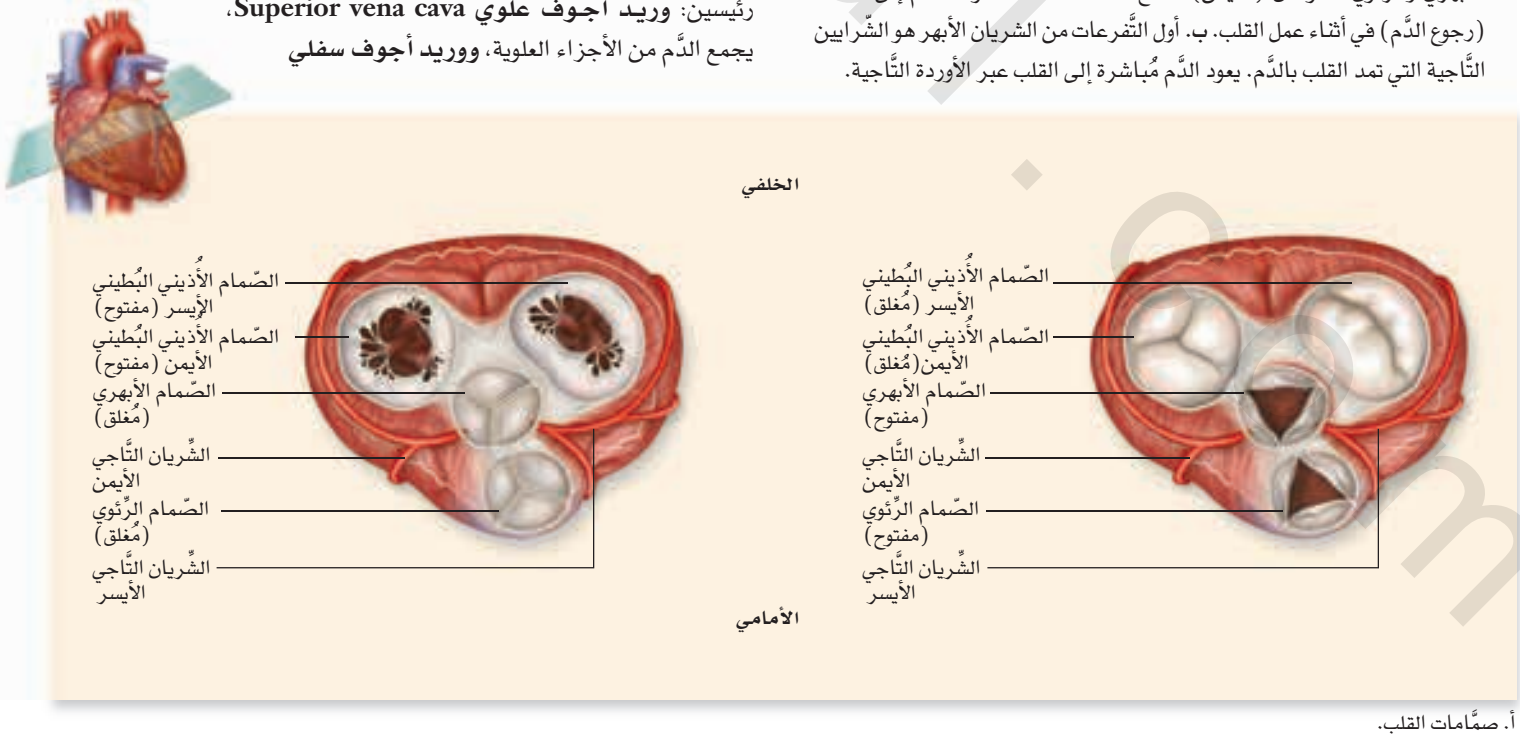
تنقُل **الشَّرايين الرِّئوية Pulmonary arteries** اليُمنى واليُسرى الدَّم غير المحمل بالأكسجين من البُطين الأيمن إلى الرئتين اليُسرى واليُمنى. وكما ذكرنا سابقًا، فإنَّ **الأوردة الرِّئوية Pulmonary veins** تعيد الدَّم المحمل بالأكسجين من الرِّئتين إلى الأُذين الأيسر من القلب.

الأبهرُ **Aorta** وتشعُّباته جميعها شرايين جهازيةٌ، تحمل الدَّم المحمل بالأكسجين من البُطين الأيسر إلى أجزاء الجسم كلّه. **الشَّرايين التَّاجية Coronary arteries** هي أول التَّفرعات من الأبهر؛ حيث تُزوِّد هذه الشَّرايين عضلات القلب بالدَّم المحمل بالأكسجين (الشكل 49-5 ب). تتفرَّع الشَّرايين الجهازية الأُخرى من القوس الأبهري فوق القلب والجزء الهابط والعابر للتَّجويف الصَّدري والبطني.

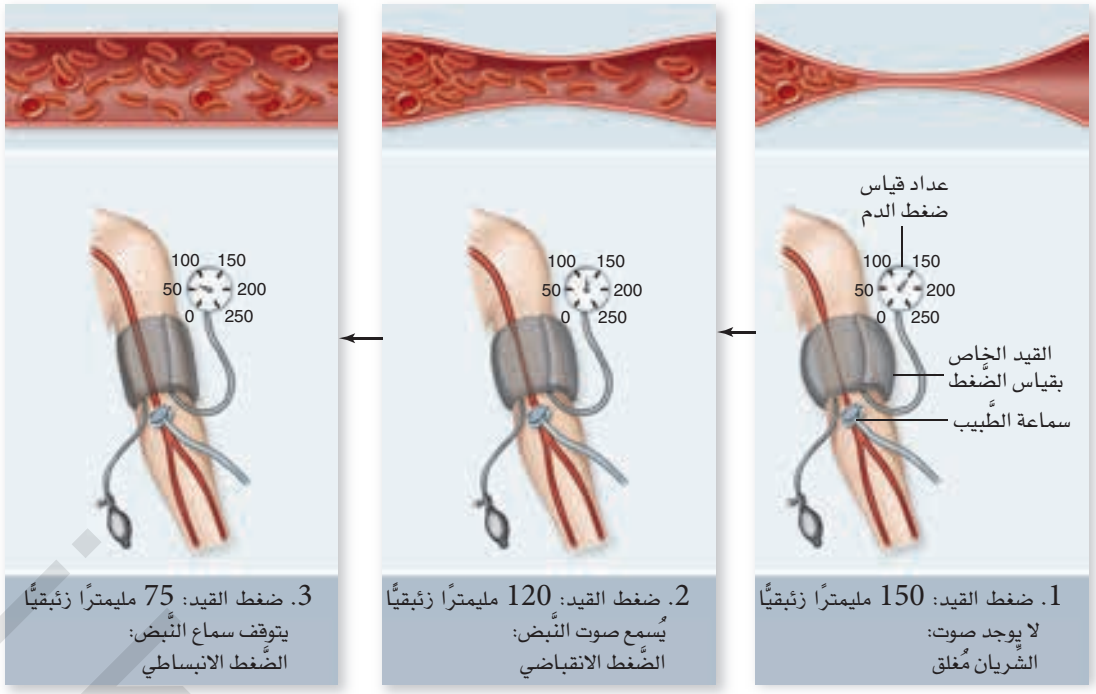
يعود الدَّم قليل الأكسجين، من أعضاء الجسم المُختلفة إلى القلب عن طريق الأوردة الجهازية. تُصب هذه الأوردة في النِّهاية في وريدين رئيسين: **وريد أجوف علوي Superior vena cava**، يجمع الدَّم من الأجزاء العلوية، **ووريد أجوف سفلي**

الشكل 49-5

صمامات القلب والدَّورة التَّاجية. أ. الصّمامات الأربعة للقلب مُوضَّحة في هذا الشَّكل، وتبدو الصمامات الأُذينية -البُطينية مفتوحة (الأيسر)، وكذلك الصّمام الأبهري والرِّئوي مفتوحان (الأيمن). تمنع هذه الصّمامات عودة الدَّم إلى الخلف (رجوع الدَّم) في أثناء عمل القلب. ب. أول التَّفرعات من الشريان الأبهر هو الشَّرايين التَّاجية التي تمد القلب بالدَّم. يعود الدَّم مُباشرة إلى القلب عبر الأوردة التَّاجية.



أ. صمَّامات القلب.



الشكل 49-6

قياس ضغط الدَّم. يتم ربط القيد الخاص بقياس ضغط الدَّم بشكل مُحكم؛ لكي يُمنع تدفُّق الدَّم عبر الشريان العضدي. بعد تقليل الضغط في هذا القيد، يُصبح ضغط الدَّم الانقباضي أكبر من ضغط القيد، ولهذا يُسمع النَّبضُ باستخدام سمَّاعة الطَّبيب. يُسجَّل الضَّغطُ عند هذه النقطة بوصفه ضغطًا انقباضيًّا. مع تخفيض الضَّغط في القيد تدريجيًّا، يقلّ تشوّه الأوعية الدّمويّة، فيختفي الصوت، ويعود تدفُّق الدَّم الصامت. الضغط الانبساطي هو الضَّغط الذي يتوقف عنده سماع الصوت.

Inferior vena cava، يجمع الدَّم من الأجزاء السُّفلية. تصبُّ هذه الأوردة في الأُذين الأيمن، فتكتمل بذلك الدَّورة الدّمويّة الجهازية.

يتسبَّب الضَّغط المُتولِّد عن الانقباض البُطيني في تدفُّق الدَّم في الشَّرايين، والشُّعيرات الدّمويّة، والأوردة. ويجب على البُطينين الانقباض بقوة كافية لتحريك الدَّم عبر الجهاز الدّوريّ كاملًا.

يمكن قياس ضغط الدَّم الشِّرياني

ينتقل الضَّغط المُتولِّد بعد انقباض البُطينين إلى الشَّرايين بعد أن يُفتح الصّمام الأبهر. إنَّ النَّبض المحسوس عند معصم اليد أو الرَّقبة سببه تغيُّرات في الضَّغط، حيث تتمدد الشَّرايين المرنة أو تتقلّص مع تدفُّق الدَّم فيها. يستخدم الأطباء عادةً ضغط الدَّم مؤشرًا عامًّا يدلّ على سلامة الجهاز القلبي الوعائي، حيث إنَّ ظروفًا مُتنوعة تُسبِّب زيادة أو نقصًا في ضغط الدَّم.

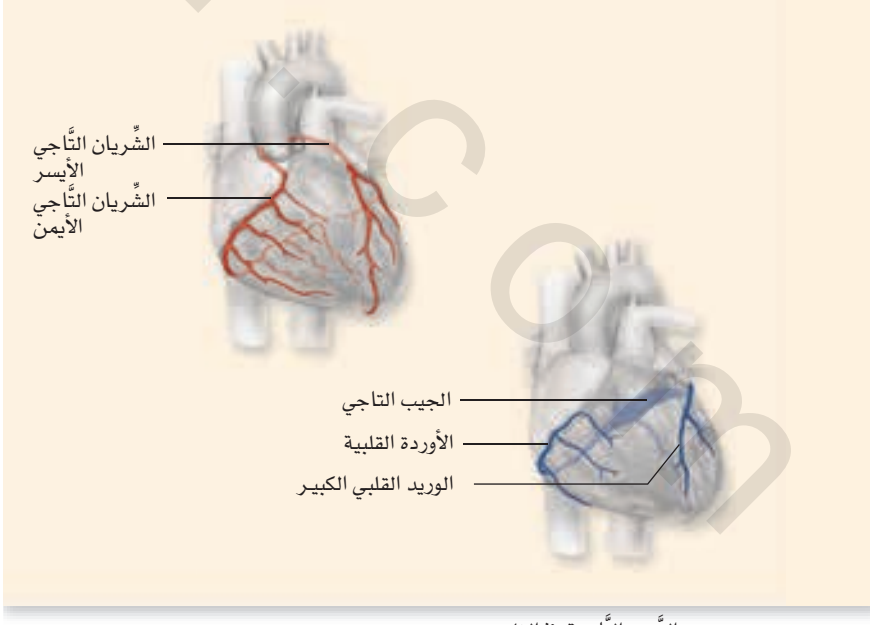
يُقاس ضغط الدَّم بجهاز، يُسمّى المِضغاط (جهاز قياس ضغط الدَّم) *Sphygmomanometer*، عن طريق الشِّريان العضدي الموجود في الجزء الدَّاخلي للذراع، فوق الكوع (الشكل 49-6). تُلف قطعة قماش تُشبه القيد على الجزء العلوي للذراع بشكل جيد، وتنفخ لتمنع تدفُّق الدَّم إلى الجزء السُّفلي للذراع. عند تخفيف الضغط تدريجيًّا في قطعة القماش (القيد)، نبدأ سماع نبضات بسماعة الطَّبيب، وهذا بسبب مرور الدَّم في الشَّرايين. في اللحظة التي يبدأ فيها سماع الصَّوت، تُؤخذ القراءة، ويدل ذلك على قمة الضَّغط في الشَّريان، أو **ضغط الانقباض Systolic pressure**، وهو ناتج عن انقباض البُطينين. عند زيادة ارتخاء القيد، لا يكون هناك عائق لتدفُّق الدَّم، لهذا يتوقف سماع النَّبضات. وتُشير هذه النُّقطة إلى أقل ضغط أو **ضغط الانبساط Diastolic pressure**. عندها، يكون البُطينان في حالة ارتخاء.

يُكتب ضغط الدَّم بوصفه نسبة الضَّغط الانقباضي إلى الضَّغط الانبساطي، وللشَّخص الطَّبيعي في العشرينيّات من عمره، يكون ضغط الدَّم تقريبًا 120 / 75 (تُقاس بالمليمتر الزِّئبقي، mmHg). إذا زاد هذا الرَّقم على 150 مليمترًا زئبقيًّا بالنِّسبة إلى الضَّغط الانقباضي، أو زاد على 90 مليمترًا للضَّغط الانبساطي، فإنّ هذا يشير إلى **ارتفاع ضغط الدَّم Hypertension**.

انقباض عضلات القلب ينشأ من خلايا ذاتية الإيقاع

تحفّز إزالةُ الاستقطاب الغشائي انقباضَ الخلايا القلبية، كما يحدث في الخلايا العضلية الأُخرى (انظر الفصل الـ 44 و 47). تقوم السّيالات العصبية القادمة من العصبونات الحركية بإزالة الاستقطاب، في العضلات الهيكلية. يمتلك القلب، بالمُقارنة مع الخلايا العضلية الهيكلية، خلايا عضلية مُتخصصة لديها قابلية "الإثارة الذَّاتية" تُدعى **أليافًا ذاتية الإيقاع Autorhythmic fiber**، وتستطيع تكوين سيالات عصبية على فترات مُنتظمة دون الحاجة إلى تنشيط عصبي.

العُقدة الجيبية الأذينية أهم مجموعة من الخلايا ذاتية الإيقاع، وقد تمَّ وصفها في السَّابق (الشكل 49-7). تقع هذه العُقدة في جدار الأُذين الأيمن، وتعمل بوصفها صانع الخطو لبقية القلب؛ لأنها تكوِّن سيالات عصبية تلقائية بمعدَّل عالٍ مُقارنة مع الخلايا ذاتية الإيقاع الأُخرى. سبب السّيالات العصبية التِّلقائية هو النَّدفُّق



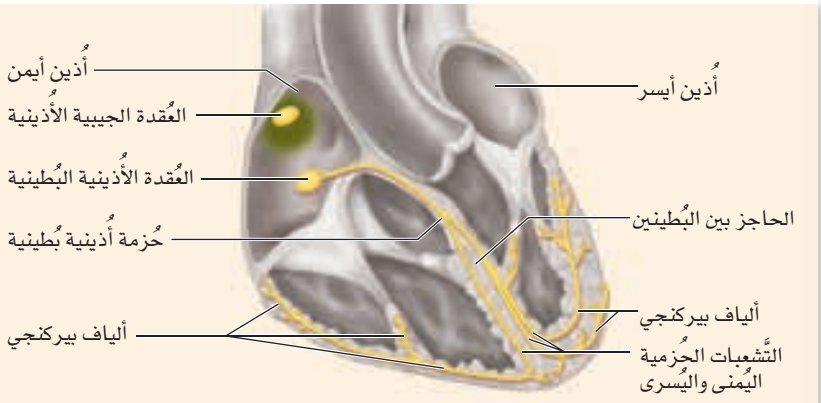
ب. الدَّورة التَّاجية في القلب.

obeikandl.com

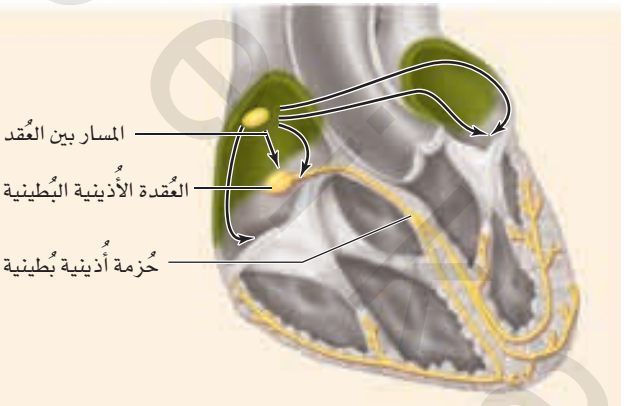
المُستمر لأيونات الصوديوم إلى داخل الخليَّة الذي يعمل على إزالة الاستقطاب. عند وصول جهد العتبة، يحدث السّيال العصبي. عند انتهاء السّيال العصبي، يكون الكمون الغشائي (جهد الغشاء) أقل من شدة العتبة، وتعود العملية لتبدأ من جديد. تُكوِّن العُقدة الجيبية الأُذينية سيالًا عصبيًّا كلّ 0.6 ثانية، وهذا يعادل ما يقارب 100 نبضة في الدَّقيقة. وكما سنرى لاحقًا في هذا الفصل، فإنَّ الجهاز العصبي الذَّاتي يستطيع تغيير هذا المُعدَّل.

تنتقل إزالة الاستقطاب من هذه العُقدة عبر طريقين: الأول إلى الألياف العضلية القلبية للأُذين الأيسر. والثاني إلى الأُذين الأيمن، ومن ثمَّ إلى **العُقدة الأُذينية البطينية Atrioventricular (AV) node**. عندما تنشأ إزالة الاستقطاب، تنتشر بسرعة من خليّة عضلية إلى أُخرى على شكل موجة تُغلِّف كلاً من الأُذين؛ الأيمن والأيسر في الوقت نفسه تقريبًا. إنَّ هذا الانتقال السَّريع لإزالة الاستقطاب ممكن الحدوث بسبب وجود ألياف توصيل مُتخصِّصة، وبسبب اتصال الخلايا العضلية مع بعضها من خلال الأقراص البينية *Intercalated disks* (انظر الفصل الـ 43).

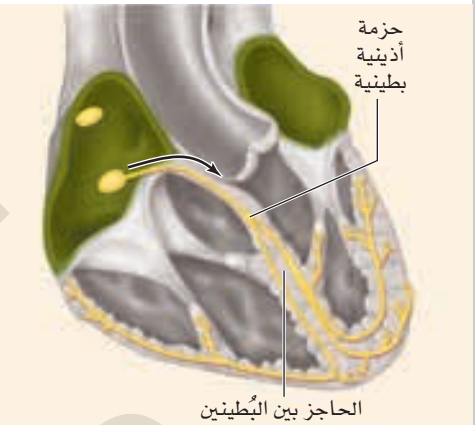
تفصل صفيحة من النَّسيج الضَّام الأُذينين عن البُطينين، وتمنع انتشار السّيالات العصبية عبر الألياف العضلية من الأُذين إلى البطين. تعمل العُقدة الأُذينية البُطينية بوصفها طريقًا وحيدًا لمرور إزالة الاستقطاب وتوصيله من الأذينين إلى البُطينين. تقلِّلُ الألياف المُكوِّنة للعُقدة الأُذينية البطينية سرعة توصيل إزالة الاستقطاب،



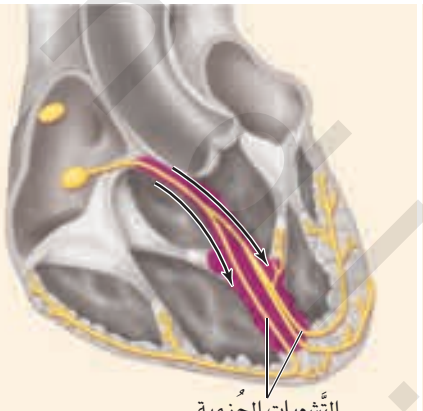
1. يبدأ السّيال العصبي من عند العُقدة الجيبية الأُذينية، وينتقل إلى العُقدة الأُذينية البُطينية.



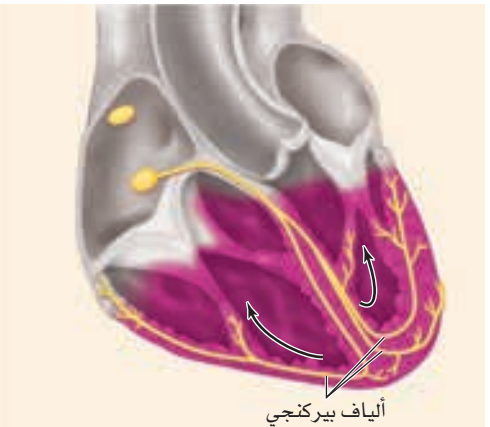
2. يتلكأ السّيال العصبي عند العُقدة الأُذينية البُطينية. ومن ثم ينتقل إلى الحُزمة الأُذينية البُطينية.



3. من الحُزمة الأُذينية البُطينية، ينتقل السّيال العصبي إلى الأسفل عبر الفاصل بين البطينين.



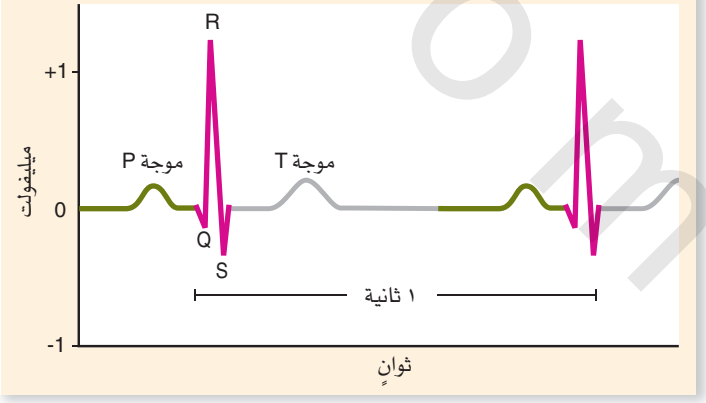
4. ينتشر السّيال العصبي إلى التَّفرعات في الحاجز بين البطينين.



5. أخيرًا يصل السّيال العصبي إلى ألياف بركنجي، ثُمَّ يتوزع السّيال عبر البُطينين.

الشكل 49-7

مسار التَّهيُّج الكهربائي في القلب. الأحداث التي تتم في أثناء انقباض القلب تتماشى مع قياسات النَّشاط الكهربائي في التَّخطيط الكهربائي للقلب (ECG). إزالة الاستقطاب/ انقباض الأُذينين يظهران باللَّون الأخضر في الأعلى، ويقابلان الموجة P من مُخطَّط القلب الكهربائي (وهي أيضًا باللَّون الأخضر). إزالة الاستقطاب/ انقباض البُطينين يظهران باللَّون الأحمر، ويقابلان الموجة QRS من المُخطط الكهربائي للقلب (باللَّون الأحمر أيضًا). الموجة T في المُخطط الكهربائي للقلب تقابل إعادة استقطاب البُطينين. تُغطّى إعادة استقطاب الأُذينين بالموجة QRS ومن ثم، فهي لا تظهر.



مُقلِّلة بذلك انقباض البُطين بمقدار 0.1 ثانية. ويسمح هذا التَّأثير للأُذين بإتمام عملية الانقباض وطرح ما يحويه من دم قبل أن يبدأ البُطين بالانقباض.

بعد ذلك، تنتقل إزالة الاستقطاب بشكل سريع إلى البُطين عبر شبكة من الألياف تُسمّى **الحزمة الأُذينية البطينية Atrioventricular bundle**، أو **حزمة هِسّ Bundle of His**. تنتقل إزالة الاستقطاب بعد ذلك من هذه الألياف إلى **ألياف بيركنجي Purkinje fibers**، التي تُحَفِّزُ انقباض الخلايا العضلية القلبية في كلّ من البطينين الأيمن والأيسر بشكل مُباشر، مُسببةً انقباضها في الوقت نفسه.

إنَّ تحفيز الخلايا العضلية القلبية يُسبِّب تكوين جهد الفعل بها، الذي يؤدي بدوره إلى انقباض هذه الخلايا. يتم التَّحكُّم في عملية الانقباض هذه عن طريق الكالسيوم ونظام تروبونين/ تروبوميوسين بشكل مُشابه لما يحدث في العضلة الهيكلية (انظر الفصل الـ 47)، لكن شكل جهد الفعل في الخلايا العضلية القلبية مُختلف عنه في خلايا العضلة الهيكلية. يتبع فترة الصُّعود التي يُسبِّبها تدفُّق أيونات الصوديوم عبر قنوات، تفتح وتُغلق مُعتمدة على التَّغيُّر في فرق الجهد حول الغشاء، فترة ثبات في إزالة الاستقطاب التي تسمح بحدوث انقباض دائم. إنَّ سبب هذه الفترة يعود إلى فتح قنوات الكالسيوم المُعتمدة في فتحها وإغلاقها على التَّغير في فرق الجهد حول الغشاء. يُسبِّب استمرار تدفُّق الكالسيوم من الخارج استمرارًا في إزالة الاستقطاب عندما يتم وقف تنشيط قنوات الصوديوم. يؤدي هذا الاستمرار في إزالة الاستقطاب إلى زيادة عدد قنوات الكالسيوم المفتوحة الموجودة في الشبكة الأندوبلازمية وزيادة تدفُّق الكالسيوم نحو السيتوبلازم، وهذا يُسبِّب انقباضًا مُستديمًا. يُزال الكالسيوم من السيتوبلازم عن طريق مضخَّة في الشَّبكة الأندوبلازمية تُشبه تلك الموجودة في العضلات الهيكلية، وعن طريق نواقل إضافية على غشاء الخليّة، تقوم بضخ الكالسيوم من السيتوبلازم إلى الفراغ بين الخلوي.

يُمكن تسجيل النَّشاط الكهربائي للقلب من السَّطح الخارجي للجسم عن طريق أقطاب توضع على الأطراف والصَّدر. يُسمّى هذا التَّسجيلُ **التَّخطيطَ الكهربائيَّ للقلب Electrocardiogram (ECG)**، الذي يُبيِّن إزالة الاستقطاب أو إعادته لخلايا القلب خلال الدَّورة القلبية (انظر الشَّكل 49-7). تُسبِّب إزالةُ الاستقطاب انقباضَ القلب، وتُسبِّب إعادةُ الاستقطاب ارتخاءَه.

تنتج القمة الأولى في التَّخطيط، P، من إزالة الاستقطاب الحاصلة في الأُذينين، وترتبط هذه القمة بانقباضهما. وتُعبِّر القمّة الثانية، QRS عن إزالة الاستقطاب في البُطينين؛ في خلال هذه الفترة، ينقبض البُطينان (الانقباض البُطيني). القمّة الأخيرة، T، تُعبِّر عن إعادة استقطاب البُطينين؛ وفي هذه الفترة يحدث ارتخاء البُطينين.

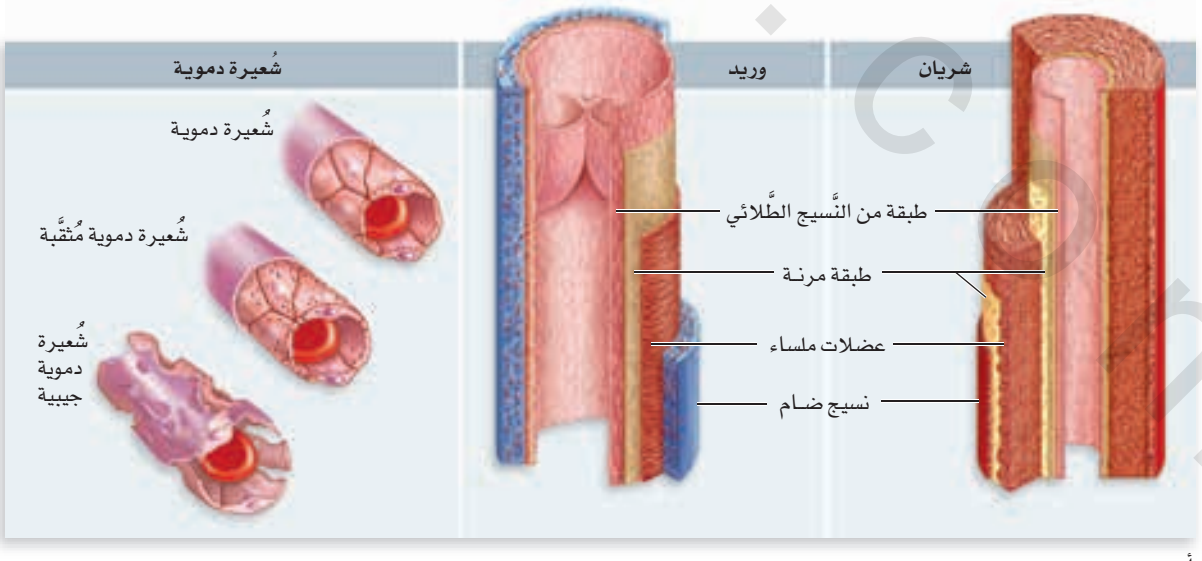
تتكوَّن الدَّورة القلبية من مرحلتين: مرحلة انقباضية وأخرى انبساطية؛ ينقبض البُطين عند المرحلة الانقباضية، ويرتخي عند المرحلة الانبساطية. تنشأ أمواج إزالة الاستقطاب من العُقدة الجيبية الأُذينية في الأُذين الأيمن، وتُحفِّز هذه الأمواج انقباض الأُذينين في البداية، ومن ثم البُطينين. يستمر الانقباض مدة أطول في العضلات القلبية منها في العضلات الهيكلية بسبب وجود قنوات الكالسيوم المُعتمدة في فتحها على التَّغيُّر في فرق الجهد حول الغشاء، التي تضيف المزيد من الكالسيوم إلى السيتوبلازم، ومن ثم تجعل الانقباض يستمر مدة طويلة. التَّخطيط الكهربائي للقلب يتبع إزالة الاستقطاب الذي يحدث خلال الدَّورة القلبية.

4-49 خصائص الأوعية الدّمويّة

عرفت أنَّ الدَّم يُغادر القلب من خلال أوعية دموية تُدعى الشَّرايين **Arteries**. تتفرع هذه الأوعية، لتُشكِّل "شجرة" مُتفرِّعة تصل إلى أعضاء الجسم كلّه. إنَّ أدق هذه التَّشعبات هي **الشُّريّنات Arterioles**. ينتقل الدَّم من الشُّريّنات إلى **الشُّعيرات الدّمويّة Capillaries**، وهي شبكة من الأنابيب الضَّيقة، ذات جدار رقيق. بعد أن يعبر الدَّم الشُّعيرات الدّمويّة، يتجمَّع في **الوُرَيْدات Venules**، التي تنقل الدَّم إلى أوعية دموية أكبر تُسمّى **الأوردة Vein**، تُرجِع الدَّم إلى القلب.

الأوعية الدّمويّة الكبيرة مُكوَّنة من أربع طبقات

تمتلك الشَّرايين، والشُّريّنات، والأوردة، والوريدات تركيبًا مُتشابهًا (الشكل 49-8). الطَّبقة الدَّاخلية للأوعية الدّمويّة هي طبقة طلائية حرشفية داخلية تُسمّى إندوثيليوم *Endothelium*. تُغطّي هذه الطبقة طبقة رقيقة من الألياف المرنة، وطبقة ثانية من العضلات الملساء، وطبقة ثالثة من النَّسيج الضَّام. تتميز جدران هذه الأوعية الدّمويّة، بأنها سميكة، بحيث لا تسمح بعملية تبادُل المواد بين الدَّم والأنسجة المُحيطة بالأوعية الدّمويّة.



الشكل 49-8

تركيب الأوعية الدّمويّة. الشَّرايين (أ) والأوردة (ب) تمتلك طبقات نسيجية مُتشابهة، لكن طبقة العضلات الملساء في الشَّرايين أكثر سُمكًا. وهناك طبقتان مرنتان. (جـ) الشُّعيرات الدّمويّة تتكون من طبقة واحدة من النَّسيج الطِّلائي. (أبعاد القياس غير حقيقية).

في المقابل، تتميز جدران الشُّعيرات الدّمويّة، بأنها تتكوَّن من طبقة واحدة من الطلائية الداخلية، ولهذا تستطيع الجُزيئات والأيونات مُغادرة بلازما الدَّم عن طريق الانتشار، والمرور من خلال الثُّقوب الموجودة بين الخلايا المُكوِّنة لجدر الشُّعيرات الدّمويّة، ومن خلال النَّقل عبر الخلايا الطّلائية نفسها. لهذا، يمكننا القول: إن تبادُل الغازات والمواد الأيضية بين الدَّم والسائل بين الخلوي وخلايا الجسم تحدث من خلال الشُّعيرات الدّمويّة.

الشَّرايين والشُّرينات تطورت لتحمُّل الضَّغط

تمتلك الشَّرايين الكبيرة أليافًا مرنة في جدارها أكثر من الأوعية الدّمويّة الأُخرى، تسمح لها هذه الخاصيَّة بأن ترتد بعد أن تتمدَّد في كلّ مرة تستقبل فيها كمية من الدَّم تُضخ إليها من القلب. الشَّرايينُ الصَّغيرةُ والشُّريِّنات أقلُّ مرونةً، لكنها تمتلك طبقة سميكة تقريبًا من العضلات الملساء، وهذا يُساعدها على عدم الانفجار عند استقبالها للدَّم.

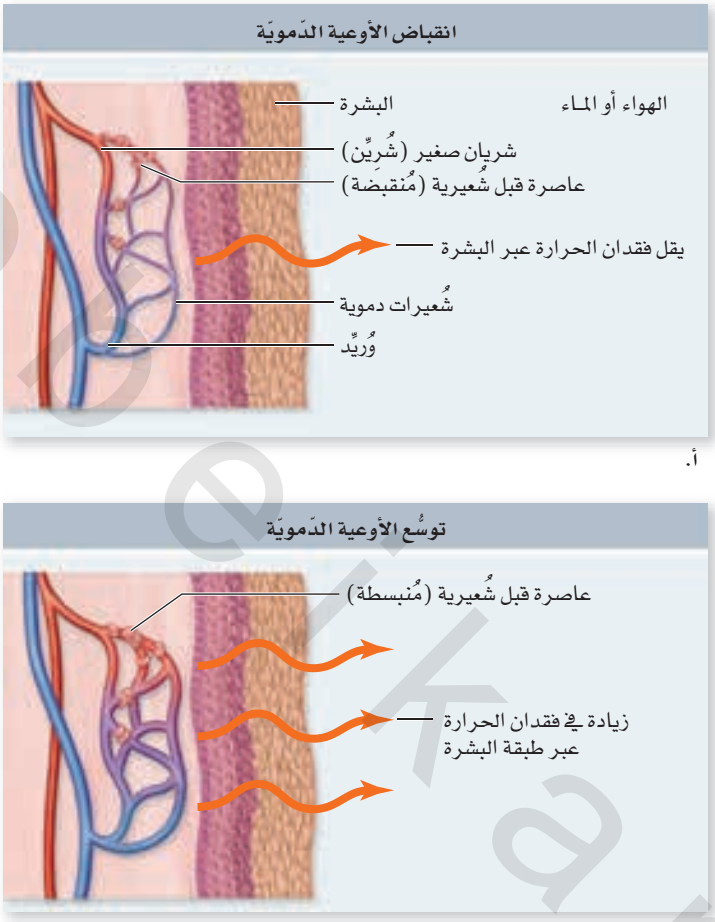
وكلما ضاقت الأوعيَّة، زادت المُقاومة لتدفُّق الدَّم من خلالها. فمثلًا، إذا قلَّ قُطر وعاء دموي ما إلى النِّصف، فإنَّ المُقاومة تزداد بمقدار 16 مرة عما كانت عليه سابقًا. تتناسب مُقاومة التَّدفُّق عكسيًّا مع قُطر الوعاء الدَّموي مرفوعًا للقوة الرابعة. ولهذا، فإنَّ الشرايين الصغيرة والشُّريِّنات تُشكِّل مُقاومة كبيرة لتدفُّق الدَّم في الشجرة الشريانية.

إنَّ انقباض طبقة العضلات الملساء في الشُّرينات يُسبِّب تضيُّق **الأوعية الدّمويّة Vasoconstriction** الذي يزيد بدوره المُقاومة، ويُقلِّل من التَّدفُّق. أما ارتخاء العضلات فيُسبِّب **توسُّع الأوعية Vasodilation**، وهذا يُقلِّل من المُقاومة، ويزيد من تدفُّق الدَّم إلى الأعضاء (الشكل 49-9). إنَّ تضيُّق الشُّريِّنات يُسبِّب ارتفاعًا في ضغط الدَّم.

تُشكِّل الشُّعيرات الدّمويّة شبكة واسعة لتبادُل المواد

إنَّ العدد الكبير من تفرعات الشُّعيرات الدّمويّة يؤكد أن كلّ خليّة في الجسم تكون على بعد 10 ميكرومترات من الشُّعيرات الدّمويّة. وفي المُعدَّل العام، فإنّ طول الأوعية الدّمويّة ميليمتر واحد وقطرها 80 ميكرومترًا تقريبًا، وهذا القطر أكبر بقليل من قطر خلايا الدَّم الحمراء (5 – 7 ميكرومترات). على الرغم من قُرب قطر خلايا الدَّم الحمراء من قطر الشُّعيرات الدّمويّة، فإنها قادرة على المرور دون مشكلات، بسبب مُرونة خلايا الدَّم الحمراء.

إنَّ مُعدل تدفُّق الدَّم خلال الأوعية الدّمويّة يتحكم فيها قوانين علم الموائع. فكلما قلّت مساحة المقطع العرضي للوعاء الدَّموي، زادت سرعة التَّدفُّق به. بناءً على ذلك، يُتوقَّع أن التَّدفُّق في الشُّعيرات الدّمويّة يكون الأسرع مُقارنة مع بقية أجزاء الجهاز القلبي الوعائي. إنَّ السُّرعة الكبيرة هذه ليست جيدة لإتمام عملية الانتشار، وحقيقةً هذا لا يحدث في الشُّعيرات الدّمويّة. وعلى الرغم من أنَّ الشُّعيرات الدّمويّة ضيقة جدًا، فإن مجموع مساحات المقطع العرضي للشُّعيرات الدّمويّة هو أكبر من مساحة المقطع العرضي لأي وعاء دموي. ومن ثم، فإنَّ الدَّم يمر عبر الشُّعيرات الدّمويّة ببطء، وهذا يجعله يمتلك الوقت الكافي ليقوم بتبادُل المواد مع السَّائل خارج الخلوي المُحيط بالشُّعيرات الدّمويّة. بعد أن يصل الدَّم إلى نهاية الشُّعيرات الدّمويّة، يكون قد تخلص من الأكسجين والمواد الغذائية الموجودة به، والتقط ثاني أكسيد الكربون والفضلات الأُخرى. يقل ضغط الدَّم وسرعته عندما ينتقل الدَّم من الشَّرايين إلى الشُّريِّنات، ثم إلى الشُّعيرات الدّمويّة. ولكن كلما صَغُرَت مساحة المقطع العرضي مع السَّير في الجانب الوريدي، زادت سرعة الدَّم.



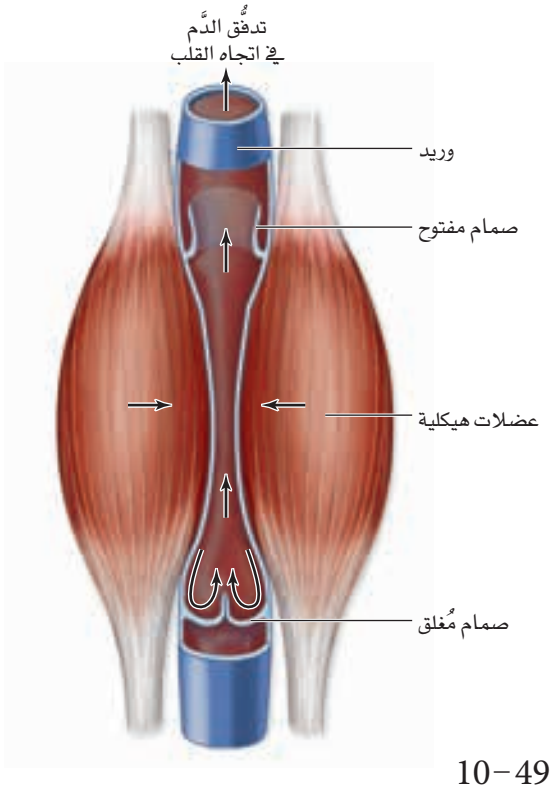
الشكل 49-9

تنظيم فقدان الحرارة. يمكن تنظيم كمية الحرارة المفقودة من سطح الجسم عن طريق التَّحكم في تدفّق الدَّم إليه. أ. انقباض الأوعية الدّمويّة السَّطحية يُقلِّل من تدفُّق الدَّم وفقدان الحرارة. ب. توسُّع الأوعية الدّمويّة يزيد من تدفُّق الدَّم وفقدان الحرارة.

تمتلك الأوردة والوريدات كمية أقل من العضلات في جدرانها

تمتلك الأوردة والوريدات الطَّبقات النَّسيجية نفسها التي للشَّرايين، إلا أنها تمتلك طبقة أقل سمكًا من العضلات الملساء. يعزى سبب قلّة العضلات في الأوردة والوريدات إلى أنَّ ضغط الدَّم عادةً يكون عُشْر مقدار الضَّغط في الشَّرايين. تحتوي الأوردة على مُعظم الدَّم الموجود في الجهاز القلبي الوعائي، وهذه الأوردة لديها القدرة على التَّمدد لاستيعاب كميات إضافية من الدَّم. تستطيع رؤية هذا التمدُّد في قدميك عندما تقف مدة طويلة من الزَّمن.

إنَّ الضَّغط الوريدي ليس كافيًا لإرجاع الدَّم إلى القلب من القدمين والرجلين، ولكن هناك عدد من مصادر الضَّغط التي تُساعد على ذلك. أكثر هذه المصادر تأثيرًا هو العضلات الهيكلية المُحيطة بالأوردة، حيث لديها القدرة على دفع الدَّم إلى الأمام عند انقباضها، وتُعرف هذه الآلية **بالمضخة الوريدية Venous pump**. ينتقل الدَّم في اتجاه واحد في الأوردة راجعًا إلى القلب بمُساعدة **الصمامات الوريدية Venous valves** (الشكل 49-10). عندما تتمدَّد هذه الأوردة كثيرًا نتيجة تراكم الدَّم فيها، تفقد الصمامات الوريدية عملها، وهذا يؤدي إلى تجمُّع الدَّم بكثرة في الأوردة. تُعرف هذه الحالة بدوالي الأوردة.



الشكل 49-10

تدفُّق الدَّم خلال الأوردة في اتجاه واحد. تضمن صمامات الأوردة حركة الدَّم في اتجاه واحد، أي إنه عائدٌ إلى القلب.

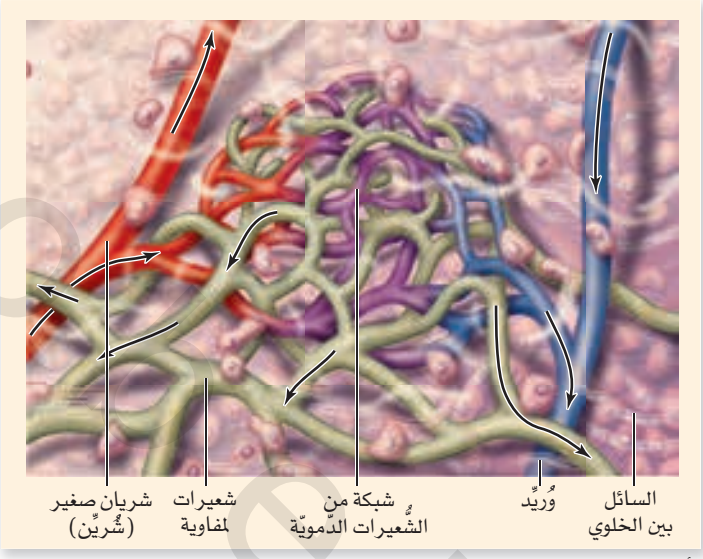
الجهازُ اللِّيمفاوي مفتوحٌ في اتجاه واحد

الجهازُ القلبيُّ الوعائيُّ مغلقٌ، حيث ترتبط الأوعية جميعها ببعضها، ولا يوجد من هذه الأوعية ما يملك طرفًا مغلقًا. ترشح كمية جيدة من الماء والمواد المذابة في بلازما الدَّم من جدار الشُّعيرات الدّمويّة لتُشكِّل السَّائل بين الخلوي (السَّائل النسيجي). مُعظم السَّائل الذي يُغادر الشُّعيرات الدّمويّة يُغادرها بالقرب من الطَّرف الشِّرياني، حيث يكون ضغط الدَّم هناك مُرتفعًا؛ ويعود إلى الشُّعيرات بالقرب من الطَّرف الوريدي (الشكل 49-11).

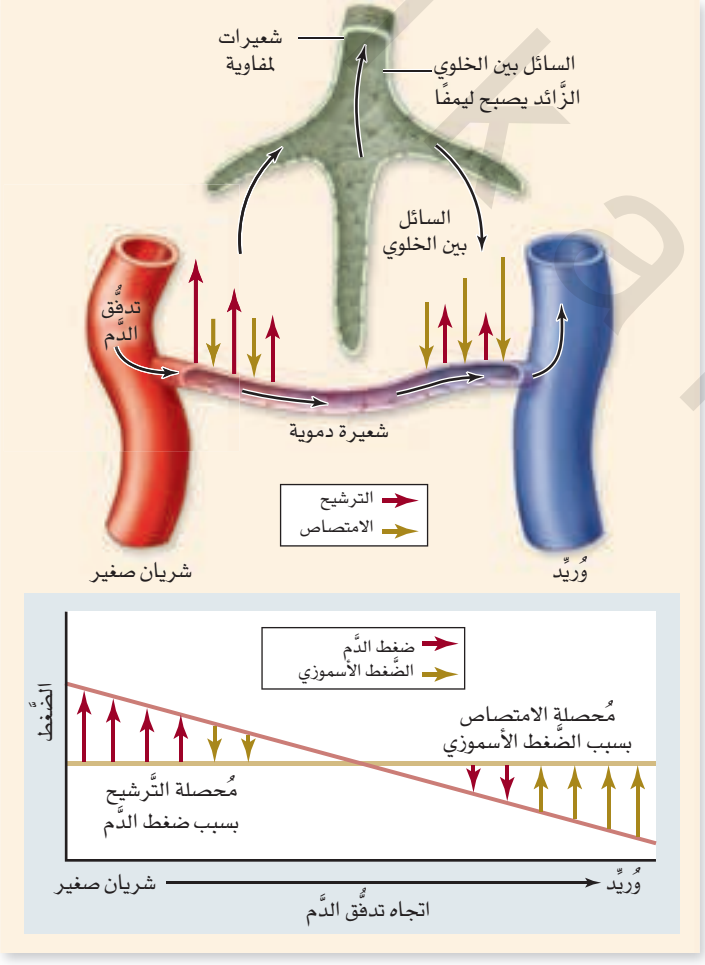
إنَّ رجوع السَّائل يحدث عن طريق الخاصيَّة الأُسموزية (انظر الفصل الـ 5). لا تُغادر مُعظم بروتينات البلازما الشُّعيرات الدّمويّة لِكبَر حجمها، وهذا يؤدي إلى ارتفاع تركيزها في البلازما أكثر من تركيز البروتينات في السَّائل بين الخلوي. هذا الاختلاف في التَّركيز، يُسبِّب فرقًا في الضَّغط الأُسموزي، ويُسبِّب اندفاع الماء إلى الشُّعيرات الدّمويّة من الفراغ بين الخلوي.

يُسبِّب ارتفاع ضغط الدَّم في الشُّعيرات الدّمويّة تراكمًا كبيرًا للمحلول بين الخلوي. في النِّساء الحوامل، مثلًا، نجد أنّ كِبَرَ حجم الرَّحم، الذي يحمل الجنين، وضغطه على الأوردة في التَّجويف البطني يزيد من ضغط الدم في الشُّعيرات الدّمويّة في الأطراف السُّفلية للمرأة. إنَّ زيادة المحلول بين الخلوي يُسبِّب انتفاخ أنسجة القدمين، أو ما يُدعى **بالاستسقاء Edema** الذي قد يسببه نقص تركيز بروتينات البلازما، حيث يبقى السَّائل بين الخلوي في الخارج، ولا يعود إلى الشُّعيرات الدّمويّة.

إنَّ نقص تركيز البروتينات في البلازما قد يُسبِّبه مرض الكبد؛ لأنّ الكبد يُنتِج مُعظم بروتينات البلازما، أو قد يسببه قِلَّة تناول الوجبات البروتينية، كما يحدث في حالات الجوع الشديد.



أ.



ب.

الشكل 49-11

العلاقة بين الدَّم واللِّيمف والسائل بين الخلوي. أ. يُبيِّن الشَّكلُ الأوعيةَ في الجهاز الدّوريّ واللِّيمفاوي مع وجود أسهم تُشير إلى اتجاه تدفُّق السائل في الأوعية. ب. السائل البلازمي، دون البروتينات، يخرج خارج الشُّعيرات، مُكوِّنًا السائل بين الخلوي الذي يغمر الأنسجة. يعود الكثير من هذا السائل إلى الشُّعيرات الدّمويّة عن طريق الخاصية الأُسموزية بسبب التَّركيز العالي للبروتينات في البلازما. يُصبّ الزَّائد من السَّائل بين الخلوي في الشُّعيرات اللِّيمفاوية، ذات الطَّرف المفتوح، التي في النهاية تصُبّ هذا السائل في الجهاز القلبي الوعائي.

الشكل 49-12

قلب ليمفاوي.

في الوضع الطَّبيعي، تكون كمية السائل الرَّاشح من الشُّعيرات الدّمويّة أكثر من كمية السَّائل العائد إليها عن طريق الخاصيَّة الأسموزية. يعود ما تبقَّى إلى الجهاز القلبي الوعائي عن طريق الجهاز الدَّوري المفتوح المُسمّى **الجهاز اللِّيمفاوي Lymphatic system**.

يتكون الجهاز اللِّيمفاوي من الشُّعيرات اللِّيمفاوية، والأوعية اللِّيمفاوية، والعُقد اللِّيمفاوية، والأعضاء اللِّيمفاوية، مثل الطُّحال والغدَّة الزَّعترية. يدخل السَّائل الزائد في الأنسجة إلى الشُّعيرات اللِّيمفاوية ذات الطَّرف المُغلق والنَّفاذية العالية. يُدعى هذا السَّائلُ بعد دخوله الجهاز اللِّيمفاوي، **اللِّيمف Lymph**، يمُر اللِّيمف بعد ذلك إلى الأوعية اللِّيمفاوية الأكبر التي تمتلك تركيبًا شبيهًا بالأوردة، وتمتلك صمامات تُمرِّر اللِّيمف في اتجاه واحد (مُشابه للشَّكل 49-10). يدخل الليمف في النهاية إلى وعاءين لمفاويين رئيسين، يصبان بعد ذلك في الوريد تحت الترقوي الأيمن والأيسر اللذين يقعان تحت عظام الترقوة.

يتحرك اللِّيمف في الثَّدييات عن طريق دفعه بفعل انقباض العضلات الهيكلية التي تضغط على الأوعية اللِّيمفاوية، لتدفع اللِّيمف إلى الأمام بآلية تُشبه عمل المضخة الوريدية التي تدفع الدَّم في الأوردة. في بعض الحالات، تنقبض الأوعية اللِّيمفاوية بشكل مُنتظم. ففي مُعظم الأسماك، وكلّ البرمائيات والزَّواحف، وأجنة الطُّيور، وبعض الطُّيور البالغة، يُدفَع اللِّيمف عن طريق **القلوب اللِّيمفاوية Lymph hearts** (الشكل 49-12).

يتم تحوير اللِّيمف في أثناء مروره بالعُقد اللِّيمفاوية والأعضاء اللِّيمفاوية عن طريق خلايا بلعمية تُبطِّن قنوات هذه الأعضاء. تحتوي العُقد اللِّيمفاوية والأعضاء اللِّيمفاوية على المراكز الجرثومية *Germinal centers*، حيث يتم بها تنشيط الخلايا اللِّيمفاوية وتكاثرها.

الأمراض القلبية الوعائية تُؤثر في جهاز النقل

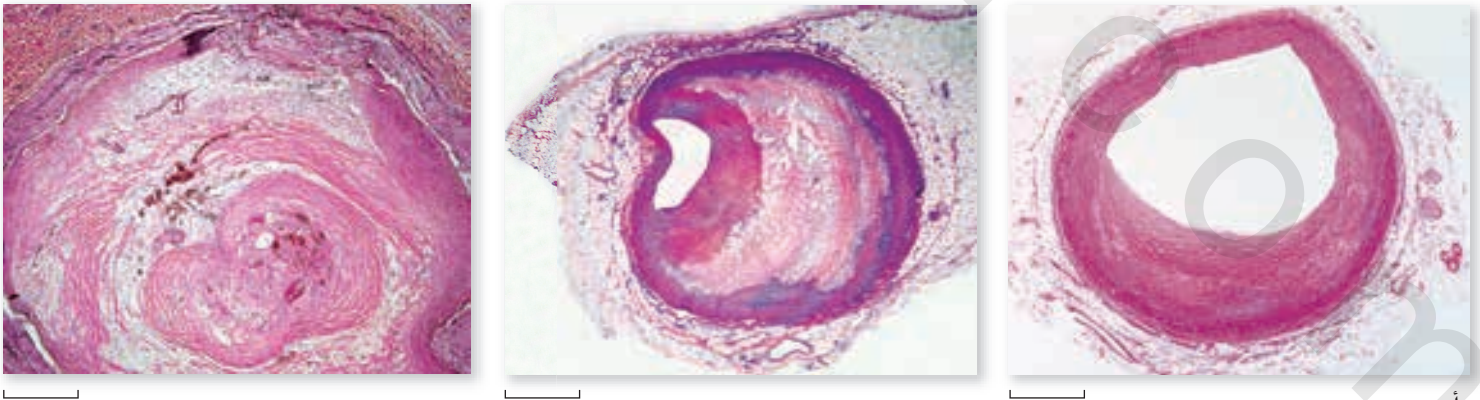
الأمراض القلبية الوعائية من أهم الأسباب المُؤدية للموت في الولايات المُتحدة؛ فأكثر من 42 مليون شخص يعانون أنواعًا من الأمراض القلبية الوعائية. كثيرٌ من هذه الأمراض ناجم عن مشكلات في الشَّرايين، مثل انسدادها أو تمزقها.

الجلطاتُ القلبية Heart attacks هي المُسبِّبُ الرّئيس للموت الناجم عن الأمراض القلبية الوعائية في الولايات المُتحدة، حيث يُشكِّل ما يُقارب خُمس الوفيات نتيجة هذا المرض. يؤدي نقص التَّروية إلى جزء أو أكثر من القلب إلى موت الخلايا العضلية القلبية في هذه الأجزاء. تنتج الجلطة القلبية عن انسداد أحد الشَّرايين التَّاجية نتيجة لتخثر الدَّم بها، أو نتيجة للتَّصلُّب الدهني للشَّرايين. إنَّ الشِّفاء من هذا المرض ممكن إذا كان الجزء المُصاب من القلب صغيرًا، ولا يؤثّر في انقباض القلب بوصفه وحدة وظيفية واحدة.

تحدث **الذَّبحة الصَّدرية Angina pectoris**، التي تعني حرفيًّا "ألم الصّدر"، لأسباب مُشابهة لأسباب الجلطة القلبية، ولكنّها ليست بشدَّتها. يحدث الألم عادةً في القلب، والكتف والذراع اليسرى. تُعَدُّ الذَّبحة الصَّدرية إشارة تحذير إلى أن تروية عضلة القلب غير كافية، لكنّها غير كافية لموت الخلايا العضلية.

تحدث **الجلطة الدِّماغية Strokes** نتيجة التَّدخل في تروية الدِّماغ بالدَّم. يمكن أن تنجم عن تمزق الأوعية بالدَّماغ (جلطة دماغية نزيفية)، أو عند انسداد شريان الدِّماغ عن طريق خثرة دموية، أو عن طريق التَّصلُّب الدهني للشَّرايين (الجلطة الناجمة عن نقص الأكسجين). تعتمد تأثيرات الجلطة الدِّماغية على شدَّة التلف الناتج، ومكان حدوثه.

التَّصلُّب الدهني Atherosclerosis هو تجمُّع المواد الدُّهنية في داخل الشَّرايين، وكمية غير طبيعية من العضلات الملساء، وترسبات الكولسترول



الشكل 49-13

التَّصلب الدهني. أ. شريان تاجي به انسداد صغير. ب. شريانٌ يمتلك تصلُّبًا دهنيًّا حادًا- مُعظم الممر تمَّ إغلاقه ببناء مواد على الجدار الدَّاخلي للشِّريان. جـ. شريان تاجي مُغلق تمامًا.

أو الفايبرين، أو أي نوع من الحُطام الخلوي. هذه التجمُّعات تزيد من المُقاومة الوعائية، ومن ثم تُقلِّل من تدفُّق الدَّم (13-49). يمكن أن يقل تضيُّق تجويف الشريان أكثر عن طريق تكوُّن الخثرات التي تنتج من التصلُّب الدهني. في الحالات الشديدة، قد يتم إغلاق الشريان بشكل كامل.

إنَّ تراكم الكولسترول في الأوعية الدّمويّة يتأثر بعوامل عدة، مثل مجموع تركيز الكولسترول في المصل، ومستوى البروتينات المُختلفة النَّاقلة للكولسترول. وبسبب عدم ذوبان الكولسترول في الماء، فإنَّه يُنقل في الدَّم على شكل مُعقدات بروتينية دهنية. وهناك شكلان من هذه البروتينات الدُّهنية يختلفان عن بعضهما في الكثافة، هما: بروتينات دهنية ذات كثافة قليلة (**LDL**) وبروتينات دهنية ذات كثافة عالية (**HDL**). وعادةً ما تُدعى البروتينات الدهنية ذات الكثافة العالية "بالكولسترول الجيد"، وتُدعى البروتينات الدهنية قليلة الكثافة "بالكولسترول السيئ". إنَّ سبب هذه التَّسمية هو قيام البروتينات الدهنية عالية الكثافة بنقل الكولسترول خارج الدَّورة الدّمويّة إلى الكبد للتَّخلص منه. أما البروتينات الدهنية قليلة الكثافة فهي تنقل الكولسترول إلى خلايا الجسم جميعها. تنشأ المُشكلة عندما تمتلك الخلايا كفايتها من الكولسترول. هذا الشَّيء يُقلِّل من كمية مُستقبلات البروتينات الدهنية قليلة الكثافة، ما يؤدي إلى ارتفاع مستوى هذه البروتينات الدهنية في الدَّم، التي ينتهي بها المطاف بالتَّرسُّب على الأوعية الدّمويّة.

هناك عوامل عدة تُشجِّع على حدوث التَّصلُّب الدهني مثل العوامل الوراثية، والتَّدخين، وارتفاع ضغط الدَّم، وتأثيرات الكولسترول التي نوقشت سابقًا. إنَّ التَّوقف عن التَّدخين أحد أفضل الإجراءات التي يأخذها المُدخِّن ليُقلِّل من خطورة هذا المرض.

يحدث **تصلُّب الشَّرايين Arteriosclerosis**، عندما يترسّب الكالسيوم على جُدر الشَّرايين، وهو يحدث عادةً بوصفه مرحلة مُتقدِّمة من التَّصلُّب الدهني. يعمل هذا المرض على إعاقة تدفُّق الدَّم، ويمنع توسُّع الشَّرايين. يجبر هذا النقص في مرونة الأوعية الدّمويّة القلب على العمل بشكل أكبر؛ حتى يزيد من ضغط الدَّم للمُحافظة على تدفُّق الدَّم بشكل ثابت.

يضخ القلب الدَّم إلى الجهاز الشِّرياني، الذي يتشعب إلى شُريِّنات دقيقة. تصب هذه الشُّريِّنات الدَّم في الشُّعيرات الدّمويّة ذات الجدار الرَّقيق، وهناك تتمّ عملية تبادُل المواد مع الأنسجة. يعود الدَّم إلى القلب عبر الوريدات والأوردة. يدفع ضغط الدَّم السَّوائل خارج الشَّرايين، وتعود مُعظم هذه السَّوائل إلى الأوردة بفعل الخاصيَّة الأُسموزية. إنَّ ما تبقى من هذه السوائل بين الخلوية، ويُدعى اللِّيمف، يعود إلى الجهاز القلبي الوعائي عن طريق الجهاز اللِّيمفاوي. يُسبِّب نقصُ التَّروية مجموعةً من الأمراض القلبية الوعائية، وهذه الأمراض تشمل الجلطة القلبية، والجلطة الدّماغية، والتَّصلب الدهني، وتصلُّب الشَّرايين.

5-49 تنظيم تدفُّق الدَّم وضغطه

على الرغم من أنَّ الجهاز العصبي الذَّاتي لا يُنشئ ضربات القلب، فإنه يعمل على تعديلها من ناحية عددها، وقوة انقباضها. إضافة إلى ذلك، هناك عدد من الآليات تُنظِّم خصائص الجهاز القلبي الوعائي، وتشمل هذه الخصائص الناتج القلبي، وضغط الدَّم، وحجم الدَّم.

الجهاز العصبي يُسرِّع أو يُبطِّئ مُعدَّل ضربات القلب

يتحكم الجهازُ العصبيُّ الذَّاتيّ في مُعدَّل ضربات القلب. يتكون مركز القلب في النُّخاع المستطيل (جزء من الدِّماغ الخلفي؛ الفصل الـ 44) من مركزين عصبيين يعملان على تعديل عدد ضربات القلب، إذ يُرسل **المركز المُسرِّع للقلب Cardioacceleratory center** إشارات عصبية عن طريق الأعصاب الودية المُسرعة للقلب إلى العُقدة الجيبية الأذينيَّة، والعُقدة الأذينية البطينية، والعضلات القلبية. تُفرز هذه الأعصاب نورإبينفرين، الذي يزيد من مُعدَّل ضربات القلب. إنَّ تنبيه الجهاز العصبي الودي يزيد أيضًا من قوة انقباض القلب، ولهذا فالقلب يقذف كمية أكبر من الدم مع كل انقباض (حجم الضربة).

يقوم **المركز المُبطِّئ Cardioinhibitory center** بإرسال إشارات عصبية عن طريق ألياف نظير وِدِّية موجودة في العصب الحائر إلى العقدة الجيبيَّة الأُذينيَّة، والعقدة الأذينية البُطينية. يُفرز العصب الحائر مادة أستيل كولين، التي تمنع تَكوُّن السّيالات العصبية في القلب وتُقلِّل بذلك ضرباته.

يزيد الناتج القلبي مع الإجهاد

يُعرَّف **الناتج القلبي Cardiac output** بأنه كمية الدَّم التي يضخها القلب من كلّ بُطين في الدَّقيقة. يُحسب الناتج القلبي بضرب مُعدَّل ضربات القلب بحجم الضَّربة *Stroke volume*، الذي يمثل كمية الدَّم التي يقذفها كلّ بُطين في الانقباض الواحد (الضَّربة الواحدة). فمثلًا، إذا كان عدد ضربات القلب 72 في الدَّقيقة، وحجم الضربة 70 مللترًا، فإنَّ الناتج القلبي يساوي 5 لترات/ دقيقة، التي تُقارب المُعدَّل الطبيعي في الإنسان في أثناء الرَّاحة.

يزيد الناتج القلبي في أثناء الإجهاد، حيث يزيد مُعدَّل ضربات القلب، ويزيد حجم الضَّربة. عند بداية الإجهاد، مثل ما يحدث عند الرَّكض، يزيد مُعدَّل ضربات القلب إلى ما يقارب 100 ضربة /دقيقة. وعندما تصبح الحركة أكثر شدة، تضغط العضلات الهيكلية على الأوردة بقوة أكبر، ويعود الدَّم إلى القلب بشكل أسرع. إضافة إلى ذلك، تزيد قوة انقباض البُطينين، ومن ثم تُفرّغ المُحتويات بشكل كامل مع كلّ ضربة قلب.

خلال التَّمرين، يزيد الناتج القلبي إلى ما يُقارب 25 لترًا/دقيقة في الإنسان الشاب البالغ. على الرغم من أنَّ الناتج القلبي يزيد بمقدار 5 أضعاف، فلا تستقبل الأعضاء جميعها 5 أضعاف تدفُّق الدَّم؛ بعضها يستقبل أكثر، وبعضها أقل. الشُّريِّنات في بعض الأعضاء، كالجهاز الهضمي، تتضيَّق، في حين تتوسع الشُّريِّنات في العضلات العاملة والقلب.

منعَكس مُستقبلات الضَّغط يحافظ على الاتزان الدَّاخلي لضغط الدم

يعتمد ضغط الدَّم الشِّرياني على عاملين: الناتج القلبي والمُقاومة لتدفُّق الدَّم في الجهاز الوعائي. هذه العلاقة يُعبَّر عنها كما يأتي:

ضغط الدَّم الشِّرياني (BP) = الناتج القلبي (CO) × مقاومة تدفُّق الدم (R)

يزداد ضغط الدَّم، في حالة زيادة مُعدَّل ضربات القلب، أو حجم الضَّربة (حيث يعمل الاثنان على زيادة الناتج القلبي)، أو عن طريق تضيُّق الأوعية، التي تزيد بدورها من مقاومة تدفُّق الدَّم. وعلى العكس من ذلك، يقلّ ضغط الدَّم إذا انخفض معدل ضربات القلب، أو قلّ حجم الضَّربة – مثلًا، في حالة الجفاف أو النَّزيف الشَّديد (نزف الدَّم).

يُجسّ ضغط الدَّم الشِّرياني عن طريق **مُستقبلات الضَّغط Baroreceptors** الموجودة في القوس الأبهري والشَّرايين السُّباتية (انظر الفصل الـ 45). هذه المجسَّاتُ مُستقبلاتٌ حسَّاسةٌ للشَّد، والتَّمدُّد، وانقباض الشَّرايين. عندما تشعر هذه المُستقبلات بهبوط ضغط الدَّم، يقل عدد السّيالات العصبية الصّادرة منها والمتَّجهة إلى مركز القلب في الدِّماغ، هذا يؤدي إلى زيادة تنبيه الأعصاب الودية، ويقلل تنبيه الأعصاب نظير الودية للقلب والأعضاء الأُخرى. وهذا يزيد معدل ضربات القلب، وحجم الضَّربة، وبذلك يزيد الناتج القلبي. ويُسبِّب هذا انقباض الأوعية الدّمويّة في الجلد والأمعاء، مُسبِّبًا زيادة في مقاومة التَّدفُّق. تؤدي هذه مجتمعة لزيادة ضغط الدَّم، فتُغلق دائرة التَّغذية الرَّاجعة في هذا الاتجاه (الشكل 49-14 الأعلى).

عند إحساس مُستقبلات الضَّغط بارتفاع ضغط الدَّم، يزيد عدد السّيالات العصبية المُرسلة منها إلى مركز القلب. هذا يعطي تأثيرًا مُعاكسًا، حيث يُقلِّل من تنبيه الأعصاب الوديَّة، ويزيد تنبيه الأعصاب نظير الودية للقلب. يؤدي هذا إلى نقص مُعدَّل ضربات القلب وحجم الضَّربة ليُقلِّل بذلك من الناتج القلبي. يرسل مركز القلب أيضًا إشارات عصبية مُسبِّبًا توسُّع (انبساط) الأوعية الدّمويّة في الجلد والأمعاء، مُقلِّلًا بذلك من مُقاومة تدفُّق الدَّم. تؤدي هذه مجتمعة إلى تقليل ضغط الدَّم، فتغلق بذلك دائرة التَّغذية الرَّاجعة في هذا الاتجاه. لهذا، يمكن القول: إن رد فعل مُستقبلات الضَّغط يُشكِّل تغذية راجعة سلبية استجابةً للتَّغيُّر في ضغط الدَّم (الشكل 49-14، الأسفل).

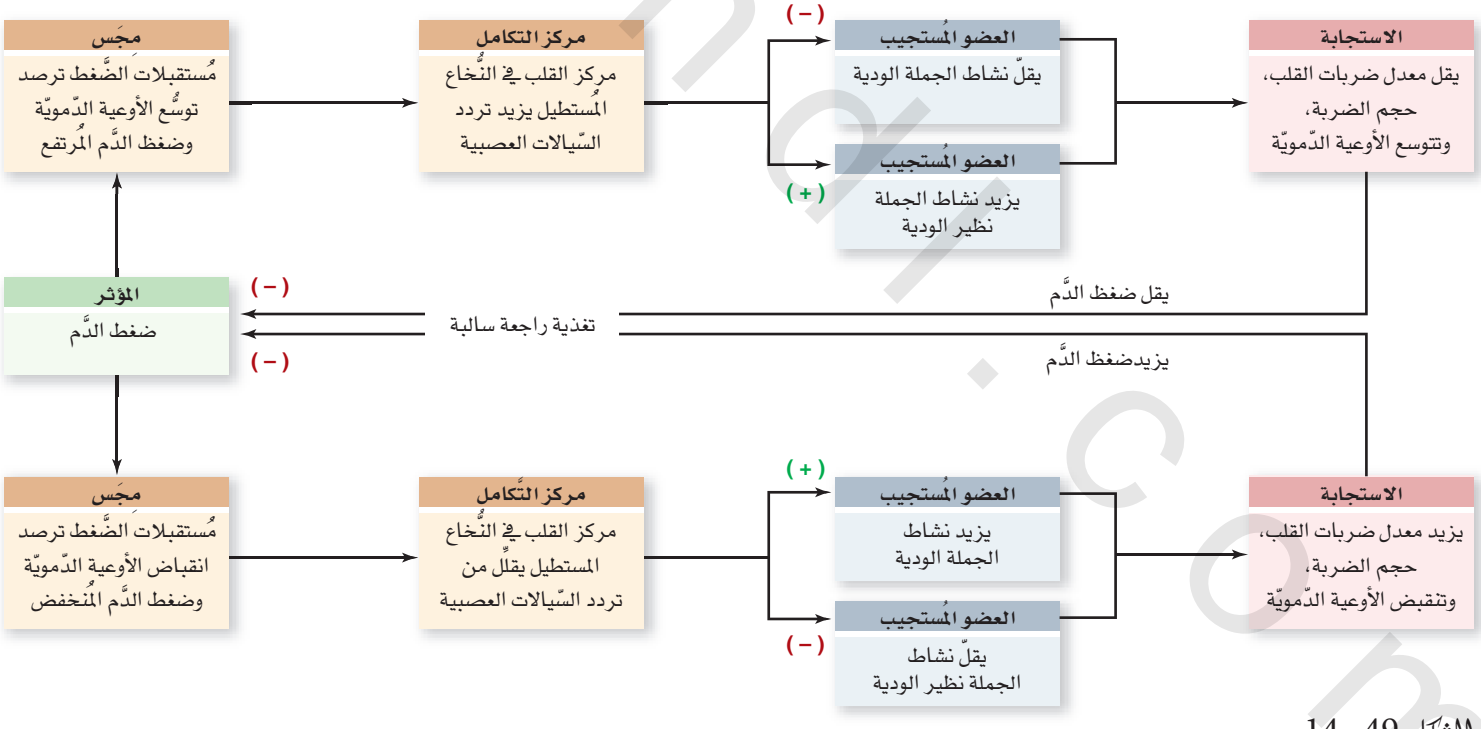
تنظيم حجم الدَّم عن طريق الهرمونات

يعتمد ضغط الدَّم جُزئيًا على حجم الدَّم الكلي؛ لأن ذلك يؤثّر في الناتج القلبي. يسبب نُقصان حجم الدَّم انخفاضًا في ضغط الدَّم، إذا كان هناك ثبات في العوامل الأُخرى. يتأثر حجم الدَّم بالهرمونات الأربعة الآتية: (1) الهرمون المانع لإدرار البول. (2) ألدوستيرون. (3) الهرمون الأذيني المُدِّر للصوديوم. (4) أُكسيد النتريك.

الهرمون **المانع لإدرار البول Antidiuretic hormone**، ويُسمّى الهرمون القابض للأوعية الدّمويّة *Vasopressin*، يُفرَز من الفصّ الخلفي للغُدَّة النُّخامية استجابةً لزيادة أُسموزية بلازما الدَّم (انظر الفصل الـ 46). فمثلًا، في حالة العطش الشَّديد، يحدث نقص في حجم الدَّم. تفسِّرُ المُستقبلات الأُسموزية الموجودة في تحت المِهاد ذلك على شكل إحساس بالعطش، وتُحفِّز إفراز الهرمون. يعمل هذا الهرمون، بدوره، على تنشيط الكليتين لزيادة إعادة امتصاص الماء، مُخرجًا بولًا مُركزًا. لهذا، فالشخص العَطِش يشرب ماءً أكثر، ويخرج بولًا أقل، وهذا يزيد حجم الدَّم، ويحافظ على الاتزان الدَّاخلي (البيئة الدَّاخلية ثابتة).

عندما يقلّ حجم الدَّم المُتدفِّق للكليتين، فإنَّ مجموعة من الخلايا تبدأ بإفراز أنزيم يسمى رنين *Renin* في الدَّم. يعمل رنين على تنشيط بروتين الدَّم، أنجيوتنسين، الذي يُحفز انقباض الأوعية الدّمويّة في أجزاء مُختلفة من الجسم، ويُحفِّز أيضًا إفراز هرمون ألدوستيرون من القشرة الكظريّة. يعمل هذا الهرمون على الكلية، ويُحفزّها على إعادة امتصاص الصوديوم والماء إلى الدَّم (انظر الفصل الـ 46).

عند زيادة تركيز الصوديوم في الدَّم، تقل كمية ألدوستيرون المُفرَزة من القشرة الكظرية، ولهذا يقل رجوع الصوديوم والماء إلى الدَّم عن طريق الكليتين. حديثًا، استطاع العلماء اكتشاف زيادة إفراز الصوديوم في البول تحت تأثير هرمون آخر، هو **الهرمون الأذيني المُدر للصوديوم Atrial natriuretic hormone**. يُفرز هذا الهرمون من الأُذين بسبب زيادة حجم الدَّم. إنَّ عمل هذا الهرمون يكمل دائرة التَّغذية الرَّاجعة السَّلبية، مُقلِّلًا بذلك حجم الدَّم وضغطه.



الشكل 49-14

تتحكم دورات التَّغذية الرَّاجعة السَّالبة لمُستقبلات الضَّغط بضغط الدَّم. تتحكم مُستقبلات الضَّغط العائدة للجزء الوارد من دورة التَّغذية الرَّاجعة في ضغط الدَّم. يتناسب تردُّد السيالات العصبية من مُستقبلات الشَّد (التمدُّد) تناسبًا طرديًّا مع ضغط الدَّم. تُعالَج هذه المعلومات في مركز القلب الموجود في النُّخاع المُستطيل. الجزء الصادر من هذه الدَّورة يتضمن الأعصابَ الودية، ونظيرَ الودية التي تغذي القلب. تستطيع هذه السَّيطرة زيادة أو تقليل معدل ضربات القلب، أو حجم الضربة، لزيادة أو تقليل ضغط الدَّم استجابة إلى إشارات عصبية قادمة من مُستقبلات الضَّغط، بلازما الدم.

أُكسيد النتريك Nitric Oxide هو غاز تفرزه الخلايا الطلائية المُبطِّنة للأوعية الدّمويّة. وكما تم ذكره في الفصل الـ 46، يُعَدُّ أُكسيد النتريك واحدًا من كثير من المُنظِّمات التي تُفرَز على الخلايا المُجاورة. في المحاليل، ينتقل أُكسيد النتريك في اتجاه الخارج من خلال طبقات الأوعية الدّمويّة، مُسبِّبًا استرخاء العضلات الملساء المُغلِّفة للأوعية الدّمويّة، وتوسعًا في قطرها. لأكثر من قرن، وصِف النيتروجلسرين للمُصابين بالأمراض القلبية للتَّقليل من آلام الصَّدر، وقد أصبح واضحًا في الوقت الحالي فقط أنَّ هذه المادّة تُطلِق غاز أُكسيد النتريك.

يعتمد الناتج القلبي على مُعدَّل ضربات القلب، وكمية الدَّم التي تُضخ في كلّ ضربة (انقباض). يُنظِّم تدفُّق الدَّم عن طريق انقباض الشَّرايين، التي تُؤثِّر بدورها في مُقاومة تَدفُّق الدَّم. يتأثر ضغط الدَّم بحجم الدَّم؛ إنَّ كمية الماء المُعادة للجهاز الوعائي تعتمد على الهرمونات التي تعمل على الكليتين والأوعية الدّمويّة.

6-49 أجزاء الدَّم (مكوِّنات الدَّم)

الدَّم نسيجٌ ضام يتكون من مادة سائلة بين خلوية، تُدعى **البلازما Plasma**، وأنواع مُختلفة من الخلايا **والعناصر المُشكِّلة الأُخرى Formed elements** التي تسبح في المادة السائلة بين الخلوية (الشكل 49-15). **الصَّفائح الدّمويّة Platelets**، على الرغم من ضمِّها في الشَّكل 49-15، فإنها ليست خلايا كاملة؛ بل هي أجزاء من خلايا تُنتَج في نخاع العظم. (سنُناقِش دور الصَّفائح الدّمويّة في تخثر الدَّم لاحقًا).

يمكن تلخيص وظائف الدَّم بما يأتي:

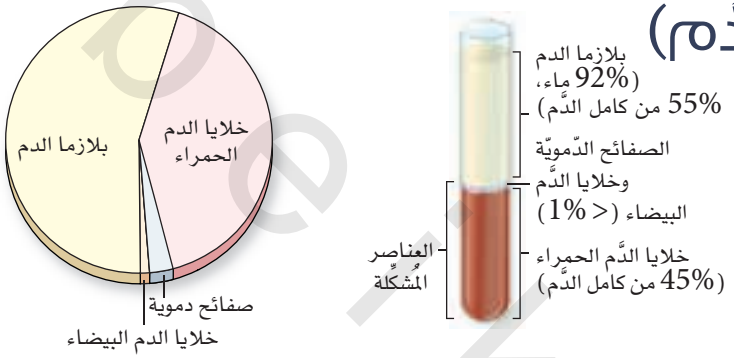
1. **النَّقل Transport**. ينقل الدَّم المواد الضَّرورية جميعها واللازمة لعمليات الأيض الخلوية. تنقل خلايا الدَّم الحمراء الأكسجين مُرتبطًا مع الهيموجلوبين، وتُنقل المواد الغذائية في البلازما، وفي بعض الأحيان مُرتبطة مع نواقل، يتمُّ التَّخلص من الفضلات الأيضيَّة، عندما يمرّ الدَّم المُحمَّل بها في الكبد والكليتين.
2. **التَّنظيم Regulation**. ينقل الجهاز القلبي الوعائي الهرمونات المُفرزة من الغدد الصَّماء، وكذلك يُسهم في التَّنظيم الحراري. تَضيق أو تتوسّع الأوعية الدّمويّة بالقرب من السَّطح، تحت طبقة الأدمة الخارجية، ما يُساعد على فقدان الحرارة أو الحفاظ عليها (انظر الشكل 49-6).
3. **الحماية Protection**. يقي الجهاز الدّوريّ الجسم من الجروح والأجسام الغريبة أو السَّامة الدَّاخلة إليه. ويعمل تخثُّر الدَّم على منع فقدان الدَّم عند تلف الأوعية. تتخلَّصُ خلايا الدَّم البيضاء من الأجسام الغريبة المُهاجمة للجسم، مثل الفيروسات والبكتيريا (انظر الشكل 51).

بلازما الدَّم هي السّائل بين الخلوي

بلازما الدَّم هي السّائل بين الخلوي الذي تسبح فيه خلايا الدَّم والصفائح الدّمويّة. ينشأ السّائل بين الخلوي (خارج الخلوي) في أنسجة الجسم المُختلفة من السَّائل الموجود في بلازما الدَّم.

وعلى الرغم من أنَّ بلازما الدَّم تحتوي على 92% ماء، فهي تحتوي على المواد المُذابة الآتية:

1. **المواد الغذائية، والفضلات، والهرمونات Nutrients, wastes and hormones**. يذاب في بلازما الدَّم المواد الغذائية جميعها الناتجة عن عملية الهضم التي تستطيع الخليّة استخدامها، وتشمل هذه المواد الجلوكوز، والأحماض الأمينيَّة، والفيتامينات. وتذوب الفضلات في البلازما مثل المُركبات النتروجينية وثاني أُكسيد الكربون اللَّذين تنتجهما الخلايا بعد القيام بالعمليات الأيضية. يحمل الدَّم أيضًا الهرمونات المُفرزة من الغدد الصَّماء إلى الخلايا التي تعمل عليها، أو الخلايا الهدف.
2. **الأيونات Ions**. البلازما محلول ملحيّ مُخفَّف. أكثر الأيونات الموجودة في بلازما الدَّم هي الصوديوم، والكلور، وأيونات البيكربونات (HCO_3^-).



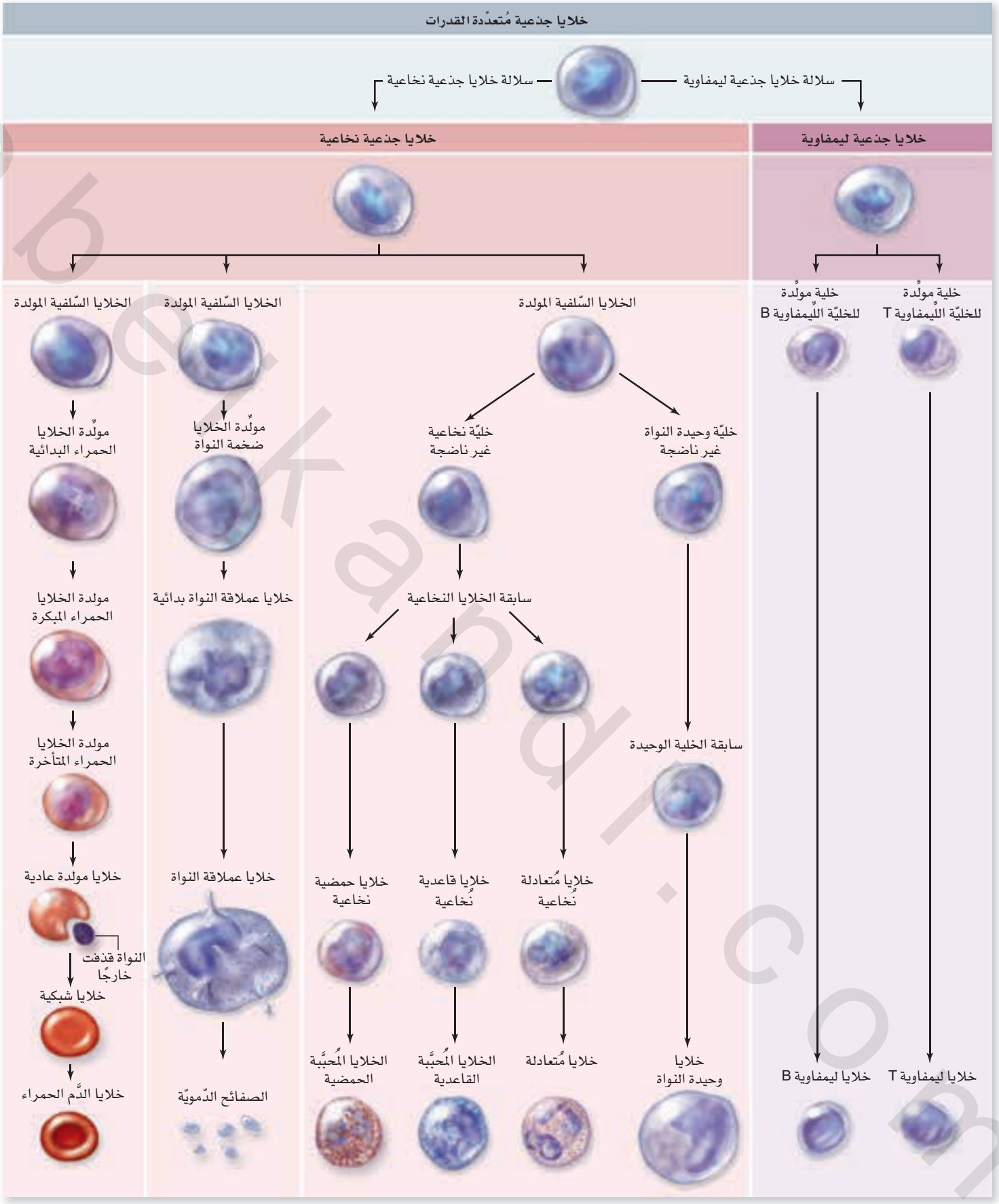
الصفائح الدّمويّة	خلايا الدَّم الحمراء	بلازما الدم
300.000 – 150.000 / ملم^3 دم	6 ملايين – 4 ملايين / ملم^3 دم	**بروتينات البلازما** (7 %) الألبومين (54 %) جلوبيولين (38 %) مولد فايبرين (7 %) بروتينات أخرى (1 %) **ماء** (91.5 %) **مواد ذائبة أخرى** (1.5 %) مواد إلكتروليتية مواد غذائية غازات مواد مُنظِّمة نواتج الفضلات
خلايا حمضية	**خلايا مُتعادلة**	
4 – 2%	70 – 60%	
خلايا ليمفاوية	**خلايا قاعدية**	**خلايا وحيدة النواة**
25 – 20%	1 – 0.5%	8 – 3%

الشكل 49-15

تركيب الدم.

إضافة إلى ذلك، تحتوي البلازما على كميات قليلة جدًا من أيونات أُخرى مثل الكالسيوم، والماغنسيوم، والنُّحاس، والبوتاسيوم، والزنك.

3. **البروتينات Proteins**. كما ذكرنا سابقًا، فإنَّ الكبد يُنتِج مُعظم بروتينات بلازما الدَّم، تتضمن هذه البروتينات **الألبيومين Albumin**، الذي يُشكِّل الجزء الأكبر من بروتينات البلازما؛ **وألفا وبيتا جلوبيولين Globulins**، التي تعمل على نقل الدُّهون والهرمونات الستيرويدية؛ **ومولد الفايبرين Fibrinogen**، الذي يُستخدم في عملية تخثُّر الدَّم. بعد نزع الفايبرينوجين من بلازما الدَّم، يسمّى بلازما الدَّم **المصل Serum**.



الشكل 49-16

الخلايا الجذعية وإنتاج العناصر المشكلة.

تَتَضَمَّنُ العناصرُ المُشَكَّلَةُ الخلايا والصفائحَ الدَّمويّة

تتضمنُ **العناصرُ المُشَكَّلَةُ Formed elements** في الدَّم خلايا الدَّم الحمراء، وخلايا الدَّم البيضاء، والصَّفائح الدّمويّة. كل واحد من هذه العناصر يمتلك وظائف مُحدَّدة للحفاظ على صحة الجسم واتزانه الدَّاخلي.

خلايا الدَّم الحمراء *Red blood cells*

يحتوي كلّ ملليمتر واحد على ما يُقارب خمسة ملايين خليّة دم حمراء، **Erythrocytes**. ويُسمّى الجزء الذي تحتله خلايا الدَّم الحمراء من المجموع الكلي لحجم الدَّم الهيماتوكريت *Hematocrit*، أو حجم خلايا الدَّم المتراصَّة؛ يُقدَّر هذا الحجم، في الإنسان، بـ 45% من حجم الدَّم الكلي تقريبًا.

تشبه خلايا الدَّم الحمراء في الثّدييّات قطعة حلوى الدونات، قرصية الشكل ومقعرة من الوجهين. في الثدييات، تفتقر خلايا الدَّم الحمراء الناضجة للنواة. تحتوي هذه الخلايا في الفقريات على هيموجلوبين، الصبغة التي ترتبط بالأكسجين وتنقله. (سنُناقِش صبغة الهيموجلوبين لاحقًا في هذا الفصل عندما نتحدث عن التَّنفس). في الفقريات، يوجد الهيموجلوبين في خلايا الدَّم الحمراء، أما في اللافقريات، فتوجد الصَّبغة المُرتبطة بالأكسجين (ليس دائمًا هيموجلوبينًا) في البلازما.

خلايا الدَّم البيضاء *White blood cells*

تُشكِّل **خلايا الدَّم البيضاء Leukocytes** أقل من 1% من خلايا الدَّم في الإنسان؛ حيث تكون نسبة خلايا الدَّم البيضاء إلى الحمراء 1 أو 2 إلى 1000. تمتلك خلايا الدَّم البيضاء حجمًا أكبر وأنوية، مُقارنةً مع خلايا الدَّم الحمراء. تستطيع خلايا الدَّم البيضاء مُغادرة الشُّعيرات الدّمويّة من خلال الفراغات بين الخلوية إلى السّائل النَّسيجي المُحيط.

تحتوي خلايا الدَّم البيضاء على أنواع مُختلفة من الخلايا، ولكلّ واحدة من هذه الخلايا دور خاص في الدِّفاع عن الجسم ضد المخلوقات الدَّقيقة والمُهاجمة والمواد الغريبة الأُخرى، كما سَيوصَف في (الفصل الـ 51). تضم **خلايا الدَّم البيضاء المُحبَّبة Granular leukocytes** الخلايا المُتعادلة، والخلايا الحمضية، والخلايا القاعدية، وجميعها اكتسبت تسميتها بحسب خصائص اصطباغ الحُبيبات الموجودة في السيتوبلازم. تضم **خلايا الدَّم البيضاء غير المُحبَّبة Nongranular leukcytes** خلايا وحيدات النواة، والخلايا اللِّيمفاوية. في الإنسان، تُشكِّل الخلايا المُتعادلة الجزء الأكبر، ثم تليها بالتَّرتيب الخلايا اللِّيمفاوية، فالخلايا وحيدة النواة، فالخلايا الحمضية، فالخلايا القاعدية.

الصفائح الدّمويّة *Platelets*

هي أجزاء خلوية نتجت عن تحطُّم خلايا كبيرة في نخاع العظم. يبلغ قطر هذه الصفائح 3 ميكرومترات تقريبًا. تُفرز الصفائح الدّمويّة عوامل مُخثِّرة (بروتينات) في الدَّم، بعد جرح الوعاء الدَّموي. بوجود هذه العوامل، يتحول مولد الفايبرين إلى خيوط غير ذائبة تُسمّى الفايبرين. تتجمع هذه الخيوط بعد ذلك لتُشكِّل الخثرة الدّمويّة (الجلطة الدّمويّة).

العناصر المشكّلة تَنتُج من خلايا جذعية

تمتلك العناصر المُشكّلة عمرًا مُحدَّدًا، ولهذا يجب أن تُجدَّد باستمرار. إنَّ كثيرًا من أجزاء الخلايا القديمة يتمُّ هضمها عن طريق خلايا البلعمة الموجودة في الطحال؛ على الرغم من ذلك، فإنَّ بعض نواتج هضم الخلايا القديمة، مثل الحديد والأحماض الأمينيَّة، تُستخدم في تصنيع مكونات الدَّم الجديدة. يبدأ تكوين العناصر المُشكلة للدَّم في نخاع العظم، كما ذكرنا سابقًا في (الفصل الـ 47).

تتطور مُعظم مُكوِّنات الدَّم من خلايا تُسمّى **خلايا جذعية مُتعدِّدة القدرات Pluripotent stem cells** (انظر الفصل الـ 19). يتم إنتاج خلايا الدَّم في نخاع العظم، وتُسمّى العملية **إنتاج خلايا الدَّم Hematopoiesis**. تُولِّد هذه العملية نوعين من الخلايا الجذعية، هما: الخلايا الجذعية اللِّيمفاوية التي تُنتِج الخلايا اللِّيمفاوية، والخلايا الجذعية النُّخاعية التي تُنتِج ما تبقى من خلايا الدَّم (الشكل 49-16).

إذا قلّت وفرة الأكسجين في الدَّم، فإنَّ الكليتين تحوِّلان بروتين البلازما إلى **هرمون إيرثروبويتين Erythropoietin**. يُحَفِّزُ هذا الهرمون إنتاج خلايا الدَّم الحمراء من خلال عملية تُسمّى تكوُّن خلايا الدَّم الحمراء *Erythropoiesis*.

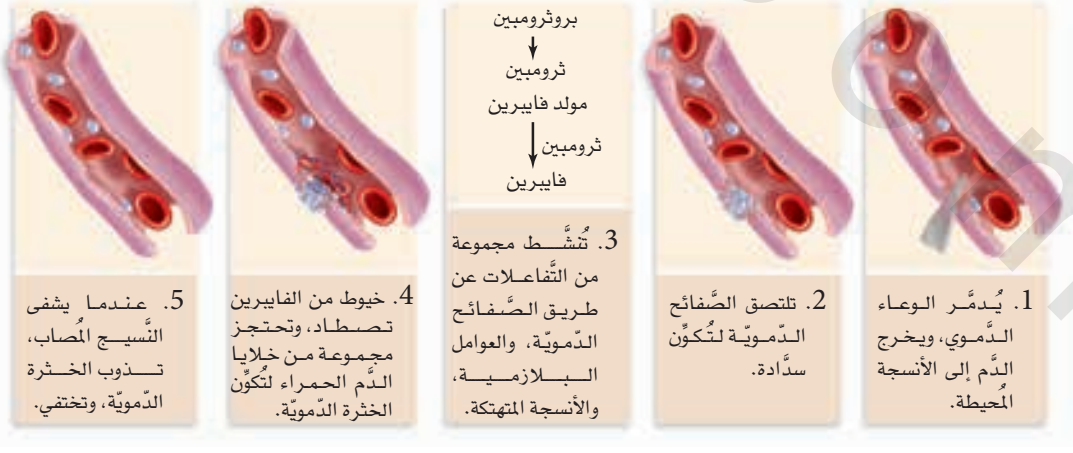
في الثدييات، تفقد خلايا الدَّم الحمراء أنويتها قبل أن تنطلق إلى الدَّورة الدّمويّة. على العكس من ذلك، فإنَّ خلايا الدَّم الحمراء الناضجة في الفقريات الأُخرى تبقى ذات أنوية. الخلايا ضخمة النواة مثال على خلايا ملتزمة Committed cell تتشكَّل في نخاع العظم من الخلايا الجذعية. تتكسَّر هذه الخلايا إلى قطع سيتوبلازمية مُكوِّنة الصَّفائح الدّمويّة.

استقصاء

لماذا تعتقد أنَّ استخدام إيرثروبويتين بوصفه دواءَ دواء مُنع في الدَّورات الأولمبية وبعض الرِّياضات الأُخرى؟

تخثُّرُ الدَّم مثالٌ على سلسلة من التَّفاعلات الأنزيمية (الشَّلال الأنزيمي)

عندما ينقطع الوعاء الدَّموي أو يتمزّق، فإنَّ العضلات الملساء فيه تنقبض، مُسبِّبةً تضيُّقًا له. تتجمَّع الصَّفائح الدّمويّة عند مكان الجرح (القطع) يلتصق بعضها ببعض وبالأنسجة المُحيطة بها مشكلةً بذلك سدَّادة (الشكل 49-17). تُنَبِّهُ الصَّفائح الدّمويّة، والعوامل البلازمية، والجزيئات التي تُطلق من النَّسيج التالف سلسلة من التفاعلات الأنزيمية.



الشكل 49-17

تجلُّط الدَّم. يتشكَّل الفايبرين من بروتين ذائب، يُسمّى مولد الفايبرين. يُحفَّز هذا التَّفاعل عن طريق أنزيم الثرومبين، الذي يتشكل من أنزيم غير نشط يُدعى سابق ثرومبين. يعدّ تنشيط الثرومبين آخر خطوة في مجموعة التفاعلات الأنزيمية التي تنتج الجلطة الدّمويّة، عندما يتلف أو يُجرح الوعاء الدَّموي.

إنَّ أهم نواتج سلسلة التفاعلات هذه هو بروتين مولد الفايبرين، الذائب في البلازما، الذي يتحول إلى فايبرين غير ذائب في بلازما الدَّم. تُقَوِّي هذه الخيوط من الفايبرين السدَّادة التي تشكَّلت من تجمُّع الصفائح الدّمويّة، عن طريق انقباض الفايبرين. السدَّادة المُكوَّنة من الصفائح الدّمويّة، والفايبرين، وخلايا الدَّم الحمراء العالقة تُكَوِّنُ الخثرة الدّمويّة (الجلطة).

بعد شفاء النسيج التَّالف (الجُرح)، تبدأ عملية إذابة الجلطة الدّمويّة. هذه العمليَّة مُهمّة؛ لأنّ تكسُّر الخثرة وانتقالها عبر الدَّورة الدّمويّة قد يُسبِّب انسداد الأوعية الدّمويّة في الدِّماغ، مُكوِّنًا ما يُدعى الجلطة الدِّماغية، أو في القلب، مُسبِّبًا الجلطة القلبية.

تحتوي البلازما؛ الجزء السّائل من الدَّم، على أنواع مُختلفة من المواد الغذائية، والفضلات، والهرمونات، وتحتوي على البروتينات والأيونات. تتضمن العناصر المشكلة للدَّم من الخلايا وأجزاء الخلايا (الصفائح الدّمويّة). تحتوي خلايا الدَّم الحمراء على هيموجلوبين، وتنقل الأكسجين. تمتلك خلايا الدَّم البيضاء وظائف مُتخصّصة؛ فهي تحمي الجسم من المخلوقات الدَّقيقة الخلوية المُسبّبة للمرض، وتُشارك الصَّفائح الدّمويّة في عملية تخثُّر الدَّم. يتضمَّن هذا سلسلة من التَّفاعلات الأنزيمية لتُكوّن الفايبرين من مُولِّد الفايبرين.

7-49 تبادُل الغازات عبر السّطوح التَّنفسية

من أهم وظائف الجهاز الدّوريّ الحصول على الغازات، وتوزيعها، وإزالتها لدعم أنسجة الجسم. إنَّ من أهم التَّحديات الفسيولوجية التي تواجهها المخلوقات مُتعدِّدة الخلايا الحصول على كمية الأكسجين الكافي، والتَّخلص من ثاني أكسيد الكربون (الشكل 49-18). يُستخدم الأكسجين في الميتوكندريا في عملية التَّنفس الخلوي، تُنتِج هذه العملية ثاني أكسيد الكربون بوصفه فضلات (انظر الفصل الـ 7). يتضمن التَّنفس على مستوى أجهزة الجسم مجموعة من العمليات ليست موجودة على مستوى الخليّة، تتراوح هذه العمليات من ميكانيكية التَّنفس إلى تبادل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الأعضاء التَّنفسية.

تُظهر اللافقريات تنوعًا كبيرًا في الأعضاء التَّنفسية، مثل النَّسيج الطلائي، والقصبات، والخياشيم. بعض الفقريات، مثل الأسماك، ويرقات البرمائيات، تستخدم أيضًا الخياشيم. أما البرمائيات البالغة، فتستخدم الجلد أو أنسجة طلائيــة أُخرى بوصفها عضوًا مساعدًا أو عضوًا تنفسيًّا خارجيًّا رئيسًا.

الشكل 49-18

فقمةُ البحر بطلٌ تنفسيٌّ. يغوص هذا الحيوان إلى أعماق البحر أكثر من أي حيوان بحري آخر، مثل الحيتان، وسلاحف البحر، وأفيال البحر، حيث يستطيع هذا الحيوان وقف التَّنفس مدة أكثر من ساعتين، صاعدًا وهابطًا في البحر، ويتحمَّل الغوص المُتكرِّر دون المعاناة من أي مشكلات تنفسية ظاهرة.

يملك كثيرٌ من البرمائيات البالغة، والزَّواحف، والطُّيور، والثَّدييات رئتين لإنجاز التَّنفس الخارجي. في الحيوانات البحرية والبرية التي تعيش على اليابسة، تشكل هذه الأعضاء التَّنفسية عالية التَّروية الدّمويّة مكان انتشار الأكسجين للدَّم، وخروج ثاني أكسيد الكربون منه. ويكون اتجاه انتشار الغاز في أنسجة الجسم، مُعاكسًا لما يحدث في الأعضاء التَّنفسية.

في هذا الفصل، سنُناقِش آلية عمل الأجهزة التَّنفسية وتركيبها وتطورها، إضافة إلى مبادئ انتشار الغازات بين الدَّم والأنسجة.

يتضمن تبادُل الغازات انتشارها عبر الأغشية

حيث إنَّ الأغشية الخلوية يجب أن تُحاط بالماء لتكون ثابتة، فإنَّ البيئة الخارجية التي يتمُّ من خلالها تبادُل الغازات تكون دائمًا مائية. ينطبق هذا حتى على الفقريات التي تعيش على اليابسة؛ ففي هذه الحالة، يذوب الأكسجين في طبقة رقيقة من السّائل الذي يُغطِّي السّطوح التَّنفسية.

في الفقريات، تنتشر الغازات إلى داخل الطَّبقة المائية المُغطِّية للخلايا الطِّلائية التي تُبطِّن الأعضاء التَّنفسية. إنَّ عملية الانتشار هذه سالبة، ولا تحتاج إلى طاقة، وتعتمد على اختلاف فرق تركيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون على جانبي الغشاء، وعلى درجة ذوبانهما في الأغشية البلازمية. في حالة الغازات الذَّائبة، يُعبَّر عن تركيز الغازات بالضَّغط؛ سنناقِش ذلك بعد قليل.

بشكل عام، يَتحكم في مُعدَّل الانتشار بين منطقتين علاقة تُعرف **بقانون (فِكْ) للانتشار Fick's law of diffusion**. ينصُّ قانون فِكْ للغازات الذائبة على أنَّ معدل الانتشار (R) يتناسب طرديًّا مع فرق الضَّغط (Δp) على جانبي الغشاء ومساحة المنطقة (A) التي تمَّ من خلالها الانتشار. إضافة إلى ذلك، يتناسب مُعدَّل الانتشار عكسيًّا مع المسافة (d) التي يحدث خلالها الانتشار. ويعتمد ثابت الانتشار الخاص بالجُزيء، D، على حجم الجُزيء، ونفاذية الغشاء، ودرجة الحرارة. ويمكن التَّعبير عن قانون فِكْ، بالصِّيغة الآتية:

$$R = \frac{DA\Delta p}{d}$$

حدثت هناك تغيُّرات تطورية في آلية التَّنفس لزيادة فاعلية عملية الانتشار (انظر الشكل 49-18).

يمكن زيادة فعالية مُعدَّل الانتشار R بإحداث التَّغيُّرات الآتية: (1) زيادة مساحة السَّطح الذي يتمُّ من خلاله الانتشار، A؛ (2) تقليل المسافة التي يحدث من خلالها الانتشار، d؛ أو (3) زيادة فرق التَّركيز، ΔP. لقد تضمَّنت عملية تطور الأجهزة التَّنفسية تغيُّرات في هذه العوامل جميعها.

استقصاء

ما الجزء التَّابع للجهاز القلبي الوعائي الذي زاد مساحة السطح؟

عظمت إستراتيجيات تطوريّة من انتشار الغازات

لا يمكن الحصول على الكمية المُناسبة من الأكسجين التي تحتاج إليها عملية التَّنفس الخلوي باستخدام الانتشار وحده إذا زادت المسافة عن نصف مليمتر بين مصدر الأكسجين ومكان حدوث التنفس الخلوي. أعاقت هذه المشكلة وبشكل كبير من حجم وتركيب المخلوقات الحية التي تعتمد في أثناء حصولها على الأكسجين بشكل رئيس على عملية الانتشار من البيئة. البكتيريا، والبكتيريا القديمة، والأوليات جميعها صغيرة بما يكفي ليكون الانتشار كافيًا لها، حتى إن كانت على شكل مُستعمرات (الشكل 49-19أ)، لكن مُعظم الحيوانات مُتعدِّدة الخلايا تحتاج إلى تراكيب تكيُّفية لتزيد، وتُحسِّن من عملية تبادل الغازات.

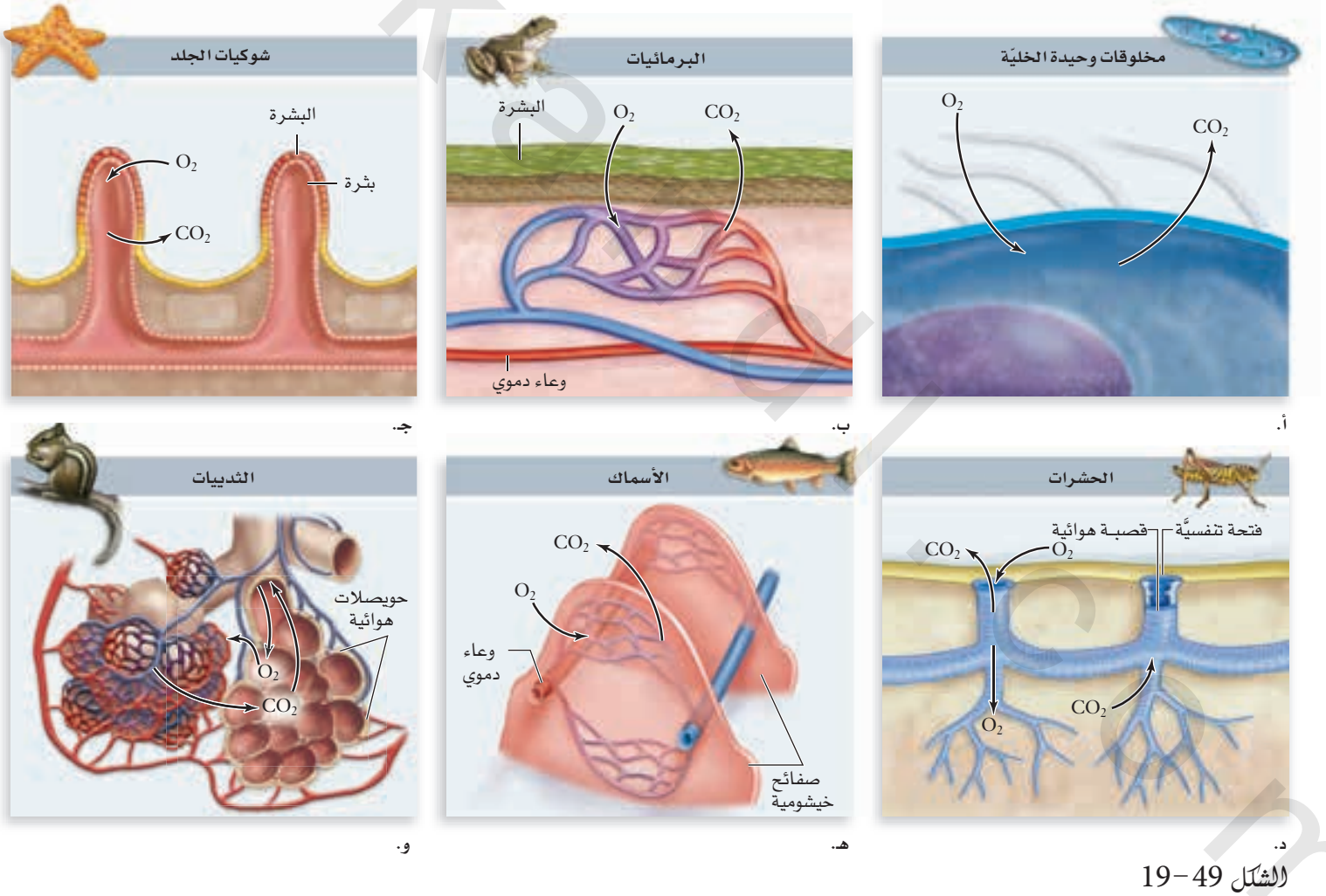
زيادة فرق الضَّغط (التَّركيز)

مُعظم شُعب اللافقريات تفتقر إلى الأعضاء التَّنفسية المُتخصِّصة، إلاّ أنها طوَّرت وسائل تُحسِّن من عملية الانتشار. كثير من المخلوقات الحية صنعت تيارًا مائيًّا يعمل على تغيير الماء بشكل مُستمر فوق السّطوح التَّنفسية؛ وتقوم الأهداب، عادةً، بعمل هذا التيار. وبسبب هذا التَّدفق المُستمر للماء، فإن التَّركيز الخارجي للأكسجين لا يتغيّر على طول مسار الانتشار، وعلى الرغم من أن بعض جزيئات الأكسجين التي دخلت إلى المخلوق الحي قد أُزيلت من الماء المحيط، فإنّ الماء الجديد المُستمر يحل محل الماء الخالي من الأكسجين. وهذا يؤدي إلى زيادة فرق التركيز- Δp في معادلة فِكْ.

زيادة مساحة السَّطح وتقليل المسافة

تمتلك اللافقريات الأكثر تعقيدًا (الرَّخويات، ومفصليات الأرجل، وشوكيات الجلد) والفقريات، أعضاء تنفسيَّة زادت من مساحة السَّطح المُتوافر لعملية الانتشار، مثل الخياشيم، والقصبات الهوائية، والرِّئات. هذه التَّكيفات تُقرِّب ما بين البيئة الخارجية (الهواء أو الماء) والبيئة الدَّاخليّة، مثل الدَّم والليمف الدموي، التي عادةً ما تدور خلال الجسم. لهذا زادت الأعضاءُ التَّنفسيةُ مُعدَّلَ الانتشار بزيادة مساحة السَّطح (A) وبتقليل المسافة (d) التي على الغازات قطعها.

تبادُل الأكسجين وثاني أُكسيد الكربون بين المخلوقات الحية وبيئتها يُعظَّم (يصل إلى أقصى حدوده) زيادة فرق التركيز، ومساحة السَّطح، وتقليل المسافة التي يجب أن تقطعها هذه الغازات.



الشكل 49-19

أجهزة تبادُل الغازات المُختلفة في الحيوانات. أ. تنتشر الغازات مباشرة إلى المخلوقات وحيدة الخليّة. ب. البرمائيات وحيوانات أخرى تتنفَّس عبر الجلد. البرمائيات أيضًا تتبادل الغازات من خلال الرئتين. جـ. تمتلك شوكيات الجلد زوائد بثرية تزود المخلوق بمساحة سطح تنفُّسي أكبر. د. تتنفَّس الحشرات من خلال نظام القصبات واسع الانتشار. هـ. خياشيم الأسماك تزود الأسماك بمساحة سطح تنفسيَّة عالية جدًا وتبادل تياري متعاكس. و. الحويصلات الهوائية في رئتي الثدييَّات تزود الثدييات بمساحة سطح تنفسيَّة عالية، ولكنها لا تسمح بتبادل تياري مُتعاكس.

Obeikan.com

8-49 الخياشيم، والتَّنفس الخلوي، وأجهزة القصبات الهوائية

الخياشيمُ Gills امتداداتٌ نسيجيَّةٌ مُتميِّزةٌ تندفع نحو الماء. يمكن أن تكون الخياشيم بسيطة، كما في بثرات شوكيات الجلد (انظر الشكل 49-19 جـ)، أو معقدة، مثل الخياشيم كثيرة الالتواءات في الأسماك (الشكل 49-19 هـ). إنَّ مساحة سطح الخياشيم الكبيرة التي يتم عبرها الانتشار مكَّنت المخلوقات الحية البحرية من استخلاص كمية أكسجين من الماء أكبر بكثير من الكمية التي يمكن أخذها عن طريق الجلد وحده. في هذا الجُزء، سنُركِّز على الخياشيم الموجودة في الحيوانات الفقرية.

تؤدي السطوح الرَّطبة دورًا في تبادُل الغازات في بعض الفقريات واللافقريات. يشكّل تبادُل الغازات عبر الجلد إستراتيجية شائعة في كثير من البرمائيات، ومفصليات الأرجل التي تعيش على اليابسة، مثل الحشرات التي طوَّرت نظام قصبات هوائية يسمح بتبادُل الغازات عبر هيكلها الخارجي الصلب.

الخياشيم الخارجية موجودة في الأسماك والبرمائيات غير النَّاضجة

الخياشيم الخارجية ليست موجودة داخل تراكيب الجسم. من الأمثلة على الفقريات التي تحتوي على الخياشيم الخارجية يرقاتُ كثير من الأسماك والبرمائيات، وكذلك في برمائيات مثل السلمندر، الذي يُحافظ على صفات اليرقات طول مدة حياته.

إحدى مساوئ الخياشيم الخارجية أن عليها الاستمرار في الحركة لكي تبقى على اتصال مع الماء الغني بالأكسجين. إنَّ الخياشيم كثيرة التَّشعب تقاوم هذه الحركة، جاعلةً هذا النَّوع من التَّنفس غير فعّال إلا في الحيوانات الصغيرة. ومن المساوئ أيضًا، سهولة التَّلف، إذ إنَّ الخياشيم الخارجية تمتلك نسيجًا طلائيًّا رقيقًا لتبادُل الغازات.

الحُجرات الخيشومية تحمي الخياشيم في بعض اللافقريات

طوَّرت أنواع أُخرى من الحيوانات البحرية حجرات خيشومية *Branchial chambers*، تضخّ الماء فوق الخياشيم الساكنة. يفتح تجويف العباءة الدَّاخلي للرَّخويات نحو الخارج وهو يحتوي على الخياشيم. ويُسبِّب انقباضُ الجدار العضلي لتَّجويف العباءة جرَّ المياه إلى الدَّاخل، ومن ثَمَّ طرحها.

في القشريات، تقع الحجرة الخيشومية بين الجسم والهيكل الخارجي الصلب للحيوان. تحتوي هذه الحجرة على الخياشيم، وتفتح إلى السطح تحت الأطراف. وتُسبِّب حركة الأطراف سحب الماء عبر هذه الحجرات، ومن ثم تولِّد تيارًا فوق الخياشيم.

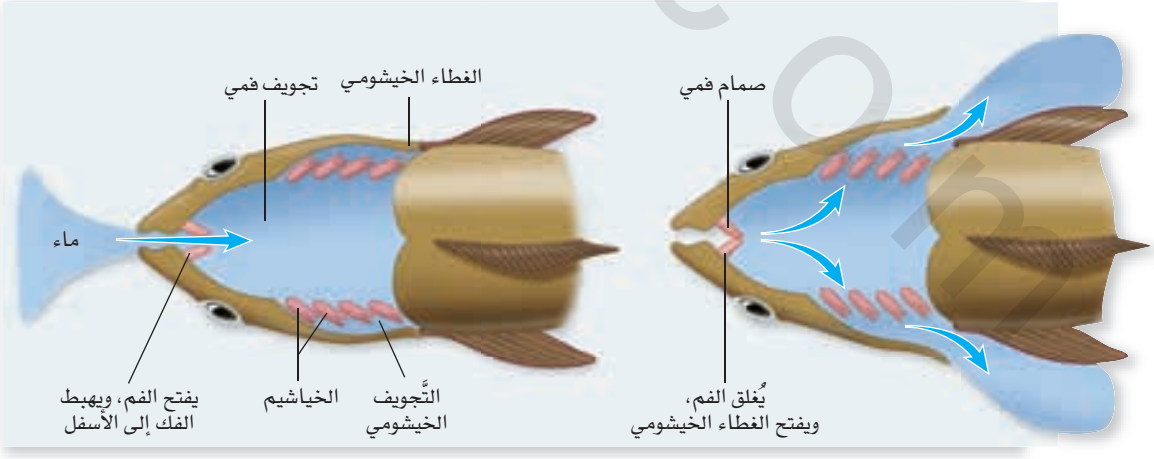
خياشيم الأسماك العظميَّة مُغطّاة بالغطاء الخيشومي

تقع الخياشيم في الأسماك العظمية بين التجويفين الفمي، والخيشومي الذي يحتوي على الخياشيم (الشكل 49-20). يعمل هذان التَّجويفان مثل مضختين تتمدَّدان بشكل متبادل لتُحرك الماء إلى الفم، وعبر الخياشيم، ثم إلى خارج السمكة من خلال فتحة **الغطاء الخيشومي Operculum**.

تمتلك بعض الأسماك العظمية التي تسبح باستمرار، مثل أسماك التونا، غطاء خيشوميًّا غير مُتحرك. تسبح هذه الأسماك وفمها مفتوح جزئيًّا، دافعة الماء بشكل مستمر فوق الخياشيم، وتُعرف هذه العمليةُ التهويةَ بالقوة *Ram ventilation* الشكل 49-20). على الرغم من ذلك، تمتلك مُعظم الأسماك العظمية غطاء خيشوميًّا مرنًا. مثل، سمك اللَّشَك، وهو سمك يُمسك و"يعلق" على ظهر سمك القرش وكتفيه. يستخدم هذا السمك التهوية بالقوة عندما تكون أسماك القرش سابحة، ولكنه يضخّ الماء عن طريق الأغطية الخيشومية عندما يتوقف سمك القرش عن السِّباحة.

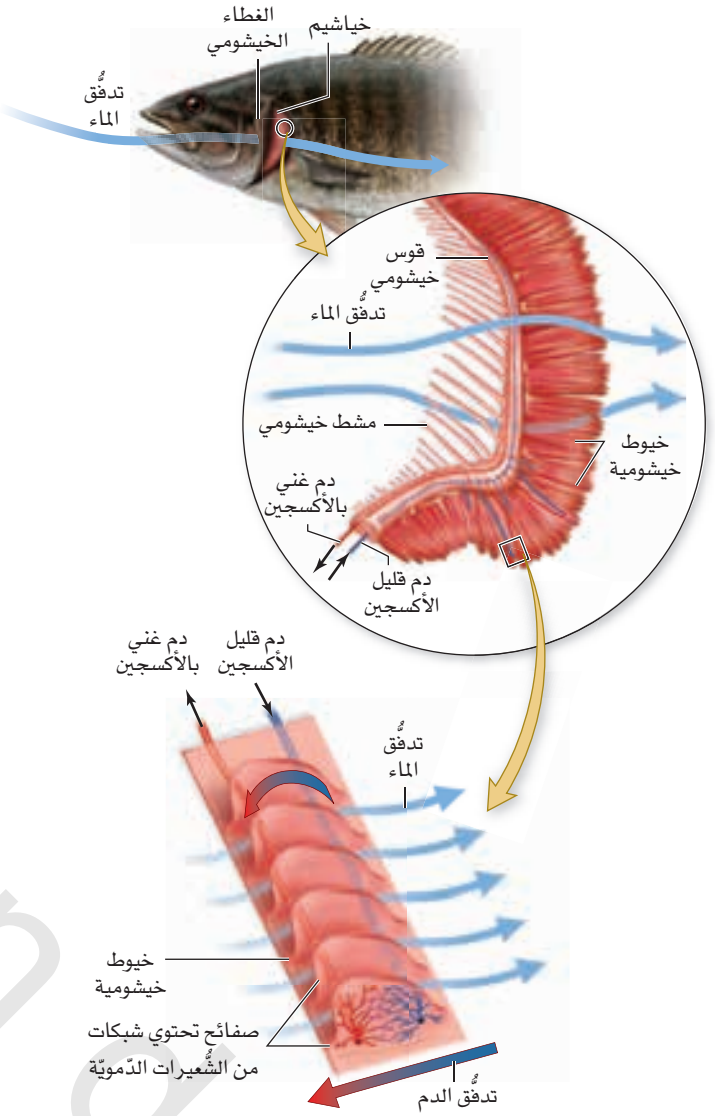
هناك أربعة **أقواس خيشومية Gill arches** على كلّ جانب من رأس السمكة. كلّ قوس يتكون من صفين من الخيوط الخيشومية، ويحتوي كلّ خيط من هذه الخيوط على صفائح غشائية رقيقة، تبرز إلى الخارج في مسار تدفُّق الماء (انظر الشكل 49-21). يمرّ الماء عبر هذه الصفائح في اتجاه واحد.

في كلّ صفيحة، يمر الدَّم مُعاكسًا لاتجاه حركة الماء. يدعى هذا التَّرتيبُ **تَدَفُّقَ التَّيارِ المُتعاكس Countercurrent flow**، يعمل هذا التَّرتيب على زيادة (بأقصى حد) نسبة الأكسجين في الدَّم عن طريق زيادة فرق تركيز الأكسجين على طول مسار الانتشار، فتزيد Δp في قانون (فِك) للانتشار. الفائدة العائدة من هذا التَّرتيب مُوضحة في (الشَّكل 49-22. أ). يضمن تدفق التَّيار المُتعاكس أنَّ يبقى فرق تركيز الأكسجين بين الدَّم والماء المُحيط قائمًا على طول الصفيحة الخيشومية. يسمح هذا للأكسجين باستمرار الانتشار على طول الصفيحة، ولهذا يكون للدَّم الذي يغادر الخياشيم تركيزٌ مرتفعٌ للأكسجين، وهو قريب من تركيز الأكسجين الموجود بالماء الدَّاخل إلى الخياشيم.



الشكل 49-20

كيف تتنفَّس الأسماك العظمية. تقع الخياشيم بين التَّجويفين: الفمي والخيشومي. يحدث التنَّفس على مرحلتين. يفتح الصّمام الفمي، ويهبط الفك إلى الأسفل، ساحبًا الماء إلى التَّجويف الفمي، في حين يكون التَّجويف الخيشومي مُغلقًا. بعد ذلك، يُغلق صمامُ الفم، ويُفتح الغطاءُ الخيشومي، دافعًا الماء عبر الخياشيم إلى الخارج.

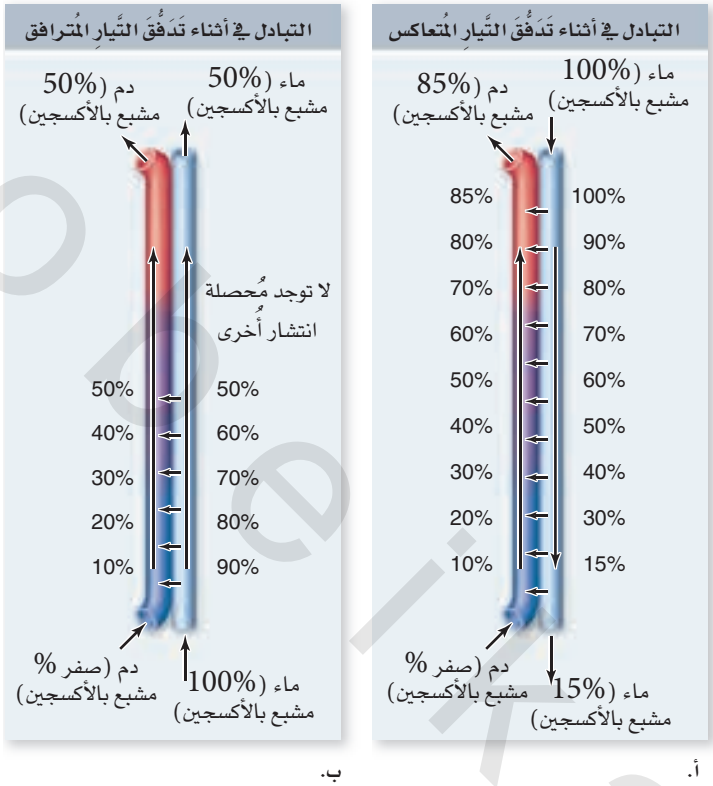


الشكل 49-21

تركيب الخياشيم في الأسماك. يمر الماء عبر القوس الخيشومي فوق الخيوط (من اليسار إلى اليمين في الرَّسم). يمر الماء دائمًا عبر الصفائح في الاتجاه المُعاكس لاتجاه تدفُّق الدَّم من خلال الصفائح. إنَّ نجاح عمل الخياشيم يعتمد على التَّدفُّق المُتعاكس لتيار الدَّم والماء.

إذا كان اتجاه حركة الماء والدَّم نفسه، فإنَّ التدفُّق يكـون مُترافقًا *Concurrent* (الشكل 49-22ب). في هذه الحالة، يقل فرق التَّركيز على طول الصفيحة الخيشومية بشكل سريع حالما يفقد الماء الأكسجين للدَّم، ولهذا فإنَّ مُحصلة انتشار الأكسجين تقلّ، ثم تتوقف عندما تصل إلى مرحلة الاتزان.

تُعَدُّ خياشيم الأسماك من أكثر الأعضاء التَّنفسية فعالية، بسبب وجود تبادل الغازات عن طريق التَّيار المُتعاكس.



الشكل 49-22

التَّبادُل التَّياري المتُعاكس. تسمح هذه العملية بتحميل الدَّم بالأكسجين بشكل فعّال جدًا. عندما يتدفق الدَّم والماء في اتجاهين مُتعاكسين (أ)، يكون الفرق الأولي في تركيز الأكسجين بين الدم والماء قليلًا، لكنه كافٍ لانتشار الأكسجين من الماء إلى الدم. وكلما زاد انتشار الأكسجين إلى الدم، يرتفع تركيز الأكسجين فيه، يُقابل الدَّم ماء يمتلك تركيزًا أعلى من الأكسجين. عند كلّ نقطة، يكون تركيز الأكسجين أعلى في الماء، ولهذا يستمر تدفُّق الأكسجين من الماء إلى الدَّم. في هذا المثال، يحتوي الدَّم تركيزًا من الأكسجين يبلغ 85%. عندما يتدفق الماء والدَّم في الاتجاه نفسه (ب)، ينتشر الأكسجين من الماء إلى الدَّم بسرعة في البداية، لكن بعد ذلك يقلّ معدل الانتشار كلما انتشر الأكسجين من الماء إلى الدَّم، حتى يتساوى تركيز الأكسجين في الماء والدَّم في النهاية. في هذا المثال، لا يزيد تركيز الأكسجين في الدَّم على 50%.

يحتاج التَّنفس عبر الجلد إلى ترطيبه بشكل مستمر

للأكسجين وثاني أكسيد الكربون القدرةُ على عبور الجلد في بعض الفقريات (انظر الشَّكل 49-19 ب). في معظم الأحيان، تكون هذه الفقريات بحرية، مثل البرمائيات وبعض السَّلاحف، وتمتلك نسيجًا طلائيًّا عالي التَّروية الدّمويّة. تُسمّى عمليةُ تبادل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون عبر الجلد **التَّنفسَ الجلديَّ Cutaneous respiration**. في البرمائيات، يُعَدُّ التَّنفس الجلدي مساعدًا لعمل الرئتين. وعلى الرغم من بعض الحالات غير الشائعة، فإنَّ بعض برمائيات اليابسة، مثل السلمندر، تعتمد على التَّنفس الجلدي بشكل كامل.

obeikandi.com

من بين الزواحف البحرية، تستطيع السَّلاحف ذات الغطاء اللِّين أن تغمر نفسها في رواسب النَّهر ساعات عدة دون أن تستخدم التَّهوية الرِّئوية. في هذا المستوى القليل من النَّشاط، يقدّم التَّنفس الجلدي الأكسجين الكافي للأنسجة. تستخدم مُتزلجات البرك الشائعة كذلك التَّنفس الجلدي ليساعدها على البقاء مغمورة. في فصل الشتاء، تستطيع هذه السلاحف البقاء مغمورة في الماء أيامًا عدة دون حاجة إلى تنفّس الهواء.

نظام القصبات الهوائية الموجودة في مفصليات الأرجل

ليس لمفصليات الأرجل عضو تنفسي واحد. فالجهاز التّنفسيّ لمعظم مفصليات الأرجل التي تعيش على اليابسة يتكون من قنوات صغيرة، مُتشعبة مُبطنة بمادة الكيوتيكل تُسمّى **القصبات الهوائية Tracheae** (انظر الشكل 49-19 د). هذه القصبات، تتشعب في النهاية إلى **قُصيبات هوائية دقيقة Tracheoles** جدًا، وهي سلسلة أنابيب تنقل الغازات إلى جميع أجزاء جسم مفصليات الأرجل. تكون هذه القُصيبات الهوائية على اتصال مُباشر مع الخلايا، وينتشر الأكسجين مباشرة عبر الغشاء الخلوي للخلايا.

يدخل الهواء إلى القصبات الهوائية من خلال فتحات مُتخصِّصة في الهيكل الخارجي تُسمّى **الفتحات التَّنفسية Spiracles**. تُفتحُ هذه الفتحات وتُغلقُ في معظم مفصليات الأرجل التي تعيش على اليابسة عن طريق صمامات. إنَّ القدرة على إغلاق هذه الفتحات التَّنفسية للتَّقليل من فقدان الماء كان من أهم التَّكيفات التي سَهَّلت عملية غزو هذه المخلوقات لليابسة.

الخياشيمُ تراكيب كثيرةُ التَّقسيمات لتسمح بزيادة مساحة السَّطح الذي يتم من خلاله التَّبادُل. في خياشيم الأسماك العظمية، يتدفق الدَّم في اتجاه مُعاكس لتدفُّق الماء. تدفُّق التيار المتعاكس هذا يُعظّم تبادل الغازات، جاعلًا خياشيم الأسماك من أكثر الأعضاء التَّنفسية كفاءة. تعتمد بعض البرمائيات على التَّنفس الجلدي، وخاصة وهي في طور اليرقة. في مفصليات الأرجل، سمح تطور نظام القصبات الهوائية المزود بفتحات تنفسية بإجراء تبادل الغازات على الرغم من وجود الهيكل الخارجي وسمح لها بغزو اليابسة.

9-49 الرئتان

على الرغم من الكفاءة العالية للخياشيم بوصفها أعضاء تنفسية في البيئة البحرية، فإنها استُبدِلَت في الحيوانات التي تعيش على اليابسة لسببين رئيسين، هما:

1. **الهواء أقل دعامة من الماء.** لا تمتلك الصفائح الخيشومية دعامة بنائية قوية؛ لذا تعتمد على الماء من أجل ذلك. فإذا أخرجت الأسماك من الماء، على الرغم من وجود الأكسجين، فإنها تختنق بسرعة؛ لأنَّ الخياشيم تُصبح كتلة من الأنسجة. على العكس من ذلك، تستطيع الممرات الدَّاخلية مثل القصبات الهوائية والرئتين البقاء مفتوحة، حيث تمتلك هذه الأجسام التَّراكيب الدِّعامية التَّركيبية اللازمة.
2. **تبخر الماء.** عادةً ما يكون الهواء غير مشبع ببخار الماء، إلا بعد هطل المطر مُباشرة. ولهذا، فإنَّ المخلوقات الحية التي تعيش على اليابسة تفقد الماء باستمرار إلى الجو. تمتلك الخياشيم مساحة سطح كبيرة تجعلها تفقد كمية كبيرة من الماء.

تُقلِّل **الرِّئة Lung** هذا التَّبخر، حيث تُمرِّر الهواء إلى ممرات أُنبوبية مُتشعبة. إنَّ نظام القصبات الهوائية في مفصليات الأرجل يستخدم أيضًا الأنابيب الدَّاخلية للتَّقليل من التَّبخر.

يتشبَّع الهواء المار في الممرات التَّنفسية ببخار الماء قبل أن يصل إلى المناطق الدَّاخلية للرِّئة. في هذه المناطق، يوجد غشاء رطب رقيق يسمح بعملية تبادُل الغازات. باستثناء الطيور، تستخدم الفقرياتُ التي تعيش على اليابسة جميعها مجموعةً مُتجانسة من الغازات التي تلامس سطوح التبادُل الغازي. على العكس من مرور الماء في اتجاه واحد الذي يُعدّ فعّالًا جدًا في الخياشيم، فإنَّ الغازات تمر إلى الرِّئتين، ومنهما عبر الممرات الهوائية نفسها، أي نظام التدفُّق ثنائي الاتجاه. تمتلك الطيور جهازًا تنفسيًّا استثنائيًّا، وسنرى ذلك لاحقًا.

التَّنفس بالهواء يستفيد من الضَّغط الجزئي للغازات

يحتوي الغاز الجاف على 78.09% نيتروجين، و20.95% أكسجين، و0.93% آرجون وغازات خاملة أُخرى، و 0.03% ثاني أكسيد الكربون. تجعل تيارات الحمل الحراري الجو مُحافظًا على ثبات هذه التَّركيبة لارتفاع يصل إلى 100 كم على الأقلّ، على الرغم من أنَّ كمية هذه الغازات (عدد الجزيئات) في الهواء تقلّ كلما ارتفعنا إلى الأعلى (الشكل 49-23).

وبسبب وجود قوة الجاذبية، فإنَّ الهواء يُشكل ضغطًا للأسفل. يُستخدم جهاز مقياس الضَّغط لقياس ضغط الهواء، حيث القيمة 760 ملم زئبقي هي مقدار ضّغط الهواء عند سطح البحر. كذلك يُعرف هذا الضغط بأنه يساوي **ضغطًا جويًّا واحدًا 1 atmosphere** (1 atm).

يُسهم كلّ نوع من الغازات في المجموع الكلي للضَّغط الجوي بحسب نسبة مجموع الجزيئات الموجودة. ويُسمّى الضغط الذي يُسهم به غاز ما **الضَّغط الجزئي Partial pressure**، ويُشار إليه بـ P_{N_2}، P_{O_2}، P_{CO_2}، وهكذا. يكون الضَّغط الجزئي لـ N_2، O_2، CO_2 عند مستوى سطح البحر، كما يأتي:

$P_{N_2} = 760 \times 79.02\% = 600.6$ ملم زئبقي

$P_{O_2} = 760 \times 20.95\% = 159.2$ ملم زئبقي

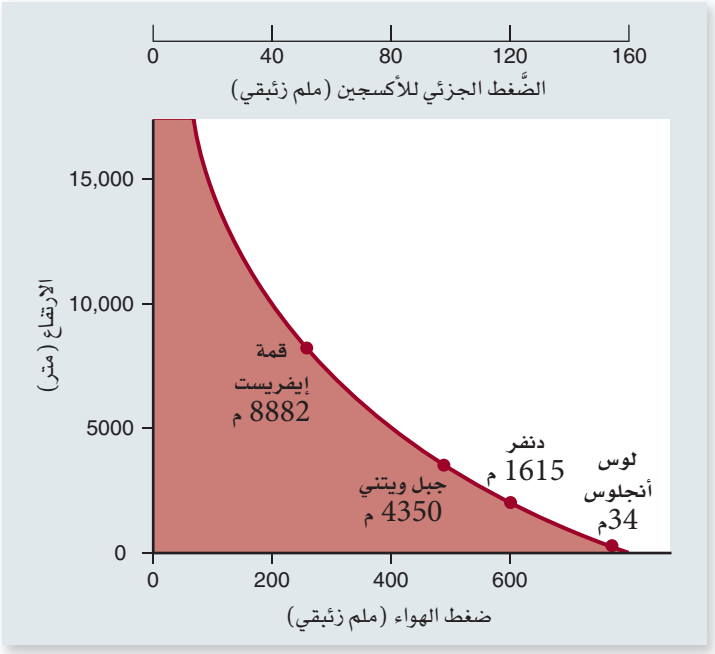
$P_{CO_2} = 760 \times 0.03\% = 0.2$ ملم زئبقي

لا يعيش الإنسان مدة طويلة على ارتفاعات أعلى من 6000م. وعلى الرغم من أنَّ الهواء هناك يحتوي على20.95% أكسجين، فإنَّ الضَّغط الجوي هو 380 ملم زئبق تقريبًا، ولهذا يكون P_{O_2} 80 ملم زئبق ($380 \times 20.95\%$)، وهذه نصف كمية الأكسجين المُتوافرة عند سطح البحر.

في الأجزاء القادمة، سوف نصف التَّنفس في الفقريات التي تمتلك رئة، مبتدئين بالزَّواحف والبرمائيات. وسنُلخص بعد ذلك الرِّئتين في الثدييات، والرِّئتين في الطيور التي تكيَّفت وتخصَّصت بشكل كبير.

رئاتُ البرمائيات والزَّواحف امتداداتٌ مُتخصِّصةٌ من القناة الهضمية

رئات البرمائيات تُشكل ما يُشبه كيسًا يبرز من القناة الهضمية (الشكل 49-24). على الرغم من احتواء السَّطح الدَّاخلي لهذه الأكياس على انثناءات، فإن مساحة السَّطح المُتوافرة لعملية التبادُل في البرمائيات أقلُّ من مساحة السَّطح في رئات الفقريات الأخرى التي تعيش على اليابسة. تتصل كلّ رئة في البرمائيات بالجزء الخلفي من تجويف الفم، أو البلعوم، ويتحكم صمام، يُدعى المزمار، في فتح الممر من هذه الأجزاء إلى الرئة وإغلاقه.



الشكل 49-23

العلاقة بين ضغط الهواء والارتفاع فوق مستوى سطح البحر. ضغط الهواء عند المرتفعات العالية (عند قمم الجبال) أقل بكثير مما هو عند مستوى سطح البحر. عند قمة جبل إيفريست، أعلى جبل في العالم، يبلغ ضغط الهواء ثلث ما هو عند سطح البحر.

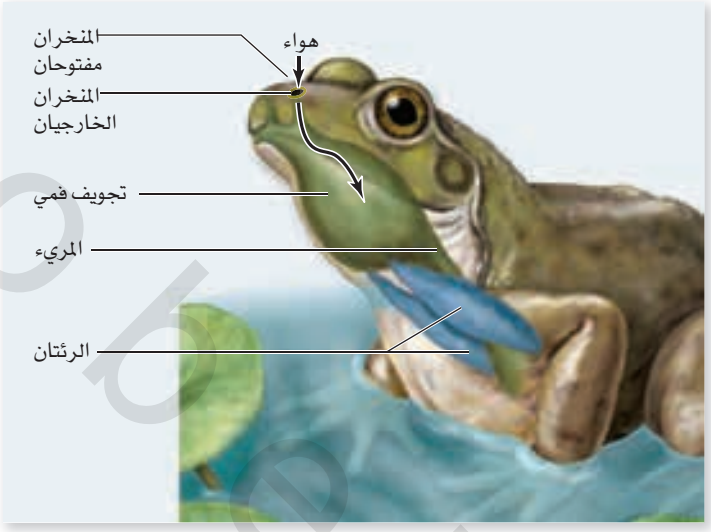
استقصاء

ما الفرق في نسبة أكسجين الجو بين قمة إيفريست وجبل ويتني؟

تتنفس البرمائيات بطريقة تختلف عن الفقريات الأُخرى التي تعيش على اليابسة. تجبر البرمائيات الهواء على الدُّخول إلى رئاتها؛ حيث تعمل على ملء تجويف الفم بالهواء (الشكل 49-24 أ)، وتغلق فمها وفتحتي الأنف لديها، ومن ثم تقوم برفع سقف تجويف الفم. هذا يجعل الهواء يندفع إلى الرِّئتين بطريقة مُشابهة لاستخدام أسطوانة الغاز المضغوط في ملء بالون (الشكل 49-24 ب). ويُسمّى هذا التَّنفس طريقة **الضَّغط الموجب Positive pressure breathing**؛ في الإنسان، يشبه ذلك عملية إدخال الهواء بقوة إلى رئتي شخص ما عن طريق عمل التّنفس الاصطناعي عن طريق الفم.

الزَّواحف التي تعيش على اليابسة تمتلك جلدًا جافًّا، قاسيًا، وحرشفيًّا لا يمنع فقط الجفاف، لكنه يمنع التَّنفس الجلدي، الذي تستخدمه كثير من البرمائيات كذلك. توسِّع الزَّواحف أقفاصها الصدرية عن طريق انقباضات عضلية. يُنشئ هذا الأمر نقصًا في الضغط داخل رئاتها مقارنة مع الجو المحيط بها، إنَّ الضَّغط الجوي العالي من الخارج يدفع الهواء إلى داخل رئات هذه الحيوانات. هذا النوع من التَّهوية يُسمّى التَّنفس بطريقة **الضَّغط السلبي Negative pressure breathing** حيث «يُسحب» الهواء إلى داخل الحيوان بدلًا من أن «يُدفع».

تمتلك رئات الزَّواحف مساحة سطح أكبر من رئات البرمائيات، ولهذا تُعَدُّ فعاليتها أكبر في تبادل الغازات. إنَّ التّنفس الجلدي، قد يحدث، مع ذلك، في بعض الزَّواحف، مثل أفاعي البحر.



أ.

ب.

الشكل 49-24

رئتا البرمائيات. كلّ رئة لهذا الضفدع هي امتداد للقناة الهضمية، وتعبأ بالهواء عن طريق تكوين ضغط موجب في التَّجويف الفمي. أ. يتمدَّد التَّجويف الفمي ويتدفَّق الهواء من خلال فتحات الأنف. ب. تُغلق فُتحتا الأنف، وينضغط (ينكمش) تجويف الفم، وهذا يُحدث ضغطًا موجبًا يُستخدم لملء الرئتين. تفتقر الرئة في البرمائيات إلى التَّراكيب الموجودة في رئات الحيوانات الفقرية الأُخرى التي تعيش على اليابسة والتي تعطيها مساحة سطح كبيرة لتبادل الغازات، ولهذا فهي ليست فعّالة مثل رئات الفقريات الأُخرى.

الرِّئتان في الثَّدييات زادت مساحة السَّطح بشكل كبير

الحيوانات داخلية الحرارة، مثل الطُّيور والثَّدييات، تمتلك مُعدلًا عاليًا ومستمرًّا من عمليات الأيض. تمتلك هذه المجموعات من الفقريات أجهزة تنفُّسية مُعقَّدة وذات كفاءة عالية مُقارنة مع الحيوانات ذات الدَّم البارد. إنَّ تطور هذه الأجهزة جاء ليلبي الطَّلب الزَّائد على التَّنفس الخلوي في هذه الحيوانات ذات الدَّم الحار.

Openingdoor.com

تحتوي رئتا الثَّدييات على ملايين الحويصلات الهوائية **Alveoli**، وهي أكياس صغيرة تتجمع مثل قطوف العنب (الشكل 49-25). يزوِّد هذا كلّ رئة بمساحة سطح كبيرة لتبادُل الغازات. تتكون كلّ حويصلة هوائية من نسيج طلائي يبلغ سمكه خليّة واحدة، ويُحاط بالشُّعيرات الدّمويّة التي تمتلك جدارًا سمكه طبقة واحدة من الخلايا أيضًا. ولهذا، فإنَّ المسافة d التي تقطعها الغازات قليلة جدًا؛ فقط 0.5 – 1.5 ميكرومترًا.

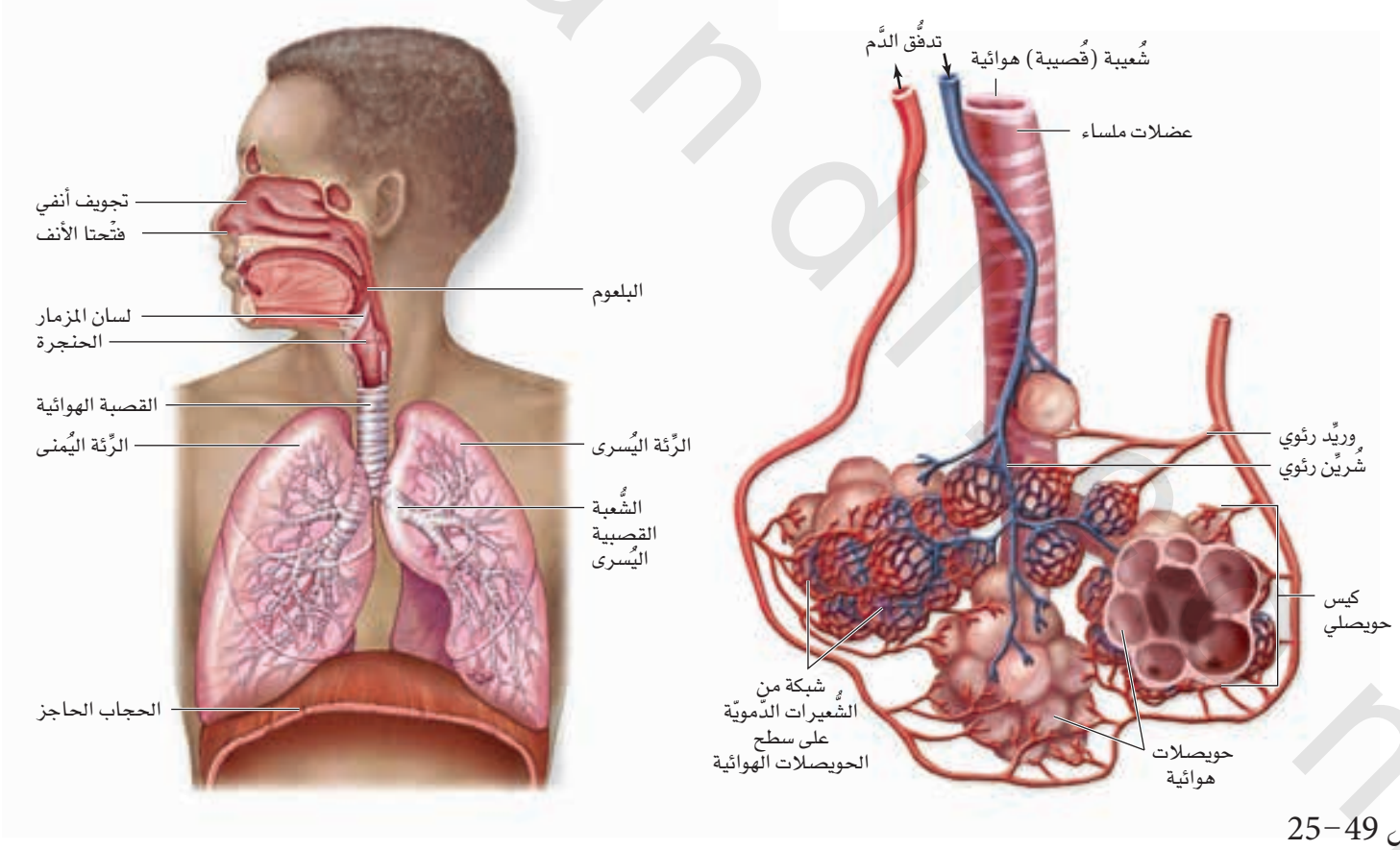
يُؤخذ الهواء عن طريق الفم والأنف، ثم يمر إلى البلعوم، ومن ثم إلى **الحنجرة Larynx** (صندوق الصوت)، بعد ذلك يمر الهواء من خلال فتحة في الحبال الصوتية، تُسمّى المزمار *Glottis*، إلى أنبوب مدعم بحلقات غضروفية لها شكل حرف C، تُسمّى **القصبة الهوائية Trachea**. تُستخدم القصبة الهوائية في الفقريات وفي مفصليات الأرجل لتُشكِّل الأنابيب التَّنفسية. تتشعَّب القصبة الهوائية في الثدييات إلى **شعبتين هوائيتين Bronchi**: يُمنى ويُسرى، تدخل كلّ منهما إلى رئة، ومن ثم تتفرع إلى **شعيبات هوائية Bronchioles** توصل الهواء إلى الحويصلات الهوائية.

تُحاط الحويصلات الهوائية بشبكة كبيرة من الشُّعيرات الدّمويّة. يحدث معظم التَّبادُل بين الهواء والدَّم عبر جدران الحويصلات الهوائية. إنَّ تشعُّب القصبات الهوائية، ووجود عدد كبير من الحويصلات الهوائية زاد من مساحة السَّطح كثيرًا بالمقارنة مع البرمائيات والزَّواحف. في الإنسان، هناك ما يُقارب 300 مليون حويصلة هوائية في كلّ رئة، ومجموع مساحة السطح الموجودة لعملية الانتشار أكثر من 80 م^2، أو ما يُعادل 42 مرة مساحة سطح الجسم. وستُناقش تفاصيل عملية التَّبادُل بين الشُّعيرات الدّمويّة والحويصلات الهوائية في الأجزاء المقبلة.

جهازُ التَّنفسِ في الطُّيور جهازُ تدفُّق عالي الكفاءة

الجهاز التّنفسيّ في الطُّيور ذو تركيب فريد، إذ يزود الطُّيور بتنفس أكثر فاعلية مُقارنة مع الفقريات الأُخرى على اليابسة، وبصورة تختلف عما هو عليه الحال في رئة الثَّدييات التي تنتهي بحويصلات هوائية مُغلَقة النِّهايات. تدفع الرئة في الطيور الهواء إلى أوعية هوائية مُتعدِّدة صغيرة تُسمّى **القصبات الجانبية Parabronchi**، التي يحدث فيها تَبادُل للغازات. يمرُّ الهواء من خلال هذه القصبات الجانبية في اتجاه واحد فقط. هذا شبيه بمرور الماء في اتجاه واحد من خلال الخياشيم في الأسماك.

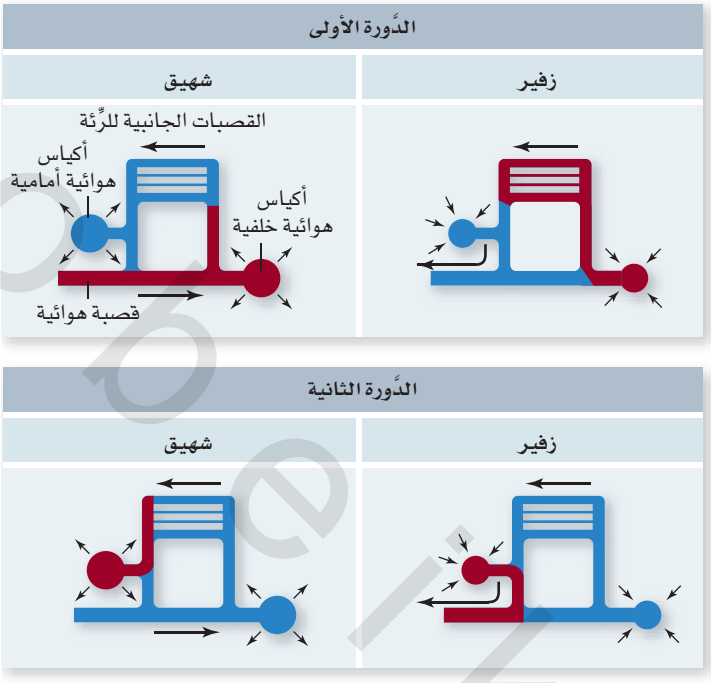
في الفقريات الأُخرى التي تعيش على اليابسة، يختلط الهواء النَّقي الدَّاخل مع الهواء «القديم»، الأفقر بالأكسجين المتبقي من عملية التَّنفس السابقة. لا تُفرِّغ الرئتان في البرمائيات، والزواحف، والثَّدييات محتوياتِها من الغازات بشكل كامل. أما في الطُّيور، فالهواء النقي فقط هو الذي يدخل إلى القصبات الجانبية، ويخرج الهواء «القديم» من طريق آخر. إنَّ هذا الاتجاه الأُحادي في تدفُّق الهواء يحدث بسبب وجود الأكياس الهوائية الأمامية والخلفية التي تُميِّز الطُّيور (الشكل 49-26 أ). عندما يتم أخذ الهواء في أثناء الشَّهيق، فإنَّ هذه الجيوب تتمدد وتمتلئ بالهواء، وعندما يحدث الزَّفير، فإنها تنضغط (تنقبض) دافعةً الهواء إلى الرِّئتين.



الشكل 49-25

الجهاز التّنفسيّ للإنسان وتركيب الرِّئة في الثَّدييات. تمتلك رئتا الثَّدييات مساحة سطح كبيرة بسبب امتلاكها ملايين الحويصلات الهوائية التي تتجمع عند نهايات القُصيبات الهوائية. يعمل هذا على تبادُل الغازات بشكل فعّال مع الدَّم.

أ.



ب.

الشكل 49-26

كيف تتنفَّس الطيور. أ. تمتلك الطيور جهازًا من الأكياس الهوائية، مُقسّمًا إلى مجموعتين: أمامية وخلفية، وهي تمتّد بين الأعضاء الدَّاخلية وفي العظام. ب. يحدث التَّنفس عبر دورتين: في الأولى، يُسحب هواء الشَّهيق (مُبيَّن باللّون الأحمر) من القصبة الهوائية إلى الأكياس الهوائية الخلفية، ومن ثم يحدث له إخراج (زفير) إلى الرِّئتين. وفي الدَّورة الثانية يُسحب الهواء من الرِّئتين إلى الأكياس الهوائية الأمامية، ومن ثمَّ يحدث له إخراج (زفير) إلى الخارج عبر القصبة الهوائية. يكون مرور الهواء عبر الرئتين دائمًا في الاتجاه نفسه، من الخلف إلى الأمام (من اليمين إلى اليسار في هذا الرَّسم).

يحدث التَّنفس في الطُّيور على دورتين (الشكل 49-26 ب). تتضمن كلّ دورة شهيقًا وزفيرًا، لكن الهواء الذي يُؤخذ في الشَّهيق في الدَّورة الأولى لا يتم إخراجه حتى الدَّورة الثانية.

في حالة الشهيق، تتمدَّد الأكياس الهوائية الأمامية والخلفية، إلا أنَّ الهواء يدخل في حالة الشهيق هذه إلى الأكياس الخلفية فقط، وتمتلئ الأكياس الأمامية بالهواء المسحوب من الرِّئتين. في حالة الزَّفير، يخرج الهواء من الأكياس الهوائية الأمامية إلى خارج الجسم، أمّا الهواء فيخرج من الأكياس الهوائية الخلفية إلى الرئتين. تُعاد هذه العملية في الدَّورة الثانية.

إنَّ تدفُّق الهواء في اتجاه واحد يسمح بكفاءة تنفسيّة كبيرة: يتدفق الدَّم من خلال رئة الطُّيور بزاوية 90° بالنسبة إلى تدفُّق الهواء. هكذا تدفُّق عرضي التيار، ليس بفاعلية تدفق التيار المُتعاكس الذي يستخدم زاوية 180° في خياشيم الأسماك، على الرغم من أنَّ هذا النِّظام يمتلك القدرة الكبيرة على استخلاص الأكسجين من الهواء مُقارنة مع رئة الثَّدييات.

بسبب هذه التَّكيُّفات التَّنفسية، فإنَّ العصفور الدّوريّ يمكن أن يعيش على ارتفاع يقارب 6000 م، أمّا الفأر، الذي يملك كتلة الجسم نفسها ومُعدَّل الأيض نفسه كذلك، فإنه سيموت بسبب قلة الأكسجين في وقت قصير.

الفقريات التي تعيش على اليابسة تأخذ الهواء إلى رئتين تُشبه الأكياس تزوّد هذه الفقريات بمساحة سطح كبيرة لتبادُل الغازات. يُساعد التَّنفس الجلدي على تبادل الغازات في بعض البرمائيات والزَّواحف المائية. يُعَدُّ الجهاز التَّنفسيّ في الطُّيور من أكثر الأجهزة كفاءة مُقارنة مع الفقريات الأُخرى التي تعيش على اليابسة، حيث يمتلك تدفقًا هوائيًا في اتجاه واحد يتقاطع مع تيار الدَّم المُتدفِّق بزاوية 90° في الرِّئتين.

10-49 تراكيب التَّهوية وآلياتها

يوجد ما يقارب 30 بليون شُعيرة دموية في كلّ رئة، أي نحو 100 شُعيرة دموية لكلّ حويصلة هوائية. لهذا، يمكن تخيُّل الحويصلة الهوائية على أنها فقاعة هوائية صغيرة جدًا يُغطّى سطحُها كلّه بالدَّم. يحدث تبادُل الغازات بسرعة كبيرة عند السَّطح البيني؛ بين الدَّم والحويصلات الهوائية.

يعود الدَّم من الدَّورة الجهازية، منزوعًا منه الأكسجين، ويمتلك ضغطًا جزئيًّا للأكسجين (Po_2) يُقارب 40 مليمترًا زئبقيًّا. بالمقارنة، فإنَّ مزيج الغاز في الحويصلات الهوائية يملك ضغطًا جزئيًّا مقداره 105 مليمترات زئبقية تقريبًا. يؤدي هذا الاختلاف في ضغط الغازات، Δp في معادلة (فِك)، المُقدَّر بـ 65 مليمترًا زئبقيًّا، إلى حركة الأكسجين نحو الدم. يُغادر الدَّم الرِّئتين، نتيجة هذا التبادل، بضغط جزئي للأكسجين مقداره نحو 100 مليمتر زئبقي. كما ترى، تقوم الرِّئتان بعمل فعّال، لكنه ليس كاملًا، من ناحية تزويد الدَّم بالأكسجين. هذه التَّغيرات في P_{O_2} للدَّم، وكذلك التغيُّرات في ثاني أكسيد الكربون في البلازما (يُشار إليها P_{CO_2})، موضَّحة في (الشكل 49-27).

تركيب الرِّئة ووظيفتها تدعم التَّنفسية

يُغطّى السَّطحُ الخارجي للرِّئة في الإنسان وثدييات أُخرى بغشاءٍ رقيق يُسمّى **غشاءَ الجَنْب الحشوي Visceral pleural membrane**، في حين يُبطن **غشاءُ الجنب الجداري Parietal pleural membrane** الجدارَ الدَّاخلي للتَّجويف الصدري. يُسمّى الفراغُ بين هذين الغشاءين **تجويفَ الجنب Pleural cavity**، وهو صغير جدًا وممتلئ بسائل. يعمل هذا السائل على التصاق الغشاءين مع بعضهما، ومن ثم ربط الرِّئتين مع التَّجويف الصدري بفعالية. تغلف أغشية الجنب كلّ رئة وحدها، حيث إنَّ انهيار إحدى الرِّئتين أو انفشاشها بسبب ثقب في الغشاء، لا يؤثر في الرئة الأخرى؛ لذا فإنها ستظل عاملة.

خلال عملية الشهيق، يزيد حجم التَّجويف الصدري من خلال انقباض مجموعتين من العضلات: عضلات بين الأضلاع الخارجية *Intercostal muscles* وعضلة الحجاب الحاجز *Diaphragm*. يؤدي انقباض عضلات بين الأضلاع الخارجية إلى ارتفاع الأضلاع، وتمدُّد القفص الصدري. أما انقباضُ الحجاب الحاجز، وهو صفيحة مُحدبة من العضلات المُخطَّطة تفصل التَّجويف الصدري عن التَّجويف البطني، فيُسبِّبُ انخفاضَ الحجاب الحاجز وجعله مستوي الشكل. يؤدي هذا إلى تمدد حجم التَّجويف الصدري والرئتين، وزيادة الضغط على الأعضاء في البطن، مُسببًا ما يُسمّى التَّهوية بتأثير الضَّغط السالب (الشكل 49-28 أ).

يمتلك البلعوم والرئتان درجة من المرونة؛ إنَّ تمدُّد هذه التّراكيب خلال عملية الشهيق يضعها تحت شّد مرن. ارتخاء عضلات بين الأضلاع الخارجية والحجاب الحاجز يُنتج زفيرًا سببه إزالة الشّد المرن، سامحًا للبلعوم والرئتين بالارتداد إلى وضعهما قبل الشَّهيق. يمكنك إخراج كمية أكبر من الهواء عن طريق انقباض عضلات البطن، مثل ما يحدث خلال عملية نفخ بالون (الشكل 49-28 ب).

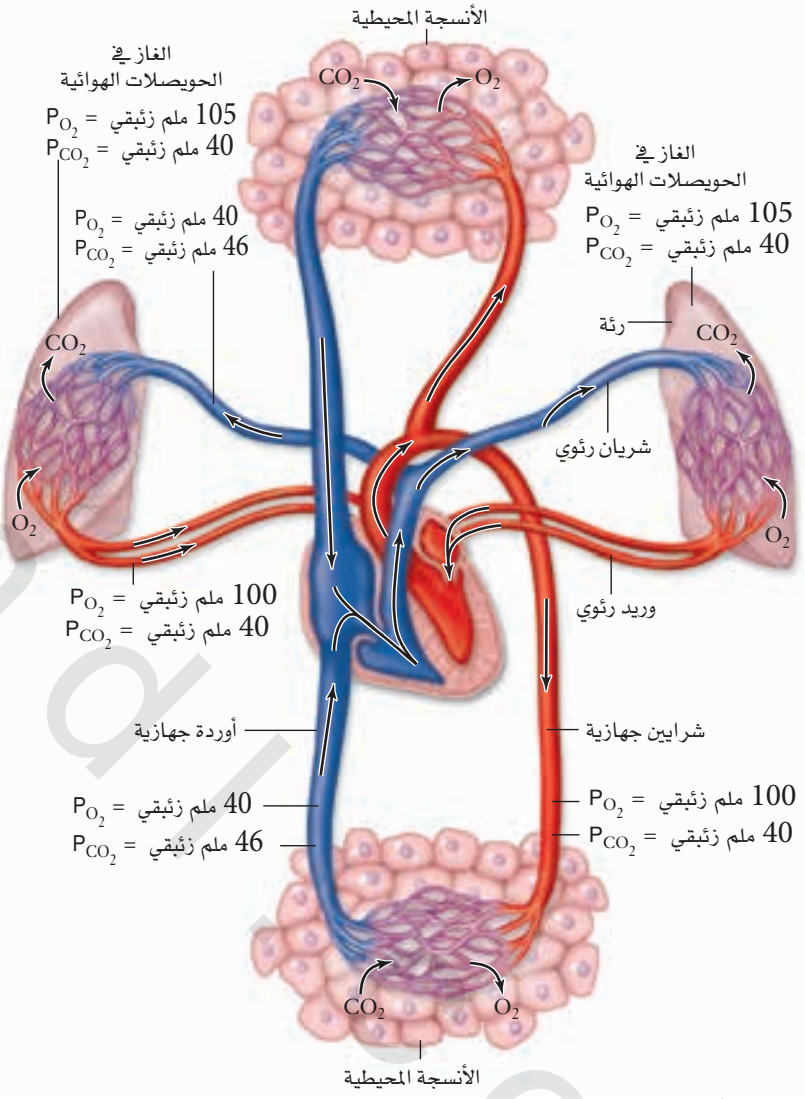
تعتمد فعالية التَّهوية على السِّعة الرِّئوية ومُعدل التَّنفس

تُستخدم مجموعة متنوعة من المُصطلحات لوصف التَّغيرات في حجم الرِّئة خلال عملية التَّنفس. في حالة الرَّاحة، يحرك الشَّخص في كلّ حركة تنفُّس ما يقارب 500 مل من الهواء إلى داخل الرئة وإلى خارجها، ويُسمّى هذا الحجم من الهواء حجم **المدّ والجزْر Tidal volume**. يبقى 150 مل من هذا الحجم في الممرات الأنبوبية (القصبة، والشُّعب القصبية، والقُصيبات)، حيث لا يحدث تبادل للغازات، تُسمّى هذه الممرات الحيز الميت التَّشريحـــي *Anatomical dead space*. يمتزج الغاز في هذه الممرات مع الغاز النَّقي خلال عملية الشَّهيق. هذا الاختلاط هو أحد الأسباب التي تجعل عملية التَّنفس في الثَّدييات ليست بكفاءة عملية التَّنفس في الطُّيور، حيث يمر الهواء في الرِّئتين في اتجاه واحد فقط.

تُسمّى الكميةُ العُظمى من الهواء التي يمكن إخراجها قسريًّا، بعد أقصى كمية من الهواء يمكن إدخالها قسريًّا **السِّعةَ الحيوية Vital capacity**. يبلغ مُعدَّل هذه السِّعة، في الرِّجال الشباب 4.6 لترات تقريبًا، وفي النِّساء الشابات نحو 3.1 لترات، هذه السِّعة مُهمة من النَّاحية الطِّبيّة؛ حيث يمكن أن يدل انخفاضها على وجود تلف في الحويصلات الهوائية في كثير من الأمراض الرِّئوية.

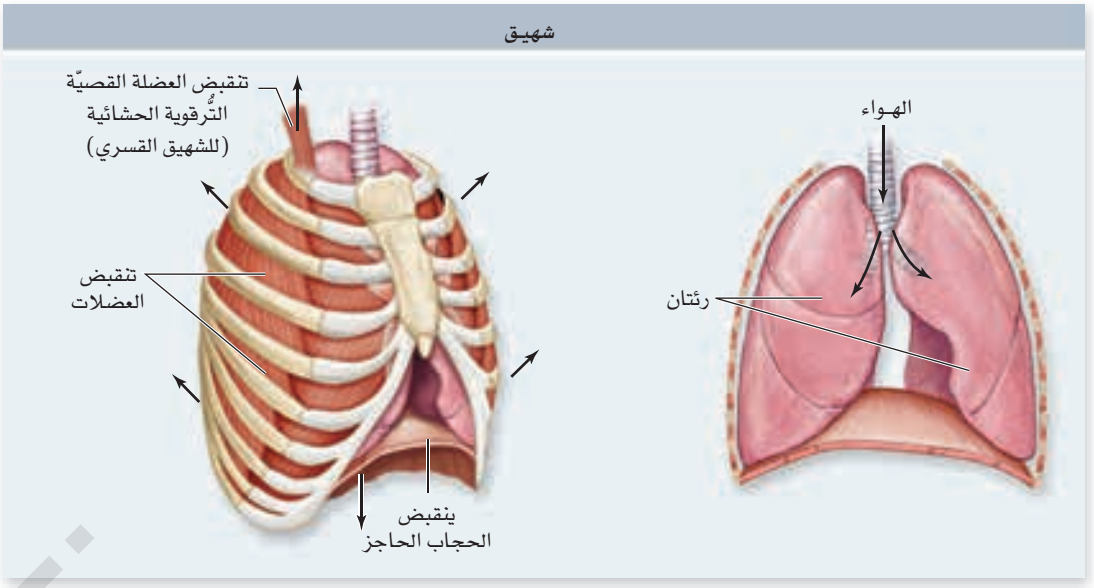
يُحافظ مُعدل التّنفس وعمقه في العادة على P_{O_2} وP_{CO_2} ضمن معدلهما الطَّبيعي. إذا أصبح التَّنفس غير كافٍ للمحافظة على المُعدل الطبيعي لكمية الغازات في الدَّم (مثل زيادة P_{CO_2})، يوصف الشخص بأنه في حالة **نقص التَّهوية Hypoventilation**. وإذا زاد التَّنفس، ينخفض P_{CO_2} في الدَّم، ويوصف الشَّخص بأنه في حالة **زيادة التَّهوية Hyperventilation**.

لا تُعَدُّ زيادة التَّنفس التي تحدث خلال الإجهاد المُتوسط حالة زيادة تهوية؛ لأنَّ زيادة مُعدَّل التَّنفس وقوته يصاحبهما زيادة في مُعدَّل الأيض، ولهذا تبقى قياسات الغازات في الدَّم ضمن مُعدلها الطّبيعي. في الأجزاء المقبلة، سنصف كيف يُنظَّم التَّنفس ليبقى متوازيًا (متماشيًا) مع عمليات الأيض.

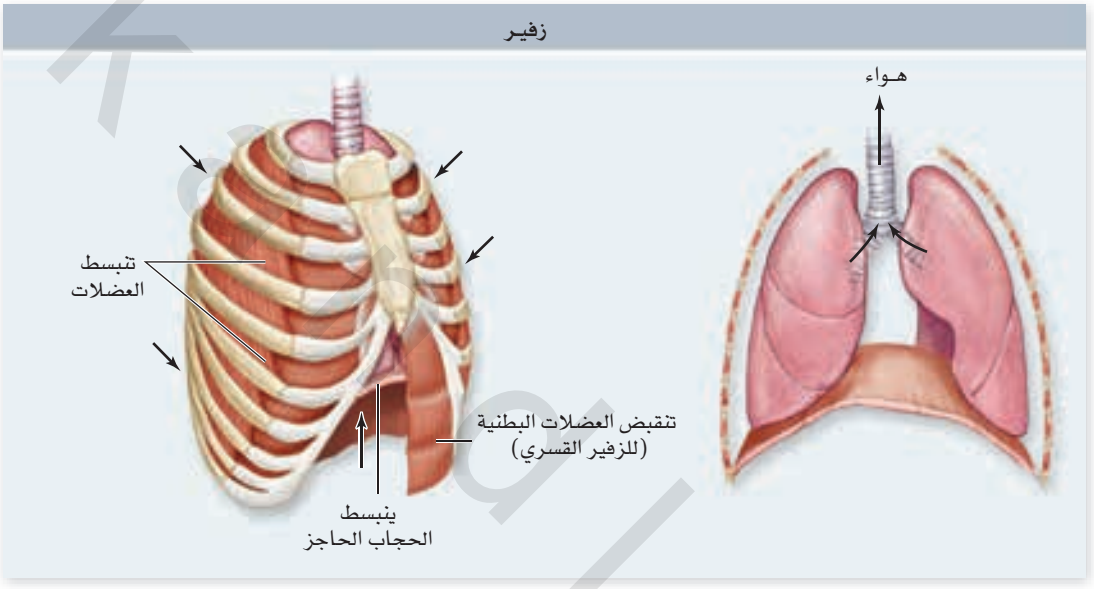


الشكل 49-27

تبادُل الغازات في الشُّعيرات الدَّمويّة في الرِّئة والدَّورة الجهازية. نتيجة لتبادل الغازات في الرِّئتين، تحمل الشَّرايين الجهازية الدَّم المحمل بالأكسجين والمحتوي على تركيز قليل من ثاني أكسيد الكربون. بعد تفريغ الأكسجين في الأنسجة، يصبح محتوى الدم من الأكسجين في الأوردة الجهازية منخفضًا، في حين يكون تركيز ثاني أكسيد الكربون عاليًا.



أ.



ب.

الشكل 49-28

كيف يتنفَّس الإنسان. أ. الشَّهيق. ينقبض الحجاب الحاجز، ويتمدد التَّجويف الصدري، يؤدي هذا إلى زيادة حجم التَّجويف والرِّئتين. نتيجة لزيادة حجم الرِّئتين، يدخل الهواء إلى الرِّئتين. ب. الزَّفير. يعود الحجاب الحاجز وجدار الصدر إلى مواقعهما السابقة بسبب المرونة، ويؤدي هذا إلى نقص حجم التَّجويف الصدري، وإخراج الهواء من الرِّئة إلى الخارج عبر القصبة الهوائية. لاحظ أنّه يمكن تُقوية الشهيق بانقباض عضلات تنفُّسية مُساعدة أُخرى (مثل العضلة القصيّة التّرقوية الحشائية)، ومن المُمكن تقوية الزَّفير بانقباض العضلات البطنية.

التَّهوية تحت سيطرة الجهاز العصبي

يبدأ كلّ شهيق عن طريق خلايا عصبية في مركز السّيطرة التّنفسية *Respiratory control center* الموجود في النُّخاع المُستطيل. تُنبِّه هذه الخلايا العصبية عضلات الحجاب الحاجز وعضلات بين الأضلاع الخارجية للانقباض، ولهذا فهي تُسبِّب الشَّهيق. عندما تتوقف هذه الخلايا العصبية عن إرسال السّيالات، فإن العضلات تسترخي، ويحدث الزَّفير. وعلى الرغم من أنَّ عضلاتِ التَّنفس هيكليةٌ، فإنها تكون في العادة تحت سيطرة أوتوماتيكية. على الرغم من أنَّ هذه السيطرة يمكن التغلُّب عليها إراديًّا، في حالة نقص التَّهوية (التوقف عن التَّنفس) أو زيادتها.

يجب على الخلايا العصبية في النُّخاع المُستطيل أن تستجيب للتّغيرات في P_{CO2} و P_{O2} لتحافظ على الاتزان الدَّاخلي. يمكن أن توضِّح هذه الآلية بإيقاف التَّنفس لديك. هذه العملية تؤدي إلى ارتفاع مُباشر في تركيز ثاني أكسيد الكربون، ونقصان في مستوى الأكسجين. بعد وقت قصير، تُصبح الحاجة إلى التّنفس ضرورية بسبب هذه التَّغيُّرات في غازات الدَّم. إنَّ ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الدَّم، كما يدل عليه ارتفاع P_{CO2}، هو السبب الرّئيس المولِّد للتَّنفس، وليس انخفاض مستوى تركيز الأكسجين.

إنَّ ارتفاع P_{CO2} يُسبِّب زيادة في إنتاج حمض الكاربونيك (H_2CO_3)، الذي يدل على انخفاض درجة حموضة الدَّم وقاعديته. هذا الانخفاض يُسبِّب تنبيه الخلايا الحساسة للتغيُّرات الكيميائية في **الأجسام الأبهرية Aortic bodies والأجسام السُّباتية Carotid bodies**، الموجودة في الأبهر والشِّريان السُّباتي (الشكل 49-29 أ). تُرسل هذه المُستقبلات الطَّرفية سيالات عصبية إلى مركز التَّحكم التّنفسيّ، الذي يزيد بدوره مُعدَّل التَّنفس. يحتوي الدِّماغ أيضًا

على مُستقبلات كيميائية مركزية تُنشَّط بانخفاض درجة الحموضة في السائل الدِّماغي الشوكي (CSF) (الشكل 49-29 ب).

لا يستطيع الشَّخص إنجاز نقص التهوية بشكل إرادي مدة طويلة. حيث يُسبِّب هذا نقصًا في P_{CO_2} في البلازما، وزيادة درجة الحموضة فيها وفي السائل الدِّماغي الشوكي بسبب نقص التَّهوية الذي يثبِّط عمل رد الفعل المُسبِّب للتَّنفس. إنَّ زيادة التَّهوية تسمح للأشخاص بحبس أنفاسهم مدة طويلة، ليس بسبب زيادة الأكسجين في الدَّم، بل بسبب انخفاض مستوى ثاني أكسيد الكربون واحتياجه إلى وقت أطول ليتراكم، مُؤجلًا الحاجة إلى التَّنفس.

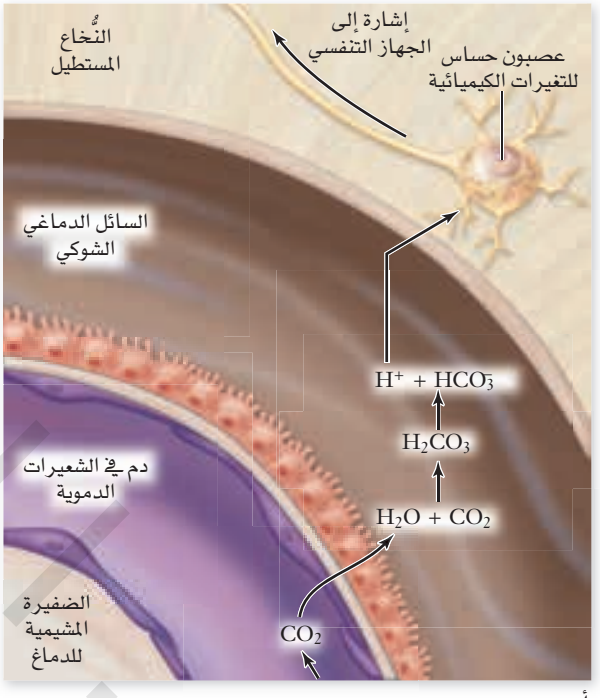
في الأشخاص الذين يملكون رئتين طبيعيتين، يُصبح P_{O2} مؤثرًا فعّالًا للتَّنفس فقط على المرتفعات، حيث يكون P_{O2} منخفضًا في الجو. تُعرف الأعراض التي تنجم عن نقص الأكسجين على المرتفعات بمرض الجبال، يتضمن هذا المرض شعورًا بالضَّعف، والصداع، والغثيان، والتقيؤ، وضعف في الوظائف العقلية. سببُ هذه الأعراض كلها انخفاضُ الضَّغطِ الجزئي للأكسجين، وتزول هذه الأعراض بإعطاء المريض الأكسجين اللازم.

الأمراض التَّنفسية التي تعيق تبادُل الغازات

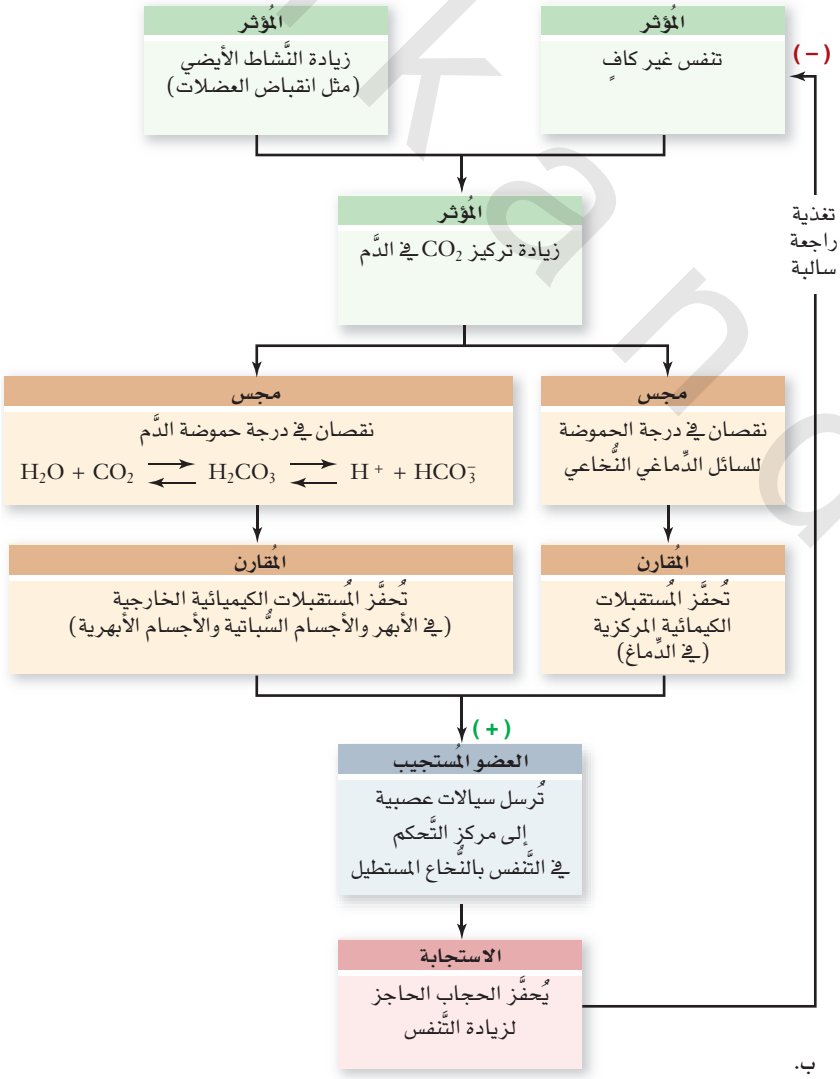
مرض الانسداد الرئوي المُزمن Chronic obstructive pulmonary disease يشير هذا المصطلح إلى أي مرض يعمل على إغلاق مجرى الهواء مدة طويلة. من الأمراض الرّئيسة التي تقع تحت هذه التَّسمية: الرَّبـو، والالتهاب الشُّعَبي المُزمن، والإمفيزيما. في **الرَّبو Asthma**، تعمل المادة المُسبِّبة للحساسية على إفراز مادة الهستامين ومواد كيميائية أُخرى مُسببة للالتهاب. تسبب هذه المواد تضيُّقًا شديدًا للقصبات الهوائية، وتصل في بعض الأحيان إلى الاختناق. من الأنواع الأُخرى لأمراض الانسداد الرِّئوي المُزمن ما يكون سببه بشكل كبير التَّدخين، وتلوث الهواء، أو التَّعرض لهواء مُحمَّل بمواد مُهيِّجة للجهاز التّنفسيّ.

الإمفيزيما *Emphysema* (انتفاخ الرئة)

في هذا المرض، تتحطَّم جدران الحويصلات الهوائية، وتصبح الرِّئة ذات حويصلات هوائية كبيرة لكن عددها قليل. وتصبح الرِّئة مُتليفة وقليلة المُرونة. تُفتح الممرات التّنفسية بشكل مُناسب خلال عملية الشَّهيق، إلّا أنها تنهار، وتمنع خروج الهواء إلى الخارج. يكون الأشخاص المصابون بهذا المرض مُنهكين، حيث



أ.



ب.

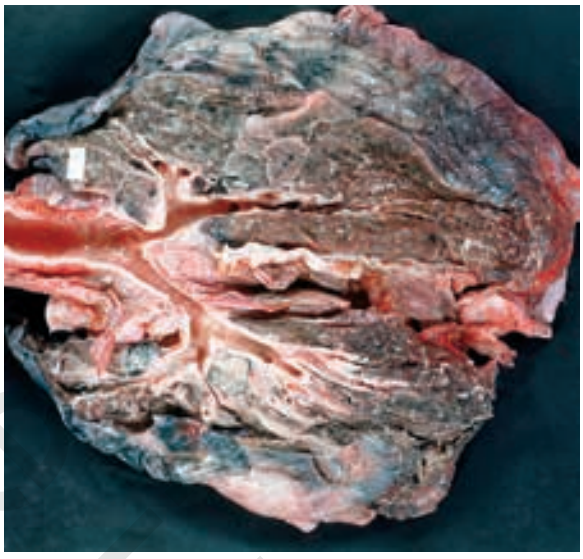
الشكل 49-29

تنظيم التَّنفس عن طريق المُستقبلات الكيميائية الحسّاسة للتَّغير في درجة الحموضة. أ. تُحِسُّ التَّغيرات في درجة حموضة السائل الدِّماغي الشوكي عن طريق المُستقبلات الكيميائية الحساسة لأيون الهيدروجين في الدِّماغ، التي تُساعد على تنظيم التَّنفس. ب. ترصد المُستقبلات الكيميائية المحيطية والمركزية الانخفاض في درجة حموضة الدم والسائل الدِّماغي الشوكي، على التّوالي، عندما يزيد تركيز ثاني أكسيد الكربون نتيجة التَّنفس غير الكافي. استجابة لذلك، تقوم هذه المُستقبلات بتنبيه مركز التَّحكم التّنفسيّ في النُّخاع المُستطيل الذي يُسبِّب زيادةً في مُعدل التَّنفس. نتيجة لذلك، يعود تركيز ثاني أكسيد الكربون إلى وضعه الطبيعي، مكملًا حلقة التَّغذية الرَّاجعة السلبية.

رئتان سليمتان

أ.

رئتان مُصابتان بالسَّرطان



ب.

الشكل 49-30

مُقارنة بين رئة سليمة (أ) وأخرى مُصابة بالسَّرطان (ب).

ينفقون طاقة أكثر من ثلاث إلى أربع مرات من كمية الطّاقة التي يُنفقها الشَّخص العادي للتَّنفس. إنَّ ثمانين إلى تسعين في المئة من الأشخاص الذين يموتون من هذا المرض هم من المُدخنين.

استقصاء

باستخدام قانون فِكْ، كيف تؤثر الإمفيزيما في مُعدل انتشار الغازات إلى الرِّئة ومنها؟

سرطان الرِّئة

يُسبِّب **سرطان الرِّئة Lung cancer** الموت أكثر من أيّ نوع آخر من السّرطانات. التدخينُ أهمُّ مُسبِّبات سرطان الرِّئة، ويتبعه من على بُعد كبير عامل تلوث الهواء (الشكل 49-30). يتبع سرطان الرئة مرض الانسداد الرِّئوي المُزمن أو يتزامن معه.

ينشأ أكثر من 90% من سرطان الرِّئة في الغشاء المُخاطي للشّعب الكبيرة. عندما يُهاجم السَّرطان جدار الشّعب، وينمو حولها، فهو يضغط على المسار الهوائي، وربما يُسبِّب انهيار (إغلاق) الأجزاء البعيدة من الرئة. إنَّ نمو السَّرطان عادة ما ينتج عنه السُّعال، لكن السُّعال هو عادةً ما يحدث كلّ يوم للمُدخنين، وهو نادرًا ما يُشير إلى وجود سرطان. إنَّ أول الإشارات الجادّة التي تدل على وجود مشكلات هو مصاحبة خروج الدَّم مع السُّعال.

ينتشر سرطان الرِّئة بشكل سريع، حيث يكون قد هاجم أعضاء أُخرى عندما يُكتشف ويُشخص. إنَّ فرصة الشفاء قليلة، حيث تبلغ نسبة الأشخاص الذين يعيشون خمس سنوات بعد اكتشاف المرض 7%.

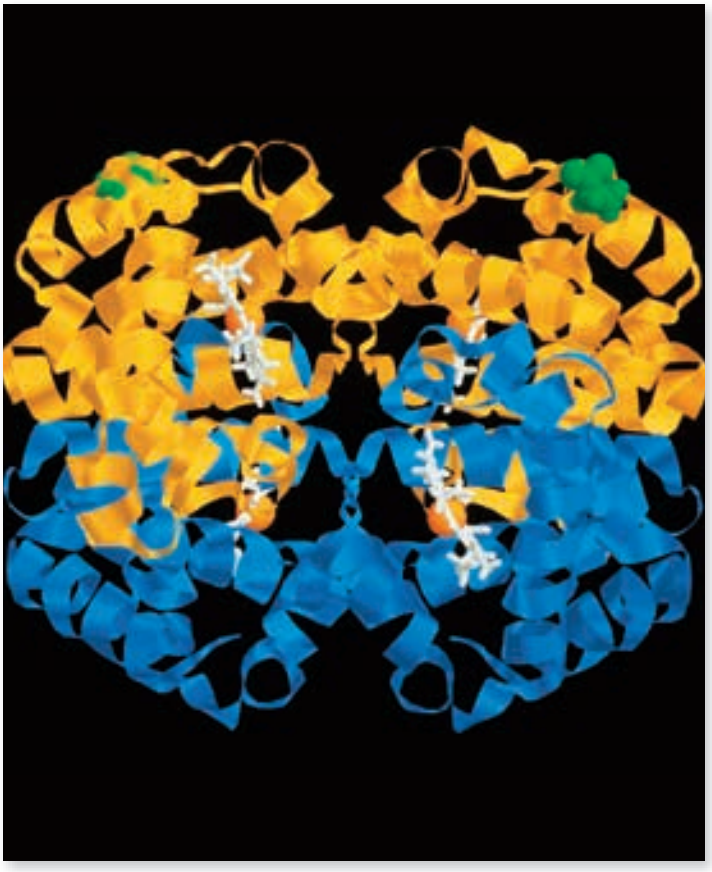
الإنسان، مثل الفقريات الأُخرى، يستنشق الهواء من خلال انقباض عضلات الحجاب الحاجز وعضلات بين الأضلاع، مولدًا بذلك تهوية ذات ضغط سالب. تحدث عملية الزَّفير بشكل رئيس عن طريق استرخاء العضلات والارتداد المرن. تُحافظ التَّهوية على غازات الدَّم ودرجة الحموضة ضمن مُعدلها الطبيعي، وهي تحت تحكُّم رد فعل المُستقبلات الكيميائية. الأمراض التَّنفسية، مثل أمراض الانسداد الرِّئوي المُزمن تحدُّ من تبادُل الغازات. يرتبط سرطان الرِّئة مع التَّدخين، ومُعدَّلُ بقاء المريض على قيد الحياة مُنخفضٌ.

11-49 نقل الغازات في سوائل الجسم

تعتمد كمية الأكسجين التي تذوب في بلازما الدم بشكل مُباشر على P_{O2} للهواء الموجود في الحويصلات الهوائية، كما أوضحنا سابقًا. عندما تعمل رئتا الثدييّات بشكل طبيعي، فإنَّ بلازما الدَّم المُغادرة للرئتين تمتلك كمية من الأكسجين المُذاب مساوية لما هو محسوب نظريًّا، بناءً على P_{O2} الموجودة في الهواء. ولأنّ الأكسجين يمتلك ذائبية قليلة، فإنّ أقصى ما تستطيع بلازما الدَّم امتلاكه هو 3 مل من الأكسجين فقط لكلّ لتر. لكن مُعظم الدَّم يستطيع حمل 200 مل تقريبًا من الأكسجين لكلّ لتر. يكون معظم هذا الأكسجين في الدَّم مُرتبطًا مع جزيئات الهيموجلوبين في داخل خلايا الدَّم الحمراء.

الصِّبغات التَّنفسية ترتبط بالأكسجين لنقله

الهيموجلوبين Hemoglobin بروتينٌ مكَّونٌ من أربع سلاسل من عديد الببتيد، وأربعة مركبات عضوية تُسمّى كلّ منها مجموعة الهيم *Heme group*. توجدُ في مركز كلّ واحدة من هذه المجموعات ذرةُ حديد تستطيع الارتباط بجزيء الأكسجين (الشكل 49-31). لهذا، فإنَّ كلّ جزيء هيموجلوبين يرتبط بأربع ذرات من الأكسجين.



الشكل 49–31

تركيب بروتين الهيموجلوبين. يتكون الهيموجلوبين من أربع سلاسل من عديد الببتيد: سلسلتا ألفا وسلسلتا بيتا. كلّ سلسلة تشترك مع مجموعة هيم، وتمتلك كلّ مجموعة هيم ذرة حديد مركزية ترتبط مع جزيء الأكسجين.

يُحمَّل الهيموجلوبين بالأكسجين في الشعيرات الدّمويّة التّابعة للحويصلات الهوائية في الدورة الدّمويّة الرِّئوية، مُشكلًا **أوكسي هيموجلوبين Oxyhemoglobin**. ويمتلك هذا الجزيء لونًا أحمر فاقعًا. عندما يمر الدَّم بالشعيرات التابعة للدَّورة الدّمويّة الجهازية، يفقد بعض هذا الهيموجلوبين الأكسجين، ويُصبح **هيموجلوبينًا منزوع الأكسجين Deoxyhemoglobin**. يمتلك هذا الجزيء لونًا أحمر قاتمًا؛ ويمنح لونًا أزرق خفيفًا للأنسجة. وتُبيِّن رسومُ الجهاز القلبي الوعائي الأوعيةَ المُحمَّلة بالدَّم المحمّل بالأكسجين باللّون الأحمر، والأوعيةَ التي تحمل دمًا منزوع الأكسجين باللّون الأزرق.

يُعَدُّ الهيموجلوبين بروتينًا قديمًا؛ حيث إنه لا يُستخدم حاملًا للأكسجين بالفقريات فقط، بل يُستخدم أيضًا بوصفه ناقلًا للأكسجين في كثير من اللافقريات، مثل: الديدان الحلقية، والرَّخويات، وشوكيات الجلد، والديدان المُفلطحة، وحتى بعض الأوليات. كثير من اللافقريات الأخرى، تستخدم حاملًا مُختلفًا للأكسجين، مثل هيموسيانين **Hemocyanin**. في الهيموسيانين، الذّرة التي ترتبط بالأكسجين هي النُّحاس. الهيموسيانين ليس مُرتبطًا بخلايا الدَّم، بل هو بروتين حر يدور في السائل الدّوريّ (الليمف الدموي) لمفصليات الأرجل وبعض الرَّخويات.

استقصاء

إذا كان لونُ الأوعية الدّمويّة قليلة الأكسجين هو الأزرقَ، فهل هذا يعني أن الأوردة جميعها في الجسم تمتلك اللّون الأزرق؟ أو لماذا لا تمتلك هذا اللون؟

يُشكِّل الهيموجلوبين احتياطيًّا جيدًا من الأكسجين

يكون 97% من الهيموجلوبين في خلايا الدم الحمراء على شكل أوكسي هيموجلوبين عندما يكون P_{O2} للدم 100 مليمتر زئبقي، هذا المستوى موجود في الدم المغادر للحويصلات الهوائية، ويشار إليه بنسبة إشباع الأوكسي هيموجلوبين بمقدار 97%.

عندما يكون الشخص مرتاحًا، يمتلك الدَّم العائد إلى القلب عبر الأوردة الجهازية PO_2 منخفضة حتى 40 مليمترًا زئبقيًّا. عند هذا المستوى المنخفض من P_{O2}، تكون نسبة إشباع الهيموجلوبين 75%. هذا يعني في حالة الرَّاحة أن 22 % فقط (97% ناقص 75%) من الأوكسي هيموجلوبين أطلقت محتوياتها من الأكسجين إلى الأنسجة. بعبارة أخرى، أُطلق خُمس الأكسجين إلى الأنسجة، تاركًا أربعة أخماس الأكسجين في الدَّم احتياطيًّا. يُسمّى الرَّسمُ الذي يوضِّح هذه التغيُّرات مُنْحَنَى انحلال أوكسي هميوجلوبين (الشكل 49–32).

يمتلك هذا الاحتياطي الكبير من الأكسجين وظيفة مهمة؛ حيث يزوِّد الجسم باحتياجاته من الأكسجين خلال عملية الإجهاد والرَّاحة. خلال التمارين الرِّياضية، مثلًا، تتسارع عمليات الأيض في العضلات، ومن ثم تستخدم أكسجينًا أكثر، ويقلل P_{O2} في الدم الوريدي. يمكن أن يصل P_{O2} في الدَّم الوريدي إلى 20 مليمترًا زئبقيًّا. في هذه الحالة، يكون إشباع الهيموجلوبين 35% (انظر الشكل 49–32). وحيث إنَّ الدَّم الشِّرياني لا يزال يحتوي على 97% من الأوكسي هيموجلوبين، فإنَّ كمية الأكسجين التي أفرغت من الهيموجلوبين ستكون الآن 62% (97% ناقص 35%)، بدلًا من 22% عند الرَّاحة.

إضافة إلى هذه الوظيفة، فإنَّ احتياطي الأكسجين يضمن أيضًا أنَّ الدَّم يحتوي على الكمية الكافية من الأكسجين للمُحافظة على الحياة من 4–5 دقائق إذا توقف

استقصاء

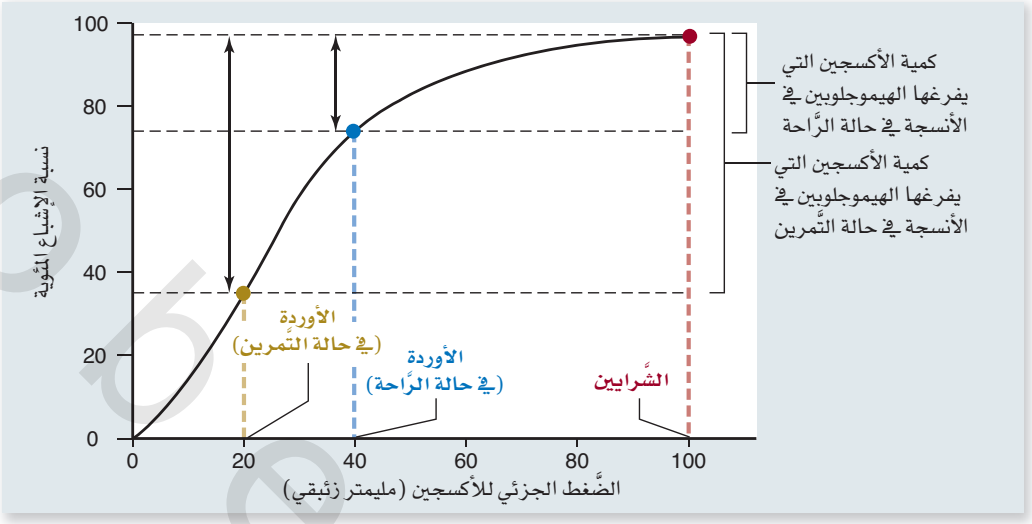
استنادًا إلى المعلومات السابقة، هل يستفيد الشخص السليم بشكل كبير من تنفس هواء يحتوي على 100% أكسجين بعد أداء تمرين رياضي مجهد، مثل سباق 400 م؟

التَّنفس، أو توقف القلب عن ضخ الدَّم.

يتأثر عشق الهيموجلوبين للأكسجين بكل من درجة الحموضة والحرارة

يتأثر نقل الأكسجين بالدَّم بعوامل مثل الحرارة ودرجة الحموضة. يتَّحد ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات الأيض بالأنسجة مع الماء، ليُشكِّل حمض الكربونيك (H_2CO_3). يتحلَّل حمض الكربونيك إلى أيون البيكربونات (HCO_3^-) وأيون الهيدروجين، لهذا يُقلِّل من درجة حموضة الدَّم وقاعديته. يحدث هذا التفاعل داخل خلايا الدَّم الحمراء، حيث يُقلِّل انخفاض درجة الحموضة عشق الهيموجلوبين للأكسجين، مُسببًا إطلاق الأكسجين من الهيموجلوبين بشكل سريع.

يُعرف تأثير درجة الحموضة على عشق الهيموجلوبين للأكسجين، **بانتقال بور Bohr shift**، وسببه ارتباط أيون الهيدروجين إلى الهيموجلوبين. يُوضَّح هذا في الرَّسم بإزاحة منحنى انحلال أوكسي هميوجلوبين إلى اليمين (الشكل 49–33 أ).



الشكل 49–32

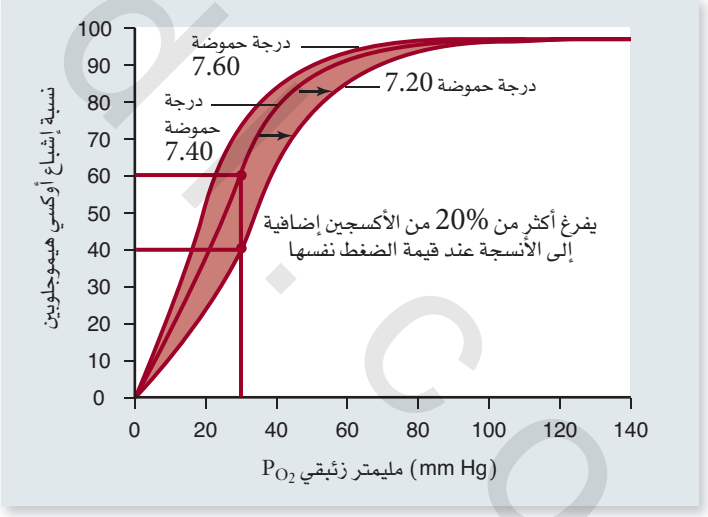
منحى انحلال أوكسي هيموجلوبين. يتَّحد الهيموجلوبين مع الأكسجين في الرِّئتين، وينتقل هذا الدَّم المحمل بالأكسجين عن طريق الشَّرايين إلى خلايا الجسم. بعد إزالة الأكسجين من الدَّم للقيام بالتَّنفس الخلوي، يدخل الدَّم إلى الأوردة مُحتويًا على كمية أقل من الأكسجين.

تملك زيادة الحرارة تأثيرًا مشابهًا في عشق الهيموجلوبين للأكسجين (الشكل 49–33 ب). لأنّ العضلات الهيكلية تُنتج ثاني أكسيد الكربون بشكل سريع خلال عملية التَّمرين، وتُنتج أيضًا العضلات النَّشطة الحرارة، فإنَّ الدَّم يفقد نسبة أكبر من الأكسجين المحمول خلال التَّمرين.

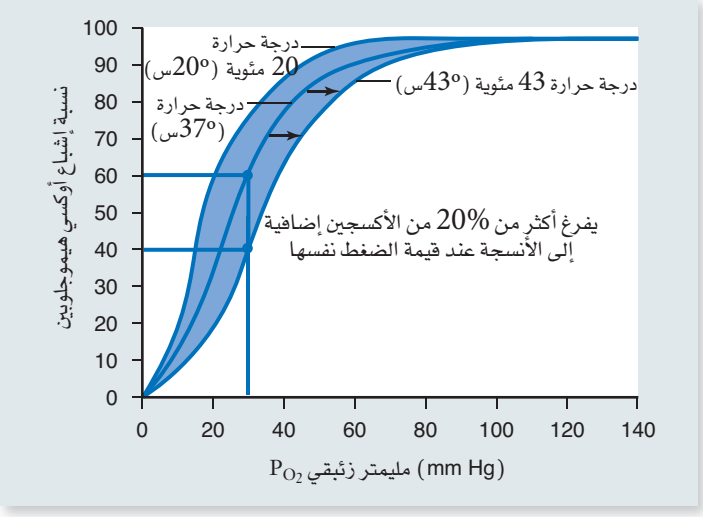
ينتقل ثاني أكسيد الكربون بشكل رئيس على هيئة أيون البيكربونات

يُنقل نحو 8% من ثاني أكسيد الكربون ذائبًا في بلازما الدَّم؛ وينقل 20% عن طريق الهيموجلوبين. وحيث إنَّ ثاني أكسيد الكربون يرتبط بجزيء البروتين في الهيموجلوبين، وليس بأيون الحديد في مجموعة الهيم، فإنه لا يتنافس مع الأكسجين؛ إلا أنه يُغيِّر في شكل الهيموجلوبين، مسببًا انخفاضًا في عشقه للأكسجين.

ينتشر ما بقي من ثاني أكسيد الكربون، الذي يشكِّل 72% إلى خلايا الدَّم، حيث يقوم أنزيم مجفف **حمض الكربونيك Carbonic anhydrase** بتحفيز ارتباط ثاني أكسيد الكربون مع الماء ليُشكِّل حمض الكربونيك COH. يتحلل هذا المركب في داخل خلايا الدم إلى أيون البيكربونات وأيونات الهيدروجين. يرتبط أيون الهيدروجين إلى الهيموجلوبين منزوع الأكسجين، ويخرج أيون البيكربونات خارج خلايا الدَّم الحمراء، أي إلى بلازما الدَّم، عن طريق ناقل ينقل جزيئًا واحدًا



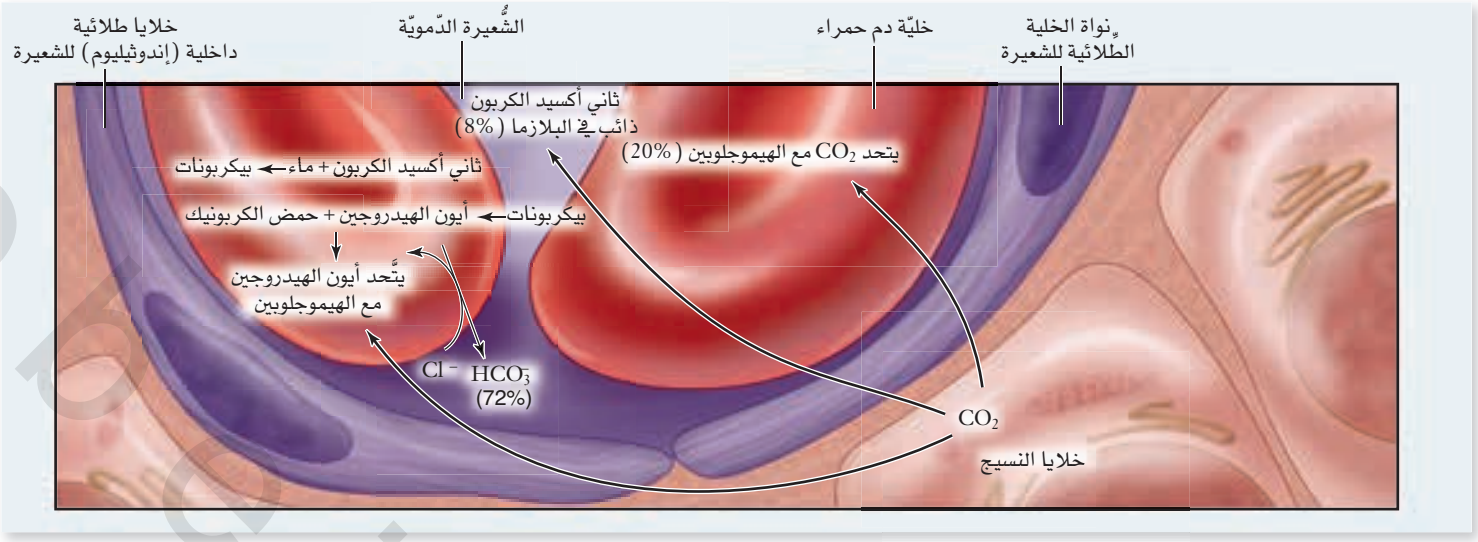
أ. الإزاحة بفعل درجة الحموضة



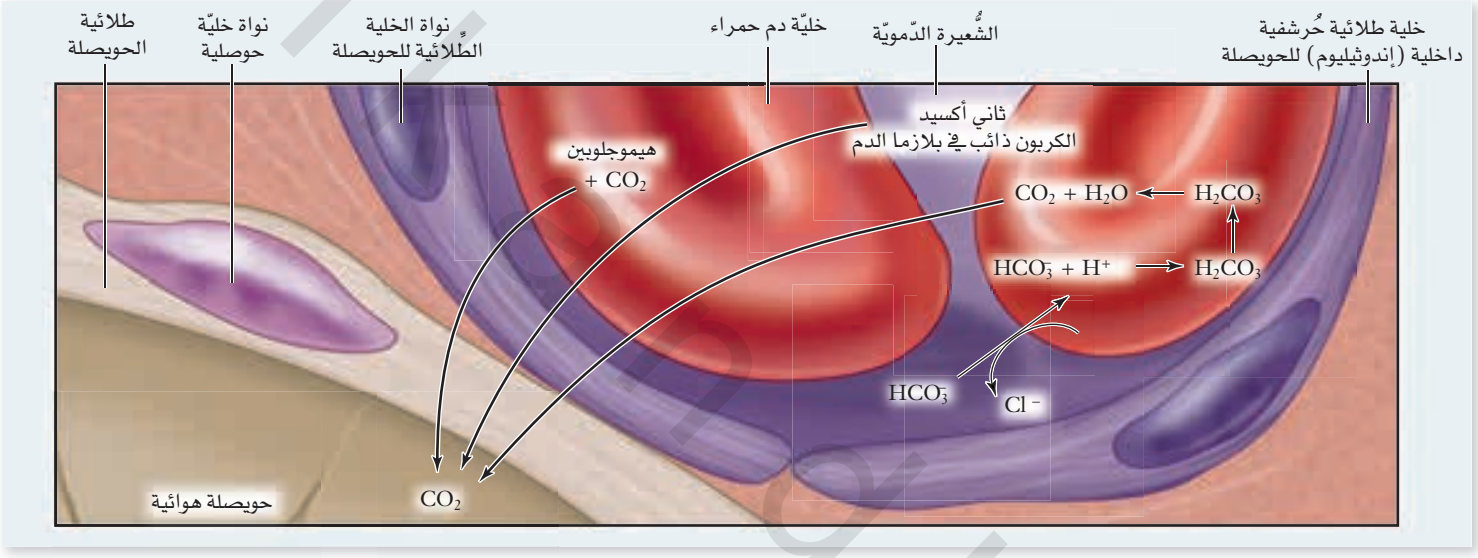
ب. الإزاحة بفعل درجة الحرارة

الشكل 49–33

تأثير درجة الحموضة والحرارة في منحى انحلال أوكسي هيموجلوبين. أ. انخفاض درجة الحموضة. (ب) ارتفاع درجة الحرارة يُزيح منحى انحلال أوكسي هيموجلوبين إلى اليمين، مُسهِّلًا انحلال الأكسجين. في هذا المثال، هذا الشيء يمكن ملاحظته، عندما تقل نسبة إشباع أوكسي هيموجلوبين من 60% إلى 40%، حيث يشير المثال هذا إلى أن الأكسجين المنفك إلى الأنسجة يكون أكثر بنسبة 20%.



أ.



ب.

الشكل 49–34

نقل ثاني أكسيد الكربون في الدَّم. أ. مرور ثاني أكسيد الكربون إلى الدم. ينتقل ثاني أكسيد الكربون بثلاث طرق، هي: الذوبان في بلازما الدم، أو الارتباط مع الجزيء البروتيني للهيموجلوبين، أو على شكل بيكربونات تتشكَّل في خلايا الدَّم الحمراء. إنَّ تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء ليُشكِّل حمض الكربونيك يُحفَّز بأنزيم يُدعى مجفف حمض الكربونيك الموجود في خلايا الدم الحمراء. ب. إزالة ثاني أكسيد الكربون من الدَّم. عند مرور الدَّم عبر الشُّعيرات الرِّئوية، تنعكس هذه التَّفاعلات، فينتج غاز ثاني أكسيد الكربون، الذي يخرج بعملية الزَّفير.

من الكلور لكلّ أيون من أيونات البيكربونات (يُسمّى هذا «انتقال الكلوريد»).

يزيلُ هذا التفاعل كمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون من بلازما الدَّم، مُحافظًا على فرق في التَّركيز الذي يسمح لكميات إضافية من ثاني أكسيد الكربون بالانتشار إلى بلازما الدم من الأنسجة المُحيطة (الشكل 49–34 أ). يؤدي تشكل H_2CO_3 دورًا مهمًّا في المحافظة على توازن الأحماض والقواعد في الدَّم؛ وتؤدي أيونات البيكربونات دورًا محلولًا مُنظِّمًا رئيسًا لدرجة الحموضة في بلازما الدَّم.

إنَّ انخفاض P_{CO2} للغازات داخل الحويصلات الهوائية في الرئتين يعمل على جعل تفاعل أنزيم مجفف حمض الكربونيك يسير في اتجاه معاكس، محولًا H_2CO_3 إلى ماء وثاني أكسيد الكربون (الشكل 49–34ب). ينتشر ثاني أكسيد الكربون خارج خلايا الدَّم الحمراء وإلى الحُويصلات الهوائية، مُغادرًا الجسم في عملية الزَّفير المقبلة.

هناك غازات ذائبة أخرى تنقل بالهيموجلوبين، أكثرها ملاحظة هو أكسيد النتريك Nitric oxide، الذي يؤدي دورًا مهمًّا في توسُّع الأوعية الدّمويّة. يرتبط أول أكسيد الكربون بقوة أكبر مع الهيموجلوبين مُقارنة مع الأكسجين، وهذا يُسبِّب الوفاة بالتَّسمم بأول أكسيد الكربون (الاختناق). يمتلك المصابون بالتَّسمم بأول أكسيد الكربون جلدًا أحمر فاتحًا بسبب ارتباط الهيموجلوبين مع أول أكسيد الكربون.

يرتبط الهيموجلوبين منزوع الأكسجين مع الأكسجين في الرئتين ليشكل أوكسي هيموجلوبين الذي يتفكَّك في الشُّعيرات الدّمويّة للأنسجة ليُطلق الأكسجين. ينتقل ثاني أكسيد الكربون في الدم بثلاث طرق: ذائبًا في بلازما الدم، أو مرتبطًا مع الهيموجلوبين، أو على شكل بيكربونات في بلازما الدَّم المُتشكِّلة عن طريق تفاعل يُحفَّز أنزيميًّا، ويحدث في خلايا الدَّم الحمراء.

49-1 الأجهزة الدورية في اللافقريات

يتناسب الجهاز الدّوريّ للمخلوقات متعددة الخلايا مع حجم المخلوق الحيّ، ودرجة تعقيده، وطريقة معيشته (الشكل 49-1).

- تمرر الإسفنجيات الماء من خلال قنوات، وتدوِّر اللاسعات الماء خلال التجويف المعدي الوعائي.
- الحيوانات الصغيرة تستخدم سوائل التَّجويف الجسمي لعملية التَّدوير.
- تمتلك الأجهزة المُغلقة سائلًا دوريًّا مميزًا محصورًا داخل الأوعية الدّمويّة، وينتقل في دوائر مغلقة.

49-2 الأجهزة الدورية في الفقريات

إنَّ زيادة الحجم والتعقيد تحتاج إلى مساحة سطح أكبر لتوصيل المواد الغذائية والأكسجين، والتخلص من الفضلات وثاني أكسيد الكربون.

- تمتلك الأسماك قلبًا خطيًا يحتوي حجرتي ضخ لزيادة فعالية مرور الدَّم من خلال الزَّعانف (الشكل 49-2).
- الدَّورة الرِّئوية تضخ الدم إلى الرئتين، أمّا الدّورة الجهازية فتضخ الدَّم إلى بقية الجسم.
- يمتلك قلب الضفدع أذينين يفصلان تدفق الدم إلى الرئتين والجسم، وبُطينًا واحدًا (الشكل 49-3).
- تمتلك الزَّواحف حاجزًا يفصل البُطين جزئيًّا، مُقللةً بذلك من اختلاط الدَّم المحمل بالأكسجين وغير المحمل بالأكسجين.
- تمتلك الثدييّات، والطُّيور، والتَّماسيح، بطينين (الشكل 49-4).

49-3 القلب رباعي الحجرات والأوعية الدّمويّة

يستخدم القلبُ رباعي الحجرات دورةً قلبية كاملة تحتوي على فترة راحة، ودورتين انقباضيتين.

- يُحافَظ على تدفُّق الدَّم عبر القلب في اتجاه واحد عن طريق صمامين يقعان بين الأذينين والبطينين (الشكل 49-5).
- خلال مرحلة الارتخاء القلبي، يسترخي البطينُ وينقبض الأذينان؛ خلال مرحلة الانقباض القلبي ينقبض البطينان.
- تنقل الشَّرايين والشُّرينات الدَّم المحمل بالأكسجين إلى الجسم، وتُرجع الأوردة والوريدات الدَّم غير المحمل بالأكسجين إلى القلب (الشكل 49-4).
- يبدأ الانقباض من العقدة الجيبية الأذينية (الشكل 49-7).

49-4 خصائص الأوعية الدّمويّة

تمتلك الأوعية الدّمويّة -ما عدا الشُّعيرات الدّمويّة- التَّركيب الأساسي نفسه.

- تتكون الشرايين والأوردة من طبقة من النسيج الطلائي، وألياف مرنة، وعضلات ملساء، وأنسجة ضامة (الشكل 49-8).
- تمتلك الشُّعيرات الدّمويّة طبقة واحدة فقط من النَّسيج الطلائي.
- تتحمل الشرايين والشُّرينات التَّغيرات في ضغط الدَّم، وتتحكم في تدفُّق الدم بسبب وجود الألياف المرنة في جدرانها.
- تبادلُ المواد في الشُّعيرات الدّمويّة سريعٌ (الشكل 49-9).
- تُسهِّل عودة الدَّم إلى القلب عن طريق الأوردة عن طريق انقباض العضلات الهيكلية ووجود صمامات تفتح في اتجاه واحد (الشكل 49-10).
- يخرج السائل من بلازما الدم خارج الشُّعيرات الدّمويّة، ثم يعود عن طريق الخاصية الأسموزية والجهاز اللمفاوي المنفصل (الشكل 49-11).
- يتحرك اللِّيمف من خلال الأوعية اللِّيمفاوية إلى العقد والأعضاء اللِّيمفاوية، ويعود إلى القلب عن طريق الأوردة تحت التَّرقوية.

49-5 تنظيم تدفُّق الدم وضغطه

يتم تنظيم تدفُّق الدَّم وضغطه عن طريق الجهاز العصبي الذَّاتي (الشكل 49-14).

- يزيدُ نورإبينيفرين، المُفرز من الأعصاب الودية، مُعدَّلُ ضربات القلب؛ أما الأستيل كولين، المفرز من الأعصاب شبه الودية، فيُقلِّل من مُعدَّل ضربات القلب.
- الناتج القلبي، حاصل ضرب معدل ضربات القلب في وحدة من الزمن في حجم الضربة يزيد مع الإجهاد.
- تتم السيطرة على ضغط الدَّم الشِّرياني عن طريق مُستقبلات الضّغط الموجودة في القوس الأبهري، والشرايين السُّباتية.
- يُنَظَّمُ حجمُ الدَّم عن طريق هرمونات.

49-6 أجزاء الدَّم (مكونات الدم)

الدَّمُ نسيجٌ ضامٌّ مُكوَّنٌ من سائل خلوي، وبلازما، وعناصر أُخرى مُكوِّنة تضم الخلايا وأجزاء من الخلايا (الشكل 49-16).

- تحتوي البلازما على 92% ماء، إضافة إلى المواد الغذائية، وفضلات، وهرمونات، وأيونات، وبروتينات (الشكل 49-15).
- تشمل خلايا الدَّم: خلايا الدَّم الحمراء، وخلايا الدَّم البيضاء، والصفائح الدّمويّة.
- خلايا الدَّم تنشأ من خلايا جذعية مُتعددة القدرات في نخاع العظم عن طريق عملية تُسمّى تكوُّنَ الدَّم (الشكل 49-16).
- تحتوي خلايا الدَّم الحمراء على الهيموجلوبين لنقل الأكسجين.
- تُشكِّل خلايا الدَّم البيضاء جزءًا من جهاز المناعة.
- تُنتج الصفائح الدّمويّة الخثرات الدّمويّة (الجلطة الدّمويّة) (الشكل 49-16).

49-7 تبادُل الغازات عبر السطوح التَّنفسية

إحدى الوظائف الرَّئيسة للجهاز الدّوريّ الحصولُ على الغازات وتوزيعها وإزالتها لتدعم النَّشاط الأيضي.

- يتضمن تبادُل الغازات انتشارها عبر الأنسجة الرَّطبة.
- الانتشار عملية لا تحتاج إلى طاقة، ومعدل الانتشار يقاس بقانون (فِكْ) للانتشار (صفحة 1000).

49-8 الخياشيم، والتَّنفس الجلدي، وأجهزة القصبات الهوائية

زاد التَّطور من انتشار الغازات لأقصى حدوده في الخياشيمَ والرِّئتين (الشكل 49-19).

- زادت الخياشيم مساحة سطح التَّنفس لتبادُل الغازات.
- في الأسماك العظمية، زاد الانتشار إلى حده الأقصى عن طريق تبادُل التَّيار المُتعاكس (الشكل 49-20 و 49-21).
- الكثير من البرمائيات تستخدم التَّنفس الجلدي لتبادُل الغازات.
- تمتلك الحشرات قصيبات تنقل الأكسجين مباشرة إلى الخلايا.

49-9 الرئتان

حلّت الرئتان بدلًا من الخياشيم في المخلوقات الحية التي تعيش على اليابسة بسبب الحاجة إلى تراكيب مدعومة، وبسبب تبخر الماء بسرعة.

- تُمرر الرئتان الهواءَ عبر ممرات متشعبة أنبوبية لتقلِّل من تبخر الماء (الشكل 49-25).
- تحدث تهوية الرِّئتين بطريقة الضّغط الموجب والضغط السالب (الشكل 49-28).
- مساحة سطح الرِّئتين كبيرة بسبب وجود أعداد كبيرة من الحويصلات الهوائية، مُحاطة بشبكة كثيفة من الشُّعيرات الدّمويّة (الشكل 49-25).
- يُعَدُّ الجهازُ التّنفسيّ في الطُّيور فعالًا جدًا (الشكل 49-26).

49-10 تراكيب التَّهوية وآلياتها

يعتمد تبادل الغازات على فرق الضغط وتهوية الرئتين.

- يدفع فرق الضّغط الجزئي للغازات عملية التَّبادل للغازات (الشكل 49-27).
- انقباضُ عضلات الحجاب الحاجز وعضلات بين الأضلاع الخارجية، الذي يحدث ضغطًا سالبًا هو السببُ في تهئة الرئتين (الشكل 49-28).
- تهوية الرِّئة تحت تحكُّم الجهاز العصبي (الشكل 49-29).

49-11 نقل الغازات في سوائل الجسم

تعتمد كمية الأكسجين في الدَّم على الضّغط الجزئي للأكسجين. إنَّ قلة ذائبية الأكسجين في الدَّم تحتاج إلى وجود نواقل للأكسجين.

- يزيد الهيموجلوبين قدرة الدَّم على نقل الأكسجين، ويزوِّد الجسم باحتياطي من الأكسجين (الشكل 49-32).
- كلما قلت درجة الحموضة والقاعدية، وزادت درجة الحرارة، قلّ عشق الهيموجلوبين للأكسجين (الشكل 49-33).
- ينتقل ثاني أكسيد الكربون بشكل رئيس على هيئة أيونات البيكربونات (الشكل 49-34).

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. أنت تمتلك مجموعة من الصبغات التي يمكن أن تُضاف إلى الدَّم، وتمتلك أيضًا جهازًا لقياس هذه الصبغات في الجسم. إذا تمَّ حقن صبغة حمراء إلى الدَّورة الجهازيـــة وصبغة صفراء إلى الدَّورة الرِّئوية، في أي من المخلوقات الآتية يمكن أن تختلط هذه الصبغات لتُشكِّل لونًا برتقاليًّا؟
   أ. الطُّيور. ب. الثَّدييات.
   جـ. البرمائيات. د. التَّماسيح.
2. من ميزات الجهاز الدّوريّ المُغلق كلٌّ مما يأتي ما عدا:
   أ. فصل السائل الدّوريّ (الدم) عن السائل خارج الخلوي.
   ب. نقل الأكسجين.
   جـ. توصيل فعّال إلى مناطق خاصة من الجسم.
   د. زيادة حجم الجسم وتعقيده.
3. يقيس ECG (تخطيط القلب الكهربائي):
   أ. التَّغيُّرات في فرق الجهد الكهربائي خلال الدّورة القلبية.
   ب. تركيز الكالسيوم في البُطينين في حالة الاسترخاء.
   جـ. قوة انقباض الأذينين خلال مرحلة الانقباض.
   د. كمية الدَّم التي تُضخ خلال دورة الانقباض.
4. الانقباض مهم وحيوي لعمل القلب، ويبدأ في القلب نتيجة:
   أ. تنشيط العقدة الأذينية – البطينية.
   ب. تنشيط العُقدة الجيبية الأذينية (SA).
   جـ. فتح قنوات البوتاسيوم الحسّاسة للتغيُّر في فرق الجهد.
   د. فتح الصمامات نصف القمرية.
5. التَّسلسل الصحيح للأحداث في الدَّورة الدّمويّة هو:
   أ. القلب، الشرايين، الشُّرينات، الشُّعيرات الدّمويّة، الوريـدات اللِّيمف، القلب.
   ب. القلب، الشرايين، الشُّرينات، الشُّعيرات الدّمويّة، الأوردة الوريدات، القلب.
   جـ. القلب، الشرايين، الشُّرينات، الشُّعيرات الدّمويّة، الوريدات الأوردة، القلب.
   د. القلب، الشُّرينات، الشرايين، الشُّعيرات الدّمويّة، الوريـدات الأوردة، القلب.
6. إحدى هذه الجمل غير صحيحة:
   أ. تحمل الشرايين الدم المؤكسد فقط.
   ب. تمتلك الشرايين والأوردة طبقة من العضلات الملساء.
   جـ. الشرايين والأوردة تتفرع إلى شبكة شعيرات دموية.
   د. العاصرات قبل الشعيرات الدّمويّة تُنظم تدفق الدَّم خلال الشُّعيرات الدّمويّة.
7. يشبه الجهاز الليمفاوي الجهاز الدّوريّ من حيث إنَّ الاثنين:
   أ. لهما عقد تعمل على ترشيح مسببات المرض.
   ب. لهما شبكة من الشرايين.
   جـ. لهما شعيرات دموية.
   د. نظامان مغلقان.
8. واحد من التَّراكيب الآتية لا يمر فيه جزيء من ثاني أكسيد الكربون المتولد في العضلة القلبية للبطين الأيسر قبل خروجه من الجسم:
   أ. الأذين الأيمن. ب. البطين الأيمن.
   جـ. الأذين الأيسر. د. البطين الأيسر.
9. في قلب الفقريات، ينقبض الأذينان من الأعلى، وينقبض البُطينان من الأسفل (القاع). كيف يتم ذلك؟
   أ. تنتشر إزالة الاستقطاب من العقدة الجيبية الأذينية عبر الأذينين من الأعلى، أما في العقدة الأذينية–البطينية، فإنّ إزالة الاستقطاب تنتشر منها إلى قاع البطينين قبل أن تنتشر عبر النسيج البطيني.
   ب. تبدأ إزالة الاستقطاب من العقدة الجيبية الأذينية عن طريق أعصاب حركية هابطة من الدماغ، أما إزالة الاستقطاب في العقدة الأذينية – البطينية فتبدأ من أعصاب حركية صاعدة من النُّخاع الشوكي.
   جـ. تحمل الجاذبية إزالة الاستقطاب من العقدة الجيبية الأذينية إلى الأسفل من القلب، في حين يقوم انقباض الحجاب الحاجز بإجبار إزالة الاستقطاب على الحركة من العقدة الأذينية البطينية من قاع القلب إلى الأعلى.
   د. هذه المقولة غير صحيحة؛ فكلاهما ينقبضان من القاع.
10. عند أخذ نفس عميق، تندفع المعدة إلى الأمام بسبب:
   أ. ابتلاع الهواء يزيد من حجم التجويف الصدري.
   ب. يجب على المعدة عدم التحرك إلى الأمام عند أخذ نَفَسٍ عميق، وذلك لزيادة حجم التجويف الصدري، وليس البطني.
   جـ. انقباض عضلات البطن يدفع المعدة إلى الأمام، مولدًا ضغطًا سالبًا في الرئتين.
   د. عندما تنقبض عضلات الحجاب الحاجز، فإنها تتحرك إلى الأسفل دافعةً التَّجويف البطني إلى الأمام.
11. إذا امتنعت عن التَّنفس مدة طويلة من الزَّمن، فإنَّ مستوى ثاني أكسيد الكربون في الجسم _____، ودرجة حموضة سوائل الجسم _____.
   أ. تزيد، تزيد. ب. تقل، تزيد.
   جـ. تزيد، تقل. د. تقل، تقل.
12. الازدواج بين التَّركيب والوظيفة غير الصحيح هو:
   أ. خلايا الدم الحمراء: نقل الأكسجين.
   ب. الصفائح الدّمويّة: تخثر الدَّم.
   جـ. بلازما الدَّم: نقل الفضلات.
   د. كلّ ما سبق صحيح.
13. إن الزيادة في فعالية تبادل الغازات في الفقريات سببها وجود الآليات الآتية ما عدا:
   أ. التَّنفس الجلدي.
   ب. تدفُّق الهواء في اتجاه واحد.
   جـ. تدفق التيار العرضي.
   د. وجود الحلقات الغضروفية في القصبة الهوائية.
14. الطريقة الرّئيسة التي يُنقل بها ثاني أكسيد الكربون إلى الرئتين هي:
   أ. الذوبان في بلازما الدّم.
   ب. الارتباط بالهيموجلوبين.
   جـ. الانتقال على شكل أول أكسيد الكربون.
   د. الانتقال على شكل بيكربونات.

أسئلة تحـدٍّ

1. لدى الإنسان عدد من الآليات التي تساعده في المُحافظة على ضغط الدَّم، وخاصة عندما ينخفض بشكل كبير. وضِّح كيف تعمل الكلية وجهاز الغدد الصماء في المحافظة على ضغط الدم.
2. وضِّح لماذا يستطيع الطائر الدّوريّ الطيران فوق قمم الجبال على ارتفاع أكثر من 6.000 م، لكن فأرًا بالحجم نفسه يموت من نقص الأكسجين على هذا الارتفاع.
3. عادت زميلتك توًّا من سباق 5 كم، وهي تتنفس بسرعة، وتتصبب عرقًا. في بداية السباق استهلك جسمها الكثير من الجلوكوز، وأطلق الكثير من ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالجلوكوز وبثاني أكسيد الكربون، عندما كانت في حالة راحة. كيف يتعامل الجسم مع هذه الزِّيادة في ثاني أكسيد الكربون خلال التَّمرين؟

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.