الفصل 47

الجهاز العضلي الهيكلي

The Musculoskeletal System

مقدّمة

إن القدرةَ على الحركة جزءٌ كبير من حياتنا اليومية، التي علينا تقبّلها بشكل بدهي. تكون الحركة ممكنة بتعاون الجهاز الهيكلي شبه الصلب، والمفاصل التي تعدّ مراكز للحركة، والجهاز العضلي الذي يسحب هذه العظام. تحدث الحركة الموضعية في الحيوانات بسبب قوة عضلية تنتج تغيرًا في شكل الجسم، ما يسلط قوة على المحيط الخارجي. فعند بداية الركض، تتحرك قوائم حصان السباق إلى الأمام وإلى الخلف، وعندما تلامس قوائمه الأرض تنتج قوة تدفع الجسم إلى الأمام بسرعة معقولة، وبالطريقة نفسها، يقلع الطائر في أثناء الطيران عندما تسلط أجنحته قوة على الهواء، والسمكة السابحة تدفع ضد الماء. في هذا الفصل، سنلقي نظرة على العضلات والجهاز الهيكلي، اللذين يسمحان للحيوانات بالحركة.

موجز المفاهيم

47-1 أنواع الأجهزة الهيكلية

- *يستخدم الهيكل الهيدروستاتيكي ضغط الماء داخل جدار الجسم.*
- *يتكون الهيكل الخارجي من غطاء خارجي صلب.*
- *يتكون الهيكل الداخلي من أعضاء داخلية صلبة.*

47-2 نظرة فاحصة على العظم

- *تقسم العظام إلى مجموعتين بحسب طريقة تكوينها الجنيني.*
- *يحتوي العظم على أوعية دموية وأعصاب.*
- *إمكانية إعادة بناء العظام تسمح لها بالاستجابة للاستعمال أو للإهمال.*

47-3 حركة المفاصل والعظام

- *تختلف المفاصل المتحركة في مدى الحركة بحسب نوعها.*
- *العضلات المخططة تسحب العظام لإحداث حركة المفصل.*

47-4 انقباض العضلات

- *تنقبض العضلة عند انزلاق الخيوط المتداخلة معًا.*
- *الانقباض يعتمد على إطلاق أيونات الكالسيوم تبعًا للإشارة العصبية (الإثارة).*
- *النوعان الرئيسان من الألياف العضلية: الومضة السريعة والومضة البطيئة.*
- *يتغير أيض العضلات تبعًا لنوع المجهود المطلوب منها.*
- *التدريب الحركي يزيد من السعة الهوائية والقوة العضلية.*

47-5 أنماط حركات الحيوان

- *الحيوانات المائية تظهر عددًا من التكيفات الحركية.*
- *الحركة على اليابسة عليها التعامل أولًا مع الجاذبية.*
- *تستخدم الحيوانات الطائرة الهواء للدعم.*

تسحب العضلات ضد شيء معين لإحداث تغير ينتج الحركة. يحتاج هذا بالضرورة إلى شكل من أشكال الدعم يقوم به الجهاز الهيكلي. يميز علماء الحيوان ثلاثة أنواع من الجهاز الهيكلي لدى الحيوانات، هي: الهيكل الهيدروستاتيكي، والهيكل الخارجي، والهيكل الداخلي.

يستخدم الهيكل الهيدروستاتيكي ضغط الماء داخل جدار الجسم

يوجد الهيكل الهيدروستاتيكي بشكل أساسي في أجسام اللافقريات الأرضية الرخوة كدودة الأرض، والبزاق، واللافقريات المائية الرخوة؛ كقنديل البحر، والحبار، والإخطبوط، وغيرها.

عمل الجهاز العضلي الهيكلي في دودة الأرض

يوجد في هذه الحيوانات تجويف مركزي مليء بالسائل، ومحاط بمجموعتين من العضلات في جدار الجسم: العضلات الدائرية الموجودة بشكل قطع متكررة على طول الجسم، والعضلات الطولية التي تعاكس في عملها تأثير العضلات الدائرية.

تعمل العضلات على السائل الموجود في التجويف المركزي الذي يمثل الهيكل الهيدروستاتيكي. عند بدء الحركة الموضعية (الشكل 47-1) تنقبض العضلات الدائرية الأمامية ضاغطة بذلك على السائل الداخلي، فتنتج بذلك قوة تجعل مقدمة الجسم رفيعة. وبذلك، فإن جدار الجسم يمتد إلى الأمام.

توجد في أسفل جسم الدودة تراكيب شوكية دقيقة، تدعى الأهلاب أو الأشواك **Chaetae**. فعندما تعمل العضلات الدائرية، تسحب الأشواك في تلك المنطقة في اتجاه الجسم، فتفقد الأشواك الاتصال بالأرض. وهذا يؤدي إلى انتشار نشاط العضلات الدائرية إلى الخلف قطعة قطعة، لتشكل موجه انقباض تتجه إلى الخلف.

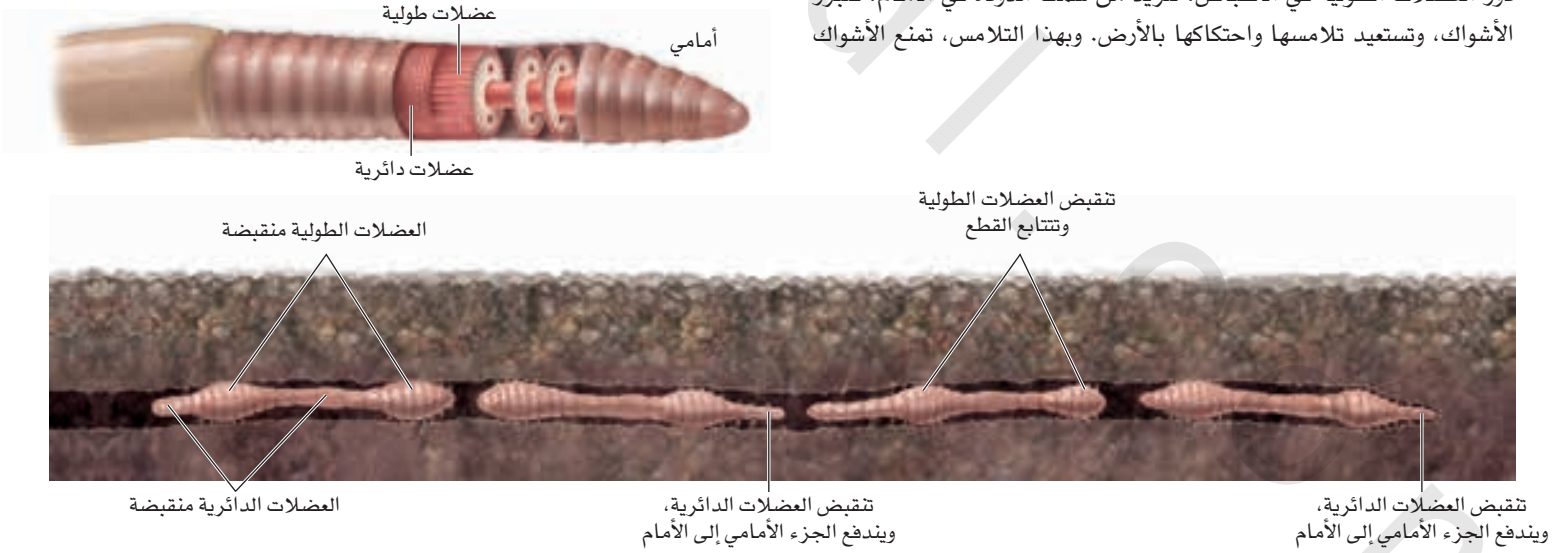
وعندما تستمر موجة الحركة تلك، ترتخي العضلات الدائرية في الأمام، ليبدأ دور العضلات الطولية في الانقباض، لتزيد من سمك الدودة في الأمام، فتبرز الأشواك، وتستعيد تلامسها واحتكاكها بالأرض. وبهذا التلامس، تمنع الأشواك ذلك الجزء من الدودة من الانزلاق إلى الخلف. وتستمر هذه الحركة الموضعية الناجمة عن أمواج من الانقباض للعضلات الدائرية، يتبعها انقباض العضلات الطولية، فتتحرك الدودة إلى الأمام.

عمل الجهاز العضلي الهيكلي في اللافقريات المائية

تستخدم بعض الحيوانات البحرية طريقة للحركة معتمدة على السائل، هذه لا تنطبق بشكل مثالي مع تعريف الحركة الموضعية باستخدام الهيكل الهيدروستاتيكي. وهنا يتم إطلاق (قذف) السائل الذي تم أخذه من المحيط، بطريقة يسميها بعضهم القذف أو النفث jetting. ومثال ذلك الحركة في قنديل البحر الذي يحتوي على جزأين: جرس فيه ألياف منقبضة، **وكتلة هلامية mesoglea** تملأ معظم تجويف جسم الحيوان (الشكل 47-2 أ). تُنتج الألياف المنقبضة نبضات منتظمة تؤدي إلى عصر الجرس. وتؤدي كل عملية انقباض إلى إخراج كمية من الماء الموجود داخل الجرس.

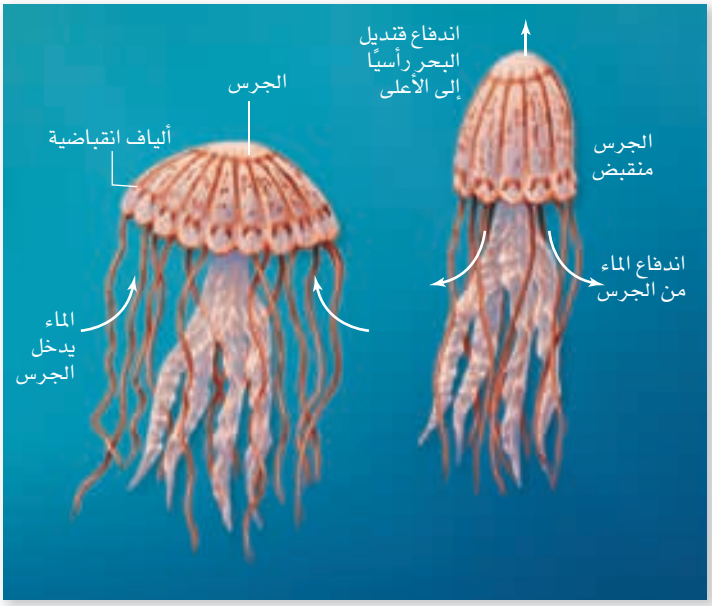
إن عملية نفث الماء ليست قوية، ولكنها كافية لإبقاء قنديل البحر طافيًا على سطح الماء بشكل أفقي متوازن، معتمدًا على درجة انحناء الجرس. إضافة إلى ذلك، فإن عملية الانقباض تضغط الطبقة الوسطى التي تعود لوضعها بسبب مرونتها، ما يعيد الجرس لشكله المفتوح بالكامل.

إن الحركة اللطيفة لقنديل البحر لا تُعدّ شيئًا مقارنة بحركة الحبار. يستخدم الحبار الحركة التموجية لزعانفه لأغراض السباحة. وكذلك يستخدم طريقة السباحة النفاثة القوية، كما في حالة قنديل البحر، ولكن باستخدام ماء البحر بدلًا من السائل داخل جسمه. يوجد في داخل عباءة الحبار تجويف مركزي كبير، يمكن ملؤه بالماء (الشكل 47-2 ب). ولا يدخل الماء إلى تجويف الجسم من خلال السيفون، ولكن من خلال فتحة صغيرة جانبية واقعة بين الرأس والعباءة.



الشكل 47-1

الحركة عند دودة الأرض. يُستخدم الهيكل الهيدروستاتيكي في دودة الأرض لتحريك السائل الموجود في تجويف الجسم المقسم إلى حلقات، ويؤدي هذا إلى تغيير شكل الحيوان. عندما تنقبض العضلات الدائرية في جدار جسم الدودة، يرتفع الضغط على السائل داخل تجويف الجسم. في الوقت نفسه، ترتخي العضلات الطولية، ويصبح الجسم مستطيلًا ورفيعًا. عندما تنقبض العضلات الطولية، ترتخي العضلات الدائرية، وتمتد الأشواك على السطح البطني للدودة لتثبت الجسم، وتمنع الانزلاق إلى الخلف. إن تتابع موجة انقباض العضلات الدائرية، ثم انقباض العضلات الطولية على طول الجسم، يؤدي إلى حركة الدودة إلى الأمام.



أ.

ب.

الشكل 47-2

السابحات النفاثة: قنديل البحر والحبار. أ. يسبح قنديل البحر من خلال انقباضات الجرس الذي يدفع الماء خارجًا إلى أسفل. ب. يستطيع الحبار ملء تجويف العباءة بماء البحر، ثم يدفعه بقوة إلى الخارج خلال السيفون، ليندفع الحيوان إلى الخلف.

تقوم العضلات التي تمر خلال العباءة بتقليل سمكها، ويؤدي ذلك إلى تمدد التجويف الداخلي. ويدخل الماء نتيجة لذلك، ولكنه يمنع من النفاذ إلى الخارج عن طريق الصمام الموجود في فتحة دخول الماء. بعد ذلك، تنقبض العضلات الدائرية في العباءة، فتدفع الماء بقوة إلى الخارج من خلال السيفون، ويندفع الحيوان بقوة إلى الخلف. تُعدّ الحركة النفاثة السريعة طريقة للهرب السريع، ويساعد على ذلك الانقباض السريع للعضلات الدائرية، ما يسمح للحبّار بالانطلاق بسرعة تعادل سرعة أسرع الأسماك البحرية.

يتكون الهيكل الخارجي من غطاء خارجي صلب

يحيط الهيكل الخارجي بالجسم كعلبة صلبة قاسية. تمتلك الحيوانات المفصلية كالقشريات والحشرات هيكلًا خارجيًّا مكونًا من مركب عديد التسكر يدعى الكايتين *chitin* (الشكل 47-3 أ). وكما تعلمت في فصول سابقة، فإن الكايتين موجود في جدر الخلايا عند الفطريات والأوليات، إضافة إلى الهيكل الخارجي عند الحيوانات المفصلية.

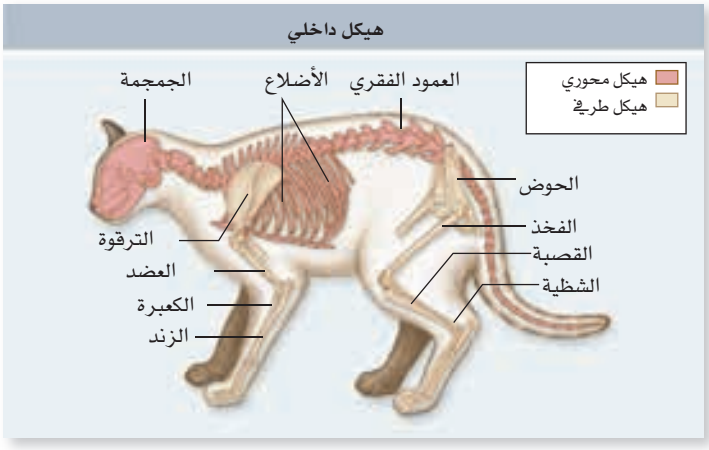
يقاوم الكايتين عملية الانثناء، ويعمل من ثم كقالب هيكلي للجسم، إضافة إلى وظيفته في حماية الأعضاء الداخلية، والتصاق العضلات الموجودة داخل صفائح الهيكل الخارجي به. وحتى يتمكن الحيوان من النمو، لا بد له من طرح الهيكل الخارجي دوريًّا (انظر فصل الـ 34). ويصبح الحيوان عرضة للافتراس، ريثما يتكون هيكله الخارجي من جديد (أكبر عادةً). وتختبئ السلطعونات وجراد البحر عادة في أثناء عملية طرح الهيكل الخارجي. وإذا لم تطفُ هذه الحيوانات عن طريق الماء، فإن الحيوانات الأكبر والأثقل تتكمش بسبب ثقلها خلال هذه العملية.

وللهيكل الخارجي سيئات أخرى: إن الهيكل الكايتيني ليس بقوة الهيكل العظمي الداخلي. وهذه الحقيقة أدت إلى تحديد حجم الحشرة، لكن هناك شكلًا أكثر أهمية من أشكال القصور. ويتمثل ذلك في الجهاز التنفسي للحشرة المكون من فتحات في جدار الجسم تقود إلى أنابيب صغيرة. وعندما يكبر حجم الحيوان أكثر من حد معين، ينعدم التناسق بين الحجم الداخلي لهذه الأنابيب وحجم الجسم، ويثقل هذا كاهل هذا النوع من الأجهزة التنفسية. وأخيرًا، وعندما تكون العضلات ملتصقة من الداخل بالهيكل الخارجي، فإنه لا يمكنها النمو في الحجم والقوة مع الاستخدام المتزايد، مقارنة بالعضلات المرتبطة بالهيكل الداخلي للحيوانات الأخرى.

يتكون الهيكل الداخلي من أعضاء داخلية صلبة

الهيكلُ الداخليُّ Endoskeleton الموجود في الفقريات وشوكيات الجلد صلبٌ، يمثل هيكلًا أو إطارًا للجسم، ويقدم سطوحًا لارتباط العضلات. يتكون الهيكل الداخلي لشوكيات الجلد مثل قنفذ البحر، ودولار الرمل، من هيكل مكون من مادة الكالسيت Calcite، وهي شكل من كربونات الكالسيوم المتبلورة.

أ.



ب.

الشكل 47-3

الجهاز الهيكلي الخارجي والداخلي. أ. تمتلك المفصليات غطاء خارجيًّا صلبًا وقويًّا، مكوّنًا من مادة الكايتين، ويمثل هيكلها الخارجي. ب. أما الفقريات كالقط، فعندها هيكل داخلي مكون من العظام والغضروف. بعض العظام الرئيسة معلمة بأسمائها.

ويختلف مركب الكالسيوم هذا عن ذلك الموجود في العظام الذي يعتمد على فوسفات الكالسيوم.

النسيج الهيكلي في الفقريات

يشتمل الهيكل الداخلي في الفقريات على نسيج ضام ليفي كثيف، إضافة إلى النسيج الضام الأكثر صلابة، أي الغضروف أو العظم (انظر الفصل الـ 43). الغضروف نسيج قوي به درجة من المرونة، وتظهر أهميته في وظيفته كحشوة لنهايات العظام، حيث تلتقي مع بعضها عند المفاصل. ومع أن هناك حيوانات كبيرة الحجم ونشيطة تمتلك هيكلًا غضروفيًّا بشكل كامل مثل قرش البحر، فإن العظم هو المكون الرئيس في الهيكل عند الفقريات؛ العظم أصلب من الغضروف، ولكنه أقل مرونة منه.

تركيب الهيكل عند الفقريات

يتكون الهيكل الداخلي للفقريات من شقين؛ محوري وطرفي (الشكل 47-3 ب). وكما يدل الاسم، فإن عظام الهيكل المحوري **Axial skeleton** تمثل محور الجسم ابتداءً من الجمجمة في مقدمة الجسم وانتهاءً بالذيل في المؤخرة. إضافة إلى الجمجمة، فإن الهيكل المحوري يشتمل على الفقرات والأضلاع وعظمة القص. وتدعم هذه العظام الجسم كهيكل رئيس، وتسمح بحركة الفكين وانحناء الجسم. كذلك تقدم حماية لأعضاء الجسم كالرأس، والرقبة، والجذع.

أما **الهيكل الطرفي Appendicular skeleton** فيشتمل على عظام الأطراف (في الأسماك عظام الزعانف) المرتبطة بالحزام الصدري (الأطراف الأمامية) والحزام الحوضي (الأطراف الخلفية). يرتبط الحزام الصدري عند الأسماك العظمية بالجمجمة. ويختفي هذا الاتصال بين الرأس والحزام الصدري عند الفقريات التي تعيش على اليابسة، حيث يلتحم الحزام الصدري بالأضلاع عن طريق عضلات ونسيج ضام ليفي. في بعض هذه الفقريات، يلاحظ أن الحزام الحوضي مرتبط بواحدة أو أكثر من الفقرات العجزية المختصة. وهذه الحالة غير موجودة عند الأسماك التي تفتقر إلى الفقرات العجزية في عمودها الفقري.

هناك ثلاثة أنواع من الهيكل الداخلي عند الحيوان، هي: الهيكل الهيدروستاتيكي، والهيكل الخارجي والهيكل الداخلي. يوجد الهيكل الهيدروستاتيكي عند الديدان واللافقريات البحرية. أما الهيكل الخارجي للحشرات فيتكوّن من الكايتين الذي يتم التخلص منه بشكل دوري عند نمو الحيوان. في حين يتكون الهيكل الداخلي في الفقريات من نسيج ضام ليفي كثيف، هو العظم أو الغضروف، وينتظم في شقين؛ محوري وطرفي.

2-47 نظرة فاحصة على العظم

العظم نسيج صلب ومرن تتميز به الحيوانات الفقرية. ظهر هذا النسيج الضام في البداية منذ أكثر من 520 مليون سنة خلت في مخلوقات شبيهة بالحنكليس، تدعى كونودونت Conodont (جذر السن). ومنذ ذلك الوقت، توجد العظام بأشكال متعددة في مجموعات حيوانية مختلفة، بما في ذلك الحنكليس الحقيقي، وهو تحت مجموعة نشأت بعد ذلك بملايين السنين.

تقسم العظام إلى مجموعتين بحسب طريقة تكوينها الجنيني

يمكن تقسيم العظام إلى مجموعات عدة، وبحسب طرق مختلفة. أكثر النظم استخدامًا هو الاعتماد على طريقة نمو العظم وتطوره الجنيني. هناك طريقتان أساسيتان، هما: التكوين داخل الغشائي *Intramembranous development*، وهي الطريقة الأبسط في النمو، والأخرى التكوين الغضروفي الداخلي *Endochondral development*، وهي الطريقة الأكثر تعقيدًا.

التكوين داخل الغشائي *Intramembranous development*

يتكون العظم هنا في طبقات داخل النسيج الضام، وتتكون عظام كثيرة بهذه الطريقة خاصة الجزء الخارجي من الجمجمة.

يبدأ تكوين العظام ونموها بالتكوين داخل الغشائي بشكل نموذجي في أدمة الجلد. وخلال تكون الجنين، تتكون الأدمة بشكل أساسي من **النسيج الميزنكيمي Mesenchyme** الذي يملأ فراغ الجسم، وهو نسيج ضام مفكك مكون من خلايا ميزنكيمية غير متمايزة، ومن غيرها من الخلايا المنبثقة عنها، إضافة إلى ألياف الكولاجين. بعض هذه الخلايا غير المتمايزة تكمل نموها لتصبح خلايا متخصصة تسمى **خلايا بانية العظم Osteoblasts** (الشكل 47-4). تصطف هذه الخلايا على طول خيوط الكولاجين، وتفرز أنزيم محلل الفوسفات القلوي، الذي يسبب تكوين أملاح فوسفات الكالسيوم على شكل بلّورات تسمى **هيدروكسي أباتيت Hydroxyapatite**، وهذه البلّورات تعمل على تغطية خيوط الكولاجين.

وتعطي بلورات هيدروكسي أباتيت العظم صلابته، في حين تأتي المرونة من ألياف الكولاجين، فيصبح العظم صلبًا، ولكنه هش بدرجة خطيرة. يحتوي العظم النموذجي حجمين متساويين من الكولاجين وهيدروكسي أباتيت، ويشكل الأخير نحو 65% من وزن العظم.

وخلال تكوين خلايا بانية العظم لبلّورات العظم، يصبح بعض هذه الخلايا محاطًا بالكامل بحشوة العظم، فتتحول الخلايا عندها إلى **خلايا العظم Osteocytes**. وقد يحصل تحول كبير في شكلها ووظيفتها، فهي توجد في فراغ ضيق يسمى **المحفظة Lacuna**، ويتفرع من كل محفظة **قُنيَّات صغيرة Canaliculi**، تعطي المحفظة شكلًا نجميًّا، وتوفر إمكانية اتصال كل خلية عظم بالخلية المجاورة لها (الشكل 47-4). بهذه الطريقة، يشترك كثير من الخلايا في العظم في الاتصال بين الخلوي.

عندما ينمو العظم داخل الغشائي يتغير شكله. ويمكن تمثيل ذلك بما يحصل عند تصنيع وعاء من الصلصال الصغير. فإذا أردنا زيادة حجمه، فلا يكفي إضافة الصلصال إليه من الخارج، بل لا بد من إزالة جزء من الصلصال من الداخل أيضًا. فنمو العظم يحتاج أيضًا إلى إعادة البناء والتشكيل، حيث تتم إضافة نسيج من جهة، وإزالة نسيج آخر من جهة أخرى. وإزالة النسيج أو تحليله هي وظيفة **خلايا هادمة العظم Osteoclasts**، التي تكونت من خلال اندماج خلايا وحيدة (نوع من أنواع خلايا الدم البيضاء) لتتشكل خلايا كبيرة متعددة الأنوية، وظيفتها تحطيم نسيج العظم.

الشكل 47-4

يرجع أصل هذه الخلايا إلى الخلايا الميزنكيمية الجنينية غير المتمايزة، التي تعطي أنواعًا متعددة من الخلايا ذات الوظائف المختلفة. فخلايا بانية الألياف تنتج الكولاجين، والخلايا بانية الغضروف تنتج الغضروف، وتتحول إلى خلايا الغضروف، أما الخلايا بانية العظم فهي خلايا تكوِّن العظم. وعندما تصبح الخلايا بانية العظم محصورة داخل نسيج العظم، فإنها تتحول إلى خلايا العظم. وهي تظهر في مقطع من العظم داخل نظام هافيرس، وبين أجزائه. تقع خلايا العظم داخل فراغ ضيق يسمى المحفظة. تخرج من المحفظة قنيّات صغيرة ترتبط بالمحافظ الأخرى، وهي تحتوي أذرع خلايا العظم. الخلايا هادمة العظم لا يرجع أصلها إلى الخلايا الجنينية كباقي الخلايا في نسيج العظم، بل تنتج من اندماج الخلايا الوحيدة، التي هي نوع من خلايا الدم البيضاء.

obeikandi.com

التكوين الغضروفي الداخلي *Endochondral development*

تتكون بهذه الطريقة العظام التي تكوِّن الشكل العام للجسم، وتوجد في مناطق عميقة داخل الجسم، مقارنة بالنوع السابق (داخل الغشائي). ومثال ذلك: الفقرات، والأضلاع، وعظام الكتف، وعظام الحوض، والعظام الطويلة كعظام الأطراف، والعظام الداخلية للجمجمة. يبدأ هذا العظم بنمو غضروفي صغير، يأخذ شكلًا بدائيًّا لشكل العظمة التي سوف تتكوّن.

يأتي تكوين العظم هنا بإضافته إلى خارج النموذج الغضروفي، في أثناء إحلال العظم محل الغضاريف الداخلية. يُنتج العظم المضاف إلى الخارج في هذا النموذج في غمد ليفي يغلف الغضروف. يكون الغمد قويًّا، ويتكون من ألياف الكولاجين، ويحتوي أيضًا على خلايا ميزنكيمية غير متمايزة. تظهر خلايا بانية العظم، وتنتظم على طول الألياف في الجزء الأعمق من الصفيحة. وعندها يتكون العظم بين الصفيحة والغضروف. تشبه هذه العملية ما يحدث في الأدمة خلال تكوين العظم داخل الغشائي.

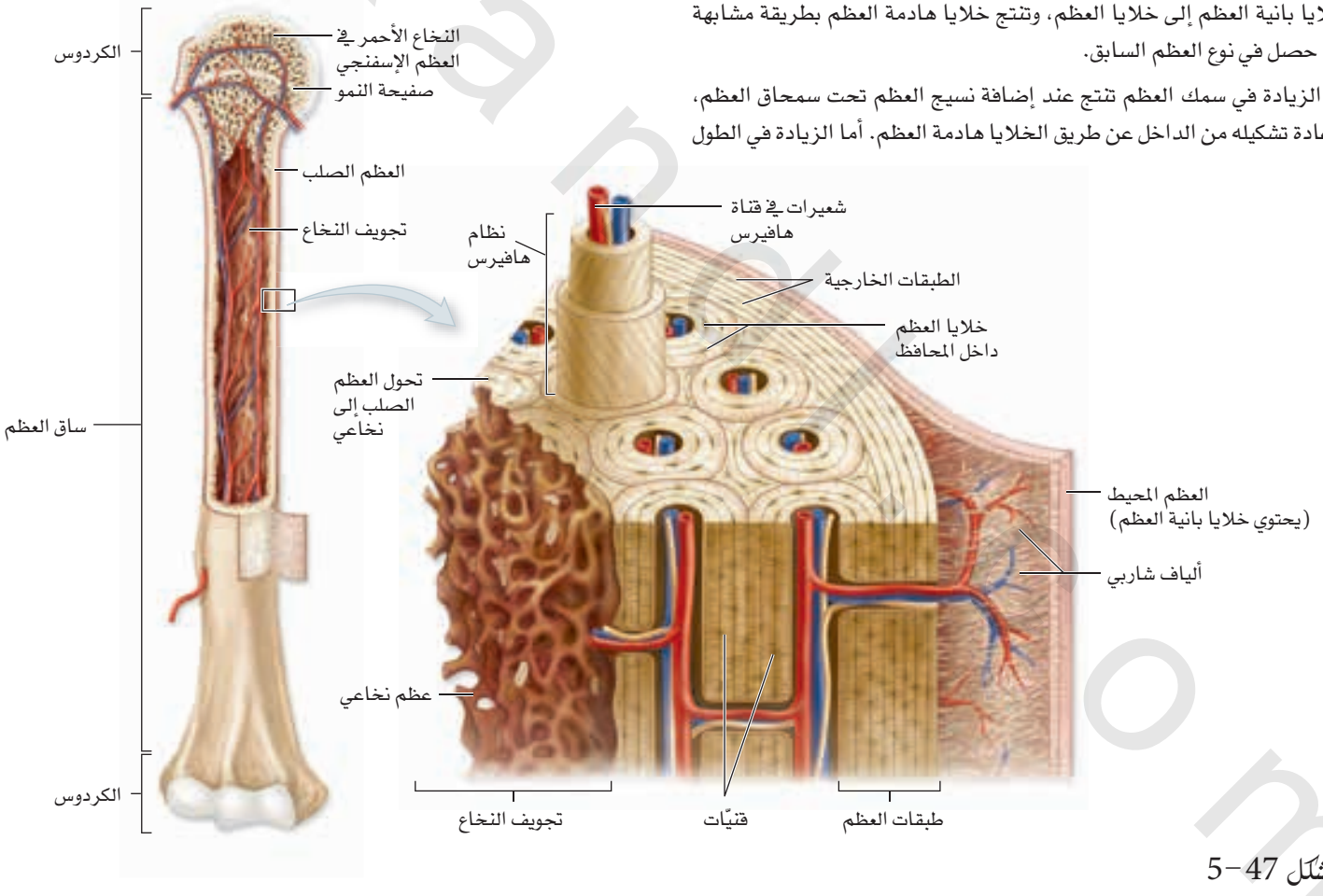
وبينما يتشكل العظم في الخارج، فإن الغضروف الداخلي يبدأ بالتكلس. ويبدو أن مصدر الكالسيوم هو خلايا الغضروف نفسها. وبحصول التكلس، فإن النسيج الغضروفي يتكسر إلى أجزاء صغيرة. وتبدأ الأوعية الدموية في الصفيحة الخارجية، التي أصبحت تسمى **سمحاق العظم Periosteum**، بشق طريقها بقوة من خلال الغلاف الخارجي للعظم المتكون، وتستقر داخل النموذج الغضروفي، لتساعد على التخلص من المواد المترسبة في الداخل. كذلك تتحول خلايا بانية العظم إلى خلايا العظم، وتنتج خلايا هادمة العظم بطريقة مشابهة لما حصل في نوع العظم السابق.

إن الزيادة في سمك العظم تنتج عند إضافة نسيج العظم تحت سمحاق العظم، وإعادة تشكيله من الداخل عن طريق الخلايا هادمة العظم. أما الزيادة في الطول هنا فهي أكثر تعقيدًا؛ خذ مثلًا زيادة طول عظمة الساعد في الثدييات، وهي من العظام الطويلة. تحتوي هذه العظمة على ساق **Shaft** رفيعة، ونهايات عريضة تسمى الكردوس **Epiphysis** (الشكل 47-5).

إن الغضروف المتبقي بعد استبدال العظم بالغضروف، يُعدّ ضروريًّا ليستكمل العظم نموه ووظيفته. فالغضروف المتبقي على سطوح الكردوس يشكل وسادة عند سطح نهايتي العظمة التي تلامس العظام الأخرى في المفصل.

تحتوي مناطق أخرى على غضاريف، تبقى ما دام العظم في مرحلة نمو فقط. وتمثل هذه صفيحة نمو الكردوس *Epiphyseal growth plate*، التي تفصل كردوس العظمة عن ساقها. ويمكن تلخيص ما يحدث في الصفيحة بما يأتي:

1. خلال نمو العظام الطويلة، يكبر الغضروف في منطقة صفيحة النمو بشكل طولي ليزيد من سمك الصفيحة.
2. هذا النمو يدفع الكردوس بعيدًا عن ساق العظمة، ما يزيد من طولها.
3. في الوقت نفسه، يحدث تكلس للغضاريف من جانب ساق العظم، وتحيط بذلك صفيحة النمو الغضروفي، وبذلك فإن عظم الساق يزداد في الحجم. وإذا كان نمو الغضروف في السمك أسرع من عملية التكلس، يبقى جزء من الغضروف دون تكلس، ويزيد العظم طولًا. بعد ذلك، يبطؤ نموّ الغضروف، وتغلب عليه عملية التكلس التي تعمّ أجزاء العظم كله.



الشكل 47-5

تركيب العظم. عظمة الساعد في الإنسان تم فتحها بشكل جزئي لرؤية التركيب الداخلي على اليسار. تم إزالة المقطع وتكبيره على اليمين للتمييز بين تركيب الجزء الخارجي الصلب للعظمة، والجزء الإسفنجي الداخلي للعظمة الواقع في مركزها، ويبطن تجويف اللب. يمكن رؤية تفاصيل الطبقات الأمامية إضافة إلى قناة هافيرس وخلايا العظم داخل المحافظ.

يتوقف نمو العظم عند الإنسان في مرحلة متأخرة من المراهقة. وينطبق هذا فقط على نمو العظمة الطولي، وليس النمو في السمك، فيمكن زيادة سمك الساق بإضافة عظم تحت نسيج السمحاق.

يحتوي العظم على أوعية دموية وأعصاب

تحتوي العظام في أثناء النمو على مصدر داخلي للدم في معظم الأحيان، وخاصة حالة التكوين الغضروفي الداخلي. لكن مصدر الدم هذا قد لا يبقى بعد اكتمال نمو العظمة. عند الثدييات، تحتفظ العظام التي تنمو بطريقة التكوين الغضروفي الداخلي بأوعية الدم الداخلية، وتسمى العظام في هذه الحالة **العظام الوعائية Vascular bones**. توجد العظام الوعائية أيضًا في كثير من الزواحف، والقليل من البرمائيات. تحتوي العظام الوعائية خلايا العظم وكثير منها وعائية، وتتميز بأنها تبقى نشيطة وفعالة (الشكل 47-5).

تتميز العظام في الأسماك والطيور بأنها **لاوعائية Avascular**، ولا تحتوي على خلايا عظم، وبذلك فهي عظام لاخلوية *Acellular bones*. هذه العظام اللاوعائية واللاخلوية خاملة وغير فعالة باستثناء منطقة السطح، حيث يوجد نسيج السمحاق والخلايا الميزنكيمية القادرة على إصلاح العظم وقت الحاجة بداخله.

الكثير من العظام، وخاصة ذات التكوين الغضروفي الداخلي الطويلة تحتوي تجويفًا مركزيًّا يسمى الفجوة النخاعية *Medullary cavity*. في كثير من الفقريات، تحتوي الفجوة النخاعية على نخاع العظم، وهو مركز تصنيع خلايا الدم الحمراء، وعندها تسمى **فجوة النخاع Marrow cavity**. لا تحتوي كل الفجوات النخاعية على نخاع العظم. فالطيور ذات العظام الخفيفة تحتوي فجوة داخلية كبيرة دون نخاع عظم، فهي تعتمد على الخلايا الجذعية الموجودة في أماكن أخرى من الجسم لإنتاج خلايا الدم الحمراء.

يختلف نسيج العظم المبطن للفجوة النخاعية عن العظام الملساء والصلبة الموجودة على السطح الخارجي. واعتمادًا على الكثافة والتركيب، تم تقسيم العظام إلى ثلاث مجموعات، هي: **العظام الصلبة** (المصمتة) **Compact bone**، **والعظام النخاعية Medullary bone** التي تبطن الفجوة الداخلية، **والعظام الإسفنجية Spongy bone** ذات التركيب الشبيه بخلايا العسل، وتشكل الجزء الأساسي من الكردوس محاطًا بغلاف من العظم الصلب.

العظام الصلبة والإسفنجية تسهمان في قوة العظم، أما العظام النخاعية فهي محاطة بنسيج رقيق يُسمى **السمحاق الداخلي Endosteum**، الذي لا يحتوي على الكولاجين، ولكن يمكن أن يحتوي على أجزاء أخرى مثل الخلايا الميزنكيمية.

تحتوي العظام الوعائية على تركيب داخلي منتظم يُسمى **نظام هافيرس Harversian system**. تحت الطبقة الخارجية الأساسية، تترتب عظام الغضروف الداخلي بشكل طبقات دائرية متحدة المركز، تُسمى طبقات هافيرس *Harversian lamellae*. تتمركز هذه الطبقات حول قنوات ضيقة تُسمى قنوات هافيرس *Harversian canals*، التي تجري موازية لطول العظمة. يمكن أن تحتوي قنوات هافيرس على ألياف عصبية، ولكنها تحتوي دومًا على أوعية دموية، تبقي على خلايا العظم حية على الرغم من أنها مدفونة داخل حشوة العظم.

تتكون هذه الأوعية الدموية من شرايين وأوردة صغيرة، وغالبًا شعيرات دموية، حيث ترتبط بأوعية أكبر تمتد داخليًّا من السمحاق الخارجي، والسمحاق الداخلي، وتسير في قنوات عمودية بالنسبة إلى قناة هافيرس.

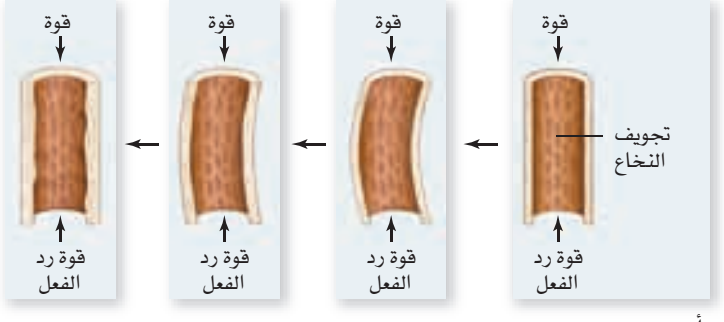
إمكانية إعادة بناء العظام تسمح لها بالاستجابة للاستعمال أو للإهمال

من السهل علينا، التفكير في أن العظام خاملة، خاصة ونحن لا نراها إلا وهي على هيئة هيكل عظمي لحيوان نافق. لكنها كأي جزء آخر من الجسم، كالعضلات والجلد، قابلة للتغير بحسب الضغوط البيئية، وإن العظم نسيج ديناميكي يستطيع التغير وَفق ما هو مطلوب منه.

فالتأثيرات الميكانيكية كالضغط على المفاصل، أو القوة الناتجة عن انقباض العضلات على أجزاء وخواص للعظم، وتأثيرات أخرى قد تشكل جميعها عوامل إعادة تشكيل ونمذجة، لا تغير شكل العظم فقط في أثناء التطور الجنيني، ولكن بعد الولادة أيضًا. واعتمادًا على اتجاه القوى المؤثرة في العظم ومقدارها، فإن سمك العظم قد يـزداد، وقد يتغير حجم خصائص السطوح التي ترتبط بها العضلات والأوتار والأربطة وشكلها كذلك. وقد تتغير التراكيب العظمية الصغيرة التي تشكل العظم الإسفنجي. إن النشاط الرياضي، أو استخدام العضلة المعدة للقيام بوظيفة معينة لا يؤثر في العضلة فقط، ولكنه أيضًا يزيد من كمية الأوعية الدموية والأنسجة الليفية الضامة، ويصبح الهيكل العظمي أغلظ وأصلب بزيادة سمك العظم وقوته.

إن ظاهـرة **إعـادة التشـكيل Remodeling** تحـدث في العظام جميعهـا، ولكنها تظهر بشكل أفضل في العظام الطويلة. إن القوى الصغيرة قد لا تؤثر في العظم، ولكن القوة الكبيرة المتكررة قد تسـهم في إعادة البناء (الشـكل 47-6). فالقوة الكبيرة قد تعمل على ثني العظم إلى درجة لا يمكن للعين مشاهدتها دائمًا. فهذه القوى تعمل على تحفيز تكوين العظم، وزيادة سمك العظم الصلب. ومع زيادة السمك، فإن مقدار انحناء العظم سوف يقل ليمنع الانحناء بشكل كامل، وهنا يتم إيقاف تكون العظم عند هذه النقطة. وهذا مثال آخر على التغذية الراجعة السلبية.

إن عملية إعادة بناء العظم ليست مفهومة بشكل كامل. ولكن يمكن تفسيرها من خلال تركيب بلّورات هيدروكسي أباتيت نفسها. وهناك أنواع كثيرة من البلّورات



الشكل 47-6

تظهر الصورة مقطعًا بيانيًّا من عظم طويل كعظمة الساق. هذا المقطع وقع تحت تأثير قوة أدت إلى قوة رد فعل من الأرض، حيث تقف الساق.

أ . تحت تأثير قوة ضغط ضعيفة، فإن العظمة لا تنثني.

ب. إذا زادت القوة، وكان العظم الصلب غير سميك بما فيه الكفاية، فإن العظم سوف ينثني (الانحناء في الصورة مبالغ فيه للتوضيح).

جـ. عند حدوث الضغط، فإن خلايا بانية العظم تحفَّز عند منطقة الثني لتقوم بإنتاج عظم إضافي. ومع إضافة عظم صلب جديد، يقلّ مقدار الانحناء.

د. عندما تضاف كمية كافية من العظم الصلب لمنع الانحناء، يتوقف إنتاج الخلايا بانية العظم، وتتوقف بذلك إضافة العظم الصلب.

يمكن أن تغير موقعها بسبب قوى خارجية، ويؤدي ذلك إلى فقدان شحنتها المحايدة، حيث تصبح مشحونة. تُسمى هذه الظاهرة **التأثير الكهربائي للضغط Piezoelectric effect**، حيث يمكن للمؤثر الميكانيكي التأثير في تركيب بلّورات الهيدروكسي أباتيت.

إن الشحنات الناتجة بالطريقة السابقة تعمل على تحفيز إنتاج خلايا بانية العظم، ومن ثم إنتاج عظم جديد في تلك المنطقة. وكما قلنا، فإننا لإعادة بناء العظم نحتاج إلى إزالته من مناطق أخرى، مستعينين بخلايا هادمة العظم، ولكن ما يحفزها غير معروف بصورة مؤكدة.

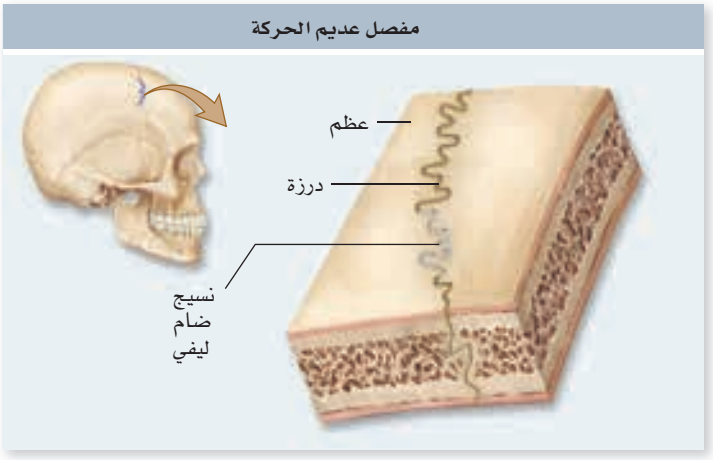
يمكن تقسيم العظم بحسب طريقة تكوينه الجنيني إلى عظم داخل غشائي، أو غضروفي داخلي. يتم إنتاج العظم عن طريق خلايا بانية العظم، التي ترتب نفسها في شرائط من الأنسجة الضامة، وتفرز بلّورات من فوسفات الكالسيوم تُسمى الهيدروكسي أباتيت. يتكون العظم المتخصص من تشكيلة من الكولاجين، وبلّورات هيدروكسي أباتيت. تحتوي الكثير من العظام دورة دموية داخلية، وخلايا حية ضمن مكوناتها. تتم عملية إعادة تشكيل للعظام استجابة لمؤثرات فيزيائية.

3-47 حركة المفاصل والعظام

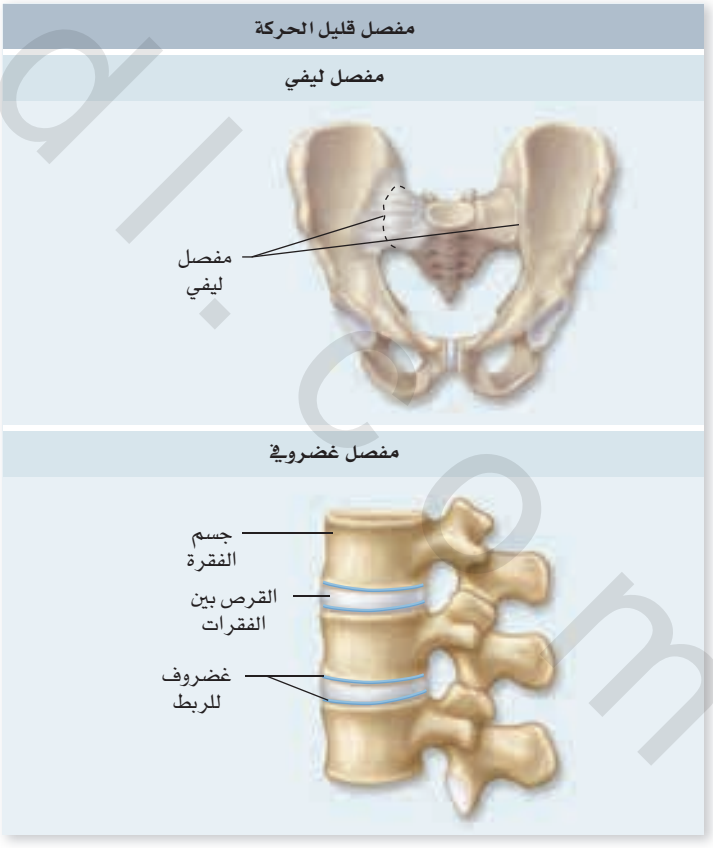
يتحرك الهيكل الداخلي بالقوة الناتجة عن الجهاز العضلي الهيكلي. ترتبط العضلات الهيكلية بالعظام بطرق عدة. فألياف العضلات ترتبط مباشرة بالسمحاق الخارجي في العظم أو النسيج الضام في العضلات الهيكلية لتشكل حبلًا ليفيًّا قويًّا يُسمى **الوتر Tendon** الذي يربط ألياف العضلة بسمحاق العظم. تحدث حركة الهيكل استجابة لانقباض العضلة عند **المفاصل Joints** أو أماكن الارتباط، حيث تلتقي عظمة بأخرى.

هناك ثلاثة أنواع رئيسة من المفاصل، هي:

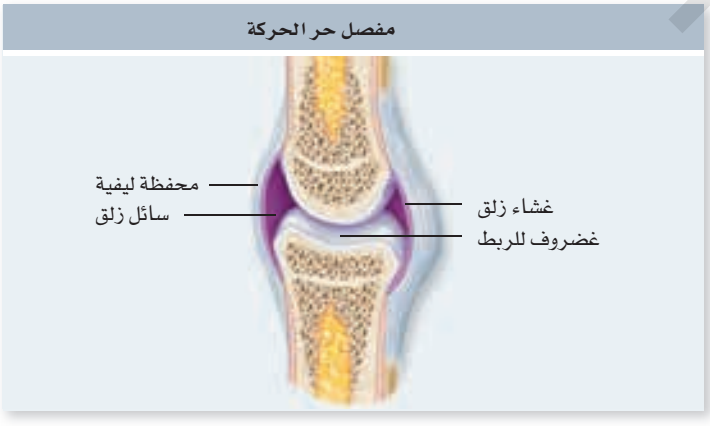
1. **المفاصل عديمة الحركة Immovable joints** التي تشمل الدرزات التي تربط عظام الجمجمة (الشكل 47-7 أ).
2. **المفاصل قليلة الحركة Slightly movable joints** التي تشمل نوعين اعتمادًا على المادة الرابطة بين العظمتين: الأولى تحتوي على نسيج



أ.



ب.



جـ.

الشكل 47-7

ثلاثة أنواع من المفاصل:

أ . الدرزات في الجمجمة مفاصل عديمة الحركة.

ب. مفاصل قليلة الحركة. وتشمل المفصل العجزي الحرقفي عند الثدييات، وهو مفصل ليفي (أعلى) والمفاصل الغضروفية بين الفقرات (أسفل).

جـ. المفاصل حرة الحركة، وهي المفاصل الزلقة كمفاصل الأصابع.

ضام ليفي كتلك التي في المفصل العجزي الحرقفي، حيث يلتقي الحوض بالعمود الفقري، والثانية تحتوي على غضاريف كما في الأقراص بين الفقرات في العمود الفقري، حيث تعمل كوسادة ملطفة للحركة (الشكل 47-7 ب).

3. **المفاصل حرة الحركة Free movable joints** وهي شائعة عند الفقريات، وتدعى المفاصل الزلقة *Synovial joints*؛ لأن العظام تلتقي مع بعضها عن طريق محفظة (غشاء) زلقة *Synovial capsule* مليئة بسائل زجاجي يساعد على الانزلاق. نهاية كل عظمة مغطاة بغضاريف، والجزء الخارجي للكبسولة الزلقة يتكون من ألياف سميكة قوية تُبقي العظام المتقابلة في موقعها. تتضمن المفاصل الزلقة مفاصل الأطراف، والفك، والأصابع (الشكل 47-7 جـ).

تختلف المفاصل المتحركة في مدى الحركة

بحسب نوعها

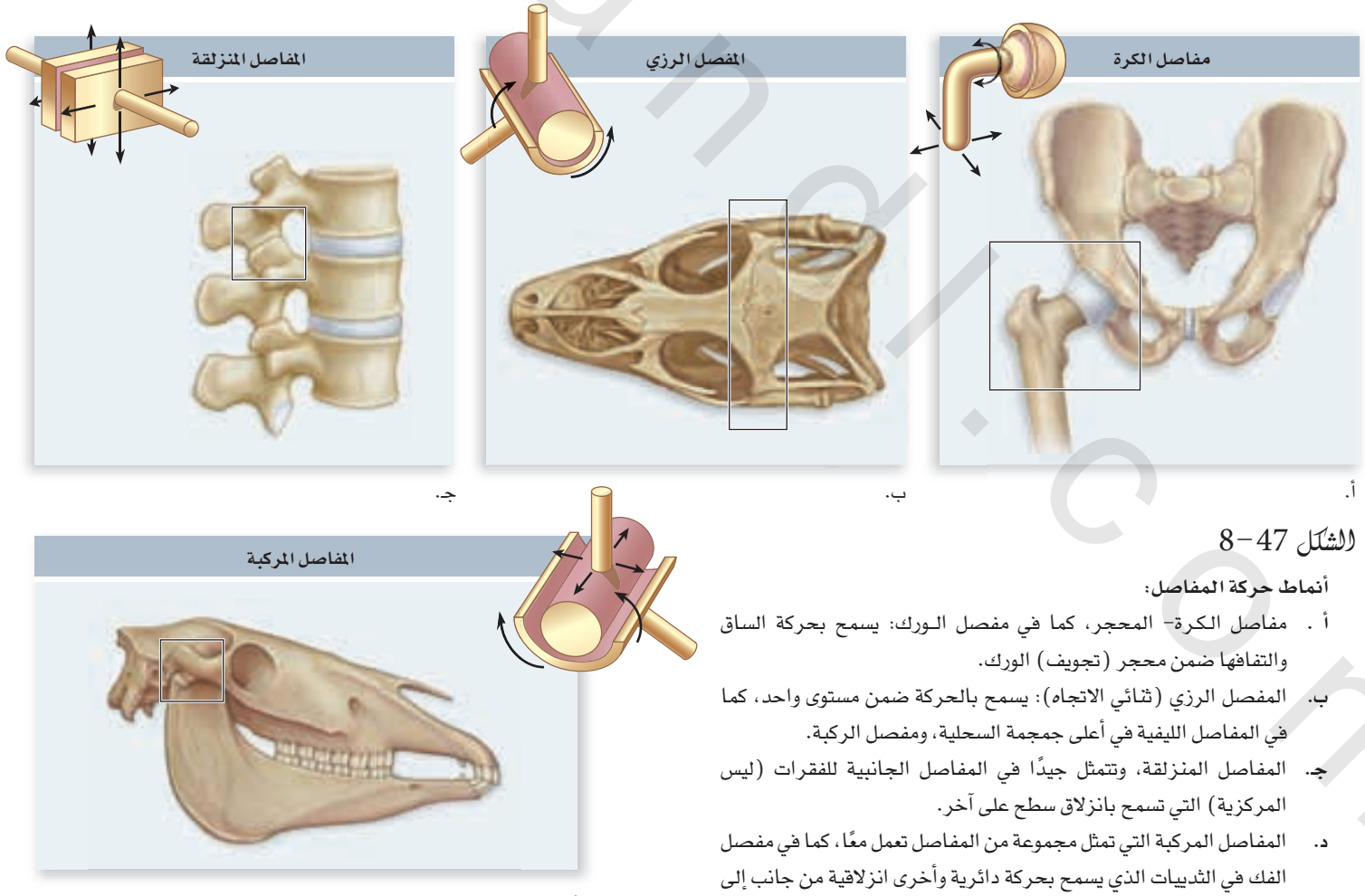
يحتوي كل مفصل في الهيكل على مدى مميز من الحركة، وأنماط الحركة الأربعة المعروفة، هي: الكرة والمحجر (الكرة والجيب)، والرَّزِّي (ثنائي الاتجاه)، والمنزلق، والمركب.

مفاصل الكرة–المحجر Ball-and-socket تشبه تلك الموجودة في مفصل الورك، حيث تشكل عظمة الساق العليا الكرة التي تلائم المحجر الموجود في عظمة الحوض. يشكل هذا المفصل حركة عامة في الاتجاهات جميعها إضافة إلى التفاف الكرة ودورانها (الشكل 47-8 أ).

أبسط أنواع المفاصل هي **المفاصل الرزية** (ثنائية الاتجاه) **Hinge** كمفصل الركبة، حيث تقتصر حركة عظم الساق السفلى على الدوران إلى الأمام أو الخلف، دونما حركة جانبية. والمفصل الليفي الذي يشبه الدرزات في أعلى جمجمة السحلية هو أيضًا مثال على هذه المفاصل (الشكل 47-8 ب).

المفاصل المنزلقة Gliding joints توجد في جمجمة بعض الفقريات اللاثديية، وأيضًا بين النتوءات الجانبية للفقرات في الثدييات (الشكل 47-8جـ). النتوءات الجانبية تكون على شكل أزواج، وتمتد من الأمام والخلف في كل فقرة. والنتوءات الأمامية تكون مائلة للأسفل قليلًا، وكل منها ينزلق على السطح الواقع تحتها للنتوءات الخلفية من الفقرة التي تليها. هذا المفصل الزلق والمنزلق يعطي ثباتًا للعمود الفقري، ويسمح في الوقت نفسه ببعض المرونة للحركة بين الفقرات.

المفاصل المركبة Combination Joint هي التي تمتلك صفات حركية موجودة في نوعين أو أكثر من المفاصل. وأفضل مثال على ذلك هو مفصل الفك في الثدييات، وهو مفصل زلق، ولكنه يختلف في نوع الحركة التي يسمح بها مقارنة مع باقي المفاصل الزلقة. فمفصل الفك في السحلية هو رَزِّي (ثنائي الاتجاه). أما الثدييات، فهي مختلفة؛ لأنها تقوم بطحن الطعام في الفم إلى أجزاء صغيرة، ثم تبتلعه خلافًا لباقي الفقريات التي تستطيع ابتلاع الضحية مرة واحدة، أو على شكل قطع كبيرة. ولكي تستطيع طحن الطعام وتقطيعه، فلا بد للفك السفلي من الحركة من جانب إلى آخر لحصول الاحتكاك والتلاقي بين الأسنان العلوية والسفلية بشكل جيد. ويمكن للفك السفلي أن ينزلق إلى الأمام والخلف لحد ما. في الوقت نفسه، يجب أن يمتلك مفصل الفك شكلًا قريبًا من شكل المفصل الرزي ليسمح للفم بالفتح والإغلاق. وعليه، فإن مفصل الفك مزيج لصفات المفصل الرزي وحركته، والمفصل المنزلق (الشكل 47-8 د).



أ. ب. جـ. د.

الشكل 47-8

أنماط حركة المفاصل:

أ. مفاصل الكرة- المحجر، كما في مفصل الورك: يسمح بحركة الساق والتفافها ضمن محجر (تجويف) الورك.

ب. المفصل الرزي (ثنائي الاتجاه): يسمح بالحركة ضمن مستوى واحد، كما في المفاصل الليفية في أعلى جمجمة السحلية، ومفصل الركبة.

جـ. المفاصل المنزلقة، وتتمثل جيدًا في المفاصل الجانبية للفقرات (ليس المركزية) التي تسمح بانزلاق سطح على آخر.

د. المفاصل المركبة التي تمثل مجموعة من المفاصل تعمل معًا، كما في مفصل الفك في الثدييات الذي يسمح بحركة دائرية وأخرى انزلاقية من جانب إلى آخر.

العضلات المخططة تسحب العظام لإحداث حركة المفصل

إن انقباض العضلات يؤدي إلى تحريك الهيكل العظمي. وبشكل عام، تتصل كل نهاية من نهايتي العضلة بعظمة مختلفة، أو بجزء آخر كالجلد. هناك طريقتان لارتباط العضلة: الأولى، ارتباط ألياف العضلة بالسمحاق الخارجي بشكل مباشر. والثانية، انتهاء العضلة بنسيج ضام كثيف على هيئة حبل يسمى الوتر الذي يرتبط بالسمحاق (الشكل 47-9 ب).

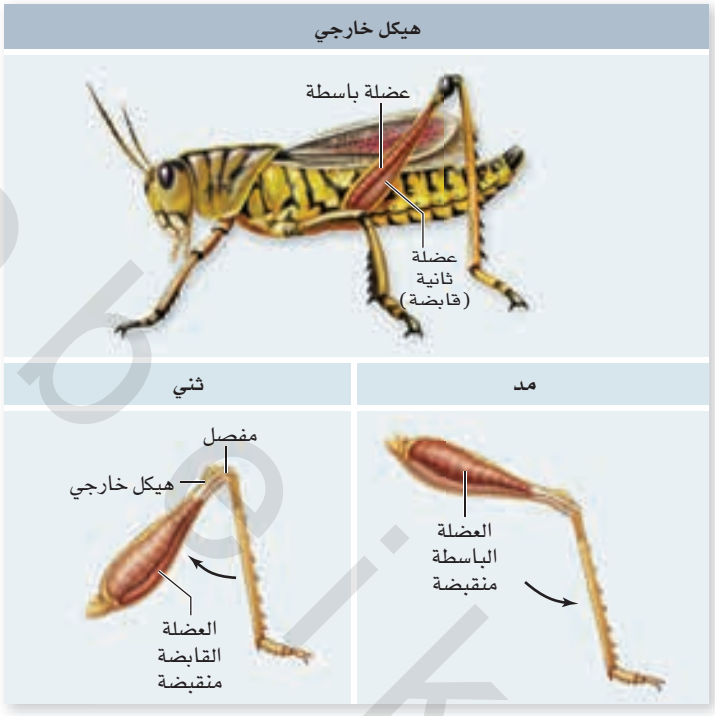
يطلق على مكان الارتباط الأول **للعضلة الأصل** (المثبِّت) **Origin** ويبقى في مكانه تقريبًا عند الحركة والانقباض. أما مكان ارتباط النهاية الأخرى للعضلة فيسمى **المُرتَكَز Insertion** ويرتبط بالعظمة التي تتحرك عند انقباض العضلة. فالعضلة ذات الرؤوس الأربعة في الساق تسبب حركة الساق السفلى إلى الأمام أو الخلف بالنسبة إلى الساق العلوية.

تترتب العضلات بشكل أساسي، بحيث إن أي حركة تنتجها عضلة معينة يمكن عكسها بعضلة أخرى. فالعضلات القابضة للساق (الشكل 47-9 ب) تحرك الساق السفلى إلى الخلف والأعلى، فيتم ثني الركبة. تسمى هذه المجموعة من العضلات **عضلات رائدة Agonist** وحركتها معاكسة لحركة العضلة ذات الرؤوس الأربعة التي يطلق عليها **العضلة المضادة Antagonist** والعكس صحيح، فيمكن تسمية العضلة ذات الرؤوس الأربعة بالرائدة. لذا، فإن العضلة القابضة للساق تكون المضادة. المهم هنا أن كل عضلتين أو مجموعتين من العضلات تعمل كعضلات متعاكسة، وعليه، فكل عضلة رائدة يقابلها عضلة مضادة.

عندما ترفع وزنًا معينًا بقبض العضلة ذات الرأسين في ذراعك، فإن القوة الناتجة عن العضلة هي أكبر من قوة الجاذبية على ذلك الوزن. في هذه الحالة يقلّ طول العضلة خلال عملية رفع الوزن. يسمى هذا النوع من الانقباض **انقباض متساوي التوتر** (تواتري) **Isotonic contraction** ؛ لأن القوة أو التوتر داخل العضلة تبقى ثابتة تقريبًا في أثناء عملية الانقباض.

أما إذا كان الوزن أكبر من أن تحمله العضلة، فإن العضلة تنقبض دون أن ينقص طولها؛ لأنها لا تستطيع رفع الوزن. ويدعى هذا الانقباض الانقباض **متساوي الطول (القياسي) Isometric contraction** لأن طول العضلة لا يتغير. هذا الانقباض ضروري للمحافظة على وضع الجسم وبقاء الأشياء في موقع ثابت. إن كلا النوعين من الانقباض التواتري والقياسي يحتاجان إلى طاقة. ومعظم حركاتنا تضمّ النوعين من الانقباض.

تمنح المفاصل الهيكل الصلب قدرة على الحركة، فتسمح بمجال معين من الحركة اعتمادًا على نوع المفصل. أنواع المفاصل هي: الكرة-المحجر، والرزية (ثنائية الاتجاه)، والزلقة، والمركبة. تتموضع العضلات عبر المفصل، ويعمل انقباضها على حركة الجسم. العضلات المتضادة لها أعمال متعاكسة.



الشكل 47-9

العضلات القابضة والباسطة في الساق. أ . العضلات المتضادة تتحكم في الحركة عند الحيوانات ذات الهيكل الخارجي، كعملية القفز عند الجندب. فعند انقباض عضلة الساق الصغرى (القصبة) تسحب الساق السفلى إلى أعلى. ومن ثم، فإن انقباض عضلة الساق الباسطة تقوم بجعل الساق مستقيمة بشكل كامل، وتدفع الحشرة من ثم في الهواء (إلى أعلى). **ب.** تعمل العضلات المتضادة بالمثل في الهيكل الداخلي. مثال ذلك عضلة باطن الركبة (المأبض) التي تتصل بالركبة من أسفل، وتتحكم في حركة الساق السفلية، تقوم بثني الساق إلى أسفل عند انقباضها. أما رباعية الرؤوس التي تتصل بالركبة من أعلى فتمدّ الساق السفلية إلى أعلى عند انقباضها.

4-47 انقباض العضلات:

يركز هذا الجزء على العضلات الهيكلية في الفقريات، فعضلات الفقريات تم دراستها وفهمها بشكل جيد في الحيوانات. تحتوي كل عضلة هيكلية على عدد من **الألياف العضلية Muscle fibers** كما هو موضح في (الفصل الـ 43). وتحتوي كل ليفة عضلية حزمة من **الليفيفات العضلية Myofibrils** يتراوح عددها بين 4-20 في كل ليفة عضلية. وتتكون كل لُيفية عضلية من **خيوط عضلية Myofilaments** رفيعة وغليظة (الشكل 10--47).

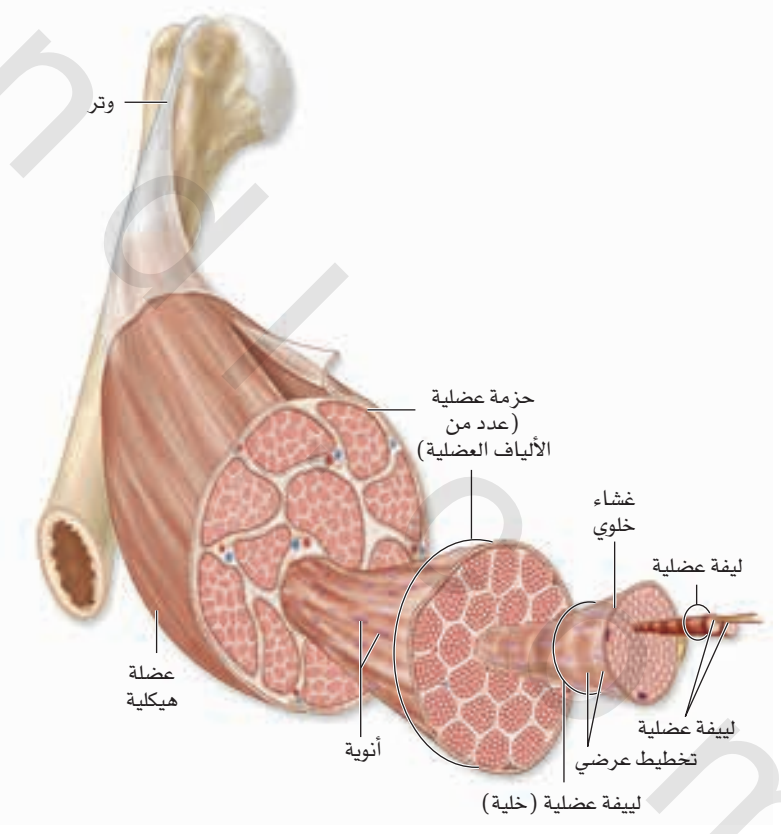
يمكن أن نرى تحت المجهر أن الليفات العضلية تحتوي على أشرطة Bands متكررة غامقة وفاتحة، وهذا يعطي المظهر المخطط للعضلات الهيكلية. تجتمع الخيوط العضلية الغليظة لتعطي الشريط الغامق، وتسمى شريط *A*، أما الخيوط الرفيعة فتوجد في الشريط الفاتح، أو شريط *I*.

يقسم كل شريط فاتح في الليف العضلي في المنتصف بقرص كثيف متعرج من البروتينات يسمى خط *Z (Z line)*، وقد سُمّي هكذا بسبب مظهره في المجهر الإلكتروني. ترتكز الخيوط الرفيعة إلى هذا القرص المتعرج. تظهر صورة المجهر الإلكتروني لليف العضلي (الشكل 47-11) تكرار التركيب من خط **Z** إلى آخر، هذا التركيب يُسمّى **قطعة عضلية Sarcomere** وهي أصغر وحدة وظيفية في العضلة.

تنقبض العضلة عند انزلاق الخيوط المتداخلة معًا

تبرز الخيوط الرفيعة، وتتداخل جزئيًّا مع الخيوط الغليظة في كل جانب من جانبي حزمة A، ولا تصل إلى منتصف العضلة المنبسطة (المرتخية). لذا، فإن منتصف حزمة A، يسمى حزمة *H (H Band)*، يكون أفتح من أطراف حزمة A لأن الأطراف تحتوي على الخيوط الرفيعة والغليظة، أما حزمة H فيحتوي خيوطًا غليظة فقط.

تنقبض العضلة، ويقصر طولها عندما ينقبض الليف العضلي ويقصر. وعند حدوث ذلك، فإن الخيوط العضلية لا تقصر، ولكن الخيوط الرفيعة والغليظة تنزلق بالنسبة إلى بعضها بعضًا (الشكل 47-1). تنزلق الخيوط الرفيعة بشكل أعمق في حزمة A وحتى في مرحلة نهائية تسبب قصر حزمة H حتى يختفي تمامًا. يعمل هذا على جعل حزمة I أضيق أيضًا، بسبب تقريب حزم A لبعضها. وهذه هي آلية الخيوط المنزلقة في انقباض العضلات.

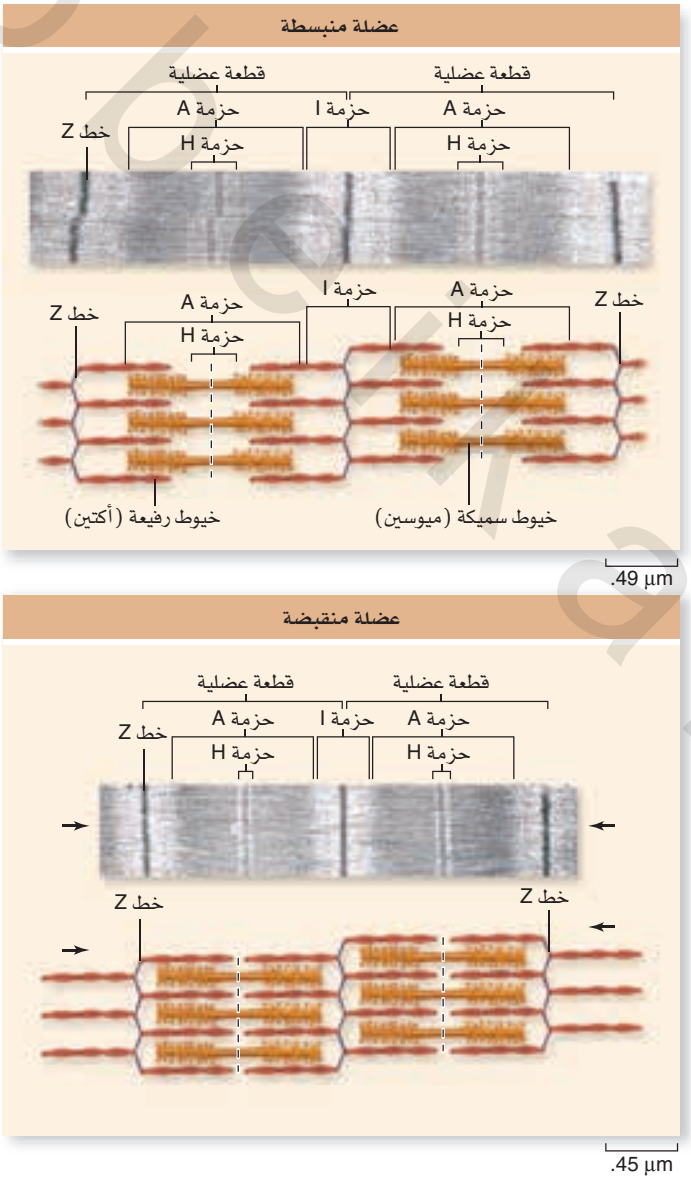


الشكل 47-10

تركيب العضلات الهيكلية في الفقاريات. تتكون كل عضلة من عدد من الحزم العضلية، وكل منها مكون من حزمة ألياف أو خلايا عضلية. وتحتوي كل خلية عددًا من الليفات التي يتكون كل منها من خيوط عضلية.

آلية الخيوط المنزلقة *The sliding filament hypothesis*

تظهر صور المجهر الإلكتروني **جسورًا عرضية Cross- bridges** تمتد من الخيوط الغليظة وحتى الرفيعة، ما يقترح آلية قد تسبب انزلاق الخيوط العضلية. إن فهم كيفية حدوث ذلك يؤكد أهمية دراسة الخيوط الغليظة والرفيعة على مستوى جزيئي. أظهرت الدراسات البيوكيمائية أن الخيوط الغليظة تتكون من جزيئات البروتين **ميوسين Myosin** المرتبطة مع بعضها. يتكون بروتين ميوسين من تحت



الشكل 47-11

تركيب القطعة العضلية في كلّ من العضلتين المنبسطة والمنقبضة. تظهر في الشكل قطعتان عضليتان، إضافة إلى الخيوط الرفيعة والسميكة. يمثل خط Z حدود القطعة العضلية، والحزمة A الخيوط السميكة. توجد الخيوط الرفيعة ضمن الحزمة I وتنتشر داخل الحزمة A متبادلة مع الخيوط السميكة. حزمة H هي الأفتح لونًا مقارنة بما حولها، وتتمركز في حزمة A وتحتوي فقط على الخيوط السميكة. العضلة العليا منبسطة (مرتخية). في العضلة السفلى المنقبضة، تتحرك خطوط Z لتقترب من بعضها، أما الحزمتان I و H فتصبحان أقصر. في حين أن حزمة A لا يتغير طولها؛ لأنها تحتوي الخيوط السميكة التي لا يتغير طولها.

أ.

ب.

الشكل 47-12

الخيوط السميكة تتكون من الميوسين.

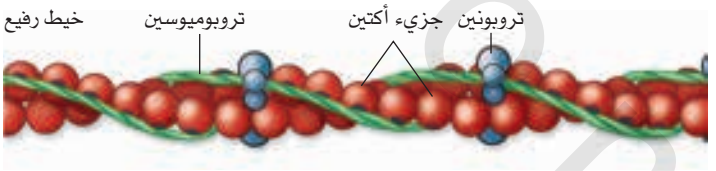
أ . يتكون كل جزيء ميوسين من سلسلتين من عديد البيتيد ملتفتين حول بعضهما. وفي نهاية كل سلسلة منطقة كروية تُسمّى الرأس.

ب. تتكون الخيوط السميكة من جزيئات ميوسين مندمجة معًا في حزم، وتبرز رؤوس الميوسين على مسافات منتظمة.

وحدتين تحتوي كل منهما رأسًا يمتد خارجًا من الخيط الرئيس الطويل الذي يلتف مع الآخر. يتكون الخيط الغليظ من نسخ من جزيئات الميوسين، بحيث إن الرؤوس تبرز في الحزمة الرئيسة على طول الخيط الغليظ (الشكل 47-12). ويشكل الرأس في بروتين الميوسين الجسر العرضي مع الخيوط الرفيعة، الذي يُرى تحت المجهر الإلكتروني.

يتكون كل خيط رفيع بشكل أساسي من كثير من **جزيئات البروتين Actin** الكروي مرتبة في خيطين ملتفين حول بعضهما بشكل لولبي مزدوج (الشكل 47-13). وإذا استطعنا رؤية القطعة العضلية على المستوى الجزيئي فسوف تكون كما تظهر في (الشكل 47-14).

يشكل الميوسين مثالًا على البروتينات المتحركة *Motor proteins* القادرة على تحويل الطاقة الكيميائية في جزيء ATP إلى طاقة حركية (انظر الفصل الـ 4). ويحدث هذا بتسلسل من الأحداث يُسمى **دورة الجسور العرضية Cross-bridge cycle** (الشكل 47-15). عندما تحطِّم رؤوس ميوسين ATP إلى



الشكل 47-13

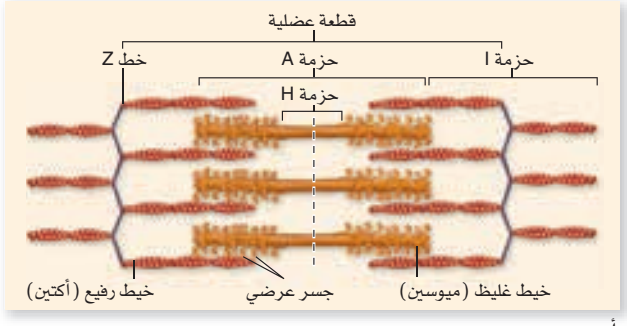
الخيوط الرفيعة تتكون من بروتين أكتين الكروي. يتشكل الخيط الرفيع من صفين من جزيئات أكتين ملتفين بشكل حلزوني. وترتبط بروتينات أخرى بخيط أكتين، وهذه هي تروبوميوسين وتروبونين التي تسهم في انقباض العضلة.

$ADP+P_i$ يتغيّر الشكل الفراغي لميوسين، ويصبح في الحالة النشطة استعدادًا لشوط القوة اللاحق. يبقى ADP و P_i مرتبطين برأس الميوسين، فيبقى هذا في الحالة النشطة. للمقارنة، يستخدم عادة مثال الزناد في المسدس لوصف هذه العملية. ففي وضع الاستعداد، ترتبط رؤوس ميوسين بأكتين مشكِّلة جسورًا عرضية. وعندما يرتبط رأس الميوسين بأكتين، ويشكلان جسرًا عرضيًّا يتحرر ADP وPi، ويحصل تغير في شكل الميوسين مرة أخرى، ما يدفع الخيوط الرفيعة في اتجاه منتصف القطعة العضلية، وهذا ما يطلق عليه شوط القوة *Power stroke* (الشكل 47-14 ب، 47-15). وفي نهاية مرحلة شوط القوة، يرتبط رأس الميوسين بجزيء ATP جديد، وهذا يفصله عن أكتين. وتستمر هذه الدورة مع استمرار حث العضلة على الانقباض. يمكن تمثيل هذه الأحداث بسحب حبل بصورة تتابعية؛ يدًا بعد الأخرى. فرؤوس ميوسين هي الأيدي وألياف أكتين هي الحبل.

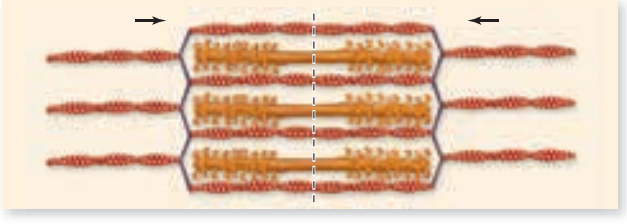
بعد موت الكائن الحي، تتوقف الخلايا عن إنتاج ATP. وبذلك، فإن الجسور العرضية لا يمكن أن تنفصل عن أكتين؛ لأن الانفصال يحتاج إلى ارتباط ATP مع رؤوس الميوسين من جديد. ويسبب هذا تصلبًا في العضلات، يتبعه الموت، ويسمى تصلب الوفاة أو التخشب الموتي *Rigor mortis*. في المقابل، فإن الخلية الحية يكون لديها رصيد من ATP يسمح لميوسين بالانفصال عن أكتين. والسؤال هنا هو: كيف تستطيع العضلة إيقاف تكوين الجسور العرضية للاسترخاء؟ وسوف يتم دراسة تنظيم عمليتي الانقباض والانبساط لاحقًا.

الانقباض يعتمد على إطلاق أيونات الكالسيوم تبعًا للإشارة العصبية (الإثارة)

عند ارتخاء العضلة، يكون رأس الميوسين في الحالة النشطة ومرتبطًا بـِ ADP و P_i، ولكنه لا يملك القدرة على الارتباط بأكتين. والسبب في ذلك أنه في



أ.



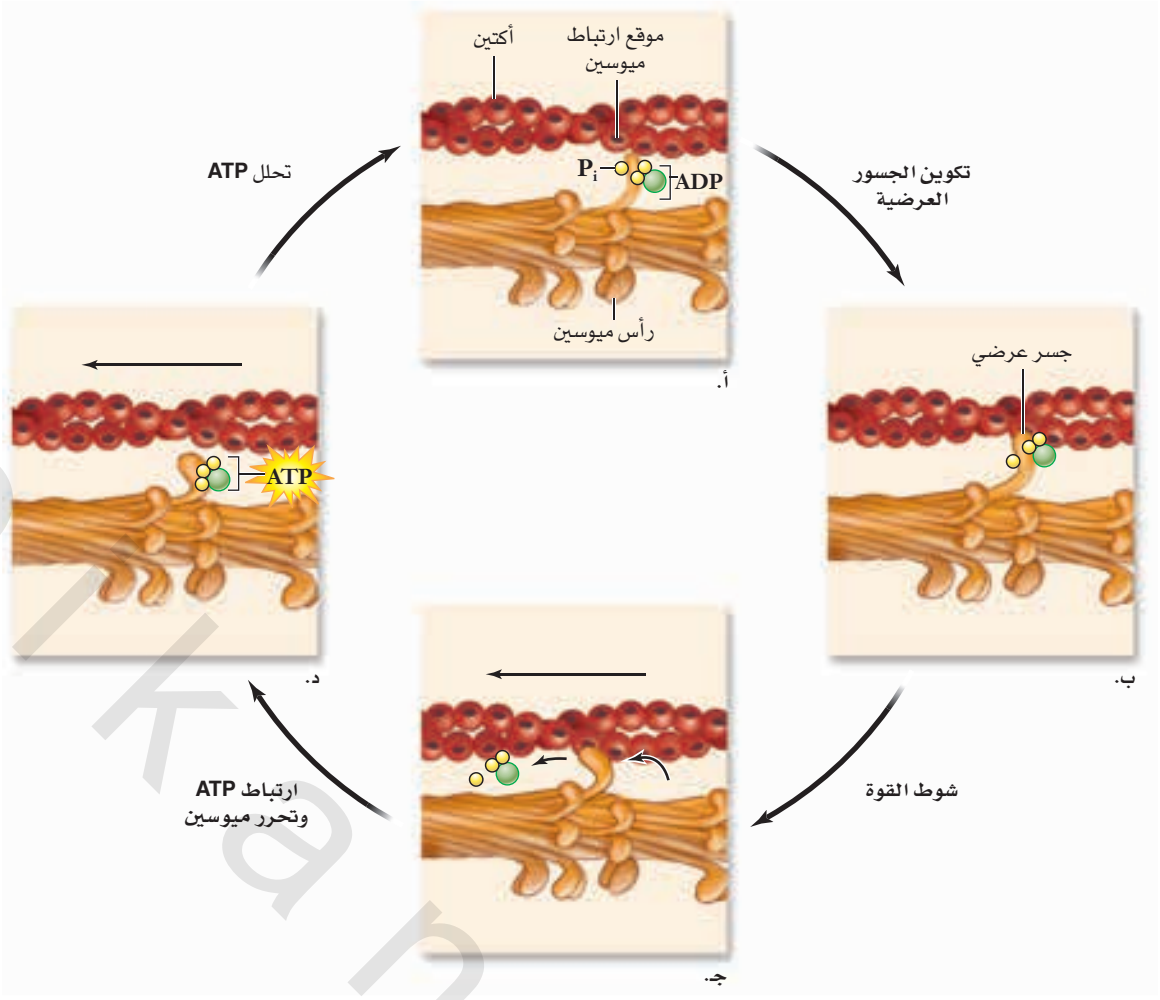
ب.

الشكل 47-14

تفاعل الخيوط الرفيعة مع السميكة في قطعة عضلية لعضلة هيكلية.

أ . تترتب رؤوس الميوسين عند نهايتي الخيط السميك في اتجاهين متعاكسين. وهذا يسمح بسحب الخيوط الرفيعة وخطوط Z عن طريق الجسور العرضية نحو منتصف القطعة العضلية.

ب. يسبب انزلاق الخيوط العضلية انقباض العضلة.



الشكل 47-15

دورة الجسر العرضي في انقباض العضلة.

أ. إن تحطم ATP عن طريق ميوسين يُنتج تغيرًا في شكل رأس ميوسين، ويحوله إلى الوضع النشط. ويبقى ADP وP_i ملتصقين برأس ميوسين الذي يستطيع الآن الارتباط بأكتين.

ب. يرتبط ميوسين بأكتين ليشكلا الجسر العرضي.

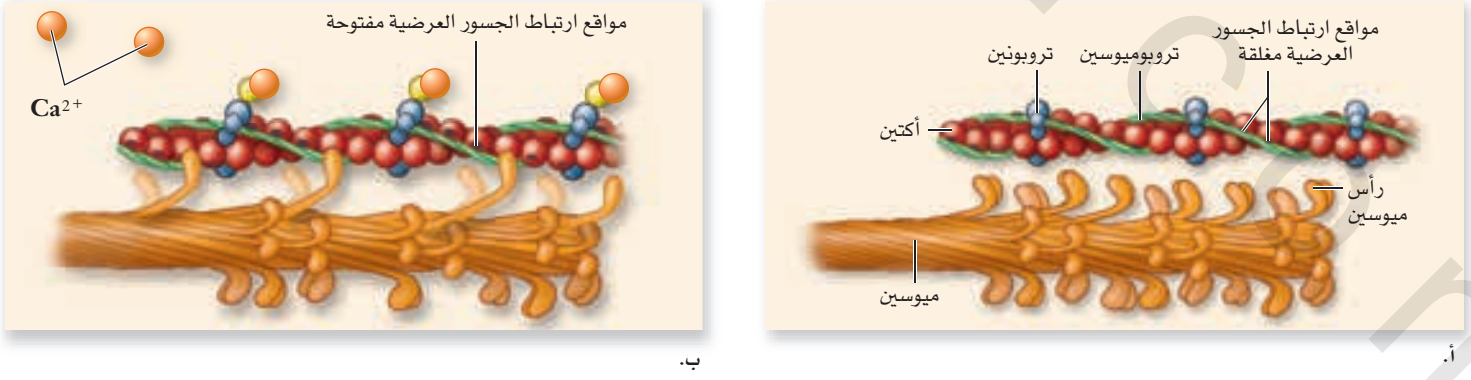
جـ. يعود ميوسين إلى شكله الأصلي خلال شوط القوة، ويطلق ADP و P_i.

د. يرتبط جزيء ATP برأس ميوسين، فيسبب انفكاك الجسر العرضي، يتبعه تحطم ATP ليعيد رأس ميوسين إلى الحالة النشطة لتبدأ الدورة من جديد.

حالة الانبساط يكون مكان الارتباط مغلقًا فيزيائيًّا عن طريق بروتين آخر يُسمّى **تروبوميوسين Tropomyosin** موجود في الخيوط الرفيعة، وبذلك لا يتكون الجسر المتداخل العرضي، ولا تنزلق الخيوط العضلية.

لحصول الانقباض، يجب إبعاد تروبوميوسين من الطريق؛ لكي يتمكن رأس الميوسين من أن يرتبط هذا باكتين في مكان الارتباط الذي أصبح مكشوفا الآن. إن عملية إبعاد تروبوميوسين تحتاج إلى بروتين آخر يسمى **تروبونين Troponin** وهو بروتين تنظيمي يربط تروبوميوسين وأكتين معًا. إن التفاعل التنظيمي بين تروبونين وتروبوميوسين تسيطر عليه أيونات الكالسيوم Ca^{2+} في سيتوبلازم الخلية العضلية.

عندما يكون تركيز Ca^{2+} في السيتوبلازم قليلًا، يثبط تروبوميوسين تكوين الجسر العرضي بين أكتين وميوسين (الشكل 47-16أ). وعندما يزداد تركيز Ca^{2+}، يرتبط Ca^{2+} بتروبونين مغيرًا بذلك شكل المعقد تروبونين- تروبوميوسين، ويزيحه قليلًا عن موضعه. يعرض هذا التغير في الشكل مناطق ارتباط ميوسين الموجودة على أكتين، ما يسمح هذا بتكوين الجسر العرضي، ومن ثم انقباض العضلة (الشكل 47-16 ب).

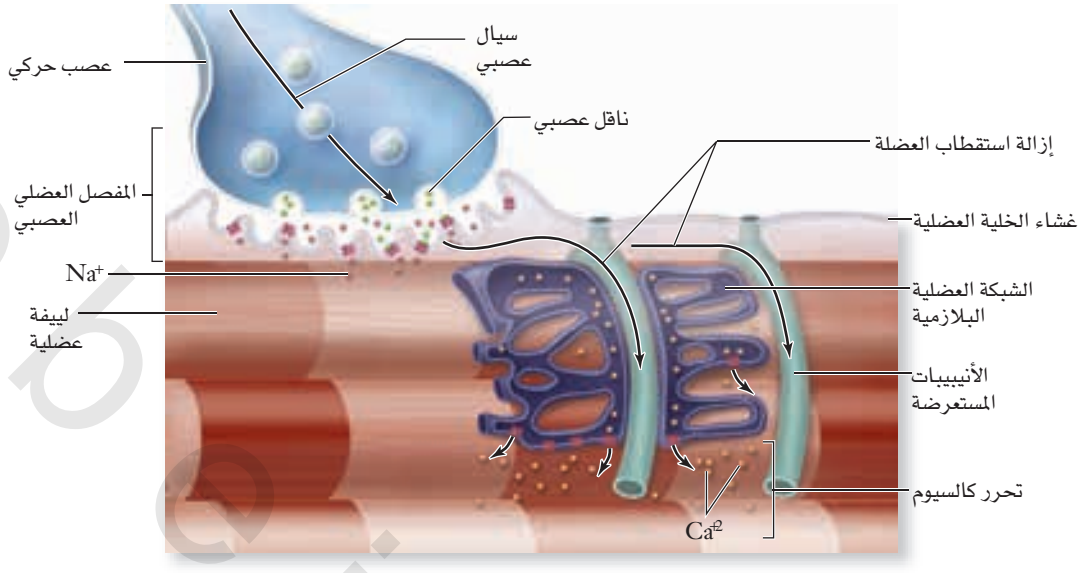


الشكل 47-16

كيفية سيطرة أيونات الكالسيوم على انقباض العضلات الهيكلية. أ. في حالة الراحة، تغلق الخيوط الطويلة للبروتين تروبوميوسين مكان ارتباط ميوسين على أكتين. بسبب عدم مقدرة ميوسين على الارتباط بأكتين لا يحصل الانقباض. ب. ارتباط كالسيوم بالبروتين تروبونين وتشكيل المعقد تروبونين-كالسيوم يقوم بإزاحة تروبوميوسين، ويظهر أماكن ارتباط ميوسين على خيط أكتين، وبذلك يسمح بتكوين الجسور العرضية، ومن ثم انقباض العضلة.

obeikandi.com

الشكل 47-17



العلاقة بين الليف العضلي، والأنيبيبات المستعرضة والشبكة العضلية البلازمية.

يطلق الناقل العصبي عند المفصل العضلي العصبي، فيرتبط بقنوات Na^+ ذات المستقبلات الكيميائية فيسبب إزالة استقطاب غشاء الخلية العصبية. وتنقل هذه الاستثارة على طول غشاء الخلية وإلى داخل الخلية عبر الأنيبيبات المستعرضة إلى داخل الشبكة العضلية البلازمية. وعندما ينتشر كالسيوم خلال السيتوبلازم إلى الليفات العضلية يحصل الانقباض.

تحتاج العضلات إلى مصدر معتمد من Ca^{2+}. تحتفظ الألياف العضلية بالكالسيوم في الشبكة الأندوبلازمية المعدلة التي تُسمّى الشبكة **العضلية البلازمية Sarcoplasmic reticulum (SR)** (الشكل 47-17). عند استثارة الليف العضلي للانقباض، فإن غشاء الليف العضلي يفقد حالة الاستقطاب، فيصبح مزال الاستقطاب. وتنقل هذه الاستثارة إلى داخل الليفة العضلية عن طريق انغمادات في الغشاء البلازمي تدعى **الأنيبيبات المستعرضة Transverse tubule (T tubule)**.

إن فقدان الاستقطاب في الأنيبيبات المستعرضة سوف يؤدي إلى فتح قنوات كالسيوم في الشبكة العضلية البلازمية، ما ينتج عنه إطلاق الكالسيوم في السيتوبلازم. ينتشر Ca^{2+} إلى الليفات العضلية، حيث يرتبط هناك بتروبونين مغيرًا شكله ليسمح بالانقباض. يطلق على عملية تدخل Ca^{2+} في انقباض العضلة **مزدوج الاستثارة-الانقباض Excitation – contraction coupling**؛ لأن إطلاق Ca^{2+} هو الذي يربط استثارة العضلة عن طريق العصب الحركي بعملية الانقباض.

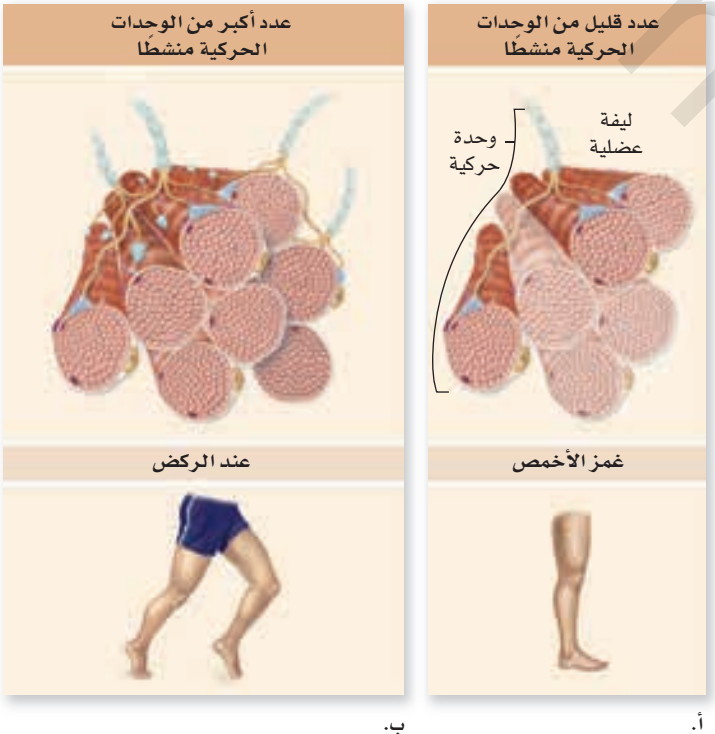
السيال العصبي ينتج عن الأعصاب الحركية

يعمل العصب الحركي على تحفيز العضلة للانقباض. وتدعى الأعصاب المحركة التي تنشط العضلات الهيكلية الأعصاب الحركية الجسمية *Somatic motor neurons*. يمتد المحور العصبي للعصب الحركي من جسم الخلية العصبية، ويتفرع ليغذي عددًا من الألياف العضلية. ويُسمّى هذا الارتباط بين نهاية العصب والخلية العضلية المفصل العصبي العضلي *Neuromuscular junction* (الشكل 47-17). يمكن لمحور واحد أن يحفز عددًا كبيرًا من الألياف العضلية، وفي بعض الحيوانات يمكن لليف العضلي الواحد أن يحفز من قبل أكثر من عصب حركي واحد. أما في الإنسان، فإن كل ليفة عضلية متصلة بفرع واحد من محور العصب الحركي.

عندما ينقل العصب الحركي الجسمي تيارًا كيميائيًّا كهربائيًّا، فإنه يحفز انقباض العضلة التي يرتبط بها من خلال العمليات الآتية:

1. يعمل العصب الحركي عند المفصل العصبي العضلي على إطلاق الناقل العصبي أستيل كولين (ACh). يرتبط أستيل كولين بالمستقبلات في غشاء الخلية العصبية، وتفتح بذلك قنوات Na^+ ليدخل Na^+ داخل الخلية العضلية، فيعمل ذلك على استثارة غشاء الخلية العضلية.
2. تمتد الاستثارة العصبية على طول غشاء الخلية العضلية وفي داخلها، عن طريق القنوات المستعرضة.
3. تنقل القنوات المستعرضة الاستثارة (السيال) في اتجاه الشبكة العضلية البلازمية، فتفتح قنوات كالسيوم ما يؤدي إلى تحرره، حيث يرتبط كالسيوم بتروبونين، ويحصل بعدها انقباض العضلة.

إن توقف السيال العصبي يؤدي إلى توقف إفراز أستيل كولين، فيتوقف بذلك إنتاج الاستثارة في الليف العضلي. يعمل بعدها بروتين غشائي في الشبكة العضلية على ضخ كالسيوم إلى داخل الشبكة العضلية مستخدمًا ATP بوصفه مصدرًا للطاقة، ويُسمّى



أ. ب.

الشكل 47-18

عدد الوحدات الحركية وحجمها. تتألف الوحدة الحركية من العصبون الحركي وجميع الألياف العضلية التي ترتبط به، ويحفزها. أ. الانقباض العضلي الدقيق يحتاج إلى عدد قليل من الوحدات الحركية. ب. أما الحركة العضلية الكبيرة، فتحتاج إلى حجم أكبر من الوحدات الحركية. وكلما زاد عدد الوحدات الحركية النشطة زادت قوة الانقباض.

هذا النقل النشط. وهنا لا يعود تروبونين مرتبطًا بكالسيوم، فيعود تروبوميوسين إلى وضعه السابق المانع للانقباض، وترتخي العضلة.

الوحدة العضلية والاستنفار *Motor units and recruitment*

يمكن لليف عضلي واحد إنتاج درجات توتر مختلفة اعتمادًا على تكرار التنبيه. تعتمد استجابة العضلة بشكل كامل على عدد الألياف العضلية المتصلة بتفرعات محور العصب الحركي جميعها، إضافة إلى العصب الحركي نفسه. تشكل مجموعة الألياف العضلية التي تغذيها فروع محور عصبون حركي واحد إضافة إلى العصبون الحركي نفسه **الوحدة الحركية Motor unit** (الشكل 47-17).

في كل مرة يطلق العصب الحركي السيال العصبي، تنقبض جميع الألياف العضلية المشكلة للوحدة الحركية معًا. إن تقسيم العضلة إلى وحدات حركية يسمح بالانقباض التدريجي للعضلة، وبالتحكم في قوة انقباضها، وهو متطلب ضروري لتنسيق الحركة. فالعضلات التي تحتاج إلى حركة دقيقة مثل عضلات العين تحتاج إلى وحدات عضلية أصغر، أي عدد ألياف عضلية أقل لكل عصب. أما في العضلات ذات الحركة الأقل دقة، ولكنها تحتاج إلى قوة أكبر مثل عضلات الساق، فإن عدد الألياف العضلية لكل عصب حركي أكبر بكثير.

تحتوي معظم العضلات وحدات حركية بأحجام مختلفة، وهذه يمكن استثارتها بشكل انتقائي عن طريق الجهاز العصبي. ويتضمن أضعف انقباض للعضلة استثارة عدد قليل من الوحدات الحركية الصغيرة. وعند الحاجة إلى انقباض أقوى، فإن عددًا أكبر من الوحدات الحركية يتم استثارته. لهذا، فإن الزيادة الابتدائية من أجل زيادة القوة هي صغيرة نسبيًّا. فكلما زاد عدد الوحدات العضلية المستثارة وحجمها تزداد قوة الانقباض. وتدعى زيادة أعداد الوحدات الحركية وحجمها من أجل إنتاج انقباض أكبر **الاستنفار Recruitment**.

النوعان الرئيسان من الألياف العضلية: الوَمضة السريعة، والوَمضة البطيئة

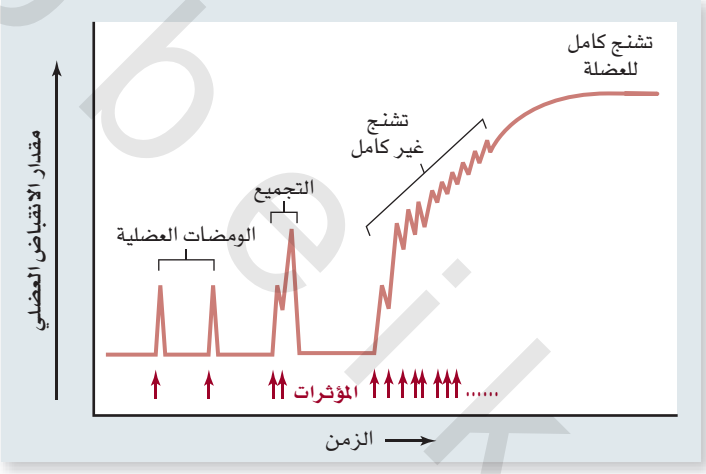
يمكن تحفيز العضلة الهيكلية المعزولة عن طريق الصدمة الكهربائية. فعند تحفيز العضلة بصدمة كهربائية واحدة، فإنها تنقبض وتنبسط (ترتخي) بسرعة، ويدعى ذلك **الوَمضة العضلية Twitch**. إن زيادة فرق جهد المنبه يزيد من قوة الوَمضة لتبلغ أقصى مدى لها. وإذا نبهت مرة ثانية بعد الأولى مباشرة، فإن العضلة ستعطي وَمضة ثانية تندمج مع الوَمضة الأولى بشكل متراكم أو «تمتطيها». ويطلق على الاستجابة التراكمية هذه **التجميع Summation** (الشكل 47-19).

عند زيادة تكرار التنبيه الكهربائي، يقلّ زمن الارتخاء بين الوَمضات، وتزداد قوة الانقباض. وعند تكرار معين، لا يظهر هناك أي ارتخاء في العضلة بين الوَمضات المتعاقبة. ويكون الانقباض مستدامًا وسلسًا كما هو الحال في أثناء الانقباض العضلي الطبيعي في الجسم، ويسمى هذا الانقباض **المستدام التشنج Tetanus**. وقد أخذ مرض التيتانوس (الكزاز) اسمه هذا؛ لأن المصاب به يعاني انقباضًا دائمًا في عضلاته.

يمكن تقسيم العضلات الهيكلية بحسب سرعة الانقباض إلى ألياف الوَمضة البطيئة *Slow-twitch (Type I)* وألياف الوَمضة السريعة، *Fast-twitch (Type II)*. فالعضلات التي تحرك العين تحتوي نسبة كبيرة من ألياف الوَمضة السريعة، حيث تصل إلى أقصى انقباض (توتر) لها في نحو 7.3 ميللي ثانية. أما العضلة الأخمصية في الساق، فإنها تحتوي عددًا كبيرًا من ألياف الوَمضة البطيئة، وتحتاج إلى 100 ميللي ثانية لتصل إلى أقصى توتر (الشكل 47-20).

ألياف الوَمضة البطيئة

هذه الألياف غنية بالشعيرات الدموية، وتحتوي عددًا كبيرًا من الميتكندريا وأنزيمات التنفس الخلوي إضافة إلى تركيز عالٍ من **الميوجلوبين Myoglobin** وهي صبغة حمراء تشبه الهيموجلوبين في خلايا الدم الحمراء، ولكنها ذات قوة جذب أكبر للأكسجين لضمان وصوله إلى الألياف العضلية. ولأن هذه الألياف تحتوي كمية كبيرة من الميوجلوبين فإنها تُدعى أيضًا **الألياف الحمراء Red**

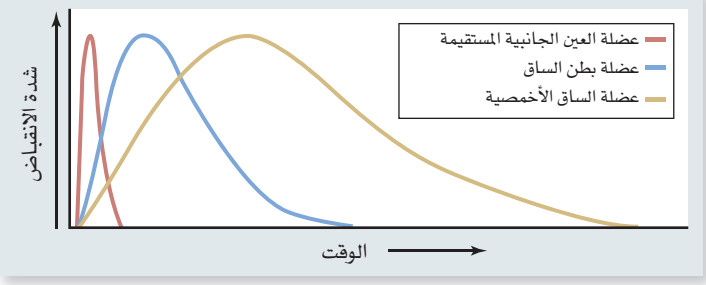


الشكل 47-19

يمكن جمع الوَمضات العضلية لتكوين انقباض تشنجي مستدام. ويمكن حدوث ذلك عند تحفيز العضلة كهربائيًّا أو عن طريق الأعصاب في الوضع الطبيعي. التشنج، وهو انقباض مستدام هو النوع الطبيعي من الانقباض في عضلات الجسم.

استقصاء

ما الذي يحدد المقدار الأقصى من الانقباضات العضلية المتجمعة (التراكمية)؟



الشكل 47-20

تحتوي العضلات الهيكلية على كميات متفاوتة من الألياف ذات الوَمضة السريعة أو البطيئة. العضلة التي تحرك العين تتألف بشكل كلي من ألياف ذات وَمضة سريعة، أما العضلات الداخلية في الساق فألياقها ذات وَمضة بطيئة. في حين أن تركيب عضلة بطن الساق متوسطة.

استقصاء

كيف يمكنك تحديد ما إذا كانت عضلة بطن الساق تحتوي على مزيج من ألياف ذات وَمضة سريعة وبطيئة، أو أنها تحتوي أليافًا ذات تركيب متوسط؟

obeikandl.com

fibers ويمكن لهذه الألياف أن تتحمل الحركة والانقباض مدة طويلة دون أن يصيبها الإعياء Fatigue.

الألياف ذات الومضة السريعة

تحتوي هذه الألياف السميكة عددًا أقل من الشعيرات الدموية والميتوكندريا مقارنة بالألياف ذات الومضة البطيئة، وأيضًا كمية أقل من الميوجلوبين، ولهذا تُسمّى أحيانًا الألياف البيضاء *White fibers*. ولقد تكيفت الألياف البيضاء لتقوم بالتنفس اللاهوائي باستخدام كميات كبيرة من الجليكوجين، وتراكيز كبيرة من الأنزيمات المحطمة لجليكوجين. تحتوي اللحوم الداكنة والفاتحة في الدجاج، والديك الرومي بشكل رئيس على عضلات ذات ألياف حمراء وبيضاء على التوالي. ولقد تكيفت الألياف ذات الومضة السريعة لإنتاج سريع للطاقة والنمو والازدياد في القوة، استجابة للتدرب على حمل الأوزان، ولكنها تفتقر إلى قوة الاحتمال الموجودة لدى الألياف ذات الومضة البطيئة.

إضافة إلى النوعين الأول والثاني من الألياف، تحتوي عضلات الإنسان على أشكال متوسطة من الألياف ذات الومضة السريعة، ولكنها تمتلك أيضًا قدرة كبيرة على الأكسدة. ومن ثم، فإنها أكثر تحملًا وأقل عرضة للإعياء. وقد وجد أن تمارين التحمل تزيد من كمية هذه الألياف في العضلات.

يتغير أيض العضلات تبعًا لنوع المجهود المطلوب منها

تحصل العضلات الهيكلية على معظم طاقتها وقت الراحة من التنفس الهوائي للأحماض الدهنية. وخلال استخدام العضلة في أثناء التدريب مثلًا، تستهلك العضلة الجليكوجين والجلوكوز القادم من الدم بوصفه مصدرًا للطاقة. إن الطاقة المستخلصة خلال التنفس الهوائي تستخدم لصنع ATP الذي تحتاج إليه العضلات في:

1. حركة الجسور العرضية خلال انقباض العضلة.
2. إعادة ضخ كالسيوم إلى داخل الشبكة العضلية البلازمية خلال ارتخاء العضلة.

تتنفس العضلات الهيكلية لاهوائيًّا خلال فترة أول 45 إلى 90 ثانية من التدريب المتوسط –القاسي؛ لأن الجهاز التنفسي والوعائي القلبي يكون في حاجة إلى هذا الوقت لزيادة تزويد العضلات بالأكسجين. وإذا كان التدريب متوسطًا، فإن التنفس الهوائي يمثل الجزء الأكبر من مصادر الطاقة اللازمة للعضلة خاصة في فترة أول دقيقتين من التدريب.

إن اختلاف طبيعة التمرين، سهلًا كان، أو صعبًا أو متوسطًا لشخص معين، يعتمد على القدرة القصوى للتمارين الهوائية. إن أقصى معدل لاستهلاك الأكسجين من قبل الجسم يدعى السعة الهوائية *Aerobic capcity*. كذلك، فإن كثافة التمرين يمكن معرفتها عن طريق عتبة حمض اللاكتيك. هذه العتبة هي النسبة المئوية للسعة الهوائية التي يحدث عندها ارتفاع ملحوظ في مستوى حمض اللاكتيك في الدم بسبب التنفس اللاهوائي. وعلى سبيل المثال، فإن الإنسان معتدل الصحة ينتج كمية واضحة من حمض اللاكتيك في الدم، عندما يتم التمرين عند 50–70% من السعة الهوائية.

التدريب الحركي يزيد من السعة الهوائية والقوة العضلية

يقصد **بتعب العضلة Muscle fatigue** انخفاض قدرتها على إنتاج القوة مع الاستمرار في الاستخدام. وهناك أوجه وأسباب عدة لتعب العضلة. إن شدة الانقباض ومدته يؤديان دورًا في تعب العضلة. كذلك، فإن تعبها يعتمد على الأيض الخلوي: أكان هوائيًّا أم غير هوائي. في حالة قيام العضلة بأقصى جهد مدة قصيرة يحصل تعب العضلة. وقد اعتُقِد مدة طويلة أن ذلك يعود إلى تراكم حمض اللاكتيك (الناتج عن التنفس اللاهوائي). هناك أبحاث حديثة تشير إلى أن تعب العضلة يمكن أن ينجم عن تراكم الفوسفات غير العضوي، والناتج عن تحطم فوسفات الكرياتين، الذي يحدث أيضًا خلال الأيض اللاهوائي. ولكن خلال القيام بالتمرين بالجهد الأقل، مدة أطول، يُعتَقد أن التعب ينتج بسبب نقص مستوى الجليكوجين.

ولأن نقص الجليكوجين في العضلة يضع حدًّا لمدة التدريب وقوته، فإن أي تكيف للعضلة للاستغناء عن الجليكوجين سوف يحسن مقدار التدريب. وهذا ما يحدث مع الرياضيين، فقد تكيفت عضلاتهم لإنتاج الطاقة من خلال التنفس الخلوي اعتمادًا على الأحماض الدهنية، وبذلك يقل استخدام الجليكوجين في العضلة. ويتميز الرياضيون أيضًا بزيادة عدد الأوعية الدموية الواردة إلى العضلات ما يزيد من وصول الأكسجين، وإزالة حمض اللاكتيك. وبسبب زيادة السعة الهوائية لدى الرياضيين المتدربين على التحمل، فإن الأداء لديهم يكون أفضل وأطول قبل حدوث تعب العضلة.

لا تزيد تمارين التحمل من حجم العضلة، ولكن حجمها يزداد بفترات متكررة من التمرين الرياضي المكثف؛ حيث تعمل العضلة ضد قوة مؤثرة (المقاومة) مثل رفع الأثقال. وتزيد هذه التمارين من حجم الألياف العضلية ذات الومضة السريعة (النوع الثاني II) ما ينتج نموًا في حجم العضلة يُسمّى **التضخم Hypertrophy** وليس من خلال انقسام الخلايا وزيادة عددها.

تحتوي الخلايا العضلية على الليفات العضلية التي تقصر خلال انقباض العضلة. يحصل الانقباض بسبب انزلاق الخيوط العضلية المتداخلة. يتضمن انزلاق الخيوط العضلية البروتين ميوسين الذي يبني الجسور العرضية مع خيوط أكتين. يتم التحكم في هذه العملية عن طريق أيونات الكالسيوم التي ترتبط ببروتين آخر هو تروبونين. يتحكم تروبونين في موقع تروبوميوسين الذي يغلق أماكن ارتباط ميوسين على خيط أكتين. تبدأ عملية ارتباط ميوسن بأكتين مع وصول جهد الفعل العصبي من العصب الحركي الذي يعمل على إطلاق كالسيوم من مخازنه في الشبكة العضلية البلازمية. يسبب المؤثر الواحد ومضة في العضلة. ويمكن جمع هذه الومضات لتشكل انقباضًا مستدامًا.

5-47 أنماط حركات الحيوان

تتميز الحيوانات عن باقي الكائنات متعددة الخلايا بقدرتها على الحركة النشطة من مكان إلى آخر. تحتاج الحركة إلى نظام دفع وأسلوب للسيطرة. وهناك كثير من أنظمة الدفع، تستخدم معظمها العضلات المنقبضة لإنتاج القوة الضرورية. وفي الخلاصة، فإن الجهاز العصبي هو الذي ينشط، وينظم العضلات المستخدمة في الانتقال.

تنتج الحركة النشطة في الحيوانات الكبيرة بشكل كلي عن طريق الأطراف ذات الحركة الرتيبة (التموجية)، أو حركة الأطراف *Appendicular locomotion*، أو عن طريق الأجسام المتموجة أو النابضة، أو بالحركة الدودية (الحركة المحورية) *Axial locomotion*.

ومع أن الحركة عند الحيوانات تحدث بأشكال مختلفة، يبقى المبدأ العام واحدًا عند كل المجموعات. إن المعيقات الفيزيائية للحركة (الجاذبية وقوة الاحتكاك) متشابهة في البيئات جميعها، ولكنها تختلف في الدرجة أو المقدار.

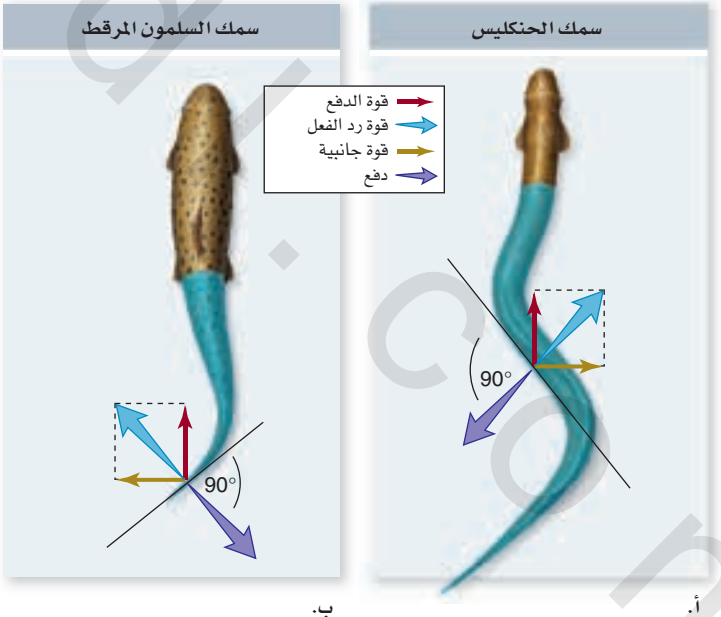
الحيوانات المائية تظهر عددًا من التكيفات الحركية

تتحرك الكثير من اللافقريات المائية زاحفة على قعر الماء مستخدمة طريقة الحركة الشبيهة بتلك المستخدمة عند الحيوانات البرية الزاحفة على سطح الأرض. تستخدم الديدان المفلطحة النشاط الهدبي لتزحف إلى الأمام. أما الديدان الأسطوانية فتستخدم الحركة الدودية، في حين يستخدم العلق الطبي في زحفه طريقة الانقباض- والتثبت- الامتداد، طريقة لا تختلف عن حركة ديدان الأرض. أما السلطعونات فتتحرك باستخدام الأطراف لتدفع بأجسامها إلى الأمام، وتستخدم الرخويات القدم العضلية، في حين يستخدم نجم البحر القدم الأنبوبية في حركته.

تمثل الحركة أو السباحة خلال الماء نوعًا من التحدي المختلف تمامًا. إن كثافة الماء تقلل من أثر الجاذبية. يعدّ عامل الاحتكاك العائق الرئيس للحركة المتقدمة إلى الأمام. لذلك، كان لشكل الجسم أهمية في تقليل الاحتكاك والاضطراب الناتج عن السباحة خلال الماء.

تتحرك بعض اللافقريات البحرية باستخدام الدفع الهيدروليكي. على سبيل المثال، يشدّ المحار طرفي صدفته بقوة إلى بعضهما، في حين يدفع الحبار والأخطبوط الماء كنفاث مائي، كما أوضحنا سابقًا.

إن اللافقريات المائية جميعها سبّاحة. وتتضمن السباحة استخدام الجسم أو زوائده لدفع الجسم ضد الماء. يسبح سمك الحنكليس عن طريق الحركات التموجية التي تشمل جسمه كله (الشكل 47-21 أ). إن الحركات التموجية للجسم السابح مثل سمك الحنكليس ناجمة عن أمواج من الانقباضات العضلية تتبادل بين العضلات المحورية اليسرى واليمنى. وعندما تدفع كل قطعة من الجسم الماء، تقوم موجات الماء المتحركة بدفع الحيوان إلى الأمام.



الشكل 47-21

حركة الأسماك السباحة. أ. يدفع سمك الحنكليس جسمه ضد الماء عن طريق تموجات تسري بطول جسمه كله. في حين ب. يدفع سمك السلمون المرقط جسمه ضد الماء عن طريق تموجات نصف جسمه الخلفي.

تستخدم الأسماك في حركتها آلية مشابهة لحركة الحنكليس، ولكنها تنتج معظم قوة الدفع من الجزء الخلفي للجسم مستخدمة زعنفتها الذيلية (الخلفية) (الشكل 47-21 ب). وهذا يعطي المجال للجزء الأمامي للقيام بالعمل المتخصص دون التضحية بقوة الدفع. أما الزواحف مثل القاطور، فتعتمد على تموجات الذيل بشكل رئيس لدفع أجسامها إلى الأمام.

تسبح الحيتان وباقي الثدييات البحرية مستخدمة الحركة التموجية لأجسامها. ولكن خلافًا للأسماك، فإن الأمواج تسري من الأسفل إلى الأعلى، وليس من جانب إلى آخر. إن عضلات الجسم عند الحنكليس والأسماك مقسمة بشكل واضح، حيث يكون كل زوج من الفقرات المتلاصقة مغطى بقطعة عضلية. وعندما تتداخل العضلات على طول الجسم تنساب الحركة التموجية بنعومة مع طول الجسم. أما الحيتان فلا تتمكن من إنتاج التموجات لأجسامها؛ لأن العمود الفقري في الثدييات مركب ليسمح بالانثناء العلوي السفلي، وليس بالانثناء من جانب إلى آخر.

يستطيع كثير من الفقريات الأرضية رباعية الأقدام السباحة من خلال تحريك أطرافها. معظم الطيور السبّاحة كالبط والإوز تدفع أجسامها ضد الماء عن طريق أرجلها الخلفية، حيث تمتلك عادة أرجلًا مجذافية. وكذلك الضفادع والسلاحف ومعظم الثدييات البحرية تسبح باستخدام أرجلها الخلفية التي تكون عادة ذات أغشية. أما الفقريات التي تسبح عن طريق أطرافها الأمامية فتكون أطرافها عادة متحورة، وتأخذ شكل زعنفة لتسمح بسحب الجسم خلال الماء، ومثال ذلك السلاحف البحرية، والبطريق، والفقمة ذات الفراء. القليل من الفقريات رباعية الأقدام مثل الدب القطبي، ومنقار البط، والإنسان تسبح عن طريق الأطراف الأمامية المستخدمة عادة للمشي، وليست متحورة لغرض السباحة.

الحركة على اليابسة عليها التعامل أولًا مع الجاذبية

تتحرك المجموعات الثلاث الأكبر من الحيوانات البرية: الرخويات، ومفصلية الأرجل، والفقريات على سطح الأرض بطرق مختلفة. تتحرك الرخويات بكفاءة أقل من المجموعات الأخرى. تفرز الحلزونيات والبزاق ممرًّا من المخاط تزحف فوقه، عندما تدفع أجسامها عن طريق القدم العضلية. أما بقية الفقريات ومفصلية الأرجل (الحشرات، والعناكب، والقشريات) فقد طورت طرقًا أسرع للحركة على السطوح. وفي كلتا المجموعتين نرى أن الجسم مرفوع عن الأرض، ويتحرك إلى الأمام عن طريق مجموعة من الزوائد المفصلية، أو الأرجل.

من وظائف الأرجل الدعامة والدفع. لذا كان من الأهمية بمكان ألّا تؤدي حركتها إلى إبعاد نقطة توازن الجسم عن محيط دعم الأرجل للجسم، إلا إذا كانت مدة عدم التوازن قصيرة. وخلافًا لذلك، فإن الحيوان سيسقط. إن الحاجة إلى الاحتفاظ بالثبات يحدد تعاقب حركة الأرجل المتشابهة عند الفقريات ومفصليات الأرجل.

الفرق الرئيس في طبيعة الحركة عند هاتين المجموعتين يعكس الفرق في عدد الأرجل. تمتلك الفقريات أربع أرجل، في حين تمتلك مفصليات الأرجل جميعها ستة أطراف أو أكثر. إن زيادة عدد الأطراف تزيد الاتزان في أثناء الحركة، وكذلك فإنها تحدّ من السرعة القصوى التي يمكن للحيوان بلوغها. إن النمط الأساسي في حركة ذات الأربع أرجل من السلمندر وحتى معظم الثدييات تأخذ الترتيب الآتي: الرجل اليسرى الخلفية- الرجل اليمنى الأمامية- الرجل اليمنى الخلفية- الرجل اليسرى الأمامية. ينتج هذا النظام نمطًا قطريًّا لإيقاع الأرجل. إن أقصى سرعة ركض لذوات الأربع أرجل كعدو الحصان يمكن أن يشمل حالات يكون الحيوان مرتكزًا فيها على رجل واحدة، أو يكون مرتفعًا عن سطح الأرض. وتفسير ذلك أن الثدييات قد حدث لديها تطور وتغير في تركيب الهيكل المحوري والطرفي، ما سمح بالركض عن طريق سلسلة من القفزات إلى الأمام.

إن كثيرًا من الحشرات كالجراد يستخدم القفز إلى الأمام عن طريق أرجله الخلفية القوية. وإن الثدييات كالكنغر، والأرنب، والضفدع هي أيضًا من الحيوانات التي تتحرك بالقفز (الشكل 47-22). إن حيوانات المراعي المفتوحة (السفانا) كالغزلان وباقي حيوانات الرعي تستخدم طريقتي العدو، والقفز إستراتيجية فعالة للهرب من المفترسين.

تستخدم الحيوانات الطائرة الهواء للدعم

تطورت عملية الطيران عند الحيوانات أربع مرات: عند الحشرات، وعند الزواحف المجنحة (زواحف طائرة منقرضة)، وعند الطيور، وعند الخفافيش. تحصل عملية الطيران النشط في هذه المجموعات الأربع بالأسلوب نفسه. تحدث عملية الاندفاع عن طريق الضغط على الهواء إلى أسفل عن طريق الأجنحة. وهذا وحده يولد قوة دفع إلى أعلى كافية لإبقاء الحشرة في الهواء. أما الفقريات، فلكونها أكبر، فإنها تحتاج إلى قوة رفع أكبر تحصل عليها من الأجنحة ذات السطح العلوي الأكثر تحدبًا من سطحها السفلي. إن أي سائل، كالهواء أيضًا، يقلل ضغطها الداخلي كلما زادت سرعة حركتها. لذا، فإن هناك ضغطًا أقل على السطح العلوي للجناح، في حين أن الضغط على السطح السفلي له أكبر. وهذا هو المبدأ نفسه المستخدم في أجنحة الطائرة.

يمكن رفع الأجنحة وخفضها عند الطيور والحشرات عن طريق الانقباض المتبادل للعضلات القابضة (الرافعة) والعضلات الباسطة (الخافضة). وهناك أربع رتب من الحشرات (تشمل الذباب، والبعوض، والدبور، والنحل، والخنافس) تتذبذب أجنحتها بمعدلات تتراوح بين 100 وإلى ما يزيد على 1000 مرة/ ثانية، وهذا أسرع من قدرة الأعصاب على نقل السيالات المتعاقبة.

إن عضلات الطيران في هذه الحشرات غير مرتبطة بالأجنحة كليًّا، بل إنها مرتبطة بالجدار الصلب المحيط بالصدر الذي ينضغط إلى الداخل والخارج بفعل انقباض تلك العضلات. إن هذه العضلات تنقبض بسرعة هائلة؛ لأن انقباض مجموعة من هذه العضلات يؤدي إلى شد مجموعة أخرى حاثًّا إياها على الانقباض دون انتظار وصول سيال عصبي جديد.

أما في الفقريات، فقد ظهر الطيران أولًا قبل نحو مئتي مليون سنة عند الزواحف الطائرة التي تدعى الزواحف المجنحة (الشكل 47-23). وبوصفها مجموعة ناجحة ومتنوعة، تراوحت الزواحف المجنحة في حجمها من أفراد في حجم العصفور الدوري، إلى أفراد في حجم الطائرة المقاتلة. وخلال تلك الفترة اشتركت تلك

الشكل 47-23

تطورت الأجنحة ثلاث مرات عند الحيوانات الفقرية. تمتلك هذه الحيوانات الفقرية المختلفة عظامًا خفيفة وأطرافًا أمامية تحورت إلى أجنحة.

الحيوانات السماء مع الطيور، التي يعتقد علماء الأحافير أنها تطورت من ديناصورات ذات ريش منذ نحو 150 مليون سنة.

الخفافيش، وهي ثدييات طائرة، ظهرت بعد انقراض الزواحف المجنحة. تطير في الليل، ولأنها تطير ليلًا، فإن بإمكان الخفافيش العيش في مخازن على الوفير من الغذاء برفقة القليل من الرفقاء مثل البعوض والحشرات، والعث. تكيفت الخفافيش للنشاط الليلي بتطوير أعضاء حس مميزة تعتمد على رجع الصدى (انظر الفصل الـ 45) بدلًا من اعتمادها على الإبصار. وأثبتت هذه الطريقة فاعليتها، حيث تمثل الخفافيش ربع أنواع الثدييات مجتمعة.

تنتج الحركة عند الحيوانات الكبيرة بشكل رئيس عن طريق الزوائد التي تدفع الوسط المحيط بطريقة ما. في الوسط المائي يشمل ذلك تموج الجسم كاملًا عند سمك الحنكليس، والجزء الخلفي من الجسم عند باقي الأسماك. يمكن للحيوان الطيران، عندما يولّد قوة رفع بسبب الاختلاف في الضغط فوق سطوح الأجنحة وأسفلها.

الشكل 47-22

الحيوانات التي تقفز تستخدم أرجلها الخلفية لدفع جسمها في الهواء. إن العضلات الخلفية القوية لهذا الضفدع مكنته من الانتقال من وضع الانطلاق إلى الوضع الأفقي في مدة 100 ميلي ثانية تقريبًا.

مراجعة المفاهيم

47-1 أنواع الأجهزة الهيكلية

تنتج التغيرات في الحركة بسبب دفع العضلات ضد تركيب داعم.

- الهيكل الهيدروستاتيكي يستخدم انقباض العضلات لإنتاج ضغط ماء داخل جدار الجسم (الشكل 47-1).
- تستخدم قوة النفث في الحركة عن طريق نفث الماء خارج الجسم، كما في قنديل البحر والحبار (الشكل 47-2).
- الهيكل الخارجي يمثل علبة صلبة وقاسية لحماية الجسم. يتخلص الحيوان من هذا الهيكل ليتمكن من النمو، واستخدام القصبة الهوائية للتنفس يحدّ من حجم الجسم (الشكل 47-2).
- الهيكلُ الداخلي للفقريات أنسجةٌ تحتوي فوسفات الكالسيوم، وهو صلب، وقاسٍ، وداخلي. (الشكل 47-3 ب).
- الهيكل عند الفقريات يقسم إلى جزأين: المحوري الذي يمثل محور الجسم، والطرفي الذي يتكون من الأطراف، وما يرتبط في حزام الكتف، وحزام الحوض (الشكل 47-3 ب).

47-2 نظرة فاحصة على العظم

العظم نسيج صلب، ولكنه مرن، وخاص بالحيوانات الفقرية.

- يتطور العظم جنينيًّا بطريقتين مختلفتين، هما: التطور داخل الغشائي، والتطور داخل الغضروفي الأكثر تعقيدًا.
- في حالة تطور العظم داخل الغشائي، يتشكل العظم على هيئة نسيج ضامّ أساسي عن طريق الخلايا بانية العظم والخلايا العظمية، وهذا شائع في تكوين عظام الجمجمة (الشكل 47-4)
- في حالة تطور العظم داخل الغضروفي، تحصل عملية التكلس عميقًا في الجسم ابتداءً من الغشاء الليفي المحيط بالغضروف، الذي يدعى بعد ذلك السمحاق، ويستمر نحو الداخل.
- ينمو العظم طوليًّا وعرضيًّا. ويبقى الغضروف بعد تطور الكردوس ليشكل طبقة عازلة بين سطوح العظم (الشكل 47-5).
- العظم عند الطيور والأسماك غير مزود بالأوعية الدموية، بل إنه غير خلوي كذلك، أما عند باقي الفقريات فالعظم يحتوي نوعين من الخلايا، وهو مزود بأوعية دموية، وأعصاب تمر خلال قنوات هافيرس.
- تشارك ثلاثة أنواع من الخلايا في تكوين العظم، هي: الخلايا بانية العظم التي تبدأ عملية تكوين العظم، وخلايا العظم الناتجة عن النوع السابق المطمور في العظم، والخلايا هادمة العظم التي تمتص العظم.
- يتغير تركيب العظم بحسب الاستعمال، ووَفق القوى المؤثرة في العظم (الشكل 47-6).

47-3 حركة المفاصل والعظام

تحدث حركة الجهاز الهيكلي التي تستجيب لأثر العضلات عند المفاصل، حيث تتقابل العظام.

- ترتبط العضلات مباشرة بالسمحاق الخارجي، وهو نسيج ضامّ كثيف يحيط بالعظم، أو تتصل عن طريق الأوتار التي تربط العضلة بالسمحاق الخارجي.
- هناك ثلاثة أنواع من المفاصل، هي: مفاصل عديمة الحركة (الثابتة) التي توصل بين العظام، ومفاصل قليلة الحركة غنية بنسيج ضام ليفي أو غضروف، وأخيرًا المفاصل حرة الحركة أو المفاصل الزلقة المليئة بسائل يسهل الحركة (الشكل 47-7).
- تمتلك المفاصل المتحركة مجالًا مميزًا من الحركة. تقوم المفاصل من نوع الكرة والمحجر بحركة عامة في الاتجاهات جميعها، أما المفاصل من النوع الرزي فحركتها محدودة، والمفاصل الزلقة تنزلق وتعطي الجسم الثبات والمرونة. وأخيرًا، فإن المفاصل المركبة تسمح بالدوران والانزلاق (الشكل 47-8).
- تعمل العضلات الهيكلية ضمن أزواج متضادة، حيث يكون فعل إحدى العضلات معاكسًا لفعل العضلة الأخرى (الشكل 47-9).

47-4 انقباض العضلات

تحتوي العضلة الهيكلية كثيرًا من الألياف العضلية المكونة من ليفات عضلية محتوية على خيوط عضلية (الشكل 47-10).

- تتميز الليفات العضلية الموجودة في العضلات الهيكلية أو المخططة بموروفولوجية واضحة: يتكون الشريط A من الأكتين والميوسين، في حين يحتوي الشريط I الأكتين، أما الخط Z فموجود على طرفي القطعة العضلية (الشكل 47-11).
- يحصل انقباض العضلة عندما تنزلق خيوط الأكتين والميوسين بالنسبة إلى بعضها، وتُشكَّل جسورٌ عرضيةٌ فيما بينها (الشكل 47-11).
- تتكون الخيوط السميكة من عدد من خيوط الميوسين. ويتألف جزيء الميوسين من وحدتين: منطقة الرأس، وخيط طويل يلتف بشكل حزمة مع غيره من الخيوط الطويلة (الشكل 47-12).
- الميوسين أحد البروتينات الحركية التي تحوّل الطاقة الكيميائية ATP إلى طاقة ميكانيكية عندما يتغير الشكل النهائي لجزيئات الميوسين (الشكل 47-13).
- يتكون كل خيط رفيع من سلسلتين من جزيئات الأكتين الكروية ملتفتين على شكل لولب حلزوني، ومن البروتينات تروبوميوسين وتروبونين (الشكل 47-13).
- يشكل رأس الميوسين جسرًا عرضيًّا مع خيوط الأكتين عندما يتحلل جزيء ATP إلى $ADP + P_i$ (الشكل 47-15).
- يمنع جزيء تروبوميوسن فيزيائيًّا تكوين الجسور العرضية، ويرتبط تروبوميوسين بالأكتين من خلال بروتين آخر هو تروبونين.
- ينظم عمل التروبونين عن طريق أيونات الكالسيوم. ويقوم تربونين المرتبط بالكالسيوم بتحريك تروبوميوسين جانبيًّا ليسمح بتكوين الجسور العرضية (الشكل 47-16).
- يختزن الكالسيوم داخل الشبكة العضلية البلازمية، وانطلاق أستيل كولين من النهايات العصبية يؤدي إلى إزالة استقطاب الغشاء الخلوي للخلية العضلية.
- تنتقل إزالة الاستقطاب إلى داخل الليفة العضلية عن طريق الأنيبيبات المستعرضة، فينطلق الكالسيوم إلى السيتوبلازم، وتدعى هذه العملية مزدوج الاستثارة والانقباض (الشكل 47-18).
- يستطيع الليف العضلي الواحد إنتاج توتر عضلي متغير اعتمادًا على مقدار تكرار التحفيز العصبي. ولكن استجابة العضلة كاملة تعتمد على عدد الألياف (الخلايا) العضلية المستخدمة، وعلى درجة توترها.
- الوحدات الحركية ذات الأحجام المختلفة تتكون من مجموعة من الألياف العضلية تغذيها تفرعات خلية عصبية حركية، إضافة إلى الخلية العصبية الحركية نفسها.
- ينتج الاستنفار انقباضات عضلية أقوى عند زيادة عدد الوحدات الحركية المنشطة وحجمها.
- تشير الومضة العضلية إلى المدة الزمنية بين انقباض العضلة المنبهة وارتخائها. وعملية التجميع هي استجابة تراكمية عندما تضاف الاستجابة الثانية إلى الاستجابة الأولى. وتدخل العضلة في حالة التشنج عندما لا يكون هناك ارتخاء بين عمليات الومضات المتتالية (الشكل 47-19).
- تحتوي العضلات الهيكلية نوعين رئيسين من الألياف العضلية، هما: ذات الومضة البطيئة أو الألياف من النوع I التي تستطيع تحمل النشاط مدة طويلة من الزمن، والنوع الثاني ذات الومضة السريعة أو الألياف من النوع II التي تكيفت للقيام بأنشطة قوية، ولكنها تفتقر إلى التحمل.
- تحصل العضلة المنشطة على الطاقة من خلال أيض الأحماض الدهنية، في حين تحصل العضلة في حالة الراحة على الطاقة من الجلوكوز والجليكوجين.
- يحصل الأعياء عند العضلات بسبب ضعف المقدرة على إنتاج الطاقة الناجم عن الاستمرار في استعمال العضلة.
- التمرين طويل الأمد لا يزيد من حجم العضلة، ولكن ما يزيد حجم العضلة هو التمرين عالي الكثافة مع وجود المقاومة.

47-5 أنماط حركات الحيوان

تُظهر الحيوانات أشكالًا عدة من آليات الدفع التي يحفزها، ويسيطر عليها الجهاز العصبي.

- في الحيوانات الكبيرة، يكون الانتقال طرفيًّا عن طريق تموجات الزوائد، أو محوريًّا عن طريق التموجات أو الأمواج الدودية (الشكل 47-21).
- أنماط الحركة على اليابسة: تندفع الرخويات عبر مسار مخاطي عن طريق القدم العضلي. في حين تمشي الحيوانات الأخرى أو تقفز عند دفعها القدم ضد الأرض، وتطير أخرى عن طريق إنتاج قوة رفع ناتجة عن الفرق في الضغط على سطحي الجناح.

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. يختلف الهيكل الخارجي والداخلي فيما يأتي:
   أ. الهيكل الخارجي صلب، أما الداخلي فهو مرن.
   ب. الهياكل الداخلية موجودة فقط عند الفقريات.
   جـ. تتكون الهياكل الخارجية من الكالسيوم، أما الهياكل الداخلية فمبنية من الكايتين.
   د. الهياكل الخارجية تقع خارج أنسجة طرية، في حين أن الهياكل الخارجية تقع داخل الجسم.
2. تستخدم الديدان واللافقريات البحرية هيكلًا هيدروستاتيكيًّا للحركة، حيث:
   أ. تمتلئ عظامها بالماء الذي يعطي الهيكل وزنه.
   ب. ينتج التغير في تركيب الجسم عن انقباض العضلات التي تضغط على سوائل الجسم.
   جـ. تحتوي العضلات فجوات مائية تعطي تركيبًا داخليًّا قاسيًا عندما تمتلئ بالماء.
   د. يشير المصطلح هيدروستاتيكي إلى الوسط الرطب. وتنتج الحركة بطريقة تشبه مفصليات الأرجل.
3. لديك صورة أشعة X لشخصين. ربيع، حامل أثقال وكمال أجسام مدة 30 عامًا، أما بشير فعاش معظم حياته جالسًا. تتوقع الفرق بين صورتي X لكليهما:
   أ. لا فرق؛ يمتلك الاثنان عظامًا أسمك من الأشخاص الأصغر سنًّا بسبب النمو الطبيعي مع الزمن.
   ب. لا فرق؛ فطريقة المعيشة لا تؤثر في كثافة العظم.
   جـ. ربيع، سيكون لديه عظام أسمك بسبب إعادة التشكيل الناتجة عن الضغط الفيزيائي.
   د. عظام بشير أكثر سماكة؛ لأن العظم يتراكم مثل الدهن بسبب بقائه جالسًا.
4. ينتج العظم عن طريق واحدة من طريقتين اعتمادًا على الهيكل الأساسي. الزوج الذي يصف هذه الميكانيكية بشكل صحيح مما يأتي هو:
   أ . داخل غشائي، وخارج غشائي.
   ب. داخلي غضروفي، وخارجي غضروفي.
   جـ. خارج غشائي، وخارج غضروفي.
   د. داخلي غضروفي، وداخل غشائي.
5. الجملة التي تمثل أفضل وصف لميكانيكية الخيوط المنزلقة في انقباض العضلة هي:
   أ. لا تقصر خيوط الأكتين والميوسين، ولكنها تنزلق خلف بعضها.
   ب. تقصر خيوط الأكتين والميوسين، وتنزلق خلف بعضها.
   جـ. عندما تنزلق الخيوط خلف بعضها، تقصر خيوط الأكتين دون خيوط الميوسين.
   د. عندما تنزلق الخيوط خلف بعضها، تقصر خيوط الميوسين دون خيوط الأكتين.
6. تم التعرف إلى مرض يتعلق بتخزين أيونات الكالسيوم في الجرذ. يؤثر عدم المقدرة على تخزين الكالسيوم في انقباض العضلة، حيث:
   أ. لن تتمكن أيونات الكالسيوم من الارتباط بتروبوميوسين، وهذا يسمح لتروبونين بالحركة وكشف مواقع ارتباط الجسور العرضية.
   ب. لن تتمكن أيونات الكالسيوم من الارتباط بتروبونين، وهذا يسمح لتروبوميوسين بالحركة وكشف مواقع ارتباط الجسور العرضية.
   جـ. لن تتمكن أيونات الكالسيوم من الارتباط بتروبوميوسين، وهذا يسمح لتروبونين بتحرير ATP.
   د. لن تتمكن أيونات الكالسيوم من الارتباط بتروبونين، وهذا يسمح لتروبوميوسين بتحرير ATP.
7. تُنشِّط الخلايا العصبية الحركية انقباض العضلة من خلال تحرير:
   أ. أيونات الكالسيوم. ب. ATP.
   جـ. أسيتل كولين. د. الهرمونات.
8. واحدة من الجمل الآتية حول الأيض عند العضلة غير صحيحة:
   أ. تحصل العضلات الهيكلية على الطاقة في أثناء الارتخاء من جليكوجين العضلات وجلوكوز الدم.
   ب. يتكون ATP بسرعة من اتحاد ADP مع الفوسفات المستمد من فوسفات الكرياتين.
   جـ. تتناسب شدة التمرين مع المعدل الأعلى لاستهلاك الأكسجين.
   د. تحتاج ATP إلى ضخ أيونات الكالسيوم ثانية إلى داخل الشبكة العضلية البلازمية.
9. إذا أردت أن تدرس استخدام ATP خلال دورة انقباض واحدة داخل الخلية العضلية، فإن العملية التي تستخدمها هي:
   أ. التجميع. ب. الومضة العضلية.
   جـ. ظاهرة الدرج. د. التشنج العضلي.
10. الترتيب الصحيح للأحداث الآتية:
    1. انسياب أيونات الكالسيوم من الشبكة العضلية البلازمية.
    2. ارتباط ميوسين بأكتين.
    3. وصول السيال العصبي من الخلية العصبية.
    4. ارتباط أيونات الكالسيوم بتروبونين هو:
    أ. 1، 2، 3، 4. ب. 3، 1، 2، 4.
    جـ. 2، 4، 3، 1. د. 3، 1، 4، 2.
11. تحرك العضلات يدك في الهواء بـ:
    أ. الانقباض. ب. الارتباط بعظمتين عبر مفصل.
    جـ. الجاذبية. د. أ + ب.
12. الذي يسمح للحيوان بالطيران هو الفرق في:
    أ. الجاذبية. ب. الرطوبة.
    جـ. الضغط. د. الحرارة.
13. تستمر خلايا العظم حية داخل العظم بسبب:
    أ. تكوّن العظم من خلايا ميتة أو ساكنة فقط.
    ب. وجود قنوات هافيرس في العظم، التي تحتوي أوعية دموية تزود خلايا العظم بما تحتاج إليه من مواد.
    جـ. امتداد زوائد من أغشية خلايا العظم؛ لتساعدها على تبادل المواد.
    د. أن العظم مجوف من الداخل، والضغط المنخفض هناك يسحب السوائل من الدم؛ ليغذي خلايا العظم.

أسئلة تحدٍّ

1. تريدُ تصميم مركبة لاستكشاف الفضاء لاستخدامها على كوكب جاذبيته أعلى من جاذبية الأرض. فإذا خيِّرت بين نظام هيدروستاتيكي أو هيكل خلوي. فماذا تختار؟ لماذا؟
2. تبدأُ الركض بأسرع ما تستطيع. بعد ذلك تخفض السرعة إلى مستوى يمكن تحمله. كيف يحصل التحول في استهلاك مصادر الطاقة في العضلة خلال عملية التحول تلك؟ لماذا؟
3. يعمل غاز الأعصاب مثيل فسفونو حمض الفلوريديك (سارين) على تثبيط الأنزيم أسيتل كولين إستيريز، الضروري لتحطيم أسيتل كولين. اعتمادًا على هذه المعلومة، ما مدى أثر هذا الغاز في عمل الأعصاب؟

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