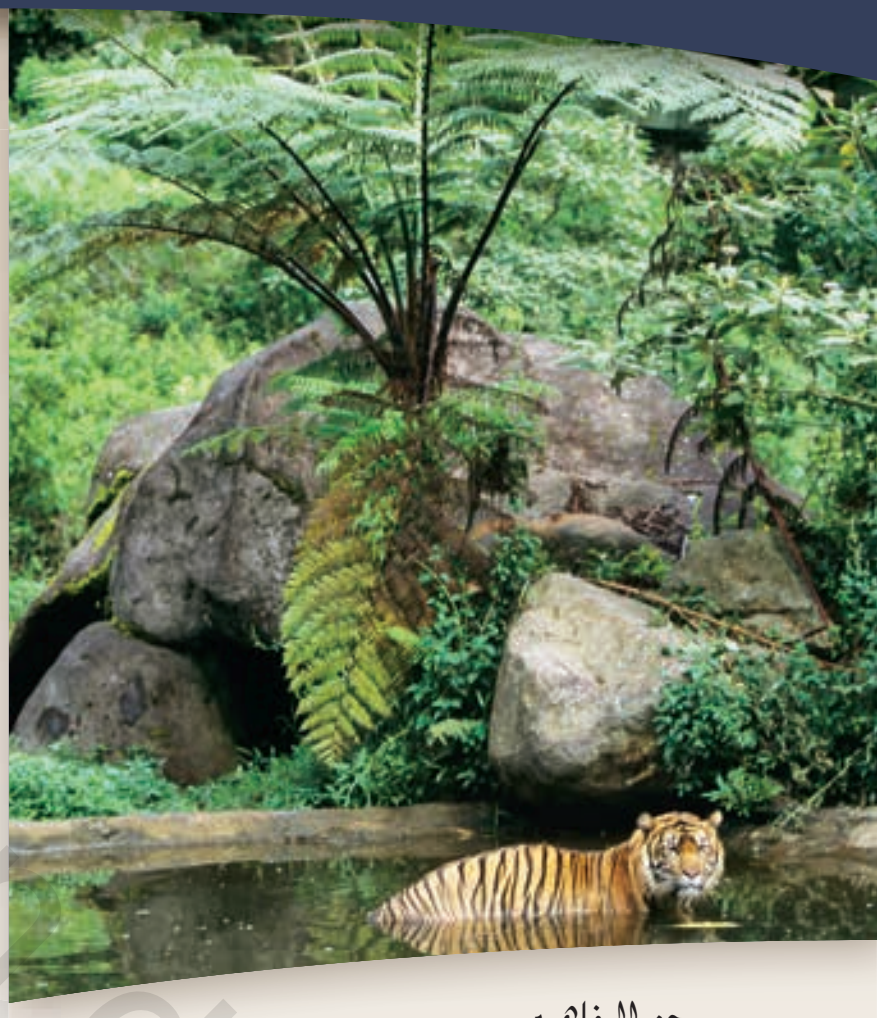
الفصل 57

ديناميكيّات الأنظمة الْبيئيّة

Dynamics of Ecosystems



موجز المفاهيم

57-1 الدَّورات الكيميائية الأرضية الحيوية (البيوجيوكيميائية)

- *المكونات الذَّرية للمادة تدور في الأنظمة الْبيئيّة.*
- *يدور الكربون، وهو أساس الْمركّبات الْعضويّة، عبر مُعظم الأنظمة الْبيئيّة.*
- *توفُّر الماء أساسي للنُّظم الْبيئيّة اليابسة.*
- *تعتمد دورة النيتروجين على تثبيته من قِبَل ميكروبات.*
- *تتم دورة الفوسفور خلال الأنظمة الْبيئيّة اليابسة والمائية، ولكن ليس خلال الغلاف الجوي.*
- *المواد الغذائية المُحدَّدة في الأنظمة الْبيئيّة هي التي تتوافر بكمية أقل من الحاجة إليها.*
- *تمَّت دراسة التدوير البيوجيوكيميائي في النِّظام البيئي للغابات تجريبيًّا.*

57-2 تدفق الطَّاقة في الأنظمة الْبيئيّة

- *الطَّاقة لا تفنى ولا تستحدث، ولكن تتحول من شكل إلى آخر.*
- *تستطيع المخلوقات الحية استخدام أشكال مُختلفة من الطَّاقة، ولكن ليس الحرارة.*
- *تتدفق الطَّاقة خلال المُستويات الغذائية للأنظمة الْبيئيّة.*
- *عدد المُستويات الغذائية يُحدِّده توافُر الطَّاقة.*
- *تُوضِّح الأهرام الْبيئيّة علاقة المُستويات الغذائية.*

مقدّمة

الأرضُ نظامٌ مُغلقٌ نسبيًّا بالنِّسبة إلى المواد الكيميائية. وهي نظام مفتوح بالنِّسبة إلى الطَّاقة، على كلّ حال، لأنَّها تستقبل الطَّاقة عند موجات مرئية، وقُرب مرئية من الشَّمس، وتُطلق بشكل ثابت طاقة حرارية إلى الفضاء الخارجي على شكل أشعة تحت حمراء. تتفاعل المخلوقات الحية في النِّظام البيئي بطريقة مُعقَّدة؛ حيثُ تُسهم في تدوير المواد الكيميائية عندما تلتقط الطَّاقة، وتستهلكها. تعتمد المخلوقات جميعها، ومن ضمنها البشر، على الإمكانات المُتخصِّصة للمخلوقات الأخرى- النباتات، والحيوانات، والطحالب، والفطريات وبدائيات النوى- للحصول على أساسيات الحياة، كما وُضِّح في هذا الفصل. في الفصلين 57 و58، سنلقي الضَّوء على الأنواع المُختلفة من الأنظمة البيئية التي تُكوِّن الغلاف الحيوي، وسنُناقش التَّهديدات التي تُواجه الغلاف الحيوي والأنواع الحية التي يحتويها.

57-3 تفاعلات المُستويات الغذائية

- *تحدث التَّأثيرات أعلى - أدنى عندما تُؤثِّر تغيُّراتٌ في أعلى مُستوى غذائي في المُنتجات الأولية.*
- *أدَّى إزالة الإنسان لآكلات اللُّحوم إلى تأثيرات أعلى-أدنى.*
- *تأثيرات أدنى-أعلى تحدث عندما تُؤثِّر تغيُّراتٌ في المُنتجات الأولية في مُستويات غذائية عُليا.*

57-4 التَّنوع الحيوي وثبات النِّظام البيئي

- *قد يزيد غنى الأنواع من الثَّبات: دراسات سيدار كريك.*
- *يتأثَّر غنى الأنواع بخصائص النِّظام البيئي.*
- *تتميَّز المناطق الاستوائيّة بأعلى تنوع، مع أنَّ الأسباب غير واضحة.*

57-5 الجغرافية الحيوية للجُزر

- *يقترح نموذج الثَّبات (الاتزان) أنَّ الانقراض والاستيطان يصلان إلى نقطة توازن.*
- *نموذج الثَّبات (الاتزان) ما زال قيد التَّجربة.*

1-57 الدَّورات الكيميائية الأرضية الحيوية (البيوجيوكيميائية)

يشمل النِّظام البيئي **Ecosystem** المخلوقات التي تعيش في مكان مُحدَّد جميعها، إضافة إلى البيئة غير الحية التي تعيش فيها- والتي تتفاعل معها- في ذلك المكان. الأنظمة الْبيئيّة هي ديناميكية بشكل حقيقي بطرق عدّة، بما في ذلك مُعالجتها للمادة والطَّاقة. وسنبدأ بالمادة.

المكونات الذَّرية للمادة تدور في الأنظمة الْبيئيّة

خلال العمليات الحيوية للمادة، تُحافظ الذَّرات المُكونة لها، مثل ذرات الكربون أو الأكسجين، على وحدتها حتى تتجمَّع لتُكوِّن مُركبات جديدة سوف تتحطم فيما بعد. تحتوي الأرض بشكل أساسي على عدد ثابت لكلّ نوع من الذَّرات التي لها أهمية حيوية، وهذه الذَّرات يتمُّ تدويرها.

كلّ مخلوق حي يتكون جسمه من ذرات كانت سابقًا في التُّربة، والغلاف الجوي، وأجزاء أخرى من البيئة غير الحيوية، أو في مخلوقات أخرى. وعندما يموت المخلوق، فإنّ ذراته تتحرر كما هي كي تُستخدم من قِبَل مخلوق آخر، أو تعود إلى البيئة غير الحية. وبسبب تدوير المُكونات الذَّرية للمادة، قد يكون جسمك مُكونًا من ذرة أكسجين أو كربون كانت جزءًا من جسم يوليوس قيصر أو كليوبترا.

يُقال: إنَّ ذرات العناصر الكيميائية المُختلفة تتحرَّك عبر النِّظام البيئي في **دورات بيوجيوكيميائية Biogeochemical cyles**، ويُؤكد هذا المُصطلح أنَّ دورات العنصر الكيميائية لا تحتاج فقط إلى مخلوقات حية وعمليات، بل أيضًا إلى أنظمة جيولوجية (غير حية) وعمليات. تشمل الدَّورات البيوجيوكيميائية عمليات تحدث على مقاييس مكانية عدَّة، من الخلوي إلى الكواكبي، وتشمل أيضًا عمليات تحدث على مقاييس زمنية مُتعدِّدة، من الثواني (مثل التفاعلات البيوكيميائية) إلى مئات القرون (مثل تجوية الصخور).

تعبُر الدَّورات البيوجيوكيميائية عادة حدود الأنظمة الْبيئيّة إلى حد ما، ولا تبقى محصورة في نظام بيئي واحد. فمثلًا، يُمكن لنظام بيئي واحد أن يستورد الكربون، ويصدره إلى الأنظمة الأخرى.

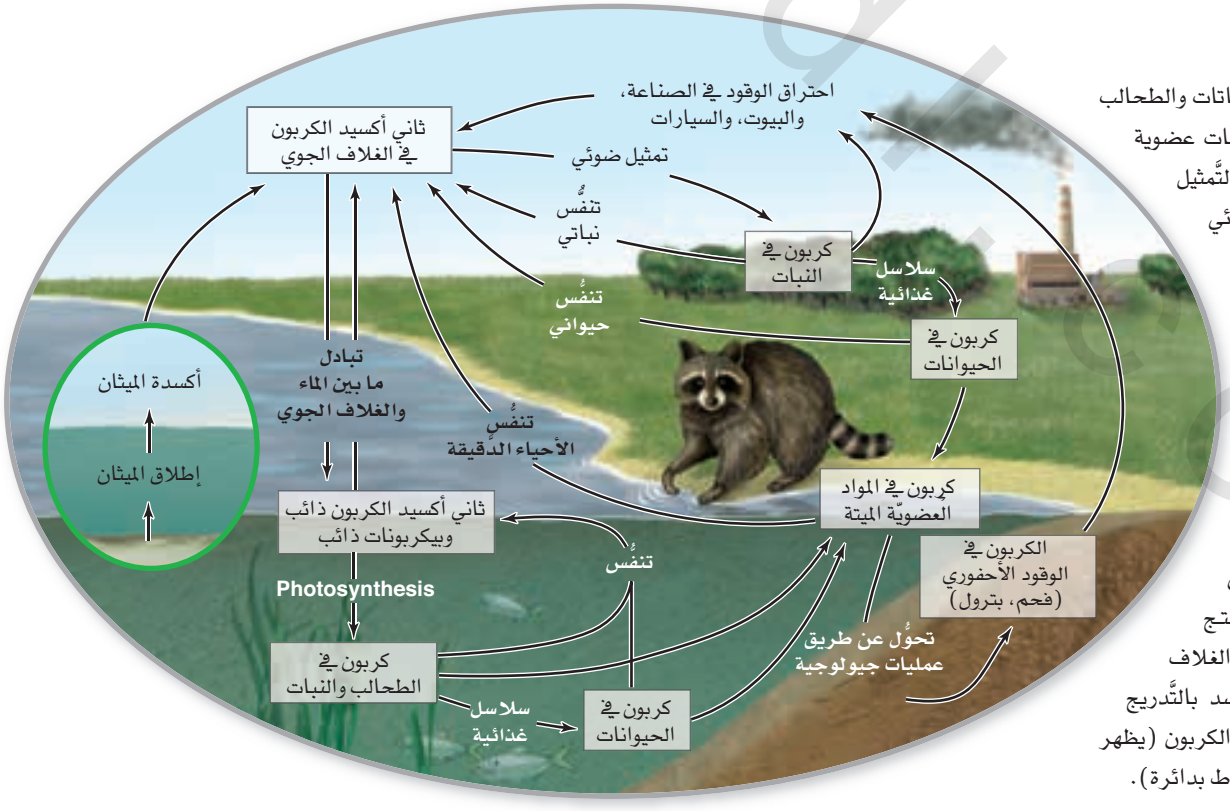
في هذا الجزء، سنأخذ في الحسبان دورات بعض أهم العناصر إضافة إلى الماء. وقد بيَّنا مثالًا على هذه الدوَّرات في النِّظام البيئي للغابات.

يدور الكربون، وهو أساس الْمركّبات الْعضويّة، عبر مُعظم الأنظمة الْبيئيّة

يُعدّ الكربون من أهم مُكونات أجسام المخلوقات الحية؛ لأنَّ ذراته تُساعد على تكوين هيكل الْمركّبات الْعضويّة جميعها (انظر الفصل الـ 3)؛ 20% من وزن جسم الإنسان تقريبًا كربون. ويُعدّ ثاني أكسيد الكربون أهم الْمركّبات المُحتوية على الكربون، في البيئة غير الحية للمخلوق. يشكل ثاني أكسيد الكربون 0.03% من حجم الغلاف الجوي، وهذا يعني أنَّ الغلاف الجوي يحتوي على 750 بليون طن متري من الكربون. أما في الأنظمة البيئية المائية، فيتفاعل ثاني أكسيد الكربون بشكل تلقائي مع الماء ليُكوِّن أيونات البيكربونات (HCO_3^-).

دورة الكربون الأساسية

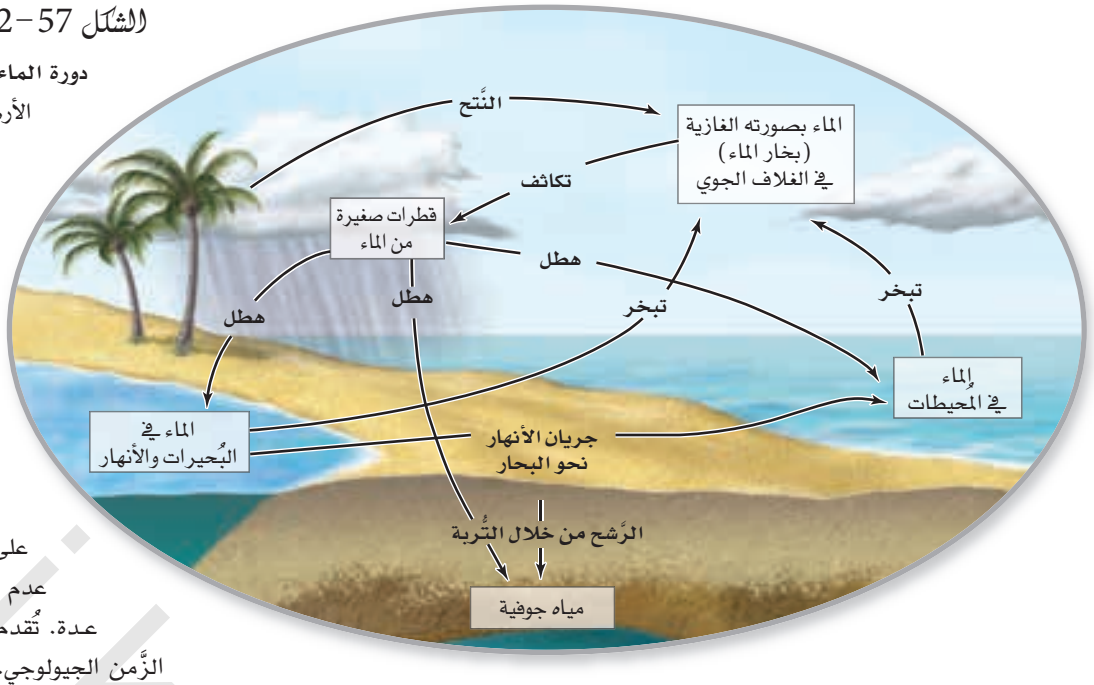
دورةُ الكربون هي دورة مُباشرةٌ، كما يظهر في (الشكل 57-1). في الأنظمة الْبيئيّة اليابسة، تأخذ النباتات ومخلوقات البناء الضّوئيّ الأخرى ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، وتستخدمه في البناء الضّوئيّ لتصنيع الْمركّبات الْعضويّة المحتوية على الكربون (انظر الفصل الـ 8). تُسمَّى هذه العملية أحيانًا **تثبيت الكربون Carbon fixation**؛ والتَّثبيت يعني تفاعلات الأيض التي تُكوِّن مُركبات غير غازية من مُركبات غازية.



الشكل 57-1

دورة الكربون. تُثبِّت النباتات والطحالب الكربون على شكل مُركبات عضوية كيميائية عن طريق التَّمثيل الضّوئيّ. التَّنفس الهوائي للمخلوقات الحية، وحرق الوقود من قبل الإنسان يُعيدان الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون وبيكربونات. الميكروبات الميثانية التي تعيش في بيئات خاصة خالية من الأكسجين، مثل الطِّين في قيعان البرك، تُنتج الميثان، وهو غاز يدخل الغلاف الجوي، ومن ثمَّ يتأكسد بالتَّدريج لاحيويًّا إلى ثاني أكسيد الكربون (يظهر في الشَّكل الأخضر المُحاط بدائرة).

الشكل 57-2



دورة الماء. يدور الماء من الغلاف الجوي إلى سطح الأرض، ويعود مرة أخرى. تُقدم الشَّمس مُعظم الطَّاقة اللازمة للتَّبخر.

تأكل الحيوانات مخلوقات البناء الضّوئيّ، وتبني أنسجتها عن طريق استخدام ذرات الكربون الموجودة في الْمركّبات الْعضويّة التي تهضمها. تحصل النباتات التي تقوم بعملية البناء الضّوئيّ والحيوانات على الطَّاقة خلال حياتها عن طريق تحطيم بعض الْمركّبات الْعضويّة المُتوافرة لها، خلال عملية التَّنفس الخلوي الهوائي (انظر الفصل الـ 7). عندما تفعل ذلك، فإنَّها تُنتج ثاني أكسيد الكربون. تُنتج المخلوقات المُحلِّلة ثاني أكسيد الكربون أيضًا. ذرات الكربون تعود إلى شكل ثاني أكسيدالكربون، وتُصبح مُتوافرة أكثر لتُستخدم في البناء الضّوئيّ لتصنيع مُركبات عضوية جديدة.

في الأنظمة الْبيئيّة المائية، تكون دورة الكربون بشكل أساسي مُشابهة لذلك، ما عدا أنَّ الكربون غير العضوي يُوجد في الماء ليس فقط على شكل ثاني أكسيد الكربون ذائب، وإنما على شكل أيونات البيكربونات (HCO_3^-) أيضًا، وكلاهما يعملان مصدرًا للكربون للبناء الضّوئيّ الذي تقوم به الطحالب والنباتات المائية.

مُنتجات الميثان

إنَّ الميكروبات التي تحطم الْمركّبات الْعضويّة عن طريق التَّنفس الخلوي اللاهوائي (انظر الفصل الـ 7) تُوفِّر بعدًا إضافيًّا لدورة الكربون الإجمالية. مُنتجات الميثان، مثلًا، هي ميكروبات تُنتج الميثان (CH_4) بدلًا من ثاني أكسيد الكربون. أحد أهم المصادر للميثان هو الأنظمة الْبيئيّة الرَّطبة، حيث تعيش مُنتِجات الميثان في رواسب خالية من الأكسجين. إنَّ الميثان الذي يدخل الغلاف الجوي يُؤكسد بطريقة غير حيوية إلى ثاني أكسيد الكربون، في حين يتمكن الميثان الذي يبقى معزولًا عن الأكسجين من البقاء مدة طويلة من الزَّمن.

ارتفاع ثاني أكسيد الكربون الجوي

هناك بُعد آخر لدورة الكربون الإجمالية، وهو أنَّه على طول الفترات الزَّمنية، تحدث الدَّورة بشكل أسرع في أحد الاتجاهات دون الاتجاهات الأخرى. هذه الاختلافات في المُعدَّل تُصبح في العادة أقل نسبيًّا من عام إلى آخر؛ ففي عام ما، تُطابق كمية ثاني أكسيد الكربون التي تُصنع عن طريق تحطيم الْمركّبات الْعضويّة تقريبًا كمية ثاني أكسيد الكربون المُستخدمة في تصنيع مُركبات عضوية جديدة.

على كلّ حال، يُمكن أن يكون لنسبة قليلة من عدم التَّطابق، تبعات كبيرة إذا استمرت سنوات عدة. تُقدم الأرض مخزون الفحم الذي تكوَّن خلال الزَّمن الجيولوجي. وتتراكم الْمركّبات الْعضويّة مثل السليلوز التي تكونت بشكل أسرع مما تحطمت، حيث تحوَّلت بعد ذلك إلى وقود أحفوري عن طريق العمليات الجيولوجية. يعتقد مُعظم العلماء أنَّ مخزون البترول العالمي قد نشأ بالطَّريقة نفسها.

إنَّ حرق الإنسان اليوم الوقود الأحفوري نجم عنه عدم اتزان مُعاصر في دورة الكربون. إن الكربون الذي احتاج إلى ملايين السنين ليتراكم، ويُشكِّل مخزون الوقود الأحفوري يُعاد بسرعة إلى الغلاف الجوي، مُؤديًا إلى ازدياد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عامًا بعد آخر ما يساعد على إثارة مخاوف ازدياد حرارة الكون (انظر الفصل الـ 58).

توفُّر الماء أساسي للنُّظم الْبيئيّة للبابسة

إنَّ دورة الماء المُوضَّحة في (الشَّكل 57-2) ربما هي الأكثر شيوعًا بين الدَّورات البيوجيوكيميائية جميعها. تعتمد الحياة كلّها على وجود الماء؛ حتى المخلوقات التي تستطيع البقاء دون ماء في حالات السُّكون تحتاج إلى الماء لاستعادة نشاطها. تتكوَّن أجسام مُعظم المخلوقات الحية بشكل أساسي من الماء. فمثلًا، يحتوي جسم الإنسان البالغ على 60% من الوزن الكلي ماءً. وتُحدِّد كمية الماء المُتاحة في النِّظام البيئي غالبًا طبيعة المخلوقات الحية الموجودة ووفرتها، كما هو مُوضَّح في الاختلاف بين الغابات والصحاري (الفصل الـ 58).

كلّ نوع من أنواع الدَّورة البيوجيوكيميائية له صفاته المُحدَّدة والمُميَّزة. الصفة المُميِّزة لدورة الماء هي أنَّ الماء جُزيء، وليس ذرة، ولذلك يُمكن له أن يتكوَّن، وأن يتحطم. يتكوَّن الماء خلال التَّنفس الخلوي الهوائي (انظر الفصل الـ 7)، ويتحطم خلال البناء الضّوئيّ (انظر الفصل الـ 8). مُعدَّلات هاتين العمليتين مُتساوية تقريبًا، ولذلك فإنّ كمية الماء التي تدور حول الغلاف الجوي ثابتة تقريبًا.

دورة الماء الأساسية

جزء مُهم من دورة الماء هو أنَّ الماء السَّائل يتبخر من سطح الأرض إلى الغلاف الجوي. ويحتاج التَّحول من الماء السائل إلى الغاز إلى كمية كبيرة من الطَّاقة الحرارية، وهذا يُفسِّر سبب تبخره بسرعة أكبر عندما تضرب أشعة الشَّمس سطح الأرض.

يحدث التَّبخر مُباشرة من سطوح المُحيطات، والبُحيرات، والأنهار. من ناحية أخرى، في الأنظمة اليابسة، يمرُّ 90% تقريبًا من الماء الذي يصل الغلاف الجوي خلال النباتات. تأخذ الأشجار، والأعشاب، والنباتات الأخرى الماء من التُّربة عن طريق جذورها، وبعد ذلك يتبخر الماء من أوراقها وسطوحها الأخرى خلال عملية تُسمَّى النَّتح (انظر الفصل الـ 38).

يوجد الماء المُتبخر في الغلاف الجوي على شكل غاز، مثل أي غاز جوي آخر. يُمكن للماء أن يتكاثف مرة أخرى إلى ماء سائل، غالبًا بسبب برودة الهواء. يُسبِّب تكاثف الماء الغازي (بُخار الماء) إلى قُطيرات أو بلورات تكوين الغيوم، ولكن إن كانت القُطيرات أو البلورات كبيرة بشكل كافٍ، فإنَّها تسقط على سطح الأرض على شكل هطل (مطر أو ثلج).

المياه الجوفية

هذه هي المياه الأقل وضوحًا من المياه السَّطحية، التي نراها في الأنهار والبُحيرات، إنَّها مياه تحت الأرض، ويُطلق عليها اسم **المياه الجوفية Ground water**. تُوجد المياه الجوفية في طبقة صخور تُدعى طبقة **الصخور المائية Aquifers**، وهي طبقات مسامية ونفَّاذة تحت الأرض من الصخور، والرِّمال، والحصباء تكون غالبًا مُشبعة بالماء. تُعَدُّ المياه الجوفية أهم مخزون للماء على الأرض في كثير من أجزاء العالم، حيث تُمثِّل أكثر من 95% من مجموع المياه العذبة في الولايات المُتحدَّة، مثلًا.

تتكوَّن المياه الجوفية من جزأين: أ. الطبقات العُليا من المياه الجوفية، وتُكوِّن مستوى الماء، الذي لا يكون محصورًا، وإنَّما يجري نحو الجداول، ويكون بشكل جزئي مُتوافرًا لجذور النباتات. ب. الطبقات السُّفلى المحصورة من المياه الجوفية التي تكون عادةً بعيدة عن الجداول وجذور النباتات، ولكن يُمكن استخراجها عن طريق الآبار. يتمُّ تزويد المياه الجوفية مرة أخرى بالماء الذي يرشح من الأعلى إلى الأسفل، من الهطل مثلًا. تتدفَّق المياه الجوفية بشكل أبطأ من المياه السَّطحية، من مليمترات إلى متر تقريبًا في كلّ يوم.

تُوفِّر المياه الجوفية في الولايات المُتحدَّة 25% من الماء الذي يستخدمه الإنسان لأغراضه كافة، وتُزود نحو 50% من السُّكان بمياه الشُّرب. في ولايات السُّهول العظيمة، حُفرت الصخور المائية العميقة التي تُدعى أوغالالا Ogallala بشكل مُكثَّف لأغراض الزِّراعة والاحتياجات البشرية الخاصة لدرجة أنَّ المياه الجوفية تُفرَّغ بشكل أكبر مما تُملأ – عدم اتزان محلِّي في دورة الماء – ما يُشكِّل تهديدًا مُنذرًا بالسُّوء على الإنتاج الزِّراعي في المنطقة. وتُواجه أجزاء كثيرة من الكرة الأرضية تهديدات مُماثلة.

التغيُّرات في الأنظمة الْبيئيّة سببها تغيُّرات في دورة الماء

يُعدّ الماء عاملًا مُهمًّا للحياة لدرجة أنَّ التَّغيُّرات في كمية الماء في نظام بيئي يُمكن لها أن تُغير طبيعة هذا النِّظام البيئي جذريًا. وقد حدثت مثل هذه التَّغيُّرات بكثرة خلال التَّاريخ الجيولوجي للأرض.

فمثلًا، يشتهر النِّظام البيئي في سهول سيرينجيتي Serengeti في تنزانيا، بسهول الحشائش على مدِّ البصر التي تستوطنها قطعان كثيرة من الغُزلان وآكلات العُشب الأخرى. كانت الغابات العُشبية شبه الجافة الحالية لسيرينجيتي غابات مطرية قبل 25 مليون سنة مضت. بدءًا من ذلك الوقت تقريبًا، نشأت جبال مثل جبال كليمنجارو بين الغابات المطرية والمُحيط الهندي الذي يشكل مصدر الرُّطوبة للغابات المطرية. إنَّ نشوء الجبال أجبر الرِّياح القادمة من المُحيط الهندي أن ترتفع إلى الأعلى، ومن ثم تبريد الهواء ما أدَّى إلى هطل مُعظم الرُّطوبة التي في الهواء قبل أن تصل الغابات المطرية. فأصبحت الأرض أكثر جفافًا، وتحوَّلت الغابات إلى مروج حشائش.

في هذه الأيام، يُمكن لأنشطة الأنسان أن تُغيِّر في دورة الماء التي تسبِّب التَّغيُّرات التي تحدث في الأنظمة الْبيئيّة. إن التَّغيُّرات التي حدثت في الغابات المطرية بسبب عمليات قطع الأشجار تزوِّدنا بمثال على ذلك. ففي الغابات الاستوائيّة السليمة، أكثر من 90% من الرُّطوبة التي تهطل على شكل مطر يأخذها النبات، ثم يُعيدها إلى الهواء عن طريق النَّتح. بمعنى آخر، تقوم النباتات بتكوين مطرها الخاص بها. الرُّطوبة التي تُعيدها الأشجار إلى الغلاف الجوي تسقط مرة أخرى على الغابات من جديد.

عندما تقوم جماعات البشر بقطع الغابات المطرية وحرقها في منطقة ما، فإنّ دورة الماء تتحطم وتنهار. فالماء الذي يسقط على شكل مطر يُصرف بعد ذلك بعيدًا إلى الأنهار بدلًا من الارتفاع إلى الأعلى لتشكيل الغيوم والسُّقوط مرة أخرى على الغابات. مثل هذا التَّغيير يحدث اليوم في كثير من الغابات الاستوائيّة المطرية (الشكل 57–3). فمثلًا، تحوَّلت مناطق واسعة من البرازيل في القرن العشرين من غابات استوائية فريدة إلى صحراء شبه جافة، ما حرم الكثير من الحيوانات والنباتات الفريدة من موطنها الطبيعي.

تعتمد دورة النيتروجين على تثبيته من قِبَل ميكروبات

يُكوِّن النيتروجين جميع البروتينات والأحماض النووية، وهو أساس تحتاج إليه المخلوقات جميعها؛ تتكوَّن البروتينات من 16% من وزنها نيتروجينًا. في كثير من الأنظمة الْبيئيّة، يُعدّ النيتروجين من العناصر الأقل وجودًا (توافرًا) بالنِّسبة إلى حاجات المخلوق الحي. وهذا تناقُض؛ لأنَّ 78% من حجم الغلاف الجوي هو نيتروجين.

الشكل 57–3

تُعيق إزالة الغابات الدَّورة المحلية للماء. إزالة الغابات الاستوائيّة يُمكن أن يكون لها عواقب وخيمة، بسبب عمليات التَّعرية، كما يبدو في هذه المنطقة المُعرَّاة من غابات منطقة الأمازون في البرازيل.

توافر النيتروجين

كيف يُمكن أن يكون هناك نقص بالنيتروجين مع أنَّ الغلاف الجوي غني جدًا به؟ الجواب هو أنَّ النيتروجين في الغلاف الجوي عنصري الشَّكل - جزيئات من غاز عنصر النيتروجين (N_2) - ولا يستطيع عدد واسع من المخلوقات، بما في ذلك النباتات والحيوانات جميعها، استعماله بشكله الكيميائي هذا.

بالنِّسبة للحيوانات، الشَّكل الذي يُمكن الاستفادة منه من النيتروجين هو الْمركّبات الْعضويّة المُحتوية على النيتروجين، والتي يتمُّ تصنيعها في النباتات، أو الطحالب، أو الأحياء الدَّقيقة الأخرى. تأكل الحيوانات آكلة الأعشاب، مثلًا، بروتينات نباتية أو طحلبية، وتستخدم الأحماض الأمينية المُحتوية على النيتروجين لتصنيع بروتيناتها الخاصة بها.

تستعمل الطَّحالب والنباتات عددًا من الْمركّبات البسيطة المُحتوية على النيتروجين كمصادر للنيتروجين لتصنيع البروتينات والْمركّبات الْعضويّة الأخرى المُحتوية على النيتروجين في أنسجتها. يُستخدم مصدران شائعان للنيتروجين وهما الأمونيا (NH_3) وأيونات النيترات (NO_3^-). كما سبق وتحدثنا في الفصل 39، يُمكن لبعض الميكروبات بدائية النوى أن تصنع الأمونيا والنيترات من غاز النيتروجين في الغلاف الجوي، وبهذا تُشكِّل جزءًا من دورة النيتروجين التي تجعل النيتروجين الجوي مُتوافرًا للنباتات والطَّحالب (الشكل 57-4). وتُحوِّل مخلوقات بدائية النوى أخرى NH_3 و NO_3^- إلى N_2 جاعلةً النيتروجين غير مُتوافر مرة أخرى. الاتزان في نشاطات هاتين المجموعتين من بدائيات النوى يُحدِّد توافر النيتروجين (N_2) للنباتات والطَّحالب.

تثبيت النيتروجين الميكروبي والنترتة واللانترتة

تُعرف عملية تكوين الْمركّبات المُحتوية على النيتروجين من N_2 بعملية **تثبيت النيتروجين Nitrogen fixation**. الخطوة الأولى في هذه العملية هي تصنيع الأمونيا من النيتروجين N_2، ويستعمل العلماء تعبير "تثبيت النيتروجين" لهذه الخطوة بالتَّحديد. تقوم ميكروبات أخرى بأكسدة جزء من NH_3، إلى أيونات النيترات NO_3^-، بعملية تُدعى **النَّترتة Nitrification**.

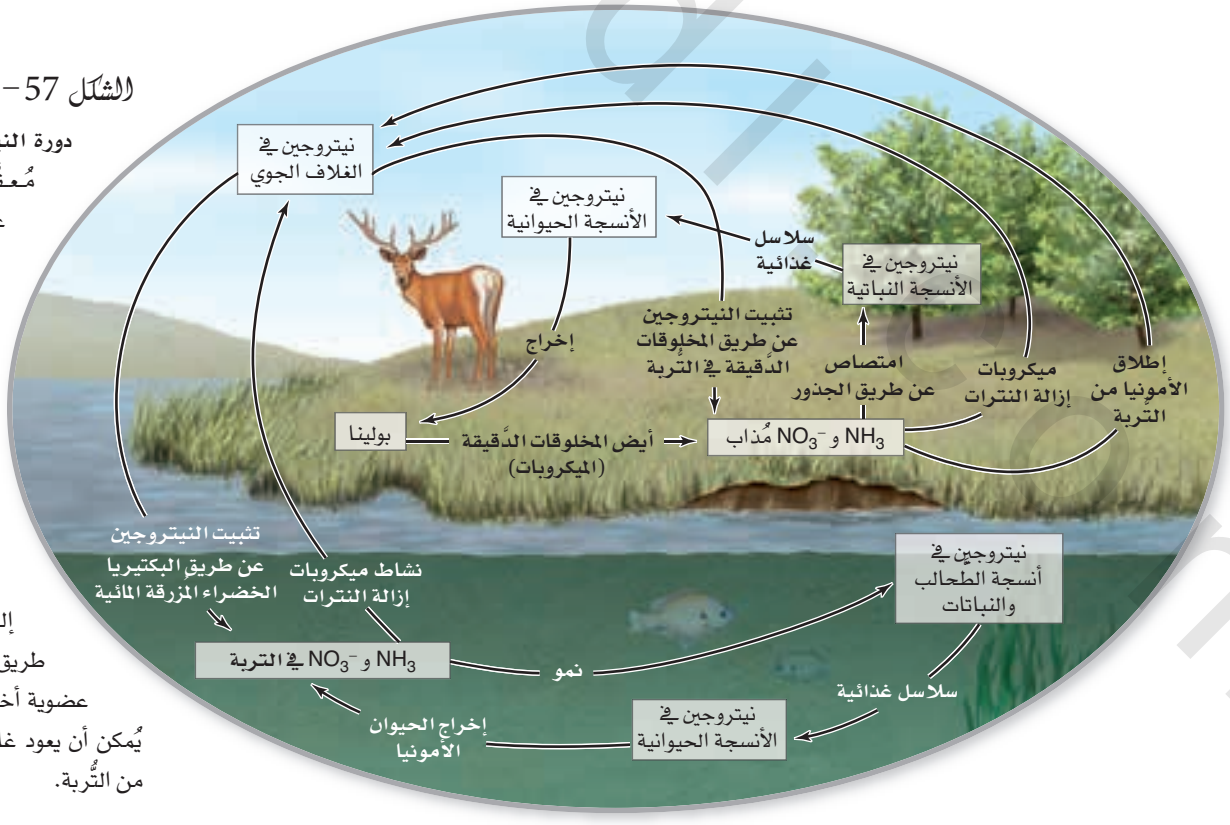
تُثبِّت بعض أجناس الميكروبات النيتروجين عن طريق نظام من الأنزيمات يعرف بمُعقّد محلل النيتروجين (النيتروجينيز) (مُعقّد جين *nif*؛ الفصل الـ 28). مُعظم الميكروبات حُرَّة المعيشة، ولكن يعيش بعضها على اليابسة معيشة تكافلية مع جذور البقوليات (نباتات من العائلة البقولية)، والآس، وجار الماء، ونباتات أخرى.

ميكروبات أخرى بدائية النوى (تشمل البكتيريا والبكتيريا القديمة) قادرة على تحويل النيتروجين الموجود في النترات NO_3^- إلى N_2 (أو غازات النيتروجين الأخرى مثل N_2O)، وهذه العملية تُسمّى **إزالة النترتة Denitrification**. تهيئ الأمونيا لعملية إزالة النترتة بشكل غير مُباشر بتحويلها أولًا إلى NO_3^- ثُمَّ إلى N_2.

الفضلات النيتروجينية واستخدام الأسمدة

تُخرج مُعظم الحيوانات، عندما تُفكِّك البروتينات في عملياتها الأيض، النيتروجين من البروتينات على شكل أمونيا NH_3. يتخلَّص الإنسان والثدييات الأخرى من النيتروجين على شكل بولينا (يوريا) في البول (انظر الفصل الـ 50)؛ وتُحوِّل أنواع مُتعدِّدة من الميكروبات البولينا إلى أمونيا NH_3. والأمونيا التي تُلتقط من فضلات الحيوانات تأخذها النباتات والطَّحالب بوصفها مصدرًا للنيتروجين.

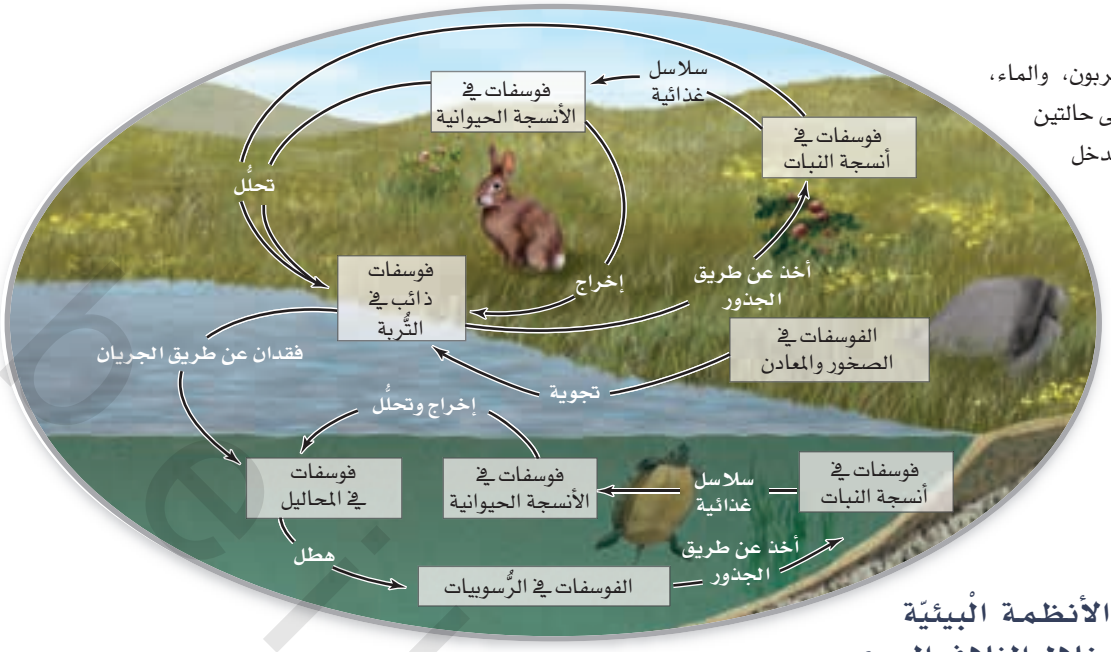
تُؤثِّر جماعات الإنسان بشكل جذري في دورة النيتروجين الإجمالية باستخدام الأسمدة في حقول الزِّراعة والمروج الخضراء. تحتوي الأسمدة على أشكال من النيتروجين المُثبت الذي تستخدمه المحاصيل، مثل أملاح الأمونيوم (NH_4) المُنتج صناعيًّا من N_2 الموجود في الغلاف الجوي. وبسبب إنتاج الأسمدة، جزئيًّا، ضاعف الإنسان نسبة تحويل النيتروجين إلى أشكال يُمكن استخدامها في التُّربة والماء.



الشكل 57-4

دورة النيتروجين. دورة النيتروجين مُعقَّدة لأنها تتطلَّب تغيُّرات عدَّة في الشَّكل الكيميائي للنيتروجين. تثُبِّت بعض بدائيات النوى النيتروجين الجوي (N_2)، مُحوِّلةً إياه إلى أمونيا (NH_3) ونترات (NO_3^-) يُمكن أن يستعملها النبات. بدائيات نوى أخرى تُعيد النيتروجين إلى الجو على الشكل N_2 عن طريق تحطيم NH_3 أو مُركبات عضوية أخرى تحتوي على النيتروجين. يُمكن أن يعود غاز الأمونيا إلى الجو مُباشرة من التُّربة.

الشكل 57-5



دورة الفوسفور. بالمقارنة مع الكربون، والماء، والنيتروجين، فإنّ الفوسفور يوجد على حالتين فقط: سائلة وصلبة، ولذلك لا يدخل الغلاف الجوي.

تتم دورة الفوسفور خلال الأنظمة الْبيئيّة اليابسة والمائية، ولكن ليس خلال الغلاف الجوي

تحتاج المخلوقات جميعها إلى الفوسفور بكميات أساسية؛ يُوجد الفوسفور في الحمض النَّووي، والدهون المُفسفرة الموجودة في الأغشية، ومُركبات مهمة أخرى، مثل أدينين ثلاثي الفوسفات (ATP).

ليس للفوسفور شكل غازي، ولا يدور خلال الغلاف الجوي بخلاف الكربون، والماء، والنيتروجين، (الشكل 57-5). لهذا، تُمثِّل دورة الفوسفور نوعًا من الدَّورات يبديها أيضًا الكالسيوم، والسليكون، والكثير من المعادن. خاصية أخرى تُبسِّط كثيرًا دورة الفوسفور مُقارنةً بدورة النيتروجين، وهي أنَّ الفوسفور يُوجد في الأنظمة الْبيئيّة بحالة تأكسد وحيدة، وهي الفوسفات (PO_4^{3-}).

وجود الفوسفات

تستخدم النباتات والطَّحالب الفوسفات الحر غير العضوي PO_4^{3-} في التربة أو الماء لتصنيع مُركباتها المُحتوية على الفوسفور. تقوم الحيوانات بعد ذلك باستخلاص الفوسفور الموجود في الْمركّبات الموجودة في أنسجة النباتات أو الطَّحالب لبناء مُركباتها الفوسفورية. عندما تموت المخلوقات، تحطّم الميكروباتُ المُحلِّلة – في عملية تُسمَّى إعادة تعدين الفوسفات– الْمركّباتِ الْعضويّة في أجسام المخلوقات الميتة، فينطلق الفوسفور على شكل فوسفات غير عضوي PO_4^{3-} تستخدمه النباتات والطَّحالب مرة أخرى.

تضم دورة الفوسفور عمليات لاحيوية كيميائية وفيزيائية. يُوجد الفوسفات الحر PO_4^{3-} في التربة فقط بتراكيز قليلة؛ أولًا، لأنَّه يتَّحد مع مُكوِّنات التُّربة الأخرى، ليُشكل مُركبات غير ذائبة، وثانيًا، لأنَّه يميل إلى أن يُغسل بعيدًا عن طريق الجداول والأنهار. بالتَّجوية لأنواع كثيرة من الصُّخور، يتمُّ إطلاق الفوسفات الأيوني مُجددًا في الأنظمة الْبيئيّة اليابسة، ولكن بعد أن تحمل الأنهار هذه الأيونات إلى المُحيطات. هناك تدفُّق في اتجاه واحد لأيونات الفوسفات من صخور اليابسة إلى ترسبات البحر العميقة.

استخدام الفوسفات سمادًا

تُغيِّر أنشطة الإنسان كثيرًا في دورة الفوسفور الإجمالية بتسميد المحاصيل الزِّراعية. صُمِّمت الأسمدة بشكل نموذجي لتوفير PO_4^{3-} لكي لا تجد المحاصيل نقصًا فيه؛ الفوسفات PO_4^{3-} الموجود في الأسمدة مُشتق بشكل نموذجي من الصخور الغنية بالفوسفات والمُتفتِّتة ومن العظام. تُعدّ المُنظفات مُتهمًا مُحتملًا آخر يضيف PO_4^{3-} إلى الأنظمة الْبيئيّة، ولكن القوانين تُجبر على استخدام مُنظفات قليلة الفوسفات في مناطق مُختلفة من العالم.

المواد الغذائية المُحدَّدة في الأنظمة الْبيئيّة هي التي تتوافر بكمية أقل من الحاجة إليها

تحتاج النباتات والطَّحالب لكي تنمو في النِّظام البيئي – وتُوفِّر بذلك الغذاء للحيوانات – إلى الكثير من العناصر الكيميائية المُختلفة. أبسط نظرية هي أنّه في نظام بيئي مُعيَّن، سيكون عنصر ما مُتوافرًا بشكل قليل بالنِّسبة إلى الحاجة إليه من قِبَل النباتات والطَّحالب. هذا العنصر يُعدّ **عنصرًا غذائيًا مُحدِّدًا Limiting nutrient**–وهو الحلقة الأضعف – في النِّظام البيئي.

إن دورة المواد الغذائية المُحدِّدة مُهمة بشكل خاص؛ لأنَّها تُحدِّد المُعدَّل الذي تُصبح عنده المواد الغذائية مُتاحة للاستخدام. لقد أعطينا اهتمامًا خاصًّا لدورات النيتروجين والفوسفور؛ لأنَّ هذه العناصر مواد غذائية مُحدِّدة في مُعظم الأنظمة الْبيئيّة. النيتروجين مادة غذائية مُحدَّدة في ثُلثي المُحيطات تقريبًا والكثير من الأنظمة الْبيئيّة لليابسة.

اكتشف علماء المُحيطات في السنوات الخمس عشرة الأخيرة فقط أنَّ الحديد عنصر غذائي مُحدِّد لجماعات الطَّحالب (عوالق نباتية) في ثُلث المُحيطات في العالم تقريبًا. في هذه المياه، يظهر أنَّ غبار الأتربة المُتولد عن الريح في الغالب هو المصدر الرئيس للحديد. فعندما تُحضر الريح غبارًا غنيًّا بالحديد، تنمو جماعات الطَّحالب وتتكاثر، ما يشير إلى أنَّ الحديد بشكله الكيميائي المُفيد. بهذه الطَّريقة، تستطيع العواصف الرَّملية في الصحراء الكبرى، عبر زيادة كمية الغُبار في الريح الإجمالية، من زيادة إنتاجية الطَّحالب في مياه المُحيط الهادي (الشكل 57-6).

تمَّت دراسة التَّدوير البيوجيوكيميائي في النِّظام البيئي للغابات تجريبيًّا

زوَّدتنا سلسلة من الدِّراسات في غابة هبارد بروك التَّجريبية في نيوهامبشاير بالكثير من النتائج المُتوافرة حول تدوير العناصر الغذائية في النِّظام البيئي للغابات. هبارد بروك هو جدول مركزي لتجمُّع مطري كبير ينساب على جوانب

الشكل 57-6

عالم واحد. يتمُّ حمل ملايين الأطنان المترية من الغبار الغني بالحديد في كلّ عام نحو الغرب عن طريق الرِّياح التِّجارية من الصحراء الكبرى ومناطق السَّاحل المُجاورة. الفرضية المعروفة من قِبَلِ علماء المُحيطات هي أنَّ هذا الغبار يُسمِّد أجزاء من المُحيط، ومن ضمنها أجزاء من المُحيط الهادي، حيث يُعدّ الحديد عنصرًا غذائيًّا مُحدِّدًا. استعمالات الأراضي في إفريقيا، التي تزيد من مساحة صحراء شمال إفريقيا، تستطيع أن تُؤثر في النِّظام البيئي في الجهة الأخرى من الكرة الأرضية.

سلسلة جبال مُغطاة بغابة مُعتدلة مُتساقطة الأوراق. تحمل جداول عدَّة رافدة الماء من المُرتفعات إلى منطقة هبارد بروك.

زُوِّد كلّ من ستة جداول رافدة، يجري كلّ منها بوادٍ مُعين، بأدوات قياس عند بداية الدِّراسة. كلّ المياه التي تجري في كلّ وادٍ كانت تمرُّ عبر نظام القياسات، حيث يُقاس جريان الماء وتراكيز المواد الغذائية.

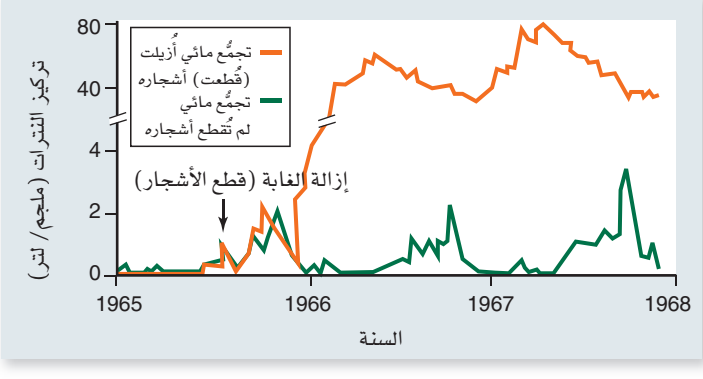
وَفْقَ القياسات التي أجراها العلماء، كانت الغابات غير المُنتهكة حول هبارد بروك فعالة جدًا في الاحتفاظ بالمواد الغذائية؛ فخلال عام واحد، كانت كميات قليلة فقط من المواد الغذائية تدخل الجدول من الخارج، وغالبًا بسبب الهطل. كمية العناصر الغذائية التي تحملها جداول الماء كانت قليلة أيضًا. عندما نقول: "قليلة"، فإننا نعني دخول العناصر وخروجها يُمثِّل أجزاء طفيفة من مجموع كميات العناصر الغذائية في النِّظام، نحو 1% في حالة الكالسيوم، مثلًا.

في عامي 1965 و 1966، قام الباحثون بقطع الأشجار كلّها، وإزالة الشُّجيرات جميعها من واحد من الأودية الستة، ومنعوا إعادة نمو الأشجار والشجيرات (الشكل 57-7 أ). كانت الآثار مأساوية. لقد ازدادت كمية المياه التي تجري في ذلك الوادي بنسبة 40%، مُشيرًا إلى أنَّ المياه التي كانت تأخذها النباتات سابقًا، وتتبخر إلى الجو أصبحت الآن تجري في الأودية. وازدادت كميات كثير من المواد الغذائية التي تجري خارج النِّظام البيئي أيضًا. فمثلًا، ازداد مُعدَّل فقدان الكالسيوم 9 أضعاف. الفوسفور، من جهة ثانية، لم يزدد في مياه الجدول؛ ولكنَّه على ما يبدو ارتبط مع مُركبات غير ذائبة في التربة.

إنَّ التَّغيُّر في حالة النيتروجين في الوادي المُضطرب كان مُدهشًا بشكل خاص (الشكل 57-7 ب). راكمت الغابات غير المُضطربة في هذا الوادي النيترات (NO_3^-) بمُعدَّل 5 كجم تقريبًا لكلّ هكتار لكلّ سنة، ولكن في النِّظام البيئي منزوع الغابات، فقد كان فقد النيترات بمُعدَّل 53 كجم لكلّ هكتار لكلّ سنة تقريبًا. وازداد تركيز النترات في مياه الجدول بشكل سريع. وتناقصت خصوبة الوادي بشكل مأساوي، عندما ولّد جريان النترات نموًّا كبيرًا ومُفاجئًا للطَّحالب أسفل الجدول، ومن ثم ازداد خطر الفيضانات هناك.

لقد كانت هذه التَّجربة مُفيدة بشكل مُحدد وبناءة في مطلع القرن الواحد والعشرين؛ لأنَّ أراضي الغابات تستمر إزالتها حول العالم (انظر الفصل الـ 58).

الذَّرات المُكونة للمادة يُعاد تدويرها بين أنسجة المخلوقات والبيئة اللاحيوية، مثل الغلاف الجوي أو التربة. تُدعى إعادة التَّدوير هذه في الدَّورة البيوجيوكيميائية. تدور عناصر الكربون، والنيتروجين، والفوسفور بطرق معروفة، وكذلك الماء، المُهم للأنظمة البيئيّة. تُؤثر أنشطة الجماعات السكانية مُتزايدة العدد في معدلات كثيرة، مثل مُعدَّل إضافة ثاني أكسيد الكربون للغلاف الجوي.



ب.

أ.

الشكل 57-7

تجربة هبارد بروك. أ. قطعت الأشجار بشكل كامل حول تجمُّع لمياه الأمطار مساحته 38 دونمًا، وتمَّت مُراقبة الجريان سنوات عدّة. ب. زادت إزالة الغابات بشكل كبير من فقدان المواد الغذائية في المياه الجارية من النِّظام البيئي. المنحنى البُرتقالي يُظهر تركيز النترات في المياه الجارية من التَّجمُّع المائي المقطوعة أشجاره؛ المُنحنى الأخضر يُظهر تركيز النترات في المياه الجارية من التَّجمُّع المائي المُجاور الذي لم تُقطع الأشجار عنده.

2-57 تدفُّق الطَّاقة في الأنظمة الْبيئيّة

تشمل الطَّبيعة الدِّيناميكية للأنظمة الْبيئيّة مُعالجة الطَّاقة وكذلك المادة. تتبع الطَّاقة، على كلّ حال، مبادئ مُختلفة كثيرًا عن التي تتبعها المادة. الطَّاقة لا يتمُّ إعادة تدويرها. بدلًا من ذلك، تعبر الطَّاقة المُنبعثة عن الشَّمس التي تصل الأرض الأنظمة الْبيئيّة لكوكبنا في اتجاه واحد، قبل أن يتمَّ تحويلها إلى حرارة، وبعثها مرة أخرى في الفضاء، ما يعني أنَّ الأرضَ نظامٌ مفتوحٌ للطَّاقة.

الطَّاقة لا تفنى ولا تستحدث ولكن تتحول من شكل إلى آخر

لماذا تختلف الطَّاقة عن المادة؟ جزء مُهم من الإجابة هو أنَّ الطَّاقة توجد في أشكال عدَّة، مثل الضّوء، وطاقة الرّوابط الكيميائية، وطاقة الحركة، والطَّاقة الحرارية. وعلى الرَّغم من أنَّ الطَّاقة لا تفنى، ولا تستحدث في الغلاف الجوي (القانون الأول للدِّينامكا الحرارية)، لكنها غالبًا تُغيِّر شكلها.

النقطة المهمة الثانية هي أنَّ المخلوقات لا تستطيع تحويل الحرارة إلى شكل من أشكال الطَّاقة. لذلك، إذا حوَّلت المخلوقات بعض طاقة الرّوابط الكيميائية، أو الطَّاقة الضّوئيّة إلى حرارة، فإنّ هذا التَّحويل يسير في اتجاه واحد؛ لأنَّها (أي المخلوقات) لا تستطيع إعادة تدوير هذه الطَّاقة مرة أخرى إلى شكلها الأصلي.

تستطيع المخلوقات الحية استخدام أشكال مُختلفة من الطَّاقة، ولكن ليس الحرارة

حتى نفهم لماذا يجب أن تعمل الأرض بوصفها نظامًا مفتوحًا بالنِّسبة إلى الطَّاقة، يجب أن نعرف مبدأين إضافيين: الأول، أنَّ المخلوق يستطيع استخدام أنواع مُعينة من الطَّاقة. مثلًا، لتعيش الحيوانات، يجب أن تمتلك طاقة بشكل خاص على شكل طاقة الرّوابط الكيميائية، التي يحصل عليها من غذائه. والنباتات يجب أن تحصل على الطَّاقة على شكل ضوء. ولا تستطيع الحيوانات ولا النباتات (ولا أي مخلوق آخر) استعمال الحرارة مصدر طاقة لتبقى على قيد الحياة. والمبدأ الثاني، عندما تستعمل المخلوقات الحية طاقة الرَّبط الكيميائية أو الضّوء، يتحوَّل بعضها إلى حرارة؛ ينص القانون الثاني للدِّينامكا الحرارية على أنَّ التَّحول الجزئي إلى حرارة لا يُمكن تجنُّبه. بصيغة أخرى، يحتاج الحيوان والنبات إلى طاقة الرّوابط الكيميائية والضّوء للبقاء على قيد الحياة، ولكن عند استعمالهما لتلك الأنواع من الطَّاقة، فإنَّهما يحولانها إلى حرارة، ولكن لا يستعملانها للبقاء على قيد الحياة، ولا يستطيعان إعادة تدويرها إلى أشكالها الأصلية.

لحسن الحظ بالنِّسبة إلى المخلوقات الحية، تعمل الأرض بوصفها نظامًا مفتوحًا للطَّاقة. يصل الضّوء كلّ يوم من الشَّمس إلى الأرض. تستخدم النباتاتُ ومخلوقاتُ التَّمثيلِ الضّوئيِّ الأخرى الضّوءَ الجديد الواصل، فتستفيد منه في تصنيع طاقة الرّوابط الكيميائية في مُركباتها الْعضويّة لتبقى على قيد الحياة. يتحوَّل الضّوء وطاقة الرّوابط الكيميائية بشكل جزئي إلى حرارة في كلّ خطوة. في الحقيقة، يتمُّ تحويل الضّوء والطَّاقة الكيميائية إلى حرارة بشكل كامل في النِّهاية. وتُغادر الحرارة الأرض مُنبعثة على شكل أطوال موجية غير مرئية، تحت حمراء من الطَّيف الكهرومغناطيسي. ولكي تستمر الحياة، تحتاج دائمًا إلى طاقة ضوئية جديدة.

يجب أن تكون تدفقات الطَّاقة المُنبعثة القادمة إلى الأرض والمُغادرة لها مُتوازنة لكي تبقى درجة حرارة الأرض ثابتة. أحد التَّحذيرات هو أنَّ أنشطة الإنسان تُغيِّر تركيب الغلاف الجوي بطرق تُعيق التَّدفق المُغادر، يُسمَّى هذا تأثير البيت الزُّجاجي *Greenhouse effect* المذكور في الفصل المقبل. قد تتراكم الحرارة على الأرض، مُسببة الارتفاع الحراري العالمي أو الدفيئة العالمية (انظر الفصل الـ 58).

تتدفق الطَّاقة خلال المُستويات الغذائية للأنظمة الْبيئيّة

في الفصل الـ 7، تعرَّفنا مفهومَ ذاتية التَّغذية وعضوية التَّغذية ("تتغذى على الآخرين"). تصنع **ذاتية التَّغذية Autotrophs** الْمركّبات الْعضويّة المُكوِّنة لأجسامها من أصول غير عضوية مثل ثاني أكسيد الكربون، والماء، و NO_3^- باستخدام طاقة من مصادر غير حيوية. تستعمل بعض ذاتية التَّغذية الضّوء مصدر طاقة لها. لهذا، فهي **ذاتية التَّغذية ضوئية Photoautotrophs**؛ إنَّها المخلوقات التي تقوم بالتَّمثيل الضّوئيّ، مثل: النباتات، والطَّحالب، والبكتيريا الخضراء المُزرقة. وتحصل ذاتية تغذية أخرى هي **ذاتية تغذية كيميائية Chemourutotrophs** على الطَّاقة عن طريق تفاعلات أكسدة غير عضوية، مثل: الميكروبات التي تستخدم كبريتيد الهيدروجين المُتوافر في المياه العميقة (انظر الفصل الـ 58). كلّ ذاتية التَّغذية الكيميائية هي بدائية النواة. ذاتية التَّغذية الضّوئيّة هي أكثر المخلوقات أهمية في مُعظم الأنظمة الْبيئيّة، سنركّز عليها فيما تبقى من هذا الفصل.

عضويةُ التَّغذيةِ Heterotrophs مخلوقاتٌ لا تستطيع صنع المواد الْعضويّة من خامات غير عضوية، ولكن بدلًا من ذلك تأخذ الْمركّبات الْعضويّة التي صنعتها مخلوقات أخرى. إنها تحصل على الطَّاقة التي تلزمها للحياة عن طريق تحطيم الْمركّبات الْعضويّة المُتوافرة لها، مُطلقةً بذلك طاقة الروابط الكيميائية لأغراض الأيض (انظر الفصل الـ 7). الحيواناتُ، والفطرياتُ، وكثير من الميكروبات مخلوقاتٌ عضويةُ التَّغذيةِ.

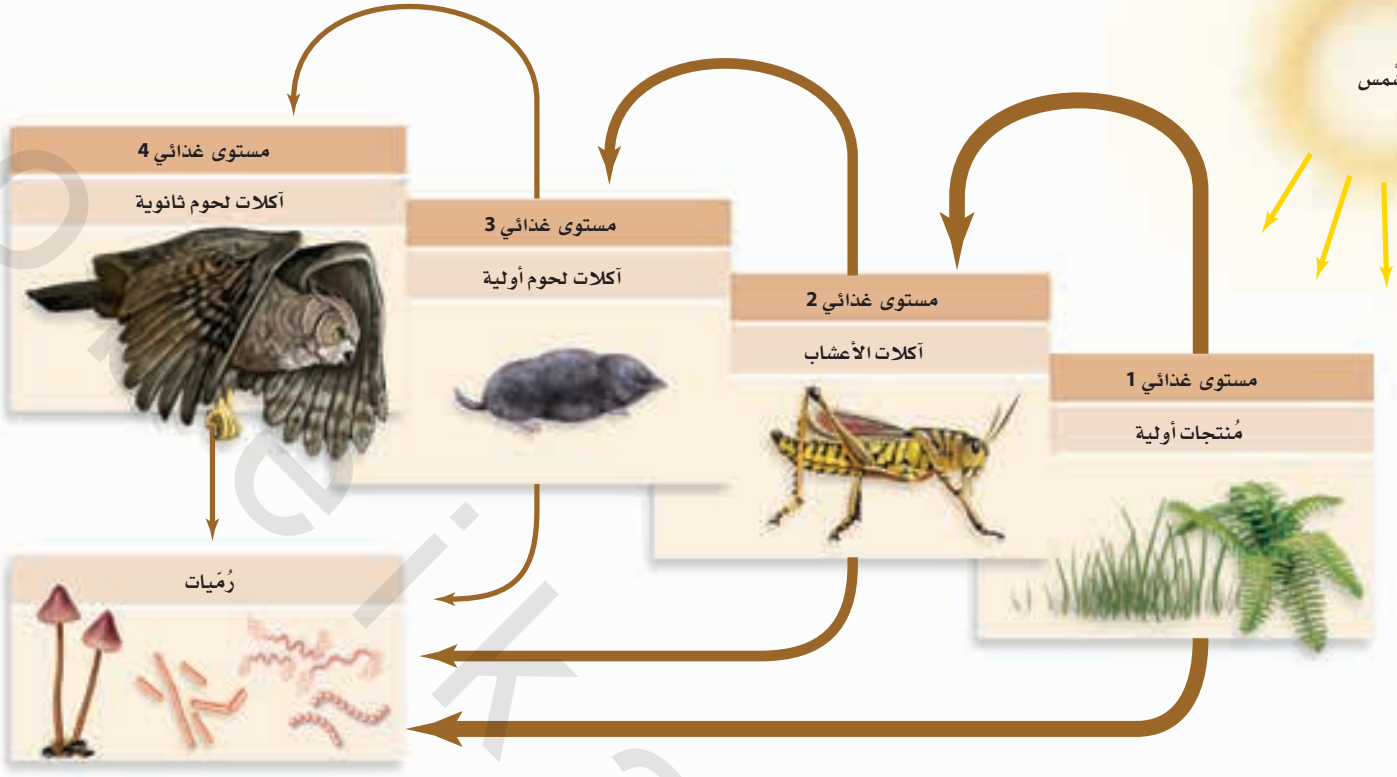
عندما تعيش الأنواع في بيئاتها الطَّبيعية، فإنَّها غالبًا ما تكون مُنظّمة على شكل سلاسل تأكل بعضها بعضًا بشكل تتابعي. فمثلًا، نوع من الحشرات يُمكن أن يأكل النبات، ثم بعد ذلك يأكل هذه الحشرةَ حيوانٌ آكل للحشرات مثل الزبَّابة، وقد يأكل الصقر هذه الزبَّابة. يمرُّ الغذاء هنا خلال أربعة أنواع بالتَّتابع الآتي: نبات ← حشرات ← الزبَّابة ← الصقر. ويُسمَّى تتابع الأنواع بهذا الشَّكل **سلسلة غذائية Food chain**.

في النِّظام البيئي ككل، تؤدي الكثير من الأنواع أدوارًا مُشابهة؛ لا يوجد نوع واحد في كلّ دور. فمثلًا، الحيوانات التي تأكل النباتات يُمكن أن تشمل ليس نوعًا واحدًا من الحشرات، وإنما 30 نوعًا منها تقريبًا، إضافة إلى عشرة أنواع من الثدييات التي تأكل النبات أيضًا. لتنظيم هذا التَّعقيد، ميَّز علماء البيئة عددًا محدودًا من مُستويات التَّغذية يدعى **المُستويات الغذائية Trophic levels** (الشكل 57-8).

تعريف المُستويات الغذائية

أول مُستوى غذائي في النِّظام البيئي، يدعى **المُنتجات الأولية Primary producers**، ويتكوَّن من المخلوقات ذاتية التَّغذية في النِّظام البيئي جميعها. المُستويات الغذائية الأخرى جميعها تتكوَّن من مخلوقات عضوية التَّغذية، هي **المُستهلكات Consumers**. وضعت المخلوقات عضوية التَّغذية التي تتغذَّى بشكل مُباشر على المُنتِجات الأولية جميعها في مُستوى غذائي سُمِّي آكلات **الأعشاب Herbivores**. من جهة أخرى، تُسمَّى المخلوقات عضوية التَّغذية التي تتغذى على آكلات الأعشاب (تأكلها أو تتطفَّل عليها) **آكلات اللُّحوم الأولية Primary carnivores**، أما التي تتغذَّى على آكلات اللُّحوم الأولية فتسمّى **أكلات اللُّحوم الثانوية Secondary carnivores**.

أخذت دراسات مُتقدمة للأنظمة الْبيئيّة في الحسبان أنَّ المخلوقات الحية لا تترتب بشكل خطي مُتتابع بالاعتماد على ما تأكل؛ فبعض الحيوانات، مثلًا، تأكل كلًّا من مُنتجات أولية وحيوانات أخرى. ومع هذا، فإنّ التَّسلسل الخطي للمُستويات الغذائية هو مبدأ تنظيمي لأسباب كثيرة.



الشكل 57-8

المُستويات الغذائية عبر النِّظام البيئي. تحصل المُنتجات الأولية مثل النباتات على طاقتها مُباشرة من الشَّمس، ما يضعها في المُستوى الغذائي 1. الحيوانات التي تأكل النباتات، مثل الحشرات آكلة النبات، هي آكلات الأعشاب، وتوجد في المُستوى الغذائي 2. أما الحيوانات التي تأكل آكلات الأعشاب، مثل حيوان الزبابة، فهي آكلات لحوم أولية، وهي في المُستوى الغذائي 3. في حين أن الحيوانات التي تأكل آكلات اللُّحوم الأولية، مثل البوم، هي آكلات لحوم ثانوية، وهي في المُستوى الغذائي 4. كلّ مُستوى غذائي، على الرَّغم من توضيحه بنوع مُعيَّن، فإنه يتكوَّن من الأنواع جميعها في النِّظام البيئي التي لها الوظيفة نفسها من حيث طريقة التَّغذية. تستهلك المخلوقات التي في المُستوى الغذائي الرُّمي المادة العُضويّة الميتة التي تحصل عليها من المُستويات الغذائية الأخرى جميعها.

أضيف مُستوى مُستهلكات إضافي هو **مُستوى الرُّميَّات (آكلة الحتات) Detritivore**. تختلف الرُّميَّات عن باقي المخلوقات في المُستويات الغذائية الأخرى في أنَّها تتغذَّى على بقايا مخلوقات ميتة؛ **الحُتات أو Detritus** هي مادة عضوية ميتة. مجموعة جزئية من الرُّميَّات هي **المُحلِّلات Decomposers**، التي هي في الأغلب ميكروبات ومخلوقات حية صغيرة تعيش على مواد عضوية ميتة تحطمها.

مفاهيم لوصف المُستويات الغذائية

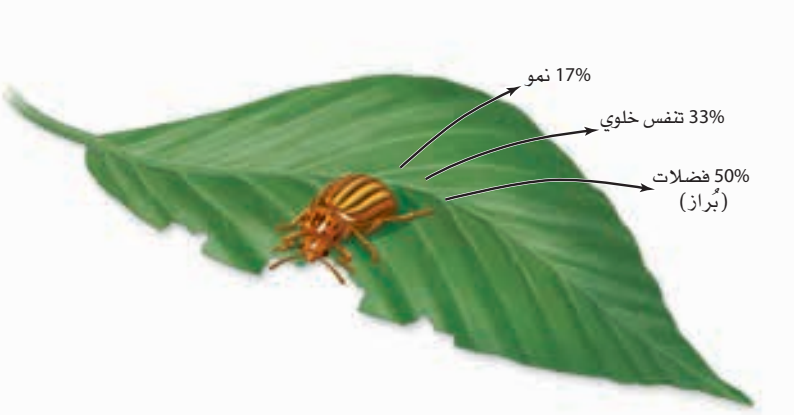
تتكوَّن المُستويات الغذائية من جماعات المخلوقات الحية جميعها. فمثلًا، مُستوى المُنتجات الأولية يتكوَّن من جماعات سكان الأنواع ذاتية التَّغذية في النِّظام البيئي جميعها. لقد وضع علماء البيئة مجموعة خاصة من المفاهيم للإشارة إلى خصائص الجماعات السكانية والمُستويات الغذائية.

إنتاجية Productivity المُستوى الغذائي هي المُعدَّل الذي تصنع به المخلوقات الحية معًا مواد عضوية جديدة (مادة نسيج جديدة). **الإنتاجية الأولية Primary productivity** هي إنتاجية المُنتجات الأولية. تعقيد مُهم في دراسة المُنتجات الأولية هو أنَّها لا تصنع المواد العُضويّة الجديدة بالبناء الضّوئيّ فقط، بل إنَّها تحطم بعض المواد العُضويّة لإنتاج الطَّاقة عن طريق التَّنفس الخلوي اللاهوائي (انظر الفصل الـ 8). **تنفُّس Respiration** المُنتجات الأولية، في هذا السِّياق، هو المُعدَّل الذي تحطّم به المُركّبات العُضويّة. **الإنتاجية الأولية الإجمالية Gross Primary Productivity** هي ببساطة المُعدَّل الخام الذي تصنع المُنتجات الأولية به المواد العُضويّة؛ **الإنتاجية الأولية الصَّافية Net Primary Productivity** هي الإنتاجية الأولية الإجمالية مطروحًا منها تنفس المُنتجات الأولية. تمثِّل الإنتاجية الأولية الصَّافية المواد العُضويّة المُتوافرة لآكلات الأعشاب لكي تستعملها غذاءً.

تُدعى إنتاجيةُ المُستوى الغذائي **لعضوية التَّغذية الإنتاجيةَ الثانويةَ Secondary productivity**. فمثلًا، المُعدَّلُ الذي تصنع فيه مواد عضوية بسبب نمو المخلوق وتكاثره في آكلات الأعشاب جميعها في نظام بيئي هو الإنتاجيةُ الثانوية للمُستوى الغذائي لآكلات الأعشاب. لكلّ مُستوى غذائي لعضوية التَّغذية إنتاجيته الثانوية الخاصة به.

وكلَّما تعلَّمت عن المبادئ البيئيّة، يجب أن يكون أحد أهدافك الأساسية التَّمييز بين الخصائص المُتحركة *Dynamic* والثابتة (الساكنة) *Static* للجماعات. الإنتاجيةُ خاصيةٌ مُتحركةٌ، ويُعبَّر عنها دائمًا بالمُعدَّل؛ لأنَّها تستمر وتستمر، ولا يكون لها معنى مُنفصل عن مرور الزَّمن.

الخاصية الرَّئيسة السَّاكنة للجماعة السكانية أو للمُستوى الغذائي هي كمية المادة العُضويّة الموجودة في وقت مُعيَّن، وهذا يُسمَّى **محصول الكتلة الحيوية القائم Standing crop biomass** للجماعة أو للمُستوى الغذائي، وببساطة المحصول القائم أو الكتلة الحيوية *Biomass*. تخيَّل أنَّك تلتقط صورة لمُستوى غذائي. المواد العُضويّة التي تظهر في الصورة ستكوِّن الكتلة الحيوية للمحاصيل القائمة في تلك اللَّحظة.



الشكل 57–9

مصير طاقة الروابط الكيميائية بعد تناولها: لماذا لا تكون الطَّاقة التي تُستهلك عن طريق عضوية التَّغذية جميعها مُتاحة للمُستوى الغذائي اللاحق. تمتص عضوية التَّغذية مثل هذه الحشرة آكلة الأعشاب جزءًا فقط من طاقة الروابط الكيميائية التي تأكلها. في هذا المثال، 50% منها لا تُمتصّ، ولكن تخرج على شكل بُراز؛ طاقة الرَّوابط الكيميائية هذه التي يتمُّ إخراجها لا يُمكن أن تستخدمها آكلات اللحوم الأولية. ثُلث (33%) الطَّاقة التي يتمُّ أكلها تُستخدم وقودًا للتَّنفس الخلوي، ومن ثمَّ تُحوَّل إلى حرارة، ولا يمكن أن تستخدمها آكلات اللحوم الأولية. يتحوَّل 17% فقط من الطَّاقة المُتناولة إلى الكتلة الحيوية للحشرة خلال النُّمو، ويُمكن أن تُستعمل غذاءً للمُستوى الغذائي الذي يليه، ولكن حتى هذه النِّسبة ليس مُؤكدًا استخدامها بتلك الطَّريقة؛ لأنَّ بعض الحشرات سوف تموت قبل أن تُؤكل.

كيف تُعالج المُستويات الغذائية الطَّاقة

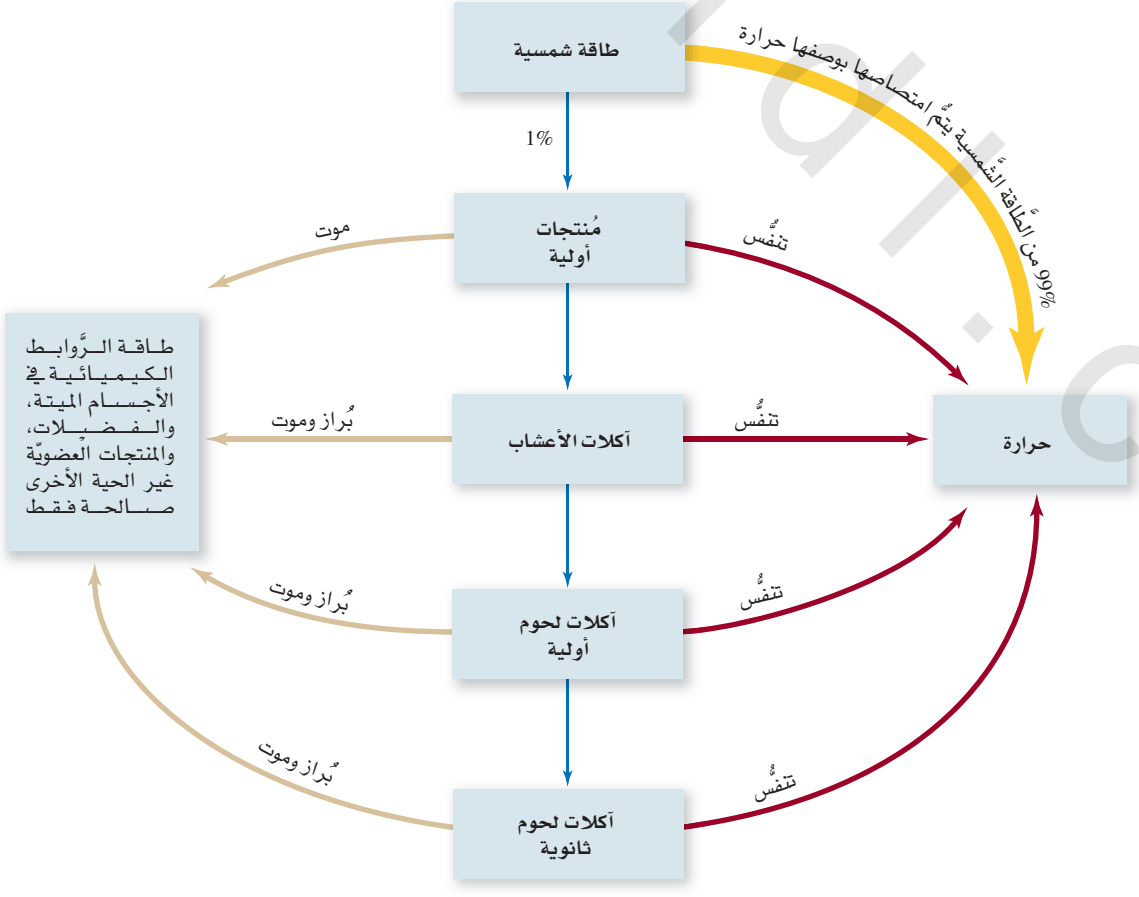
يتمُّ التقاط جزء صغير من الطَّاقة الشَّمسية عن طريق المُنتجات الأولية. على مدار العام، نحو 1% من الطَّاقة الشَّمسية التي تسقط على الغابات والمُحيطات يتمُّ التقاطها. لاحظ الباحثون مُستويات أقل من ذلك، ولكنهم لاحظوا نسبًا عالية مثل 5% في ظروف مُعينة. الطَّاقة الشَّمسية التي لا تُلتقط من خلال البناء الضّوئيّ تتحوَّل إلى حرارة.

كما لاحظنا سابقًا، تقوم المُنتجات الأولية بالتَّنفس، حيث تقوم بتحطيم بعض المُركّبات العضويّة في أجسامها لتُطلق الطَّاقة الموجودة بين الرَّوابط الكيميائية. تستخدم هذه المخلوقات جزءًا من الطَّاقة هذه لصناعة ATP، الذي تستخدمه بدورها لتشغيل العمليات التي في حاجة إلى طاقة. وفي النِّهاية، تتحوَّل طاقة الرّوابط الكيميائية التي يُطلقها المخلوق في أثناء التَّنفس إلى حرارة.

تذكَّر أنَّ المخلوقات لا تستطيع استخدام الحرارة لتبقى على قيد الحياة. لذلك، كلما غيَّرت الطَّاقة شكلها لتُصبح حرارة، فإنَّها تفقد الكثير، بل كلّ فائدتها للمخلوق بوصفها مصدرًا للطَّاقة. ما رأيناه حتى الآن أنَّ 99% تقريبًا من الطَّاقة الشَّمسية التي تصطدم بالنِّظام البيئي تتحوَّل إلى حرارة؛ لأنَّها تفشل في أن تُستعمل في التَّمثيل الضّوئيّ. وبعد ذلك يصبح بعضُ الطَّاقة التي استُعملت في التَّمثيل الضّوئيّ حرارةً أيضًا عن طريق التَّنفس الذي تقوم به المُنتجات الأولية. كلّ عضوية التَّغذية في النِّظام البيئي يجب أن تعيش على طاقة الرّوابط الكيميائية التي تبقَّت.

مثال على ضياع الطَّاقة بين المُستويات الغذائية

عندما تمر طاقة الرَّبط الكيميائية من مُستوى غذائي لعضوية تغذية إلى مُستوى آخر يليه، يضيع جزء كبير من الطَّاقة في أثناء ذلك. هذا المبدأ له نتائج مأساوية. وهذا يعني أنَّه، خلال أي فترة مُحدَّدة من الزَّمن، تكون كمية طاقة الرّوابط



الشكل 57–10

تدفُّق الطَّاقة في النِّظام البيئي. تُمثِّل الأسهم الزَّرقاء تدفُّق الطَّاقة التي تدخل النِّظام البيئي على شكل ضوء ثم تعبر من خلال طاقة الروابط الكيميائية إلى المُستويات الغذائية المُتعاقبة. عند كلّ خطوة تتوزع الطَّاقة، وهذا يعني أنَّ طاقة الروابط الكيميائية التي تكون مُتاحة لكلّ مُستوى غذائي أقل من تلك التي تكون مُتاحة للمُستوى الغذائي السَّابق. الأسهم الحمراء تُمثِّل تحويلات الطَّاقة إلى حرارة. الأسهم البرونزية تُمثِّل تحويلات الطَّاقة إلى فضلات ومواد عضوية صالحة للرُّميات فقط.

الكيميائية المُتوافرة لآكلات لحوم أولية أقل من كمية الطَّاقة المُتوافرة لآكلات الأعشاب، وأنَّ كمية الطَّاقة المُتوافرة لآكلات اللُّحوم الثانوية أقل من تلك المُتوافرة لآكلات اللُّحوم الأولية.

لماذا تقل كمية طاقة الروابط الكيميائية كلَّما عبرت الطَّاقة من مُستوى غذائي إلى آخر يليه؟ خذ مثلًا استخدام الطَّاقة في المُستوى الغذائي لآكلات الأعشاب (الشكل 57-9). بعد أن تبتلع آكلات الأعشاب مثل الحشرات آكلات الأوراق بعض الطعام، فإنَّها تتبرَّز. طاقة الروابط الكيميائية في المركّبات الموجودة في الفضلات لا تمرُّ إلى المُستوى الغذائي لآكلات اللُّحوم الأولية. جزء من الطَّاقة المُمتصة من قِبَل آكلات الأعشاب تُطلق عن طريق التَّنفس الخلوي لتُستخدم في إصلاح الأنسجة، وحركات الجسم، ووظائف أخرى مُشابهة. الطَّاقة التي تُستخدم في هذه الطُّرق، تتحوَّل إلى حرارة، ولا تمرُّ إلى المُستوى الغذائي لآكلات اللُّحوم. تبقى بعض طاقة الروابط الكيميائية في أنسجة آكلات الأعشاب، ويُمكنها أن تعمل بوصفها غذاءً لآكلات اللُّحوم. من ناحية أخرى، تموت بعض أفراد العاشبات بسبب المرض والحوادث بدلًا من أكلها عن طريق المُفترسات.

في النِّهاية، طبعًا، تتجمَّع بعض طاقة الروابط الابتدائية المُكتسبة من الورقة في أنسجة آكلات الأعشاب التي تُؤكل عن طريق آكلات اللُّحوم الأولية. مُعظم طاقة من ناحية أخرى، الروابط الكيميائية الابتدائية تتحوَّل إلى حرارة، وبُراز، وإلى أجسام أفراد آكلات الأعشاب التي لا تستطيع آكلات اللُّحوم أكلها. يتكرَّر الحدث نفسه في كلّ خطوة في سلسلة المُستويات الغذائية (الشكل 57-10).

وبمنزلج القاعدة، استنتج علماء البيئة أنَّ كمية طاقة الروابط الكيميائية المُتاحة للمُستوى الغذائي خلال فترة من الزَّمن هي 10% تقريبًا من تلك المُتاحة للمُستوى الغذائي السَّابق خلال الفترة الزَّمنية نفسها. وفي بعض الحالات تكون النِّسبة أعلى من ذلك، فقد تصل إلى 30%.

الحرارة بوصفها منتجًا نهائيًّا للطَّاقة

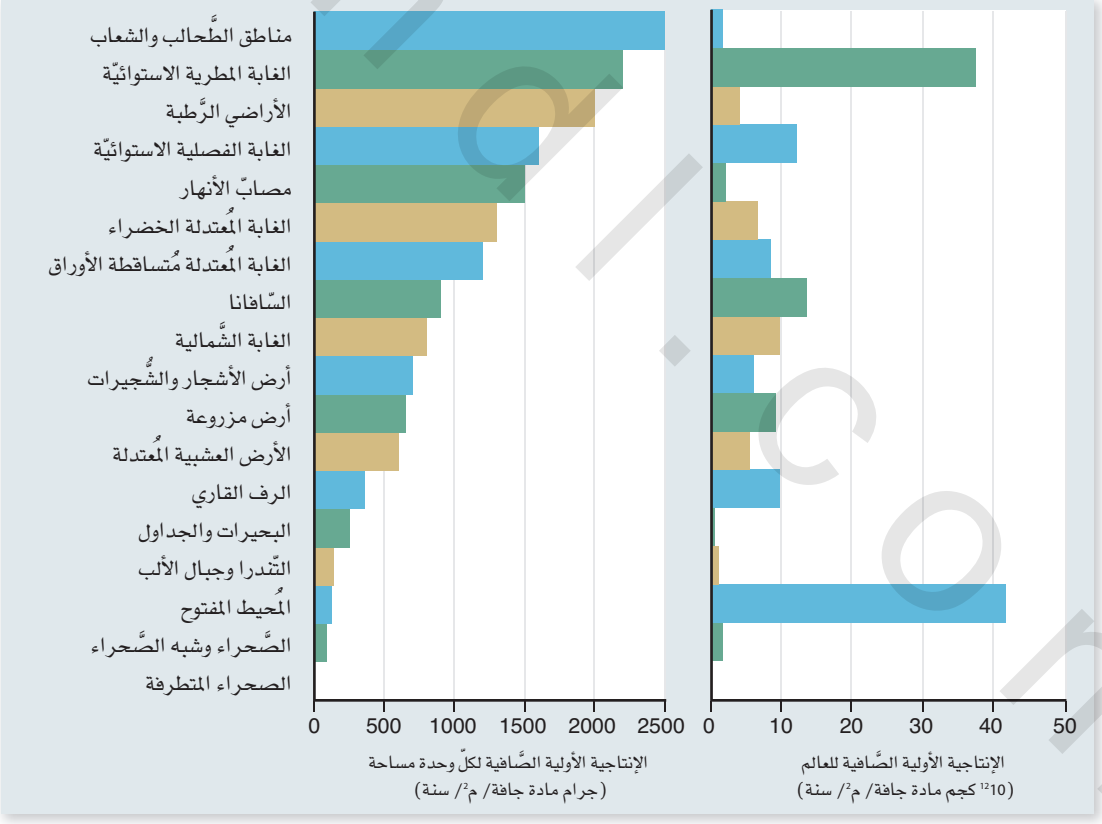
بشكل أساسي، تصبح طاقة الروابط الكيميائية جميعها التي تُلتقط عن طريق البناء الضّوئيّ في النِّظام البيئي حرارة في النِّهاية، وذلك عندما تُستخدم طاقة الروابط الكيميائية من قِبَل المُستويات الغذائية المُختلفة. حتى نرى أهمية هذه النُّقطة، يجب أن نعرف أنَّ الرُّميات عندما تُحلِّل الأجسام الميتة كلَّها في النِّظام البيئي، وكذلك البُراز، ومواد أخرى مُتوافرة لها، فإنَّها تُنتج حرارة تمامًا مثل المُستويات الغذائية الأخرى.

الأنظمة الْبيئيّة المُنتجة

تختلف الأنظمة الْبيئيّة بشكل كبير في الإنتاجية الأولية الصَّافية (NPP). الأراضي المُبتلة والغابات الاستوائيّة المطرية مثالان مُحدّدان على الأنظمة الْبيئيّة المُنتجة (الشكل 57-11)؛ تُقاس الإنتاجية الأولية الصَّافية فيهما، بالوزن الجاف للمادة الْعضويّة الجديدة المُنتجة، وهي غالبًا 2000 جم / م^2/ سنة تقريبًا. في المقابل، فإنّ الأرقام المُوازية لأنواع أخرى من الأنظمة الْبيئيّة هي: 1200-1300 في الغابات المُعتدلة، 900 في السّافانا، 90 في الصحارى. (هذه الأنواع العامة من الأنظمة الْبيئيّة تُسمَّى المناطق الحيوية، وقد وُصفت في الفصل المقبل)

عدد المُستويات الغذائية يحدده توافر الطَّاقة

يتناقص المُعدَّل الذي تكون عنده طاقة الروابط الكيميائية مُتوافرة للمخلوقات في المُستويات الغذائية المُختلفة بشكل أُسي عندما يشق طريقه من المُنتجات الأولية إلى آكلات الأعشاب، ثُمَّ إلى المُستويات المُختلفة لآكلات اللُّحوم. لكي نتصور هذه النُّقطة، افترض لغايات التَّبسيط أنَّ مُنتِجات أولية في نظام بيئي تكسب 1000 وحدة من طاقة الروابط الكيميائية خلال فترة زمنية. إذا كانت الطَّاقة المُدخلة



الشكل 57-11

إنتاجية النِّظام البيئي السَّنوية. يُظهر العمود الأول من البيانات مُعدَّل الإنتاجية الأولية الصَّافي لكلّ متر مُربع لكلّ سنة. يُظهر العمود الثاني حاصل ضرب البيانات في المساحة التي يُغطيها نوع النِّظام البيئي؛ ويُساوي الإنتاجية لكلّ متر مُربع لكلّ سنة مضروبًا في عدد الأمتار المُربعة التي يحتلها النِّظام البيئي على مُستوى العالم. لاحظ أنَّ نوع النِّظام البيئي عالي الإنتاجية على أساس المتر المُربع قد لا يُسهم في الإنتاجية الإجمالية إذا كان من النَّوع غير الشائع، مثل الأراضي الرَّطبة. على الطَّرف الآخر، يكون نوع النِّظام البيئي الأكثر شيوعًا، مثل المُحيط المفتوح، أكثر انتاجية على مُستوى العالم على الرغم من أنَّ إنتاجيته لكلّ متر مُربع قليلة جدًا.

المصدر: البيانات في: بيجون؛ هاربر؛ وتاونسيند، البيئة، الطبعة الثالثة، بلاكويل للعلوم، 1996، صفحة 715.
المصدر الأصلي: ويتكر، ر. هـ. المجتمعات والنِّظام البيئي، الطبعة الثانية، ماكميلن، لندن، 1975.

لكلّ مُستوى غذائي 10% من مقدار الطَّاقة المُدخلة للمُستوى السَّابق له، فسيكون مقدار طاقة الروابط الكيميائية المُدخلة للمُستوى الغذائي لآكلات الأعشاب 100 وحدة، وللمُستوى الغذائي الأولي لآكلات اللحوم 10 وحدات، وللمُستوى الغذائي الثانوي لآكلات اللحوم وحدة واحدة خلال الفترة الزَّمنية نفسها.

مُحدِّدات على آكلات اللُّحوم العُليا

يُحدِّدُ التَّناقصُ الأُسيُّ لطاقة الروابط الكيميائي في كلّ سلسلة غذائية أطوالَ السَّلاسل الغذائية، وأعدادَ آكلات اللُّحوم العُليا التي يُمكن للنِّظام البيئي أن يدعمها. بالنِّسبة إلى حسابات نموذجية، إذا كان نظام بيئي يشمل آكلات لحوم ثانوية، نحو واحد بالألف فقط من الطَّاقة المُلتقطة بالتَّمثيل الضّوئيّ تمّر قدمًا عبر سلسلة من المُستويات الغذائية لتصل إلى هذه الحيوانات على شكل طاقة روابط كيميائية قابلة للاستعمال. آكلات اللُّحوم الثالثة يُمكن أن تستقبل 1 من 10 آلاف فقط. هذا يُفسِّر لماذا لا تُوجد مُفترسات تعيش على الأسود أو النُّسور.

يُساعد التَّناقص في طاقة الروابط الكيميائية المُتاحة على توضيح لماذا تميل أعداد الأفراد في المُستوى الأعلى لآكلات اللُّحوم في النِّظام البيئي لأن تكون قليلة. كامل المُستوى الغذائي لآكلات اللُّحوم العُليا تستقبل طاقة قليلة نسبيًّا. ومع ذلك مثل هذه الحيوانات تميل إلى أن تكون كبيرة في الحجم: فلها أحجام جسم كبيرة نسبيًّا، ويحتاج أفرادها إلى طاقة عالية. وبسبب هذين العاملين، تميل أعداد جماعات المُفترسات العُليا إلى أن تكون صغيرة.

ربما توجد أطول السَّلاسل الغذائية في المُحيطات. بعض أسماك التُّونا ومُفترسات المُحيط الأعلى مُستوى ربما تعمل بوصفها مُفترسات من المستويين الثالث والرَّابع. هناك تحدٍّ واضح أمام تفسير مثل هذه السَّلاسل الغذائية الطَّويلة، ولكن الإجابات ليست مفهومة بشكل جيد في الوقت الحالي.

الإنسان مستهلكًا؛ دراسة حالة

ساعد تدفُّق الطَّاقة في بحيرة كايوغا Cayuga في الجزء الشَّمالي من ولاية نيويورك (الشكل 57-12) على توضيح كيف أنَّ تحرُّك الطَّاقة في المُستويات الغذائية يُمكن له أن يُؤثِّر في مصادر غذاء الإنسان. من الخصائص الحقيقية لهذا النِّظام البيئي، وجد الباحثون أنَّ 150 إلى 1000 سعر من طاقة الروابط الكيميائية التي تلتقطها المُنتجات الأولية في البُحيرة انتقلت إلى أجسام آكلات الأعشاب. 30 سعرًا تقريبًا من هذه السُّعرات انتقلت إلى أسماك الهف، وهي أسماك صغيرة من آكلات اللُّحوم الأولية الأساسية في النِّظام.

إذا أكل الإنسان من أسماك الهف، فإنَّه يحصل على نحو ستة سعرات من ألف سعر دخلت في بداية النِّظام. وإذا أكلتْ أسماكُ السَّلمون أسماكَ الهف، ثُمَّ أكل الإنسانُ أسماكَ السَّلمون، فإنّ الإنسان يكسب 1.2 سعر. عمومًا، تتوافر للجماعات البشرية طاقة إذا أكل الإنسانُ النباتاتِ أو المُنتجاتِ الأخرى أكثر من أكله الحيوانات، في حين تتوافر طاقة أكثر إذا أكل آكلاتِ أعشابٍ أكثر من أكله آكلات لحوم.

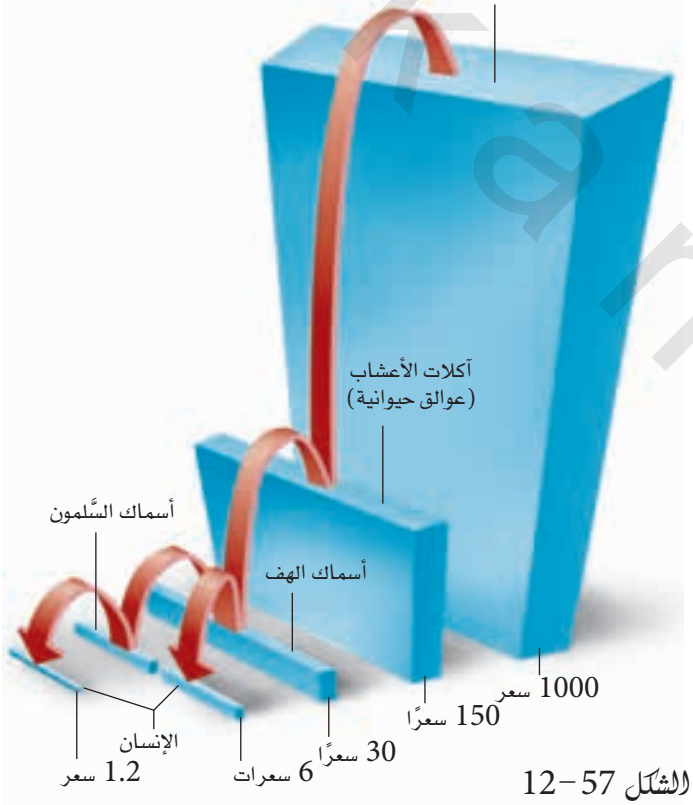
تُوضِّح الأهرام البيئيّة علاقة المُستويات الغذائية

تخيَّل أنَّ المُستويات الغذائية في النِّظام البيئي مُثِّلت بوصفها صناديق وُضعت فوق بعضها. تخيَّل أيضًا أنَّ عرض كلّ صندوق يتناسب مع إنتاجية المُستوى الغذائي الذي يُمثِّله. ستكون الصناديق الموضوعة فوق بعضها على شكل هرم؛ كلّ صندوق أَضيق من الصندوق الذي تحته بسبب قوانين تدفُّق الطَّاقة التي لا يُمكن انتهاكها. مثل هذا الشَّكل الذي رسمناه يُدعى **هرم تدفُّق الطَّاقة Pyramid of energy flow** أو **هرم الإنتاجية Pyramid of productivity** (الشكل 57-13 أ). هذا الهرمُ مثالٌ على **الهرم البيئي Ecology pyramid**.

هناك أنواع كثيرة من الأهرام الْبيئيّة. يُمكن استخدام أشكال توضيحية للهرم لتمثيل محصول الكتلة الحيوية القائم، أو عدد الأفراد، وكذلك الإنتاجية.

في **هرم الكتلة الحيوية Pyramid of biomass**، يُرسم عَرضُ هذه الصناديق، بحيث يتناسب مع محصول الكتلة الحيوية القائم. المُستويات الغذائية التي تمتلك إنتاجية قليلة نسبيًّا عادةً، تمتلك أيضًا كتلة حيوية قليلة نسبيًّا موجودة عند وقت مُعيَّن. لهذا، تكون أهرام الكتلة الحيوية عادة مُعتدلة عمودية، وهذا يعني، أنَّ كلّ صندوق أضيق من الصندوق الذي تحته (الشكل 57-13 ب). لا تكون الأهرام العمودية القائمة للكتلة الحيوية محكومة بالقوانين الأساسية التي لا يُمكن انتهاكها كما الأهرام العمودية للإنتاجية. في بعض الأنظمة الْبيئيّة، تكون أهرام **الكتلة الحيوية مقلوبة Inverted**، ما يشير إلى، أنَّ مُستوى غذائيًّا واحدًا على الأقل يمتلك كتلة حيوية أكبر من المستوى الغذائي الذي تحته (الشكل 57-13 جـ).

كيف يُمكن أن يكون هرم الكتلة الحيوية مقلوبًا؟ خذ في الحسبان النَّوع الشَّائع للنِّظام المائي الذي تكون فيه المُنتجاتُ الأولية طحالبَ وحيدة الخلية (عوالق نباتية)، وآكلات الأعشاب بحجم حبة رز (مثل مجذافي الأرجل) وتتغذَّى على المُنتجات الأولية (الطَّحالب، والبكتريا الخضراء المُزرقة).

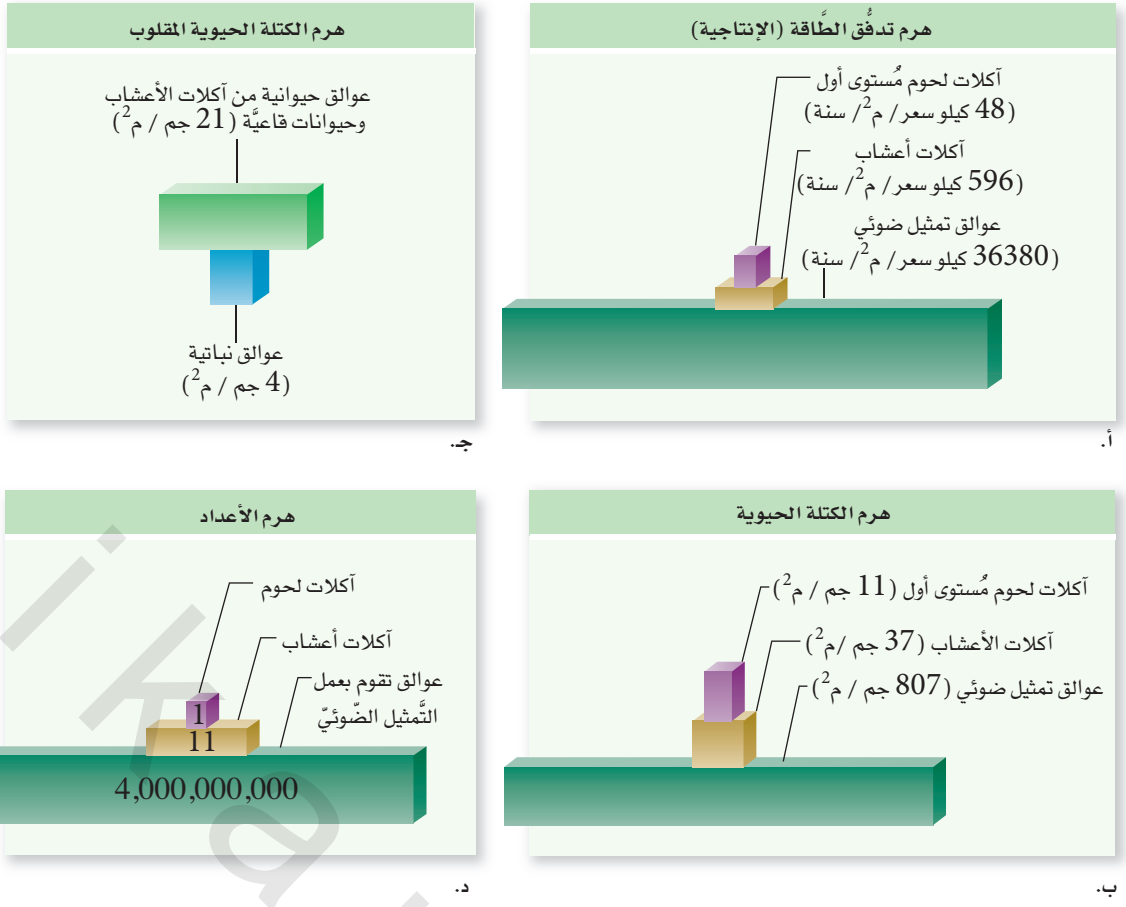


الشكل 57-12

تدفُّق الطَّاقة خلال المُستويات الغذائية لبحيرة كايوجا. العوالق ذاتية التَّغذية (الطَّحالب والبكتريا الخضراء المُزرقة) تُثبِّت الطَّاقة الشَّمسية، في حين تتغذى آكلات الأعشاب (عوالق حيوانية) على هذه العوالق، في حين تتغذى كلاهما يأكله سمك الهف. يأكل سمكُ السَّلمون سمكَ الهف. كمية لحم السَّمك المُنتج للاستهلاك البشري أكبر بِـ 5 مرات إذا أكل الإنسان الهف، ولكن الناس يفضلون أكل السَّلمون.

استقصاء

لماذا تحتاج كمية كبيرة من السُّعرات الحرارية من الطَّحالب إلى دعم كمية قليلة جدًا من سعرات الإنسان؟



الشكل 57-13

الأهرام البيئيّة. في الهرم البيئي، تُمثَّل المُستويات الغذائية المُتتابعة بصناديق مصطفة ومُتلاصقة، ويُمثِّل عرض الصناديق حجم خاصية بيئية في المُستويات الغذائية المُختلفة. يُمكن أن تُمثِّل الأهرام البيئيّة خصائص عدَّة مُختلفة. أ. هرم تدفُّق الطَّاقة (الإنتاجية). ب. هرم الكتلة الحيوية من النَّوع العادي. جـ. هرم الكتلة الحيوية المقلوب. د. هرم الأعداد.

استقصاء

كيف يُمكن تفسير وجود أهرام كتلة حيوية مقلوبة؟

خلايا الطَّحالب مُباشرة. في هذا النِّظام، يكون إنتاج الخلايا الطُّحلبية سريعًا جدًا: تتكاثر الخلايا بشكل سريع، ولكن الحيوانات تستهلكها بالسرعة نفسها. في هذه الظُّروف، لا تصل الخلايا الطُّحلبية أبدًا لأن تكون جماعة كبيرة، أو أن تكون ذات كتلة حيوية كبيرة. مع ذلك، وبسبب الإنتاجية العالية للخلايا الطُّحلبية، فإنّ النِّظام البيئي يُمكن أن يدعم كتلة حيوية كبيرة من الحيوانات، أي كتلة حيوية أكبر مما يُمكن مُشاهدته في جماعة الطَّحالب على الإطلاق.

في **هرم الأعداد Pyramid of numbers**، يتناسب عرض الصناديق مع عدد الأفراد الموجودين في المُستويات الغذائية المُختلفة (الشكل 57-13 د). مثل هذه الأهرام تكون عمودية عادةً، ولكن ليس دائمًا.

تلتقط مخلوقات البناء الضّوئيّ- المُنتجات الأولية- 1% تقريبًا من الطَّاقة الشَّمسية، وتُحوِّلها إلى طاقة روابط كيميائية. عندما تمرُّ هذه الطَّاقة خلال المُستويات الغذائية الأخرى، يتحوَّل بعض الطَّاقة في كلّ خطوة إلى: حرارة، وبُراز، ومادة ميتة. وفقًا لذلك، فإنّ كمية الطَّاقة الكيميائية التي تُصبح متاحةً لكلّ مُستوى غذائي في وحدة زمنية مُعيَّنة نحو 10% فقط من الكمية المُتاحة للمُستوى الغذائي السَّابق. يُحدِّد هذا الفقدان في طاقة الروابط الكيميائية عدد المُستويات الغذائية في النِّظام البيئي، ويُجبر أهرامات الطَّاقة لهذه الأنظمة البيئيّة أن تكون عمودية. ويعني هذا الفقدان أيضًا أنَّ المُستهلكات يُمكنها الحصول على طاقة إن عملت بوصفها آكلات أعشاب أفضل من عملها بصفتها آكلات لحوم.

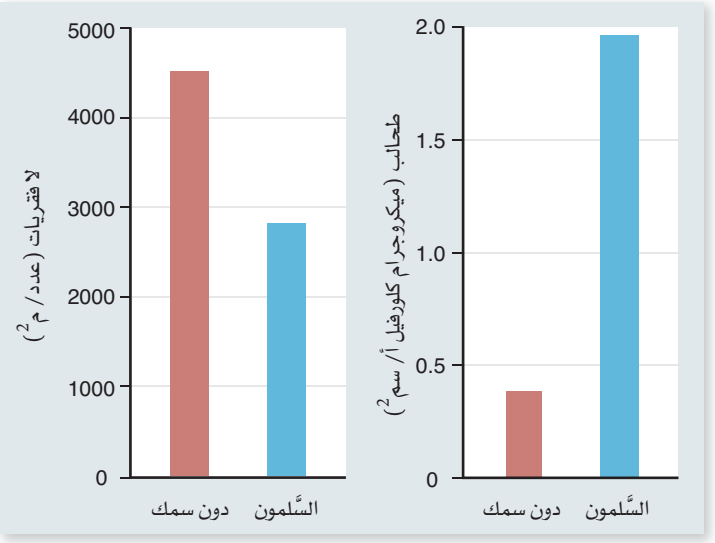
3-57 تفاعلات المُستويات الغذائية

يهيىء وجود سلاسل غذائية احتمال أن يكون لنوع ما في أي مُستوى غذائي تأثيرات في أكثر من مُستوى غذائي. قد تُؤثر آكلات اللُّحوم الأولية، مثلًا، ليس فقط في الحيوانات التي تأكلها بل، وبشكل غير مُباشر، في النباتات أو الطَّحالب التي تأكلها فريستها. وبالاتجاه المعاكس، يُمكن أن يُوفر ازدياد الإنتاجية الأولية المزيد من الطَّعام ليس للعاشبات بل لآكلات اللُّحوم بشكل غير مُباشر كذلك.

تُسمَّى التَّأثيراتُ التي يسلطها مُستوى غذائي أعلى نحو الأسفل لتُؤثر في اثنين أو أكثر من المُستويات الغذائية الأدنى **الشَّلالَ الغذائيَ Trophic cascade**. كما تُسمَّى هذه التَّأثيرات **التأثيرات أعلى-أدنى Top- down effects**. وعندما يجري التَّأثير نحو الأعلى خلال سلسلة غذائية مثل جريانه من المُنتجات الأولية إلى مُستويات غذائية أعلى، فإنَّه يُسمَّى **تأثير أدنى- أعلى Bottom-up effect**.

تحدث التَّأثيرات أعلى- أدنى عندما تُؤثِّر تغيُّرات في أعلى مُستوى غذائي في المُنتجات الأولية

أثبت وجود التَّأثيرات أعلى-أدنى من خلال تجارب مُحكمة في بعض أنواع الأنظمة البيئيّة، وبالتَّحديد أنظمة المياه العذبة. فمثلًا، في إحدى الدِّراسات، أُحيطت مقاطع من جدول بشبكة منعت الأسماك من الدُّخول. أُضيف السَّلمون البني – مُفترس اللافقريات – إلى بعض المحميات دون أخرى. بعد عشرة أيام، كان عدد



الشكل 57-14

تأثيرات أعلى-أسفل مُوضَّحة بشلال غذائي بسيط. في جدول مائي في نيوزيلندة، احتوت المحميات بوجود أسماك السَّلمون على آكلات أعشاب لافقرية أقل (لاحظ اللَّوحة على اليسار) وكمية أكبر من الطحالب (لاحظ اللَّوحة على اليمين) من تلك التي لا تحتوي على سمك السَّلمون.

استقصاء

لماذا تحتوي جداول الماء المُحتوية على أسماك السَّلمون طحالب أكثر؟

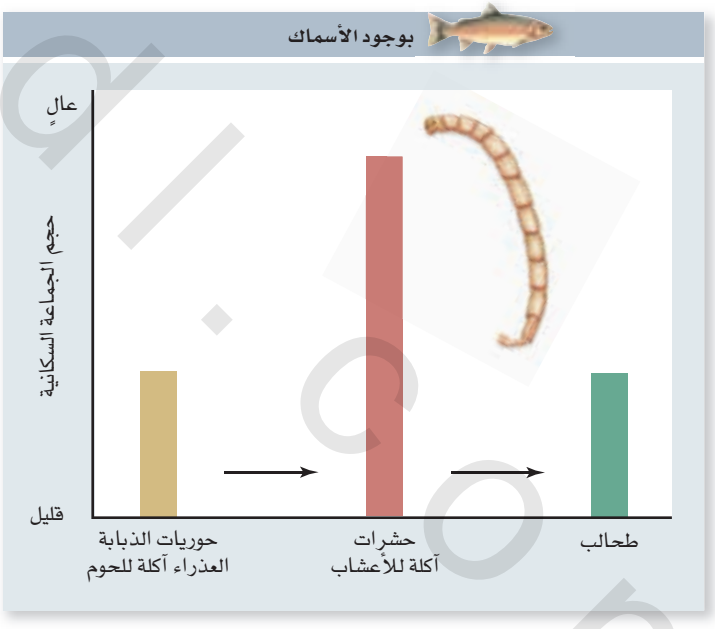
اللافقريات في المحمية التي بها السلمون ثُلثي عددها في المناطق الخالية من الأسماك (الشكل 57-14). من ناحية أخرى، كانت الكتلة الحيوية للطَّحالب التي تتغذَّى عليها اللافقريات أكثر بخمسة أضعاف في المحميات التي فيها سمك السَّلمون عن تلك التي لا يوجد فيها سمك السَّلمون.

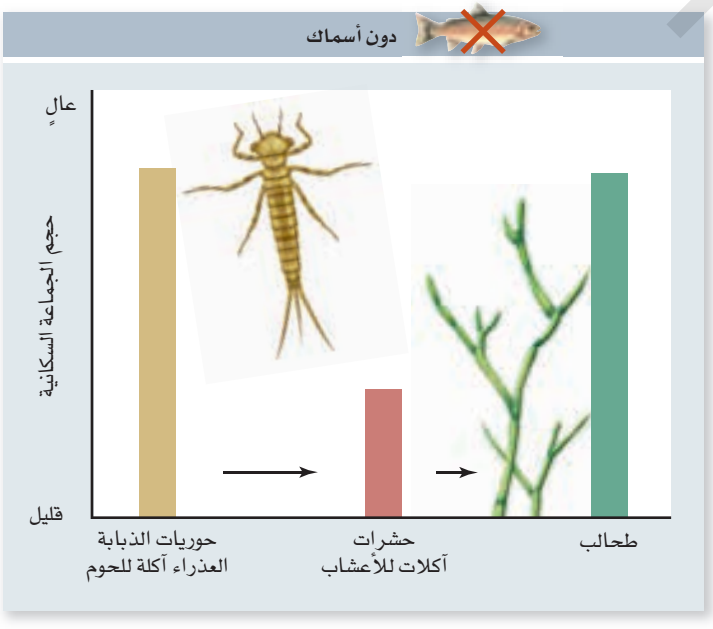
منطق الشَّلال الغذائي الذي ذُكر سابقًا يقود إلى التَّوقع أنَّه إذا أُضيفت آكلات لحوم ثانوية إلى المحمية، فإنَّها سوف تُؤدي إلى إحداث آثار شلال. من المُتوقع أنَّ آكلات اللُّحوم الثانوية ستُبقي جماعات آكلات اللُّحوم الأولية تحت السَّيطرة، ما سيؤدي إلى وفرة في آكلات العُشب، وندرة في المُنتجات الأولية.

في تجربة شبيهة للتجربة التي ذُكرت توًّا، أُقيمت محميات في جداول حُرَّة الجريان في شمال كاليفورنيا. كانت آكلة اللُّحوم الرّئيسة في هذه الجداول، يرقات الذبابة العذراء (تُدعى حوريات). الأسماك التي تفترس هذه الحوريات وآكلات اللُّحوم الأولية كانت قد أُضيفت إلى بعض المحميات دون أخرى. في المحميات التي تحتوي على أسماك، كان عدد الحوريات قليلًا جدًا، ما أدَّى إلى ارتفاع في أعداد فرائسها، ومن ضمنها آكلات الأعشاب من الحشرات التي أدَّت إلى تناقُص الكتلة الحيوية للطَّحالب (الشكل 57-15).

ليس من السَّهل التحقق من صحة الشَّلالات الغذائية في الأنظمة الحيوية الكبيرة بتجارب شبيهة بتجارب محميات الجداول، وعمل مثل هذه الشَّلالات ليس معروفًا بشكل كافٍ . وعلى الرَّغم من ذلك، تمَّ التّعرّف إلى بعض الشَّلالات في الأنظمة البيئيّة الكبيرة من قِبَل مُعظم علماء البيئة. واحد من أكثرها دراماتيكية يشترك فيه ثعلب البحر، وقنفذ البحر، وغابات أعشاب البحر الصغيرة على طول السَّاحل الغربي لأمريكا الشمالية (الشكل 57-16).

تأكل ثعالبُ البحر قنافذَ البحر، وتأكل القنافذُ الأعشابَ البحرية الصغيرة، مانعةً تكوين غابات أعشاب البحر. عندما تتوافر ثعالب البحر، تنمو غابات أعشاب البحر جيدًا بسبب وجود عدد قليل نسبيًّا من قنافذ البحر في النِّظام. ولكن عندما تكون



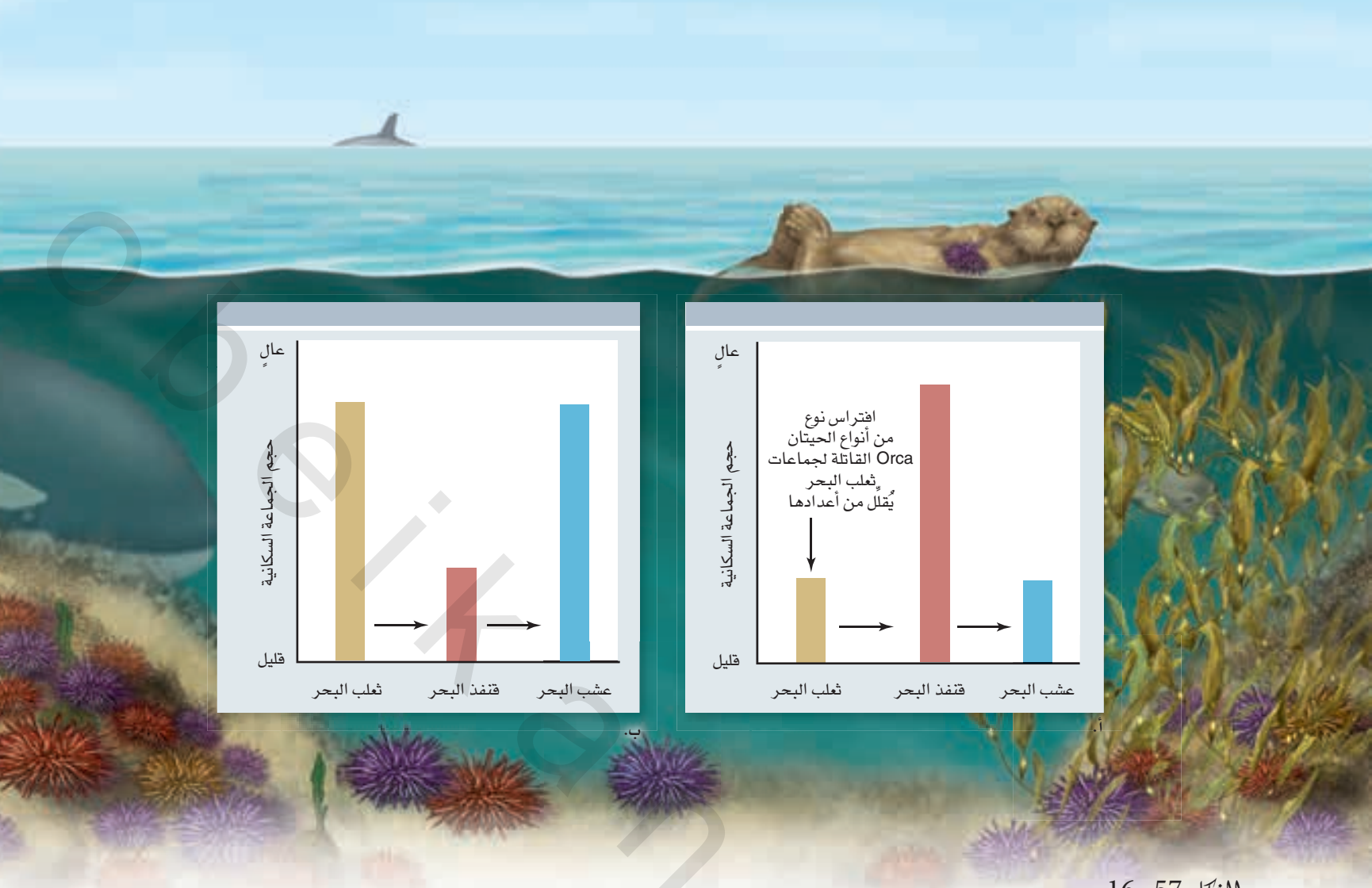


الشكل 57-15

تأثيرات أعلى-أسفل مُوضَّحة بتجربة في شلال غذائي ذي أربعة مُستويات غذائية. تمتلك المحميات جدول ماء فيه أسماك كبيرة آكلة لحوم (على اليمين) القليل من آكلات لحوم أولية، مثل حوريات الذبابة العذراء، والقليل من الحشرات آكلة الأعشاب (مثلت هنا بعدد نوع من أنواع الحشرات النباتية)، ومستوى منخفض من الطَّحالب.

استقصاء

ما التَّأثير المُحتمل للأفاعي التي تأكل الأسماك إذا أُضيفت إلى المحميات؟



الشكل 57-16

شلال غذائي في نظام بيئي واسع. على طول السَّاحل الغربي لأمريكا الشَّمالية، يوجد نظام ثعلب البحر / قنفذ البحر / أعشاب البحر على حالتين: في الحالة المُوضَّحة على اللَّوحة أ، يسمح العدد القليل لجماعات ثعلب البحر لأعداد كبيرة من جماعات قنفذ البحر، الذي يكبح أعداد عشب البحر؛ في الحالة المُوضَّحة في اللَّوحة ب، أعداد كبيرة من ثعلب البحر تبقي القنافذ تحت السيطرة، ما يسمح لنمو غزير لأعشاب البحر. تبعًا لفرضية حديثة، أدَّى تحوُّل الحوت القاتل Orca إلى افتراس الثعالب دون الثدييات الأخرى إلى أن يكون النِّظام البيئي اليوم غالبًا في الحالة المُمثَّلة على اليسار.

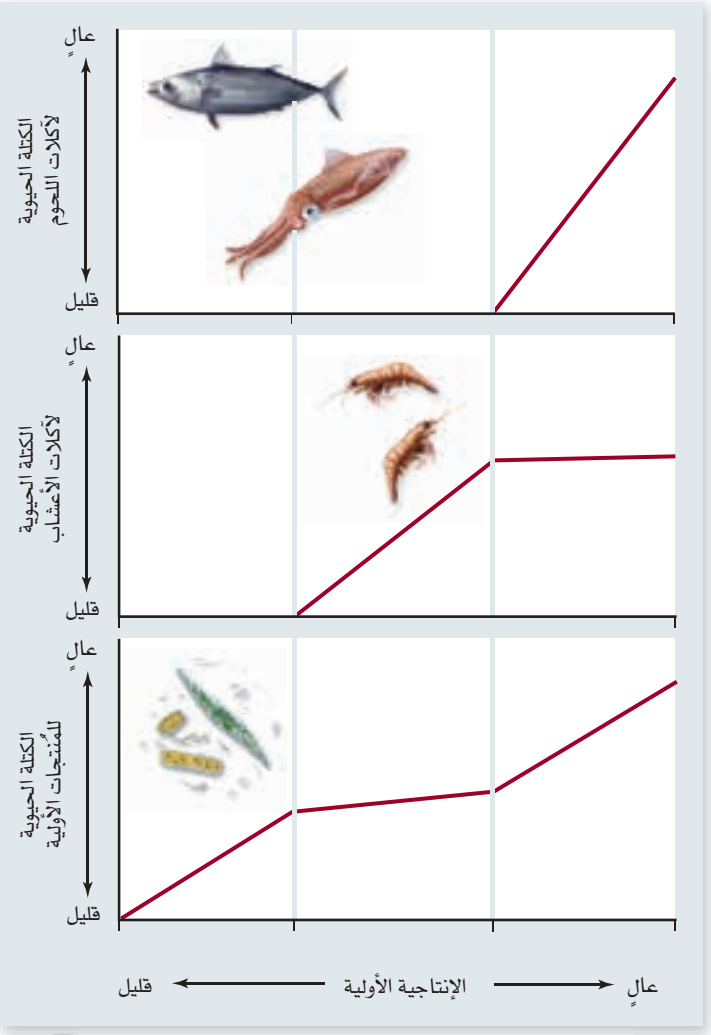
هذه الثعالب قليلة، فإنّ القنافذ تكون كثيرة العدد مما يُسبِّب خللًا في تطور غابات أعشاب البحر. وتدخل في هذه الصورة الحيتان القاتلة Orcas لأنَّها بدأت في السَّنوات الأخيرة تفترس بشكل مُكثَّف ثعالب البحر، ما أدَّى إلى انخفاض أعداد جماعات ثعالب البحر.

أدَّى إزالة الإنسان لآكلات اللُّحوم إلى تأثيرات أعلى- أدنى

يُعتقد أنَّ أنشطة الإنسان لها تأثيرات أعلى-أسفل في عدد من الأنظمة البيئيّة، بإزالة آكلات اللُّحوم بالمُستوى الأعلى عادة. عالم الطَّبيعة الكبير ليوبولد Aldo Leopold وضع مثل هذه التَّأثيرات قبل فترة طويلة من وضع فرضية الشَّلالات الغذائية، عندما كتب في مقاطعة ألمانك الرملية *Sand County Almanc*: "عشت لأرى ولاية بعد ولاية تُزيل ذئابها. شاهدت وجه الكثير من الجبال الجديدة الخالية من الذِّئاب، ورأيت المُنحدرات التي تُواجه الجنوب تمتلئ بعدد مُذهل من الغزلان الجديدة. لقد رأيت الشُّجيرات الصالحة للأكل، والأشجار حديثة النُّمو ترعى فيها الماشية، بدايةً فَقَدَتِ المنحدراتُ حيوتَها، وأصبحت مهجورة، ثُمَّ انتهى بها الأمر إلى الموت. رأيت كلّ شجرة صالحة للأكل عارية الأوراق إلى ارتفاع يصل لارتفاع السّرج".

الكثير من الأمثلة المُشابهة موجودة، التي تؤدي فيها إزالة المُفترسات في تأثير الشَّلال في المُستويات الغذائية السُّفلى. كانت المُفترسات الكبيرة كالأسود والنُّمور الجبلية غائبة عن جزيرة Barro Colorado، وهي قمة تلة تحوَّلت إلى جزيرة عند بناء قناة بنما في بداية القرن الماضي. نتيجةً لهذا، فإنّ المُفترسات الصغيرة، التي كانت جماعاتها تحت السَّيطرة عادة - مثل القرود، والقوطي والخنزير البقري ذي الطوق، والحيوان المُدرع - أصبحت موجودة بشكل غير عادي، وتأكل هذه الحيوانات تقريبًا أي شيء تجده. الطُّيور التي تُعشش على الأرض كانت غير آمنة، والكثير من أنواعها تناقص؛ اختفى 15 نوعًا من الطيور من هذه الجزيرة بشكل كامل.

وبشكل مُشابه، في مُحيطات العالم، تناقصت أعداد الأسماك المُفترسة الكبيرة، مثل سمك الخَرمان والقُد إلى 10% مقارنة مع أعدادها الأصلية بسبب الصَّيد الجائر في مُحيطات العالم جميعها. في بعض المناطق، تزايدت فرائس سمك القُد، مثل الرِّبيان والسَّلطعونات بشكل كبير عما كانت عليه من قبل، وهناك أدلة على تأثير شلالي في مُستويات غذائية أدنى من ذلك.



الشكل 57-17

نموذج للتأثيرات أسفل- أعلى. عند مُستويات دنيا من الإنتاجية الأولية، لا تتمكَّن جماعات آكلات الأعشاب من الحصول على طعام كافٍ لكي تبقى حية؛ دون آكلات الأعشاب، يزداد محصول الكتلة الحيوية القائم للمُنتجات الأولية مثل هذه الدَّياتومات، كلما ازدادت إنتاجيتها. فوق عتبة مُعينة، تُؤدي الزيادة في الإنتاجية الأولية إلى زيادة في جماعات آكلات العُشب، وفي الكتلة الحيوية لآكلات الأعشاب؛ بعد ذلك لا تزيد الكتلة الحيوية للمُنتجات الأولية كلما زادت الإنتاجية الأولية؛ لأنَّ الإنتاجية المُتزايدة تحصدها آكلات العُشب. فوق عتبة أخرى، يُمكن لجماعات آكلات اللُّحوم الأولية أن تثبت. كلما ازدادت الإنتاجية الأولية فوق هذه العتبة، استهلكت آكلات اللُّحوم الإنتاجية المُتزايدة لآكلات الأعشاب، لذلك تبقى جماعات آكلات اللُّحوم في ازدياد. لا تعود الكتلة الحيوية للمُنتجات الأولية تحت تأثير زيادات في جماعات آكلات الأعشاب، ولذلك تزداد بزيادة المُنتجات الأولية. المفتاح لفهم هذا النَّموذج هو الحفاظ على تمييز بين مفهومي الإنتاجية ومحصول الكتلة الحيوية القائم.

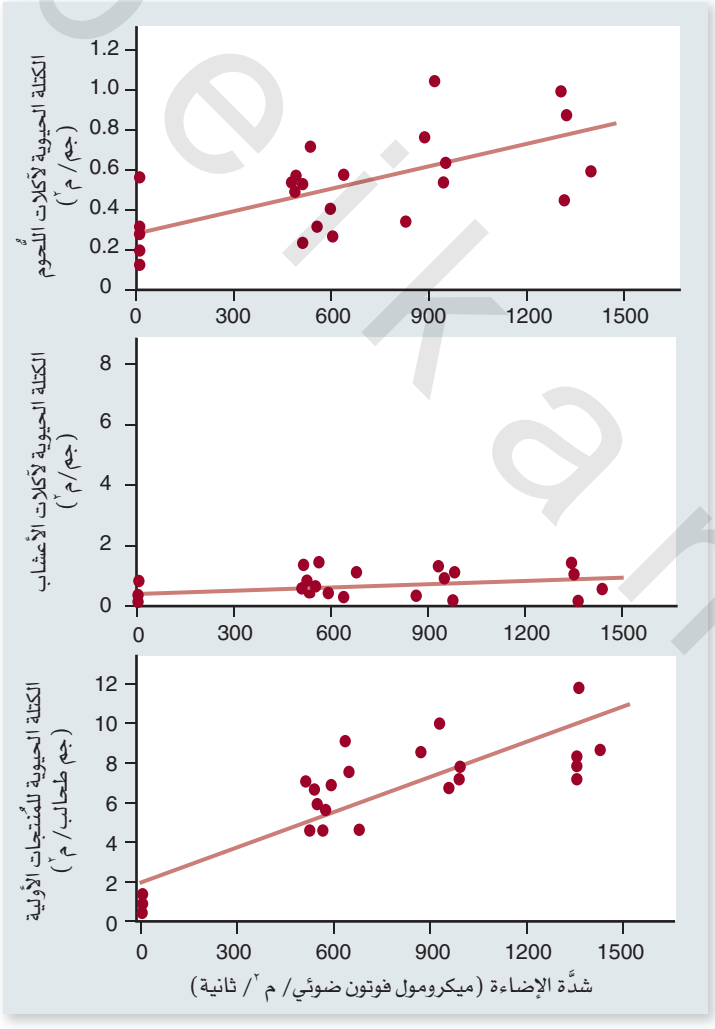
استقصاء

كيف يُمكن للكتلة الحيوية للمُنتجات الأولية أن تبقى ثابتة نسبيًا مع زيادة الإنتاجية الأولية؟

تأثيرات أدنى - أعلى تحدث عندما تُؤثِّر تغيُّراتٌ في المُنتجات الأولية في مُستويات غذائية عُليا

لدراسة التَّأثيرات أدنى - أعلى، يجب أن يأخذ علماء البيئة في حسبانهم تاريخ حياة المخلوقات الموجودة. يوضح (الشكل 57-17) نموذجًا للتَّأثيرات أدنى - أعلى يُعتقد أنَّه ينطبق على أنواع عدَّة من الأنظمة البيئيّة.

بحسب هذا النَّموذج، عندما تكون الإنتاجية الأولية قليلة، فإنّ جماعات المُنتجات لا تستطيع أن تدعم حياة جماعات آكلات الاعشاب المُهمة. وعندما تزداد الإنتاجية



الشكل 57-18

دراسة تجريبية لتأثيرات أدنى - أعلى في نظام بيئي نهري. هذا النِّظام الذي تمَّت دراسته على نهر الحنكليس في كاليفورنيا الشَّمالية يملك الأنماط المُمثَّلة بالخطوط الحمراء في (الشَّكل 57-17). أدَّت زيادة شدَّة الإضاءة إلى زيادة في الإنتاجية الأولية، وزيادة في الكتلة الحيوية للمُنتجات الأولية. وتزداد الكتلة الحيوية لآكلات اللحوم أيضًا. على كلّ حال، لم تزدد الكتلة الحيوية لآكلات العشب كثيرًا مع ازدياد الإنتاجية الأولية؛ لأنَّ الزِّيادة في إنتاجية آكلات الأعشاب استهلكتها آكلات اللُّحوم.

استقصاء

لِمَ تعدّ كمية الضّوء عاملًا مهمًا للكتلة الحيوية لآكلات اللُّحوم؟

الأولية، فإنّ جماعات آكلات الأعشاب تُصبح كثيرة في النِّظام البيئي. الزِّيادة في الإنتاجية الأولية يتمُّ التهامها بشكل كامل بعد ذلك من قبل آكلات الأعشاب، التي تزداد جماعتها في حين تمنع جماعة المُنتجات الأولية من الازدياد.

وحالما تُصبح أعداد المُنتجات الأولية أكبر، فإنّ أعداد جماعات آكلات الأعشاب تُصبح كبيرة بشكل كافٍ لكي تدعم آكلات اللُّحوم الأولية. لا تزيد الزيادة الإضافية بالإنتاجية الأولية بعد ذلك أعداد جماعات آكلات الأعشاب، بل تزيد جماعات آكلات اللُّحوم.

الدَّليل التَّجريبي لتأثيرات أدنى – أعلى تنبأ به نموذج لدراسة أُجريت في محميات على نهر (الشكل 57-18). فصلت المحميات الأسماك الكبيرة (آكلات لحوم ثانوية). وُضعت أسقف فوق كلّ محمية. بعض الأسقف كانت شفافة، وبعضها الآخر ظُلِّلَ بدرجات مُتفاوتة، لذلك كانت المحميات تختلف فيما بينها بكمية ضوء الشَّمس التي تعبر إليها.

كانت الإنتاجية الأولية أعلى ما يُمكن في المحميات التي لها سقوف شفافة وأقل ما يُمكن في المحميات ذات السُّقوف المُعتمة. وكما ازدادت الإنتاجية الأولية بشكل مُوازٍ لكمية الضّوء، ازدادت الكتلة الحيوية للمُنتجات الأولية، إضافة إلى ازدياد الكتلة الحيوية لآكلات اللُّحوم. من ناحية أخرى، لم تزدد الكتلة الحيوية للمُستوى الغذائي لآكلات الأعشاب، المحصورة بينهما في الوسط، بشكل كبير، كما تنبأ النَّموذج في (الشكل 57-16) (انظر خطوط الشَّكل الحمراء).

بسبب طبيعة الارتباط في السَّلاسل الغذائية، تؤثر جماعات الأنواع في المُستويات الغذائية المُختلفة كلّ منها في الأخرى، ويُمكن لهذه التَّأثيرات أن تنتشر إلى الأسفل أو إلى الأعلى في الأنظمة البيئيّة. تُلاحظ تأثيرات أعلى – أسفل، أو الشلالات الغذائية، عندما تُؤثّر التَّغيُّرات في جماعات آكلات اللُّحوم في مُستويات غذائية أدنى. تُلاحظ تأثيرات أدنى– أعلى عندما تُؤثر تغيُّرات في الإنتاجية الأولية في مُستويات غذائية أعلى.

4-57 التَّنوع الحيوي وثبات النِّظام البيئي

في الفصل السابق، ناقشنا الغنى النَّوعي *Species richness*–أي عدد الأنواع الموجودة في مُجتمع. ناقش علماء البيئة نتائج الاختلافات في غنى الأنواع بين مجتمع وآخر. تقول إحدى النَّظريات: إن المُجتمعات الغنية بالأنواع أكثر استقرارًا– وهذا يعني ثباتًا أكثر في التَّركيب، وإمكانية أفضل لمُقاومة الاضطراب. قام العالِم ديفيد تلمان وزملاؤه في منطقة التاريخ الطبيعي لجامعة مينيسوتا سيدار كريك بدراسة هذه الفرضية بشكل رائع.

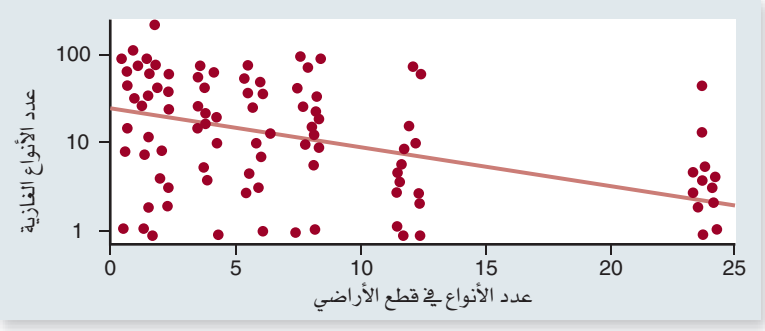
قد يزيد غنى الأنواع من الثَّبات: دراسات سيدار كريك

راقب الباحثون 207 قطع أراضٍ مستطيلة (8-16 م^2) مدة 11 عامًا (الشكل 57-19 أ). في كلّ قطعة أرضٍ، قام الباحثون بتعداد أنواع نباتات البراري، وقاسوا كمية الكتلة الحيوية الكلية للنباتات (كتلة كلّ النباتات في قطعة الأرض). خلال مجرى الدِّراسة، تمَّ ربط غنى الأنواع مع ثبات المُجتمع – قطع الأرض ذات الأنواع الأكثر أظهرت تناقُصًا في تنوع الكتلة الحيوية من سنة إلى أخرى. إضافة إلى هذا، في سنتين جافتين، كان التَّناقُص في الكتلة الحيوية مُرتبطًا ارتباطًا سلبيًّا مع غنى الأنواع – بعبارة أخرى، كانت قطع الأراضي ذات الأنواع الأكثر الأقل تأثُّرًا بالجفاف.

في تجربة ذات علاقة، عندما أُضيفت بذور أنواع نبات أُخرى إلى قطع أراضٍ مُختلفة، كانت قُدرة هذه الأنواع على النُّمو والوجود مُرتبطة ارتباطًا سلبيًّا مع غنى الأنواع (الشكل 57-19 ب)؛ أي، كانت المجتمعات الأكثر تنوعًا، أكثر مُقاومة لغزو أنواع جديدة، وهذا مقياس لثبات المُجتمع.

قد يُؤثِّر غنى الأنواع في عمليات أخرى داخل النِّظام البيئي. راقب تلمان وزملاؤه 147 قطعة أرض تجريبية مختلفة في عدد الأنواع لتحديد مقدار النُّمو الحاصل، ومقدار النيتروجين الذي تأخذه الأنواع من التُّربة. وقد وجدوا أنَّه كلما زاد عدد الأنواع في قطعة الأرض ازداد أخذ النيتروجين، إضافة إلى ازدياد الكمية الكلية للكتلة الحيوية المُنتجة. في هذه الدِّراسة، ظهر بشكل واضح أنَّ التَّنوع الحيوي المُتزايد يُؤدي إلى إنتاجية أكبر.

أ.



ب.

الشكل 57-19

أثر غنى الأنواع في استقرار النِّظام البيئي. أ. واحدة من قطع أراضي سيدار كريك التَّجريبية. ب. يُمكن تقييم ثبات المُجتمع بالنَّظر إلى تأثير غنى الأنواع في غزو المُجتمع. تُمثِّل كلّ نقطة بيانات من قطعة أرض تجريبية في حقول سيدار كريك التَّجريبية. قطع الأراضي ذات الأنواع الأكثر يُصبح غزوها أكثر صعوبة من قِبَل أنواع غير مُستوطنة.

استقصاء

كيف يمكنك تصميم تجربة عن قابلية الغزو التي لا تعتمد على أنواع من المناطق المُجاورة؟

وأعطت دراسات مخبرية على أنظمة بيئية اصطناعية نتائج مُشابهة. في إحدى الدِّراسات الرَّائعة، أُقيمت أنظمة بيئية بمساحة 1 م^2 في غرف نمو ضُبِطَ فيها كلّ من درجة الحرارة، ومُستويات الإضاءة، والتَّيارات الهوائية، وتراكيز غازات الجو كلها. وتمَّ إدخال نباتات، وحشرات، وحيوانات أخرى مُتنوعة إلى هذه الأنظمة الْبيئيّة المُكونة من 9، 15، 31 نوعًا، بحيث كانت الغُرف التي تعرَّضت لمُعالجات أقل تنوعًا تحتوي مجموعة جزئية من الأنواع التي توجد في المحميات التي تحتوي على أنواع أكثر. وكما بينت تجارب تلمان، فقد كانت كمية الكتلة الحيوية مُرتبطة بغنى الأنواع، وكانت كمية ثاني أكسيد الكربون المُستهلك مُؤشرًا آخر على إنتاجية النِّظام البيئي.

إنَّ استنتاج تلمان؛ الأنظمة الْبيئيّة الصحية تعتمد على التَّنوع، لم يكن مقبولًا من قِبَلِ علماء الْبيئة جميعهم، على كلّ حال. يُشكِّك النَّاقدون في صحة دراسات التَّنوع الحيوي هذه وارتباطها، ويُجادلون في أنَّ زيادة أنواع أخرى إلى قطعة الأرض، يزيد احتمالية أن يُصبح نوع واحد أكثر إنتاجية. لإظهار أنَّ الإنتاجية العالية تنتُج من ازدياد غنى الأنواع بحدِّ ذاته، لا بسبب وجود أنواع عالية الإنتاجية بشكل خاص، يجب أن تتميَّز قطع الأراضي التَّجريبية "بالإنتاجية الزَّائدة؛" بعبارة أخرى، إنتاجية قطعة الأرض ستكون أعلى من أكثر الأنواع إنتاجيةً لو نُمِّي بشكل مُنفصل.

مع أنَّ هذه النقطة ما زال مشكوكًا فيها، إلا أنَّ أبحاثًا من سيدار كريك وأماكن أخرى قدَّمت أدلة على الإنتاجية الزَّائدة، داعمةً الادعاء القائل: إن غنى المُجتمعات يُشجِّع إنتاجية المُجتمع وثباته.

يتأثَّر غنى الأنواع بخصائص النِّظام البيئي

هناك عوامل عدة معروفة، أو يفترض أنها تُؤثر في غنى الأنواع في المُجتمع. ناقشنا بعضها في (الفصل الـ 56)، مثل فقدان الأنواع الأساسية، والاضطرابات الفيزيائية المُعتدلة. هنا سنُناقش ثلاثة عوامل إضافية؛ الإنتاجية الأولية، وعدم تجانس الموطن، والعوامل المُناخية.

الإنتاجية الأولية

تختلف الأنظمة الْبيئيّة بشكل أساسي في الإنتاجية الأولية (انظر الشكل 57-11). تُشير بعض الأدلة إلى أنَّ غنى الأنواع مُرتبط بالإنتاجية الأولية، لكن العلاقة بينهما ليست خطية. في حالات عدَّة، مثلًا، تميل الأنظمة الْبيئيّة ذات المُستويات المُتوسطة من الإنتاجية إلى امتلاك عدد أكبر من الأنواع (الشكل 57-20 أ).

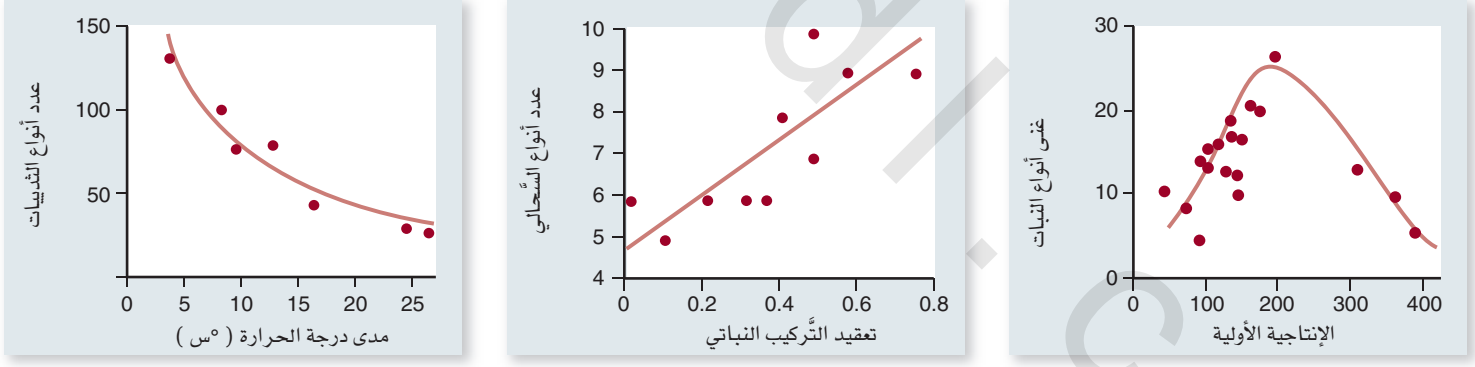
لماذا الأمر هكذا؟ هو أمر قيد الجدل العلمي. أحد الاحتمالات هو أنَّ مُستويات الإنتاجية مرتبطة بعدد المُستهلكات. بتطبيق هذا المبدأ على غنى الأنواع النَّباتية، تكون الحجة هي أنه عند الإنتاجية القليلة، يكون هناك آكلات أعشاب قليلة، وتكون المُنافسات النباتية المتفوقة قادرة على إزالة مُعظم النَّباتات الأخرى. في المُقابل، عند الإنتاجية العُليا تكون أعداد آكلات الأعشاب كثيرة الوجود لدرجة أنَّ أنواع النَّباتات المُقاومة للرَّعي هي التي تعيش، ما يُقلِّل من تنوع الأنواع. وبسبب هذا، فإنّ أعدادًا كبيرة من أنواع النباتات توجد معًا بمُستويات مُتوسطة من الإنتاجية وبوجود آكلات الأعشاب.

عدم تجانس الموطن

البيئات غير الحية غير المُتجانسة مكانيًّا هي البيئات التي تتكوَّن من أنواع عدَّة من المواطن، مثل أنواع التُّربة، مثلًا. ويُتوقّع من البيئات غير المُتجانسة الموطن أن تُلائم أنواعًا من النباتات أكثر من البيئات مُتماثلة الموطن. زِد على هذا، من المُتوقع أن يعكس الغنى النَّوعي للحيوانات غنى نوعيًّا للنباتات الموجودة. يُمكن مُشاهدة مثال على هذا التَّأثير الأخير في (الشَّكل 57-20 ب): عدد أنواع السَّحالي في أماكن عدَّة في الجنوب الغربي الأمريكي يعكس التَّنوع التَّركيبي المحلي للنَّباتات.

العوامل المُناخية

من الصَّعب التَّنبؤ بدور العوامل المُناخية. فمن جانب، من المُتوقع أن توجد أنواع معًا في البيئة الفصلية الموسمية أكثر من البيئة الثابتة؛ لأنَّ التَّغيُّر المُناخي قد يُفضِّل أنواعًا مُختلفة في أوقات مُختلفة من السَّنة. ومن جهة أخرى، يُمكن للبيئات



أ. ب. جـ.

الشكل 57-20

العوامل التي تُؤثِّر في غنى الأنواع. أ. الإنتاجية: في مُجتمعات النباتات داخل مناطق جبلية في أمريكا الجنوبية، يصل غنى الأنواع إلى القمة عند مُستويات مُتوسطة من الإنتاجية (الكتلة الحيوية). ب. عدم تجانس الموطن: يرتبط غنى أنواع سحالي الصَّحراء إيجابيًّا مع التَّعقيد التَّركيبي للغطاء النباتي في مواقع صحراوية في جنوب غرب أمريكا. جـ. المُناخ: يرتبط غنى أنواع الثدييات ارتباطًا عكسيًّا مع مدى مُعدَّل درجات الحرارة الشَّهري على طول السَّاحل الغربي لأمريكا الشَّمالية.

استقصاء

أ. لماذا يكون غنى الأنواع أكبر ما يُمكن عند مُستويات مُتوسطة الإنتاجية؟ ب. لماذا تمتلك المناطق الأكثر تعقيدًا في التَّركيب أنواعًا أكثر؟ جـ. لماذا تمتلك المناطق الأقل تنوُّعًا بدرجات الحرارة أنواعًا أكثر؟

الثابتة أن تدعم أنواعًا مُتخصِّصةً لا تستطيع أن تعيش في الظُّروف المُتغيرة. تتناسب أعداد أنواع من الثدييات في مواقع على طول السَّاحل الغربي لأمريكا الشَّمالية عكسيًّا مع كمية التَّغيُّر في درجة الحرارة المحلية – كلما كان التَّغيُّر أكبر، كانت أنواع الثدييات أقل – ما يدعم الافتراض الأخير (الشكل 57-20 جـ).

تتميَّز المناطق الاستوائيّة بأعلى تنوع، مع أنَّ الأسباب غير واضحة

حتى قبل داروين، أدرك علماء الأحياء أنَّ أنواعًا أكثر اختلافًا من الحيوانات والنباتات تستوطن المناطق الاستوائيّة أكثر من المناطق المُعتدلة. وبالنِّسبة إلى أنواع عدَّة من المخلوقات الحية، هناك تزايد ثابت بغنى الأنواع بالانتقال من المناطق المُتجمدة إلى المناطق الاستوائيّة. يُسمَّى هذا التَّدرُّج الجغرافي الحيوي في أعداد الأنواع المُرتبط بخطوط العرض **ميل غنى الأنواع Species diversity cline**، ويمتد ميل غنى الأنواع هذا إلى النباتات والحيوانات، بما في ذلك الطُّيور (الشكل 57-21)، والثدييات، والزَّواحف.

في الجزء الأكبر من القرن الماضي، فكَّر علماء البيئة في حل لغز ميل غنى الأنواع من مناطق التَّجمد إلى مناطق الاستواء. لم تكن المُشكلة بتكوين فرضية معقولة عن سبب وجود أنواع أكثر في المناطق الاستوائيّة، وإنَّما في فرز هذه الفرضيات المتعددة المعقولة. هنا، أخذنا في الحسبان خمسة من أكثر الاقتراحات الشَّائعة التي نُوقشت.

العمر التَّطوري للمناطق الاستوائيّة

اقترح العلماء مرارًا أنَّ المناطق الاستوائيّة تمتلك أنواعًا أكثر من المناطق المُعتدلة؛ لأنَّ المناطق الاستوائيّة وُجدت خلال فترات طويلة غير مُتقطعة من الزَّمن التَّطوري، في حين تعرَّضت المناطق المُعتدلة إلى فترات جليدية مُتكررة. فربما سمح العمر الأكبر للمُجتمعات الاستوائيّة لتفاعلات المُجتمعات المُعقَّدة لكي تنشأ بينها، ما يدعم تنوعًا أكبر من النباتات والحيوانات.

لقد اقترح بحث حديث أنَّ الاستقرارَ طويل الأمد للمُجتمعات الاستوائيّة مُبالغٌ فيه، على كلّ حال. أظهر فحص لحبوب لقاح في أعماق تُربة لم تتعرَّض للاضطراب أنَّ الغابات الاستوائيّة تقلصت خلال العصور الجليدية إلى ملاجئ قليلة صغيرة مُحاطة بأراضٍ عشبية. وهذا يقترح أنَّ المناطق الاستوائيّة لم يكن لها سجل طويل من غنى الأنواع خلال فترة طويلة من الزَّمن التَّطوري.

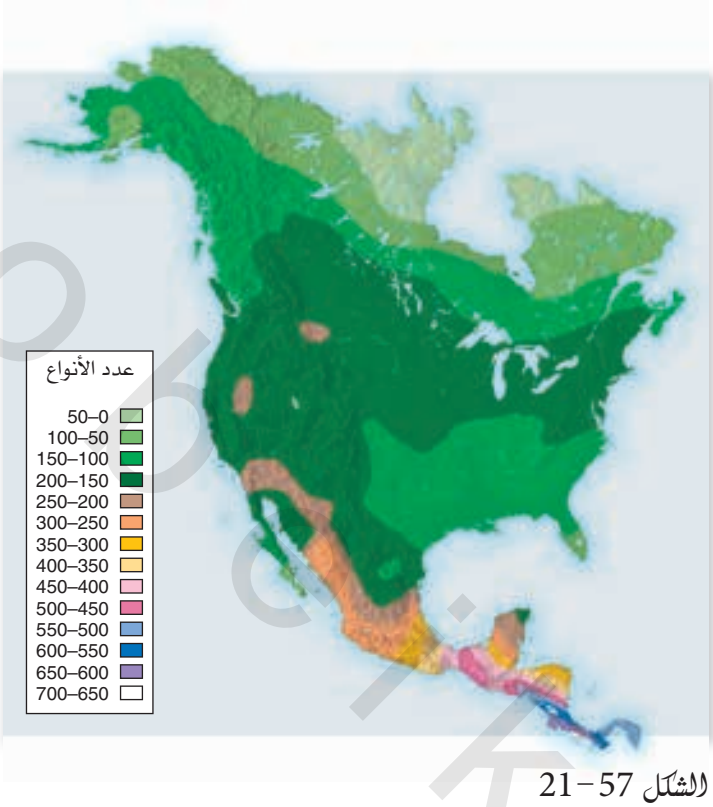
الإنتاجية المُتزايدة

الفرضية الثانية المُتقدمة تقول: إنَّ المناطق الاستوائيّة تحوي أنواعًا أكثر؛ لأنَّ هذا الجزء من الأرض يستقبل كمية من الطَّاقة الشَّمسية أكثر من المناطق المُعتدلة. وهذا يعني أنَّ الطَّاقة الشَّمسية، إضافة إلى فصل نمو على طول السَّنة، زاد بشكل كبير نَشاط التَّمثيل الضَّوئيّ الكُلِّي للنباتات في المناطق الاستوائيّة.

إذا مثَّلنا المصادر الكُلِّية للغابات الاستوائيّة بوصفها فطيرة، ومثَّلنا البيئات الصغيرة الوظيفية للأنواع بحصص الفطيرة، فسنرى أنَّ الفطيرة الأكبر تُعطي حصصًا أكثر. ولكن كما لاحظنا سابقًا، فإنّ دراسات حقلية عدَّة أوضحت أنَّ غنى الأنواع أعلى ما يُمكن عند مُستويات مُتوسطة الإنتاجية. وعلى هذا، فإنّ ازدياد الإنتاجية يُتوقع أن يُؤدي إلى غنى أنواع أقل، وليس أكثر.

استقرار / ثبات الظُّروف

على الرغم من أنَّ التَّنوع الفصلي موجود في المناطق الاستوائيّة، فهو أقل منه في المناطق المُعتدلة. هذا التَّنوع الفصلي المُنخفض ربما شجَّع التَّخصص مع وجود بيئات وظيفية مُجزَّأة لتقسيم المصادر وتجنُّب المُنافسة. النَّتيجة المُتوقعة هي أعداد



الشكل 57-21

تناقُص في غنى الأنواع مع خطوط العرض. هناك زيادة واضحة لعدد الأنواع لطيور أمريكا الشَّمالية والوسطى، عندما نتَّجه نحو خط الاستواء. أعداد أقل من 100 نوع تُوجد عند خطوط العرض للمناطق المُتجمدة، ولكن هناك أكثر من 600 نوع يعيش في جنوب أمريكا الوسطى.

أكبر من الأنواع الأكثر تخصُّصًا في المناطق الاستوائيّة، وهذا ما نراه. لفحص هذه الفرضية، أُجريت اختبارات حقلية كثيرة، وكلها تقريبًا دعمت هذه الفرضية، مُعلنةً أنَّ المناطق الاستوائيّة يوجد بها أعداد أكبر من البيئات الوظيفية الأضيق مقارنة بما في المناطق المُعتدلة.

الافتراس

أشارت تقارير عدَّة إلى أنَّ الافتراس أكثر كثافة في المناطق الاستوائيّة. نظريًّا، يؤدي الافتراس المُكثَّف إلى انخفاض أهمية المُنافسة، ما يسمح بتداخل أكبر للبيئات الوظيفية، مُشجِّعًا غنى أنواع أكبر.

عدم تجانس الموطن

كما أشرنا سابقًا، يُشجِّع عدم تجانس الموطن غنى الأنواع. استنادًا إلى تعقيدها، تستطيع الغابات الاستوائيّة، تهيئة تنوع في البيئات الدَّقيقة التي يُمكن لها أن ترعى عددًا أكبر من الأنواع. إنَّ العمود القائم الطَّويل من النباتات والأشجار الذي يمر من خلاله الضَّوء في الغابة الاستوائيّة ربما يصنع مدى واسعًا من كثافات الضَّوء وترددات، ما يجعل تنوعًا أكبر من البيئات الضَّوئيّة، وبهذا تُشجِّع تنوع الأنواع.

تدعم الدراسات الحقلية التَّجريبية فرضية أنَّ المُجتمعات غنية الأنواع هي أكثر استقرارًا وإنتاجًا، على الرغم من أنَّ علماء البيئة كلهم لا يُوافقون على هذا الاستنتاج.

لا أحد يعلم حقيقة سبب وجود أنواع أكثر في المناطق الاستوائيّة، ولكن هناك عدد من الفرضيات تمَّ اقتراحها.

obeikan.com

5-57 الجغرافية الحيوية للجُزر

واحدٌ من أكثر الأنماط الموثوقة في علم البيئة هو مُلاحظةُ أنَّ الجُزر الأكبر تحتوي أنواعًا أكثر من الجُزر الأصغر. عام 1967، اقترح العالِمان روبرت مكارثر من جامعة برنستون، وإدوارد ويلسون من جامعة هارفارد أنَّ **علاقة النَّوع مع المنطقة Species–area-relationship** سببها أثر المنطقة الجُغرافية والانعزال في احتمال انقراض الأنواع واستيطانها.

يقترح نموذج الثبات (الاتزان) أنَّ الانقراض والاستيطان يصلان إلى نقطة توازن

فسّر العالِمان مكارثر وويلسون أنَّ الأنواع تنتشر إلى الجُزر بشكل ثابت، لهذا فإنّ الجُزر تميل إلى أن تُراكِمَ أنواعًا أكثر فأكثر. وفي الوقت الذي تُضاف فيه أنواع جديدة، تُفقد أنواع أخرى عن طريق الانقراض. وكلما زاد عدد الأنواع على جزيرة فارغة ابتداء فإنّ مُعدَّل الاستيطان يجب أن يتناقص حالما ينفد مستودع المخلوقات المُستوطنة المُحتملة، التي لا توجد حاليًّا على الجزيرة. وفي الوقت نفسه، يزداد مُعدَّل الانقراض، كلما زادَ عدد الأنواع على الجزيرة زادَ احتمالُ أن يموت أيُّ نوع من الأنواع.

ونتيجة، عند نقطة مُعيَّنة، يجب أن يُصبح عدد الأنواع المُنقرضة وعدد المُستوطنة بحالة تساوٍ، وأنَّ عدد الأنواع يجب أن يُصبح ثابتًا. عندئذٍ، تمتلك كلّ جزيرة بمساحة مُعيَّنة، عدد اتزان مُميَّزًا من الأنواع الذي يميل نحو الثبات خلال الوقت (نقطة التَّقاطع في الشكل 57-22 أ) – وعلى الرغم من ذلك، فإنّ تركيبة الأنواع سوف تتغيَّر عندما تنقرض أنواع، وتستوطن أنواع أخرى جديدة.

يقترح نموذج الاتزان لمكارثر وويلسون أنَّ غنى أنواع الجزيرة هو اتزان ديناميكي بين الاستيطان والانقراض. مساحة الجزيرة وبُعدها عن اليابسة يُؤثران كلاهما في الاستيطان والانقراض. نتوقع أنَّ الجُزر الأصغر تملك مُعدَّلات انقراض أعلى؛ لأنَّ أحجام جماعاتها ستكون بالمُعدَّل أصغر. ويجب أن نتوقع عددًا قليلًا من الأنواع المُستوطنة يصل الجُزر التي تقع بعيدًا عن اليابسة. ولهذا، فإنّ الجُزر الصغيرة والبعيدة عن اليابسة يجب أن تحتوي عدد أنواع أقل؛ والجُزر الكبيرة والقريبة من اليابسة يجب أن تحتوي على عدد أكثر من الأنواع (الشكل 57-22 ب).

تنبؤات هذا النَّموذج البسيط تُؤيدها جيدًا النَّتائج الحقلية. تُظهر أنواع الطيور بين آسيا والمحيط الهادي (الشكل 57-22 جـ) ارتباطًا إيجابيًّا لغنى النَّوع مع مساحة الجزيرة، وارتباطًا سلبيًّا لغنى النَّوع مع البُعد عن مصدر المُستوطنين.

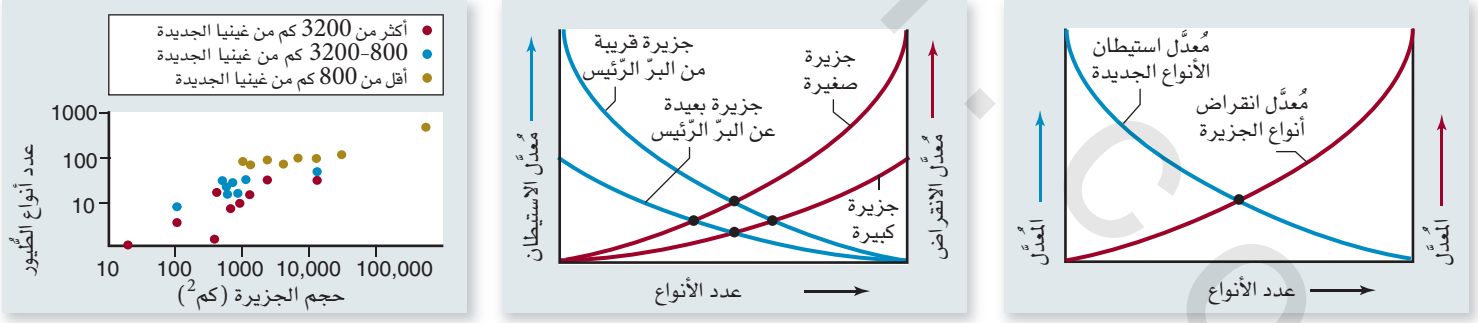
نموذج الثبات (الاتزان) ما زال قيد الاختبار

قام العالمان ويلسون ودان سمبرلوف الذي كان حينها طالب دراسات عليا، بإجراء دراسات مبدئية في مُنتصف عام 1960 على جُزر شجر المانغروف الاستوائيّة في الجزر المنخفضة لفلوريدا. أُحصيت هذه الجُزر، ونُظِّفت من الحيوانات بالتَّبخير، ثُمَّ سُمِح لها بإعادة التَّوطين، مع إجراء العدِّ والإحصاء بشكل دوري. اتجهت هذه الدِّراسات ودراسات أخرى حقلية مُشابهة إلى دعم نموذج الاتزان.

تقترح دراسات حقول تجريبية طويلة الأمد، على كلّ حال، أنَّ الوضع أكثر تعقيدًا مما رآه مكارثر وويلسون. فقد تنبأ نموذجهما بمُستوى عالٍ من **الانقلاب النَّوعي Species turnover** عندما تنتهي أنواع، وتدخل أخرى. ولكن دراسات على طيور الجُزر والعناكب أشارت إلى أنَّ انقلابًا بسيطًا يحدث من سنة إلى أخرى. إضافةً إلى ذلك، فإنّ هذه الأنواع التي تأتي وتذهب، تُمثِّل مجموعة جزئية من أنواع لم تصل إلى مُستوى المجموعات السكانية الكبيرة. ويبدو أنَّ نسبة معقولة من الأنواع تُحافظ على جماعات كبيرة ونادرًا ما تتَّجه نحو الانقراض.

تجري هذه الدِّراسات في فترة زمنية قصيرة نسبيًّا. ومن المُحتمل وخلال فترات تزيد على قرون، أن يكون نموذج الاتزان وصفًا جيدًا لما يُحدِّد غنى أنواع الجُزر.

يبدو أنَّ غنى الأنواع على الجُزر يُمثِّل اتزانًا ديناميكيًّا بين الاستيطان والانقراض.



أ. ب. جـ.

الشكل 57-22

نموذج اتزان الجغرافيا الحيوية للجُزر. أ. يصل غنى أنواع الجُزر إلى اتزان (نقاط سوداء) عندما يُساوي مُعدَّل استيطان أنواع جديدة مُعدَّل انقراض أنواع على الجزيرة. ب. ينحرف الاتزان بالاعتماد على مُعدَّل الاستيطان، ومساحة الجزيرة، والمسافة عن مصادر المُستوطنين. يرتبط غنى الأنواع إيجابيًّا مع مساحة الجزيرة، وعكسيًّا مع المسافة عن اليابسة. تمتلك الجُزر الصغيرة مُعدَّلات انقراض أكبر، ما يزيح نقطة الاتزان نحو اليسار. في الشكل نفسه، تمتلك الجُزر الأبعد مُعدَّلات استيطان أكبر، ما يزيح نقطة الاتزان مرة أخرى إلى اليسار. جـ. أثر البعد عن جزيرة كبيرة، التي يُمكن أن تكون مصدرًا لأنواع مُستوطنة، واضح بسهولة. تمتلك الجُزر الأبعد أنواعًا أقل من الطيور الآسيوية الواصلة إلى جزر المحيط الهادي مُقارنة مع الجُزر الأقرب التي لها المساحة نفسها.

57-1 الدَّورات الكيميائية الأرضية الحيوية (البيوجيوكيميائية)

الأنظمة الْبيئيّة ديناميكية من الدَّاخل من حيث مُعالجتها للمادة والطَّاقة.

- مبدئيًّا، تمتلك الأرض عددًا ثابتًا من كلّ نوع من الذَّرات ذات الأهمية الحيوية، ويعاد تدوير هذه الذَّرات في الدَّورات البيوجيوكيميائية.
- تشمل الدَّورات البيوجيوكيميائية عمليات تحدث في أماكن عدَّة، وفي مُستويات زمنية مُتعدِّدة.
- تعبر الدَّورات البيوجيوكيميائية الحدود بين الأنظمة الْبيئيّة إلى حد ما.
- تتضمَّن دورة الكربون عادة ثاني أكسيد الكربون الذي يُثبِّته التَّمثيل الضّوئيّ، ويُطلقه التَّنفس. في الأوساط المائية، يكون الكربون أيضًا على شكل أيونات البيكربونات، وفي ظروف غياب الأكسجين يكون الكربون على شكل ميثان. يؤدي حرق الإنسان للوقود الأحفوري إلى عدم اتزان في دورة الكربون (الشكل 57-1).
- دورةُ الماء مُتميِّزةٌ؛ لأنَّها تتضمن مُركبًا يُمكنه أن يتكوَّن في أثناء التَّنفس الخلوي، وأن يُحطم في أثناء التَّمثيل الضّوئيّ. يدخل الماء الغلاف الجوي عن طريق التَّبخر والنَّتح، ويعود إلى سطح الأرض على شكل هطل. مُعظم المياه على الأرض، ومن ضمنها المياه الجوفية المخزونة، مُلوَّثة، وأنشطة الإنسان لا تُغيِّر فقط مخزون المياه، ولكن أيضًا تُغيِّر وبشكل جذري الأنظمة الْبيئيّة (الشكل 57-2).
- يتناقص مخزون المياه الجوفية بأكثر مما يعاد تغذيته.
- النيتروجين عادة، هو العنصر الكيميائي الأقل توافرًا، ولو أنَّه يوجد بنسبة 78% في الجو. لا يُمكن استخدام النيتروجين الذري من قِبل المخلوقات الحية إلى أن تُحوِّله الميكروبات إلى أمونيا بعملية تُسمَّى تثبيت النيتروجين، أو تُحوِّله إلى نيترات بعملية تدعى النَّترتة. تتحوَّل النترات إلى نيتروجين مرة أخرى بعملية تُسمَّى إزالة النترات. ضاعفت أنشطة الإنسان نسبة نقل النيتروجين الجوي عن طريق تصنيع الأسمدة (الشكل 57-4).
- لا يدور عنصر الفوسفور، وهو من المواد الغذائية المُحدِّدة، خلال الغلاف الجوي. ينطلق الفوسفور عن طريق تجوية الصخور، ويتدفَّق خلال المُحيطات، حيث يترسب في تراكمات البحر العميقة (الشكل 57-5).
- دورة المادة الغذائية المُحدِّدة مُهمة؛ لأنَّها تُحدِّد النِّسبة التي تكون عندها المادة الغذائية مُتاحة للاستخدام.
- تزيد عملية إزالة الغابات من نسبة فقدان المواد الغذائية من النِّظام البيئي (الشكل 57-7ب).

57-2 تدفُّق الطَّاقة في الأنظمة البيئية

الأرض نظام مفتوح للطَّاقة. تمر الطَّاقة التي تشعها الشَّمس في اتجاه واحد خلال النِّظام البيئي قبل أن تتحوَّل إلى حرارة يُعاد إشعاعها إلى الفضاء الخارجي.

- الطَّاقة لا تفنى ولا تُستحدث، ولكنها تتحوّل من شكل إلى آخر. عندما تتحوَّل الطَّاقة إلى حرارة خلال مرورها عبر المخلوق الحي، لا يُمكن أن تتحوَّل إلى أشكال أخرى من الطَّاقة المُفيدة.
- ينص قانون الدِّينامكا الحرارية الثاني على أنَّه كلما استخدم المخلوق طاقة الروابط الكيميائية والطَّاقة الضّوئيّة، يتحوَّل بعض هذه الطَّاقة بشكل حتمي إلى حرارة.
- تتكوَّن المركّبات العضويّة عن طريق ذاتية التَّغذية - ذاتية التَّغذية الضّوئيّة، وذاتية التَّغذية الكيميائية- وتستهلكها عضوية التَّغذية.
- عندما تنتقل الطَّاقة من مخلوق إلى آخر، يُطلق على كلّ مُستوى تغذية المُستوى الغذائي، ويُسمَّى التَّسلسلُ خلال المُستويات الغذائية المُتتابعة السِّلسلةَ الغذائيةَ (الشكل 57-8).
- تشمل قاعدة المُستوى الغذائي المُنتجات الأولية، وهي ذاتية التَّغذية، وتأكلها آكلات الأعشاب، التي بدورها تأكلها آكلات اللُّحوم. الرُّميات تأكل بقايا المخلوقات الميتة.
- إنتاجية المُستوى الغذائي هي المُعدَّل الذي تصنع عنده مخلوقات المُستوى الغذائي الواحد جميعها مواد عضوية جديدة عن طريق النُّمو أو التَّكاثر.
- يُمكن أن يُعبَّر عن الإنتاجية الأولية من ذاتية التَّغذية بالإنتاجية الأولية الإجمالية أو بالإنتاجية الأولية الصَّافية. الإنتاجيةُ الأوليةُ الصَّافيةُ تُعادلُ الإنتاجيةَ الأوليةَ الإجماليةَ مطروحًا منها التَّنفس.
- محصول الكتلة الحيوية القائم هو كمية المادة العضويّة الموجودة في زمن مُعين.
- يُلتقط نحو 1% فقط من الطَّاقة الشَّمسية التي تضرب الأرض من أجل عمليات التَّمثيل الضّوئيّ.
- كلما عُولجت الطَّاقة خلال أي مُستوى غذائي، فإنّ كمية قليلة من الطَّاقة (10% من طاقة الروابط الكيميائية تقريبًا) تتبقى من المُستوى الغذائي الذي يسبقه (الشكل 57-10).
- تختلف الإنتاجية الأولية الصَّافية بشكل واضح بين الأنظمة الحيوية أو المناطق الحيوية (الشكل 57-11).
- التَّناقُص الأسي في طاقة الروابط الكيميائية يُحدِّد أطوال السَّلاسل الغذائية، وأعداد آكلات اللُّحوم العُليا التي يُمكن أن تدعمها.
- الأهرام الْبيئيّة التي تعتمد على تدفُّق الطَّاقة، أو الكتلة الحيوية، أو الأعداد، غالبًا ما تكون مُعتدلة (قائمة). الأهرام المقلوبة للكتلة الحيوية أو الأعداد تكون مُحتملة إذا كان واحد على الأقل من المُستويات الغذائية يملك كتلة حيوية أكبر أو مخلوقات أكثر من المُستوى الغذائي الذي تحته (الشكل 57-13).

57-3 تفاعلات المُستويات الغذائية

وجود سلاسل غذائية يؤدي إلى احتمالية أنَّ التَّغيُّرات في النَّوع في مُستوى غذائي واحد ربما تسبّب تأثيرات مُتعدِّدة في مُستويات غذائية أخرى.

- يحدث الشَّلال الغذائي عندما تقع تغيُّرات في مُستوى، أعلى فتؤثِّر في مُستويات غذائية أقل.
- يقع التَّأثير الغذائي أعلى- أسفل عندما تُؤثِّر تغيُّرات في المُستوى الغذائي الأعلى في المُنتجات الأولية (الشكل 57-15).
- يحدث التَّأثير أدنى- أعلى عندما تُؤثِّر تغيُّرات في المُنتجات الأولية في مُستويات غذائية أعلى (الشكل 57-17).

57-4 التَّنوع الحيوي وثبات النِّظام البيئي

يُمكن لغنى الأنواع أن يُؤثِّر في ثبات المُجتمع واستقراره، أيْ، تركيب المُجتمع وقُدرته على مُقاومة الاضطراب.

- يؤدي غنى الأنواع الأكبر إلى تنوُّع سنوي أقل في الكتلة الحيوية، ومُقاومة أكبر للجفاف.
- يتأثَّر غنى الأنواع بكل من الإنتاج الأولي، وعدم تجانس الموطن، والعوامل المُناخية (الشكل 57-20).
- تمتلك المناطق الاستوائيّة التَّنوع الأكبر مع أنَّ الأسباب غير واضحة. التَّنوع العالي يُمكن أن يعكس زمنًا تطوريًّا طويلًا، أو إنتاجية عالية، أو تغيُّرًا فصليًّا قليلًا، أو افتراسًا أكثر مما يقلل التَّنافس، أو عدم تجانس الموطن (الشكل 57-21).

57-5 الجغرافية الحيوية للجُزر

عدد الأنواع في بيئة ما يبدو أنه اتزان ديناميكي بين الاستيطان والانقراض (الشكل 57-22)

- تمتلك الجُزر الأصغر أنواعًا أقل من الجُزر الكبيرة؛ بسبب المُعدَّلات الأعلى للانقراض.
- تمتلك الجُزر القريبة أنواعًا أكثر من الجُزر البعيدة بسبب المُعدَّلات الأعلى للاستيطان.

أسئلة مراجعة

اختبار ذاتي

ارسم دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. إحدى الجُمل الآتية عن المياه الجوفية غير دقيقة:
   أ. تُزوِّد المياه الجوفية 50% من سكان الولايات المُتحدة بماء الشُّرب.
   ب. المياه الجوفية يتمُّ استهلاكها أسرع من إعادة تغذيتها.
   جـ. أصبحت المياه الجوفية مُلوثة بشكل مُتزايد.
   د. يُمكن إزالة المُلوثات من المياه الجوفية بسهولة.
2. مخلوقات التَّمثيل الضّوئيّ:
   أ. تُثبِّت ثاني أكسيد الكربون.
   ب. تُطلق ثاني أكسيد الكربون.
   جـ. تُثبِّت الأكسجين.
   د. (أ) و (ب).
   هـ. (أ) و (جـ).
3. غالبًا، يُعَدّ النيتروجين عاملًا غذائيًّا مُحدِّدًا في أنظمة بيئية كثيرة؛ لأنَّ:
   أ. كمية النيتروجين في الغلاف الجوي أقل بكثير من الكربون.
   ب. مخلوقات كثيرة يمكنها استخدام النيتروجين الذَّري.
   جـ. التَّلوث بالأسمدة العُضويّة قلل من توافر النيتروجين كثيرًا.
   د. مُعظم المخلوقات لا تستطيع استعمال النيتروجين الذَّري.
4. بعض المخلوقات لها القُدرة على "تثبيت" النيتروجين. وهذا يعني أنها:
   أ. تُحوِّل الأمونيا إلى نتريت ونترات.
   ب. تُحوِّل غاز النيتروجين الجوي إلى أشكال مُفيدة حيويًّا من النيتروجين.
   جـ. تحطم المركّبات الغنية بالنيتروجين، وتُطلق أيونات الأمونيوم.
   د. تُحوِّل النترات إلى غاز النيتروجين.
5. إحدى الجمل الآتية عن دورة الفوسفور صحيحة:
   أ. يُثبَّت الفوسفور من قِبَل النباتات والطحالب.
   ب. مُعظم الفوسفور الذي يُطلق من الصخور يُحمل إلى المُحيطات عبر الأنهار.
   جـ. لا تستطيع الحيوانات الحصول على الفوسفور من أكل الطحالب والنباتات.
   د. لم يُؤثِّر استخدام الأسمدة العُضويّة في الميزانية الأرضية من الفوسفور.
6. اعتمادًا على نتائج من دراسات في غابة هبارد بروك التَّجريبية، الأثر المُتوقع من إزالة الأشجار من حول مناطق مساقط المياه هو:
   أ. تزايُد فقدان الماء والعناصر الغذائية من منطقة مساقط المياه.
   ب. تناقُص فقدان الماء والعناصر الغذائية من منطقة مساقط المياه.
   جـ. ازدياد توافر الفوسفور.
   د. ازدياد توافر النترات.
7. كقاعدة عامة، مقدار الطَّاقة التي تُصنع عند انتقال الطَّاقة من مُستوى غذائي إلى مُستوى غذائي أعلاه مُباشرة هو:
   أ. 1%
   ب. 10%
   جـ. 90%
   د. 50%
8. الأهرام البيئيّة المقلوبة للأنظمة الحقيقية تتطلَّب عادةً:
   أ. تدفُّق الطَّاقة.
   ب. الكتلة الحيوية.
   جـ. تدفُّق الطَّاقة والكتلة الحيوية.
   د. لا شيء مما ذُكر.
9. وفقًا لفرضية الشَّلال الغذائي، قد يُسبِّب إزالة آكلات اللُّحوم من نظام بيئي:
   أ. تناقُص أعداد آكلات الأعشاب، وتناقُص كمية النباتات.
   ب. تناقُص أعداد آكلات الأعشاب، وزيادة كمية النباتات.
   جـ. زيادة أعداد آكلات الأعشاب، وزيادة كمية النباتات.
   د. زيادة أعداد آكلات الأعشاب، وتناقُص كمية النباتات.
10. تُنتج تأثيرات أدنى- أعلى على التَّركيب الغذائي بسبب:
    أ. تحديد لتدفُّق الطَّاقة إلى مُستوى الطَّاقة الأعلى الذي يليه.
    ب. أفعال للمُفترسات العُليا على مُستويات غذائية أقل.
    جـ. تغيُّرات مُناخية على المُستهلكات العُليا.
    د. ثبات الرُّميات في الأنظمة البيئيّة.
11. في منطقة التَّاريخ الطبيعي في سيدار كريك، أظهرت قطع الأراضي التَّجريبية تناقُصًا في أعداد الاستيطان عند ازدياد تنوُّع الأنواع في قطع الأراضي:
    أ. مُقترحًا أنَّ تنوع الأنواع المُنخفض يزيد من استقرار الأنظمة البيئيّة.
    ب. مُقترحًا أنَّ استقرار النِّظام البيئي هو وظيفة الإنتاجية الأولية فقط.
    جـ. مُتوافقًا مع فرضية أنَّ الاضطراب المُتوسط ينجم عنه أعلى استقرار.
    د. لا شيء مما ذُكر.
12. تنوُّع الأنواع:
    أ. يزداد مع خطوط العرض كلما ابتعدت عن خط الاستواء نحو الأقطاب.
    ب. يتناقص مع خطوط العرض كلما ابتعدت عن خط الاستواء نحو الأقطاب.
    جـ. يبقى كما هو كلما اتجهت من خط الاستواء نحو الأقطاب.
    د. يزداد مع خطوط العرض كلما تحرَّكت من الشَّمال نحو خط الاستواء، ويقل مع خطوط العرض كلما تحرَّكت من الجنوب نحو خط الاستواء.
13. يقترح نموذج اتزان الجغرافيا الحيوية للجُزر كلًّا مما يأتي ما عدا أنَّ:
    أ. الجُزر الكبيرة عندها أنواع أكثر من الجُزر الصغيرة.
    ب. غنى أنواع الجزيرة يُحدِّده الاستيطان والانقراض.
    جـ. الجُزر الأصغر عندها مُعدَّلات انقراض أقل.
    د. مُعدَّلات الاستيطان أكبر في الجزر القريبة إلى اليابسة.

أسئلة تحدٍّ

1. إذا علمت أنَّ المخلوقات خارجية الحرارة (ذوات الدَّم البارد) لا تستهلك جزءًا كبيرًا من طاقة الطَّعام الذي تأكله لإبقاء درجة حرارة الجسم ثابتة وعالية (عملية توليد حرارة)، كيف تتوقَّع السَّلاسل الغذائية للأنظمة البيئيّة التي تسودها آكلات أعشاب، وآكلات لحوم من ذوات الدَّم البارد، مُقارنةً مع الأنظمة التي تسودها آكلات أعشاب، وآكلات لحوم من داخلية الحرارة (ذوات الدَّم الحار)؟
2. بشكل عام، إذا علمت، أنَّ مدخول الطَّاقة كبير عند قاع مُستوى غذائي (مُنتجات أولية) ويقل عندما يزداد النَّقل عبر المُستويات الغذائية، كيف يمكن لبُحيرات عدَّة أن تُظهر كتلة حيوية قائمة لآكلات أعشاب من العوالق الحيوانية أكبر بكثير من العوالق النباتية التي تستهلكها؟
3. يهتم علماء البيئة في الغالب بالتَّأثيرات المُحتملة لفقدان نوع (مثلًا، بسبب: التلوث، أو تحطيم الموطن، أو عوامل بشرية أخرى) في نظام بيئي لأسباب أخرى غير الفقدان المُباشر للنَّوع فقط. باستعمال (الشَّكل 57-17) فسِّر لماذا؟
4. اشرح عدَّة طرق مُفصَّلة تتمّ فيها زيادة التَّعقيد التَّركيبي للنباتات ما قد يؤدي إلى غنى أنواع أكبر وأعظم للسَّحالي (الشكل 57-20ب). هل يُمكن فحص أيٍّ من هذه الأفكار؟ كيف؟

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.