مقدمة قصيرة جدًّا

تيم لنتون

علم نظام الأرض

ترجمة أحمد سمير درويش

علم نظام الأرض

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
تيم لنتون

ترجمة
أحمد سمير درويش

مراجعة
هبة عبد العزيز غانم

هنـــداوي

علم نظام الأرض

تيم لنتون

Earth System Science

Tim Lenton

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩ ٣١٠٩ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٦.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر جامعة أكسفورد.

Copyright © Tim Lenton 2016. *Earth System Science* was originally published in English in 2016. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Hindawi Foundation is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

المحتويات

١- الموطن	٧
٢- إعادة التدوير	٢٣
٣- التنظيم	٤١
٤- ثورات	٥٩
٥- الأنثروبوسين	٧٧
٦- التوقع	٩٣
٧- الاستدامة	١٠٩
٨- التعميم	١٢٥
قراءات إضافية	١٤٣
المراجع	١٤٧
مصادر الصور	١٤٩

الفصل الأول

الموطن

عندما نظر البشر من الفضاء إلى كوكب الأرض لأول مرة، توغَّلَت الوحدة الواضحة لهذا الكوكب الذي يدعمنا — وكل أشكال الحياة التي نعرفها — في وعينا الجمعي. ومن رحمِ هذا الاكتشاف، وُلد عِلم نظام الأرض الذي يُعَد مجالًا بحثيًّا يسعى إلى فهم الآلية التي تُسيِّر كوكبنا بصفته نظامًا كليًّا واحدًا. وهذا العلم ذو نطاقٍ واسع. فهو يغطي تاريخ الأرض الممتد عَبْر ٤٫٥ مليارات سنة، والكيفية التي يسير بها النظام الآن، والتنبؤات بحالته المستقبلية، ومصيره النهائي. ويتناول الكيفية التي خُلِق بها عالَم تَسنَّى للبشر أن يتطوَّروا فيه، والكيفية التي تَسنَّى بها لنوعنا البشري أن يُعيد تشكيل هذا العالم الآن، والشكل المُحتمَل الذي قد يصبح عليه مستقبلٌ مستدام للبشر ضِمن نظام الأرض. ومن ثَم، فإنَّ عِلم نظام الأرض مجالٌ متعدد التخصصات؛ إذ يجمع بين عناصر من علوم الجيولوجيا والأحياء والكيمياء والفيزياء والرياضيات. وفوق ذلك، فهو عِلمٌ حديث وتكاملي يُمثِّل جزءًا من توجُّهٍ فكري أوسع في القرن الحادي والعشرين نحو محاولة فهم الأنظمة المعقَّدة والتنبؤ بسلوكها. ويوضِّح هذا الفصل كيف ظهر عِلم نظام الأرض، ويقدِّم بعض مفاهيمه الأساسية.

علامات على الحياة

كثيرًا ما يكون من المفيد أن تنظر إلى الأشياء من زاويةٍ جديدة كي تراها بطريقةٍ مختلفة، وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ تفكيرَ شخصٍ واحد في كيفية اكتشاف الحياة على سطح المريخ هو الذي أعطانا منظورًا علميًّا جديدًا نرى كوكب الأرض من خلاله. كان ذلك في عام ١٩٦٥، وقد وظَّفَت وكالة ناسا جيمس لفلوك ضِمن البعثات التي صارت تُعرَف ببعثات

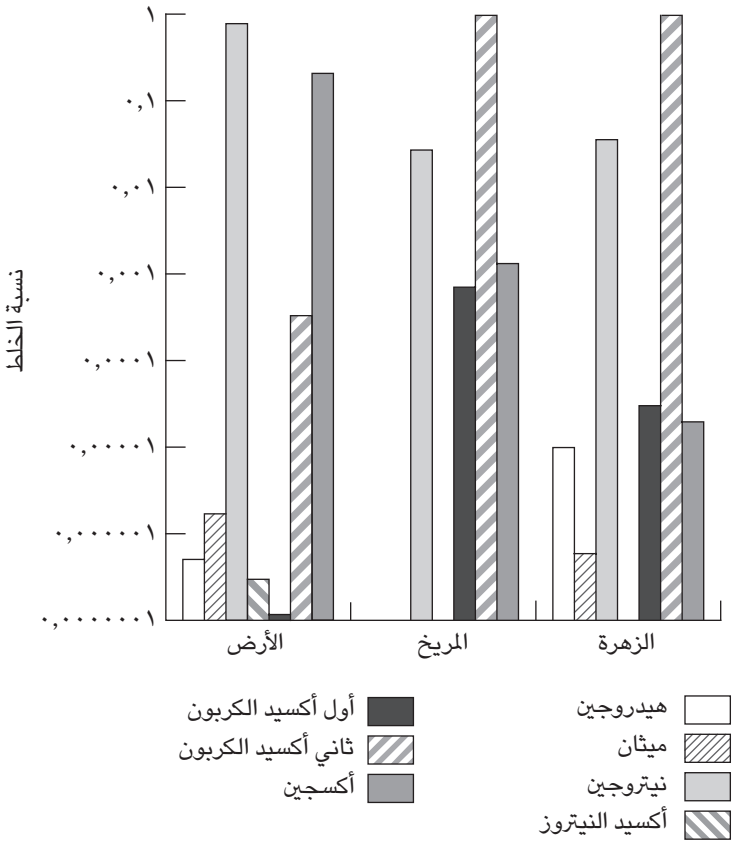
الفايكينج إلى المريخ. وأدرك لفلوك، الذي كان مكلَّفًا بتصميم وسيلة لاكتشاف علامات على وجود حياة على سطح المريخ، أنَّ الذهاب إلى المريخ ليس ضروريًّا في الحقيقة. فالكائنات لكي تبقى على قيد الحياة لا بُد أن تستهلك مواد وتُحوِّلها كيميائيًّا؛ ومن ثَم تُفرز النُّفايات الناتجة في الوسط المحيط بها. ويُعَد الغِلاف الجوي الغازي المحيط بأي كوكب هو المصدرَ الطبيعي للمواد، وهو أيضًا مَكبُّ نُفايات الكوكب. ومن ثَم، استنتج أنه إذا وُجدَت حياة على كوكب المريخ، أو على غيره من الكواكب، فإنها بالضرورة ستظهر في تركيب غِلافه الجوي.

يُمكن استنتاج تركيب الغلاف الجوي المحيط بكواكب أخرى من على الأرض هنا، وذلك عن طريق النظر إلى طيف الإشعاع الذي يُبَث عَبْر الغِلاف الجوي؛ لأن الغازات المختلفة تمتص الإشعاع عند أطوالٍ موجية مختلفة. وبعد مدةٍ قصيرة من ذلك الاقتراح الذي اقترح فيه لفلوك اكتشاف وجود الحياة بتحليل الغِلاف الجوي، أظهرَت الأرصاد الأولى من التلسكوبات الأرضية أنَّ كوكب المريخ كان محاطًا بغلافٍ جوي يسوده غاز ثاني أكسيد الكربون، مثلما سيكون متوقَّعًا بالضبط في حالات عدم وجود حياة. وكذلك كان كوكب الزهرة. أمَّا كوكب الأرض، فلديه غِلافٌ جوي لافت، يحتوي على مزيجٍ كيميائي من غازات تتسم بنشاطٍ كيميائي عالٍ، وهذا المزيج يظل باقيًا بسبب وجود حياةٍ (شكل ١-١).

يُعَد الأكسجين المكوِّن الغريب الرئيسي هنا؛ إذ يُشكِّل ما يزيد عن خُمس الغِلاف الجوي للأرض، ويُعَد ضروريًّا لوجودنا بصفتنا حيواناتٍ مُتحركةً مُفكرة، ولكن لولا عملية التمثيل الضوئي التي تُخلِّقه، لكان من الغازات النادرة جدًّا. هذا ويكون الأكسجين مختلطًا بغازاتٍ أخرى تتفاعل معه بنشاطٍ شديد، لدرجة أنهما يكونان على وشك الاحتراق معًا. ولعل التفسير الوحيد لارتفاع تركيز الميثان إلى حدٍّ لافت في الغِلاف الجوي الحالي أنه يُنتَج باستمرار بسبب وجود حياة. أمَّا ثاني أكسيد الكربون، فهو شحيح بدرجةٍ مُفاجئة في الغِلاف الجوي الحالي. وكما سنرى، فتفسير ذلك أيضًا ينطوي على وجود الحياة.

لغز الشمس الصغيرة الخافتة

بينما كان لفلوك يُفكر في كيفية اكتشاف وجود حياة على كوكبٍ ما، كان كارل ساجان في مَمر مُختبَر الدفع النفَّاث في مدينة باسادينا بولاية كاليفورنيا، يُفكر مُتحيِّرًا فيما أبقى كوكبَ الأرض دافئًا في المراحل المبكرة من عمره. يتمثل اللغز في أنَّ النجوم، التي تُعَد شمسنا واحدة منها، تحترق بسطوعٍ متزايد باطِّراد مع مرور الزمن. وعندما تكوَّنَت الأرض — مع بقية المجموعة الشمسية — منذ حوالَي ٤٫٥ مليارات سنة، كانت شدة إضاءة شمسنا أقل



شكل ١-١: تركيبات الأغلفة الجوية المحيطة بالأرض والمريخ والزهرة (نسبة الخلط تكافئ نسبة الغاز في الغِلاف الجوي).

بحوالَي ٣٠ في المائة من قيمتها الحالية. ومع ثبات كل العوامل الأخرى، كان من المفترَض أن يؤدي ذلك إلى انخفاض حرارة سطح الأرض بمقدار ٣٣ درجةً مئوية، وهو ما يعني أنَّ المحيطات كانت ستتجمد، في ظل التركيب الحالي للغِلاف الجوي. وبدون وجود ماء سائل على السطح، لكان من المستحيل أن تكون الأرض مهد الحياة. غير أنَّ ظهور الصخور الرسوبية قبل ٣,٨ مليارات سنة أظهرَ أنَّ بعض المواد حُلِّلَت من اليابسة بفعل التجوية، وترسَّبَت بعدئذٍ في قاع البحر، ونستنتج من ذلك أن الأرض كانت تحتوي بالفعل على

محيطاتٍ سائلة في المراحل المبكرة من عمرها. لذا فمن المؤكَّد أنَّ شيئًا ما قد أبقى الأرض دافئةً في المراحل الأولى من عمرها.

اقترح ساجان أن هذا الشيء يمكن أن يكون غطاءً أكبر سُمكًا مكوَّنًا من غازاتٍ حابسة للحرارة في الغِلاف الجوي. كان المرشَّح الأرجح من وجهة نظره هو غاز الأمونيا، وأحد أسباب ذلك أنَّ الأمونيا إذا كان موجودًا في الغِلاف الجوي المبكر، فمن الممكن أن يكون قد تفاعل مع غازاتٍ أخرى ليكوِّن الأحماض الأمينية، التي تُعَد اللبنات الأساسية للحياة. والآن نظنُّ أنَّ الأرض حين كانت في مراحلها المبكرة، من المفترَض أنها كانت محاطة بغِلافٍ جوي يسوده ثاني أكسيد الكربون، مثل الغلافَين المحيطَين بكوكبَي المريخ والزهرة في الوقت الحاضر. ثم نُقل معظم ثاني أكسيد الكربون إلى القشرة الأرضية أثناء العصور الطويلة التي تلت ذلك. ولكن تلك النظرية تُثير لغزًا مختلفًا؛ إذ يتعين تفسير سبب إزالة ثاني أكسيد الكربون على نحوٍ ثابت، مع ازدياد شدة سطوع الشمس، وهو ما أتاح للكوكب أن يبقى باردًا.

فرضية جايا

عندما ناقَش لفلوك لغز الشمس الصغيرة الخافتة مع ساجان، خطرَت بباله فكرة؛ إذا كان الغِلاف الجوي ناتجًا في الأساس من وجود حياة، وكان تركيبه مُستقرًّا على مَرِّ فتراتٍ زمنية جيولوجية؛ فربما تُنظِّم الحياةُ تركيبَ الغلاف الجوي، وبذلك تُنظِّم مُناخ كوكب الأرض. كان مُقدَّرًا لهذه الفكرة أن تُصبح معروفة بعدئذٍ باسم فرضية جايا؛ ومفادُها أنَّ الحياة وبيئتها غير الحية على كوكب الأرض تكوِّنان نظامًا ذاتيَّ التنظيم يُبقي مُناخ الأرض وتركيب الغِلاف الجوي صالحَين لوجود حياة فيهما. طوَّر لفلوك فرضية جايا، التي سُميَت بهذا الاسم نسبةً إلى جايا إلهة الأرض في الأساطير الإغريقية، في أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات من القرن الماضي مع لين مارجوليس، العالمة العظيمة الراحلة التي كانت متخصِّصة في علم الأحياء الدقيقة. تُمثِّل هذه الفرضية أول بيانٍ علمي يعتبر الأرض نظامًا كليًّا واحدًا وليس منظومات جزئية منفصلة. ولذا فمن وجهة نظري الشخصية على الأقل، تُمثِّل فرضية جايا بداية عِلم نظام الأرض.

بالطبع كان يوجد رُواد سابقون بدءوا يُفكِّرون في الأرض على أنها نظام، وبدءوا يُدرِكون دور الحياة في هذا النظام. فجيمس هَتون، الذي كان يُلقَّب بأبي الجيولوجيا، وصَف الأرض الصُّلبة في أواخر القرن الثامن عشر بأنها «ليست مجرد آلة بل كِيانٌ منظَّم؛

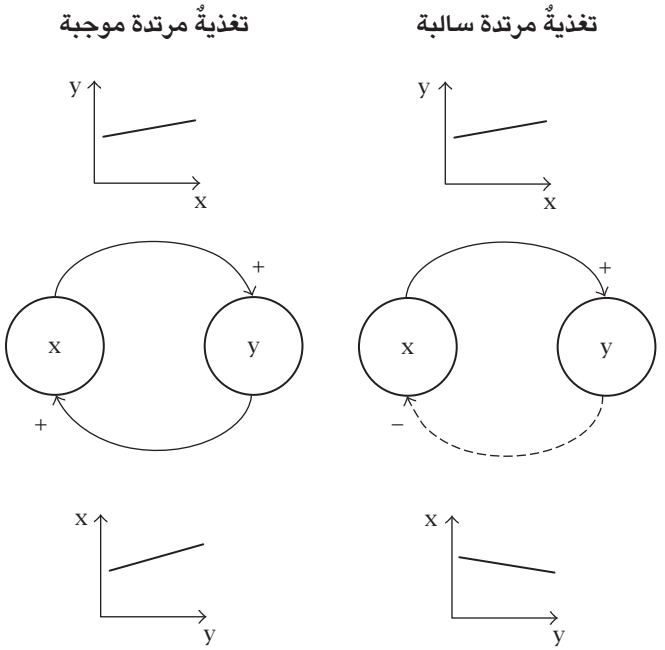
لأنها تملك القدرة على التجدد وتعويض ما تفقده.» وكذلك أكَّد فلاديمير فيرنادسكي في كتابه «الغلاف الحيوي»، الذي نُشر في عام ١٩٢٦، أنَّ الحياة هي القوة الجيولوجية الرئيسية التي تُشكِّل الأرض. وفي عام ١٩٥٨، اقترح عالِم المحيطات ألفريد ردفيلد آلياتٍ لِما أسماه «التحكم الحيوي في العوامل الكيميائية في البيئة». هذا مجرد غَيضٍ من فيض. ولكن رغم ذلك، لم يُدرِك أيُّ مُفكِّر سابق مدى وقوة اقتران الحياة ببيئتها الكوكبية في نطاق الكون ككلٍّ.

كتَب لفلوك ومارجوليس في البداية أنَّ تنظيم الغلاف الجوي يحدُث بـ «واسطة» المُحصِّلة الإجمالية لكل أشكال الحياة على الأرض «ومن أجلها». ومع أنهما لم يقصدا ذلك، يبدو أنَّ هذا يشير ضمنيًّا إلى نوع من التنظيم أو التحكم الغائي في بيئة الكوكب بفعلِ كائناتٍ غير واعية. غير أنَّ مثل هذا الفكر الغائي يقع خارج الحدود المسموح بها للعلم؛ ولذا بدأ جدال بخصوص فرضية جايا، وما زال هذا الجدال مستمرًّا حتى اليوم. وفي الحقيقة، فالفكرة التي كان لفلوك يحاول إيصالها هي أنَّ نظامًا معقَّدًا كالأرض يُمكن أن يُنظِّم ذاته تلقائيًّا، دون أي رؤية أو غايةٍ واعية.

التغذية المرتدة

كان لفلوك على دراية بنظرية الأنظمة، وأحد فروعها الذي يُسمى «السيبرنطيقا»، والذي يَدرُس أنظمة التحكم التنظيمي. ومن المفاهيم البالغة الأهمية في نظرية الأنظمة مفهوم التغذية المرتدة. يُشير ذلك إلى سلسلة من علاقة السبب والنتيجة تُشكِّل حلقةً مغلقة (شكل ١-٢). وهذا يعني أنَّ المعلومات المتعلقة بحالةِ جزء من نظام معيَّن في الماضي أو الحاضر يُمكن أن تؤثر في حالته الحالية أو المستقبلية. قد يكون من الصعب فهمُ مثل هذه الحلقات المغلقة من العلاقات السببية؛ لأننا تعلمنا أن نُفكِّر «من منظور خطي»؛ حيث يؤدي سبب معيَّن إلى نتيجة معيَّنة وقُضي الأمر. غير أنَّ لفلوك أدرك أنَّ نظامًا معقَّدًا كالأرض ينطوي حتمًا على العديد من حلقات التغذية المرتدة المغلقة التي تؤثر تأثيرًا عميقًا في سلوكه.

يوجد نوعان من التغذية المرتدة. التغذية المرتدة الموجبة، التي تُعَد حلقةً مُضخِّمة من الصلات السببية؛ بمعنى أنَّ إحداث تغيير أوَّلي في أي جزء من الحلقة سيُثير استجابةً تُضخِّم التغيير الأوَّلي. والنوع الثاني هو التغذية المرتدة السالبة التي تُعَد حلقة مُثبِّطة من الصلات السببية؛ بمعنى أنَّ إحداث تغيير أوَّلي في أي جزء من الحلقة سيُثير استجابةً تُثبِّط التغيير الأوَّلي. وبذلك فالتغذية المرتدة السالبة تميل إلى إبقاء الوضع على ما هو عليه، في



شكل ١-٢: تغذيةٌ مرتدة موجبة وتغذيةٌ مرتدة سالبة. توضِّح إشارة الزائد المرسومة على سهم متصل وجودَ علاقةٍ طردية (أي إنَّ مقدار Y يزداد كلما ازداد مقدار X). وتوضِّح إشارة الناقص على سهمٍ متقطع وجودَ علاقةٍ عكسية (أي إنَّ مقدار X يقل كلما زاد مقدار Y). يعطي أي عدد زوجي (بما في ذلك الصفر) من العلاقات العكسية المترابطة في حلقةٍ مغلقة تغذيةً مرتدة موجبة، فيما يعطي العدد الفردي تغذيةً مرتدة سالبة.

حين أنَّ التغذية المرتدة الموجبة تميل إلى دفع التغيير وتعزيزه. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ المقصود بكلمتَي «موجبة» و«سالبة» ليس المعنى الذي ينطوي على الإيجابية والسلبية، بل المعنى الرياضي للفظَين. أي ليس شرطًا أن تكون «التغذية المرتدة الموجبة» مفيدة لنظام الأرض، ولا أن تكون «التغذية المرتدة السالبة» ضارَّة به. بل إنَّ المعنى الرياضي غالبًا ما يكون معاكسًا للمعنى اللفظي في الحقيقة.

افترض لفلوك ومارجوليس أنَّ المزيج بين حلقات التغذية المرتدة السالبة والموجبة في نظام الأرض يُنتج خاصية التنظيم الذاتي في المُجمَل؛ بمعنى أنَّ النظام إذا تعرَّض لتأثيرٍ

ما، يميل إلى الارتداد إلى حالته الأصلية. وهذا يعني أنَّ التغذية المرتدة السالبة صاحبة اليد العُليا، على الأقل بالقرب من حالة النظام الابتدائية. ولكن إذا تعرَّض النظام لتغييرٍ أشد ممَّا يسمح له بالعودة إلى حالته الأصلية، فالنتيجة المنطقية أنه ربما يُدفَع إلى حالةٍ بديلة، بفعلِ التغذية المرتدة الموجبة. بعبارة أخرى، فالتنظيم الذاتي ليس ثابتًا، بل يمكن أن ينهار.

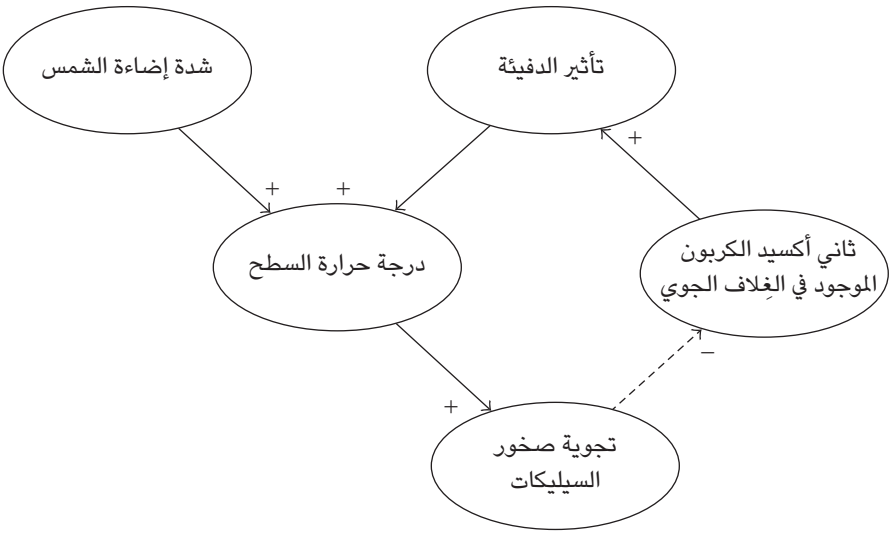
وهكذا يتمثَّل جزءٌ أساسي من علم نظام الأرض في تحديد حلقات التغذية المرتدة في نظام الأرض وفهم السلوك الذي يمكن أن تُحدِثه. ولكن عندما خطرَت ببال لفلوك فِكرتُه العظيمة، التي تطوَّرَت لاحقًا إلى فرضية جايا، لأول مرة، لم يكن لديه أي فكرة عن ماهية آليات التغذية المرتدة التي يمكن أن تُنظِّم المناخ وتركيب الغِلاف الجوي، بل لم يكن أي شخص آخر آنذاك لديه فكرة عن ذلك. صحيحٌ أنَّ لفلوك ومارجوليس بدآ خلال السبعينيات يفترضان آليات يمكن أن تكون مسئولةً عن تنظيم تركيب الغِلاف الجوي، لكن الاستقرار الطويل الأمد الذي يتسم به مناخ الأرض ظل يمثِّل لغزًا.

تنظيم المناخ

ثم اقترح جيمس ووكر وبي بي هايز وجيم كاستينج، في عام ١٩٨١، آلية تغذية مرتدة سالبة يُمكن أن تكون قد أحدثت تأثيرًا معاكسًا يعادل تأثير زيادة سطوع الشمس، وأبقت درجة حرارة الأرض منخفضة. ومن الأسس التي تقوم عليها فكرتهم عمليةٌ تُسمى تجوية صخور السيليكات، وهي تُزيل ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي والمحيطات على مرِّ العصور الجيولوجية. وهذا يُوازِن تأثير ازدياد كمية ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي والمحيطات بفعلِ العمليات البركانية وعمليات تحويل الصخور، التي تُعيد تدوير الكربون القديم الذي ترسَّب في قاع البحار. وتتضمن عملية تجوية السيليكات تفاعُل ثاني أكسيد الكربون ومياه الأمطار مع صخور السيليكات، وهو ما يؤدي إلى إطلاق أيونات الكالسيوم والماغنسيوم والبيكربونات التي تترسب في المحيط، حيث تتحد معًا لتُكوِّن صخور الكربونات. وهذا ينقل ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي إلى القشرة الأرضية.

ما أدركه ووكر وزملاؤه أنَّ تجوية صخور السيليكات، مثلها مثل معظم التفاعلات الكيميائية، تجري بوتيرة أسرع عندما تكون الظروف المحيطة بها أدفأ. ومن ثَم، فإذا كان يوجد شيء يعمل على تدفئة الأرض، مثل سطوع الشمس على نحوٍ مُطَّرد، فمن المفترَض أن يؤدي ذلك إلى تسريع عملية تجوية صخور السيليكات، وإزالة المزيد من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. ولأنَّ ثاني أكسيد الكربون أحد غازات «الدفيئة» التي تحبس

الحرارة، فمن المفترَض أن يميل ذلك إلى خفض الحرارة مجدَّدًا. تُمثِّل هذه العملية إحدى آليات التغذية المرتدة السالبة (شكل ١-٣)، وفي هذه الحالة تُعَد التغذية المرتدة «السالبة» نافعة بالتأكيد؛ لأنها تساعد في تحقيق استقرار مناخ الأرض.



شكل ١-٣: يبيِّن الشكل التغذية المرتدة السالبة الناتجة من تجوية السيليكات، فيما تظهر شدة الإضاءة الشمسية المتغيرة على أنها تأثيرٌ خارجي.

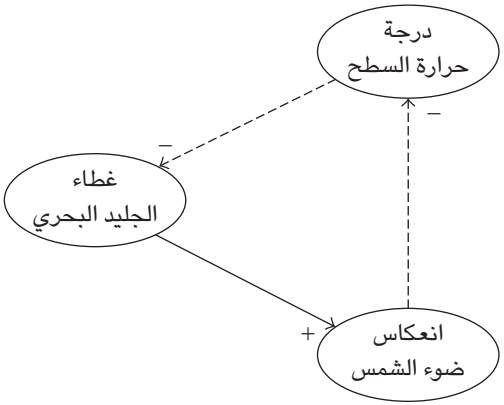
وصحيح أنَّ التغذية المرتدة الناتجة المتمثلة في تجوية السيليكات ليست مثالية — إذ لا يمكنها إبطال تأثير ازدياد سطوع الشمس تمامًا — لكنها تُخفِّف التغيرات المتوقَّعة في درجة حرارة الأرض. هذا وقد أضاف جيم لفلوك، مع أندرو واطسون ومايك وايتفيلد، بعد ذلك بوقتٍ قصير لمسةً بيولوجية إلى آلية التغذية المرتدة. وذلك بأنهم أشاروا إلى أنَّ النباتات ومجتمعات الكائنات المرتبطة بها التي تعيش في التربة تخلق بيئةً تجويةٍ حمضية تُذيب الصخور بوتيرة أسرع، وبذلك تُسرِّع انخفاض كمية ثاني أكسيد الكربون. يؤدي هذا إلى انخفاض درجة حرارة الأرض، ولأن إنتاجية النبات تتأثر بالتغيرات في ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة، يمكن أن تنتج آلية تغذية مرتدة أقوى.

الأرض كرةٌ ثلجية

بينما كان علماء الكيمياء الجيولوجية يحاولون التوصل إلى العوامل التي يُمكن أن تحافظ على استقرار مُناخ الأرض على مرِّ أطول النطاقات الزمنية، كان واضعو نماذج المناخ الأوائل مهمومين بالعوامل التي ربما تُزعزع استقراره. ففي أواخر الستينيات، أدرك ميخائيل بوديكو ووِيليام سيلرز، كلٌّ على حدة، أن مناخ الأرض يمكن نظريًّا أن يُحوَّل إلى حالةٍ متجمِّدة؛ حيث يكون مغطًّى بالجليد من خط الاستواء إلى القطبَين. أصبحَت هذه الحالة البديلة تُعرف باسم «الأرض كرة ثلجية»؛ لأن الكوكب عندئذٍ سيبدو من الخارج ككرة ثلجية عملاقة. اللافت أنَّ نموذجَي بوديكو وسيلرز اقترحا أنَّ حالة الكرة الثلجية ستكون مستقرة، مثل حالة المُناخ الحالية بالضبط؛ لأنها سوف تمتص قدرًا أقل بكثير من الطاقة الشمسية، وتُوازِن ذلك بإصدار إشعاع حراري أقل، بفضل درجة حرارتها المنخفضة.

يتضمَّن الانتقال من الحالة المُناخية الحالية إلى الحالة التي تتحول فيها الأرض إلى كرة ثلجية آليةً قوية جدًّا من آليات التغذية المرتدة الموجبة، تُعرَف باسم «التغذية المرتدة الرابطة بين الجليد والبياض» (والبياض هو مقياس الانعكاس الانتشاري لأشعة الشمس) (شكل ١-٤). الفكرة الأساسية هي أنَّ الجليد والثلج يعكسان قَدْرًا كبيرًا من ضوء الشمس (أي يتسمان بدرجة بياض عالية). ومن ثَم، فإذا حدث شيءٌ يميل إلى خفض درجة حرارة الأرض — كانخفاض في محتوى الغلاف الجوي من ثاني أكسيد الكربون مثلًا — يؤدي هذا إلى توسيع مساحة الجليد والثلج؛ ومن ثَم إلى زيادة قَدْر ضوء الشمس المنعكس، وانخفاض درجة الحرارة على نحو أكبر. وفي هذه الحالة، فالتغذية المرتدة «الموجبة» ليست مفيدةً على الإطلاق بالتأكيد.

وككل آليات التغذية المرتدة الإيجابية، يمكن أن تؤدي التغذية المرتدة الرابطة بين الجليد ودرجة البياض إلى زيادة تغيُّر المناخ في أيٍّ من الاتجاهين؛ إما اتجاه انخفاض الحرارة (بازدياد رُقعة الغطاء الجليدي) وإما اتجاه زيادة الحرارة (بانحسار رُقعة الغطاء الجليدي). تجري هذه التغذية حاليًّا بالفعل على كوكب الأرض، بغطاءَيه الجليديَّين الصغيرَين نسبيًّا عند كل قُطب؛ حيث تميل إلى تضخيم التغيرات المناخية وخصوصًا بالقرب من القطبَين. غير أنَّ التغذية المرتدة تُصبح أقوى إذا انخفضَت حرارة الكوكب وزادت رُقعة الغطاء الجليدي. وذلك لأن الجليد ينتشر على السطح الكروي وصولًا إلى دوائر عرض أكثر انخفاضًا؛ حيث يوجد قَدْر أكبر من أشعة الشمس الواردة. وعندما يصل الجليد إلى دوائر العرض الأكثر انخفاضًا، يمكن أن يؤدي تغيرٌ معيَّن في درجة الحرارة إلى حدوث تغيرٍ



شكل ١-٤: التغذية المرتدة الموجبة التي تربط بين الجليد والبياض.

تدريجي أكبر في مساحة الغطاء الجليدي، وزيادةٍ أكبر في انعكاس ضوء الشمس، وتضخيمٍ أكبر في تغيُّر درجة الحرارة بالتبعية.

إذا وصل حدُّ الغطاء الجليدي إلى دائرة العرض البالغة ٣٠ درجة تقريبًا — أي مدار السرطان أو الجدي — تُصبح التغذية المرتدة قوية جدًّا لدرجة أنها «تصير جامحة وخارجة عن السيطرة». بمعنى أنَّ أي انخفاض إضافي طفيف في درجة الحرارة سيؤدي إلى زيادة في رُقعة الغطاء الجليدي، وتبريدٍ شديد مُصاحب لذلك بدرجةٍ تضاهي شدة التبريد الأوَّلي (أو تفوقها). وهذا يُسفِر عن زيادةٍ أكبر من ذي قبلُ في الغطاء الجليدي، وهكذا دوالَيك، إلى أن تنغلق حافتا الغطاء الجليدي بعضهما على بعض عند خط الاستواء، فتُكوِّنان بذلك كرةً أرضية ثلجية.

تُعَد مثل هذه التغذية المرتدة الموجبة الجامحة نادرة جدًّا. فهي لا تحدُث إلا عندما يؤدي إكمال دورة واحدة عَبْر إحدى حلقات التغذية المرتدة الموجبة إلى تضخيم التغيير الأوَّلي بمقدار ١٠٠ في المائة أو أكثر. وهذا التضخيم الشديد لا يصل إليه سوى جزء صغير من الآليات، سواء في الأرض أو أي نظام آخر. بل إنَّ معظم آليات التغذية المرتدة الموجبة أضعف من أن يُسبِّب زيادةً جامحة — أي إنَّ إكمال دورة واحدة عَبْر حلقة التغذية المرتدة يُضخِّم التغيير الأوَّلي بمقدارٍ أقل بكثير من ١٠٠ في المائة — وبذلك يميل النظام إلى العودة إلى حالةٍ قريبة من حالته الأصلية.

الهروب من حالة الكرة الثلجية

في الوقت الذي صاغ فيه بوديكو وسيلرز نموذجَيهما، لم يكن أي شخص يتصور أنَّ الأرض تحوَّلَت بالفعل إلى كرةٍ ثلجية في الماضي؛ إذ كان من الصعب أنَّ يتخيل أحدٌ الكيفية التي استطاع الكوكب أن يهرب بها من تلك الحالة. ولكن توجد آلية هروب معقولة، وأول من اقترحها هو جو كيرشفينك في عام ١٩٩٢. تعتمد تلك الآلية على اختلال توازُن دورة الكربون الطويلة المدى. ففي ظل المناخ الشديد الجفاف والمُجمِّد الذي اتسمَت به الأرض عندما كانت كرةً ثلجية، مع اكتساء جزء كبير من القارَّات بالصفائح الجليدية، توقَّفَت عملية تجوية السيليكات التي تُزيل ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. غير أنَّ إضافة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي من البراكين وعمليات تحوُّل الصخور استمرَّت، بينما استطاعت البراكين أن تخترق الصفائح الجليدية الكبيرة على أسطح القارات بإذابتها. وهكذا في ظل إضافة مزيد من ثاني أكسيد الكربون وعدم إزالة أي قَدْر منه، فإنَّ تركيزه في الغِلاف الجوي ظل يتراكم ويتراكم ويتراكم.

ومع تراكُم ثاني أكسيد الكربون، حُبس المزيد من الكمية الضئيلة المتدفقة من الإشعاع الحراري المنبعث من الكوكب المتجمد وأُعيد إلى السطح؛ الأمر الذي أدى إلى ارتفاع درجة الحرارة. وبعد ذلك بملايين السنين، وصل ثاني أكسيد الكربون في النهاية إلى تركيزٍ كافٍ ليبدأ إذابة الجليد عند خط الاستواء وتعرية سطح المحيط الغامق. وعند حدوث ذلك، بدأَت التغذية المرتدة الرابطة بين الجليد ودرجة البياض مجدَّدًا، لكنَّ تأثيرها هذه المرة كان في الاتجاه المعاكس؛ إذ عزَّزَت ذوبان الجليد، في عمليةٍ جامحة مرةً أخرى.

وتقترح النماذج أنَّ الذوبان الجامح للكرة الأرضية الثلجية استمر على المنوال نفسه حتى وصل إلى حالةٍ أصبح فيها الكوكب خاليًا من الجليد. ومع وجود كمية هائلة من ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، أصبح المُناخ حارًّا (ورطبًا) جدًّا، وصارت عملية تجوية السيليكات سريعةً جدًّا. وعلى مرِّ ملايين السنين التي تلت ذلك، أُزيل ثاني أكسيد الكربون الزائد الذي كان قد تراكَم في الغلاف الجوي؛ مما أسفر عن تبريد المُناخ مرةً أخرى. وبالطبع إذا لم يكن شيءٌ آخر قد تغيَّر، يُمكن أن يكون المُناخ قد برَد للدرجة التي جعلَت الأرض تتحول إلى كرةٍ ثلجية مرةً أخرى، وكرَّرَت الدورةُ نفسها. وهكذا سيظل النظام مذبذَبًا بين هذه الحالة وتلك، وهذا التذبذب عادةً ما يُميز سلوك النظام الذي تتفاعل فيه تغذيةٌ مرتدة موجبة سريعة — أي التغذية المرتدة الرابطة بين الجليد ودرجة البياض في هذه الحالة — مع تغذيةٍ مرتدة سالبة بطيئة؛ أي التغذية المرتدة المتمثلة في تجوية السيليكات في هذه

الحالة. وكما سنرى (في الفصل الرابع)، يتضمَّن تاريخُ الأرض فترةً زمنية واحدة على الأقل يُعتقد أنها شهدَت تحوُّل الكوكب إلى كرةٍ ثلجية عدة مرات.

تغيُّر عالَمي

كان التفكير في تاريخ كوكبنا، مقارنةً بالكواكب المجاورة له، هو الذي بدأ عِلم نظام الأرض. ولكن بحلول ثمانينيات القرن الماضي، ظهر سببٌ آخر وجيه دفع العلماء إلى التفكير في كوكب الأرض على أنه نظام؛ إذ بدأ العالَم آنذاك يُدرك أنَّ الأنشطة البشرية كانت تُغيِّر نظام الأرض الموجود، على مدى نطاقٍ زمني أقصر بكثير. وأدرك العلماء الذين كانوا يَدرُسون استنزاف الأوزون من طبقة الستراتوسفير أنَّ فهم تلك التغيرات العالمية فهمًا صحيحًا يستلزم التركيز على التفاعلات بين المكوِّنات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية في نظام الأرض.

وهنا أسهَم العمل الذي أنجزه لفلوك إسهامًا رئيسيًّا مرةً أخرى؛ لأنه، في عام ١٩٧١، كان أول من اكتشف التراكم العالمي لمركَّبات الكلوروفلوروكربون في الغلاف الجوي. وفي عام ١٩٧٤، استخدَم ماريو مولينا وشيروود رولاند نموذجًا من نماذج كيمياء الغِلاف الجوي للتنبؤ بأنَّ هذا التراكم لمركَّبات الكلوروفلوروكربون سيحفز فقدان جزء متواضع من الأوزون في طبقة الستراتوسفير (مقداره ٧ في المائة عَبْر فترة تتراوح ما بين خمسين ومائة سنة). ولكن اتضح لاحقًا أنَّ الواقع أشد دراميةً بكثير. ففي عام ١٩٨٥، نشر جو فارمان وزملاؤه رصْدَهم لثقب أوزون فوق القارة القطبية الجنوبية. ومن المفارقات أنَّ مطياف رسم خرائط الأوزون الكلي، الذي يحمله قمرٌ صناعي والذي أُطلِق في عام ١٩٧٩، كان يرى هذا الثقب بالفعل طوال كل هذا الوقت، لكن إحدى الخوارزميات الحاسوبية كانت ترفض البيانات المتطرفة مُعتبِرةً إياها أحد أخطاء الجهاز. أثار انفتاح ثقب الأوزون بحثًا علميًّا دءوبًا لفهم السبب الذي أدى إلى فقدان هذا القَدْر الهائل من الأوزون. واتضح أنَّ السبب يتعلق بتأثيراتٍ متبادَلة بين دوران الرياح في الغِلاف الجوي والمعروف بالدوامة القطبية، وتشكيل سُحُب الستراتوسفير القطبية الشديدة البرودة، وتفاعلات كيميائية على سطحها تُطلِق الكلور والبروم، والتدمير المُحفَّز للأوزون بفعل هذين الهالوجينَين. وبحلول عام ١٩٨٧، وقَّعَت ٥٩ دولةً على بروتوكول مونتريال، الذي يدعو إلى فرض قيود صارمة للحد من انبعاثات مركَّبات الكلوروفلوروكربون.

كان من الواضح أيضًا بحلول ثمانينيات القرن العشرين أنَّ تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي يتزايد، وهذا بفضل القياسات المستمرة المأخوذة من مرصد مونا لوا في هاواي، التي بدأها تشارلز ديفيد كيلينج في أواخر الخمسينيات. كان السبب الواضح في هذه الزيادة هو مصادر ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ والناتجة من حرق الوقود الأحفوري وتغيُّر استخدام الأراضي، ولكن كان يوجد لغزٌ متمثِّل في أنَّ النسبة التي كانت تتراكم في الغِلاف الجوي سنويًّا من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون كانت تُساوي النصف تقريبًا فقط.

ومن أجل فهم ما كان يحدث، ابتكَر بعض الرُّوَّاد مثل بِرت بولين النماذجَ الأولى لدورة الكربون العالمية، موضِّحين بها أنَّ المحيطات واليابسة كانت تمتص جزءًا من ثاني أكسيد الكربون الذي يضيفه البشر. وفي الوقت نفسه، كانت عملية وضع نماذج للمُناخ قيد النضج أيضًا. ففي أواخر الستينيات من القرن الماضي، قدَّم سيوكورو مانابي (الشهير بـ «سوكي») وكيرك برايان أول نموذج عالمي نجح في الجمع بين عمليات دوران الغِلاف الجوي والمحيطات. واستخدم مانابي، بالتعاون مع ديك ويذرالد، النموذج لوضع التنبؤات الأولى لتغيُّر المناخ بسبب تراكُم ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، والتي نُشرَت في عام ١٩٧٥. وكذلك جُمِع سِجل الأرصاد الخاص بارتفاع درجات حرارة الأرض العالمية لأول مرة خلال السبعينيات، بواسطة وحدة أبحاث المناخ في جامعة إيست أنجليا. وبعد سلسلة من السنوات التي اتسمَت بارتفاع درجة الحرارة في الثمانينيات، أدلى جيمس هانسن، المتخصص في إنشاء نماذج المُناخ، بشهادةٍ أمام الكونجرس الأمريكي في عام ١٩٨٨ مُنبهًا العالم إلى مشكلة الاحترار العالمي.

يُظهِر هذان النموذجان المشهوران كيف بدأ علماء الأرصاد وواضعو النماذج الحاسوبية يفهمون مسألة التغيير العالمي من منظور وجود تفاعلات بين أجزاء من نظام الأرض. ووسط كل هذا النشاط، جمَعَت وكالة ناسا مجموعةً من العلماء لإرساء إطار خارجي لهذا المجال الناشئ الخاص بعلم نظام الأرض. وفي تقريرٍ مؤثِّر في عام ١٩٨٦، قدَّموا «رؤية لنظام الأرض باعتباره مجموعةً من العمليات المتفاعلة التي تجري على نطاقٍ مكاني وزماني واسع، بدلًا من أن يكون مجموعةً من المكوِّنات المفردة». ويُعَد الإرث الأبقى الذي بقي من هذا التقرير مُخطَّطًا بيانيًّا يوضِّح التفاعلات بين مكوِّنات نظام الأرض (شكل ١-٥)، وأصبح يُعرف باسم «مخطط بريذرتون»؛ نسبةً إلى رئيس لجنة العلماء، فرانسيس بريذرتون. ما فعلَه مخطط بريذرتون هو أنه وضَع مجموعةً كاملة من

الموضوعات العلمية — والمجتمعات العلمية المرتبطة بها — معًا على خريطةٍ واحدة. وبذلك أتاح رابطةً اجتماعية جعلَت مجموعةً واسعة من الباحثين تتجمَّع معًا تحت شعار «عِلم نظام الأرض» الدامج التكاملي.

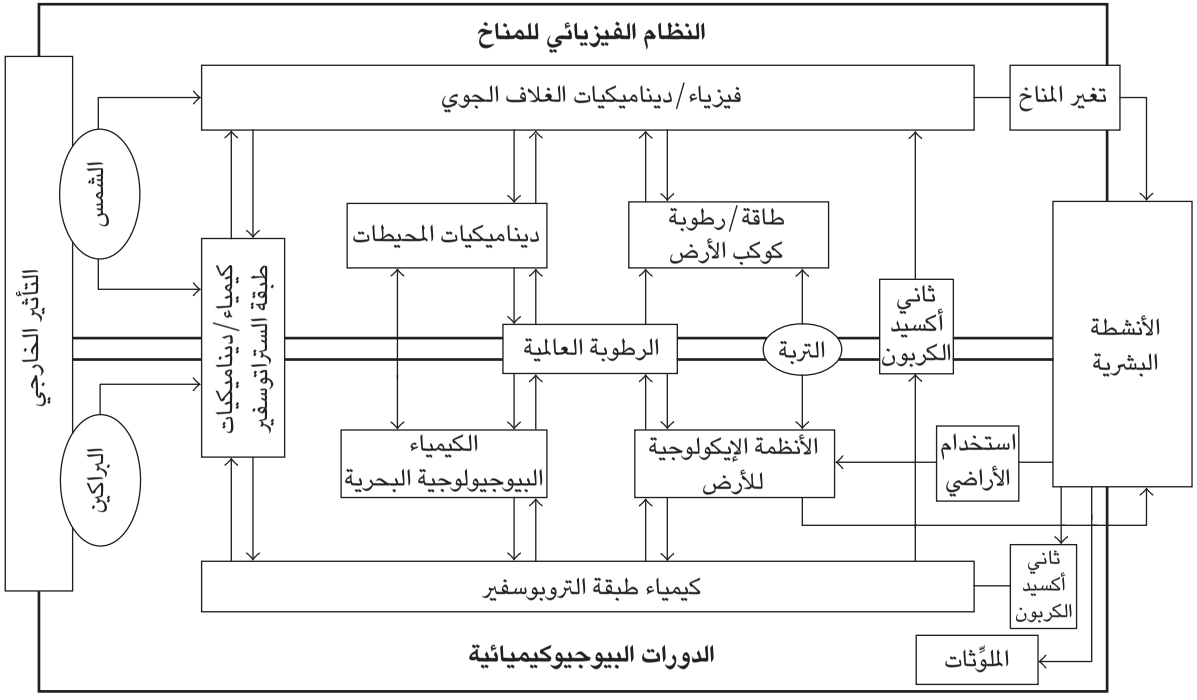
تحديد نظام الأرض

عادةً ما تكون الخطوة الأولى في التفكير النُّظُمي هي أن تتعرَّف على نظامك وحدوده. وهذا يعني تحديدَ ما هو داخل النظام وما هو خارجه. وقد كان مخطط بريذرتون (شكل ١-٥) وتقرير ناسا المصاحب له من أولى المحاولات الرامية إلى فعل ذلك بالضبط فيما يتعلق بنظام الأرض.

يُعَد الحد الخارجي لنظام الأرض واضحًا؛ فهو قمة الغلاف الجوي. أي إنَّ الشمس تقع خارج نظام الأرض. صحيحٌ أنها توفِّر المصدر الرئيسي الذي يُمدُّنا بالطاقة، لكنها لا تتأثر بما يجري داخل نظام الأرض. هذا ويحدُث تبادُل لكمياتٍ كبيرة من الطاقة عَبْر الجزء العلوي من الغِلاف الجوي، ولكنَّ التبادل الذي يحدُث فيما بين المواد ضئيل نسبيًّا. فبعض ذرات الهيدروجين يُمكن أن تهرُب من جاذبية الأرض وتُفقَد في الفضاء، فيما يأتي إلينا من الفضاء بعضُ المواد النيزكية (حوالي ٤٤ طنًّا يوميًّا في المتوسط)، لكنَّ معدَّلات تدفُّق المواد بالغةُ الصِّغر مُقارنةً بمعدَّلات دوران المادة داخل نظام الأرض.

غير أنَّ الشيء الأقل وضوحًا هو ما إذا كان ينبغي وضعُ حدٍّ داخلي لنظام الأرض، والموضع الذي يُفترض وضع هذا الحد عنده. فمن منظور الفضاء الخارجي، من الطبيعي اعتبار كوكب الأرض كله نظامًا واحدًا. غير أنَّ الكتلة الكبيرة المتمثلة في الجزء الداخلي من كوكب الأرض لها مصدر حرارة خاص بها، يُغذيه مزيج من التحلل الإشعاعي والحرارة المتبقية من تراكُم الكوكب. وهذا المصدر الحراري الداخلي يحفِّز الحمل الحراري الخاص بطبقة الوشاح والنشاط البركاني والصفائح التكتونية عند السطح. ومن ثَم فهو يؤثِّر في نظام الأرض عند السطح ولكنه لا يتأثَّر به. لذا، فمن منظور التفكير النُّظُمي، يُعتبر «خارج» النظام، مع أنه يقع تحتنا (وتدفُّق الحديد السائل في لُب الأرض الخارجي يُنشئ مجالًا مغناطيسيًّا واقيًا من حولنا).

إذَن، فأين يضع العلماء الحد الفاصل بين نظام سطح الأرض والجزء الداخلي من الأرض؟ من المفاجئ بعض الشيء أنَّ ما يُعَد جزءًا من نظام الأرض يعتمد على النطاق



شكل ١-٥: «مخطط بريذرتون» للموائع والعمليات البيولوجية على الأرض.

الزمني محل الاهتمام. فإذا كنا مهتمين بالتغير العالمي على مدار القرن المُقبِل، نستبعد تدوير الصفائح التكتونية للقشرة الأرضية من نماذجنا؛ لأنَّ هذا التدوير يحدُث على مدار ملايين عديدة من السنين. بل لا نحتاج إطلاقًا إلى أن نضع في حُسباننا تجوية القارات واستقرار الرواسب في المحيطات. وصحيحٌ أننا نضع في حُسباننا المواد الناجمة عن الانفجارات البركانية، ولكنها تُعامَل على أنها آتية من خارج النظام، وهذا بالضبط ما يُبيِّنه مخطط بريذرتون (شكل ١-٥).

وكلما كان النطاق الزمني الذي نَدرُسه أطول، كَثُرت العناصر التي نحتاج إلى إدراجها في نظام الأرض. لنضرب هنا مثلًا بأشد الحالات تطرفًا؛ فإذا كنا مهتمين، على سبيل المثال، بدراسة الآليات التي عادلَت تأثير ازدياد سطوع الشمس المطَّرد على امتداد مليارات السنين، نحتاج إلى أن نضع في حُسباننا إنشاء القارَّات وحركتها، وإعادة تدوير الكربون المترسِّب في القشرة الأرضية، والتغيرات الطويلة المدى في النشاط البركاني والنشاط التكتوني. وهذا يعني أنَّ المادة الموجودة في القشرة الأرضية تُصبح جزءًا من نظام الأرض، وعلينا أن ندرك أنَّ القشرة أيضًا تتبادل المواد مع وشاح الأرض.

كل هذا يجعل الحد السفلي لنظام الأرض ضبابيًّا بعض الشيء. ومن ثَم تُوجد نزعةٌ قوية إلى إدراج باطن الكوكب كله ضمن نظام الأرض، وهذا بالضبط ما فعَله تقرير عام ١٩٨٦ الصادر عن وكالة ناسا عند دراسة أطول النطاقات الزمنية. وكذلك يميل بعض العلماء الذين يَدرُسون كوكب الأرض إلى إبقاء الكوكب كله ضمن حدود نظام الأرض، وهذا مفهوم بالطبع. غير أنَّ العديد من علماء نظام الأرض يرون أنَّ كوكب الأرض مُكوَّن في الواقع من نظامين؛ نظام سطح الأرض الذي يدعم الحياة بمقوِّماتها الأساسية، وباطن الأرض الذي يُمثِّل الجزء الأكبر منها. وما يُركِّز عليه هذا الكتاب هو النظام المتعلق بالطبقة الرقيقة عند سطح الأرض، وخصائصه اللافتة.

الفصل الثاني

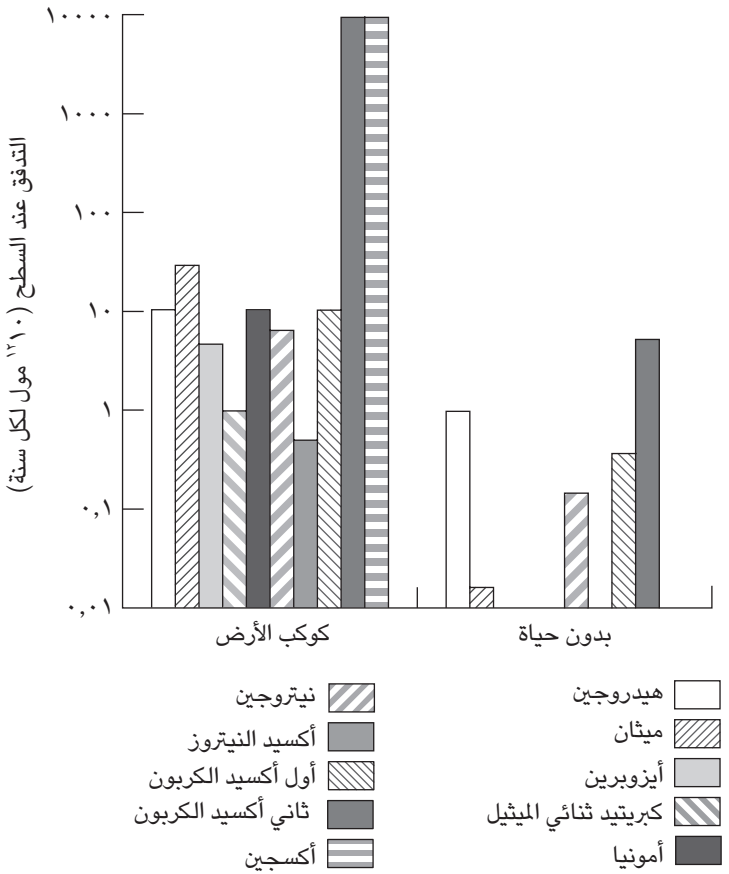
إعادة التدوير

كيف يدعم نظام الأرض الحالي ازدهار الحياة بهذا الشكل؟ من البديهي أنَّ توافُر مُناخٍ صالح للحياة يُعَد أمرًا ضروريًّا، لكنَّ الكائنات الحية تحتاج أيضًا إلى طاقة ومجموعة من المواد لتبني أجسامها بها. وتُوفر الشمس كمياتٍ وفيرة من الطاقة، وهذه الطاقة تُحرك دورة الماء وتُغذي الغلاف الحيوي كذلك، عَبْر عملية التمثيل الضوئي. لكن نظام سطح الأرض يكاد يكون مغلقًا أمام استقبال المواد؛ إذ لا تصل إلى السطح سوى موادَّ بسيطة من باطن الأرض. ولذا فإنَّ تعزيز الغِلاف الحيوي العامر بالحياة يستلزم خضوع كل العناصر اللازمة للحياة لإعادة التدوير داخل نظام الأرض. وهذا بدوره يتطلب طاقة لتحويل المواد كيميائيًّا ولتحريكها فيزيائيًّا في مختلف أنحاء الكوكب. وتُسمَّى الدوراتُ الناتجة من انتقال المادة بين الغِلاف الحيوي والغِلاف الجوي والمحيطات والأراضي والقشرة الأرضية، الدورات البيوجيوكيميائية؛ لأنها تتضمَّن عملياتٍ بيولوجية (أي حيوية) وجيولوجية وكيميائية. ويستعرض هذا الفصل تلك الدورات التي تُحافظ على استدامة الحياة.

التدوير البيوجيوكيميائي

يتضح حجم التدوير الذي يجري ضِمن نظام الأرض بجلاء عند إجراء مقارنة بين تدفقات الغازات المُتبادَلة عند سطح الأرض في الوقت الحاضر وتدفقات الغازات التي تدخل نظام الأرض من عمليات جيولوجية (شكل ٢-١). ويبلغ حجمُ تبادل المواد بين سطح الأرض والغِلاف الجوي مقدارًا أكبر بعدة قيم أُسية من إضافات المواد الآتية من الأرض الصُّلبة

(أي من سطح الأرض وباطنها). ولا يُمكن تفسير التدوير إلا بوجود حياة على كوكبنا. بل إنَّ عدة غازات من الغازات الأساسية التي يتم تبادلها لا تَنتُج إلا من الحياة.



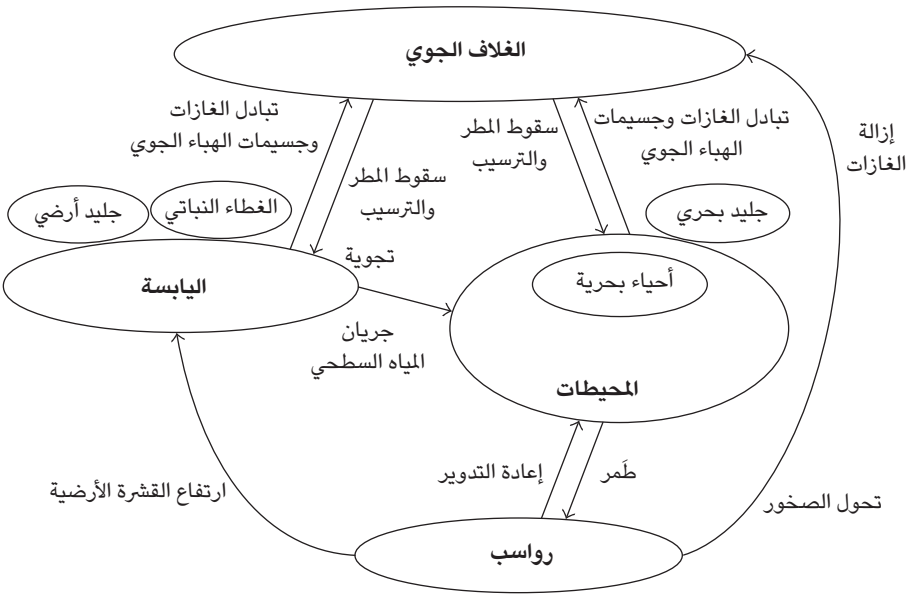
شكل ٢-١: تدفقات الغازات المُتبادَلة عند سطح الأرض في الوقت الحاضر وتدفقاتها على كوكب الأرض في حالة عدم وجود حياة، وهي توضِّح تأثير الحياة العميق.

يُعَد هذا التبادل اللافت للغازات بين الغِلاف الجوي من ناحية والمحيطات وأسطح اليابسة من ناحيةٍ أخرى مجرَّد جزءٍ واحد من التدوير البيوجيوكيميائي. فبعض العناصر

تنتقل انتقالًا فيزيائيًّا أيضًا من الأراضي إلى المحيطات في صورة موادَّ صُلبة أو ذائبة في محاليل، تحملها دورة الماء. وتُمثِّل دورة الماء الدورة الفيزيائية للماء عَبْر أنحاء الكوكب بين المحيطات (حيث يُخزَّن ٩٧ في المائة منها) والغِلاف الجوي والصفائح الجليدية والأنهار الجليدية والمياه العذبة والماء الجوفي.

ترتبط دورة الماء ارتباطًا وثيقًا بمُناخ الأرض؛ لأنها تُحفَّز بالطاقة، كما أنها تحمل معها الطاقة. فتغيير حالة الماء من الصُّلب إلى السائل أو من السائل إلى الغازي يتطلب طاقة، وهذه الطاقة في نظام المُناخ تأتي من الشمس. وكذلك فعندما يتكثف الماء ويتحول من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة أو يتجمَّد متحولًا من الحالة السائلة إلى الصلبة، تشهد هذه العملية إطلاق طاقة. تُسبب حرارة الشمس تبخير الماء من المحيطات. وهذا مسئول عن إمداد الغِلاف الجوي بحوالي ٩٠ في المائة من بخار الماء الذي يوجد فيه، فيما تأتي نسبة الـ ١٠ في المائة المتبقية من عمليات التبخر التي تحدُث على اليابسة ومُسطحات المياه العذبة (وتَسامي الجليد والثلج إلى بخار مباشرةً). ويعمل التبخر على تبريد المحيطات وأسطح اليابسة، وعندما يتكثف الماء ليكوِّن قطيرات سُحُب وأمطارًا، أو يتجمد ليكوِّن ثلجًا، يعمل ذلك على تسخين الغِلاف الجوي. وهذا التسخين بدوره يُسبب صعود الكُتل الهوائية إلى الأعلى بفعل تيارات الحَمل الحراري. ويعمل هطول الأمطار والثلج على إعادة الماء إلى المحيطات واليابسة، حيث يُمكن أن يتدفق الماء عَبْر المياه العذبة إلى المحيطات. وحيثما يظل الثلج المتساقط متجمِّدًا طوال عام كامل، يمكن أن تبدأ صفيحةٌ جليدية في النمو.

ترتبط دورة الماء ارتباطًا وثيقًا بدوراتٍ بيوجيوكيميائية أخرى (شكل ٢-٢)؛ فالعديد من المركَّبات قابل للذوبان في الماء، وبعضها يتفاعل مع الماء. وهذا يجعل المحيط خزانًا رئيسيًّا لعدة عناصرَ أساسية. وهذا يعني أيضًا أنَّ مياه الأمطار يُمكن أن تُزيل الغازات القابلة للذوبان وأيضًا جُسيمات الهَباء الجوي من الغلاف الجوي. وعندما تصل مياه الأمطار إلى الأرض، يُمكن للمحلول الناتج أن يُجوِّي الصخور تجويةً كيميائية. وتُسهم تجوية السيليكات بدورها في إبقاء المناخ في حالة يكون فيها الماء سائلًا. ويعمل هطول الأمطار والانجراف الجليدي على تعرية الأرض فيزيائيًّا كذلك. ثم تُنقَل الجُسيمات الدقيقة والمواد الذائبة الناتجة من التعرية والتجوية الكيميائية بواسطة المياه العذبة من اليابسة إلى المحيطات. وفور الوصول إلى المحيطات، يُمكن تحويل العناصر الأخف إلى صورةٍ غازية وإعادتها إلى الغلاف الجوي؛ حيث يُمكن أن يعود جزءٌ منها إلى الأرض (أمَّا العناصر الأثقل، فيستحيل أن تتحول إلى غازات). تترسب المواد الصُّلبة من المحيط وتقبع ضمن



شكل ٢-٢: التدوير البيوجيوكيميائي عند سطح الأرض وعَبْر دورة الصخور، يُظهر عمليات وخزَّانات رئيسية.

رواسبه. غير أنَّ جزءًا كبيرًا مما يترسَّب في قاع المحيط تُعيد الكائنات الحية تدويرَه مرةً أخرى وتُعيده إلى عمود الماء.

وعلى مدار نطاقاتٍ زمنية جيولوجية أطول، يُعاد تدوير المواد عَبْر القشرة الأرضية أيضًا (شكل ٢-٢)؛ فبعض تدفقات المواد الطفيفة تُفقَد مؤقتًا من نظام سطح الأرض في صخورٍ رسوبية جديدة تتشكل في قاع البحر، لكنَّ معظم هذه المواد تُعاد في النهاية إلى السطح بواسطة دورة الصخور. ويُمكِن أن تظهر الرواسب الموجودة على الرفوف القارية لاحقًا بانخفاض مستوى سطح البحر أو ارتفاع القشرة القارية. وفي النهاية تتعرَّض رواسب المحيطات للاندساس عند الحواف القارِّية، حيث تخضع للتسخين والضغط — في عملية تُعرَف بالتحول — فتُطلِق المواد المتطايرة التي تحتويها مُعيدةً إياها مرةً أخرى إلى الغِلاف الجوي في صورة غازات، عَبْر البراكين أحيانًا. تعود الصخور المتحولة إلى السطح مرةً أخرى عن طريق حركة الصفائح التكتونية. وهكذا تُوفِّر الصخور الرسوبية المُعاد

تدويرُها والصخور المتحولة والصخور النارية (المتكونة من طبقة الوشاح) مصدرًا جديدًا يُمِد نظام سطح الأرض بموادَّ يمكن إطلاقها عَبْر عملية التجوية الكيميائية.

وصحيحٌ أنَّ كل عنصرٍ رئيسي مهم للحياة له دورةٌ بيوجيوكيميائية عالمية خاصة به. ولكن يُمكن تصوُّر كل دورة بيوجيوكيميائية على أنها سلسلة خزانات (أو «صناديق») من مواد متصلة بتدفقات (أو جريانات) من المواد فيما بينها. سأعبِّر هنا عن أحجام الخزانات بالمول (الذي يُعَد مقياسًا لعدد الذرات أو الجزيئات التي تحويها) بدلًا من الكتلة (لأنَّ الكتلة الذرية تختلف باختلاف العناصر)، فيما سأعبِّر عن التدفقات بين الخزانات بوحدة المول لكل سنة. عندما تكون الدورة البيوجيوكيميائية في حالةٍ مستقرة، يجب أن تكون التدفقات التي تدخل كل خزان مساويةً للتدفقات التي تخرج منه. يسمح لنا هذا بتحديد كمياتٍ إضافية مفيدة. إذ تجدُر الإشارة هنا على وجه التحديد إلى أنَّ كمية المادة في الخزان مقسومةً على التدفق المتبادَل مع خزانٍ آخر تُعطي متوسط «زمن مكوث» المواد في ذلك الخزان فيما يتعلق بعملية التبادل المختارة. فعلى سبيل المثال، يُوجد حوالي ٧ × ١٠١٦ مول من ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي حاليًّا، وتستخدم عملية التمثيل الضوئي حوالي ٩ × ١٠١٥ مول من ثاني أكسيد الكربون سنويًّا، وهو ما يمنح كل جُزيء من ثاني أكسيد الكربون زمنَ مكوث في الغِلاف الجوي مقداره نحوُ ثماني سنوات قبل أن يُستخدم، في مكانٍ ما في العالم، بواسطة عملية التمثيل الضوئي.

دورة الأكسجين

تُعَد عملية التمثيل الضوئي بمثابة الباب الذي تدخل منه الطاقة الشمسية للغلاف الحيوي وتبدأ تحويل المواد كيميائيًّا. لذا من المُرجَّح أن يكون اكتشاف التدوير البيوجيوكيميائي قد بدأ مع التجارب التي كان جوزيف بريستلي يُجريها على النباتات (في عام ١٧٧٢)؛ فبريستلي أدرك أنَّ النباتات تتبادل المواد مع الغِلاف الجوي والتربة أيضًا. وهذا يعني بالمصطلحات العصرية أنَّ النباتات تحصُل على كربونها من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي، وتُضيف الإلكترونات التي تُستمَد من جزيئات الماء إلى الكربون، ثم تُطلِق الأكسجين إلى الغِلاف الجوي بصفته من المواد الناتجة. تُكتب الصيغة الكيميائية المُبسَّطة للتفاعل الكلي على النحو الآتي:

$$CO_2 + H_2O \ + \text{ضوء الشمس} \longrightarrow CH_2O + O_2$$

ومع أنَّ النباتات تُهيمِن على عملية التمثيل الضوئي على اليابسة، فإنَّ أولى الكائنات الحية التي أدَّت عملية التمثيل الضوئي كانت الزراقم، تلَتْها حفيداتها الأكثر تعقيدًا، الطحالب، وما زالت هذه الكائنات تُهيمِن على التمثيل الضوئي في المحيطات والمياه العذبة. وإذا أردنا التعبير عن ذلك بمصطلحات الطاقة، يُمكن القول إنَّ التمثيل الضوئي العالمي يمتص في الوقت الحاضر حوالي ١٣٠ تيرا واط (حيث تساوي التيرا واط الواحدة ١٢١٠ واط) من الطاقة الشمسية في صورةٍ كيميائية؛ حوالي نصفها في المحيط ونصفها تقريبًا على اليابسة. ويستهلك هذا تدفقًا هائلًا من ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي، ويُطلِق كميةً مكافئة من غاز الأكسجين الجزيئي (O_2) (شكل ٢-١).

يتسم الأكسجين بأنه مادةٌ عالية النشاط الكيميائي، وله ميلٌ قوي إلى أن يسلبَ الإلكترونات من العناصر والمركَّبات الأخرى في عملية تُعرَف باسم «الأكسدة». وبذلك يُقال إنَّ المواد التي سُلبَت إلكتروناتها، عَبْر التفاعل مع الأكسجين على سبيل المثال، «مؤكسَدة» (بينما تُعرَف العملية المضادة التي تتضمن إضافة إلكترونات باسم «الاختزال»، ويقال إنَّ المواد التي تحتوي على فائض من الإلكترونات «مُختزَلة»). ما يحدُث في عملية التمثيل الضوئي يحدُث عكسه في عملية التنفس الهوائي — أي أكسدة المادة العضوية بالأكسجين ($CH_2O + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$) — حيث تُطلَق الطاقة الكيميائية التي استُخلصَت من ضوء الشمس ويُعاد ثاني أكسيد الكربون (الكربون المؤكسَد) إلى الغلاف الجوي. وتؤدي الكائناتُ الحية التي تُمارِس التمثيل الضوئي عملية التنفس الهوائي لتغذية نموها، وكذلك الحيواناتُ والفطريات ومجموعةٌ كاملة من الميكروبات.

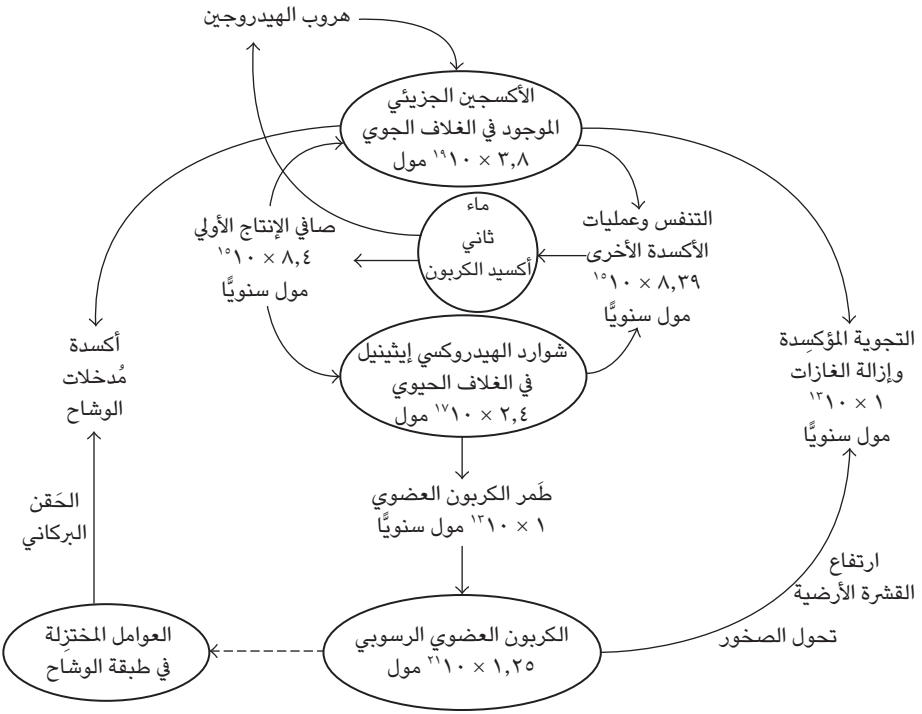
غير أنَّ بعض الكربون العضوي الناتج من عملية التمثيل الضوئي يُفلِت من عملية التنفس الهوائي ويصل إلى أماكنَ خالية من الأكسجين، مثل رواسب المحيطات أو أمعاء الحيوانات. ويُمكن تحويله هناك إلى ثاني أكسيد الكربون مجدَّدًا بفعل البكتيريا باستخدام النترات أو الكبريتات أو أكاسيد الحديد أو غيرها من المواد المؤكسدة. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ الأكسجين الموجود في هذه المركَّبات مُستمَد أصلًا من عملية التمثيل الضوئي، وبذلك تبقى النتيجة النهائية موازِنة لعملية التمثيل الضوئي، لكنَّ التفاعلات تُنتج طاقةً أقل مما يُنتجها التنفس الهوائي. وإذا نفدَت المواد المؤكسدة، يمكن لمجموعةٍ خاصة من الكائنات الحية تُسمى العتائق أن تُحوِّل الكربون العضوي إلى غاز الميثان وثاني أكسيد الكربون، مُنتِجةً طاقةً أقل. ثم يتفاعل الميثان في النهاية مع الأكسجين الموجود في الغلاف الجوي (أو المواد المؤكسَدة الأخرى)، فيُوازِن تأثير التمثيل الضوئي مجددًا. وتُسفِر كل مسارات

تحلُّل الكربون العضوي مُجتمِعةً عن إنتاجِ دفقٍ من ثاني أكسيد الكربون يعود إلى الغِلاف الجوي، ويكاد يوازِن الكمية التي يتم استهلاكها في عملية التمثيل الضوئي (شكل ٢-١).

يُعَد نظام إعادة التدوير عند سطح الأرض شبه مثالي، لكنَّ جزءًا بالغ الصغر (مقداره نحو ٠,١ في المائة) من الكربون العضوي المُصنَّع في عملية التمثيل الضوئي يُفلِت من إعادة التدوير ويُطمر في صخورٍ رسوبية جديدة. وهذا الكربون العضوي المطمور يترك كميةً مكافئة من غاز الأكسجين في الغِلاف الجوي. ومن ثَم، فإنَّ طَمْر الكربون العضوي يُمثِّل المصدر الطويل الأمد للأكسجين في الغِلاف الجوي. يوازَن ذلك بتفاعُل الأكسجين الموجود في الغِلاف الجوي مع المواد العضوية القديمة التي تنكشف في الصخور الرسوبية الموجودة في القارات؛ وهي عمليةٌ تُعرف باسم التجوية المؤكسِدة. يُوجد ٣,٨ × ١٠^١٩ مول من الأكسجين الجزيئي في الغلاف الجوي في الوقت الحاضر، وتستهلك التجوية المؤكسِدة حوالي ١ × ١٠^١٣ مول من الأكسجين الجزيئي سنويًّا، وهو ما يمنح الأكسجين زمنَ مكوثٍ مقداره نحو أربعة ملايين سنة إلى أن يُستهلك بواسطة التجوية المؤكسِدة. وهذا يجعل دورة الأكسجين (شكل ٢-٣) إحدى الدورات الممتدة على نطاقاتٍ زمنية جيولوجية.

على مدى نطاقاتٍ زمنية أطول وأطول، يُتبادَل بعض الكربون العضوي والأكسجين العضوي مع وشاح الأرض. إذ يُزال الأكسجين بالتفاعل مع غازاتٍ بركانية مُختزَلة قادمة من طبقة الوشاح، ويُضاف كربون عضوي قديم إلى هذه الطبقة عند اندساس الصفائح التكتونية. ومن المرجَّح أنَّ تدفُّق المادة المؤكسَدة إلى طبقة الوشاح يتجاوز تدفُّق المواد المُختزَلة، ولكن منطقة الوشاح شديدةُ الضخامة ومُحصَّنة للغاية لدرجة أنَّ حالة الأكسدة الخاصة بها لم تتغير كثيرًا على مدار تاريخ الأرض. في المقابل، تحتوي قشرة الأرض على كميةٍ أكبر بكثير من الأكسجين المحبوس في الصخور في صورة حديد مؤكسَد وكبريت مؤكسَد، من كمية الكربون العضوي التي تحويها. يُخبرنا هذا بوجود مصدر أمدَّ القشرة الأرضية إمدادًا صافيًا بالأكسجين على مدار تاريخ الأرض، وهذا المصدر ناتج حتمًا من فقدان الهيدروجين في الفضاء. وتُعَد سلسلة التفاعلات الكاملة معقَّدة، لكنها تبدأ بتفكيك الماء في عملية التمثيل الضوئي، وتصل في النهاية إلى فقدان الهيدروجين الموجود في الماء بتصعيده إلى الفضاء وترك الأكسجين:

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H\uparrow_{space}$$



شكل ٢-٣: دورة الأكسجين، شاملةً أحجام التدفقات والخزانات.

وصحيح أنَّ كمية الهيدروجين التي تهرب من غِلاف الأرض الجوي في الوقت الحاضر ضئيلة جدًّا؛ مما يجعل هذا مصدرًا ضعيفًا للأكسجين، لكنَّ الوضع لم يكن هكذا دائمًا (كما سنرى في الفصل الرابع).

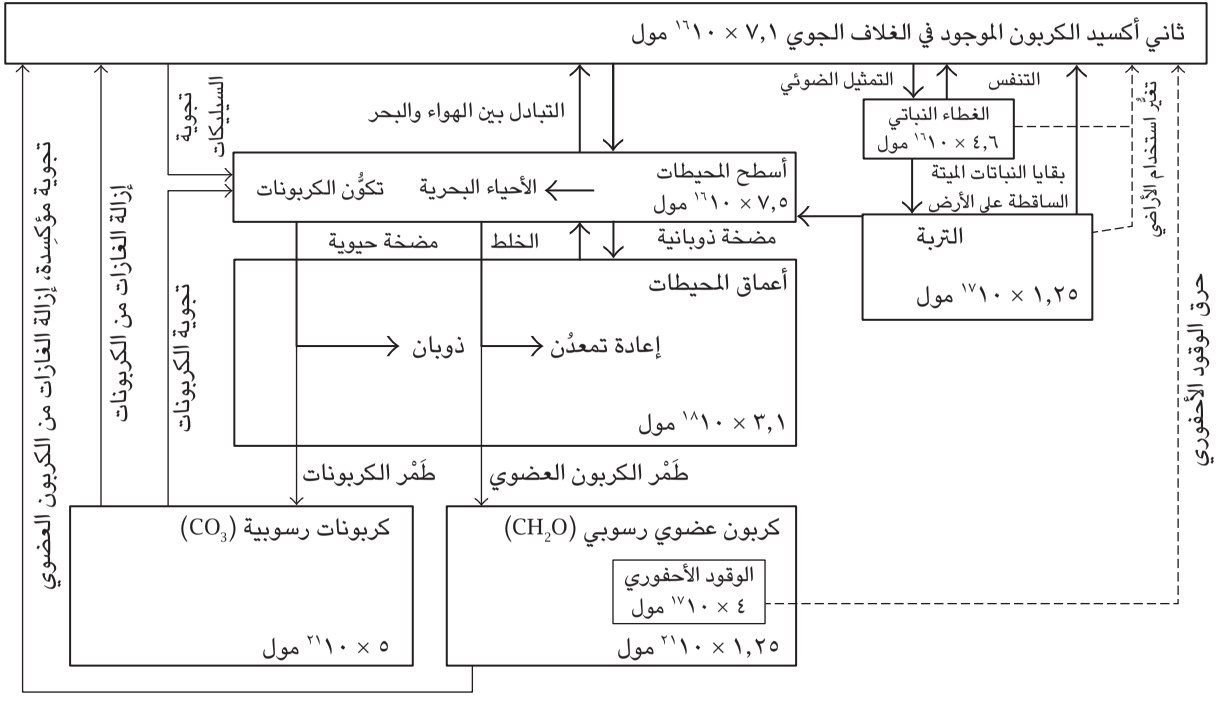
دورة الكربون

تُعَد دورة الأكسجين بسيطةً نسبيًّا؛ لأنَّ خزان الأكسجين في الغلاف الجوي ضخم جدًّا لدرجة أنه يجعل خزانات الكربون العضوي في الغطاء النباتي والتربة والمحيطات تبدو ضئيلةً بالمقارنة به. ومن ثَم، لا يمكن أن يَنفَد الأكسجين بالتنفس أو احتراق المواد العضوية. حتى احتراق جميع احتياطيات الوقود الأحفوري المعروفة لا يُمكنه سوى أن

يصنع مجرد ثغرة صغيرة في خزان الأكسجين الجوي الأكبر بكثير (يُوجد نحوُ ٤ × ١٠^{١٧} مول من كربون الوقود الأحفوري، وهذا لا يُمثِّل إلا حوالي ١ في المائة فقط من خزان الأكسجين الجزيئي).

غير أنَّ ثاني أكسيد الكربون غازٌ أندر بكثير من الأكسجين؛ فكل جُزيء من ثاني أكسيد الكربون كان يقابله ٧٥٠ جُزيئًا من الأكسجين الجُزيئي في الغِلاف الجوي قبل الثورة الصناعية. ومن ثَم، فإن التدفقات نفسها يمكن أن تُحدِث تأثيرًا أكبر بكثير على ثاني أكسيد الكربون مما تُحدِثه على الأكسجين. وعلى عكس الأكسجين، فإنَّ الغِلاف الجوي ليس الخزان السطحي الرئيسي للكربون. فكمية الكربون في الغطاء النباتي العالمي مُقارِبة لتلك الموجودة في الغِلاف الجوي، وكمية الكربون في التُّرَب (بما فيها التربة الصقيعية) تُساوي تلك الموجودة في الغِلاف الجوي أربع مرات تقريبًا. وحتى هذه الخزانات تبدو ضئيلةً أمام المحيط، الذي يُخزن كمية من الكربون تُساوي تلك الموجودة في الغلاف الجوي خمسًا وأربعين مرة؛ وذلك لأنَّ ثاني أكسيد الكربون يتفاعل مع مياه البحر. لذا يجب النظر إلى التدفقات التبادلية بين الأرض والمحيط على أنها من المحتمل أن تكون المتحكمة في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي بشكلٍ مؤقت (شكل ٢-٤).

ويُعتبر تبادُل الكربون بين الغِلاف الجوي واليابسة في جزء كبير منه قائمًا على العمليات الحيوية؛ إذ يتضمَّن امتصاص الكربون في عملية التمثيل الضوئي وإطلاقه من عملية التنفس الهوائي (وكذلك من خلال الحرائق، بكميةٍ أقل). أمَّا تبادُل الكربون بين الغِلاف الجوي والمحيطات، فيتضمَّن مزيجًا من العمليات الكيميائية والفيزيائية والحيوية. إذ يجري تبادُل ثاني أكسيد الكربون بين أسطح المحيطات والغِلاف الجوي باستمرار. وبينما تنتقل المياه من أسطح المحيطات انتقالًا فيزيائيًّا من دوائرِ عرضٍ منخفِضة إلى أخرى مرتفِعة، تبرُد، وهو ما يجعلها تمتص مزيدًا من ثاني أكسيد الكربون. وفي بعض المناطق الواقعة عند دوائر عرضٍ مرتفعة — كشمال المحيط الأطلسي والمحيط الجنوبي في الوقت الحاضر — تغوص هذه المياه السطحية إلى أعماقٍ كبيرة، آخذةً معها فائض ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يُنتِج «مِضخة ذوبانية» تنقل الكربون إلى أعماق المحيطات. وتُوجد أيضًا «مضخة حيوية» للكربون، وهذه تتمثل في أنَّ الكائنات الحية الموجودة في سطح المحيط تمتص ثاني أكسيد الكربون، وتغوص أجسادها بعد الموت (أو تغوص فضلات الكائنات الحية التي أكلَتها) ناقلةً الكربون إلى الأعماق. وهكذا فإنَّ مضخَتَي الكربون كلتَيهما تُنتِجان فائضًا من الكربون في أعماق المحيطات وتُحدِثان نقصًا في كميته في الغلاف الجوي وأسطح المحيطات.



شكل ٢-٤: دورة الكربون؛ تُظهِر كلًّا من التدوير القصير الأمد عند السطح (الأسهم الكبيرة) والتبادل الطويل الأمد مع القشرة (الأسهم الأصغر)، مع التدفقات الرئيسية البشرية المنشأ (الأسهم المتقطعة).

بالإضافة إلى أنَّ بعض الكائنات البحرية مكوَّنة من الكربون العضوي، فإنها تُرسِّب كربونات الكالسيوم والماغنسيوم. ومن هذه الكائنات عوالقُ نباتية بالغة الصِّغر تطفو في سطح المحيط، وكائناتٌ حية دقيقة قاعية (تعيش في قاع البحر)، والشعاب المرجانية. تُفرِط العوالق النباتية في إنتاج الكربونات، ولكن لأن أصدافها المصنوعة من الكربونات تغوص في أعماق المحيط، فهي تميل إلى الذوبان مع زيادة الضغط. ويُحدد هذا عمقًا معينًا لا يمكن الحفاظ على الكربونات في رواسب المحيط تحته، ويُطلَق عليه «عمق تعويض الكربونات»، وهو ما يُشبه «خط الثلج». فوق هذا العمق، يمكن أن تتشكل صخورٌ كربوناتية جديدة، بإزالة الكربونات من نظام السطح. ويوازَن تأثير هذه الإزالة بتجوية صخور الكربونات الموجودة على اليابسة، وهو ما يستهلك ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي (عَبْر هذا التفاعل مثلًا: $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow 2HCO_3^- + Ca^{2+}$). وعندما تترسَّب الكربونات وتُحفظ في المحيط في النهاية، يُعكَس هذا التفاعل، فيُطلِق جزيئًا واحدًا من ثاني أكسيد الكربون مُقابل كل جُزيء من الكربونات المتكونة (عَبْر هذا التفاعل مثلًا: $2HCO_3^- + Ca^{2+} \longrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$). يُنتِج ذلك دورةً صفرية لا تُحدِث أي تأثير في المُجمَل على ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، ما دامت عمليتا التجوية وترسيب الكربونات متوازِنتَين.

تتضمَّن دورة الكربون الطويلة الأمد تبادُل الكربون مع القشرة (شكل ٢-٤). وتُسفر عملية تجوية صخور السيليكات، متبوعةً بتكوين صخور الكربونات، في المُجمَل عن إزالة الكربون ونقله إلى قشرة الأرض (عَبْر هذا التفاعل مثلًا: $CaSiO_3 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + SiO_2$). يُوجد نحوُ ٣٫٤ × ١٠[١٨] مول من الكربون في المحيطات واليابسة والغِلاف الجوي معًا، وتُزيل تجوية السيليكات حوالي ٧ × ١٠[١٢] مول من الكربون سنويًّا. ومن ثَم، يبلغ زمن مكوث ثاني أكسيد الكربون فيما يتعلق بإزالته بفعل تجوية السيليكات حوالي ٥٠٠ ألف عام. ويعود هذا الكربون من القشرة عند اندساس رواسب الكربونات الموجودة في المحيطات و«إزالة الغاز منها» بفعل العمليات البركانية وعمليات تحويل الصخور؛ وهو ما يؤدي إلى إدراج ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي مجددًا. وكذلك يؤدي طَمْر الكربون العضوي إلى إزالة الكربون ونقله إلى القشرة، ثم يُعاد هذا الكربون إلى سطح الأرض بفعل التجوية المؤكسِدة أو إزالة الغاز (وتلك صورةٌ معكوسة لدورة الأكسجين). وعند المقارنة بين طريقتَي إزالة الكربون ونقله إلى القشرة، نجد أنَّ حجم تدفُّق طَمْر الكربونات أكبر من تدفُّق طَمْر الكربون العضوي أربع مرات.

قيودٌ نظائرية

كيف يتوصل علماء نظام الأرض إلى مثل هذه الأرقام، وبالتبعية يُحددون حجم التدوير البيوجيوكيميائي؟ بالطبع يُحاولون تقدير حجم التدفقات والخزانات بقياسها مباشرة. لكنَّ القياس ليس ممكنًا في كل الحالات. ومن ثَم، غالبًا ما تُستخدم النماذج لاستنباط أرقام عالمية من القياسات المتاحة. وعندما يتعلق الأمر بتمثيل عملياتٍ ذات نطاقٍ زمني طويل تتضمن تدفقاتٍ صغيرة نسبيًّا، يُمكن أن تكون أعمدة الخطأ في هذا التمثيل كبيرة. ولكن لحسن الحظ، يُوجد قيدٌ إضافي على البيانات، وهو قائم على التركيب النظائري للخزانات والتدفُّقات المختلفة.

فالنظائر مفيدة جدًّا بالأخص في إعادة إنشاء دورات الكربون في الماضي. وللكربون نظيران مستقران؛ النظير ^{12}C الشائع والنظير ^{13}C الأثقل والأندر (الذي يتضمَّن نيوترونًا إضافيًّا في النواة). ولأنَّ كتلتَي النظيرين مختلفتان، تُفضِّل كل عملية نظيرًا معينًا منهما. فامتصاص ثاني أكسيد الكربون في عملية التمثيل الضوئي (بفعلِ الإنزيم المعروف باسم «روبيسكو» RuBisCO) مثلًا يُفضِّل النظير ^{12}C الأخف تفضيلًا شديدًا على النظير ^{13}C الأثقل، فتكون المادة العضوية الناتجة مُحتويةً على كميةٍ أقل من النظير ^{13}C بنسبةٍ تتراوح بين ٢٫٥ و٣ في المائة بالنسبة إلى الغِلاف الجوي. يُشار إلى هذا بمصطلح «التجزئة النظائرية». وعادةً ما يُقاس على مقياس جزء في الألف، بالمقارنة بمعيار أو مادةٍ مرجعية لها تركيبٌ مُحدَّد على أنه يُساوي صفرًا في الألف. وقد كان المعيار الأصلي عينةً من الكربونات في صورةِ صدَفةِ كائنٍ أحفوري؛ من السهميات. عادةً ما تكون عمليات التجزئة ذات القِيَم البعيدة عن المعيار صغيرةً ويُعبَّر عنها بالرمز «دلتا»، مثل $\delta^{13}C$؛ ومن ثَم، تبلغ قيمة $\delta^{13}C$ الخاصة بالكربون العضوي الناتج من عملية التمثيل الضوئي مقدارًا يتراوح بين سالب ٢٥ و٣٠ لكل ألف.

يبلغ متوسط التجزئة النظائرية لصخور الكربونات صفرًا لكل ألف، لكنَّ التذبذبات بعيدًا عن هذه القيمة يُمكن أن تعطي خيوطًا إرشادية قيِّمة عن تغيُّراتٍ ماضية في دورة الكربون. إذ تجدُر الإشارة إلى أنَّ كمية الكربون المُزال في المادة العضوية إذا تغيَّرَت، فسيتغير التركيب النظائري للمحيطات، وهذا بدوره يُسجَّل في صخور الكربونات. فعلى سبيل المثال، إذا زاد معدل طَمْر الكربون العضوي، فسيُزيل ذلك كميةً أكبر من النظير ^{12}C الخفيف من المحيطات، وسيجعل المحيطات، وصخور الكربونات التي تتكون فيها، غنيةً

بالنظير ^{13}C. وكذلك فإذا انخفض معدل طَمْر الكربون العضوي، فستُصبح المحيطات وكربوناتها غنيةً بالنظير ^{12}C.

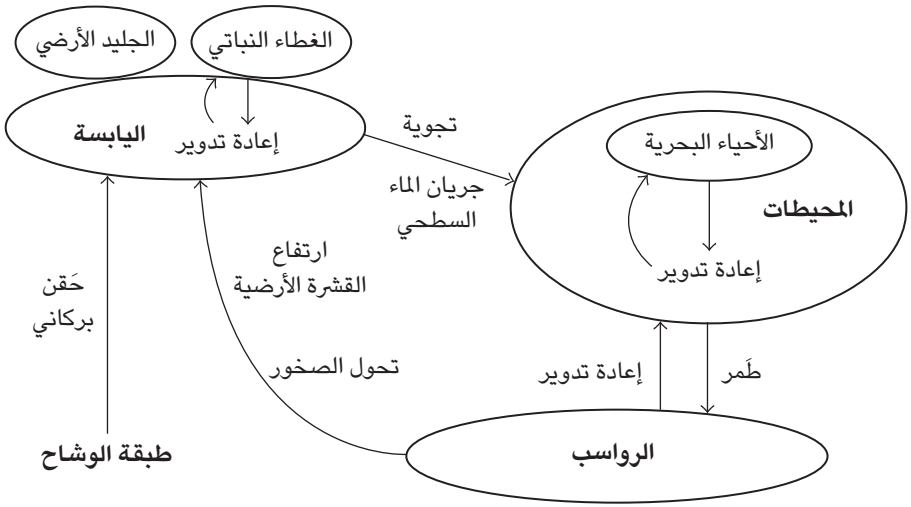
اللافت أننا عندما نتفحَّص تاريخ الأرض، نجد تقلبات في التركيب النظائري للكربونات، ولكننا لا نجد انزياحًا صافيًا في قيمته بالزيادة أو النقصان. وهذا يشير إلى أنَّ خُمس الكربون تقريبًا دائمًا ما كان مطمورًا في صورةٍ عضوية، في حين أنَّ الأخماس الأربعة الأخرى مطمورة في صورة صخورٍ من الكربونات. ومن ثَم، فحتى في المراحل المبكرة من عمر الأرض، كان الغِلاف الحيوي يتسم بإنتاجيةٍ كافية لدعمِ مستوًى صحي من تدفق طَمْر الكربون العضوي.

دورة الفوسفور

تتحدَّد الإنتاجية ومعدَّل طَمْر الكربون العضوي بحجم إمداد اليابسة والمحيطات بالمواد المغذية. وأهم مادتَين مغذيتَين للحياة هما الفوسفور والنيتروجين، وكلاهما له دورةٌ بيوجيوكيميائية مختلفة تمامًا عن الآخر (الشكلان ٢-٥ و٢-٦)؛ فأكبر خزان للنيتروجين يُوجد في الغِلاف الجوي، أمَّا الفوسفور الأثقل، فلا يُوجد في الصورة الغازية بكميةٍ جديرة بأن تؤخذ في الحُسبان. ولذا يُشكِّل الفوسفور تحديًا أكبر للغِلاف الحيوي في إعادة تدويره.

يدخل كل الفوسفور نظام سطح الأرض من باب التجوية الكيميائية للصخور على اليابسة (شكل ٢-٥). ويتركَّز الفوسفور في الصخور في صورةِ حُبيبات أو عروق من معدن الأباتيت.

أكسَب الانتخاب الطبيعي النباتات الموجودة على اليابسة وشريكاتها من الفطريات («الفطريات الجذرية») قدرةً كبيرة على استخلاص الفوسفور من الصخور، بتصنيع وإفراز مجموعة من الأحماض العضوية التي تعمل على إذابة معدن الأباتيت. إذ تَحفِر الفطريات طريقها عَبْر الصخور، وعندما تعثُر على الأباتيت، تبدأ العمل على إذابته. وحالما يُصبح الفوسفور في صورته المُذابة؛ أي يتحوَّل إلى فوسفات، يمكن أن تمتصَّه النباتات مباشرة. ولكن يمكن كذلك أن يُمتَص الفوسفات داخل أسطح المعادن مثل المعادن الطينية، أو يتفاعل مع عناصرَ أخرى في التربة ليُكوِّن معادنَ ثانوية؛ مما يُقلل درجة توافُره ويزيد قيمة إعادة تدوير الفوسفور. هذا ويُعاد تدوير الفوسفور الموجود في المواد العضوية الميتة بفعل البكتيريا والفطريات، بما فيها الفطريات الجذرية المرتبطة مباشرةً بجذور النباتات؛ الأمر الذي يحدُّ من احتمالية فقدان كميات منه طوال الوقت. وهكذا



شكل ٢-٥: دورة الفوسفور.

يُعيد النظام الإيكولوجي الأرضي تدوير الفوسفور حوالي خمسين مرةً في المتوسط قبل أن يُفقَد في المياه العذبة.

عند فقدان الفوسفور من اليابسة فإنه ينتقل بالكامل إلى المحيطات؛ ومن ثَم يُعتبر هذا هو المصدر الأساسي لإدخال هذا العنصر المُغذي الضروري إلى النظام. ويُخزَّن الفوسفور في المحيطات في صورة فوسفات مُذاب في الماء. وعندما يتدفق الفوسفات من أعماق المحيطات إلى الأعلى، تمتصُّه عوالقُ نباتية، هذه العوالق تموت أو تؤكَل فيما بعدُ. ويُمثِّل الفسفور قيمةً كبيرة في علم الأحياء، حتى إنه يُستخرج بالذات من هذه المادة العضوية الميتة. وهذا يُنتِج حلقة من إعادة تدوير المواد المُغذية في سطح المحيط بمساعدة الأحياء الدقيقة، ويُقدَّر أنَّ هذه الحلقة تُحسِّن إنتاجية السطح بمقدار ثلاث مرات. ومع ذلك، يهرب بعض الفوسفور إلى أعماق المحيطات. وتُحدِّد عملية إعادة تدويره، عَبْر التدفق الفيزيائي للمياه إلى الأعلى، كمية المادة العضوية التي يُمكن أن تُغادر أسطح المحيطات في «المضخة الحيوية» وتؤثِّر على دورة الكربون بالتبعية.

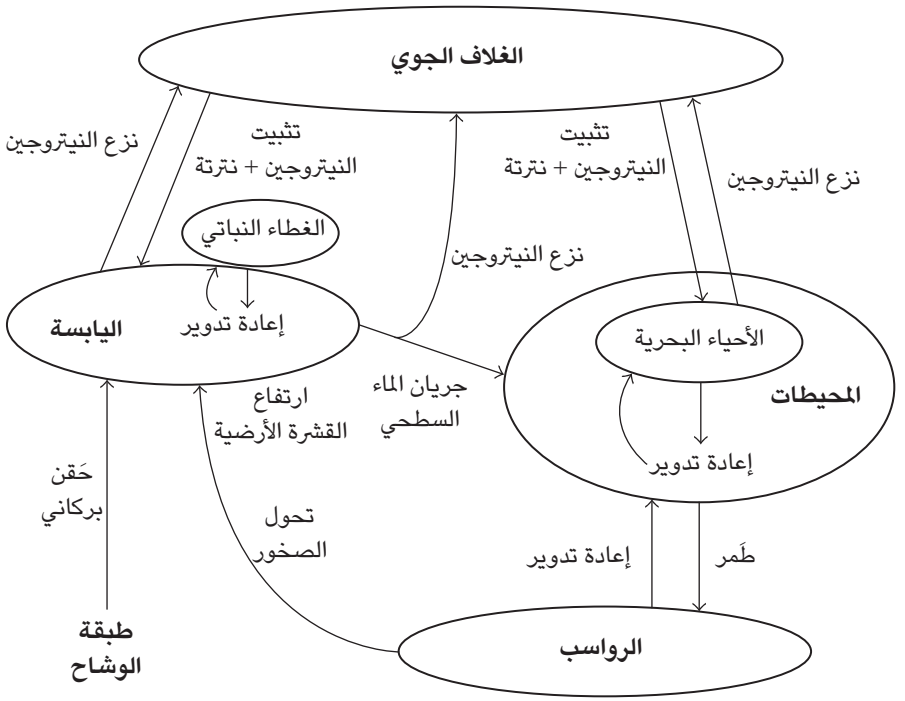
يصل بعض الفوسفور العضوي إلى رواسب المحيط، حيث تُفضِّل الكائنات مجددًا التغذِّي عليه، فيُعاد بذلك تدويرُ جزءٍ كبير منه إلى عمود الماء، ويُسهم ذلك في دعم الإنتاجية

في سطح المحيط. لكنَّ بعض الفوسفور يظل محصورًا في الرواسب بفعل تكوين معادن أباتيت جديدة والتصاق الفوسفات بأسطح معادن أكاسيد الحديد، ويتبقى بعضُه في موادَّ عضوية تَدخُل صخورًا رسوبية جديدة. وهذه العملية التي تتضمَّن إزالة الفوسفور ونقله إلى دورة الصخور تُوازِن تجوية الفوسفور من الصخور الموجودة على اليابسة. بل تُحدِّد كمية الكربون العضوي الذي يُمكن طَمْره في المحيط؛ وبذلك تُحدِّد حجم المصدر الطويل الأمد الذي يُمِد الغِلاف الجوي بالأكسجين.

دورة النيتروجين

تتحكم الأحياء في دورة النيتروجين (شكل ٢-٦). وصحيحٌ أنَّ الغِلاف الجوي يحوي خزانًا كبيرًا من النيتروجين، لكنَّ جُزيئات غاز النيتروجين (N_2) مرتبطة معًا بقوة؛ مما يجعل النيتروجين غير مُتاح لمعظم الكائنات الحية. ويتطلب تفكيك النيتروجين الجُزيئي وإتاحة النيتروجين للكائنات الحية مجهودًا كيميائيًّا حيويًّا لافتًا — يُعرَف باسم تثبيت النيتروجين — ويستهلك كثيرًا من الطاقة. وتُعَد أبرز مُثبِّتات النيتروجين في المحيطات البكتيريا الزرقاء، مع توافُر مصدر مباشر للطاقة من ضوء الشمس. أمَّا على اليابسة، فتُقيم نباتاتٌ مختلفة شراكةً تكافلية مع بكتيريا مُثبِّتة للنيتروجين؛ إذ تُتيح لها موطنًا في العُقد الجذرية، وتُمِدها بالغذاء مقابل النيتروجين. ويُوجد كذلك كائناتٌ غير طفيلية مُثبِّتة للنيتروجين في التربة.

يُثبَّت النيتروجين في الأمونيوم، الذي يُعَد مُركَّبًا مُختزَلًا، ويُنتِج طاقة عند تفاعُله مع الأكسجين. وتعيش بكتيريا النترتة على هذه الطاقة، محوِّلةً الأمونيوم إلى نيتريت ثم نترات (NO_3^-) في عملية النترتة. وفي عالمنا المؤكسَج، تُعَد النترات مركَّبًا مستقرًّا نسبيًّا يُشكِّل الخزان الرئيسي للنيتروجين المُتاح للأحياء في المحيطات والتربة. ولكن يمكن استخدام النترات لأكسدة المادة العضوية؛ وبذلك تُنتج طاقة، وتُحول النترات في النهاية إلى غاز النيتروجين، في عملية تُعرَف باسم نزع النيتروجين. تعيش بكتيريا نزع النيتروجين على مصدر الطاقة هذا، وغالبًا ما يُطلَق أثناء العملية غاز أكسيد النيتروز (N_2O). تُصبح الظروف مُواتية لعملية نزع النيتروجين حالما ينخفض تركيز الأكسجين؛ لذا فهي عادةً ما تحدُث في التُّرَب المشبعة بالمياه والمنقوصة جدًّا من الأكسجين، وفي «مناطق الحد الأدنى من تركيز الأكسجين» التي تُوجد على عُمق متوسط في المحيطات (والتي تنشأ بفعلِ التنفس الهوائي للمواد العضوية الغائصة).



شكل ٢-٦: دورة النيتروجين.

تُشكِّل عملية تثبيت النيتروجين التدفُّق الأساسي لإدخال النيتروجين إلى كلٍّ من اليابسة والمحيطات، بينما تُشكل عملية نزع النيتروجين تدفُّق إخراجه الأساسي من اليابسة والمحيطات، لكنَّ النيتروجين يخضع لإعادة تدوير داخل بعض النُّظم الإيكولوجية أيضًا. فبعض الكائنات التي تؤدي عملية التمثيل الضوئي (النباتات على اليابسة، والعوالق النباتية في المحيطات) تأخذ النترات (أو الأمونيوم في حالة بعض العوالق النباتية) وتمتصُّها داخل المادة العضوية. ويُمكن بعدئذٍ استردادُ هذا النيتروجين من المواد العضوية الميتة بفعل البكتيريا، وكذلك الفطريات الموجودة على اليابسة، التي تُحوِّله إلى أمونيوم في عملية تُعرَف باسم الأمونَة (أو إعادة التمعدن). ثم يُمكن بعد ذلك نَترتةُ الأمونيوم وتحويلُه إلى نترات، وامتصاصُه مرةً أخرى داخل الكائنات التي تؤدي التمثيل الضوئي. وفي المحيطات،

تحدُث إعادة تمعدُن النيتروجين الآتي من المادة العضوية على نطاق من الأعماق المختلفة بينما تغوص المادة العضوية عَبْر عمود الماء. وكالفوسفور، يُعاد تدوير بعض النيتروجين بسرعة في طبقات المحيط السطحية المختلطة جيدًا والمضاءة بنور الشمس. أمَّا الجزء المتبقي، فيُعاد تدويره ببطء في المياه العميقة المظلمة، ويتعيَّن عليه انتظار التدفق الفيزيائي لتلك المياه إلى الأعلى قبل أن يُمكن امتصاصُه داخل العوالق النباتية مرةً أخرى.

يتسرَّب بعض النيتروجين من أنظمة اليابسة الإيكولوجية إلى المحيطات في صورة مواد عضوية ونترات مذابة. ويتعرض جزءٌ كبير من هذا النيتروجين إلى النزع في مصبَّات الأنهار ورواسب البحار عند الأرفف الساحلية. ويصل بعض النيتروجين المُثبت الموجود في المحيطات إلى الرواسب من خلال المواد العضوية. ثم يُنتزع جزءٌ كبير منه في الرواسب مجددًا. ولكن تُفقَد كميةٌ صغيرة من النيتروجين بدخوله في تكوين صخور رسوبية جديدة. يُوجد ١٫٤ × ٢٠١٠ مول من غاز النيتروجين في الغِلاف الجوي، ويُطمر النيتروجين في القشرة الأرضية بمعدل ٣ × ١٠١١ مول في السنة تقريبًا؛ مما يُعطي النيتروجين زمن مكوثٍ مقداره نحوُ ٥٠٠ مليون سنة في الغِلاف الجوي فيما يتعلق بعملية إزالته ونقله إلى القشرة. وصحيح أنَّ هذا زمنٌ طويل، ولكن لا بُد أنَّ تأثير مدخلات النيتروجين الآتي من طبقة الوشاح وإعادة التدوير بفعلِ تجوية الصخور قد وازَن تأثيرَ إزالة النيتروجين ونقله إلى القشرة موازَنةً شبه تامة طوال تاريخ الأرض.

أيضُ كوكب الأرض

أحدَث التدوير البيوجيوكيميائي العالمي للمواد، الذي تُعزِّزه الطاقة الشمسية، تحوُّلًا في نظام الأرض. ويُمكن اعتبار عملية تحوُّل الطاقة وتدوير المواد بفعل الغِلاف الحيوي بمثابة «أيض» نظام الأرض. فهي ضرورية للإنتاجية اللافتة التي يتسم بها غِلاف الأرض الحيوي، تمامًا مثلما تُعَد عملية الأيض التي يؤديها كل كائن حي مفرد ضروريةً لعيشه حياةً صحية. وقد جعلَت هذه العملية الأرض مختلفة جذريًّا عن حالتها قبل وجود الحياة وعن الكوكبَين المجاورَين لها؛ المريخ والزهرة. ومن خلال تدوير المواد التي يحتاج إليها غِلاف الأرض الحيوي، جعل نفسه في حالةٍ أكثر إنتاجية. ومن ثَم، نتناول في الفصل الثالث الكيفية التي تُنظِّم بها الدوراتُ البيوجيوكيميائية ذاتَها وكيفية اقترانها بمناخ الأرض.

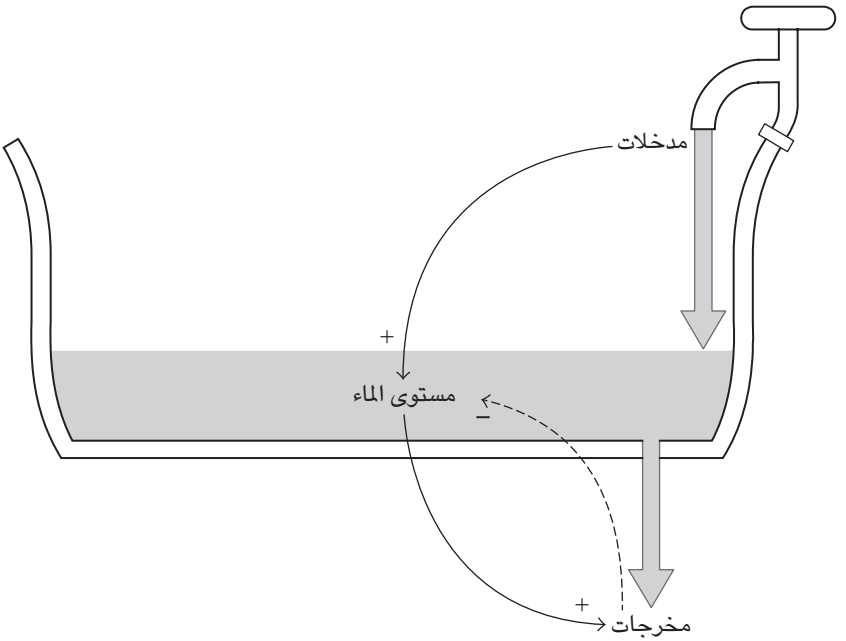
الفصل الثالث

التنظيم

حافَظ نظام الأرض على ظروفٍ صالحة للعيش فيها على مدار فتراتٍ زمنية جيولوجية. وتتضمن هذه الظروف درجةَ حرارة عالمية منتظمة وغير متقلبة، وكميةً كافية من ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي لدعم عملية التمثيل الضوئي، وموادَّ مغذية كافية للنمو. وفوق ذلك، فعلى مدار الـ ٣٧٠ مليونَ سنةٍ الماضية على الأقل، كانت توجد كميةٌ كافية من الأكسجين في الغِلاف الجوي لدعم الحياة الحيوانية المُعقدة التي تتسم بالحركة والتنقل، لكنها ليست كبيرةً لدرجة أن تلتهم حرائقُ الغابات الجزءَ الأكبر من الغطاء النباتي. يقدِّم هذا الفصل الطرق التي تُنظَّم بها هذه «المتغيرات الرئيسية» في نظام الأرض وكيف يَدرُس العلماء هذا التنظيم.

مفاهيم أساسية

تُوجد التغذية المرتدة السالبة في صميم كل الآليات التنظيمية؛ وبشكلٍ عام، يُمكن القول إنها حلقةٌ مغلقة من الصلات السببية تميل إلى كبح الاضطرابات في أي جزء من الحلقة. وعند التفكير في تنظيم المواد — كالمواد المُغذية في المحيطات، أو ثاني أكسيد الكربون أو الأكسجين في الغِلاف الجوي — نحتاج إلى ربط مفهوم التغذية المرتدة السالبة (الذي طُرِح في الفصل الأول) بمفهوم الخزانات والتدفقات (الذي طُرِح في الفصل الثاني). بمصطلحاتٍ أساسية، يُمكن القول إننا لتنظيم حجم خزانٍ ما، يُمكن أن تعمل التغذية المرتدة السالبة إمَّا على تدفُّق المُدخلات إلى ذلك الخزان أو على تدفُّق المُخرجات منه. على سبيل المثال، مع ازدياد حجم الخزان، يُمكن أن تؤدي التغذية المرتدة السالبة إلى زيادة تدفُّق المواد الخارجة من ذلك الخزان، وبذلك تُحافظ على استقراره.



شكل ٣-١: شكلٌ يوضِّح تشبيه عملية التنظيم والتحكم بحوض استحمام. تتحكم التغذية المرتدة السالبة في كمية المواد التي تخرج من المخزن.

إحدى الطرق لتصوُّر تلك العملية هي تشبيهها بما يحدُث في حوض استحمام (شكل ٣-١)؛ فهذا الحوض له مُدخلات (تأتيه من الصنبور) ومُخرجات (تتسرَّب عَبْر البالوعة الموجودة أسفله). إذا فتحتَ الصنبور وكانت البالوعة مفتوحة، فمن المفترَض أن يبقى مستوى الماء ثابتًا، وسيعتمد على مقدار الجزء المفتوح من فتحة الصنبور؛ وذلك لأنَّ حجم التدفق الخارج من البالوعة يميل إلى الازدياد مع ازدياد حجم الماء في الخزان، مُطبِّقًا بذلك تغذيةً مرتدة سالبة. تخيَّل لو زادت مساحة البالوعة مع ازدياد كمية الماء في الحوض، ستُصبح التغذية المرتدة السالبة أفضل. ولكن ماذا لو أُخرِجَ الماء من الحوض بمعدلٍ ثابت بغضِّ النظر عن الكمية الموجودة فيه؟ عندئذٍ لن تتحكم التغذية المرتدة في كمية المُخرَجات. ولكي يكون هذا النظام مُستقرًّا، سيتوجَّب عندئذٍ أن تُوجد تغذيةٌ مرتدة تؤثِّر في كمية الماء المُدخَل إلى حوض الاستحمام لكي تُعادِل تأثير التغيرات الحادثة في مستوى

الماء بضبطِ حجم الماء المندفع من الصنبور؛ أي بتقليل حجم الماء الداخل عند ارتفاع مستوى الماء في الحوض أو زيادته عند انخفاض مستوى الماء في الحوض.

هذا التشبيه يمكن أن يُستخدم في تجسيد خزان أي مادة؛ ليس شرطًا أن تكون ماءً أو حتى سائلًا. وكما سنرى، أحيانًا ما تتضمن حالاتُ التنظيم الحقيقية في نظام الأرض تغذيةً مرتدة سالبة على مدخلات خزانٍ معيَّن، وأحيانًا أخرى تتضمن تغذيةً مرتدة سالبة على المُخرَجات الخارجة من خزانٍ معيَّن.

نماذج بيوجيوكيميائية

سعيًا إلى فهم العوامل التي تُنظِّم المواد المغذية والأكسجين وثاني أكسيد الكربون عَبْر نطاقاتٍ زمنية جيولوجية، أنشأ علماء نظام الأرض نماذج. وهذه النماذج البيوجيوكيميائية الطويلة الأمد تُمثِّل الخزانات الرئيسية على أنها سلسلة من الصناديق بينها تدفُّقات. ومهمة واضع النموذج هي أن يُحدد أين وكيف تعتمد التدفقات الواردة في النموذج على أحجام الخزانات؛ ومن ثَم ينتج التغذيات المرتدة، كما حدث في تشبيه حوض الاستحمام. وغالبًا ما تؤدي هذه التغذيات المرتدة وظيفتَها عَبْر متغيراتٍ وسيطة مثل درجة الحرارة، وهذه المتغيِّرات لا تُعَد خزاناتٍ للمواد في حد ذاتها، ولكنها تتأثَّر بها.

وفي هذا النوع من البحث، يُعَد النموذج بمثابة أداة تُساعد على الفهم. إذ تُمثِّل فرضياتُ واضع النموذج الآليةَ المُعبِّرة عن آرائه بخصوص الطريقة التي يسير بها الكون، ويستخلص منها تنبؤات يُمكن اختبار صحتها بمقارنتها بالبيانات المتاحة. وعادةً ما يُجرِّب واضع النموذج بإدراج عمليةٍ معيَّنة جديدة أو علاقة من التغذية المرتدة في النموذج (مُمثِّلًا فرضيةً معينة)، ويَدرُس كيفية تأثيرها في تنبؤات النموذج فيما يتعلق ببعض البيانات (الأرصاد) التي يُحاول تفسيرها. فإذا تسبَّبَت العملية الجديدة في انحراف النتائج بعيدًا عن البيانات، فمن المرجَّح أن تُدحَض الفرضية؛ أمَّا إذا جعلَت النتائج مُقاربة للبيانات، فستظل الفرضية قائمة. (أحيانًا ما لا يكون الأمر بهذه البساطة في الواقع؛ لأنَّ النموذج الذي يُمثل نظام تغذية مرتدة معقَّدًا يُمكن، كما يحدث في العالم الحقيقي، أن يُظهِر سلوكًا مفاجئًا، وهنا قد يؤدي إجراء تعديلات متزامنة عديدة إلى تقليل الفجوة بينه وبين البيانات مجددًا.)

أذكُر أنني وضعتُ نموذجًا كهذا عندما كنتُ طالبًا للدكتوراه مع أندرو واطسون للتوصل إلى إجابة عن هذين السؤالَين المترابطَين: ما الذي يُنظِّم توازُن المواد المغذية في

المحيطات ويُنظِّم محتوى الأكسجين في الغِلاف الجوي؟ ثم وسَّعنا النموذج لاحقًا — مع طالبٍ آخر، وهو نوم بيرجمان — لدراسة السؤال الآتي: ما الذي يُنظِّم محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي والمُناخ على النطاقات الزمنية الجيولوجية؟ كان النموذج الناتج، الذي يُسمَّى COPSE أو «كوبس»، مبنيًّا على عملٍ رائد من إنجاز بوب بيرنر، الذي وضع سلسلةً من النماذج لفهم التباينات في دورتَي الكربون والأكسجين الطويلتَي الأمد. كانت كل هذه النماذج تُركِّز على الـ ٥٤٢ مليون سنة الأخيرة، المعروفة باسم الحقبة الفانيروزوية، التي تعني حرفيًّا عصر الحياة الظاهرة، والتي بدأَت بالحيوانات وشهدَت ظهور النباتات. هذا وتُوضِّح الأقسام التالية الألغاز التي كنا نُحاول حلها وما عرفناه بمساعدة النموذج.

تنظيم المواد المغذية

يُوجد تكافؤٌ لافت بين النسبة التي يُوجد بها العنصران المغذيان الأساسيان، النيتروجين والفوسفور، في مياه المحيطات والنسبة التي تحتاجها الكائنات الحية البحرية منهما. وكان أوَّل من أبرز هذه المسألة هو عالِم المحيطات ألفريد ريدفيلد في عام ١٩٣٤؛ ولذا يُعرَف متوسط نسبة N : P (أي النيتروجين إلى الفوسفور) التي تُوجد في الكائنات البحرية باسم «نسبة ريدفيلد» تكريمًا له. عادةً ما تبلغ نسبة N : P لدى العوالق النباتية ١٦، في حين أنَّ نسبة N : P في المياه المُتدفقة من أعماق المحيط إلى الأعلى تُساوي ١٥ تقريبًا. لذا ففي معظم الكائنات الحية، يُوجد عجزٌ طفيف في النيتروجين بالمقارنة بالفوسفور في المحيطات. يتمثل «لغز ريدفيلد» في تفسير سبب هذا التناظر بين نسبة العنصرَين في تركيب المحيطات ونسبتهما في تركيب الكائنات الحية. هل يُمكن أن يكون قد حدث بالصدفة؟ أم إنَّ الكائنات الحية تكيَّفَت مع الظروف البيئية وحسب؟ أم إنَّ الحياة نظَّمَت تركيب المحيطات بطريقةٍ ما لتتوافق مع متطلباتها الخاصة؟ أيَّد ريدفيلد تلك الإجابة الأخيرة.

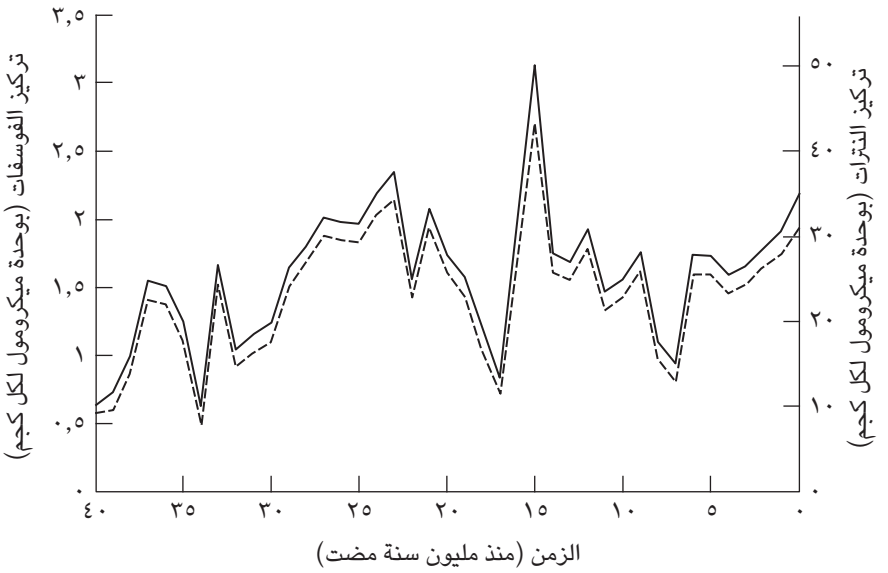
يدخل في جوهر آلية التغذية المرتدة التي اقترحها ريدفيلد أنشطةُ الكائنات التي تعمل على تثبيت النيتروجين. فتثبيت النيتروجين يستهلك قَدرًا كبيرًا من الطاقة (في تفكيك الرابطة الثلاثية بين ذرتَي غاز النيتروجين)؛ وهو ما يعني أنَّ الكائنات التي لا تعمل على تثبيت النيتروجين من المُرجَّح أن تتفوَّق على مثبِّتات النيتروجين كلما توافَر النيتروجين. ومن ثَم، فعندما تتدفق مياه المحيطات العميقة التي تكون فيها نسبة N : P أصغر من ١٦ إلى الأعلى نحو أسطح المحيطات، تستنفد عوالقُ نباتية أخرى النيتروجين الذي تحويه تلك المياه، ولكن عندما ينفد النيتروجين، سيبقى الفوسفور في العادة. عندئذٍ تسنح للكائنات

الحية المثبِّتة للنيتروجين فرصة النمو باستخدام هذا الفوسفور المُتبقي وتثبيت النيتروجين مباشرةً من الغِلاف الجوي. وهكذا يضيف نشاط مثبِّتات النيتروجين نيتروجينًا مُثبَّتًا إلى المحيطات؛ ولذا تحدُّ هذه المُثبتات من انتشارها بنفسها. لكنَّ النيتروجين المُثبَّت يتعرض لإزالةٍ مستمرة بفعل أنشطة الكائنات الحية التي تعمل على نزع النيتروجين، والتي تزدهر حيثما يَنفَد الأكسجين في أعماق المحيطات. وهذا يُتيح لبعض مُثبتات النيتروجين أن تَبقى كجزءٍ صغير من مجتمع كائنات السطح.

وهكذا تنتُج من ذلك آلية تغذية مرتدة سالبة تُطبَّق على مُدخلات النيتروجين إلى المحيطات وتُبقيها متوازنةً مع المُخرجات. وتسمح هذه التغذية المرتدة لمحتوى النيتروجين بتتبُّع التباينات الحادثة في محتوى الفوسفور، والتي يمكن أن تُسببها التقلبات في التجوية، على سبيل المثال (شكل ٣-٢). فإذا زادت مُدخلات الفوسفور إلى المحيطات، فسيزداد معدل تثبيت النيتروجين، فيزيد محتوى النيتروجين في المحيطات. أمَّا إذا قلَّت مُدخلات الفوسفور، فسيقل مُعدل تثبيت النيتروجين؛ وبذلك يترك عملية نزع النيتروجين تُقلِّل محتوى النيتروجين في المحيطات. وبالمثل، فالتغيُّرات الحادثة في مُعدل إزالة الفوسفور من المحيطات ستُحدِث تغييراتٍ مضادةً مُعادِلة في مُعدل تثبيت النيتروجين ومُحتوى النيتروجين في المحيطات. ومن ثَم، فعلى الرغم من أنَّ النيتروجين عادةً ما يكون أول عنصر مغذٍّ ينفَد في أسطح المحيطات، فإنه نظرًا لأنَّ النيتروجين يمكن أن يتتبَّع التبايُنات الحادثة في مُحتوى الفوسفور، يُنظر إلى الفوسفور على أنه العنصر المُغذي الأساسي الذي يحدُّ من النمو البيولوجي عَبْر النطاقات الزمنية الجيولوجية.

وكذلك يُنظَّم محتوى الفوسفور في المحيطات، ولكن بفعل تغذية مرتدة سالبة تُطبَّق على مُخرجاته من المحيطات؛ لأن مُدخلات الفوسفور التي تسري مع مياه الأنهار لا يُمكن التحكم فيها عن طريق العمليات الحادثة في المحيط. فإذا زادت مُدخلات الفوسفور إلى المحيطات وبالتبعية زاد تركيزه، يؤدي ذلك إلى زيادة النيتروجين والإنتاجية ومُعدَّل انتقال الفوسفور إلى الرواسب البحرية. وبالمثل، فإذا قلَّت مُدخلات الفوسفور، يؤدي هذا إلى تقليل تركيزه في المحيطات، وهو ما يُقلل من إنتاجية السطح ويكبح عملية انتقال الفوسفور إلى الرواسب. وصحيح أنَّ التغذية المرتدة السالبة الناتجة ليست مثاليةً أو تامة، لكنها تُخفف من التقلبات الحادثة في تركيز المواد المُغذية في المحيطات، جاعلةً إياها أصغر من التقلبات الشديدة في مُدخلات الفوسفور إلى المحيطات.

تُوجد صلةٌ وثيقة بين تنظيم المواد المغذية وتنظيم الأكسجين في الغِلاف الجوي؛ لأنَّ مستويات المواد المغذية والإنتاجية البحرية تُحدِّدان مصدر الأكسجين عَبْر طَمْر الكربون



شكل ٣-٢: نتائج من نموذج «ريدفيلد» يَظهر فيها أنَّ نسبة N : P في المحيطات تُنظَّم تنظيمًا صارمًا بفعلِ تقلباتٍ مفروضةٍ كبيرة في مُدخلات الفوسفور.

العضوي. لكنَّ تنظيم المواد المُغذية في المحيطات يحدثُ على نطاقٍ زمني أقصر بكثير من نطاق تنظيم الأكسجين الموجود في الغِلاف الجوي لأنَّ أزمنة مكوثها أقصر بكثير؛ إذ يبلغ زمنُ مكوث النيتروجين حوالي ٢٠٠٠ سنة، ويبلغ زمنُ مكوث الفوسفور حوالي ٢٠ ألف سنة.

تنظيم الأكسجين

يبلغ زمنُ مكوث الأكسجين في الغِلاف الجوي فيما يتعلق بانتقاله إلى القشرة الأرضية حوالي أربعة ملايين سنة (طالِع الفصل الثاني). وصحيح أنَّ هذا قد يبدو زمنًا طويلًا،

لكنه أقصر بكثير من الفترة التي شهدَت وجود الحيوانات التي تتنفس الأكسجين على الكوكب، والتي تبلغ حوالي ٥٥٠ مليون سنة. بل أقصر بكثير أيضًا من فترة الـ ٣٧٠ مليونَ عام التي شهدَت وجود الغابات، التي تُعَد عُرضةً لحدوث زيادات في الأكسجين تزيد معدَّل تكرار الحرائق وشدَّتها. وبذلك فمن اللافت أنَّ كمية الأكسجين في الغِلاف الجوي بقيَت ضمن الحدود الصالحة لعيش الحياة النباتية والحيوانية المعقدة مع أنَّ كل جزيئات الأكسجين استُبدلَت أكثر من مائة مرة.

في الواقع، كان استقرار كمية الأكسجين لافتًا بدرجةٍ أكبر وأكبر منذ انتشار الغابات في أنحاء الكوكب. فتجارب الاحتراق تُظهِر أنَّ الحرائق لا تصبح مُستدامة ذاتيًّا في مواد الوقود الطبيعية إلا عندما يصل الأكسجين إلى حوالي ١٧ في المائة من الغِلاف الجوي. ولكن طوال السنين الـ ٣٧٠ مليونًا الماضية، يُوجد سِجلٌّ شبه مستمر من الفحم الأحفوري، مشيرًا بذلك إلى أنَّ الأكسجين لم ينخفض قط تحت هذا المستوى. وفي الوقت نفسه، لم يرتفع الأكسجين قَط إلى الحد الذي يجعل الحرائق تمنع تجدُّد الغابات البطيء. فسهولة الاحتراق تزداد زيادةً غير خطية مع ازدياد تركيز الأكسجين، لدرجةٍ تُصعِّب تَصوُّر كيف كان من المُمكن أن تظل الغابات باقيةً إذا زادت نسبة الأكسجين عن نطاق يتراوح بين ٢٥ و٣٠ في المائة (اعتمادًا على رطوبة الوقود). وهكذا ظل الأكسجين ضِمن نسبة تتراوح بين ١٧ و٣٠ في المائة من الغِلاف الجوي على مرِّ الـ ٣٧٠ مليونَ سنةٍ الماضية على الأقل. والسؤال الآن هو: ما آليات التغذية المرتدة السالبة التي يمكن أن تُفسِّر هذا الاستقرار اللافت؟

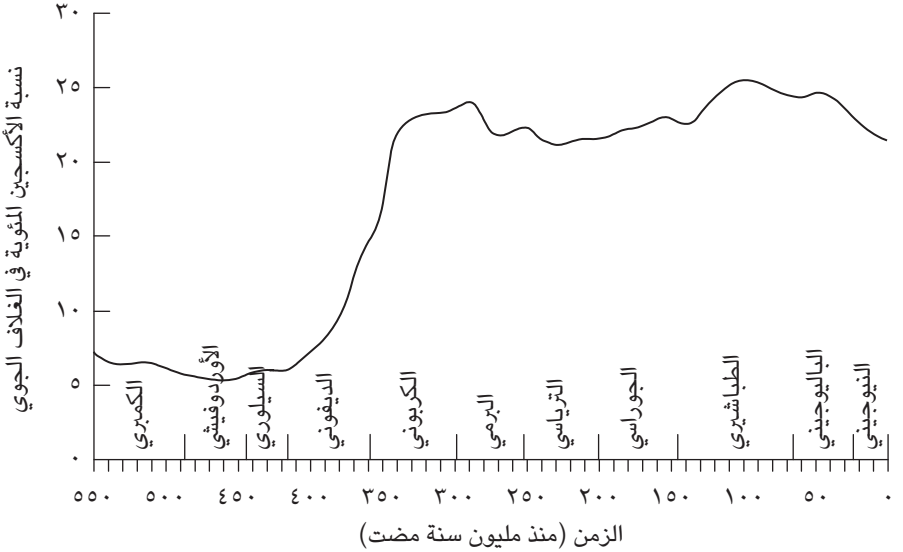
نظريًّا، يُوجد موضعان من الممكن أن يكونا قد شهدا تغذيةً مرتدة مُحقِّقة للاستقرار؛ إما على المصدر الطويل الأمد الذي يُنتِج الأكسجين من طَمْر الكربون العضوي، وإما على المصرف الطويل الأمد الذي يُزيل الأكسجين عن طريق التجوية المؤكسِدة. ولكن في الكون الحالي الغني بالأكسجين، فإنَّ معظم الكربون العضوي القديم الذي انكشف بفعلِ ارتفاع الصخور على القارات يتأكسد. ولذا لا تُوجد فرصةٌ كبيرة لدى التباينات البسيطة في تركيز الأكسجين في الغِلاف الجوي لتؤثِّر في معدل تدفُّق إزالة الأكسجين بفعل التجوية المؤكسِدة. وعلى العكس من ذلك، تُوجد بالتأكيد آلياتٌ تجعل تدفق الأكسجين من مصدر إنتاجه القائم على طَمْر الكربون العضوي قابلًا للتأثر بالتباينات الحادثة في تركيز الأكسجين.

يأتي نحوُ نصف الكربون العضوي الذي يُطمر في العالم حاليًّا من الإنتاج الأوَّلي في المحيطات، ويأتي النصف الآخر من الإنتاج الأوَّلي على اليابسة، لكن كله تقريبًا يُطمر في رواسب المحيطات. لذا من الطبيعي أن يجري البحث عن آليات تنظيم الأكسجين في

المحيطات. فعندما تَقِل مستويات الأكسجين في الغِلاف الجوي، يَقِل تركيز الأكسجين في المحيطات أيضًا، وعندما تصبح المحيطات أكثر خلوًّا من الأكسجين، تزداد كمية الكربون العضوي الذي يُحفَظ في الرواسب؛ وبذلك تُعَد هذه العمليات بمثابة تغذيةٍ مرتدة سالبة تميل إلى رفع مستويات الأكسجين في الغِلاف الجوي. وقد اتضح أنَّ هذه الآلية تتضمن دورة الفوسفور؛ ففي ظل حالة انعدام الأكسجين، يُعاد تدوير مزيد من الفوسفور من رواسب المحيطات وإرجاعه إلى عمود الماء، وهذا يؤدي إلى زيادة الإنتاجية في أسطح المحيطات، وهو ما يزيد كمية الكربون العضوي التي تصل إلى الأعماق، ومُعدل طَمره.

وصحيح أنَّ هذه الآلية التنظيمية المتركزة في المحيطات تُساعد على التخفيف من تأثير انخفاضات الأكسجين في الغِلاف الجوي. ولكن إذا ارتفع الأكسجين فوق مستوياته الحالية، يُصبح المحيط كله مؤكسَجًا وتتوقف التغذية المرتدة. لذا علينا أن نلجأ إلى اليابسة بحثًا عن آليةٍ حساسة يُمكنها إحداثُ تأثير مضاد يُوازِن زيادة الأكسجين. وهنا من المُرجَّح بوضوح أن نجد ضالَّتَنا في الحرائق والغطاء النباتي. فبينما تكبتُ الحرائق نمو النباتات، يُقلل هذا من كمية المواد العضوية الأرضية المتاحة للطمر، لكنه من المُرجَّح أن ينقل الفوسفور من اليابسة إلى المحيطات، مُغذيًا الإنتاجية هناك. غير أنَّ نسبة الكربون إلى الفوسفور في المواد العضوية البحرية أقل بكثير منها في المواد النباتية الأرضية، وهو ما يعني أنَّ نفس مصدر إمداد الفوسفور العالمي يدعم مقدارًا أقل من طَمر الكربون العضوي؛ الأمر الذي يُضعِف مصدر الأكسجين. وفوق ذلك، فعندما تكبتُ الحرائق انتشار الغابات، يُقلِّل هذا من تأثير الغابات على تجوية الصخور، ومُدخلات الفوسفور بالتبعية؛ مما يُقلل من طَمر الكربون العضوي وإنتاج الأكسجين.

عند إدراج آليات التغذية المرتدة هذه في نموذجٍ بيوجيوكيميائي، يمكن أن تُفسِّر استقرار الأكسجين الطويل الأمد في الغِلاف الجوي (شكل ٣-٣)؛ إذ يتنبأ النموذج بأنَّ نسبة الأكسجين في الغِلاف الجوي بقِيَت ضِمن نطاق يتراوح بين ١٧ و٣٠ في المائة طوال الـ ٣٥٠ مليونَ سنةٍ الماضية، وهذا متوافق مع سجل الفحم والغابات. ويتنبأ بأنَّ نسبة الأكسجين في الغِلاف الجوي قبل ظهور النباتات كانت تتراوح بين ٥ و١٠ في المائة؛ وذلك بسبب ضعف مصدر الفوسفور (إذ كانت تجوية الصخور أبطأ) وانخفاض نسبة طَمر الكربون إلى طَمر الفوسفور. لكنَّ هذا الأكسجين ما زال كافيًا لتفسير وجود الحيوانات المُبكرة. ويُشير النموذج إلى أنَّ كمية الأكسجين، قبل النباتات ومع انتشار ظاهرة انعدام الأكسجين في المحيطات على نطاقٍ أوسع، قد استقرَّت بفعل آليات تغذية مرتدة سالبة متركزة في المحيطات.



شكل ٣-٣: تنظيم نسبة الأكسجين في الغِلاف الجوي على مدار حقبة الفانيروزوي. نتائج مأخوذة من نموذج «كوبس».

ترتبط دورة الأكسجين ارتباطًا وثيقًا بدورة الكربون الطويلة الأمد. فعملية الإزالة السائدة التي تتضمن إزالة ثاني أكسيد الكربون عَبْر تجوية صخور السيليكات تُعَد مصدرًا رئيسيًّا للفوسفور المُجوَّى، وهذا بدوره يتحكم في طَمْر الكربون العضوي، ومصدر الأكسجين بالتبعية. وكذلك فإنَّ طَمْر الكربون العضوي يُمثِّل ثاني أهم بؤرة لثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي.

تنظيم ثاني أكسيد الكربون على المدى الطويل

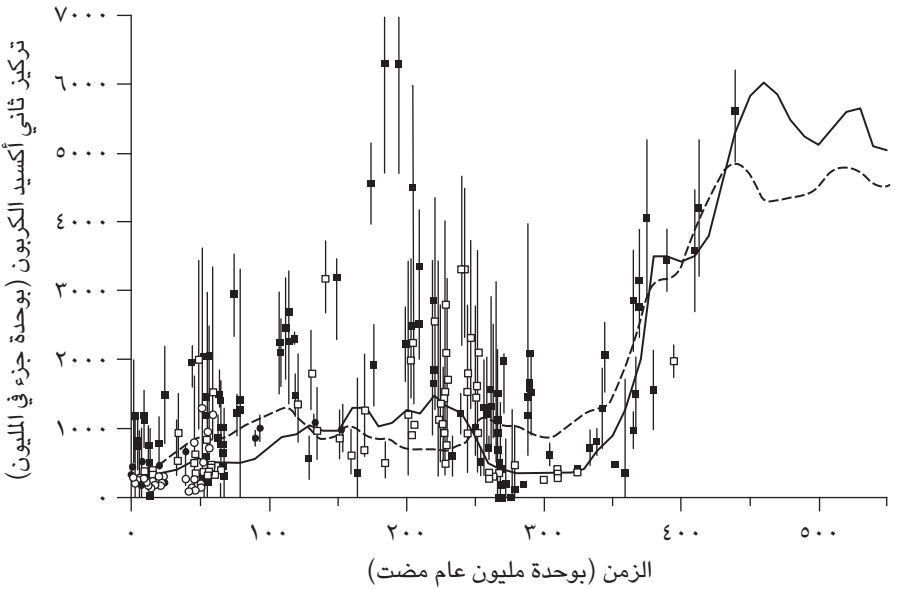
على مدى أطول النطاقات الزمنية الجيولوجية، يُنظَّم تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي من خلال اعتماد تجوية السيليكات على ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي ودرجة الحرارة العالمية. وقد تحدَّثنا في الفصل الأول (شكل ١-٣) عن آلية التغذية المرتدة السالبة المهمة تلك. ولتلخيص ما ذُكر سلفًا، يُمكن القول إنَّ معدل تجوية

السيليكات يزداد مع زيادة ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة. ومن ثَم، فإذا كان يُوجد شيءٌ ما يَزيد من كمية ثاني أكسيد الكربون أو يرفع درجة الحرارة، فإن هذا الشيء تتم مقاومتُه عن طريق ازدياد مُعدل إزالة ثاني أكسيد الكربون عن طريق تجوية السيليكات. وبالمثل، فإذا كان يُوجد شيءٌ ما يُقلل ثاني أكسيد الكربون أو يُخفِّض درجة الحرارة، فإن هذا الشيء تتم مقاومته بتقليل مُعدل إزالة ثاني أكسيد الكربون عن طريق تجوية السيليكات. وفي الوقت الحالي، يتحكم في جزءٍ كبير من هذه التغذية المرتدة البالغة الأهمية نباتاتُ اليابسة والفطريات الجذرية المصاحبة لها. فالنباتات سريعة التأثر بالتباينات الحادثة في كميات ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة، وتعمل مع شريكاتها الفطرية على تضخيم مُعدَّلات التجوية بدرجةٍ كبيرة (كما ذُكر في الفصل الثاني). وهذا يُنتِج آليةَ تغذيةٍ مرتدة سالبة أقوى ممَّا كانت عليه في غياب الحياة على اليابسة.

تتضمَّن نماذجُ دورة الكربون الطويلة الأمد هذه التغذية المرتدة مع عدة عوامل جيولوجية وبيولوجية مُسببة لتباينُ كميات ثاني أكسيد الكربون. فعلى سبيل المثال، يُقدَّر أن مصدر إضافة ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي من العمليات البركانية وعمليات تحوُّل الصخور قد تعرَّض لتقلبات مع حدوث تغيرات في حركة الصفائح التكتونية، وأنَّ مصرف ثاني أكسيد الكربون تعرَّض لتقلبات مع حدوث تباينات في ارتفاع قشرة القارَّات واندفاع صخور البازلت السهلة التجوية على اليابسة. لكنَّ التغيير الأبرز في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي خلال حقبة الفانيروزوي كان بسبب استعمار النباتات لليابسة. إذ بدأ هذا منذ حوالَي ٤٧٠ مليونَ سنة، وتَصاعَد مع ظهور الغابات الأولى منذ ٣٧٠ مليونَ سنة. ويُقدَّر أنَّ ما أنتجه ذلك من تسريع في تجوية السيليكات قد أدى إلى خفض تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي بمقدارِ قيمةٍ أُسِّية كاملة (شكل ٣-٤) وخفض درجة حرارة الكوكب مُدخلًا إياه في سلسلة من العصور الجليدية في حقبة العصر الكربوني وحقبة العصر البرمي.

تنظيم ثاني أكسيد الكربون على مدًى أقصَر

تميل التغذية المرتدة المتمثلة في تجوية السيليكات إلى تثبيت تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، وحفظ استقرار درجة الحرارة العالمية، على نطاقٍ زمني يصل إلى مئات الآلاف من السنين. غير أنَّ بعض الاضطرابات الجيولوجية، كالثورانات البركانية الهائلة أو تحوُّل الرواسب الغنية بالمواد العضوية فجأةً، يُمكن أن تُضيف كميةً زائدة من ثاني



شكل ٣-٤: تباين تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على مدار حقبة الفانيروزوي. مجموعة مُجمَّعة من بياناتٍ بديلة (نقاط ذات نطاقات خطأ) وتنبؤات نموذجية (تنبؤات نموذج «جيوكارب ٢» مُمثَّلة بالخط المتصل، وتنبؤات نموذج «كوبس» مُمثَّلة بالخط المتقطع).

أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي من حين إلى آخر بوتيرة أسرع بكثير من ذلك، فتطغى بذلك على تأثير التغذية المرتدة السالبة. وكذلك تُضيف بعضُ الأنشطة البشرية في الوقت الحاضر كميةً من ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي بمُعدل غير مسبوق. ولحُسن الحظ، تُوجد سلسلةٌ من آليات التغذية المرتدة السالبة الأخرى التي يُمكنها تنظيم ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على نطاقاتٍ زمنية أقصر.

فعلى النطاق الزمني الذي يتراوح بين سنوات وقرون، تبدأ المحيطات وغِلاف اليابسة الحيوي امتصاص ثاني أكسيد الكربون الزائد المضاف إلى الغلاف الجوي. وبعد ذلك بحوالَي ألف عام، يتم التوصل إلى توازنٍ مؤقت؛ حيث يُقسَّم ثاني أكسيد الكربون المُضاف بين المحيطات والغِلاف الجوي وسطح اليابسة. ويبقى ما لا يقل عن ١٥ في المائة من ثاني أكسيد الكربون المضاف في الغِلاف الجوي على النطاق الزمني الألفي، وتزيد تلك

النسبة كلما زادت كمية ثاني أكسيد الكربون المضاف في المقام الأول؛ لأنَّ ثاني أكسيد الكربون الذي ذاب في المحيطات يرفع حموضتها ويُقلِّل من قدرتها على تخزين الكربون.

وهذا بدوره يؤدي إلى آلية تغذية مرتدة سالبة تُعرَف باسم «تعويض الكربونات»، وهي تعمل على إزالة المزيد من ثاني أكسيد الكربون المضاف من ذلك الغِلاف الجوي على مدى نطاقٍ زمني يبلغ حوالي ١٠ آلاف عام. وفي هذه الآلية، تميل مياه المحيطات المُحمضة إلى إذابة رواسب الكربونات الملامسة لها، رافعةً مستوى عمق تعويض الكربونات إلى أعلى. تجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ رواسب الكربونات تحتوي على كمية قلويات بنسبة ١:٢ مع الكربون، وكمية القلويات في المحيطات هي التي تُحدِّد سَعَتها التخزينية للكربون. ومن ثَم، يضيف ذوبانُ رواسب الكربونات قلويةً أكبر مقارنة بالكربون إلى المحيطات؛ مما يسمح للمحيطات بامتصاص مزيد من ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي.

وفي الوقت نفسه، يميل ثاني أكسيد الكربون الزائد في الغِلاف الجوي إلى تسريع تجوية صخور الكربونات على اليابسة، برفع درجة الحرارة وزيادة حموضة مياه الأمطار. يُعزز هذا من قلوية المحيطات؛ مما يزيد من قدرتها على تخزين ثاني أكسيد الكربون، مُتيحًا بذلك تغذيةً مرتدة سالبة مرةً أخرى على نطاقٍ زمني يبلغ حوالي ١٠ آلاف عام. وفي النهاية، تُتيح هذه العملية التي تُعيد إمداد المحيطات بالقلويات إعادة ترسيخ رواسب الكربونات في أعماق المحيطات مرةً أخرى؛ مما يزيد مستوى عُمق تعويض الكربونات مُجددًا؛ ومن ثَم تصل دورة الكربون إلى التوازن مرةً أخرى. وبعدما يصل كل ذلك إلى نهايته، يبقى في الغِلاف الجوي جزءٌ صغير من ثاني أكسيد الكربون الذي أُضيف في البداية، ويُزال على مدى مئات الآلاف من السنين بفعل التغذية المرتدة الناتجة عن تجوية السيليكات.

مثال تاريخي

هل يُمكن أن نرى أي أمثلة في السجل الجيولوجي على تطبيق آليات تنظيم ثاني أكسيد الكربون والمُناخ؟ نادرًا جدًّا ما تشهد دورة الكربون اضطراباتٍ طبيعيةً كبيرة، ومع ذلك تُوجد عدة اضطرابات كهذه في السجل الجيولوجي، وقد وقع أحد أحدث هذه الاضطرابات منذ ٥٥٫٨ مليون عام عند الحد الفاصل بين العصرَين الباليوسيني والإيوسيني. ويُقدِّم هذا الحدث الساخن اللافت — الذي يُعرَف باسم الذروة الحرارية فيما بين العصرَين الباليوسيني والإيوسيني — خيوطًا إرشادية مهمة بخصوص المصير الذي ربما ندفع المُناخ إليه في المستقبل، والوقت الذي سيستغرقه للتعافي.

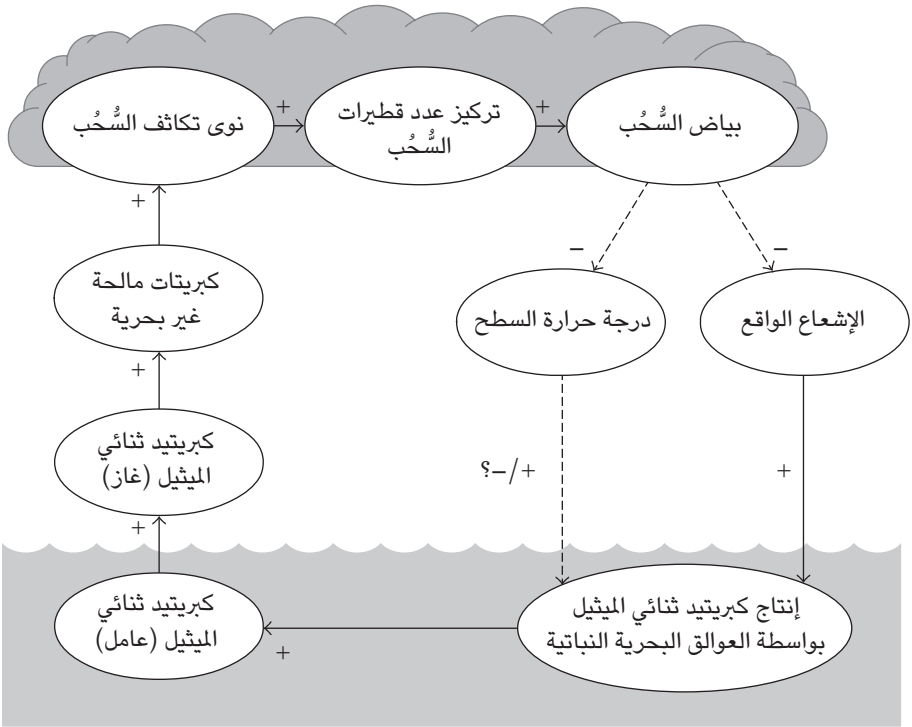
لا أحد يعرف يقينًا ما الذي سبَّب الذروة الحرارية فيما بين العصرَين الباليوسيني والإيوسيني، لكننا نعرف أنَّ تلك الفترة شهدَت حقن كمياتٍ هائلة بلغَت آلاف مليارات الأطنان من الكربون إلى الغِلاف الجوي، على الأرجح بسبب اندساس بركاني داخل مخازن الوقود الأحفوري القديمة، وقد عُزِّز هذا الحقن بزعزعة استقرار هيدرات الميثان المجمدة تحت رواسب المحيطات. ويبدو أنَّ الكربون قد حُقِن على دَفقتَين بينهما ٢٠ ألف سنة. وقد ارتفعَت درجات الحرارة العالمية بحوالي ٥ درجاتٍ مئوية على مدى ٢٠ ألف سنة، وظلَّت مرتفعةً طوال ١٠٠ ألف سنة تقريبًا. وأدى تحمُّض المحيطات إلى ذوبان رواسب الكربونات على نطاقٍ واسع، فيما زاد عُمق تعويض الكربونات بمقدار يصل إلى ٢كم. وقد استغرق التعافي التام لدورة الكربون والمُناخ حوالي ٢٠٠ ألف سنة.

يتوافق التعافي البطيء من تلك الذروة الحرارية مع النطاق الزمني للتغذية المرتدة المتمثلة في تجوية السيليكات. وذلك ينبغي أن يُنذرنا بأنَّ التغذيات المرتدة التنظيمية في دورة الكربون، وإن كانت عديدة، يُمكن أن تتغلب عليها تأثيراتٌ أخرى. ولذا من المتوقَّع أنَّ الأنشطة البشرية المعتمدة على حَرْق الوقود الأحفوري يُمكن أن تترك إرثًا مُناخيًّا طويلًا كهذا.

التغذيات المرتدة البيوجيوكيميائية المؤثِّرة في المناخ

بينما أدَّى ثاني أكسيد الكربون دورًا أساسيًّا في تنظيم المُناخ على مرِّ تاريخ الأرض، تُوجد كذلك عوامل مؤثِّرة رئيسية أخرى. وعلى وجه الخصوص، يمكن أن يكون للتغييرات في درجة البياض، أو انعكاسية سطح الأرض، تأثيرٌ كبير على درجة حرارة الأرض.

تُعَد السُّحُب ضروريةً لتحديد درجة بياض الأرض. فبينما تبدو لنا السُّحُب أشياء فيزيائية تمامًا، فإنها يمكن أن تتأثر بالأحياء؛ لأنَّ ماء السُّحُب يحتاج إلى شيء ليتكثَّف عليه. وهنا تُنتج مجموعةٌ متنوعة من الغازات الحيوية جُسيمات الهباء الجوي التي تُكوِّن بدورها مواقع تَنَوٍّ يمكن أن يتكثف عليها بخار الماء ليكوِّن السُّحُب. وعلى سبيل التحديد، تُطلِق العوالق النباتية البحرية غازًا يُسمى كبريتيد ثنائي الميثيل — أو DMS اختصارًا — ويُعَد المصدر الرئيسي لنوى تكاثُف السُّحُب فوق أجزاء بعيدة غير ملوَّثة من المحيطات في الوقت الحاضر (بل كان، قبل التلوث الصناعي البشري، أهم بكثير بصفته مصدرًا عالميًّا لنوى التكاثف). يؤدي ازدياد عدد نوى تكاثُف السُّحُب في أي سحابة إلى توزيع نفس الكمية من الماء على عدد أكبر من قُطَيراتٍ أصغر، وهو ما يجعل السحابة أشد بياضًا،



شكل ٣-٥: فرضية «سي إل إيه دبليو» لآليات التغذية المرتدة بين إنتاج كبريتيد ثنائي الميثيل وبياض السُّحُب والمُناخ.

وهذا يعني أنها تعكس قَدرًا أكبر من ضوء الشمس. وهكذا يُسفِر هذا الإنتاج الحيوي لنوى تكاثُف السُّحُب عن خفض حرارة الأرض بعدة درجات.

ومن مُنطلَق إدراك أنَّ كبريتيد ثنائي الميثيل مصدرٌ رئيسي لنوى تكاثف السُّحُب، أقدَم بوب تشارلسون وجيم لفلوك وأندي أندريا وستيف وارن، في خطوةٍ شهيرة، على اقتراح تغذيةٍ مرتدة مُناخية معروفة باسم فرضية «سي إل إيه دبليو» (نسبةً إلى الأحرف الأولى من أسماء مؤلفيها الإنجليزية) (شكل ٣-٥). وأكَّدوا في فرضيتهم أنه إذا كان شيءٌ ما يعمل على زيادة درجة الحرارة أو ضوء الشمس الواقع على سطح المحيطات، فمن المفترَض أن يُسفِر ذلك عن زيادة الإنتاج الحيوي لكبريتيد ثنائي الميثيل، مؤديًا إلى إكثار الغيوم العاكسة

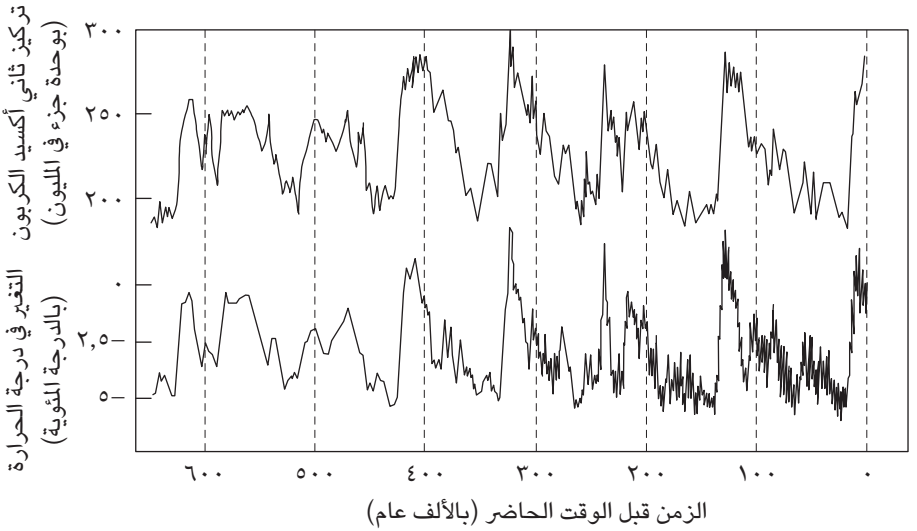
التي تعكس ضوء الشمس مرةً أخرى إلى الفضاء، فتنخفض درجة الحرارة مجددًا. وربما كانت هذه التغذية المرتدة السالبة آليةً مهمة لتنظيم المُناخ على المدى القصير في العالَم غير الملوَّث قبل وجود البشر. ولكن عند ارتفاع درجة الحرارة إلى مستوًى بالغ، يبدأ سطح المحيطات في التقسم إلى طبقات، فيُقيِّد عملية الحصول على المواد المغذية من الأسفل، وبذلك يحدُّ من الإنتاج الحيوي ومن إنتاج كبريتيد ثنائي الميثيل. وهذا يُغيِّر إشارة التغذية المرتدة الخاصة بالحرارة من السالبة إلى الموجبة، مؤديًا إلى تضخيم التغير المُناخي.

وفي الواقع، فالعديد من التغذيات المرتدة البيوجيوكيميائية الأخرى المؤثِّرة على المُناخ موجبة وليست سالبة. فمثل معظم العمليات الحيوية، يزداد إنتاج غازات «الدفيئة» الحيوية؛ أي ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز، كلها مع ارتفاع درجة الحرارة. وبذلك فإذا كان شيءٌ ما يعمل على رفع درجة الحرارة، فمن المُرجَّح أن يزداد حجم مصدر هذه الغازات، فيرفع درجة الحرارة أكثر وأكثر. تعمل هذه التغذية المرتدة الموجبة على نظام مُناخي فيزيائي مُتأثر أصلًا بتغذيةٍ مرتدة موجبة في المُجمَل بسبب آلياتٍ فيزيائية. وعلى وجه التحديد، يزداد تركيز أهم غازات الدفيئة على الإطلاق، وهو بخار الماء، مع الاحترار الناجم عن غازات الدفيئة الأخرى، فيُضخِّم تأثيراتها.

ما مدى كفاءة تنظيم مُناخ الأرض؟

تُشير الأمثلة التي نُوقشَت بإيجاز إلى أنَّ نظام الأرض، في حين أنه يتضمن ما لا يقل عن آليةٍ واحدة تعمل على حفظ استقراره على المدى الطويل، يحتوي كذلك على مزيج من تغذياتٍ مرتدة تحفظ استقراره وأخرى تُزعزعه على مدًى أقصر. ويُشير وجود الحياة منذ أمدٍ بعيد إلى أنَّ المُناخ يُنظم ضِمن حدودٍ واسعة، لكنَّ فرضية «الأرض كرة ثلجية» (التي تحدثنا عنها في الفصل الأول) تشير إلى أنَّ تنظيم المُناخ قد ينهار انهيارًا كارثيًّا جدًّا في بعض الأحيان. وهنا يظهر سؤالٌ مهم: ما مدى استقرار نظام المُناخ الحالي؟ يُقدم سِجل التغيرات المُناخية الأخيرة بعض الخيوط الإرشادية المفيدة التي قد تُعطي إجابةً مناسبة.

على مرِّ الأعوام الأربعين مليونًا الماضية، ظلَّت الأرض تتعرَّض لانخفاض في حرارتها لدرجة أنه منذ ٢٫٥ مليون سنة، بدأَت دوراتُ العصور الجليدية في نصف الكرة الشمالي. وفي البداية، كانت هذه العصور تستمر حوالي ٤١ ألف سنة (إذ كانت مرتبطةً بالتقلبات الدورية في مَيل مِحوَر الأرض)، ولكن في المليون سنة الماضية، أصبحَت العصور الجليدية أطول وأعمق؛ إذ تستمر لما يقارب ١٠٠ ألف عام (شكل ٣-٦). وتُقدِّم دورات العصر



شكل ٣-٦: سِجل العينة الأسطوانية الجوفية المأخوذة من القارَّة القطبية الجنوبية المُعبِّر عن تغيُّر تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي ودرجة الحرارة (رُسم هنا بمقياسٍ مُعدَّل ليُعبِّر عن تغيُّر درجة الحرارة على مستوًى شبه عالمي).

الجليدي الحديثة هذه نموذجًا رائعًا على عملِ الأرض بصفتها نظامًا كليًّا واحدًا، وهو ما يبدو حساسًا جدًّا للتغيُّرات الطفيفة في مدار الأرض، مع وجود تغذياتٍ مرتدة داخل النظام تُسيطر على سلوكه. ويتضح من سِجل العينة الجليدية الأسطوانية الجوفية أنَّ التقلبات التي حدثَت في المُناخ ودورة الكربون كانت متزامنة؛ فالأوقات التي شهدَت ارتفاع درجات الحرارة هي نفسها التي شهدَت ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون، والميثان، وأكسيد النيتروز (والعكس في الأوقات التي شهدَت انخفاض الحرارة). وعند نهاية كل عصر جليدي، كانت التغذيات المرتدة الموجبة بين ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي ودرجة الحرارة قويةً بما يكفي لدرجة أنَّ المُناخ ربما يكون قد دخل حالة «جموح خارج عن السيطرة» مؤقتًا، مؤديًا فجأةً إلى تحويل حالة الكوكب كله من ظروفٍ جليدية إلى ظروفٍ بين جليدية.

وهذا الشعور بعدم الاستقرار يتعزز عندما ننظر إلى التقلبات المُناخية التي حدثَت على مدًى أقصر في العصر الجليدي الأخير. إذ شهدَت تلك الفترة تغيُّراتٍ متكررة سريعة

للغاية غَطَّت تأثيراتها نصف الكرة الأرضية على الأقل. ومع انتهاء العصر الجليدي الأخير، اشتد التركيز على سِجلنا الخاص بهذه التغيُّرات المُناخية المفاجئة، فاكتُشف أنَّ منطقة جرينلاند شهدَت ارتفاع درجة الحرارة بمقدارٍ وصل إلى ١٠ درجاتٍ مئوية في أقل من عَقدٍ زمني. وهذا يُعزز فكرةَ أنَّ نظام المُناخ الحالي غير مستقر على نحوٍ غير عادي — على النطاقات الزمنية القصيرة نسبيًّا على الأقل — مُتيحًا بذلك إطارًا مُهمًّا للتفكير في الأنشطة التي تُغيِّر كوكبنا، والتي نُمارسها بصفتنا أحد الأنواع التي تعيش عليه (طالع الفصول من الخامس إلى السابع).

استقرارٌ متغير

يجري تنظيم بعض المتغيرات الرئيسية في نظام الأرض — ككمية النيتروجين والفوسفور في المحيطات وتركيز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي — بواسطة آلياتِ تغذيةٍ مرتدة سالبة تتضمن كائناتٍ حية. وقد حافظَت هذه التغذيات المرتدة على ظروفٍ مستقرة إلى حدٍّ كبير على كوكب الأرض طوال مئات الملايين من السنين. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ المقصود بكلمة الاستقرار وَفْق المعنى الدارج في سياق الأنظمة ليس الثبات؛ فبعض العوامل البيولوجية والجيولوجية المتغيرة قد أحدثَت تغييراتٍ طويلة الأمد في نظام الأرض. وبالأخص، أسفَر ظهور نباتات اليابسة عن زيادة تركيز الأكسجين في الغِلاف الجوي وتقليل كمية ثاني أكسيد الكربون وخفض درجة الحرارة. لكنَّ هذه التغييرات كانت أصغر بكثير ممَّا كانت ستُصبح عليه لو لم تكن التغذيات المرتدة السالبة موجودة. وفي حين حَظِي مُناخ الأرض بالاستقرار على نطاقاتٍ زمنية جيولوجية، ظهرَت أدلة على عدم استقراره على نطاقاتٍ زمنية أقصر، خصوصًا بالقُرب من العصر الحاضر. وبعد أن قدَّمنا الكيفية التي يُنظِّم بها نظامُ الأرض ذو الحياة المُعقَّدة نفسَه بنفسه، سوف نطرح في الفصل الرابع التغييرات الأساسية التي أنشأته.

الفصل الرابع

ثورات

كيف أصبح نظام الأرض الحالي مختلفًا جذريًّا عن أنظمة الكوكبَين المجاورَين له؛ المريخ والزهرة؟ هذا سؤالٌ كبير، لكنَّ وجود الحياة يُمثل جزءًا كبيرًا من الإجابة بلا شك. فقد شهدَت العقود القليلة الماضية تقدمًا علميًّا لافتًا في فهمنا لتطور الأرض بصفتها نظامًا، وفهمنا لكيفية اقترانها بتطور الحياة. إذ صار علماء نظام الأرض الآن يُفكِّرون من منظور تطوُّر الحياة وتطوُّر الكوكب المُقترنَين معًا، مُدركين أنَّ تطور الحياة قد شكَّل الكوكب، وأنَّ التغيرات الحادثة في بيئة الكواكب شكَّلَت الحياة، ويُمكن اعتبارهما معًا عمليةً واحدة. وعندما ننظر إلى هذا «التطور المشترك» على مرِّ تاريخ الأرض، يَبرُز عددٌ قليل نسبيًّا من التغيرات الثورية التي تحوَّل فيها نظام الأرض جذريًّا. وقد كان كلٌّ من هذه التغييرات الثورية يعتمد على التغيير السابق، ولولا هي لما أصبحنا هنا. يتعمق هذا الفصل في تاريخ الأرض لاستعراض تلك الثورات.

الأدلة

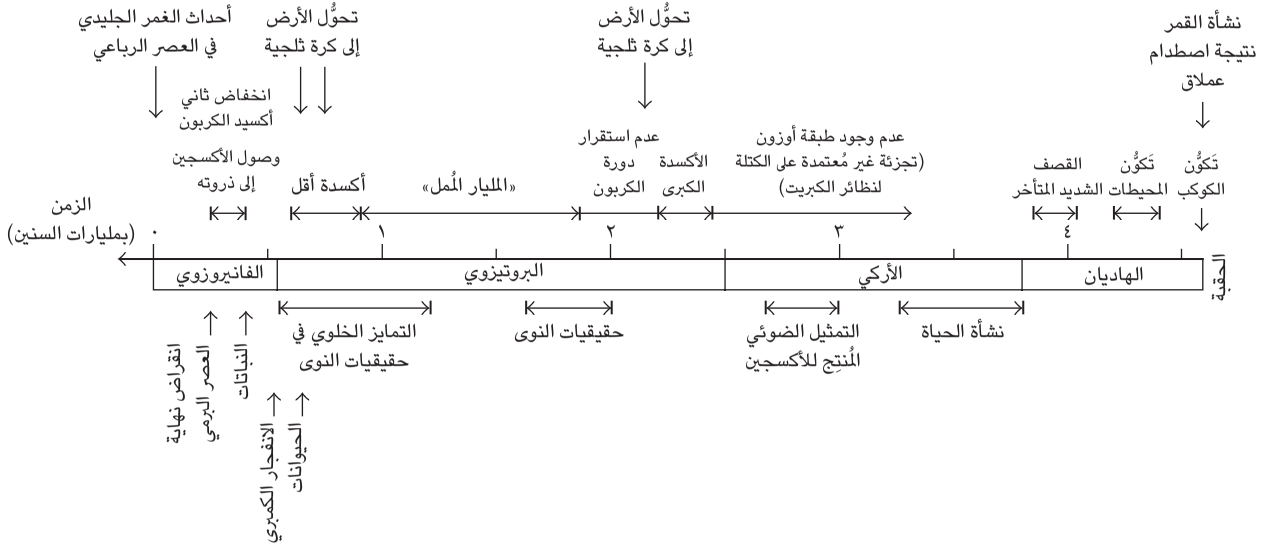
لنفهم العلم الكامن وراء هذه القصة اللافتة، نحتاج إلى إدراك القيمة الكاملة لِما وراءها من أدلةٍ حُصل عليها بمجهوداتٍ مضنية. يتمثل مصدر الأدلة الرئيسي في الصخور القديمة التي ما زالت تنكشف عند سطح الأرض. وتُعَد الصخور الرسوبية التي ترسَّبَت من المحيطات القديمة بالأخص قيِّمة جدًّا. وكذلك أحيانًا ما تكون بعض أجزاء التربة الباقية من سطح اليابسة القديم محفوظةً بحالتها الأصلية. ويُمكن أن تُقدِّم هذه مع تلك خيوطًا إرشادية إلى تركيب المحيطات والغِلاف الجوي في الماضي. والعديد من هذه الخيوط الإرشادية مُسجَّل في نِسَب العناصر التي تحويها الرواسب وتركيبها النظائري. وقد تحتوي الرواسب القديمة أيضًا على أحافير تُعَد نادرة في جزءٍ كبير من تاريخ

الأرض ولا يمكن رؤيتها إلا من خلال الميكروسكوب. وفي أحيانٍ نادرة، تحوي الرواسب زيوتًا غنية بموادَّ عضوية يمكن أن تُنتج «أحافير جزيئية» تُسمَّى مؤشراتٍ حيوية. وهذه المركَّبات العضوية الخاصة لا تصنعها سوى مجموعةٍ فرعية من الكائنات الحية، وبذلك فهي تكشف عن وجود تلك الكائنات.

وفوق ذلك، فتاريخ الحياة مُسجَّل أيضًا في الشفرة الوراثية للكائنات الحية في الوقت الحاضر. فعند المقارنة بين تلك الكائنات، يُمكن استخدام درجة الاختلاف الوراثي القائم بينها لإنشاء نموذج يحاكي «شجرة التطور»، التي توضِّح الترتيب الذي تتفرَّع به سُلالاتٌ مختلفة من سَلفٍ مشترك. وإذا كنا واثقين من شجرة التطور وكنا على درايةٍ ما بمعدل الطفرات الوراثية على فروع مختلفة من الشجرة، فيمكن أيضًا تحويلها إلى «ساعة جُزيئية». ويقوم ذلك على استخدام درجة الاختلاف الوراثي بين الكائنات الحية — في الأجزاء غير المشفِّرة من الجينوم غير المُعرَّض للانتخاب — لتحديد الوقت الذي تفرَّعَت عنده من سَلفٍ مشترك في الماضي؛ أي الطول (الزمني) للفروع المختلفة في شجرة التطور. تُعايَر الساعات الجُزيئية وَفْق السِّجل الأحفوري في زمنٍ قريب نسبيًّا، ويمكن استخدامها بعدئذٍ لاستنباط معلوماتٍ خاصة بزمنٍ أقدم؛ لأنَّ بيانات السجل الأحفوري في تلك الأزمنة الأقدم تكون شحيحةً متناثرة. وصحيحٌ أنَّ تقديرات الساعة الجُزيئية المبكرة كان لها أعمدة خطأ كبيرة لدرجة أنها لم تخبرنا إلا بأقل القليل عن توقيت نشأة سُلالات الحياة القديمة. غير أنَّ إضفاء تحسينات على الطريقة يُنتِج تقديراتٍ أصح بخصوص التوقيت، وهذه التقديرات تبدو أدق أيضًا عند مقارنتها ببيانات السجل الأحفوري الشحيحة المتناثرة.

الزمن السحيق

من أجل فهم تاريخ نظام الأرض، يجب أن نحاول فهم الزمن السحيق؛ أي الأحداث التي وقعَت على مَرِّ ملايين السنين. وهذا يعني أن ننقل تصوُّراتنا عن الزمن من تلك المقتصرة على حياتنا اليومية إلى تلك الخاصة بالعمليات الجيولوجية في نظام الأرض. وهذا يُمكن أن يكون مُشتِّتًا بعض الشيء؛ إذ قال جون بلايفير الذي كان واحدًا من أوائل الذين واجهوا هذه الفكرة (حين عرَضها عليه صديقه جيمس هَتون): «بدا أنَّ الذهن يُصاب بدُوار عند النظر بعيدًا جدًّا في هاوية الزمن». وسعيًا إلى حصولنا على بعض المساعدة طوال تلك العملية، سأسرد القصة بتسلسلٍ زمني، مُرتِّبًا الأحداث على مخططٍ زمني (شكل ٤-١). يستخدم علماء نظام الأرض الاختصار Ga للتعبير عن مليارات السنين الماضية،



شكل ٤-١: الخط الزمني لتاريخ الأرض يُظهِر الأحداث الرئيسية في البيئة (فوق الخط) وتاريخ الحياة (تحت الخط).

والاختصار Ma للتعبير عن ملايين السنين الماضية. وبادئَ ذي بدء، قسَّموا تاريخ الأرض إلى أربع حقب؛ حقبة الهاديان، وحقبة الأركي، وحقبة البروتيروزوي، وحقبة الفانيروزوي.

ومن العوامل الضرورية لتحسين فهم تاريخ الأرض القدرةُ على تحديد تاريخ الصخور بدقة، وبالتبعية تحديد توقيت الأحداث الرئيسية. فهذا يُمكِّن العلماء من ترتيب الأدلة المتاحة لدينا في تسلسلٍ زمني، والبدء في إجراء استنتاجات عن أسبابها. وفي هذا الصدد، تستخدم طريقة التأريخ الإشعاعي التحلل الإشعاعي لنظائرَ مختلفةٍ طويلة العمر. وتُعَد الطريقة الأكثر استخدامًا هي تأريخ حبيباتٍ صغيرة من الزركون المعدني الشائع الموجود في الصخور القديمة اعتمادًا على نسبة نظائر اليورانيوم والرصاص فيها. فهذه الطريقة يُمكن أن تستفيد من حقيقة وجود نظيرَين مختلفَين طويلَي العمر من نظائر اليورانيوم يتحلَّلان إلى نظيرَين مختلفَين من نظائر الرصاص. ويُتيح ذلك مراجعةً مزدوجة للتحقق من صحة التأريخ، ويُقدِّم تقديراتٍ زمنية دقيقة إلى حدٍّ لافت.

نشأة كوكب الأرض

يبدأ خطُّنا الزمني بتكوين المجموعة الشمسية. ويعود تاريخ ذلك، بناءً على أقدم مادةٍ نيزكية، إلى ٤,٥٦٧ مليارات سنة مضت. أمَّا الأرض والكواكب الأخرى، فهي أصغر عمرًا من ذلك؛ لأنها تكوَّنَت بالضرورة من التصادمات القائمة على الجاذبية وتراكُم المواد التي كانت تدور حول الشمس في مرحلةٍ مبكرة من عمرها، في عملية تُسمى التنامي بالتراكم. وفي أثناء تنامي الأرض بالتراكم، وقعَت بعض التصادمات الهائلة جدًّا، ويُظن أنَّ آخرها قد كوَّن القمر منذ ٤,٤٧٠ مليارات سنة. إذ اصطدم جسم يُسمى ثيا (تيمنًا باسم ثيا والدة سيلين، إلهة القمر) بالأرض، مؤديًا إلى إطلاق كتلة من المواد التي تراكمَت لتُكوِّن القمر. ويُمكِننا أن نكون متيقِّنين من ذلك إلى حدٍّ كبير؛ لأنَّ القمر أقل كثافةً من الأرض، مما يُشير إلى أنه يفتقر إلى لُبٍّ غني بالحديد.

كانت الأرض آنذاك ما تزال في طور التكوُّن، لكنَّ كوكبَي المشتري وزُحَل الغازيَّين العملاقَين كانا قد تكوَّنا بالفعل. وقد مزَّقت قوى الجاذبية الخاصة بهما حزامَ الكُويكبات الموجود بين المريخ والمشتري، مُطيحةً ببعض الكُويكبات حتى استقرَّت في مداراتٍ إهليلجية تمُرُّ عَبْر النظام الشمسي الداخلي. وقد أسفر ذلك، في خطوةٍ بالغة الأهمية، عن جلبِ الماء وموادَّ متطايرة أخرى، منها النيتروجين وثاني أكسيد الكربون، إلى كوكب الأرض في

مراحل عمره المُبكرة (وكذلك إلى المريخ والزهرة). تجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ بعض الأجزاء البالغة الصِّغر من قشرة الأرض، التي تعُود إلى ذلك الوقت، ما زالت موجودةً عند السطح في الوقت الحاضر، على شكل حبيبات من الزركون. ويبلغ عُمر أقدمها ٤,٣٧٤ مليارات سنة، وكانت في الأصل جزءًا من صخرة جرانيت؛ مما يُشير إلى أن القشرة القارية قد بدأَت تتكوَّن في أول ١٠٠ مليون سنة من تاريخ الكوكب. ويُشير تركيب نظائر الأكسجين الموجودة في الزركون أيضًا إلى أنَّ ذلك الوقت شهد وجود محيطات من الماء السائل على كوكب الأرض.

لكنَّ الهجوم الذي كان الكوكب يتعرَّض له من الفضاء الخارجي لم يكن قد انتهى بعدُ. فالأرض وكل النظام الشمسي الداخلي تعرَّضا لـ «قصف شديد متأخر» بالكُويكبات. وقد كُشف عن ذلك بتأريخِ الصخور المنصهِرة بفعل الاصطدام التي أحضرَتها بعثات «أبولُّو» من القمر، والتي أظهرَت تجمُّعًا من العصور في نطاقٍ زمني يتراوح بين ٤,١ و٣,٨ ملايين سنة مضت. تُشير عمليات المحاكاة الحاسوبية إلى أنَّ «القصف الشديد المتأخر» من الممكن أن يكون قد نتج من حدوث رنينٍ مداري بين مدار المشتري ومدار زُحَل أسفَر عن انحراف الكُويكبات الموجودة في مداراتٍ إهليلجية إلى داخل النظام الشمسي الداخلي. وقد كانت بعض الاصطدامات التي وقعَت في القصف كبيرةً بما يكفي لتبخير المحيطات المُبكرة؛ وبذلك جعلَت الكوكب غيرَ صالح للحياة (أو كادت تجعله هكذا).

نشأة الحياة

كان التغيير الأساسي الأبرز في تاريخ نظام الأرض هو نشأة الحياة. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ أول دليل غير مؤكَّد على وجود الحياة على الأرض يأتي بعد وقتٍ قصير جدًّا من انتهاء «القصف الشديد المتأخر»، منذ حوالي ٣,٨ مليارات سنة. ويتمثل هذا الدليل في جسيماتٍ صغيرة من الجرافيت — مصنوعة من الكربون العضوي — في بعض أقدم الصخور الرسوبية. أما أُولى الحَفريات المِجهرية التي يُفترض أنها لكائناتٍ حية فيعود تاريخها إلى حوالي ٣,٥ مليارات سنة مضت. وصحيح أنها تُشبه البكتيريا، لكن البعض ليس مقتنعًا بأنَّ تلك البِنى الأحفورية تكوَّنَت بواسطة أحياء. ومن ثَم فأول دليل يحظى باتفاقٍ واسع من أدلة وجود الحياة هو أحافير مِجهرية عمرها ٣,٢٦ مليارات سنة يبدو أنها التقطَت البكتيريا في أثناء مرورها بعملية الانقسام الخلوي.

إذَن، ما الذي حفز الغِلاف الحيوي المُبكر؟ ربما تكون أشكال الحياة الأولى قد استهلكَت مركَّبات في بيئتها، وهي تلك المركَّبات التي كان من الممكن أن تتفاعل لإطلاق طاقةٍ كيميائية. غير أنَّ إمدادات الطاقة الكيميائية عادةً ما تكون ضئيلة، إلا في بعض البيئات الاستثنائية مثل المَنافِس المائية الحرارية في الأعماق بالقرب من حيد وسط المحيط. ومن ثَم، كان من الممكن أن يؤدي نقص الطاقة الكيميائية على نطاقٍ عالمي إلى تقييد إنتاجية الحياة. أحد الاحتمالات أن تكون العتائق المبكِّرة قد استهلكَت الهيدروجين من الغلاف الجوي وثاني أكسيد الكربون لإنتاج الميثان، لكنَّ أقصى مستوًى كانت ستصل إليه إنتاجية مثل هذا الغِلاف الحيوي القائم على مولِّدات الميثان يبلغ حوالَي جزء من ألف من إنتاجية الغِلاف الحيوي البحري الحديث.

ومن المُرجَّح أن يكون غلافٌ حيوي عالمي أكثر إنتاجية قد نشأ عندما بدأَت الحياة المبكرة تُسخِّر أوفر مصادر الطاقة على هذا الكوكب؛ أي ضوء الشمس. ويبدو أنَّ عملية التمثيل الضوئي التي تُثبِّت ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي قد تطوَّرَت في وقتٍ مبكر جدًّا من تاريخ الحياة. فبعض صخور الجرافيت التي يبلغ عمرها ٣٫٨ مليارات عام تحتوي على نسبة من بعض نظائر الكربون الخاصة بنواتج عملية التمثيل الضوئي. ويُجادل بعض العلماء بوجود طرقٍ غير حيوية لصنع جرافيت يحمل هذه البصمة النظائرية المميزة. ولكن منذ ٣٫٥ مليارات سنة، كانت أبكر رواسب الكربونات تتسم ببصمةِ $\delta^{13}C$ تشير إلى وجود معدلٍ كبير من طَمْر الكربون على مستوى العالم، ولا شكَّ أنَّ هذا كان مدعومًا بعملية التمثيل الضوئي.

لم تكن أولى عمليات التمثيل الضوئي بالشكل الذي نعرفه الآن، والذي يُفكك الماء ويُطلِق الأكسجين بصفته أحد المنتجات الثانوية للتفاعل. بل كانت عمليات التمثيل الضوئي المبكر «غير أكسجينية»؛ أي إنها لم تكن تُنتج أكسجينًا. ومن الممكن أنها كانت تستخدم مجموعة من المركَّبات، بدلًا من الماء، كمصدر للإلكترونات لتُثبِّت بها الكربون من ثاني أكسيد الكربون وتختزله إلى سكريات. ومن المواد التي يُحتمل أنها منحتها الإلكترونات آنذاك الهيدروجين الجزيئي وكبريتيد الهيدروجين الموجود في الغِلاف الجوي، أو الحديدوز الذي كان مذابًا في المحيطات القديمة. ويُعَد استخلاص الإلكترونات من كلٍّ من هذه المواد أسهل من استخلاصها من الماء. ولذا فهي تتطلب عددًا أقل من فوتونات ضوء الشمس وآلياتٍ أبسط لأداء التمثيل الضوئي. هذا وتؤكد شجرة التطوُّر أن عدة أشكال من التمثيل الضوئي غير الأكسجيني قد تطوَّرَت في وقتٍ مبكر جدًّا، قبل وقتٍ طويل من عملية التمثيل الضوئي الأكسجينية.

نشأة إعادة التدوير

من المحتمل أنَّ الغِلاف الحيوي المُبكر الذي أسهَم في نموه عمليات التمثيل الضوئي غير الأكسجينية قد كان محدودًا نظرًا لمحدودية المواد التي تمنح الإلكترونات، وكلها أقل وفرةً بكثير من الماء. بل إنَّ نقص المواد ربما مثَّل مشكلةً أعم للحياة داخل نظام الأرض المبكر. تَذكَّر تدفقات المواد التي تدخُل نظام سطح الأرض من العمليات البركانية وعمليات تحوُّل الصخور في الوقت الحاضر (شكل ٢-١). هذه التدفقات أقل بِقِيمٍ أُسِّية عديدة من التدفقات الناتجة من الحياة عند سطح الأرض في الوقت الحاضر؛ الأمر الذي يُشير إلى أنَّ الغِلاف الحيوي الحالي يُعد نظامًا استثنائيًّا من أنظمة إعادة التدوير.

كان التحدي الذي واجه الحياة المبكرة هو تطوير وسائل لإعادة تدوير المواد التي تحتاج إليها لأداء عملية الأيض؛ أي لإنشاء دوراتٍ بيوجيوكيميائية عالمية. وصحيح أنَّ المعلومات المتاحة لدينا عن كيفية حدوث ذلك ووقت حدوثه ضئيلة جدًّا، لكن بضعة خيوط إرشادية تشير إلى أنه وقع في وقتٍ مبكر جدًّا من تاريخ الحياة. وبالأخص، يُخبرنا سجل نظائر الكربون في رواسب الكربونات البحرية بأنَّ الغِلاف الحيوي المبكر كان يتسم بقَدْر كبير من الإنتاجية؛ لأنَّ النسبة بين جزء الكربون المترسب كموادَّ عضوية في الرواسب والكربونات غير العضوية على كوكب الأرض في الدهر السحيق كانت مشابهة جدًّا للنسبة بينهما في الوقت الحاضر. وفوق ذلك، تشير شجرة التطور الخاصة بحياة بدائيات النوى إلى أن العديد من عمليات الأيض التي تُعيد تدوير المواد، مثل إنتاج الميثان، قد تطوَّرَت في وقتٍ مبكر. وكذلك استكشف بعض الباحثين مدى سهولة تطوير عملية إعادة التدوير، أو صعوبتها، بغرسِ أشكالٍ من «حياة مُصطنعة» في نماذجَ حاسوبية، وتركها تتطور. وفي هذه «العوالم الافتراضية»، يَظهرُ إغلاق حلقات إعادة تدوير المواد كنتيجةٍ مؤكَّدة راسخة جدًّا.

وإذا كان الغِلاف الحيوي المبكر يستمد طاقته من التمثيل الضوئي غير الأكسجيني، الذي يُفترض منطقيًّا أنه كان يعتمد على غاز الهيدروجين، فإن التجديد الحيوي للهيدروجين كان سيتم من خلال عملية إعادة تدوير رئيسية. وتشير الحسابات إلى أنه فور تطوُّر عملية إعادة تدوير كهذه، فربما يكون الغِلاف الحيوي المبكر قد حقَّق إنتاجيةً عالمية تصل إلى ١ في المائة من إنتاجية الغِلاف الحيوي البحري العصري. أما إذا كانت عملياتُ التمثيل الضوئي المبكرة غير الأكسجينية تستخدم إمدادات الحديد المُختزَل المتدفق إلى الأعلى في المحيطات، فالأرجح عندئذٍ أنَّ إنتاجيتها كانت محكومةً بدورة مياه

المحيطات، وربما تكون قد وصلَت إلى ١٠ في المائة من إنتاجية الغِلاف الحيوي البحري العصري.

نشأة التمثيل الضوئي الأكسجيني

كان الابتكار الذي أمدَّ الغلاف الحيوي المبكر بقَدرٍ هائل من الطاقة هو نشأة عملية التمثيل الضوئي الأكسجينية التي تستخدم مياهًا وفيرة لتحصُل منها على الإلكترونات. غير أنَّ تطور هذه العملية لم يكن سهلًا. فتفكيك الماء يتطلب طاقةً أكبر — أي كميةً أكبر من فوتونات ضوء الشمس ذات الطاقة العالية — ممَّا يتطلب أيٌّ من أشكال عملية التمثيل الضوئي غير الأكسجينية السابقة. وهنا كان الحل الذي قدَّمه التطور هو ربط «نظامَين ضوئيَّين» موجودَين بالفعل معًا في خليةٍ واحدة وتثبيت أداةٍ بيوكيميائية مُذهلة أمامهما يُمكنها تفكيك جُزيئات الماء. فكانت النتيجة نشوء أول خليةٍ بكتيرية زرقاء، وهي سلف جميع الكائنات الحية التي تُمارِس عملية التمثيل الضوئي الأكسجينية على كوكب الأرض في الوقت الحاضر.

تشير أدلةٌ حالية إلى أنَّ تطوُّر عملية التمثيل الضوئي الأكسجيني استغرق ما يصل إلى مليار سنة، ويعود تاريخ أول دليلٍ مقنع ظهَر على ذلك إلى فترة تتراوح بين حوالي ٣ مليارت و٢,٧ مليار سنة مضت. ويتمثل البرهان الدامغ في دليلٍ كيميائي على تسرُّب الأكسجين إلى البيئة وتفاعُله مع معادن شديدة التأثر بوجود الأكسجين. فعلى سبيل المثال، يُفصَل المولیبدینوم عن الصخور القارية ويُصبح قابلًا للانتقال إلى مواضعَ أخرى بتفاعله مع الأكسجين، وهو يظهر لأول مرة في رواسب المحيطات عند زمن يُقدَّر بحوالي ٢,٧ مليار سنة مضت. وبمجرد أن تطوَّرَت عملية التمثيل الضوئي الأكسجيني، يُفترض أنَّ إنتاجية الغِلاف الحيوي لم تعُد مقيَّدة بكمية الركائز اللازمة لعملية التمثيل الضوئي؛ لأنَّ كميات الماء وثاني أكسيد الكربون كانت وفيرة. وبالعكس من ذلك، من المفترَض أنَّ درجة توافُر المواد المغذية، لا سيما النيتروجين والفوسفور، كانت هي العامل الرئيسي الذي يحدُّ من إنتاجية الغِلاف الحيوي، كما تفعل في الوقت الحاضر.

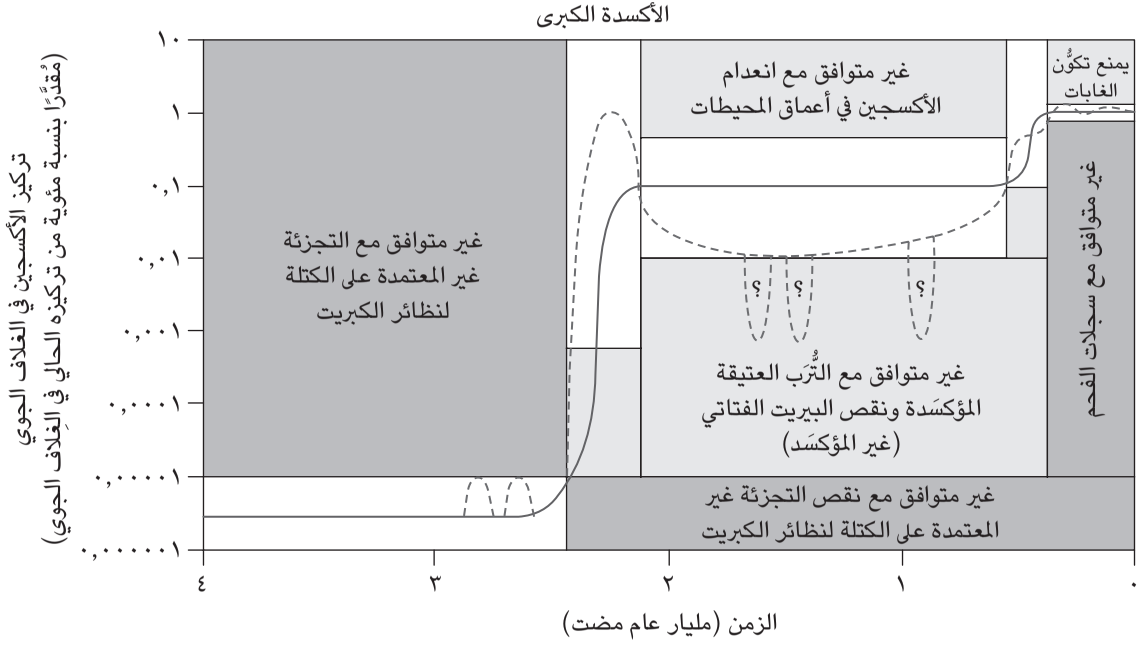
وحالما وُجد مصدرٌ للأكسجين على الكوكب، قد يتبادر إلى الذهن أنَّ تركيز الأكسجين في الغِلاف الجوي سيرتفع باطِّراد؛ على غرار ملء الحوض بالمياه بإغلاق البالوعة. ولكن تركيز الأكسجين في الغِلاف الجوي لم يرتفع فورًا أو باطِّراد. بل ظل غازًا نزرًا طوال مئات الملايين من السنين. ونعلم ذلك لوجودِ بصمةٍ مميزة جدًّا من بصمات «تجزئة نظائر

الكبريت غير المُعتمدة على الكتلة» ما زالت محفوظةً بحالتها الأصلية في رواسب يزيد عمرها عن ٢,٤٥ مليار سنة. وصحيح أنَّ إنتاج بصمة كهذه ما زال ممكنًا بفعل الكيمياء الضوئية لغازات الكبريت في الغِلاف الجوي في الوقت الحاضر، ولكن لا يمكن أن تُحفَظ في الرواسب الحالية؛ لأنَّ كل الكبريت يمُرُّ أولًا عَبْر خزان من الكبريتات في المحيطات، وهذا الخزان يجعله متجانسًا. ومن المؤكَّد أنَّ خزان الكبريتات لم يكن موجودًا في الفترة التي سبقت الـ ٢,٤٥ مليار سنة الماضية بسبب نقص الأكسجين اللازم لإنتاجه. وتُشير بصمة «التجزئة غير المعتمدة على الكتلة» إلى وجود أشعة فوق بنفسجية عالية الطاقة كانت تسري عَبْر الغِلاف الجوي السفلي؛ ولذا لم تكن طبقة الأوزون موجودة، وهو ما يُحتِّم أنَّ تركيز الأكسجين (الذي يتكوَّن منه الأوزون) كان أقل من جزأين في المليون في الغِلاف الجوي.

ومن الممكن أن يكون الأكسجين قد ظل عند هذا التركيز المنخفض طوال مئات ملايين السنين بسبب وجود تدفق زائد من مدخلات المواد المختزلة المتعطشة للتفاعل معه، من بينها الحديد المختزل الذي حُقِن داخل المحيطات من خلال مناطق حيد وسط المحيط، والغازات المختزلة مثل الهيدروجين وكبريتيد الهيدروجين التي تدخل الغلاف الجوي من خلال البراكين. فمعدل تفاعلها مع الأكسجين يزداد مع ازدياد تركيز الأكسجين، الأمر الذي أنشأ نظام تغذية مرتدة سالبة عَمِل على تثبيت تركيز الأكسجين عند مستواه (المنخفض)، وكان حجم مصرف الأكسجين يكافئ حجم مصدره في هذا النظام. وإذا أردنا استخدام استعارة الحوض التشبيهية للتعبير عن تركيز الأكسجين في الغلاف الجوي، فيُمكن القول إنَّ البالوعة كانت مفتوحة وواسعة، وهو ما جعل تركيز الأكسجين ثابتًا عند مستوًى منخفض.

الأكسدة الكبرى

انهار هذا الاستقرار بعد مئات ملايين السنين، عندما قفز تركيز الأكسجين الموجود في الغِلاف الجوي، وذلك في حدث يُعرف باسم «الأكسدة الكبرى» منذ ٢,٤ مليار سنة (شكل ٤-٢). إذ توقفَت عملية تجزئة نظائر الكبريت غير المُعتمدة على الكتلة، وهو ما يشير إلى أنَّ تركيز الأكسجين قد ارتفع بما يكفي لتحويل كل الكبريت إلى كبريتات قبل أن يستقر في الرواسب البحرية. ثم لم تعُد بصمة «التجزئة غير المعتمدة على الكتلة» قَط، وهذه الحقيقة تشير إلى تكوُّن طبقة من الأوزون بصفةٍ دائمة. وقد ظهرَت رواسبُ هائلة



شكل ٤-٢: تركيز الأكسجين في الغِلاف الجوي على مَرِّ تاريخ الأرض.

من الحديد المؤكسد في صورةِ أولى «الطبقات الحمراء» الرسوبية. وكذلك ظهر الحديد الصدئ (المؤكسد) أيضًا في بعض التُّرَب القديمة لأول مرة. وتَكشِف هذه المؤشرات أنَّ تركيز الأكسجين زاد بمقدار عدة قيمٍ أُسِّية، مرتفعًا من أقل من جزء من ١٠٠ ألف من التركيز الحالي في الغِلاف الجوي إلى مستوًى ربما تراوح بين ١ و١٠ في المائة من تركيزه الحالي في الغِلاف الجوي. وما زالت كل مؤشرات ارتفاع تركيز الأكسجين باقيةً معنا إلى الوقت الحاضر، وهو ما يشير إلى أنَّ تأثير الأكسدة الكبرى لم يُبطَل بتأثيرٍ مُعاكس قَط؛ مع أنَّ بعض الأبحاث والدراسات الحديثة تُشير إلى أن الأكسجين ربما انخفض إلى ٠٫١ في المائة من مستواه الحالي خلال حقبة البروتيروزوي التالية.

وصحيح أنَّ نشأة عملية التمثيل الضوئي الأكسجيني هي المسئولة في النهاية عن الأكسدة الكبرى، ولكن حتمًا قد حدثَت تغيراتٌ أخرى طويلة الأمد في نظام الأرض أدت إلى أكسدة نظام سطح الأرض ببطء. وكانت أبرز التغيُّرات الأساسية من بين تلك التغيُّرات فقدان ذرات الهيدروجين وانتقالها إلى الفضاء. ويُعَد هذا تدفقًا بالغ الضآلة على كوكب الأرض في الوقت الحاضر؛ لأنَّ الماء يتجمد خارج الغِلاف الجوي في «المصيدة الباردة» بين طبقتَي التروبوسفير والستراتوسفير. ومن ثَم، لا تصل أي غازات حاملة للهيدروجين تقريبًا إلى قمة الغِلاف الجوي. ولكن من المُفترَض أنَّ قَدرًا كبيرًا من الكربون العضوي الناتج من التمثيل الضوئي الأكسجيني المُبكر قد أُعيد تدويره إلى الغِلاف الجوي في صورة ميثان. ومن الممكن، في الغِلاف الجوي المبكر الغني بالميثان نتيجةً لذلك، أن تكون كميةٌ أكبر بكثير من الهيدروجين قد هربَت إلى الفضاء، وهذا عَمِل على أكسدة سطح الأرض. أسفَر ذلك عن دفع نظام الأرض إلى نقطة تحوُّل؛ حيث تحوَّل ميزان المُدخلات الداخلة إلى الغِلاف الجوي من فائض في المواد المُختزَلة إلى فائض في الأكسجين.

يشير حدوث الأكسدة الكبرى المفاجئ إلى أنَّ هذه المرحلة شهدَت بدء تغذية مرتدة موجبة قوية دفعَت تركيز الأكسجين إلى الارتفاع. وقد كان تكوُّن طبقة الأوزون عنصرًا حاسمًا لهذا التحول؛ لأنه أدى إلى كبح استهلاك الأكسجين مؤقتًا. فالإشعاع فوق البنفسجي يحفز سلسلة من التفاعلات التي يتحد فيها الأكسجين مع الميثان لإنتاج ثاني أكسيد الكربون والماء (مُحدثًا بذلك تأثيرًا معاكسًا لإنتاج الأكسجين والميثان بفعل الغِلاف الحيوي). وبدون طبقة الأوزون، كانت هذه العملية التي يُزال فيها الأكسجين سريعة وفعالة. ولكن حالما تراكمَت كميةٌ كافية من الأكسجين لبدء تكوُّن طبقة الأوزون، فمن المفترَض أنَّ هذه الطبقة قد حَمَت الغِلاف الجوي الواقع أدناها من الأشعة فوق البنفسجية،

وأبطأَت وتيرة إزالة الأكسجين مؤقتًا. ومن المفترَض أنَّ وجود كميةٍ أكبر من الأكسجين أدى إلى إنتاج كميةٍ أكبر من الأوزون؛ وبذلك سمح بمرور كميةٍ أقل من الإشعاع فوق البنفسجي، وعزَّز كبح استهلاك الأكسجين أكثر وأكثر في عملية تغذيةٍ مرتدة موجبة. وتشير بعض النماذج إلى أنَّ هذه التغذية المرتدة الموجبة كانت قوية بما يكفي لتصل إلى حالة من «الجموح الخارج عن السيطرة» مؤقتًا، مؤديةً بذلك إلى ارتفاعٍ سريع في تركيز الأكسجين. ولكن من المُفترَض أنَّ نظام الأرض سرعان ما استقر مجددًا عند مستوًى أعلى من الأكسجين مع وصول مصارف الأكسجين إلى حجم يكافئ حجم مصادره مجددًا.

عندما قفز تركيز الأكسجين في حَدَث الأكسدة الكبرى، أسفَر هذا عن انخفاض تركيز الميثان في الغِلاف الجوي، فأبطأ عملية الأكسدة الإضافية التي كانت الأرض تتعرض لها. ومن الممكن أن يساعد هذا الانخفاض في تركيز الميثان في تفسير سبب وقوع سلسلة من أحداث تكوُّن الأنهار والصفائح الجليدية (الغَمر الجليدي) عندما ارتفعَت مستويات الأكسجين. وقد وصل أحد هذه الأحداث، منذ ٢٫٢ مليار سنة، إلى دوائر عرضٍ منخفضة بالقرب من خط الاستواء، ومن المُرجَّح أنه كان أول حدث تتحول فيه الأرض إلى كرة ثلجية. وكذلك كانت الأكسدة الكبرى متبوعةً بقفزة مؤقتة كبيرة في مُعدل طَمْر الكربون العضوي، وهذه القفزة مُسجَّلة في بعض نظائر الكربون. وربما قد نتج ذلك من ازدياد الأكسجين الذي تفاعَل مع الكبريتيد في بعض الصخور على القارات لإنتاج حمض الكبريتيك الذي أذاب الفوسفور من الصخور وغذَّى الإنتاجية في المحيطات بالطاقة. وإذا صح ذلك، فإنه قد دعم انتقال الكوكب إلى مستوًى أعلى من الأكسجين. وبحلول زمن يُقدَّر بحوالي ١٫٨٥ مليار سنة مضت، استقر هذا التقلب في دورة الكربون والمُناخ، ودخلَت الأرض فترةً طويلة من الاستقرار وُصفَت، في تسميةٍ فظة وانتقاديةٍ بعض الشيء، باسم «المليار المُمل».

نشأة حقيقيات النوى

أسفَر اضطراب الأكسدة الكبرى عن نشأة ظروفٍ أنسب لأشكال الحياة التنفسية (أي التي تستخدم الأكسجين). ففي مرحلةِ ما بعد الأكسدة، كان الكوكب يحوي قَدرًا أكبر بكثير من الطاقة المتاحة؛ لأنَّ العملية التي تتنفس بها الكائنات الحية بالأكسجين تُنتِج طاقةً أكثر بقيمةٍ أُسِّية كاملة ممَّا يُنتجه تكسير جُزيئات الغذاء دون استخدام الأكسجين. ومن بين الكائنات الحية التي استفادت من مصدر الطاقة هذا حقيقياتُ النوى الأولى؛ وهي خلايا معقَّدة ذات نواة ومكوِّنات أخرى مميزة عديدة.

تختلف حقيقيات النوى اختلافًا عميقًا عن بدائيات النوى التي سبقَتها، لكنها أيضًا مكوَّنة جزئيًّا من بعض الخلايا التي كانت عبارةً عن بدائيات نوًى غير طفيلية في الماضي. أمَّا الميتوكوندريا — مصنع الطاقة — الموجودة في الخلايا الحقيقيات النوى، فكانت عبارةً عن بكتيريا هوائيةٍ غير طُفيلية في الماضي، فيما كانت البلاستيدات الموجودة في خلايا النباتات والطحالب — التي يحدُث فيها التمثيل الضوئي — عبارةً عن بكتيريا زرقاءَ غير طُفيلية ذات يوم. وقد حُصِل على هذه المكوِّنات الخلوية في عمليات اندماجٍ تكافلية قديمة مع البكتيريا. وأتاح الاندماج التكافلي، الذي أدى إلى ظهور الميتوكوندريا، مصدرَ طاقة وفيرًا للخلية الحقيقية النوى السَّلَفية. وكذلك أعادت حقيقياتُ النوى ترتيب الكيفية التي تنسخ بها المعلومات الوراثية — إذ تنسخ كروموسوماتٍ عديدة بالتوازي — بينما تنسخ بدائيات النوى الحمض النووي الخاص بها في حلقةٍ واحدة طويلة. وهذه الابتكارات مكَّنَت حقيقيات النوى من التعبير عن جينات أكثر بكثير ممَّا تُعبِّر عنها بدائيات النوى، وهذا منحَها في النهاية القدرة على إنشاء أشكالٍ أكثر تعقيدًا من الحياة تحمل أنواعًا متعددة من الخلايا.

غير أنَّ أصل نشأة حقيقيات النوى مُحاط بالغموض والجدل؛ لأنَّ علماء الأحياء ليسوا متفقين على ما يُمثِّل بداية السلالة أو ما يُشكِّل دليلًا أحفوريًّا على حقيقيات النوى. فأبكر الأدلة التي ادُّعيَ أنها مؤشِّراتٌ حيوية لوجود حقيقيات النوى قبل ٢,٧ مليار سنة مضت يُعتقد الآن أنها مشوبة بموادَّ أصغر عمرًا. وثَمَّة حفريتان مبهَمتان من حفريات «أكريتارك» عمرهما ٢,٥ مليار عام ربما تُمثِّلان الأطوار البَيْنية لحقيقيات النوى المبكرة، لكنَّ الاسم نفسه يعني أنهما من «أصل غير واضح». وربما يُمكن أن تكون بعض الحفريات الحلزونية التي يبلُغ عمرها ١,٩ مليار عام، ويُمكن رؤيتها بالعين المجرَّدة طحالب حقيقية النواة (تُسمى جريبانيا)، لكنها كذلك يمكن أن تكون بكتيريا زرقاءَ استعمارية. هذا وتشير ساعاتٌ جُزيئية إلى أنَّ آخر سلفٍ مشترك لجميع حقيقيات النوى كان يعيش منذ فترة تتراوح بين ١,٨ و١,٧ مليار سنة تقريبًا.

ولم تُدرك حقيقيات النوى قدرتها على إنشاء أشكالٍ أكثر تعقيدًا من الحياة تحمل أنواعًا متمايزة من الخلايا إلا إدراكًا بطيئًا. فمعظم الحفريات التي يعود تاريخها إلى منتصف عمر الأرض — حقبة البروتيروزوي — هي حفريات الأكريتارك الغامضة. وتُوجد حفرياتٌ أندر بكثير متبقية من أجساد حقيقيات النوى، وهذه تتضمَّن حفريات «تابانيا» التي يبلغ عمرها ١,٥ مليار عام، وربما تكون أحد الفطريات، وحفريات «بانجيومورفا

المتكاثرة جنسيًّا» التي يبلغ عمرها ١,٢ مليار عام، وتُعَد طحلبًا أحمر (عشبًا بحريًّا) متعدد الخلايا منسوبًا إلى رُتبةٍ حديثة.

ما زال الباحثون متحيرين بشأن ماهية العوامل التي منعَت تطوُّر الحياة المُعقدة خلال «المليار المُمل»، لكنَّ كثيرين يرَون أنَّ بعض القيود البيئية أدت دورًا رئيسيًّا. فطوال معظم حقبة البروتيروزوي، ظلت بدائيات النوى تُهيمِن على أسطح المحيطات، فيما بَقيَت أعماق المحيطات لا أكسجينية؛ أي خالية من الأكسجين. وعند الأعماق المتوسطة، أصبحَت بعض هذه المياه اللاأكسجينية «يوكسينية»؛ بمعنى أنَّ الكبريتات الموجودة في الماء قد اختُزلَت إلى كبريتيد الهيدروجين، الذي يُعَد مادةً سامَّة للعديد من حقيقيات النوى. وقد أسفرَت الكيمياء الغريبة للمحيطات في حقبة البروتيروزوي أيضًا عن إزالة العديد من المعادن النزرة كالموليبدينوم من المحيطات. تجدُر الإشارة إلى أنَّ الموليبدينوم يُستخدم على نطاقٍ واسع في تثبيت النيتروجين في الوقت الحاضر؛ لذا فبدونه قد يحدُث نقصٌ في كمية النيتروجين المُتاح في المحيطات.

اضطراب حقبة البروتيروزوي الحديثة

كُسِر الجمود أخيرًا في حقبة البروتيروزوي الحديثة (من ١٠٠٠ مليون سنة إلى ٥٤٢ مليونَ سنة مضت)، وقد شهدَت هذه الحقبة نوبةً من الاضطرابات المُناخية، وأكسجة أعماق المحيطات، وظهور الحيوانات الأولى. بدأَت أولى علامات التغيير منذ حوالي ٧٤٠ مليونَ سنة، عندما أصبحَت المؤشرات الحيوية الخاصة بالطحالب أكثر انتشارًا في رواسب المحيطات، وبدأ تنوُّع حفريات حقيقيات النوى يزداد. ومن المُرجَّح أنَّ هذا عزَّز كفاءة المضخَّة البيولوجية التي تنقل الكربون من أسطح المحيطات إلى أعماقها. وكذلك شَهِد ذلك الوقت وجود نُظم إيكولوجية ميكروبية مُنتِجة على اليابسة، ومن المتصوَّر أنَّ بعض الفطريات والطحالب والأشنات الحقيقية النواة (الناتجة من اندماجٍ تكافلي بين الفطريات والطحالب) ربما كانت من تلك النُّظم الإيكولوجية المُبكرة على اليابسة، وإن كنا لا نملك أدلةً أحفورية لا على هذه ولا تلك.

وفي تلك الأثناء، كانت حركة الصفائح التكتونية تُفكك القارة العُظمى «رودينيا»، وتُبعثر كتل اليابسة الناتجة وفق نسقٍ غير عادي؛ حيث وقع جزءٌ كبير من اليابسة في المناطق المدارية. ومن المُرجَّح أنَّ هذا أسفَر عن تعرُّض سيليكات القارات لتجويةٍ فعالة جدًّا يُحتمل أن تكون الأحياء قد زوَّدَتها. ومن المفترَض أن هذا بدوره قد قلَّل تركيز

ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي وخفَّض حرارة الكوكب. وبطريقةٍ ما، صار المُناخ شديد البرودة إلى حدٍّ سبَّب غَمرًا جليديًّا بالغ الشدة — يُعرَف باسم الغَمر الجليدي الستورتي — منذ حوالي ٧١٥ مليونَ سنة. وقد وصل الغَمر الجليدي إلى دوائر العرض الاستوائية؛ مما يشير إلى أنَّ هذا كان واحدًا من أحداث تحوُّل الأرض إلى كرة ثلجية. ثم استمر الغَمر الجليدي عشرات الملايين من السنين، وهو ما يتوافق مع الزمن الذي يستغرقه تراكُم كميةٍ كافية من ثاني أكسيد الكربون لإذابة الجليد.

ولم يتوقف الاضطراب المُناخي عند ذلك الحد. إذ نتج غَمرٌ جليدي شديد ثانٍ — يُعرَف بالغَمر الجليدي المارينوي — وانتهى قبل ٦٣٥ مليون سنة. وتَبِعه ترسُّب كمياتٍ هائلة من صخور الكربونات عُرِف باسم «غطاء الكربونات»، وهذا أيضًا يتوافق مع نظرية «الأرض كرة ثلجية» (الواردة في الفصل الأول). ففي الظروف ذات الحرارة والرطوبة الفائقة التي أعقبَت تحوُّل الأرض إلى كرة ثلجية، يُرجح أنَّ التجوية حدثَت بوتيرة سريعة للغاية، فأمدت المحيطات بأيونات الكالسيوم والماغنسيوم التي تتحد مع ثاني أكسيد الكربون الزائد في الغِلاف الجوي والمحيطات لتُسفر عن ترسُّب كمياتٍ هائلة من رواسب الكربونات.

ربما يكون اللغز الأكبر فيما يتعلق بأحداث الغَمر الجليدي الشديدة هذه هو كيفية نجاة أسلاف الحياة المُعقَّدة منها. يشير الدليل القائم على المؤشرات الحيوية والساعات الجُزيئية إلى أنَّ بعض الحيوانات البسيطة في صورة إسفنجيات كانت قد تطوَّرَت بالفعل، بالإضافة إلى بعض الطحالب والفطريات المتعددة الخلايا. غير أنَّ الحياة المعقدة لم تزدهر إلا بعد أحداث الغَمر الجليدي. فأولًا، تُوجد حَفريات يُظن أنها تُمثِّل أجنَّةً حيوانية، إلى جانب الطحالب والفطريات. ثم ظهرَت أول كائناتٍ حَفرية كبيرة، وهي «الكائنات الحية الإدياكارية»، منذ حوالي ٥٧٥ مليون سنة. وفي حين أنَّ نَسَبها البيولوجي محل جدال، فالمُرجَّح أنَّ بعضها على الأقل كان حيوانات. وقد تبعَتْها بعد ذلك بعشرات الملايين من السنين حيواناتُ الرعي المتنقلة، سواء على الرواسب أو كعوالقَ حيوانية في عمود الماء.

فما الذي سبَّب هذه الطفرة في تطوُّر الحيوانات؟ تحتاج الحيوانات المتنقلة الكبيرة نسبيًّا إلى أكسجين أكثر ممَّا تحتاج إليه المخلوقات غير المُتنقلة، بما فيها الإسفنجيات التي سبقَتْها. والمثير للاهتمام أنَّ أول دليلٍ ظهَر على أكسجة بعض الأجزاء من أعماق المحيطات يعود تاريخه إلى ٥٨٠ مليون عام مضت، قبل فترةٍ وجيزة من ظهور الحفريات الإدياكارية عند أعماق المحيطات. ومع ذلك، كان يُوجد أكسجين بالفعل في المياه الضحلة في

المحيطات طوال أكثر من مليار سنة قبل ذلك. ربما يكون التطور هو الذي سبَّب الأكسجة وليس العكس. فبتعزيز كفاءة عملية إزالة الكربون من عمود الماء وإزالة الفوسفور بنقله إلى الرواسب، ربما يكون ظهور الإسفنجيات والطحالب قد أدى إلى أكسجة المحيطات، فحسَّن الظروف وجعلَها أنسب لتطوُّر الحيوانات باستمرار. وقد بلغَت الثورة الحادثة في التعقيد الحيوي ذروتها بـ «الانفجار الكامبري» الذي شهد طفرةً في تنوُّع الحيوانات في الفترة الممتدة من ٥٤٠ إلى ٥١٥ مليون عام مضت، وشهد إنشاء شبكات الغذاء الحديثة في المحيطات.

كان ذلك بمثابة علامة على ميلاد عالمنا الحديث. وكان أبرز تغيير أساسي منذ ذلك الحين هو ظهور النباتات على اليابسة (وقد ناقشناه في الفصل الثالث)، الذي بدأ منذ حوالي ٤٧٠ مليون عام، وبلغ ذروته بنشوء أولى الغابات العالمية بحلول زمن يُقدَّر بحوالي ٣٧٠ مليونَ عام مضت. وقد أدى هذا إلى مضاعفة مُعدل عمليات التمثيل الضوئي العالمية، فزاد حجم تدفقات المواد. وأسفَر تسارُع التجوية الكيميائية لسطح اليابسة عن تقليل مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي وزيادة مستويات الأكسجين في الغِلاف الجوي، وهو ما أدى إلى أكسجة أعماق المحيطات بالكامل. ومنذ ظهور الحياة المُعقدة، وقع العديد من أحداث الانقراض الجماعي. وكان أكبرها هو انقراض نهاية العصر البرمي، الذي حدث قبل ٢٥٢ مليون عام، والذي أعاد نظام الأرض إلى حالاتٍ سابقة، في ظل استنفاد طبقة الأوزون وانتشار خُلو المحيطات من الأكسجين. ولكن على الرغم من أنَّ أحداث الانقراض هذه قد أحدثَت تغيُّراتٍ عميقة في عملية التطور سواء بالسلب أو الإيجاب، فإنها لم تُحدِث تغييرًا جذريًّا في آلية سَيْر نظام الأرض.

سماتٌ مشتركة

مَرَّ تاريخ نظام الأرض بثلاثة تحولاتٍ ثورية؛ بداية الحياة والتدوير البيوجيوكيميائي، ونشأة التمثيل الضوئي الأكسجيني والأكسدة الكبرى، ونشأة الحياة المعقدة من الاضطرابات البيئية في حقبة البروتيروزوي الحديثة. وتتشاركُ هذه الثورات بعضَ السمات المشتركة فيما بينها. فكلها نتجَت من ابتكاراتٍ تطورية نادرة. وتنطوي على زياداتٍ تدريجية في استخلاص الطاقة وتدفق المواد خلال الغِلاف الحيوي، مصحوبةً بزيادة في تعقيد التنظيم الحيوي ومعالجة المعلومات. فضلًا عن أنها كانت تعتمد على اتسام نظام الأرض بقَدرٍ من عدم الاستقرار، لدرجة أنَّ بعض النُّفايات الجديدة الناتجة من

عملية الأيض سبَّبَت تغيُّراتٍ شديدةً كارثية في المُناخ والتدوير البيوجيوكيميائي. ولم تنتهِ تلك الثورات إلا عندما استطاعت عملية التطور العمياء إغلاق الدورات البيوجيوكيميائية مرةً أخرى، وهو ما أعاد تدويرَ موادِّ النفايات ورسَّخ حالة مستقرة جديدة لنظام الأرض. يستعرض الفصل الخامس ما إذا كان ممكنًا أن نكون، نحن البشر، مسئولين عن بدءِ تغيير ثوري جديد في نظام الأرض.

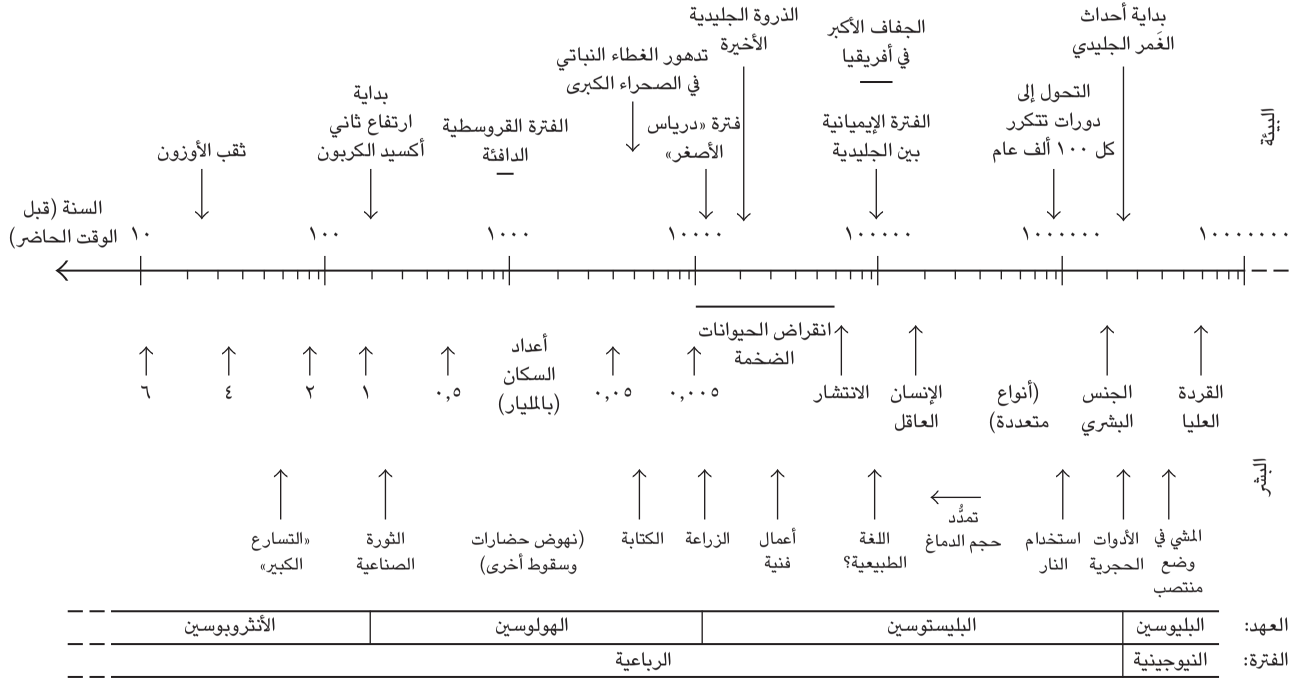
الفصل الخامس

الأنثروبوسين

هل يمكن أن يكون نظام الأرض على شفا تغييرٍ ثوري آخر، بسبب أنشطتنا بصفتنا أحد الأنواع؟ نُمثِّل، نحن البشر، ناتجًا حديثًا جدًّا من نواتج التطور، لكننا منخرطون بالفعل في تغيير الكوكب على نطاقٍ عالمي. وقد أدرك البعض أنَّ البشر صاروا الآن مُكوِّنًا رئيسيًّا من مكوِّنات نظام الأرض، وعُرِض هذا الإدراك بإيجاز في مخطط «بريذرتون» (شكل ١-٥). وفي خطوة أحدَث، صِيغَ مصطلح «الأنثروبوسين» لوصف العهد الجيولوجي الجديد الذي تُغيِّر فيه الأنشطة البشرية نظامَ الأرض على نطاقٍ عالمي. ويدور كثير من الجدل حول ما إذا كان هذا عهدًا جديدًا حقًّا، وإذا كان كذلك، فمتى بدأ. يستعرض هذا الفصل كيف تَشكَّل التطور البشري بفعل التغييرات الحادثة في نظام الأرض وكيف استمر وجودُنا حتى أصبحنا نُغير نظام الأرض، ويسجل الأحداث الرئيسية على خط زمني (شكل ٥-١).

شروط بيئية مسبقة

كانت توجد عدة شروط بيئية مسبقة لازمة لتطوُّر البشر. ولعل أبرزها وجود غِلافٍ جوي غني بالأكسجين؛ فأدمغتنا بالذات متعطشة جدًّا للطاقة، وإذا انخفض الضغط الجزئي للأكسجين في الهواء بمقدار الثُّلث تقريبًا، فستبدأ وظائف الدماغ في التعرُّض لمعاناةٍ حقيقية. لكننا نعرف من السجل المستمر للفحم الأحفوري أنَّ نسبة الأكسجين في الغِلاف الجوي ظلت أعلى من ١٥ في المائة طوال الـ ٣٧٠ مليونَ عام الأخيرة؛ لذا لم يكن نقص الأكسجين يعوق تطوُّرنا. بل أسهمَت الحرائق التي غذَّاها الأكسجين الوفير في إنشاء نوعية بيئة الأراضي العشبية المختلطة التي تطوَّر فيها أسلافنا، وأصبحَت الحرائق والنيران لاحقًا أداةً رئيسية استعان بها البشر الأوائل.



شكل ٥-١: خط زمني لتطور البشر مقابل تباينُ البيئة، على مقياسٍ لوغاريتمي.

على الرغم من أنَّ الأراضي العشبية تُغطي الآن حوالي ثلث المساحة المُنتِجة من سطح اليابسة على كوكب الأرض، فإنها حديثة جيولوجيًّا. وقد تطوَّرَت الأعشاب وسط توجُّهٍ عام نحو انخفاضِ تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، وانخفاضِ حرارة المُناخ وازدياد جفافه، على مرِّ الأربعين مليون سنة الماضية، ولم تنتشر على نطاقٍ واسع إلا في مرحلتَين خلال العهد الميوسيني الذي امتد بين حوالي ١٧ مليون سنة مضت و٦ ملايين سنة مضت. وكانت هاتان المرحلتان من توسُّع الأراضي العشبية مدفوعتَين بتغذياتٍ مرتدة موجبة قوية؛ فالأراضي العشبية تُحفز حدوث الحرائق التي بدَورها تجعل الظروف مواتية للأراضي العشبية؛ لأنَّ الحرائق المتكرِّرة تمنع تجدُّد الغابات. وفي مرحلتها الثانية من التوسُّع، استعمرَت الأراضي العشبية أجزاءً كبيرة من أفريقيا، بما فيها «الوادي المتصدع الكبير»، وهو المكان الذي تباعدَت فيه سُلالتنا التطورية عن حيوانات الشمبانزي، منذ حوالي ستة ملايين سنة. ومنذ حوالي أربعة ملايين سنة، بدأ أسلافُنا من أشباه البشر يمشون منتصبين؛ ويُتصوَّر أنَّ ذلك كان بدافع التكيُّف مع التحرُّك عَبْر السافانا التي ظهرَت حديثًا بين كُتل الغابات الشجرية آنذاك.

وحالما بدأ أسلافنا يطوِّرون استخدام الأدوات الحجرية — التي يعود تاريخ أول دليل مُسجَّل عليها إلى ٢٫٦ مليون سنة مضت — سقط كوكب الأرض في سلسلة من دورات العصور الجليدية التي تزايدَت شدَّتها وتناقَص معدَّل تكرارها. ويُعَد هذا التغيير في ديناميكات المُناخ علامةً على بداية العصر الرباعي. إذ حفَّز نشأة أنواع جديدة من الثدييات على نطاقٍ واسع، بما فيها سُلالة أشباه البشر. وربما يكون عدم الاستقرار البيئي العالمي الذي نتَج من ذلك قد أدى دورًا في تطوُّرنا بصفتنا رئيسياتٍ ذات ذكاءٍ غير عادي ونزعةٍ اجتماعية عالية. الفكرة العامة هي أنَّ البيئة عندما تتغير — على ألا تكون التغيُّرات متكررة بدرجةٍ مُبالَغ فيها أو خارج حدود المتوقع — فمن المفيد أن تتحلى بالذكاء وتتعاون في مجموعاتٍ اجتماعية للمساعدة في التكيُّف مع الظروف المتغيرة. وعلى العكس من ذلك، إذا كانت البيئة مستقرة، فلا داعي إلى أن تكون ذكيًّا، وإذا كانت شديدة التقلب، فأفضل استراتيجية هي أن تَزيد من النسل تجنُّبًا للمشكلات.

استخدام النار

ميَّز تعمُّد استخدام النار لأغراضٍ معيَّنة أسلافنا عن كل الأنواع الأخرى؛ لأنه كان أول ابتكار تضمَّن استخدام طاقةٍ أخرى غير طاقة الجسم البشري. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ استخدام

النار بطريقةٍ رشيدة محكومة ربما بدأ منذ ١,٥ مليون سنة، ومن المؤكد أنه كان جاريًا بالفعل منذ ٨٠٠ ألف سنة مضت في أفريقيا، ومنذ ٤٠٠ ألف سنة مضت في أوروبا. وقد أمدَّ استخدامُ النار لأغراض الطهي الإنسانَ المنتصِب بمزيد من الطاقة في نظامه الغذائي من طهي اللحوم، ومنَحه نظامًا غذائيًّا أكثر تنوعًا (بإزالة السموم من الأطعمة). وبدَوره أسفَر التحول إلى صيد اللحوم الغنية بالطاقة عن تكوين مجموعاتٍ اجتماعية استقرت حول المخيَّمات وعن تقسيم المهام، وهو ما أحدث طفرةً في التطور الاجتماعي البشري.

وفي الفترة الواقعة بين ٤٠٠ ألف و٢٥٠ ألف سنة مضت، أصبحَت تقنيات الأدوات الحجرية أكثر تعقيدًا، وازداد حجم الدماغ بسرعة. ثم ظهَر الإنسان ذو التركيب التشريحي العصري (الإنسان العاقل) لأول مرة في شرق أفريقيا منذ حوالي ٢٠٠ ألف سنة. وبعد ذلك بفترة، مرَّ أسلافنا بعُنق زجاجة في ظل وصول عدد أزواج التكاثر إلى ١٠ آلاف زوج أو أقل. ثم خرج أحفاد هذه المجموعة المؤسِّسة من أفريقيا وبدءوا ينتشرون في أرجاء العالم منذ حوالي ٦٥ ألف سنة. وقد سُهِّلت هِجرتهم بفضل واحدة من بين سلسلة من المراحل الرطبة الدورية التي مرَّت بها الصحراء الكبرى بعد موجةِ جفافٍ كبيرة في أفريقيا في الفترة الممتدة من ١٣٥ ألف سنة مضت إلى ٩٠ ألف سنة مضت. ومع وصول البشر العصريين إلى قارَّاتٍ جديدة، تسبَّبوا في انقراض ثدييات كبيرة أخرى أو «حيوانات ضخمة». بدأ هذا في أستراليا منذ ٤٤ ألف سنة، وفي أوروبا منذ أكثر من ٣٠ ألف سنة، وفي أمريكا الشمالية منذ ١١٥٠٠ سنة، وفي أمريكا الجنوبية منذ ١٠ آلاف سنة. وكان الانقراض أقل حدَّة في أفريقيا؛ ربما لأنَّ الأنواع الموجودة كانت معتادةً على الصيادين البشريين وحَذِرة منهم بالفعل.

كانت النار هي «الأداة» الأولى التي مكَّنَت البشر الأوائل من أن يبدءوا تغيير بيئتهم على نطاقٍ واسع. فاستخدام البشر للنار في الصيد أدى إلى إزاحة النُّظم الإيكولوجية نحو الأراضي العشبية. ويساعد هذا في تفسير السبب الذي جعل الحيوانات الآكلة العشب التي تتغذَّى على الأشجار (بدلًا من أن تأكل الأعشاب) صاحبةَ النصيب الأكبر من المعاناة في موجات انقراض الحيوانات الضخمة. وكذلك ربما يكون أسلافُنا قد عكَفوا على صيد بعض الحيوانات الكبيرة الآكلة العشب حتى أوصلوها إلى الانقراض؛ ومن ثَم أصبحَت الحيوانات الآكلة للحوم والجِيَف تُعاني نقصًا في الغذاء. ساعد الاستخدام البشري للنار في أستراليا في حفظ أراضي الشجيرات الصحراوية بامتداد مناطق شاسعة من القارَّة. وهذا بدَوره ربما قد منع عودة الرياح الموسمية إلى المناطق القارِّية الداخلية عندما دخل نظام الأرض عهد الهولوسين بين الجليدي الحالي. وإذا صحَّ ذلك، فربما يمثِّل أول تأثير واسع النطاق أحدَثه البشر على نظام المُناخ.

الزارعة وتربية الحيوانات

مع خروج نظام الأرض من العصر الجليدي الأخير، كان مُناخ نصف الكرة الشمالي يشهد تقلباتٍ كبرى. إذ حدث احترارٌ مفاجئ منذ حوالي ١٤٧٠٠ عام، ثم تَبِعه انخفاضٌ ملحوظ في درجة الحرارة منذ ١٢٧٠٠ عام، ثم احترارٌ مفاجئ آخر منذ ١١٥٠٠ عام. وخلال الفترة الباردة المعروفة باسم «درياس الأصغر»، بدأ سكان منطقة شرق البحر الأبيض المتوسط، الذين كانوا يجمعون كمياتٍ وفيرة من الحبوب البرية (التي لم يتدخل البشر في زراعتها) للغذاء، يزرعون أوَّل محاصيل الحبوب، ربما بدافع التجاوب مع الجفاف الذي خيَّم على المنطقة بسبب تغيُّر المناخ. ومع استقرار نظام الأرض في الحالة بين الجليدية المستقرة في العهد الهولوسيني الحالي، منذ حوالي ١٠٥٠٠ عام، دخلَت الصحراء الكبرى إحدى مراحلها الرطبة والخضراء مجددًا، فتحوَّلَت المنطقة التي تضُم أنهار النيل والفرات ودجلة إلى ما يُعرَف بمنطقة «الهلال الخصيب» الشهيرة. وبدأَت الزراعة هناك بإنبات حبوب القمح والشعير والبازلاء، كما بدأَت تربية الأغنام والماعز والأبقار والخنازير. وكذلك ظهرَت الزراعة وتربية الحيوانات ظهورًا مستقلًّا في أماكن أخرى من العالم؛ إذ ظهرَت منذ حوالي ٨٥٠٠ عام في جنوب الصين، ومنذ ٧٨٠٠ عام في شمال الصين، ومنذ ٤٨٠٠ عام في المكسيك، ومنذ ٤٥٠٠ عام في بيرو وشرق أمريكا الشمالية.

ويُشير ظهور الزراعة وتربية الحيوانات على نحوٍ مستقل ومفاجئ نسبيًّا في كل أنحاء العالم إلى أنَّ هذه الأنشطة ربما كانت مكبوحةً بفعل الظروف البيئية قبل عهد الهولوسين. فمن المؤكَّد أنَّ المستويات المنخفضة من ثاني أكسيد الكربون في العصر الجليدي والمناخ الجليدي المتقلب لم يكونا مُواتيَين لبدء الزراعة وتربية الحيوانات. وحالما بدأَت هذه الأنشطة، عزَّزَت من مُدخلات الطاقة التي كانت المجتمعات البشرية تحصُل عليها. وأسفرَت «ثورة العصر الحجري الحديث» هذه عن زيادة خصوبة البشر (وسرعان ما تَبِعها زيادةٌ في معدل الوفَيات)، وهو ما أدى إلى زيادة عدد السكان من ستة ملايين إلى أكثر من ثلاثين مليونًا في الفترة الواقعة بين ٦ آلاف و٤ آلاف سنة مضت، وربما وصل إلى ١٠٠ مليون عند ألفَي سنة مضت. لكنَّ إحدى سلبيات الزراعة أنَّ الحضارات الزراعية المستقرة العالية الكثافة كانت أشدَّ تأثرًا بتغير المُناخ من المجتمعات المُتنقِّلة بحثًا عن الطعام؛ إذ يُعزى انهيار عدة مجتمعاتٍ قديمة في عهد الهولوسين إلى حدوث تحولاتٍ مفاجئة في المُناخ المداري خلال تلك الفترة.

ربَط البعض بين الزيادة السكانية وزيادة تدفقات الطاقة بسبب الزراعة، وزيادة كمية المواد الداخلة إلى المجتمعات والنفايات الناتجة منها. وصحيح أنَّ الآثار البيئية الناتجة بدأَت في وقتٍ مبكر من عهد الهولوسين، لكن حجم هذه الآثار ما زال محل جدلٍ شديد. إذ بدأ الري منذ حوالي ٨ آلاف عام في مصر وبلاد الرافدَين، بتحويل مياه الفيضانات من نهر النيل ونهرَي دجلة والفرات. وقد أدى هذا إلى ترسُّب بعض الملح والطمي على اليابسة؛ مما أدَّى إلى انخفاض غلة المحاصيل، وحفَّز تحوُّل المحاصيل الزراعية من القمح إلى الشعير الأكثر تحملًا للملوحة. كان المصريون والبابليون والرومان يُخصبون الأراضي الزراعية باستخدام المعادن أو السماد، ويُفترض أنَّ هذا أسفَر عن تأثيراتٍ غير مباشرة في المياه العذبة المجاورة. وقد علَّق أفلاطون على تآكل التربة، مُشبِّهًا الأرض بـ «هيكل عظمي لرجلٍ مريض، تلاشى من عليه كل اللحم السمين واللَّيِّن، ولم يَتبقَّ سوى هيكل اليابسة العاري». ولكن هل أثَّر بدء الزراعة تأثيرًا عالميَّ النطاق في نظام الأرض؟

فرضية بدايات عهد الأنثروبوسين

يدَّعي بيل روديمان أنَّ عهد الأنثروبوسين بدأ منذ آلاف السنين نتيجةً لثورة العصر الحجري الحديث. ومن المؤكَّد أنَّ التوسُّع السكاني الذي صاحَب ذلك أدى إلى إزالة الغابات من أجل إنشاء أراضٍ زراعية وتوفير احتياجات السكان من الطاقة القائمة على الكتلة الحيوية والأخشاب. وأسفرَت إزالة الغابات بدَورها عن تقليل سعة تخزين الكربون في اليابسة، مما أدى إلى نقل ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي. ويؤكِّد روديمان أنَّ هذا التأثير كان كبيرًا جدًّا لدرجة أنَّ حجم مصدر ثاني أكسيد الكربون هذا ظلَّ كافيًا، منذ ٨ آلاف عام فصاعدًا، ليفوق ما يُفترض أنه كان انخفاضًا طبيعيًّا في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغِلاف الجوي. وفوق ذلك، فمنذ ٥ آلاف عام فصاعدًا، أنتَج ريُّ حقول الأرز مصدرًا من الميثان يفوق حجمُه حجمَ انخفاضٍ متوقَّع في غاز الميثان الموجود في الغِلاف الجوي، حسبما يقول روديمان.

واستخدَم باحثون آخرون بعض نماذج نظام الأرض لإظهار أنَّ بعض التغيرات الطبيعية في المُناخ ودورة الكربون يمكن أن تفسِّر معظم التغيُّرات في مستويات ثاني أكسيد الكربون والميثان في الغِلاف الجوي خلال عهد الهولوسين. فعلى سبيل المثال، تعني بعض التباينات في مدار كوكب الأرض أنَّ نصف الكرة الشمالي قبل ٦ آلاف عام كان أدفأ مما هو عليه في الوقت الحاضر، وبذلك ساعد على زيادة مساحة الغطاء

النباتي، سواء في المناطق الشمالية أو عَبْر معظم شمال أفريقيا، مؤديًا إلى ما يُعرَف باسم «اخضرار الصحراء الكبرى». يساعد هذا في تفسير انخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي بعض الشيء في أوائل عهد الهولوسين. ومع انخفاض تأثير التغيرات المدارية على المُناخ بوتيرةٍ ثابتة، تعرَّضَت منطقة الصحراء الكبرى لجفاف وتوسُّع مفاجئَين نسبيًّا، منذ حوالي ٥٠٠٠ عام. وتتنبأ النماذج بأنَّ ذلك نتج من التنقل بين حالاتٍ مستقرة متبادَلة من نظام المُناخ-الغطاء النباتي في شمال أفريقيا. أدَّى «تدهوُر الغطاء النباتي في الصحراء الكبرى»، مع انحسار رقعة الغابات الشمالية عن دوائر العرض الشمالية العليا، إلى إضافة كميات من ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي.

على مرِّ الألفَي سنة الماضية، تحسَّنَت سِجلاتنا الخاصة بتغيُّر المناخ في الماضي بوجود العديد من البيانات البديلة المتعلقة بتغيُّر المناخ، ومنها سِجلات حلقات الأشجار والعيِّنات الجليدية الجوفية الأسطوانية ودرجات الحرارة المَقِيسة من آبار عميقة. تَكشِف هذه السجلات عن تقلباتٍ بطيئة بين فتراتٍ أدفأ وفتراتٍ أبرد بعض الشيء على سطح اليابسة في نصف الكرة الشمالي، بما فيها الفترة القروسطية الدافئة (٩٥٠–١٢٥٠م تقريبًا) والعصر الجليدي الصغير (١٥٥٠–١٨٥٠م تقريبًا). ترتبط فترات المُناخ الأبرد بقِلَّة الإنتاج الزراعي، والحروب، وانخفاض عدد السكان، ولكن لا يُوجد إجماع على أيٍّ من العلاقات السببية، وكلها محل جدل. إذ تَكشِف بعض سِجلات العيِّنات الجليدية الجوفية الأسطوانية عن تباينات في تركيب الغِلاف الجوي، من بينها انخفاض بمقدار ١٠ أجزاء في المليون في تركيز ثاني أكسيد الكربون قبل ٥٠٠ عام، بالإضافة إلى أنَّ ذلك الوقت شَهِد انخفاض معدَّلات حرق البشر للكتلة الحيوية كذلك. ويدَّعي بيل روديمان أنَّ هذا كان بسبب انخفاض عدد السكان الذي نجَم عن الطاعون وسمَح لمناطقَ كبيرة بأن تكتسي بالغابات مجددًا وتمتص الكربون. غير أنَّ فرضيته بخصوص «بدايات الأنثروبوسين» ما زالت محل جدل، وأحد أسباب ذلك أنَّ المجتمعات قبل الثورة الصناعية كان لديها قَدْر محدود من إمدادات الطاقة التي كان يمكن أن تُغيِّر بها بيئتها.

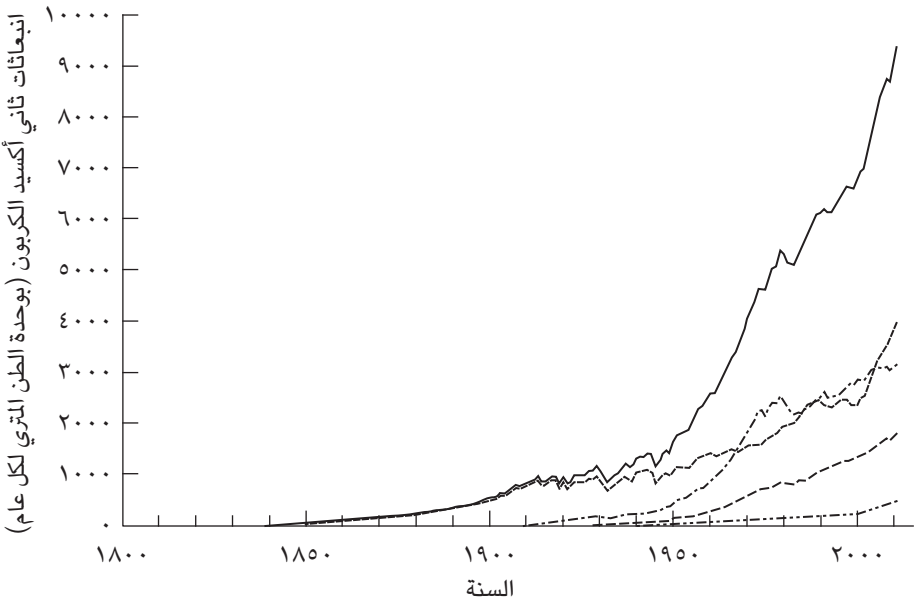
مواد الوقود الأحفوري

يربط معظم الباحثين بين بداية عهد الأنثروبوسين والثورة الصناعية؛ لأنَّ إمكانية الحصول على طاقة الوقود الأحفوري عزَّزت تأثير البشرية على نظام الأرض تعزيزًا كبيرًا. وتُميز الثورة الصناعية الانتقال من مجتمعات تستمد قَدرًا كبيرًا من طاقتها من الطاقة الشمسية

الحديثة (عَبْر الكتلة الحيوية والمياه والرياح) إلى مجتمعات تستمد طاقتها من «ضوء الشمس القديم» المُركَّز. ومع أنَّ الفحم كان يُستخدم بكمياتٍ صغيرة طوال آلاف السنين، لصناعة الحديد في الصين القديمة مثلًا، لم تبدأ الانطلاقة الحقيقية في استخدام الوقود الأحفوري إلا مع اختراع المُحرِّك البخاري وتحسينه. إذ ابتكر توماس نيوكومن مُحرِّكًا بخاريًّا عاملًا في عام ١٧١٢، ثم أضفى عليه جيمس واط بعض التحسينات في عام ١٧٦٩، وهذا أسفَر عن زيادةٍ كبيرة في عمليات استخراج الفحم، بتجفيف المناجم من المياه. وقد استُخدم المُحرِّك البخاري أيضًا لتحويل طاقة الوقود الأحفوري إلى طاقةٍ ميكانيكية في أغراض التصنيع والنقل. وهذا أنشأ حلقةً من تغذيةٍ مرتدة موجبة قوية حفَّزَت الثورة الصناعية.

أدى استخدام طاقة الوقود الأحفوري المُركَّزة (شكل ٥-٢) إلى نُموٍّ هائل في عدد السكان، وزيادة في إنتاج الغذاء، واستهلاك المواد، والنفايات الناتجة المُصاحِبة لذلك. إذ تضاعَف عدد السكان بين عامَي ١٨٢٥ و١٩٢٧ من مليار إلى مليارَي نسمة، ثم تضاعَف مرةً أخرى بحلول عام ١٩٧٥ ليصل إلى أربعة مليارات، وهو في طريقه إلى التضاعف مرةً أخرى بحلول عام ٢٠٣٠ وصولًا إلى ثمانية مليارات. ومع اندلاع الثورة الصناعية، لم يعُد الغذاء والكتلة الحيوية المصدرَين الرئيسيَّين للطاقة التي تحصُل عليها المجتمعات البشرية. بل بالعكس، تبلغ الطاقة التي يتضمَّنها الإنتاج الغذائي السنوي، الذي يعيش عليه السكان في الوقت الحاضر، خمسين إكساجول (تُساوي الوحدة الواحدة من الإكساجول ١٨١٠ جول)؛ أي حوالي العُشر فقط من إجمالي دَخْل الطاقة التي تحصُل عليها المجتمعات البشرية، والبالغ ٥٠٠ إكساجول سنويًّا. وهذا بدَوره يُعادل حوالي عُشر الطاقة التي تستخلصُها عملية التمثيل الضوئي على مستوى العالم.

وتؤدي الزيادة المقابلة في التدفقات العالمية للمواد — التي يُعَد أكبرها هو تدفُّق ثاني أكسيد الكربون (شكل ٥-٢) — إلى الإخلال بنظام الأرض. فالبشر يتخلصون من النفايات الناتجة من تلك المواد على اليابسة وفي الغِلاف الجوي وفي المحيطات. وفي بعض حلقات تدوير العناصر، صارت أنشطتنا الإجمالية الآن تتجاوز أنشطة بقية مكوِّنات الغِلاف الحيوي مُجتمعة. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ جزءًا كبيرًا من هذه الزيادة في التأثير البشري على نظام الأرض حدث منذ نهاية الحرب العالمية الثانية؛ في مرحلةٍ انتقالية عُرِفَت باسم «التسارع الكبير». وتوضِّح الأقسام التالية بالتفصيل بعضًا من هذه التغييرات في تدفقات المواد والعواقب التي نتجَت منها.



شكل ٥-٢: زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة من استخدام البشر للوقود الأحفوري.

تغيرات في استخدام الأراضي ودورات المواد المغذية

من العوامل التي حفَّزَت زيادة إنتاج الغذاء، الذي يعيش عليه الآن أكثر من سبعة مليارات شخص، زيادةُ كمية مُدخلات الأراضي اليابسة والمواد المغذية ومبيدات الأعشاب وطاقة الوقود الأحفوري. فمن العناصر التي أسهَمت إسهامًا كبيرًا في إضافة المليارَين الثاني والثالث من سكان الأرض زيادة مساحة الأراضي الصالحة لزراعة المحاصيل، وذلك بفضل إحلال الجرَّارات محل الخيول، وزيادة مُعدَّلات الري، وإضافة مُبيدات الأعشاب. ثم أُضيف المليارات الرابع والخامس بفعل الزيادة الهائلة في مُدخلات المواد المُغذية المُخصِّبة إلى الأراضي الموجودة، واكتملا بفضلِ إضافة أنواعٍ قزمة من القمح والأرز نَمَت بالتغذي

على المُدخلات التي تحوي كميةً كبيرة من المواد المغذية. وبعد ذلك أُضيف المليارات السادس والسابع، وكان العامل الأبرز وراء ذلك حدوث زيادات في غلة المحاصيل في الدول النامية اعتمادًا على انتشار ابتكاراتٍ سابقة.

أدى توسُّع الزراعة وتكثيفها إلى تغيير وجه الأرض المرئي. إذ توسَّعَت الأراضي الصالحة لزراعة المحاصيل من حوالي ٠٫٥ مليار هكتار في عام ١٨٦٠ إلى ما يقرُب من ١٫٤ مليار هكتار في عام ١٩٦٠. ومنذ ذلك الحين، لم تشهد مساحة الأراضي الصالحة للزراعة سوى تغيير طفيف، لكنَّ زيادة استهلاك اللحوم في النظام الغذائي البشري في المتوسط أدت إلى توسُّع المراعي لتصل مساحتُها حاليًّا إلى أكثر من ثلاثة مليارات هكتار؛ وكان هذا أحد المُسبِّبات العديدة لإزالة الغابات المدارية بوتيرةٍ سريعة.

وكذلك أحدَث تكثيف الزراعة تحولًا في دورة المواد المغذية العالمية. إذ تُستخدم طاقة الوقود الأحفوري لتفكيك الرابطة الثلاثية بين ذرتَي جُزيء النيتروجين وصُنع الأسمدة النيتروجينية، وتعدين السماد الفوسفوري وتكريره. وهذا أدى إلى زيادة مُدخلات النيتروجين المُتاح إلى الغِلاف الحيوي إلى الضعف تقريبًا وزيادة مُدخلات الفوسفور ثلاث مرات تقريبًا. وعلى الرغم من أنَّ هذه «الثورة الخضراء» ساعدَت في حماية النُّظم الإيكولوجية الأرضية من استخدام المِحراث، أسفرَت عن عواقبَ سلبية أخرى. إذ تستقر كميةٌ كبيرة من النيتروجين والفوسفور اللذين نُضيفهما في نهاية المطاف داخل المياه العذبة، حيث يُغذيان الإنتاجية الحيوية (أو عملية التخثث) بالطاقة، فيصلان بها أحيانًا إلى حدٍّ أنَّ البكتيريا الزرقاء القديمة تخنق أشكال الحياة الأحدث، فيما تُصبح المياه خالية من الأكسجين وتقتل الأسماك وحيوانات أخرى. فبعض النيتروجين والفوسفور المضاف يصل إلى البحار الساحلية ثم المحيطات المفتوحة في نهاية المطاف، وهو ما يدفع تلك المياه إلى أن تُصبح خالية من الأكسجين.

وكذلك فإنَّ جزءًا ضئيلًا من النيتروجين الذي يُخلِّقه البشر ويضيفونه إلى التُّرَب الزراعية يتحول إلى غاز أكسيد النيتروز الذي يُعَد أحد غازات الدفيئة الطويلة العمر، بفعل عمليتَي النترتة ونزع النيتروجين الميكروبيتَين القديمتَين. وقد أدى ذلك إلى زيادة تركيز أكسيد النيتروز في الغلاف الجوي من ٢٧٢ إلى ٣١٠ أجزاء في المليار. وفوق ذلك، أسفَر التوسُّع في الزراعة عن زيادة انبعاثات غاز الميثان إلى الغِلاف الجوي، وخصوصًا من حيوانات الماشية المجترَّة وحقول الأرز. وأدَّت الأنشطة البشرية، مع تسرُّبات الغاز الطبيعي أثناء استخراجه ونقله واستخدامه والانبعاثات الصادرة من مَكبَّات النُّفايات

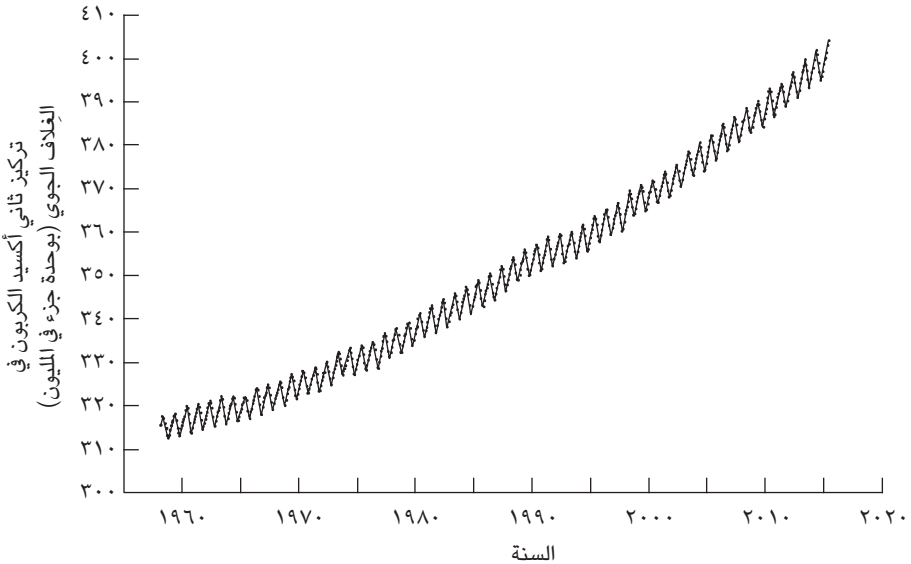
والحرائق وعمليات معالجة النُّفايات، إلى زيادة تركيز الميثان في الغِلاف الجوي إلى أكثر من الضعف، ليرتفع من حوالَي ٨٠٠ جزء في المليار إلى حوالَي ١٨٠٠ جزء في المليار حاليًّا.

تغيُّر دورة الكربون

قبل الثورة الصناعية، كانت التدفقات الهائلة من تبادُل ثاني أكسيد الكربون بين الغِلاف الجوي والمحيطات، وبين الغِلاف الجوي واليابسة، شبه متوازنة. ومنذ ذلك الحين، أدت انبعاثاتُ ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق مواد الوقود الأحفوري (شكل ٥-٢) وتغيُّر استخدام الأراضي إلى زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي من ٢٨٠ جزءًا في المليون إلى حوالَي ٤٠٠ جزء في المليون حاليًّا. وبحلول الوقت الذي بدأ فيه ديف كيلينج يقيس تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي في عام ١٩٥٨، كان قد ارتفع بالفعل إلى ٣١٥ جزءًا في المليون. وكشَف «مُنحنى كيلينج» (شكل ٥-٣) عن زيادةٍ متسارعة في تركيز ثاني أكسيد الكربون منذ ذلك الحين. لكنَّ تركيز ثاني أكسيد الكربون لا يرتفع بنفس سرعة وتيرة إضافته إلى الغِلاف الجوي. وذلك لأنَّ «مصارف الكربون» الموجودة في المحيطات وعلى اليابسة تمتص حوالي نصف ثاني أكسيد الكربون المضاف سنويًّا.

هذا وتُوجد مصارف الكربون المحيطية لأنَّ غاز ثاني أكسيد الكربون يذوب في مياه البحر ثم يتفاعل معها. فإضافة كمية زائدة من ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي تُجبِر جزءًا منها على الذوبان في أسطح المحيطات. ويكون تبادُل الغاز عَبْر سطح البحر سريعًا نسبيًّا، ولكن بعد ذلك يتفاعل ثاني أكسيد الكربون المذاب بوتيرة أبطأ مع مياه البحر. ومن المعروف أنَّ إضافة مادةٍ متفاعلة إلى أحد جانبَي تفاعلٍ كيميائي دائمًا ما تدفع التفاعل إلى الجانب الآخر، إلى أن يتحقق توازنٌ جديد؛ ولذا يتحول ثاني أكسيد الكربون إلى كربون غير عضوي مُذاب. وفي الواقع، تحدُث سلسلة من التفاعلات، وعند الاتزان يكون المُستقَر المُفضَّل لمعظم الكربون أن يكون مذابًا في الماء، لا أن يكون غاز ثاني أكسيد كربون في الغِلاف الجوي. غير أنَّ طبقة المحيط السطحية المختلطة جيدًا تتسم بحجم صغير نسبيًّا؛ لذا فإنَّ معدل امتصاص المحيط للكربون محدود بسبب التبادل البطيء نسبيًّا بين المياه السطحية وأعماق المحيط التي تُمثِّل الجزء الأكبر منه.

أمَّا مصارف الكربون على اليابسة، فتُوجد لأنَّ تلك النُّظم الإيكولوجية التي لم تتعرَّض للإزالة أو الإخلاء من أجل الزراعة — خصوصًا الغابات — تُراكِم الكربون في الغطاء النباتي الحي والتُّرَب. وأحد الأسباب الرئيسية وراء ذلك أنَّ زيادة ثاني أكسيد



شكل ٥-٣: «مُنحنى كيلينج» المُعبِّر عن قياسات تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي من مرصد مونا لوا في هاواي.

الكربون في الغِلاف الجوي تُخصِّب عملية التمثيل الضوئي؛ أي تُعزِّز كفاءة امتصاص النباتات للكربون. وهذا بسبب وجود تنافُس بين جُزيئات ثاني أكسيد الكربون والأكسجين الجزيئي على المواقع النشطة لدى إنزيم «روبيسكو» الذي يعمل على تثبيت الكربون؛ لذا تؤدي زيادة نسبة ثاني أكسيد الكربون/الأكسجين الجزيئي إلى زيادة كمية ثاني أكسيد الكربون التي تُثبَّت. وبالإضافة إلى هذا «التخصيب القائم على ثاني أكسيد الكربون»، تُخصَّب بعض النُّظم الإيكولوجية بفعل موادَّ مغذية يضيفها البشر إليها، وغالبًا ما تكون تلك المواد محمولة في الغِلاف الجوي على شكل غازات. وفضلًا عن ذلك، فحيثما تُهجر الأراضي الزراعية، تميل بعض النُّظم الإيكولوجية الطبيعية إلى أن تنمو مجددًا وتُراكِم الكربون من الغِلاف الجوي.

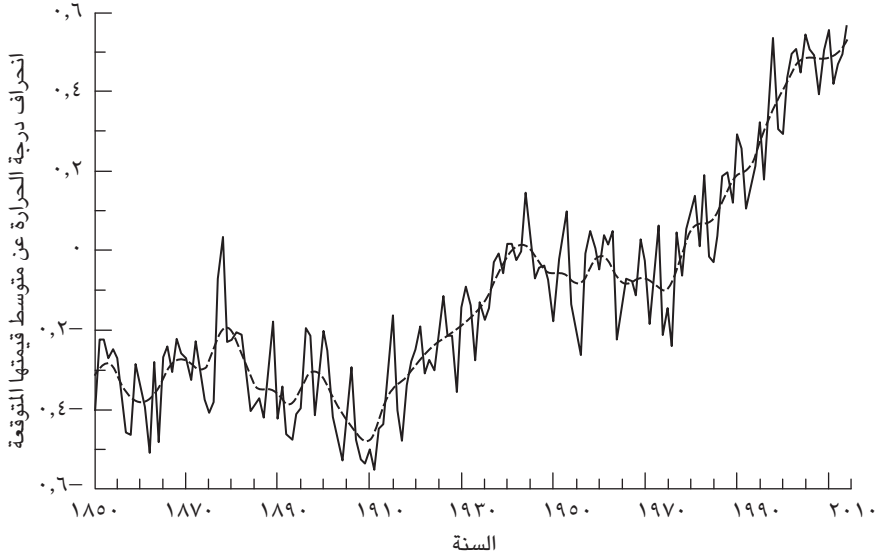
تُخفي التقلبات في مُنحنى كيلينج ثروةً قيِّمة من المعلومات الإضافية. فهي تكشف معلومات عن مصارف الكربون التي تُوجد على اليابسة بالأخص، والتي تُعَد أكثر تباينًا

بكثير من مصارفه المحيطية من سنة إلى أخرى. يُظهِر المُنحنى الزيادة العامة الإجمالية في ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي مرسومًا فوقها دورةٌ سنوية تُمثِّل «التنفس» الموسمي للغِلاف الحيوي الأرضي؛ إذ ينخفض ثاني أكسيد الكربون في فصلَي الربيع والصيف في المناطق الشمالية بينما تمتص النباتات الموجودة في نصف الكرة الشمالي الكربون، ويُعاوِد الارتفاع في فصلَي الخريف والشتاء بينما تَزفِر النُّظم الإيكولوجية نفسها ثاني أكسيد الكربون. غير أنَّ حجم هذا التذبذب وشكله يتباينان من سنة إلى أخرى. فبعد ثَوَران بركان جبل بيناتوبو في عام ١٩٩١، ارتفع ثاني أكسيد الكربون بوتيرة أبطأ؛ لأن التبريد الناتج عزَّز كفاءة مصارف الكربون على اليابسة. أمَّا بعد ظاهرة النينيو القوية في عام ١٩٩٨، ارتفع ثاني أكسيد الكربون بوتيرة أسرع؛ لأنَّ ارتفاع درجات الحرارة في ذلك العام والحرائق المصاحبة له أدَّت إلى إزالة مصرف الكربون الموجود على اليابسة.

هذا وتُوجد تغذياتٌ مرتدة موجبة بين تغيُّر المناخ ودورة الكربون (كما ورَد في الفصل الثالث)؛ فمع ارتفاع درجة الحرارة، تقل كفاءة مصرف الكربون الموجود على اليابسة. وهذا ينطبق على مصرفه المحيطي أيضًا؛ لأنَّ الاحترار يجعل ثاني أكسيد الكربون أقل قابليةً للذوبان. وفوق ذلك، يُسفِر امتصاص المحيطات لثاني أكسيد الكربون عن تحمُّضها، وهو ما يُقلل من كفاءتها في تخزين الكربون (بإزاحة اتزان التفاعلات مع مياه البحر نحو الصورة الغازية من ثاني أكسيد الكربون). ولكن في المُجمَل، تتفوق التغذية المرتدة السالبة في دورة الكربون، وتؤدي إلى إبطاء وتيرة ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي. ولولا مصارف الكربون الموجودة في اليابسة والمحيطات، لأصبح تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي أعلى من ٥٠٠ جزء في المليون بالفعل، وكان المناخ سيشهد تغيرًا أكبر.

تغيُّر المناخ

تُعَد نظرية تأثير الاحتباس الحراري من النظريات الفيزيائية التي يعود تاريخها إلى العصر الفيكتوري. ففي وقتٍ مبكر يرجع إلى عام ١٨٩٦، قدَّر سوانتي أرينيوس ببعض الحسابات أنَّ ازدياد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي عن مستوياته قبل الثورة الصناعية إلى الضِّعف قد يرفع درجة حرارة العالم بحوالَي ٥ درجاتٍ مئوية. وما زال هذا الحساب اليدوي الشاق، الذي استغرَق منه عامَين كاملَين، واقعًا ضمن نطاق تقديرات «حساسية المُناخ» المبنية على أحدث نماذج نظام الأرض. ويبلغ أدق تقدير حالي ٣ درجاتٍ مئوية تقريبًا.



شكل ٥-٤: سِجل متوسط درجات الحرارة العالمية المقاسة بمُعَدات. يُظهِر شكل بيانات قاعدة بيانات «هادكرات٤» على هيئة انحرافات عن متوسط درجة الحرارة المتوقعة في الفترة الواقعة بين عامَي ١٩٦١ و١٩٩٠: متوسط سنوي (الخط المتصل)، متوسط الانحرافات عَبْر عشر سنوات متواصلة (الخط المتقطع).

وبحلول نهاية القرن التاسع عشر، كان بعض العلماء عاكفين باستمرار على إجراء قياسات لدرجات الحرارة بأجهزةٍ محمولة على متن السُّفن أيضًا. وهذه القياسات، مع قراءات مقاييس الحرارة المأخوذة من محطات أرصادٍ مناخية أرضية، مكَّنَت علماء المناخ من تجميع ما يُسمَّى «سِجل درجات الحرارة المقاسة بمُعَدات» (شكل ٥-٤). ويُظهِر السجِل حدوث ارتفاعٍ عالمي في درجات الحرارة من عام ١٨٨٠ إلى عام ٢٠١٢ بمقدار ٠,٨٥ درجة مئوية تقريبًا، منها ٠,٥ درجة مئوية حدثَت بعد عام ١٩٨٠. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ نطاق الارتفاع في درجات الحرارة عالَمي (في حين أنَّ نطاق الحِقبة القروسطية الدافئة والعصر الجليدي الصغير كان إقليميًّا فقط). غير أنَّ الارتفاع العالمي في درجات الحرارة لم يحدُث بوتيرة ثابتة؛ إذ شهدَت بعضُ الفترات استقرار درجات الحرارة (مثل فترة الأربعينيات والخمسينيات من القرن العشرين) فيما شهِد البعض الآخر ارتفاعًا

أسرع (مثل فترة الثمانينيات والتسعينيات من القرن العشرين). وهذا متوقَّع بسبب وجود تقلبات طبيعية في المُناخ، حتى في غياب الأنشطة البشرية، ما يُسفِر عن نوباتٍ أدفأ وأخرى أبرد؛ وعندما تُمثَّل هذه النوبات على منحنًى تصاعدي، فسوف تُعطي فترات من عدم الاحترار وفترات من الاحترار السريع.

ومن العوامل التي يمكن أن تُخفِّض حرارة المُناخ حقنُ جُزيئات هَباء الكبريتات العاكسة الدقيقة في الغِلاف الجوي؛ فهي تُشتِّت ضوء الشمس (مُعيدةً جزءًا منه إلى الفضاء). ويمكن أن تأتي جزيئات هباء الكبريتات من الثورانات البركانية (مثل ثوران بركان جبل بيناتوبو في عام ١٩٩١)، أو من حرق الوقود الأحفوري، وخاصةً احتراق الفحم الكبريتي (البني). ولكن عندما تدخُل الكبريتات محلولًا، تكوِّن حمض الكبريتيك، والمطر الحمضي بالتبعية. ومن أجل الحد من الأمطار الحمضية، بُذلَت جهودٌ ناجحة لإزالة ثاني أكسيد الكبريت من غازات مداخن محطات توليد الكهرباء. وهذا بدَوره قلَّل من تأثيرها التبريدي على المُناخ، مُزيحًا النقاب عن تأثير الاحتباس الحراري المتزايد، ومُسهِمًا في زيادة الاحترار العالمي.

كوكب بشري

تطوَّر نوعنا وسط مُناخٍ غير مستقر على الإطلاق، فانتشر في كل أنحاء العالم، وزرَع أول المحاصيل، وربَّى أول حيوانات الماشية. ففي ظل الاستقرار النسبي الذي يتسم به عهد الهولوسين بين الجليدي الحالي، بدأَت الزراعة تسحب البساط من تحت أقدام الصيد وجمع الثمار لتُصبح أسلوبَ حياة بدلًا منهما، وظهرَت أولى المدن المستقلة ذات السيادة. وهكذا بدأ البشر يغيِّرون سطح الأرض، وبالتبعية دورة الكربون، والمناخ، وغيرهما من الدورات البيوجيوكيميائية. وعلى الصعيد المحلي، بدأَت الحضارات تستنفد الموارد الطبيعية حتى أقصى حدٍّ ممكن، وكان مصيرها في بعض الأحيان محكومًا بالتغيرات الطبيعية في المُناخ. وعند وقتٍ ما — غير مؤكَّد بالضبط — بدأ البشر يغيِّرون نظام الأرض كله. ومع اندلاع الثورة الصناعية، تسارعَت عملية إعادة تشكيل نظام الأرض بفعل البشر. وفي خِضَم «التفاؤل التكنولوجي» الذي شهدَته خمسينيات القرن الماضي، حدَث «تسارعٌ كبير» آخر. لكنَّ هذا التفاؤل انبثق منه سباق الفضاء وبداية إدراك الجمال المحدود لكوكبنا الذي نسكنه. والآن، صار البشر هُم المؤثِّرين المُهيمِنين في دورات الفوسفور والنيتروجين والكربون البيوجيوكيميائية. فنحن نغيِّر المناخ، ونتسبَّب في تسريع معدَّلات التعرية على

اليابسة والترسب في المحيطات بدرجةٍ هائلة، وتحميض المحيطات وإزالة الأكسجين منها، وإهلاك أنواع أخرى من الكائنات بمُعدلٍ غير مسبوق. ومن ثَم، يتناول الفصل السادس الوجهة التي يقودنا إليها هذا المسار.

الفصل السادس

التوقع

إلى أين يتجه نظام الأرض في عهد الأنثروبوسين؟ إنَّ مجرد الشروع في إجابة هذا السؤال يتطلَّب نموذجًا لكيفية سير نظام الأرض، وتعتمد الإجابة على أنشطتنا الجماعية التي نُمارِسها بصفتنا نوعًا بشريًّا، وكيفية تأثُّر نظام الأرض بها. ودَور النموذج هو التنبؤ بنتائج الافتراضات المختلفة بخصوص الأنشطة البشرية المستقبلية. وفي هذا الصدد، يقدِّم هذا الفصل بعضًا من «نماذج نظام الأرض» وبعض الافتراضات الحاسمة التي تبدأ استخدام هذه النماذج للتنبؤ بالمستقبل. ويعرض موجزًا بتنبؤاتها، منتقلًا من نطاقاتٍ زمنية أقصر إلى أخرى أطول، ومن التحدِّي المتمثل في التنبؤ بتغيُّر المناخ بصفةٍ خاصة إلى التحدي الأوسع المتمثل في استكشاف التغيرات العالمية الأخرى بصفةٍ عامة.

نماذج نظام الأرض

يُعَد نموذج نظام الأرض تمثيلًا لنظام سطح الأرض في برنامج كمبيوتر. ومثل كل الأنظمة، يجب تعيين حدود النموذج بدقة. في الجيل الحالي من النماذج، يجري التعامل مع الأنشطة البشرية على أنها مُدخلات إلى النموذج، كما لو كانت تأتي له من الخارج، مع أننا نعيش داخل نظام الأرض بالتأكيد. ويُمثِّل النموذج العناصرَ غير البشرية في نظام الأرض، بما فيها الغِلاف الجوي والمحيطات وسطح اليابسة والغِلاف الحيوي البحري والغِلاف الحيوي الأرضي، والتفاعلات الجارية بينها، بما فيها دورة الكربون (القصيرة الأمد).

وتجدر الإشارة إلى أنَّ أشد نماذج نظام الأرض تعقيدًا كانت مجرَّد نماذج للتنبؤ بالطقس في بداياتها. لكنها تحوَّلَت، على مرِّ العقود القليلة الماضية، من نماذجَ خاصة بالغِلاف الجوي إلى نماذج تُمثِّل نظام الأرض، وذلك بإضافة مكوِّنات أخرى باستمرار؛

مما أدى إلى توسيع النظام محل الدراسة توسيعًا فعَّالًا. وكلما أُضيف مكوِّنٌ جديد، تُقدَّم مجموعةٌ جديدة من التغذيات المرتدة، ولا تظل النتائج ثابتةً دائمًا. والجدير بالذكر أنَّ تنبؤات أول النماذج التي ربطَت بين الديناميكيات البطيئة (والسعة الحرارية الكبيرة) لدى المحيطات والديناميكات السريعة لدى الغِلاف الجوي عادةً ما كانت تنحرف بعيدًا تمامًا عن الحالة المُناخية الحالية، وكان يتعيَّن تقريبُها مجددًا من البيانات المرصودة بتدخلٍ بشري عن طريق ما يُسمَّى «تصحيح التدفق»، وهذه المشكلة لم تُحَل إلا في التسعينيات.

ما يُميِّز نماذج «نظام الأرض» حاليًّا هو القدرة على ترجمة الأنشطة البشرية، كانبعاثات غازات الدفيئة وجُسيمات الهَباء الجوي، إلى التأثيرات المُناخية الناتجة منها. وقد نُشرَت أوائل النماذج التي استطاعت تحقيق ذلك في عام ٢٠٠٠ تقريبًا، وكانت تتضمَّن دورة كربون عالمية تفاعلية استطاعت حسابَ تأثير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، بما في ذلك تبادُل ثاني أكسيد الكربون مع المحيطات وبعض النظم الإيكولوجية الموجودة على اليابسة. وبعد ذلك، تضمَّنَت بعضُ النماذج تأثيرات انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت على تكوين جُسيمات هَباء الكبريتات، وعلى خصائص السُّحب والمُناخ بالتبعية. وكذلك تتضمن أحدثُ النماذج التأثيراتِ الواقعة على المُناخ بسبب التغيرات الحادثة في استخدام البشر للأراضي.

اختبار النماذج

يتمثَّل أحد الاختبارات الرئيسية التي تمرُّ بها نماذجُ نظام الأرض في اختبار مدى قدرتها على إنشاء تغيرات تُحاكي تغيراتٍ مناخية مرصودة بالفعل. وعادةً ما يتضمَّن هذا الاختبار تزويد نموذج بعوامل طبيعية وبشرية معروفة مُسبِّبة لتغيرات المُناخ على مرِّ الأعوام المائة والخمسين الماضية، التي يتوافر لدينا سِجل رَصْدي لحالة المُناخ فيها. وقد أظهر هذا أنَّ إعادة إنشاء سِجل درجات الحرارة المقاسة بالمُعَدات (شكل ٥-٤) تستلزم إدراج كلٍّ من العوامل المُغيِّرة الطبيعية والبشرية المنشأ. فالعوامل الطبيعية وحدها لا يُمكن أن تُسفِر عن الاحترار الملحوظ خلال نصف القرن الماضي، بل تؤدي في الواقع إلى انخفاضٍ طفيف متوقَّع في درجات الحرارة.

وصحيحٌ أنَّ العوامل البشرية المنشأ هي المسئولة عن توجُّه درجات الحرارة نحو الارتفاع في المُجمَل، لكنها لا تستطيع تفسير بعض التقلبات التي تُوجد في سِجل درجات الحرارة، والتي ترجع إلى عواملَ طبيعية. فأحد هذه التقلبات هو تباطؤ احترار الغِلاف

الجوي على مَرِّ الأعوام الخمسة عشر الماضية، الذي يرجع إلى زيادة قدرة المحيطات على امتصاص الحرارة. وفي الواقع، تذهب معظم الحرارة المحبوسة بفعل ازدياد تأثير الدفيئة إلى المحيطات، التي تتسم بسَعةٍ أكبر لتخزين الحرارة مقارنةً بالغِلاف الجوي. لذا لا عجب في أنَّ التقلبات الحادثة في سَعة تخزين الحرارة لدى المحيطات تؤثِّر في درجة حرارة الغِلاف الجوي.

وإذا أُدرجَت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في نماذج نظام الأرض باعتبارها أحد المُدخلات، تتنبأ النماذج بالارتفاع التاريخي في تركيزات ثاني أكسيد الكربون تنبؤًا معقولًا. ومن الاختبارات المهمة الأخرى التي تمرُّ بها النماذج اختبارُ مدى قدرتها على تمثيل التغيرات المناخية السابقة التي حدثَت قبل السجِل الرصدي. غير أنَّ تشغيل النماذج المتقدمة مُكلف جدًّا لدرجة أنَّ مثل هذه الاختبارات محدودةٌ بعض الشيء. وإحدى المسائل التي تُواجِه فيها النماذج صعوبةً كبيرة هي تمثيل التغيرات المُناخية المفاجئة التي حدثَت في الماضي.

طيف من النماذج

أدَّت الرغبة في فهم التغيرات العالمية الماضية والمستقبلية إلى توليد طيف من نماذج نظام الأرض المتفاوتة التعقيد. وتُركِّز النماذج الأكثر تعقيدًا — التي نُوقشَت للتو — على التحدي المتمثل في التنبؤ بتغير المُناخ على نطاقٍ زمني قصير نسبيًّا (أي قرن مثلًا). فهي تعرض الأرض في ثلاثة أبعاد بأعلى دقةٍ وضوحٍ مكانية تُتيحها أسرع أجهزة الكمبيوتر الفائقة، لكنها تستبعد العمليات الأطول أمدًا، مثل التفاعل مع قشرة الأرض. وقد صُمِّمَت نماذجُ «متوسطة التعقيد» لمحاكاة نطاقاتٍ زمنية أطول، من ألف إلى مليون سنة، وهذه يمكن أن تتضمن تجوية الصخور على القارَّات واستقرار الرواسب في المحيطات. تعرض هذه النماذج المحيطات والغِلاف الجوي بدقةٍ وضوحٍ مكانية أقل، وذلك عن طريق تبسيطها فيزيائيًّا وعرضها بأبعادٍ أقل؛ على سبيل المثال، تقوم بتمثيل المحيط كسلسلة من الشرائح الثنائية الأبعاد بالعُمق وخط العَرض. ثم تأتي النماذج البسيطة، وهذه تتسم بدرجة وضوح مكانية محدودة جدًّا تلتقط المتغيرات التراكمية، كمتوسط درجة حرارة السطح العالمية، ولكنها يُمكن أن تتضمَّن مزيدًا من أجزاء نظام الأرض. ويُمكن أن تخدم تلك النوعية من النماذج عدة أغراض؛ كأن تُحاكي نطاقاتٍ زمنية جيولوجية، أو تُشغَّل ملايين المرات لاستكشاف حساسية النتائج لافتراضاتٍ غير مؤكَّدة، أو تُشكِّل جزءًا من «نموذج تقييم متكامل».

يتمثل الهدف الأساسي لنماذج التقييم المتكاملة في استكشاف خيارات السياسة الهادفة إلى معالجة تغيُّر المُناخ. إذ تُركِّز على أن تربط تمثيلًا بسيطًا للاقتصاد، بما في ذلك الكيفية التي يولِّد بها انبعاثات الوقود الأحفوري حاليًّا، بنموذجٍ بسيط للنظام المُناخي، الذي يُسفِر بدوره عن تأثيراتٍ مرتدة على الاقتصاد. وعادةً ما يُتخيَّل وجود صانع قرار له صلاحيةُ تغيير السياسات، وليكُن بفرض ضريبة على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مثلًا. وبذلك يقدِّم النموذج تصورًا مناسبًا عن السياسة المُثلى في الوقت الحاضر وفي المستقبل، بعدما تُدرَج فيه افتراضاتُ واضع النموذج بخصوص تكاليف عدة مساراتِ عملٍ مختلفة وفوائدها. ولحل مثل هذه المشكلة الحسابية، يُفترض عادةً أنَّ صانع السياسة عاملٌ عقلاني لديه درايةٌ تامة بالعواقب المستقبلية لأفعاله (وإن كانت بعض النماذج تتضمن تأثير عدم اليقين بشأن المستقبل). هذا ويدور جدلٌ محتدم حول هذا النهج والافتراضات المُستخدَمة فيه. ولكن بالرغم من بساطة نماذج التقييم المتكاملة، فإنها تُمثِّل المحاولة الأولى لنمذجة البشر بصفتهم جزءًا تفاعليًّا من نظام الأرض.

توقُّع وليس تنبؤًا

يختلف توقُّع التغيرات المُناخية (أو أي تغيير عالمي آخر طويل الأمد) اختلافًا جذريًّا عن التنبؤ بحالة الطقس. فالتنبؤ بحالة الطقس يُعَد «مسألة ظروف ابتدائية»؛ بمعنى أنَّ حالة الطقس المستقبلية تعتمد أساسًا على حالته الحالية (والماضية)؛ ولذا يجب أن تُدرَج في النماذج بأعلى دقةٍ ممكنة. وحتى في تلك الحالة، يُمكن أن يكون الطقس شديد التأثر بالظروف الابتدائية لدرجة أنَّ اختلافاتٍ بسيطة قد تؤدي بسرعة إلى نتائجَ مختلفة تمامًا. يُعَد هذا مثالًا تقليديًّا لظاهرة «الفوضى الحتمية» التي وضَّحها إد لورنز لأول مرة بنموذجٍ بسيط عن الغِلاف الجوي مكوَّن من ثلاث معادلات في عام ١٩٦٣.

أمَّا المُناخ، فيُعرَّف بأنه متوسط حالة الطقس على مدًى طويل (عادةً ما يكون أطول من ثلاثين عامًا)، وهو ليس سريع التأثر بالظروف الابتدائية؛ لأن الأجزاء «البطيئة» بطبيعتها من نظام الأرض، كالمحيطات، هي فقط التي يُمكِن أن تظل محتفظةً بذكرى الظروف الابتدائية على مرِّ تلك الفترة الطويلة. وعلى عكس التنبؤ بالطقس، فالتنبؤ بالمُناخ ليس مجرد «مسألة ظروفٍ حدية»؛ بمعنى أنه يعتمد على عوامل كمدار كوكب الأرض ومستويات غازات الدفيئة المختلفة وجُسيمات الهَباء الجوي في الغِلاف الجوي. وفي النطاقات الزمنية المتوسطة، التي تتراوح من موسمية إلى عَقدية، تُعَد «ذكرى» الظروف

الابتدائية التي تحملها المحيطات بالأخص مهمةً لإجراء تنبؤات دقيقة. ومن ثَم، خُصصَت جهودٌ كبرى مؤخرًا لبدء تنبؤات بحالة المُناخ على مرِّ عقدٍ كامل استنادًا إلى أرصاد حالة المحيطات الحالية.

وكلما حاولنا التنبؤ بتغير المُناخ لفترةٍ أطول في المستقبل، ازداد اعتماد التنبؤ على مسار عوامل التأثير الرئيسية كانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. والمشكلة الأساسية في هذه العوامل المتأثرة بأنشطة البشر أنها لم تُحدَّد بعد. فلا أحد يدَّعي أنه يستطيع «التنبؤ» بالكيفية التي ستتطور بها المجتمعات المستقبلية على مرِّ نطاقٍ زمني مقداره قرن. بل كل ما نستطيع فعله هو أن نقترح مجموعةً من التصورات عن الكيفية التي ربما قد تتطور بها المجتمعات وانبعاثاتها، ونستخدمها مُدخلاتٍ — أي «سيناريوهات تأثير» — إلى نماذج نظام الأرض. لهذا فمن الأحرى أن نصِف مُخرجات النماذج بأنها «توقعات» لتغيُّر المناخ — تعتمد على افتراضاتها المُدَّعاة — وليست «تنبؤات».

السيناريوهات

يُعَد السيناريو الافتراضي بخصوص المستقبل استنباطًا للوضع المستقبلي بناءً على أنَّ الوضع الحالي سيستمر كما هو؛ مما يعني ضمنيًّا أنَّ معدلات استهلاك الوقود الأحفوري ستُواصِل الازدياد. تبلغ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون حاليًّا حوالي عشرة مليارات طن من الكربون سنويًّا (شكل ٥-٢). وقد بلغ متوسط زيادتها على مرِّ الأعوام الثلاثين الماضية ٢ في المائة سنويًّا، لكنه اقترب من ٣ في المائة سنويًّا على مرِّ العَقد الماضي؛ على الرغم من الركود العالمي. وإذا ظلت مُعدَّلات الزيادة تتراوح بين ٢ و٣ في المائة سنويًّا، فسيؤدي ذلك إلى مضاعفة الانبعاثات في غضون فترة تتراوح بين ٢٥ و٣٥ عامًا أخرى؛ أي بحلول منتصف القرن الحالي. غير أنَّ هذه الزيادة الأُسِّية تُسفِر عن أرقامٍ عالية إلى حدٍّ غير معقول إذا استنبطنا منها حجم الانبعاثات بحلول نهاية القرن بافتراض أنها ستستمر كما هي. وصحيح أنها محكومة في النهاية بأنَّ الوقود الأحفوري موردٌ محدود بلا شك. غير أنَّ السيناريوهات التي تفترض استمرار الوضع الحالي كما هو عادةً ما تتوقع زيادةَ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بحوالي ثلاث مرات بحلول نهاية هذا القرن. وتتنبأ نماذجُ نظام الأرض بأنَّ هذا سيرفع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي فوق ١٠٠٠ جزء في المليون، بعدما كان تركيزه قبل الثورة الصناعية ٢٨٠ جزءًا في المليون.

ويفترض سيناريو مختلف تمامًا أننا سنبذل جهدًا جماعيًّا وحاسمًا لإيقاف تصاعُد انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ثم تقليلها، وهذا يُعد واحدًا من سيناريوهات «التخفيف القوي». تُبتكر مثل هذه السيناريوهات لتوضِّح المنافع التي يُمكِن اكتسابُها باتخاذ إجراءاتٍ فعلية حاسمة لمعالجة تغيُّر المناخ، وغالبًا ما يكمن وراءها هدفٌ معيَّن، مثل الحد من الاحترار العالمي وإيقافه عند أقل من درجتَين مئويتَين. لكنها مع الأسف سرعان ما تُصبح غير متماشية مع العصر الحاضر؛ لأنَّ الانبعاثات الفعلية تشهد زيادةً أُسية. وعادةً ما تُظهِر سيناريوهات التخفيف القوي أنَّ الانبعاثات العالمية ستنخفض إلى أقل من نصف مستواها الحالي بحلول منتصف القرن، ثم تُواصل الانخفاض نحو الصفر.

من الدروس المستفادة المهمة من نماذج نظام الأرض أنَّ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون يجب أن تنخفض في النهاية إلى الصفر لوقف ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي. وعلى المدى القصير، يمكن تثبيت تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي بتقليل الانبعاثات لتُعادِل حجم تدفُّق ثاني أكسيد الكربون إلى أعماق المحيطات، الذي يبلغ حوالي ١٠ في المائة من الانبعاثات الحالية. ويُمكن أن يؤدي هذا إلى استقرار تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي عند حوالي ٥٦٠ جزءًا في المليون (ضِعف مستوى تركيزه قبل الثورة الصناعية) أو أعلى. لكنَّ السيناريوهات الأكثر تفاؤلًا تسعى إلى تثبيت تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي عند حوالي ٤٥٠ جزءًا في المليون على نطاق القرن الزمني. وبالنظر إلى الزيادات الأخيرة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، فإن هذه السيناريوهات الساعية إلى الحد من الاحترار العالمي وإيقافه عند أقل من درجتَين مئويتَين صارت الآن تتطلب أن تكون المجتمعاتُ بحلول نهاية القرن الحالي عاكفةً بإصرار على إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي.

وبين هذين النقيضَين المتطرفَين، تُوجد مجموعةٌ من السيناريوهات الاجتماعية الاقتصادية تتضمن افتراضاتٍ مختلفة بشأن ازدياد الطلب على الطاقة أو جهود التخفيف من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وتعكس هذه السيناريوهات تصوراتٍ معيَّنة، مثل استمرار العولمة أو انحدار العالم إلى وضعٍ أكثر تشرذمًا سياسيًّا. وعادةً ما تُستخدم نماذج التقييم المتكاملة لتوليد هذه السيناريوهات.

سيتمثل الحد النهائي المفروض على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في أنَّ باطن الأرض لا يحوي سوى كميةٍ محدودة، وإن كانت كبيرة، من الوقود الأحفوري. لكن الكمية هائلة — إذ تبلغ ٥٠٠٠ مليار طن من الكربون على الأقل — وقد أصبحَت التقديرات

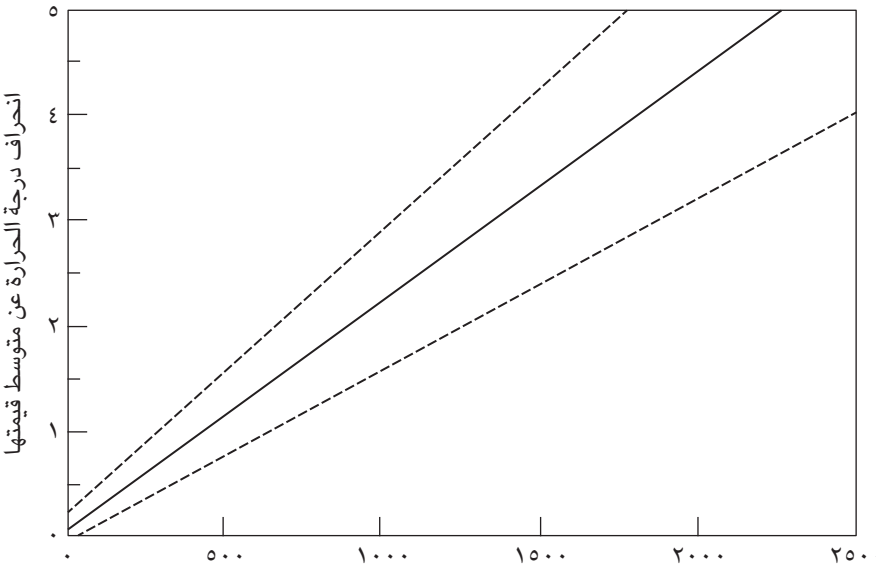
أكبر في الآونة الأخيرة، مع تحسُّن طرق الاستخراج. وإذا ارتفع سعر الوقود الأحفوري، يزداد حجم الاحتياطيات التي يصبح استخراجُها مُجديًا اقتصاديًّا. لكنَّ ارتفاع سعره يُسفِر أيضًا عن زيادة الحافز إلى اللجوء إلى مصادر طاقةٍ أخرى أرخص. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ بعض سيناريوهات النطاقات الزمنية التي تتجاوز القرن محصورةٌ بتقدير لإجمالي احتياطيات الوقود الأحفوري؛ مما يُتيح مؤشرًا مفيدًا يمنحُنا معلومات عن مدى قدرتنا على تغيير المُناخ على المدى الطويل. وأفضل منظور لرؤية هذه السيناريوهات هو اعتبارها «تجارب فكرية».

الاحترار العالمي

تعتمد توقعات التغير العالمي في درجة الحرارة اعتمادًا خطيًّا إلى حدٍّ كبير على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التراكمية حتى وقتٍ معيَّن؛ أي كمية الوقود الأحفوري التي نحرقُها دون استخلاص ثاني أكسيد الكربون المنبعث وتخزينه (شكل ٦-١). ويُمكن القول إنَّ كل ٥٠٠ مليار طن من الكربون المنبعث تؤدي إلى احترار عالَمي بمقدار درجةٍ مئوية واحدة تقريبًا. ومن ثَم، فقد حرَقنا بالفعل حوالي ٤٠٠ مليار طن من كربون الوقود الأحفوري، وتعرَّضنا لاحترار بمقدار ٠٫٨ درجة مئوية. وإذا أردنا أن يظل الاحترار ثابتًا عند أقل من درجتَين مئويتَين، نحتاج إلى الحد من انبعاثاتنا لتصل إلى تريليون (١٠٠٠ مليار) طن من الكربون. في حين أننا إذا حرَقنا كل كمية الوقود الأحفوري المعروفة البالغة ٥٠٠٠ مليار طن، يُمكن أن يصل الاحترار المتوقع إلى ١٠ درجاتٍ مئوية في النهاية. وتُعَد قابلية تحقُّق هذه التجربة الفكرية محل شكٍّ كبير؛ لأنَّ اقتراب مقدار الاحترار من ١٠ درجاتٍ مئوية يمكن أن يكون ضارًّا جدًّا إلى حدٍّ يمنعُنا من حرق كل الوقود الأحفوري أصلًا.

على النطاق الزمني القصير الممتد عَبْر العقود القليلة القادمة، لا تعتمد توقعات درجات الحرارة اعتمادًا كبيرًا على مسار الانبعاثات؛ لأن النظام المُناخي ما زال يتأثر باختلال توازُن الطاقة الناجم عن تراكُم انبعاثات غازات الدفيئة في الماضي. وكذلك فإنَّ التباين الطبيعي في كفاءة المحيطات في امتصاص الحرارة وتخزينها يمكن أن يؤثِّر تأثيرًا كبيرًا على درجات حرارة السطح على نطاقاتٍ زمنية عَقدية.

وأمَّا على النطاق الزمني الطويل الممتد عَبْر ألف عام، يظل تغيُّر درجة الحرارة معتمدًا على إجمالي انبعاثات الكربون التراكمية. ولكن بحلول ذلك الوقت، سيكون نظام الأرض قد وزَّع ثاني أكسيد الكربون الذي أضفناه بين الغِلاف الجوي والمحيطات وسطح



شكل ٦-١: العلاقة بين انبعاثات الكربون التراكمية والتغير العالمي في درجة الحرارة من مجموعة من نماذج نظام الأرض الحديثة.

الأرض. وسيعتمد الجزء المتبقي في الغلاف الجوي — والمعروف باسم «الجزء المحمول في الهواء» — على إجمالي كمية الكربون التي نبعثُها. وسيبلغ حوالي ٢٠ في المائة على أقل تقدير. لكنَّ بعض النماذج البسيطة والمتوسطة التعقيد تُخبرنا بأنَّ حجم ذلك الجزء يزداد زيادةً أُسِّية مع ازدياد كمية الكربون المُضافة. ولأن درجة الحرارة تعتمد على اللوغاريتم الطبيعي لكمية الكربون الموجود في الغِلاف الجوي، يتحد هذان التأثيران ليُنتِجا علاقةً خطية بين الكربون المنبعث والاحترار العالمي.

تتجسَّد العلاقة بين الكربون الموجود في الغِلاف الجوي والتغير العالمي في درجة الحرارة تجسدًا دقيقًا في مفهوم يُسمى «حساسية المُناخ». ويُعرف هذا المفهوم بأنه الاحترار العالمي الناجم عن مضاعفة محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، فور تَكيُّف محتوى الحرارة في المحيطات واستقراره، وسريان تأثير تغذياتٍ مرتدة «سريعة» متنوعة. ووَفْق أدق تقدير لدينا، تقترب قيمة هذا الاحترار من ٣ درجاتٍ مئوية، لكنه

يمكن أن يتراوح بين ١٫٥ درجة مئوية و٥ درجاتٍ مئوية. وتُعَد القيمة غير مؤكَّدة؛ لأن نماذجنا تختلف فيما يتعلق بقوة التغذيات المرتدة، وبمُعدل امتصاص الحرارة داخل أعماق المحيطات على المدى الطويل، ولا يُمكن أن تُتيح الأرصادُ حدودًا حاصرةً تحصُر هذه الخصائص بدرجةٍ تامة. ويُمكننا أن نُضيف إلى مفهوم «حساسية المُناخ» حساسية تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي لانبعاثاتٍ معيَّنة من ثاني أكسيد الكربون، وهذه تعتمد على تغذياتٍ مرتدة بين المُناخ ودورة الكربون. وعلى النطاقات الزمنية الأطول، تُوجد تغذياتٌ مرتدة «بطيئة» أخرى تزيد معدل الاحترار، كذوبان الصفائح الجليدية مثلًا. وهكذا فإنَّ ذلك يجعل نظام الأرض حسَّاسًا لثاني أكسيد الكربون، ويُمكن أن يكون مقدار هذه الحساسية ضِعف حساسية المُناخ.

أنماطٌ مكانية

تختلف وتيرة تغيُّر المناخ باختلاف الأماكن. فالاحترار عند القطب الشمالي أسرع مرتَين بالفعل من متوسط الاحترار العالمي، وتتنبأ النماذج بحدوث مزيد من الاحترار هناك بسبب ما يُسمى «التضخيم القطبي». وكذلك يُعَد الاحترار على اليابسة أسرع من الاحترار في المحيطات؛ لأنَّ سعة امتصاص الحرارة لدى اليابسة أقل بكثير؛ في حين أنَّ المحيطات تستطيع تخزينها. وبالمصطلحات العملية الفعلية، يعني هذا أنَّ الاحترار في الأجزاء الداخلية من القارَّات يُمكن أن يساويَ ضِعفَ متوسط الاحترار العالمي، وأنَّ الاحترار عند كتل اليابسة في القطب الشمالي قد يُساوي المتوسط العالمي ثلاث مرات.

يُعَد التنبؤ بالنمط المكاني للتغيرات في دورة الماء أصعبَ من التنبؤ بالنمط المكاني للتغيرات الحادثة في درجة الحرارة. فالاحترار سيزيد مُعدل التبخر من المحيطات، والغِلاف الجوي الأدفأ يستطيع الاحتفاظ بكميةٍ أكبر من الرطوبة؛ وَفْق ما تنصُّ عليه معادلة كلاوزيوس-كلابيرون التي تُعَد إحدى نظريات القرن التاسع عشر الفيزيائية. وصحيحٌ أنَّ النماذج تتنبأ بأنَّ الجو الأدفأ سيكون أكثرَ رطوبةً بالطبع، لكنَّ مقدار زيادة الرطوبة غيرُ مؤكَّد. ويُمكن تصوير دورة الماء على أنها تدور بوتيرةٍ أسرع في الظروف الأدفأ، فيما تتنبأ النماذج في العموم بأنَّ المناطق الرطبة تُصبح أكثر رطوبة، في حين أنَّ مناطق اليابسة الجافة من المتوقَّع أن تُصبح أشد جفافًا. فمن المتوقَّع أنَّ خلايا دوَران الغِلاف الجوي الكبيرة — التي تُسمَّى خلايا «هادلي» — والتي ترتفع عند خط الاستواء وتنخفض في المناطق المدارية، ستتوسَّع، مؤديةً بذلك إلى تمدُّد مناطق الهواء الجاف الهابط نحو

القطبَين، وإلى تكثيف بعض المناطق الجافة كالبحر الأبيض المتوسط. وهكذا ستكون مثل هذه الأنماط المكانية لتغيُّر المناخ بالغة الأهمية لتحديد كيفية تأثُّر الأجزاء الرئيسية من نظام الأرض، وكذلك التأثيرات الواقعة علينا نحن البشر.

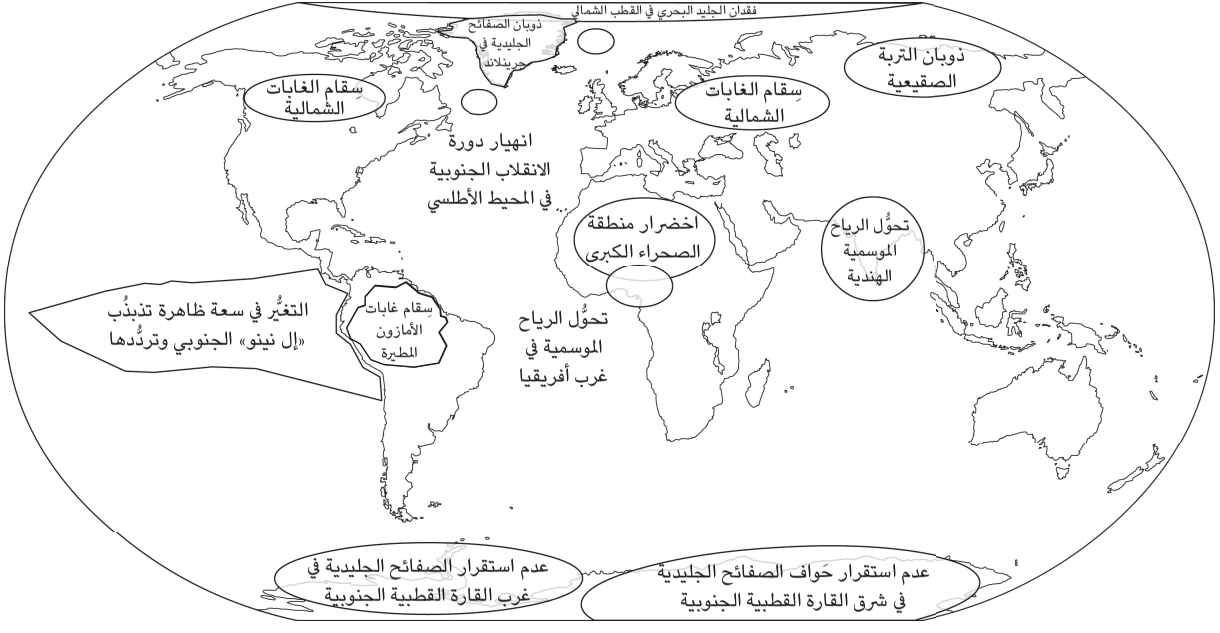
نقاط التحول

بينما يمكن وصفُ جزء كبير من سلوك نظام الأرض بأنه «خطي» وقابل للتنبؤ به باستخدام نماذجنا الحالية، تُوجد فئة من التغيير «غير الخطي»، ويُعَد التنبؤ بتلك الفئة أصعبَ بكثير، وربما تكون أخطرَ بكثير. فهي تتضمَّن «نقاط تحوُّل»؛ حيث يؤدي اضطرابٌ صغير إلى تأثيرٍ كبير في أحد أجزاء نظام الأرض؛ مما يُسفِر عن تغييراتٍ فجائية، وغالبًا ما يستحيل إلغاؤها. ويمكن أن تنشأ نقاط التحول عندما تُوجد تغذيةٌ مرتدة موجبة قوية داخل نظام معيَّن؛ مما يخلق حالاتٍ مستقرة بديلة لمجموعة من الظروف الحدية. فعندما تؤدي تغييرات في الظروف الحدية إلى فقدان استقرار حالة النظام الحالية، تنشأ نقطةُ تحوُّل، فتُسبِّب انتقال النظام إلى الحالة المستقرة البديلة. ولحسن الحظ، من الصعب جدًّا أن يمُر الكوكب ككلٍّ بإحدى نقاط التحول، والأمثلة على ذلك في تاريخ الأرض نادرة؛ إذ تتجسَّد في دخول الأرض حالة «الكرة الثلجية» وخروجها منها (كما ورَد في الفصلَين الأول والرابع).

ولكن يُعتقد أنَّ عدة أنظمة فرعية من نظام الأرض تظهر فيها نقاطُ تحول وحالاتٌ مستقرة بديلة. ومن الأمثلة النموذجية على ذلك دورة الانقلاب في المحيط الأطلسي. سُمِّيت تلك الأجزاء التي تظهر فيها نقاط تحوُّل من نظام الأرض «عناصر التحول». ومن بينها عناصرُ محتمَلة عديدة يُمكن أن تُحوَّل بفعلِ تغيراتٍ عالمية ناجمة عن أنشطة البشر (شكل ٦-٢). ويُمكن تقسيمها إلى عناصرَ تتضمن تغيراتٍ فجائية في أسلوب دوَران المحيطات أو في أسلوب دوَران الغِلاف الجوي (أو تغيرات هنا وهنا مرتبطة معًا)، وعناصرَ تتضمن تغيراتٍ فجائية في الغِلاف الحيوي، وأخرى تتضمن فقدانًا فجائيًّا لبعض أجزاء الغِلاف الجليدي.

المحيطات والغِلاف الجوي

تقترن دورات الغِلاف الجوي والمحيطات معًا، وقد تعرَّضَت لتغيراتٍ فجائية في الماضي. وتتكون دورة الانقلاب في المحيط الأطلسي من تدفق المياه السطحية نحو الشمال من



شكل ٦-٢: خريطة لعناصر تحوُّل مُحتمَلة في نظام مُناخ الأرض.

جنوب المحيط الأطلسي، عَبْر خط الاستواء، وصولًا إلى أقصى شمال المحيط الأطلسي حيث تصبح المياه كثيفة بدرجةٍ كافية لتغوص إلى الأعماق، وهو ما يدعم تدفقًا عميقًا عائدًا نحو الجنوب. وتتسم هذه الدورة باستدامةٍ ذاتية بفضل تغذيةٍ مرتدة موجبة تحصُل بها على الملح من المحيط الجنوبي، وبذلك تجعل مياه المحيط الأطلسي أكبر كثافةً وأكثر عُرضةً للغوص. ولكن إذا غُيِّرت «الظروف الحدية»، بإضافة مزيد من المياه العذبة إلى شمال المحيط الأطلسي، يمكن الوصول إلى نقطة تحوُّل يتوقف عندها تكوُّن المياه العميقة. ثم تتوقف دورة الانقلاب، وتستقر في حالة من «انعدام النشاط». ولاستعادة الحالة «النشطة» لدورة الانقلاب، يتطلب ذلك انخفاضًا أكبر بكثير في كمية المياه العذبة الداخلة.

وتُعَد تلك التحولات فيما بين الحالات المستقرة البديلة التي تشهدها دورة انقلاب المحيط الأطلسي مساهمة في كلٍّ من أحداثِ احترارٍ سريع سابقة في شمال المحيط الأطلسي (بسبب ازديادٍ مفاجئ في قوة الدورة) وأحداث انخفاض سريع في درجات الحرارة (بسبب انهيار مفاجئ للدورة). هذا وتشهد منطقة شمال الأطلسي دخول مزيد من المياه العذبة إليها بالفعل، بسبب ازدياد هطول الأمطار، وتتوقع بعض النماذج إضعاف دورة الانقلاب بسبب ذلك. وفي بعض سيناريوهات النماذج التي تفترض استمرار الوضع الحالي كما هو، تنهار دورة الانقلاب في النهاية، مُحدِثةً تأثيراتٍ غير مباشرة في مختلف أنحاء الكوكب.

ففي الماضي، أدَّت تقوية دورة الانقلاب في المحيط الأطلسي أو إضعافها إلى تحرُّك المنطقة بين المدارية التي تلتقي عندها تدفقاتٌ مُسببة لهطول الأمطار شمالًا أو جنوبًا، وهو ما أسفَر في بعض الأحيان عن تغيراتٍ مفاجئة في الرياح الموسمية في غرب أفريقيا والهند. ويُمكن اعتبار الرياح الموسمية دورة انقلاب للغِلاف الجوي؛ إذ يُسحَب هواءٌ رطب من المحيطات فوق القارَّات، حيث يرتفع ويبرد، وهو ما يؤدي إلى تكثُّف الماء وهطوله، وبذلك يُطلق حرارة كامنة تحفز انتقال الهواء إلى الأعلى بتيارات الحمل الحراري؛ وهكذا تُعَد هذه تغذيةً مرتدة موجبة تدعم دورة الرياح الموسمية. يُدفع هبوب الرياح الموسمية بمعدلٍ موسمي بفعل احترار اليابسة بوتيرة أسرع من احترار المحيطات، وفي ظل تنشيطها وإيقاف نشاطها بمعدلٍ موسمي، فإنَّ ذلك يدعم فكرةَ أنَّ الرياح الموسمية تتسم بوجود نقاط تحوُّل. وبالفعل تُظهِر بعض التوقعات المستقبلية تحولاتٍ فجائية في الرياح الموسمية، في غرب أفريقيا مثلًا؛ حيث يمكن أن يؤدي ارتفاع درجة حرارة المياه القريبة من الشاطئ إلى جعل هطول الأمطار مقتصرًا على المناطق الشاطئية، مما يؤدي إلى حرمان منطقة «الساحل» الأفريقية من إمدادها الموسمي من المياه.

الغلاف الحيوي على اليابسة

ترتبط بعض أجزاء سطح الأرض ارتباطًا قويًّا بالغِلاف الجوي عَبْر تغذياتٍ مرتدة موجبة. فعلى سبيل المثال، دعمَت حالة «اخضرار الصحراء الكبرى»، التي كانت موجودةً منذ ٦ آلاف عام، إحدى دورات الغِلاف الجوي التي جلبَت الرطوبة إلى المنطقة التي صارت الآن صحراء. وفي الوقت الحاضر، تُعيد غابات الأمازون المطيرة تدوير المياه إلى الغِلاف الجوي، وهو ما يُساعد في الحفاظ على هطول الأمطار الذي يدعم بقاء الغابات. فضلًا عن أنه يكبح اندلاع الحرائق. ولكن إذا شهد المُناخ جفافًا إقليميًّا — كما حدث في سنتَي الجفاف الأخيرتَين في منطقة الأمازون (٢٠٠٥، ٢٠١٠) — فقد يؤدي ذلك إلى سقام الأشجار (حالة مرضية في النبات عبارة عن موت الشجرة ابتداءً من الأطراف العلوية نزولًا إلى الأسفل) والتحول إلى نظام يتسم باندلاع حرائقَ أشد تدميرًا. وإذا بدأَت الأعشاب تتعدى على رُقعة الغابات، فإن هذا يحفز اندلاع الحرائق التي تُدمِّر شتلات الأشجار وتدعم نشوء حالة بديلة مكوَّنة من الأراضي العشبية أو السافانا (مُمثِّلةً بذلك تغذيةً مرتدة موجبة). ويُعتقد بالفعل أنَّ الأراضي العشبية تُعَد حالةَ غطاءٍ نباتي مستقرةً بديلة لأجزاءٍ كبيرة من حوض الأمازون في ظل هطول الأمطار الحالي. وإذا جفَّت المنطقة في المستقبل، فمن المتوقَّع تعرُّض غابات الأمازون المطيرة للسقام على نطاقٍ واسع.

وتجدُر الإشارة إلى أنَّ مناطقَ عديدة من الغابات الشمالية والمعتدلة، في أماكنَ أخرى، تتعرَّض بالفعل لسقامٍ واسع النطاق بسبب خنافس اللحاء التي تنمو وتزدهر في الظروف المناخية الأدفأ. وتُشير بعض التوقعات المستقبلية إلى أنَّ مساحاتٍ كبيرة من الغابات الشمالية ستُفقَد بسبب هجمات خنفساء اللحاء، وزيادة الحرائق، واشتداد حرارة فصول الصيف إلى حدٍّ لا تتحمَّله الأشجار. ومن المُرجَّح أن يؤدي سقام غابات الأمازون أو الغابات الشمالية بدَوره إلى ارتداد ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي، لكنَّ حجم الإسهام المُحتمَل من تلك الغابات في زيادة ثاني أكسيد الكربون متواضعٌ مقارنةً بانبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتوقَّع صدورها من الأنشطة البشرية.

الغلاف الجليدي

يعود أحد أسباب تكثيف احترار القطب الشمالي إلى دورة التغذية المرتدة الموجبة بين الجليد والبياض، التي تعرَّفنا عليها في الفصل الأول؛ فمع فقدان الجليد البحري، ينكشف

سطح المحيط المظلم فيمتص كميةً أكبر من ضوء الشمس. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ وتيرة فقدان الجليد في القطب الشمالي تتسارع، ومن المتوقَّع أن تشهد العقود القليلة القادمة فقدان الجليد كله في فصول الصيف. وإذا استمر الوضع الحالي كما هو، تتوقع النماذج فقدان الجليد البحري في القطب الشمالي طوال العام في القرن القادم. وفي بعض النماذج، يحدُث هذا الفقدان المستمر طوال العام بغتةً عندما تَعجِز درجات الحرارة الشتوية عن بلوغ نقطة التجمد عَبْر جزء كبير من المحيط القطبي الشمالي.

هذا ويؤدي احترار أسطح اليابسة في القطب الشمالي بالفعل إلى إذابة الأراضي الدائمة التجمد — التُّرَب الجليدية — وإطلاق محتوى خزانات الميثان وثاني أكسيد الكربون التي تحويها تلك الأراضي. وإذا استمر الوضع الحالي كما هو، فمن المتوقَّع أن يُفقَد معظم الأراضي الدائمة التجمد بحلول نهاية القرن الحالي، مما يؤدي إلى ازدياد الاحترار العالمي بحوالي ١٠ في المائة. وعلى نطاقٍ زمني أطول، سيؤدي احترار المحيطات إلى زعزعة استقرار الخزانات المجمَّدة من الميثان (المعروفة باسم الهيدرات أو الكلاثرات) تحت رواسب المحيطات. وهذا سيُطلِق الكربون في صورةٍ غازية، ومن المتوقَّع أن يؤدي ذلك إلى إضافة ٠٫٥ درجة مئوية إلى الاحترار على المدى الطويل، لكنَّ هذه التغذية المرتدة الموجبة بطيئة بطبيعتها بسبب بُطء انتشار الحرارة عَبْر رواسب المحيطات.

وكذلك يُعَد فقدان أجزاء كبرى من الصفائح الجليدية عمليةً بطيئة، لكنها ربما تكون جارية بالفعل. ويُعتقد أنَّ صفيحة «جرينلاند» الجليدية من بقايا العصر الجليدي الأخير، وإذا زالت فلن يُمكن أن تنمو مجددًا في ظل الظروف المُناخية الحالية. تجدُر الإشارة إلى أنها تفقد بعضًا من كتلتها بالفعل، وربما لن يُمكن إعادة تلك الكتلة المفقودة، وهذا يرجع (جزئيًّا) إلى تغذيةٍ مرتدة موجبة قوية تجعل الذوبان يُسبِّب انخفاض مستوى ارتفاع سطح الصفيحة الجليدية، وهو ما يُكثِّف احترارها أكثر وأكثر، ويُسبِّب مزيدًا من الذوبان. وفي القارة القطبية الجنوبية، ترتكز الصفيحة الجليدية القطبية الجنوبية الغربية وأجزاء من الصفيحة الجليدية القطبية الجنوبية الشرقية على قاع البحر تحت مستوى سطح البحر بعُمقٍ كبير. وعلى حسب مخطط تَدرُّج عمق قاع البحر، يمكن أن ينحسر «حد ارتكاز» الصفائح الجليدية، الذي تنفصل عنده الصفائح عن قاع البحر، فجأة، مؤديًا بذلك إلى إزاحة أسطول من الكتل الجليدية الكبيرة الطافية إلى المحيط وزيادة مستوى سطح البحر. ويُعَد انكماش الصفائح الجليدية الرئيسية بالفعل عاملًا مساهمًا رئيسيًّا في ارتفاع مستوى سطح البحر، مع ذوبان الأنهار الجليدية وتوسُّع المحيطات في ظل ارتفاع درجة حرارتها.

وإذا استمر الوضع الحالي كما هو، يمكن أن تصل الزيادة الحادثة في ارتفاع مستوى سطح البحر إلى مترٍ كامل في القرن الحالي، وقد تبلغ عشرات الأمتار على المدى الطويل.

النُّظم الإيكولوجية والعمليات البيوجيوكيميائية البحرية

تتحمَّض المحيطات بالفعل لأنَّ ثاني أكسيد الكربون يتفاعل مع مياه البحر لتكوين حمض الكربونيك. وهذا يُشكل تهديدًا للكائنات الحية التي تُرسِّب الكربونات، بما فيها الشعاب المرجانية والعديد من أنواع العوالق والقاعيات. وكذلك تُعَد الشعاب المرجانية سريعة التأثر باحترار المحيطات الذي يمكن أن يُسبِّب ابيضاض الشعاب المرجانية. ولذا فإذا استمر الوضع الحالي كما هو، فمن المتوقَّع أن تتعرَّض الشعاب المرجانية لفقدانٍ واسع النطاق.

وعلى النطاقات الزمنية الألفيَّة، ستنتشر المياه المحمَّضة وصولًا إلى أعماق المحيطات، ومن المُرجَّح أن تُذيب رواسب كربونات الكالسيوم هناك. وهذا سيُطلِق مواد قلوية، فيُمكِّن المحيطات بالتبعية من امتصاص كميةٍ أكبر من ثاني أكسيد الكربون. وفي الوقت نفسه، سيؤدي الاحترار العالمي وتحمُّض المياه المعلَّقة في التربة بفعل ثاني أكسيد الكربون إلى تسريع تجوية الكربونات والسيليكات على اليابسة، وهذا من المُرجَّح أن يُعيد إمداد المحيطات بالمواد القلوية. وعلى نطاقٍ زمني ممتد عَبْر مئات الآلاف من السنين، ستؤدي المستويات الزائدة من تجوية السيليكات إلى إزالة كربون الوقود الأحفوري الذي نُضيفه إلى الغِلاف الجوي، وترسيبه في صخور كربوناتٍ جديدة. ولكن بحلول ذلك الوقت، سنكون قد تجنَّبنا العصر الجليدي التالي بالفعل، ويمكن أن تتوقَّف دورات التناوب بين الفترات الجليدية وبين الجليدية في العصر الرباعي تمامًا.

وتجدُر الإشارة إلى أنَّ ثاني أكسيد الكربون ليس المادة الوحيدة التي تُحدِث عواقبَ طويلة المدى على نظام الأرض من بين المُخلفات الناتجة من الأنشطة البشرية. فزيادة مدخلات النيتروجين والفوسفور إلى اليابسة تؤدي بالفعل إلى تغذية ظروف انعدام الأكسجين في المياه العذبة وبعض مياه البحار الساحلية. وإذا استمر هذا الوضع آلاف السنين («وهذا مُستبعَد»)، فإنه سيُسفِر عن زيادةٍ كبيرة في محتوى النيتروجين والفوسفور في المحيطات، وهذا يُهدِّد بحدوث انعدام للأكسجين في المحيطات على نطاقٍ عالمي؛ لأنَّ انعدام الأكسجين في المحيطات يُحسِّن كفاءة إعادة تدوير الفوسفور من الرواسب البحرية عند الجروف الساحلية، مُغذِّيًا بذلك تعزيز الإنتاجية وانعدام الأكسجين في المحيطات؛

وهذا يُمثِّل تغذيةً مرتدة موجبة قوية (كما ورَد في الفصل الرابع). وكذلك تُحفِّز ظاهرة خلو المحيطات من الأكسجين أكثر وأكثر بفعل احترار المحيطات، الذي يُقلِّل قابلية الأكسجين للذوبان في الماء ويميل إلى تقسيم المحيطات إلى طبقات، عازلًا طبقات المياه الأعمق المستهلكة للأكسجين عن الغِلاف الجوي.

البساطة الطارئة

كما قال نيلز بور، «التنبؤ صعب جدًّا، وخصوصًا التنبؤ بالمستقبل». وينطبق هذا بالأخص على الأنظمة المعقدة مثل نظام الأرض؛ ولذا بُذلت جهود استغرقَت حياواتٍ مهنيةً عديدة بالفعل في إنشاء نماذج نظام الأرض. ولكن بالرغم من تعقيد نظام الأرض، يمكن أن تظهر فيه بعض «البساطة الطارئة». فعلى سبيل المثال، تبدو العلاقة الخطية بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التراكمية والتغير العالمي في درجة الحرارة قويةً عَبْر مجموعة من النماذج. ومن ثَم، نستطيع أن نتوقع بعضَ عواقبِ أنشطتنا الجماعية بشيء من الثقة، حتى لو لم نستطِع التنبؤ بالكيفية التي قد تتطور بها المجتمعات البشرية. وصحيح أنَّ التنبؤ ببعض الخصائص الأخرى لنظام الأرض، مثل نقاط التحول، يظل أصعب. ولكن يجري إحراز تقدُّم في هذا الشأن، بفضل مزيج من دراسة السلوك السابق لنظام الأرض، وفهم العمليات الجارية المؤثِّرة، ودمج هذا الفهم في النماذج. ويُمكننا تخيُّل أنَّ المستقبل سيشهد جيلًا جديدًا من نماذج نظام الأرض التي ستسمح لنا بدراسة «الحدود الكوكبية» وليس مجرد تغيُّر المُناخ فقط؛ مثل الحدود التي تُقيِّد تراكُم إضافات الفوسفور والنيتروجين لتجنُّب استهلاك الأكسجين من المحيطات على نطاقٍ واسع. بل ربما سنُحاول حتى محاكاة المجتمعات البشرية بصفتها جزءًا تفاعليًّا من نظام الأرض، ولو لمجرَّد أن نتفحَّص التوجُّهات المُحتمَلة التي تنتظرنا. في الفصل السابع، نتناول أحد تلك التوجهات؛ ألا وهو مستلزمات تحقيق استدامة طويلة المدى.

الفصل السابع

الاستدامة

على الرغم من أنَّ التغيير البشري للكوكب كان غير مُتعمَّد في البداية، فإننا الآن صِرنا نُدرِكه إدراكًا جماعيًّا متزايدًا. ويُشكِّل هذا تحديًا لعلم نظام الأرض؛ لأننا، نحن البشر، لدينا بصيرةٌ واعية وإحساس بغايةٍ معيَّنة من وجودنا، وهذا الإحساس (على حد علمنا) لم يكن جزءًا من نظام الأرض من قبلُ قَط. وهذا يُحدِث تغييرًا جذريًّا في نظام الأرض؛ لأنه يعني أن نوعًا واحدًا يستطيع تشكيل المسار المستقبلي لكوكبنا تشكيلًا جماعيًّا بوعي منه. فنحن نعلم أن طريقة عيشنا الحالية غير مستدامة، لكننا ما زلنا نُحاوِل التوصل إلى شكلٍ مستقبلٍ مستدام ومزدهر. وتُعَد هذه فرصة لعلم نظام الأرض؛ لأنه المجال الذي يُمكِن أن يُخبرَنا بما الذي يجعل نظام الأرض مُستدامًا وما الذي يجعله غير ذلك. ويوضِّح هذا الفصل كيف يمكن لعلم نظام الأرض أن يُساعِد البشر في سعيهم إلى تحقيق الاستدامة، مستهلًّا ذلك بالدروس التي يمكن أن نتعلمها من تاريخ الأرض.

دروسٌ مستفادة من تاريخ الأرض

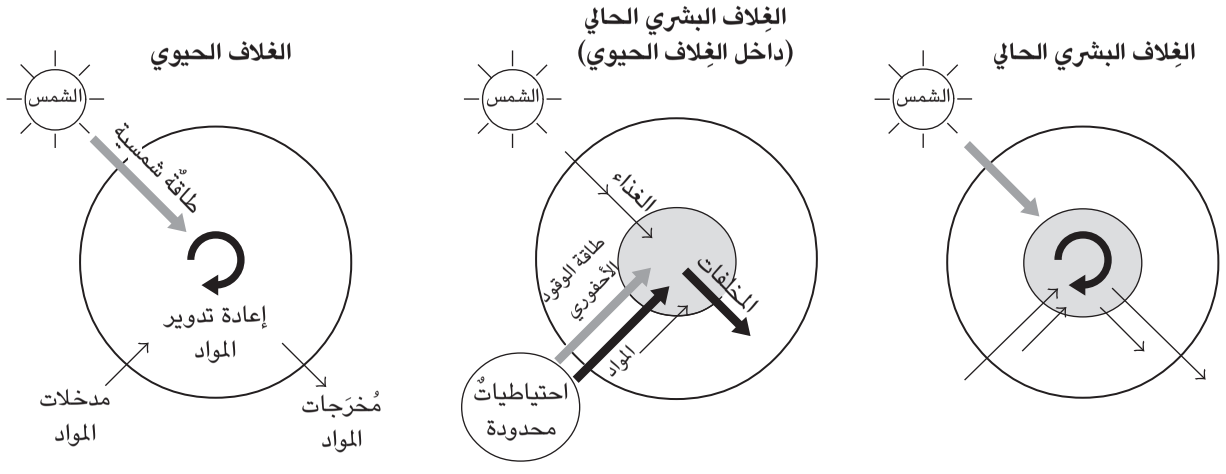
يُعَد غِلاف الأرض الحيوي مثالًا بارزًا للأنظمة المستدامة. فهو مزدهر منذ أكثر من ٣,٥ مليارات سنة، وصحيحٌ أنه كان في البداية مجرَّد عالَم من بدائيات النوى، لكنه أصبح الآن عالَمًا يدعم الحياة المعقَّدة. وفي ذلك الوقت، ازداد سطوع الشمس بوتيرةٍ ثابتة، واصطدمَت صخورٌ عملاقة بالكوكب، وحفَن لُب الأرض دفقات كبيرة من المواد المنصهِرة في نظام سطح الأرض من حين إلى آخر. ولكن بالرغم من هذه الاضطرابات، بَقيَت الظروف على سطح الأرض صالحةً للعيش فيها، ليس هذا فحسب، بل ازدهرَت الحياة. صحيحٌ أنَّ الكوكب تعرَّض لبعض الكوارث شبه المميتة، مثل أحداث تحوُّل الأرض إلى كرة ثلجية،

أو انقراض نهاية العصر البرمي، لكن هذه هي الاستثناءات وليست القاعدة. فما أسرار الاستدامة الطويلة المدى إذَن؟

السر الأول هو اقتران مصدر طاقة مستدام بإعادة تدوير المواد (شكل ٧-١). ويتمثل المصدر الأساسي الذي يُمِد نظام الأرض بالطاقة في ضوء الشمس، الذي يُحوِّله الغِلاف الحيوي ويُخزِّنه في شكلِ طاقةٍ كيميائية. وتبني أجهزة استخلاص الطاقة — أي الكائنات التي تُمارِس التمثيل الضوئي — نفسها بالاعتماد على ثاني أكسيد الكربون والمواد المغذية ومجموعة من العناصر النزرة التي تأخذها من البيئة المحيطة بها. وتُعَد كمية مُدخلات هذه العناصر والمركَّبات من نظام الجزء الصُّلب من الأرض إلى نظام سطح الأرض متواضعة. لذا تطوَّرَت بعض الكائنات التي تُمارِس التمثيل الضوئي لزيادة مُدخلات المواد التي تحتاج إليها، بتثبيت النيتروجين من الغِلاف الجوي وتجوية الفوسفور تجويةً انتقائية نازعةً إياه من الصخور، على سبيل المثال. والأهم من ذلك هو تطوُّر كائناتٍ أخرى غيرية التغذية تُعيد تدويرَ المواد التي تحتاج إليها الكائنات التي تُمارس التمثيل الضوئي (غالبًا ما تُعيد تدويرها في صورة منتَج ثانوي من استهلاك بعض الطاقة الكيميائية التي استُخلصَت أصلًا في عملية التمثيل الضوئي). ويُعَد هذا النظام الاستثنائي من أنظمة إعادة التدوير هو الآلية الأساسية التي يُحافِظ بها الغِلاف الحيوي على مستوًى عالٍ من مُعدَّل الحصول على الطاقة (أي الإنتاجية).

أمَّا السر الثاني وراء الاستدامة، فهو التنظيم الذاتي. فمن أجل أن تظل ظروفُ نظام الأرض مستقرةً وصالحةً للعيش فيها، يجب أن يُوجد لدى النظام آلياتُ تغذيةٍ مرتدة سالبة، مثل التغذية المرتدة المتمثلة في تجوية السيليكات، التي تعمل على تثبيت درجة الحرارة على المدى الطويل. فهذه التغذيات المرتدة السالبة تمنح نظام الأرض مرونة؛ بمعنى أنَّ النظام إذا تأثَّر بشيءٍ ما، فإنه يميل إلى الارتداد إلى حالته الأوَّلية. وتُعَد المرونة بالمعنى الحرفي مقياسًا لمدى سرعة ارتداده. ويُعزِّز دَور الحياة في بعض آليات التغذية المرتدة السالبة — مثل تكثيف تجوية السيليكات — من مرونة نظام الأرض. وصحيحٌ أنَّ نظام الأرض يتضمن تغذياتٍ مرتدة موجبة إلى جانب التغذيات المرتدة السالبة. لكنَّ استقراره على المدى الطويل يُخبرنا بأنَّ التغذيات المرتدة السالبة في المُجمَل هي صاحبة التأثير الأكبر. وثَمة جدل مستمر حول سبب ذلك.

وصحيحٌ أنَّ تاريخ الحياة الطويل قد يدفعُنا إلى استنتاج أنَّ نظام الأرض سيكون مَرنًا وقادرًا على استعادة حالته بعد التأثر بأنشطتنا الجماعية بصفتنا أحد الأنواع التي



شكل ٧-١: تدفقات الطاقة والمواد في الغِلاف الحيوي، والغِلاف البشري (الأنثروبوسفير)، وفي غِلافٍ بشري مستدام مُحتمَل في المستقبل.

تعيش فيه، لكن هذه قد تكون ثقةً زائفة. فاستمرار الحياة في الماضي ليس مؤشرًا قويًّا بالضرورة على استقرارها في المستقبل. والسبب أنَّ وجودنا بحد ذاته يُحتِّم اتسام نظام الأرض بتاريخ من نوعيةٍ معيَّنة؛ تاريخ ظلَّت فيه الحياة باقيةً رغم كل الصعوبات وارتفعَت فيه مستويات الأكسجين إلى الحد الذي مكَّنَنا من النشوء ورصدِ مثل هذا التاريخ. يُعَد هذا تطبيقًا لما يُسمِّيه علماء دراسة الكونيات «المبدأ البشري الضعيف». ويعني هذا المبدأ أننا ينبغي ألا نتفاجأ بشدة من أنَّ أغلب آليات التغذية المرتدة في نظام الأرض حتى الآن سالبة. وهذا لا يضمن أنَّ الوضع سيبقى كذلك. فمن الممكن أن ينشأ شيءٌ ما داخل نظام الأرض يُحدِث فيه اضطرابًا عميقًا، قد يصل حتى إلى حدِّ القضاء على كل أشكال الحياة. بل يظن بعضُنا أنَّ هذا «الشيء» يمكن أن يكون نحن.

نمو أُسِّي يصطدم بموارد محدودة

يكمُن في صميم التحدي الذي يواجه الاستدامة تعارضٌ بين تغذية مرتدة موجبة وأخرى سالبة. إذ يُمكن أن ينتج نمو أُسي من تغذيةٍ مرتدة موجبة ترتبط بالأحياء ارتباطًا متأصلًا؛ ألا وهي أنَّ الحياة تولِّد مزيدًا من الحياة. لكن النمو الأُسي دائمًا ما يكون مقيدًا في النهاية بموارد محدودة، وهو ما يفرض على النمو تغذيةً مرتدة سالبة. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ تاريخ هذه الفكرة القائلة بأنَّ النمو الأُسي سيكون مُقيدًا في النهاية بموارد محدودة يرجع، على أقل تقدير، إلى وقتِ كتاب «مقالة عن مبدأ السكان» الذي ألَّفه توماس مالتوس، ونُشر في عام ١٧٩٨. وكانت تلك الفكرة من الركائز الأساسية التي صاغ داروين نظرية الانتخاب الطبيعي بناءً عليها؛ فعندما تكون الموارد محدودة، تستقر أعداد السكان، وينتُج تنافُس على الموارد، وتُصبح الكائنات «الأصلح» (أي تلك التي تُخلِّف وراءها النسل الأكثر) مهيمِنةً على العالم.

ثم اتخذ المبدأ شكلًا أوسع في كتاب «حدود النمو» الذي نُشر في عام ١٩٧٢ من تأليف دونيلا إتش ميدوز ودينيس إل ميدوز ويورجن راندرز ووليام دابليو بيرنس الثالث، الذي درَس التفاعل بين النمو الأُسي للأنشطة البشرية والموارد المحدودة باستخدام نموذج نظام عالمي مبكر يُسمى «وورلد٣». فقد ضمَّن مؤلفو الكتاب في النموذج خمسة متغيِّرات متفاعلة؛ سكان العالم، والتحوُّل إلى النظام الصناعي، والتلوث، وإنتاج الغذاء، واستنفاد الموارد. وأدى سيناريوهان من سيناريوهات النموذج إلى تجاوُز حد استهلاك الموارد المسموح به وحدوث انهيار في هذا القرن، فيما أسفر نموذجٌ ثالث عن عالَم مستقر.

ولاقى الكتاب انتقادات من العديد من الاقتصاديين، الذين أكَّدوا أنَّ تعمُّد تقييد استهلاك الموارد سيُلحِق ضررًا جسيمًا بالتحسينات الجارية في رفاهية البشر. ومن هذه الحُجة انبثَق الحل الوسط العظيم المتمثل في «التنمية المستدامة»؛ ومفاده أننا يجب أن نسعى في آنٍ واحد إلى تحسين رفاهية البشر وإلى تحقيق الاستدامة البيئية.

ولعل أوضح رابط مؤكَّد بين التنمية البشرية والاستدامة أنها تقودنا عمومًا إلى إنجاب أطفالٍ أقل. وهذا يعني أنَّ عدد السكان البشر سيثبُت عاجلًا أو آجلًا. بل إنَّ معدلات الخصوبة انخفضَت إلى ما دون مستوى الإحلال في العديد من البلدان المتقدمة. ومن ثَم، فإذا تحقَّقَت التنمية على مستوًى عالمي، يُمكِننا أن نتوقع انخفاض عدد السكان على المدى الطويل. غير أنَّ التنمية تؤدي أيضًا إلى زيادة استهلاك الطاقة والمواد، الذي أصبح منفصلًا عن النمو السكاني ويواصل الازدياد بمُعدلٍ أسِّي. ومن ثَم فإنَّ تباطؤ النمو السكاني منذ الستينيات لا يعمل على تثبيت تأثيرنا الجماعي على كوكب الأرض عند مستوًى معيَّن. وهذا يعني أنَّ التحدي الذي تواجهه الاستدامة لا يتعلق في الأساس بثبات عدد السكان (وإن كان ذلك سيساعد في تحقيق الاستدامة)، بل يتعلق بتغيير المصادر التي نستمد منها الطاقة والكيفية التي نستخدم بها المواد.

الطاقة المستدامة

ينظر مجال «الأيض الصناعي» (أو «علم البيئة الصناعي») إلى المجتمعات البشرية على أنها تتضمن عملياتٍ متشابكة من تدفقات الطاقة والمواد، شأنها شأن الكائنات الحية والأنظمة البيئية ونظام الأرض. وصحيح أنَّ الغِلاف الحيوي حقق قفزات في مدخلات الطاقة من حين إلى آخر في الماضي، لكنَّ حجم مدخلات الطاقة كان ثابتًا طوال معظم تاريخه. وحتى الآن، استطاع البشر زيادة مدخلات الطاقة إلى الغلاف الحيوي بمقدار العُشر تقريبًا، وقد حدثت معظم هذه الزيادة منذ «التسارع الكبير»، مع زيادة استهلاك الطاقة العالمي من حوالي ١٠٠ إكساجول سنويًّا في عام ١٩٥٠ إلى حوالي ٥٠٠ إكساجول سنويًّا في عام ٢٠١٠. هذا وتُشير توقعاتٌ مستقبلية إلى أنَّ الطلب على الطاقة يمكن أن يرتفع إلى أكثر من ١٠٠٠ إكساجول سنويًّا بحلول عام ٢٠٥٠. وصحيحٌ أنه لا يمكن تلبية الطلب المتزايد على الطاقة إلى أجلٍ غير مُسمًّى، لكننا لم نقترب إطلاقًا حتى الآن من حدود الطاقة المتاحة.

يتمثل مصدر طاقتنا الرئيسي حاليًّا في مواد؛ الوقود الأحفوري. وفي حين أننا نُواصِل حرق الوقود الأحفوري، فنحن نعلم أننا نعيش على طاقةٍ مُقترَضة. فالوقود الأحفوري

مصدرٌ محدود للطاقة من القشرة الأرضية. ومن ثَم، ستؤدي تغذيةٌ مرتدة سالبة إلى الحد من الزيادة في استهلاك تلك المواد. ومن المؤكَّد أنَّ عمليات استخراج النفط هي من ستَبلغ الذروة أولًا، يليها استخراج الغاز، ثم الفحم (في النهاية). ولكن (كما رأينا في الفصل السادس)، تُوجد كميةٌ كافية من الوقود الأحفوري — الفحم بشكلٍ أساسي — لرفع درجة حرارة مُناخ الأرض بمقدار ١٠ درجاتٍ مئوية. وهذا يُمكن أن يؤدي إلى نشوء تغذية مرتدة سالبة مختلفة تؤثِّر في معدل النمو من رَحِم تأثيراته الضارة للغاية. وصحيحٌ أننا نستطيع أن نلجأ بدلًا من ذلك إلى خيار حرق الوقود الأحفوري واستخلاص ثاني أكسيد الكربون المنبعث وتخزينه — مع تحمُّل غرامة الطاقة المصاحبة لتلك العملية — ولكن لا يمكن وصف ذلك بأنه مصدرُ طاقةٍ «مستدام».

أمَّا طاقة الانشطار النووي، فتعتمد على إمداداتٍ محدودة من المواد الانشطارية؛ لذا فهي أيضًا ليست مستدامة إلى أجلٍ غير مُسمًّى. غير أنَّ الآفاق المستقبلية المحتملة لتوليد الطاقة من اليورانيوم والثوريوم الانشطاريَّين أكثر إشراقًا من آفاق توليد الطاقة من الوقود الأحفوري. وصحيحٌ أنَّ الاندماج النووي هو ما يُمِد الشمس وكل النجوم بالطاقة، وإذا أمكن ترويضه، فستكون كميةُ إمدادات المواد «الاندماجية» أكبر بقيمٍ أسية كاملة. ولكن من المُرجَّح على ما يبدو أنَّ الشمس ستظل المصدر المهيمِن بين مصادر إمداد الغِلاف الحيوي بالطاقة في المستقبل البعيد.

ويُمكن أن تزداد نسبة ضوء الشمس التي تدخل الغِلاف الحيوي زيادةً كبيرة بتدخلٍ بشري؛ لأنَّ كفاءة عملية التمثيل الضوئي في تحويل الطاقة الشمسية ليست عاليةً إطلاقًا؛ إذ تتراوح بين ١ و٢ في المائة على أقصى تقدير. ولذا ثَمة جهودٌ جارية لتحسين كفاءة التمثيل الضوئي، الذي يمكن أن يعود بفائدة على إنتاج كلٍّ من الغذاء والوقود الحيوي. ولكن ما زالت تُوجد فجوةٌ واسعة في الكفاءة بين التمثيل الضوئي والوسائل الأخرى لاستخلاص الطاقة الشمسية. فعادةً ما تَبلغ كفاءة الألواح الكهروضوئية الشمسية في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء حوالي ٢٠ في المائة، بل وشهدَت الآونة الأخيرة إنتاج جهاز يجمع بين تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء واستخلاص الطاقة الشمسية الحرارية بكفاءة تبلغ ٨٠ في المائة. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ كمية ضوء الشمس التي تصل إلى سطح الأرض (والتي تبلغ طاقتها ٢٫٥ × ١٠^{١٦} واط) تجعل إجمالي الاستهلاك البشري الحالي للطاقة (البالغ ١٫٥ × ١٠^{١٣} واط) ضئيلًا جدًّا؛ لأنها تفوقه بأكثر من ألف ضعف. وبذلك يُمكن للطاقة الشمسية أن تدعم زيادةً مستقبلية كبيرة في مُعدل الاستهلاك البشري

للطاقة، ولكن ليس زيادة غير محدودة؛ لأنَّ كمية ضوء الشمس التي تصل إلى الأرض تظل محدودة، وإن كانت هائلة.

وسيَعني هذا بطبيعة الحال تخصيص جزء من سطح الأرض لالتقاط الطاقة الشمسية، والتغلب على بعض التحديات التي تواجه نقل الطاقة وتخزينها. فمصادر الطاقة الشمسية ومعظم مصادر الطاقة المتجددة الأخرى متقطعة. ولذا تتطلب تخزينَ الطاقة و/أو شبكة كهرباء عالمية فائقة تستطيع نقل الطاقة من أماكن سطوع الشمس إلى أماكن الاحتياج إلى تلك الطاقة. ويُمكِن تخزين الطاقة في أشكالٍ عديدة. إذ يُخزن الغِلاف الحيوي الطاقة الشمسية في شكلٍ كيميائي، ويمكن أن يكون المكافئ البشري لهذه العملية هو الوقود الهيدروجيني، أو الهيدروكربونات المُخلَّقة.

إعادة تدوير المواد

نعكف حاليًّا على استخراج مجموعة من الموارد المحدودة من قشرة الأرض، من بينها الفوسفور للأسمدة المخصِّبة والحديد والألومنيوم ومجموعة من المعادن النزرة (بالإضافة إلى مواد الوقود الأحفوري). ونعمل أيضًا على تثبيت كميةٍ كبيرة من النيتروجين من الغِلاف الجوي. ونستخدم هذه المواد في اقتصادنا الصناعي أو لزراعة الغذاء. ثم عادةً ما نتخلص من النفايات والمخلفات الناتجة بإعادتها مرةً أخرى إلى الأرض، أو إطلاقها في الغِلاف الجوي، أو إلقائها في المياه العذبة والمحيطات. وهذا بدوره يُولِّد تغييراتٍ بيئية. ومن أجل تحقيق استدامةٍ طويلة المدى، سيتوجَّب حدوث تحوُّل جذري نحو معدلاتٍ أكبر بكثير من إعادة التدوير؛ لأن الموارد محدودة، ولأن النفايات المتراكمة تُسبِّب أضرارًا بيئية متزايدة.

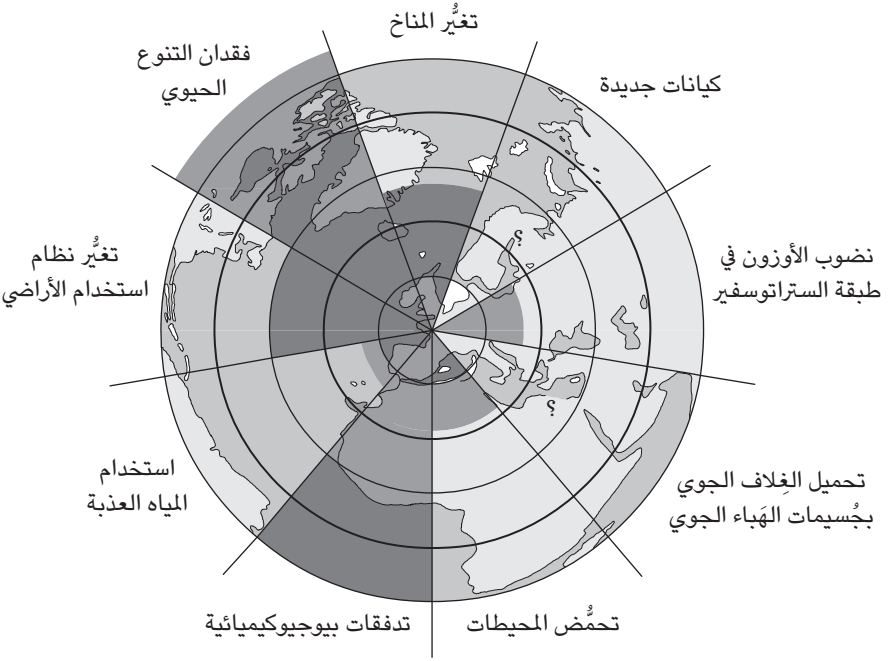
غير أنَّ إعادة التدوير تتطلب طاقة بدورها. وفي الغِلاف الحيوي، تجري إعادة التدوير باستهلاك الطاقة الكيميائية، التي استُخلصَت في عملية التمثيل الضوئي أصلًا، في تفاعلات الكائنات الغيرية التغذية. فعلى سبيل المثال، تحصُل كائناتُ التربة على طاقتها من تفاعل المواد العضوية مع الأكسجين، وتُطلِق في أثناء ذلك موادَّ مغذية تُعيدها مرةً أخرى إلى التربة (بالإضافة إلى ذلك تُطلِق ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي). وهذه حيلةٌ رائعة تدعم الحياة دعمًا مباشرًا بإمدادها بالطاقة، ودعمًا غير مباشر من خلال إعادة تدوير الموارد. غير أن هذه الحيلة لا تنسحب على كل المواد اللازمة للحضارة؛ لأن هذه المواد لا تُمِد بالطاقة بالطريقة نفسها. ومع ذلك، فنحن نستطيع إنشاء علمِ بيئةٍ صناعي يُعتمد فيه على الطاقة الشمسية في إعادة تدوير المواد. ومع أنَّ الكمية الإجمالية

للعديد من العناصر الموجودة في القشرة الأرضية هائلة، تتزايد الطاقة اللازمة لاستخراج هذه العناصر وتنقيتها؛ لأنَّ درجة نقاء تركيزات العناصر التي نستخرجها تتناقص باستمرار. وينبغي أن يُشكِّل هذا حافزًا لإعادة تدوير المواد المتداوَلة لدينا بالفعل في نظام سطح الأرض؛ لأنها تستهلك قَدرًا أقل من الطاقة. على سبيل المثال، تتطلب إعادة تدوير الحديد (والصُّلب) حوالي ربع الطاقة اللازمة لتكريره من خام الحديد فقط. وكما هو متوقَّع، فإنَّ حوالَي نصف كمية الصُّلب المُستخدَم في الإنشاءات الجديدة في أمريكا الشمالية مُعادٌ تدويرها، مع أنَّ أمريكا الشمالية تشتهر باستخراج أجود أنواع المعادن الخام منذ فترةٍ طويلة. وبالطبع إذا كانت الكمية الإجمالية للعناصر المُستخدَمة في المجتمعات تتزايد — كما هو الحال مع الحديد على مستوى العالم — فلا بد من وجود مُدخلات (تأتي في هذه الحالة من القشرة الأرضية). ولكن مع ثبات عدد السكان، يُمكِننا أن نتوقع ثبات الحجم الإجمالي للبِنية التحتية المُنشأة.

تُعَد بعض المواد أساسية لبقائنا على قيد الحياة، مثل الفوسفور والنيتروجين في غذائنا، اللذين تُستمد كميةٌ كبيرة منهما من استخدام الأسمدة. وتُعَد كمية النيتروجين الإجمالية في الغِلاف الجوي هائلةً جدًّا لدرجة أنه لن يصبح شحيحًا ولن يحدَّ من النمو البيولوجي أبدًا، ما دام لدينا مصدرُ طاقة مُستدام لتثبيته. غير أنَّ الآونة الأخيرة شهدَت بعض المخاوف من أنَّ احتياطيات الفوسفات الصخري يمكن أن تصبح شحيحةً إلى درجة تحدُّ من النمو البيولوجي، ومن أننا ربما نقترب من «ذروة إنتاج الفوسفور». وهذا يعني اللجوء إلى احتياطيات تتَّسم بأنها أقل تركيزًا أو يُعَد الوصول إليها أصعب؛ الأمر الذي يرفع الأسعار. وسواء أكانت هذه الذروة قريبة أم بعيدة، فمن الواضح أننا نحتاج إلى التفكير في آلياتٍ أكفأ بكثير لاستخدام الفوسفور وإعادة تدويره.

حدودٌ كوكبية

من الممكن أن يتجاوز تراكُم نُفايات المواد الناتجة من الأيض الصناعي حدودَ قدرة نظام الأرض على أداء وظائفه وممارسة عملياته على نحوٍ صحي آمن. ويُعَد مفهوم الحدود الكوكبية محاولةً لتعريف هذه الحدود وما يكافئها من «حيِّز آمن لممارسة أنشطة الحياة البشرية» (شكل ٧-٢). وإذا تجاوزنا هذه الحدود، فسيُجبَر نظام الأرض على الخروج من حالة «شبه هولوسينية» مستقرة. وقد اقتُرحَت تسعةُ حدود إجمالًا، وهي تتضمن تغيُّر المناخ، وتحمُّض المحيطات، ونضوب الأوزون، والتدفقات البيوجيوكيميائية،



شكل ٧-٢: الحدود الكوكبية، وهي تُبيِّن «الحيِّز الآمن لممارسة العمليات والأنشطة البشرية» (داخل الدائرة الداخلية الداكنة المتحدة المركز)، ومنطقةً من عدم التيقن (بين الدائرة الداخلية والدائرة الخارجية الداكنة المتحدة المركز)، والحالة الحالية لسبعة حدود من أصل تسعة (المناطق المظللة باللون الرمادي).

واستخدام المياه العذبة، وتغيُّر استخدام الأراضي، وفقدان التنوع الحيوي («وَحْدة الغِلاف الحيوي»)، وجُسيمات الهَباء الجوي في الغِلاف الجوي، وكيانات جديدة من بينها التلوث الكيميائي. وقد اقتُرحَت قيمٌ رقمية لبعض هذه الحدود — عينت بأقل حد ممكن من عدم التيقن — من أجل البقاء ضمن «الحيِّز الآمن لممارسة العمليات البشرية». فعلى سبيل المثال، عُيِّن حدٌّ لتغيُّر المُناخ يساوي ٣٥٠ جزءًا في المليون من ثاني أكسيد الكربون؛ وهذا المستوى قد تجاوزناه بالفعل.

وفي حين أنَّ تعيين قيمة بعض الحدود الكوكبية محاطٌ بجدلٍ شديد، فإنَّ الفكرة الأساسية التي تفيد بوجود حدود لقدرة نظام الأرض على أداء عملياته على نحوٍ صحي

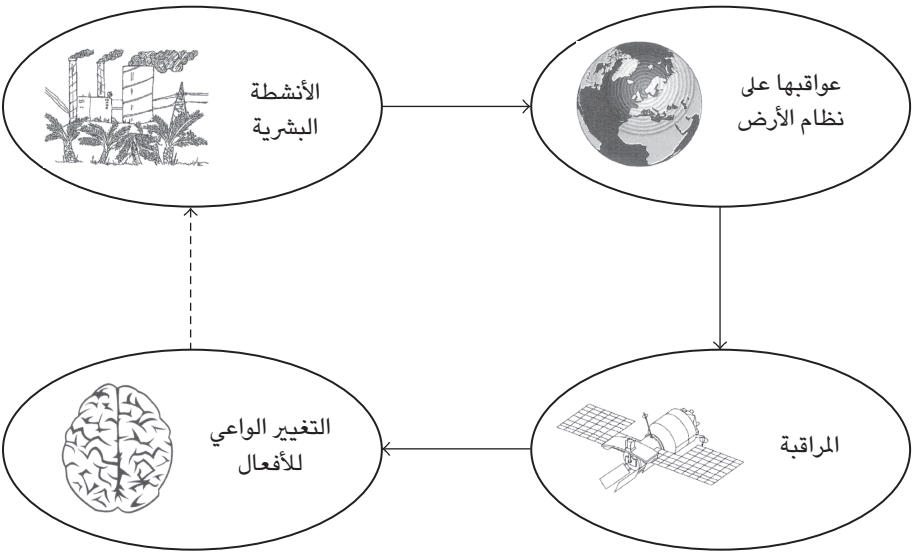
آمن تُعَد أقل إثارة للجدل. هذا ويمكن تجاوز بعض هذه الحدود حتى قبل الوصول إلى أقصى حدود الموارد المتاحة. فعلى سبيل المثال، تتوافر لدينا القدرة التكنولوجية على تدمير طبقة الأوزون بلا شك. وفوق ذلك، فالوقود الأحفوري المتوفر — الذي يُعَد معظمه من الفحم — يجعلنا قادرين على إخراج نظام الأرض من حالة عهد الهولوسين (أو العصر الرباعي حتى) التي يستقر فيها حاليًّا.

ومن المؤكَّد أننا نحتاج إلى استهلاك قَدرٍ معيَّن من الطاقة والموارد من أجل استدامة رفاهية البشر. أما بالنسبة لبعض المواد مثل الفوسفور، فإننا نجد تعارضًا بين احتياجنا الأساسي إلى إطعام البشر، والاحتياطيات المحدودة من الفوسفور، وعواقب استخدامه على البيئة. وكذلك تُوجد تعارضاتٌ ومفاضَلاتٌ محتملة بين الحدود الكوكبية. فعلى سبيل المثال، إذا اخترنا استخدام كمياتٍ أقل من الفوسفور والنيتروجين في الزراعة، وهذا يُقلِّل من غلَّة المحاصيل، فربما سيَلزم زيادة معدلات استخدام الأراضي لإطعام البشر، مع ما ينطوي عليه ذلك من تأثيراتٍ مصاحبة على التنوع الحيوي. وإذا تقبَّلنا وجود حدودٍ كوكبية ووجود مفاضَلات بينها، نحتاج إلى التصميم الواعي لطرقٍ مستدامة لممارسة أنشطتنا ضمن نطاق هذه الحدود.

نظام تغذية مرتدة ذو وعي ذاتي

يُعَد الوعي البشري — على حد علمنا — خاصيةً جديدة تمامًا من خواصِّ نظام الأرض. وعندما يتحد هذا الوعي مع قدرتنا التكنولوجية على تغيير العالم، يمكن أن يُنشئ نوعًا جديدًا من السيطرة على التغذية المرتدة في نظام الأرض. فكل التغذيات المرتدة التي ساعدَت على استقرار نظام الأرض (وتلك التي زعزعَت استقراره) حتى الآن قد نشأت وأثَّرَت دون وعي منا. ومن ثَم، فمن المحتمل في المستقبل أن نستطيع السيطرة على نحوٍ واعٍ على التغذية المرتدة، وفقًا للغاية من ورائها (شكل ٧-٣). ومن منظورٍ ما، نحن نفعل ذلك بالفعل.

في حين أنَّ رُوَّاد الثورة الصناعية وأبطالها لم يكونوا على وعي بأنهم يشرعون في تغيير المُناخ، فإننا لا نستطيع الآن أن ندَّعي أننا لا نعرف العواقب المُناخية لأنشطتنا الصناعية المستمرة. بل إنَّ أرينيوس، عندما نشر حساباته لتأثير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الاحترار العالمي في عام ١٨٩٦، كان يُدرِك أنَّ الأنشطة الصناعية تُضيف كميات من ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي وتؤدي إلى احترار المُناخ، وهو ما رآه أمرًا إيجابيًّا آنذاك. أمَّا الآن، فأصبحنا نرى عكس ذلك، وتُعَد الجهود المبذولة للتخفيف



شكل ٧-٣: مفهوم التغذية المرتدة وفقًا لغاية داخل نظام الأرض.

من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الصادرة من الوقود الأحفوري، وإن كانت محدودةً حتى الآن، بمثابة تغذيةٍ مرتدة سالبة واعية. فهي محاولةٌ ساعية إلى تقليل مدى التأثيرات السلبية المتوقعة بسبب تغيُّر المناخ من أجل البقاء داخل نطاق «الحدود الكوكبية».

تُعَد المراقبة ضروريةً لأيِّ نظام للسيطرة على التغذية المرتدة وفقًا للغاية من ورائها. وإذا كنا لا نعرف حالة نظام الأرض، فإننا لن نستطيع قياس مدى اقتراب أنشطتنا من أي أهداف نضعها أو ابتعادها عنها. وإلى الآن، يُعَد الدافع الأكبر وراء مراقبة نظام الأرض هو الفضول والرغبة في تسجيل عواقب أفعالنا. ونحن نعكف حاليًّا على مراقبة نظام الأرض على مجموعة من المستويات، من سطح الأرض إلى الفضاء، بدرجةٍ متزايدة من التفصيل المكاني والزماني. وما زالت تُوجد فجواتٌ هائلة في الرصد المكاني، مثل الفجوات الموجودة في مراقبة حالة دورة الكربون أو حالة التنوع الحيوي أو حالة أعماق المحيطات. بل تُوجد أيضًا بعض الفجوات في الأرصاد الزمانية، وخصوصًا في إنشاء نماذجَ محاكيةٍ لها قبل التاريخ الحديث. ومع ذلك يجري إحراز بعض التقدم، مثل التقدم المُحرَز في مراقبة دورة انقلاب المحيط الأطلسي وإنشاء نماذجَ محاكيةٍ لسلوكها في الماضي.

إشاراتٌ تحذيرية مبكرة

بالإضافة إلى أنَّ هذه الأرصاد تُسجل التغيرات المنتظمة في نظام الأرض، يُمكنها أن تُقدِّم إشاراتٍ تحذيريةً مهمة بخصوص قُرب حدوث أي تغييراتٍ مفاجئة. الفكرة ببساطة أنَّ النظام الذي يفقد الاستقرار يُصبح أكثر حساسيةً للاضطرابات تدريجيًّا. وهذا يعني أن التعافي من أي اضطراب سيستغرق وقتًا أطول (أي إن النظام يفقد مرونته)، كما أنَّ النظام يميل كذلك إلى الانحراف عن طبيعته بدرجةٍ أكبر تحت تأثير اضطراب معيَّن (أي تزداد قابليته للتغير). ولا نحتاج إلى إحداث اضطراباتٍ متعمدة في النظام لرصد هذه الإشارات، بل تُعَد قابلية التغير الداخلية المتأصلة في نظام الأرض بمثابة مصدر مستمر لـ «التشوش» الذي يُمكننا رصد استجابات النظام له. فإذا رأينا أجزاءً من نظام الأرض تُصبح أكثر تباطؤًا في استجابتها للتقلبات الطبيعية، يُشير ذلك إلى أنها تفقد المرونة.

وقد اكتُشفَت مثل هذه الإشارات التحذيرية المبكرة قبل بعض التغيرات المناخية المفاجئة في الماضي، وفي بعض عمليات المحاكاة النموذجية التي طُبِّقَت على بعض نقاط التحول، مثل انهيار دورة انقلاب المحيط الأطلسي. وفي الواقع، يمكن أن تقدِّم لنا تلك الإشارات أدلةً مفيدة فيما يتعلق بتحديد أجزاء نظام الأرض التي تُصبح أقل مرونة؛ ومن ثَم تعطينا تلميحًا إلى إجراءات التدخل المناسبة.

خيارات الاستجابة

يمكن تصوُّر العديد من خيارات الاستجابة للتحذيرات المبكرة من أنَّ أحد أجزاء نظام الأرض يفقد استقراره، أو من أننا نقترب من أحد الحدود الكوكبية بعينه. ولعل أوضح الاستراتيجيات وأكثرها تماشيًا مع المنطق هو أن نُحاوِل التخفيف من السبب الجَذري الذي أدى لحدوث التغيير. وقد استُخدِمَت هذه الاستراتيجية بنجاح في تقليل انبعاثات مركَّبات الكلوروفلوروكربون التي تستنفد الأوزون على مستوى العالم، والتعامل مع تلوُّث الهواء ومع زيادة المواد المُغذية في المياه العذبة والبحار الساحلية، على المستوى الإقليمي على الأقل. ولكن ما زال أمامنا طريقٌ طويل لمعالجة مشكلة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية الصادرة من الوقود الأحفوري؛ لأنها من الركائز الأساسية التي يقوم عليها نظامنا الاقتصادي الحالي. ولكن تُوجد بعض إجراءات التدخل الممكنة الأخرى.

عند رصد فقدان للمرونة في أحد أجزاء نظام الأرض، يُمكن التدخل بطريقةٍ واعية من أجل تقوية بعض التغذيات المرتدة السالبة للحفاظ على حالة الأرض المنشودة. ومن

أمثلة ذلك أننا إذا رصَدنا ضَعف مصرف الكربون على اليابسة، فإننا نتدخل لمحاولة تقويته. ويُمكن أن يتم ذلك عن طريق وقف إزالة الغابات، وتَعمُّد التشجير. وكذلك يُمكن أن يحدُث بتقليل حرث الأراضي الزراعية لمساعدتها على تخزين كربون التربة، أو تحويل الكتلة الحيوية إلى فحم وإضافتها إلى التُّربة على أنها «فحمٌ حيوي» طويل العمر. ومن الممكن أن يشتمل أيضًا على إضافة بعض معادن السيليكات المسحوقة إلى التربة في محاولةٍ متعمَّدة لتحسين التجوية. وهكذا يمكِن أن تُحقِّق هذه الأساليبُ فوائدَ محلية لمرونة نظام إيكولوجي معيَّن، مثل تقليل تآكل التربة، وتحسين الاحتفاظ بالمياه والمواد المغذِّية، ومكافحة تأثير التحمُّض. وكذلك اقتُرحَت طرقٌ أخرى لتعمُّد إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي، مثل استخلاصه من الهواء مباشرة. وسيتوجَّب مراقبة كل هذه الطرق للتحقق من تأثيراتها على دورة الكربون.

أسفرَت فكرة إكساب نظام الأرض بعض المرونة (أي تعزيز بعض التغذيات المرتدة السالبة) عن اقتراحٍ منطقي أجرأ، وهو تَعمُّد تعزيز بعض التغذيات المرتدة الموجبة من أجل تحفيز الانتقال من حالةٍ غير منشودة إلى حالةٍ منشودة. ومن أمثلة ذلك اقتراحات لتخضير (أي استصلاح) أجزاء من منطقتَي «الساحل الأفريقي» و«الصحراء الكبرى»، أو الصحراء الأسترالية. فبعض الأرصاد تشير إلى أنَّ هذه المناطق كانت تتسم بحالةٍ أكثر اخضرارًا ورطوبةً في الماضي، واستطاعت تلك الحالة الحفاظ على ذاتها بفضل الغطاء النباتي. هذا وقد طُرِح بالفعل تصورٌ لمشروع يُسمى «الجدار الأخضر العظيم» لوقف التصحُّر في منطقة «الساحل» من خلال زراعة حزام من الأشجار. وربما يُساعِد تعزيزُ ذلك بإمدادات من مياه البحر المُحلاة والمواد المُغذِّية على تمكين انتقال منطقة «الصحراء الكبرى» إلى حالةٍ خضراء مستقرة.

بل تجري كذلك مناقشة إجراء تدخلات متعمَّدة أوسع نطاقًا في النظام المُناخي تحت شعار «الهندسة الجيولوجية» (أو «هندسة المناخ»). وبالأخص، تشتمل طرق «إدارة الإشعاع الشمسي» على محاولة عكس كميةٍ أكبر من ضوء الشمس وإعادتها إلى الفضاء لتخفيض درجة حرارة الكوكب. وتتمثل إحدى الطرق التي تُناقش كثيرًا لتحقيق ذلك في حَقن جُسيمات هَباء الكبريتات (البالغة الصغر) في طبقة الستراتوسفير لتُنشِئ تأثيرًا مُحاكيًا للتأثير التبريدي الذي نتج من ثوراناتٍ بركانية سابقة في الماضي. وتُعَد هذه تقنيةً فعَّالة جدًّا لأنها لا تتطلب سوى كتلةٍ متواضعة من الهَباء الجوي لإلغاء تأثير الاحترار الناجم عن الكتلة الهائلة التي نُضيفها من ثاني أكسيد الكربون إلى الغِلاف الجوي.

غير أنَّ هذه الجُسيمات قصيرةُ العمر؛ لذا سيتعين تجديدها باستمرار طوال قرون عديدة لتجنُّب إظهار تأثير الاحترار العالمي المُكثَّف الكامن. وبادئَ ذي بدء، لا نعرف بالضبط كمية جُسيمات الهَباء الجوي اللازمة لإنتاج درجةٍ معينة من التبريد، ولسنا على درايةٍ دقيقة بتأثيراتها الجانبية على جوانبَ أخرى من نظام الأرض، مثل أنماط هطول الأمطار. ومن ثَم، يجب مراقبة تأثيرات أي مخطَّط هندسي جيولوجي كهذا مراقبةً واعية، وضبط إجراءات التدخل وفقًا لذلك، وهذا سيكون مثالًا على التغذية المرتدة التي تتفق مع غايةٍ معيَّنة.

وصحيحٌ أنَّ هذه المقترَحات قد تُحدِث تهديدًا أكبر من التهديد الذي تُحاوِل تجنُّبه أصلًا. لكنها تُفيد في توضيح أننا قد نكون على أعتاب توجيه المسار المستقبلي لنظام الأرض توجيهًا واعيًا. بل من المرجَّح أننا قد فعلنا ذلك بالفعل، ولكن في سياقٍ مختلف. فكما أوضح أوليفر مورتون، كانت «الثورة الخضراء» جهدًا مُصمَّمًا بوعي لإثراء أجزاءٍ كبيرة من سطح اليابسة على مستوى العالم بالمواد المُغذية من أجل توفير المقوِّمات اللازمة لاستمرار حياة سكان العالم الذين يتزايد عددهم بوتيرةٍ سريعة. وكذلك أسفرَت عن فائدةٍ جانبية (غير متوقَّعة على الأرجح) ألا وهي حمايةُ مساحاتٍ شاسعة من اليابسة من التجريف.

اقتصاديات نظام الأرض

تتطلب معظم الأنشطة الساعية إلى تحقيق استدامةٍ طويلة الأمد تعاونًا، وتُفيد أفرادًا آخرين من بَني نوعنا (كما تعود بالفائدة على الغِلاف الحيوي). أمَّا فكرة إنشاء تغذيةٍ مرتدة عالمية لها غايةٌ معيَّنة، فتبلغ حدًّا أبعد من ذلك، وستنجح نجاحًا فعَّالًا في تمثيل مستوًى جديد من التنظيم الحيوي قادر على التحكم في البيئة العالمية. غير أنَّ نظرية التطور تُخبرنا بأنَّ التعاون مشهور بعدم الاستقرار؛ لأنه مُعرَّض لـ «الغش» من بعض المتطفلين الانتهازيين الذين يتمتعون بالفوائد دون أن يُسهِموا في التكاليف. ويؤكِّد تاريخ الأرض أن نجاح نشوء مستوياتٍ جديدة من التنظيم الحيوي — مثل الخلية الحقيقية النوى، أو المجموعات الاجتماعية من الحيوانات — أمرٌ نادر الحدوث. لكنَّ التاريخ البشري يُظهِر قدرًا غير عادي من الانتخاب على مستوى المجموعات، ويُمكِن اعتبار التقدم الاجتماعي الحديث جهدًا واعيًا راميًا إلى تحرير أنفسنا من قيود الانتخاب الطبيعي التي أحيانًا ما تكون وحشية.

ويتجسد التعارض بين سعي بعض الأفراد إلى جَني أقصى قَدرٍ ممكن من المنافع الشخصية على المدى القصير وبين المصلحة العامة للنظام ككلٍّ على المدى الطويل في «مأساة المشاعات». الفكرة باختصار أننا كلنا، كأفراد، نسعى إلى زيادة رفاهيتنا الشخصية، في حين أنَّ البيئة مورد نتشاركه جميعًا. ومن ثَم، فأي شيء نفعله لتحسين البيئة (أو جعلها أسوأ) سيحل تأثيره على الجميع، بمن فيهم أولئك الذين لم يبذلوا أي جهد بأنفسهم. «المأساة» أنَّ تقسيم التكاليف والفوائد غير متكافئ؛ لذا فإن المسار المنطقي الذي تتخذه تصرفات الأفراد القصيرة المدى من المُرجَّح أن يكون هو تلويث البيئة المشتركة، حتى وإن كان هذا أسوأ للجميع على المدى الطويل. وتكمنُ الآن «مأساة» كهذه في استخدام المشاعات العالمية؛ أي الغلاف الجوي والمحيطات. ولكن من حُسن الحظ، تُوجد عدة طُرق للخروج من هذه «المأساة»، مثل اللوائح التنظيمية الجماعية التي تُحدِّد قيمةً مالية لتلويث البيئة. وفيما يتعلق بتغيُّر المناخ، تُحدِّد هذه اللوائح قيمةً مالية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وغيرها من انبعاثات غازات الدفيئة (ومكافأة مناظرة مقابل إزالة هذه الغازات).

غير أنَّ هذا التحول في تحديد القيمة المالية لا يُغيِّر نموذج النمو الاقتصادي جَذريًّا، بل يُحاوِل توجيهه في اتجاهٍ مختلف فحسب. ويُوجد بالفعل دليل على فصل النمو الاقتصادي عن تراكُم نُفايات المواد الناتجة، من خلال التحول نحو اقتصادٍ قائم على تبادل المعلومات بدلًا من تبادل المواد. وربما يحصُل ذلك على دفعةٍ تشجيعية بإدخال لوائحَ تنظيميةٍ مدروسة بوعي تجعل إعادة تدوير المواد مفيدةً اقتصاديًّا. ولكن يظل تخزينُ المعلومات وتبادُلها يتطلب طاقة ومواد، بالإضافة إلى أنَّ الفوائد التي يُمكِن تحقيقها من زيادة الكفاءة محدودة أصلًا بموجب القانون الثاني للديناميكا الحرارية. لذا يستحيل فصل الاقتصاديات عن نظام الأرض فصلًا تامًّا. وقد أقرَّ آدم سميث بأنَّ هذا يعني أنَّ النمو الاقتصادي لا يمكن أن يستمر إلى ما لا نهاية. ولذا ما زال يتعيَّن صياغةُ حالةٍ مستقرة لـ «اقتصاديات نظام الأرض» تدعم رفاهية الإنسان وسلامة الكوكب على المدى الطويل.

توسيع المجال

إذا اعتبرنا أنفسنا ومجتمعاتنا جزءًا لا يتجزأ من نظام الأرض، وتعامَلنا مع الخصائص الجديدة التي يُضفيها البشر على نظام الأرض بجدية، فهذا يتطلب نوعًا جديدًا من علم نظام الأرض. وهذا النوع يجب أن يضُم عناصر من العلوم الاجتماعية، على الأقل بالقَدر الذي يساعدنا على فهم دور الفاعلية البشرية في سريان آليات الكوكب وعملياته. ويُمكن

أن يُغير ذلك طبيعة نماذج نظام الأرض والطرق التي نستخدمها بها. فبدلًا من إجراء تنبؤات بناءً على مجموعة من الافتراضات عن الأنشطة البشرية المستقبلية — كما لو كنا نعيش خارج النظام — يمكن أن تصبح الأنشطة البشرية والفاعلية البشرية جزءًا متأصلًا بدرجةٍ أكبر في النماذج. بالمثل، تستدعي عملياتُ دراسة نظام الأرض إعادةَ التفكير في الاقتصاديات ونقاشات اجتماعية أوسع عن نوع المستقبل الذي ننشُده، والذي سيضُم الفنون والعلوم الإنسانية وكذلك العلوم الاجتماعية.

الفصل الثامن

التعميم

يمنحنا هذا الكتاب مقدمة إلى الكيفية التي يُمكن بها دراسة كوكب واحد صالح للحياة — وهو الأرض — بصفته نظامًا. غير أنَّ العلماء توصَّلوا في السنوات القليلة الماضية إلى الاكتشاف اللافت باحتمالية وجود كواكبَ صالحة للحياة تدور حول نجوم أخرى. وكما تغيَّرَت وجهة نظرنا عن كوكبنا والكيفية التي نَدرُسه بها عندما رأيناه لأول مرة من الفضاء، فإنَّ «رؤيتنا» الأولى لكوكب يشبه الأرض حول نجمٍ آخر ستُغيِّر منظورنا مرةً أخرى بالتأكيد. ومن ثَم، يستكشف هذا الفصل الختامي كيف يمكن تعميم فهمنا لنظام الأرض، وتحويله إلى علمٍ معني بالعوالم الصالحة للحياة في العموم.

عمر الغلاف الحيوي

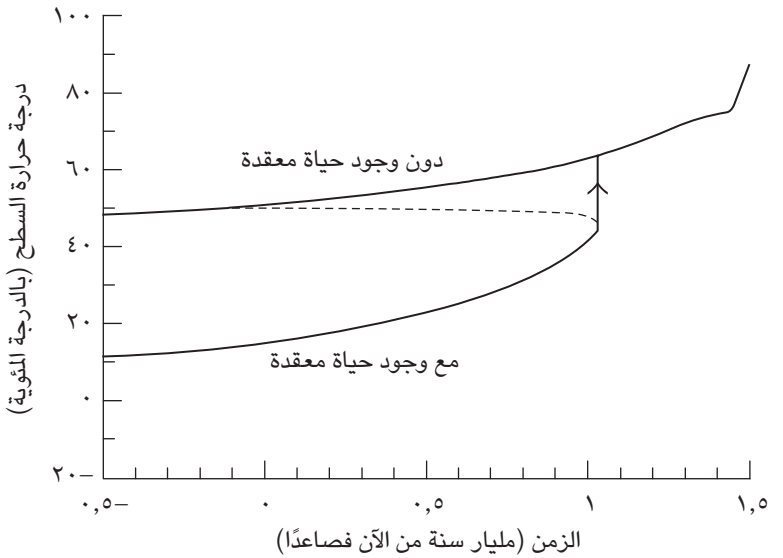
إذا استطاع البشر إيجاد علاقة مستدامة مع نظام الأرض، فربما يظل نوعنا البشري باقيًا حوالَي مليون سنة، وهذا هو العمر النموذجي لنوع من الثدييات. وإذا كنا محظوظين (أو أذكياء جدًّا) فربما نستطيع مدَّ هذا العمر إلى عشرة ملايين سنة. فحياة الكائنات المعقَّدة يُحتمل أن تستمر فترةً طويلة على الأرض، وكذلك حياة بدائيات النوى يمكن أن تستمر فترةً أطول، ولكنَّ كلتَيهما لا يمكن أن تستمرَّا إلى الأبد.

وتكمُن المشكلة في أنَّ وهج احتراق الشمس، مثلها مثل كل النجوم المنتمية إلى «النسق الأساسي» (أي التي تُولِّد الطاقة بالدمج النووي للهيدروجين محوِّلةً إياه إلى هيليوم)، يزداد سطوعًا بلا توقف مع مرور الزمن — إذ تزداد شدة السطوع بمقدار حوالي ١ في المائة كل ١٠٠ مليون سنة — وهذا سيؤدي في النهاية إلى أنَّ حرارة الكوكب ستتجاوز الحد المسموح به. ويزداد الأمر سوءًا بفعل بعض التغذيات المرتدة الموجبة؛ إذ يؤدي التسخين إلى تبخير الماء إلى الغِلاف الجوي؛ مما يؤدي إلى حبس كميةٍ أكبر من الحرارة. وتُعَد هذه

أقوى آليات التغذيات المرتدة الموجبة في نظام المُناخ بالفعل، ومن المُتوقَّع أن تزداد قوةً مع ازدياد تشبُّع الغلاف الجوي المُحتَر ببخار الماء؛ مما يجعله أكثر إعتامًا فيسمح بنفاد كميةٍ أقل من الإشعاع المنبعث من الأرض. وسيُسفِر ذلك في النهاية عن «جموح تأثير الدفيئة» وخروجه عن السيطرة، وعندئذٍ لن تستطيع الأرض أن تُعيد الحرارة إلى الفضاء بنفس الوتيرة السريعة التي تأتي بها منه. ومع تصاعُد درجة الحرارة، ستتبخر المحيطات.

وقبل حدوث هذا الجموح المتوقع، سيحدُث تأثيرٌ مميت يُسمى «تأثير الدفيئة الرطب»؛ إذ سيُصبح الغلاف الجوي مثل قِدر الضغط البخاري؛ وهو ما يؤدي إلى ارتفاع نقطة غليان المحيطات المتبقية، وتمدُّد الجزء السفلي من الغِلاف الجوي. وستصل جُزيئات الماء إلى الغِلاف الجوي العلوي وتتفكَّك بسبب الإشعاع الشديد هناك؛ مما يُسفِر عن فقدان الهيدروجين الذي تحويه وانتقاله إلى الفضاء وتجفيف الكوكب تمامًا. وقبل فقدان كل كمية الماء على الكوكب، ستكون درجات الحرارة قد صارت أعلى من أن تتحملها الكائنات الحية المعقدة. إذ يبلغ أقصى حد تستطيع حقيقيات النوى أن تتحمَّله من درجة الحرارة حوالَي ٥٠ درجةً مئوية، في حين أن بعض أشكال حياة بدائيات النوى «التي تستطيع العيش في الظروف المتطرفة» يُمكنها أن تتحمَّل أكثر من ١٠٠ درجةٍ مئوية (إذا أسفر ضغطٌ إضافي عن رفع درجة غليان الماء فوق هذا الحد). لذا من المرجَّح أن يعود نظام الأرض إلى عالَم مكوَّن من العتائق والبكتيريا قبل أن يجفَّ تمامًا.

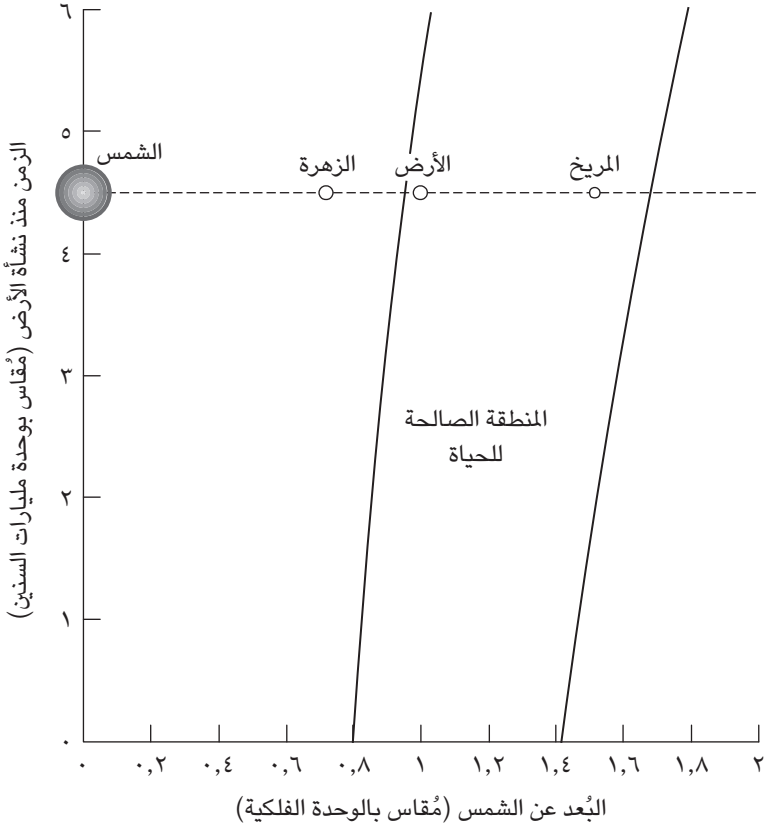
فهل يمكن تأخير هذا المصير النهائي الذي ينتظر الحياة؟ استطاعت آلية التغذية المرتدة السالبة المتمثلة في تجوية السيليكات، على مَرِّ تاريخ الأرض، إبطالَ تأثير ازدياد سطوع الشمس المستمر بإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي. غير أنَّ هذه الآلية التبريدية صارت قريبةً من أقصى حدود فاعليتها؛ لأنَّ ثاني أكسيد الكربون انخفض إلى مستوياتٍ ضئيلة تحدُّ من نمو معظم النباتات، التي تُعَد من أبرز عوامل تعزيز تجوية السيليكات. وبالرغم من تطوُّر مجموعة فرعية من النباتات قادرة على أداء عملية التمثيل الضوئي بمستوياتٍ منخفضة من ثاني أكسيد الكربون، فإنها لا تستطيع استخلاص ثاني أكسيد الكربون عند انخفاض تركيزه إلى أقل من حوالي ١٠ أجزاء في المليون. وهذا يعني أنَّ الحياة أمامها مصيرٌ محتمل ثانٍ؛ وهو نفاد ثاني أكسيد الكربون. وقد توقَّعَت النماذج المبكرة إمَّا نفاد ثاني أكسيد الكربون أو ارتفاع درجة الحرارة فوق الحد الذي تتحمَّله الكائنات الحية (شكل ٨-١) بعد حوالي مليار سنة في المستقبل. وصحيح أنَّ هذا الوقت يبدو بعيدًا إلى حدٍّ مريح، لكنه يشير إلى أنَّ العمر المستقبلي للغِلاف الحيوي للأرض أقصر بكثير من تاريخه الماضي. أي إنَّ الغِلاف الحيوي للأرض يدخل في مرحلة الشيخوخة.



شكل ٨-١: توقع نموذجي لعمر الغِلاف الحيوي يشير إلى ارتفاع درجة الحرارة فوق الحد الذي تتحمَّله الكائنات الحية المعقدة وتحوُّل نظام الأرض إلى حالةٍ مستقرة أكثر حرارة (دون التعزيز الحيوي الناجم عن تجوية السيليكات)، يليها ما يُسمَّى بتأثير الدفيئة الرطب.

المنطقة الصالحة للحياة

تُوجد طريقةٌ أخرى للتفكير في حدود صلاحية الكوكب للحياة، وهي صلاحيته على النطاق المكاني وليس الزماني. إذ تُمثِّل المنطقة الصالحة للحياة (شكل ٨-٢) نطاق المسافات حول نجمٍ ما (أو ما يكافئه من نطاق مستويات شدة الإضاءة النجمية) الذي يستطيع فيه كوكبٌ صخري شبيه بالأرض دعم استمرار وجود الماء السائل على سطحه. فإذا كان الكوكب أقرب ممَّا ينبغي من نجمه الأم، فسترتفع درجة الحرارة فوق الحد المسموح به وتُفقَد المياه، وهذا يُمثِّل الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة. أمَّا إذا كان الكوكب أبعَدَ مما ينبغي عن نجمه الأم، فستنخفض درجة الحرارة تحت الحد المسموح به ويُفقَد الماء السائل بالتجمُّد، وهذا يُمثِّل الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للسكن. ويُعَد ذلك بمثابة المكافئ المكاني لـ «لغز الشمس الصغيرة الخافتة» الذي تعرَّفنا عليه في الفصل الأول.



شكل ٨-٢: تطوُّر المنطقة الصالحة للحياة حول الشمس مع مرور الزمن.

تُعرف الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة بأنها الحد الذي يُصبح عنده ثاني أكسيد الكربون المتراكم عاجزًا عن إبقاء الكوكب فوق درجة حرارة التجمد. بل إنَّ ثاني أكسيد الكربون عندما يصل إلى تركيزاتٍ عالية جدًّا يُصبح عاملًا تبريديًّا في المُجمل؛ لأنه عندئذٍ يُشتِّت من الإشعاع الشمسي الوارد كميةً أكبر من الكمية التي يحبسها من الإشعاع الحراري المنبعث من الكوكب. يُعرف هذا التأثير باسم «تشتُّت رايلي»، ويحدُث في كل جُزيئات الغاز الصغيرة (تجدُر الإشارة إلى أنَّ تأثير تشتُّت رايلي بفعل غازَي النيتروجين

والأكسجين السائدَين في الغِلاف الجوي حاليًّا هو ما يجعل السماء تبدو زرقاء ويجعل الشمس تبدو صفراء). وفي نهاية المطاف، سيُسفِر تشتُّت رايلي عن استحالة منع الأرض من التحول إلى كرةٍ ثلجية بفعلِ تراكُم ثاني أكسيد الكربون.

تُوجد مناطقُ صالحة للحياة حول جميع النجوم المنتمية إلى النسق الأساسي التي يزداد سطوع احتراقها بانتظام مع مرور الوقت؛ مما يزيح مناطقها الصالحة للحياة بعيدًا عنها باستمرار. وصحيح أنَّ النجوم تختلف في كُتلتها، وفي شدة سطوعها بالتَّبَعية، وهو ما يؤثِّر على موقع مناطقها الصالحة للحياة، ولكن يمكن عمَل حساب تأثير هذه العوامل في النماذج بسهولة. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ النموذج التقليدي المُستخدَم لتقدير حدود المنطقة الصالحة للحياة كان من ابتكار جيم كاستينج وبعض زملائه. ويفترض النموذج كوكبًا يُشبه الأرض من حيث الكتلة والضغط الجوي، ويتسم بنشاط تكتوني، وله دورة مائية. ومن ثَم، يفترض أن تحدُث التغذية المرتدة السالبة المتمثلة في تجوية السيليكات، وهذا يوسِّع عرض المنطقة الصالحة للحياة؛ إذ يعمل على إبطال تأثير تناقُص شدة السطوع (أي الابتعاد عن النجم) بزيادة ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي، وإبطال تأثير تزايُد السطوع (أي الاقتراب من النجم) بإزالة ثاني أكسيد الكربون. وبدون أن تضبط هذه التغذية المرتدة مستوى ثاني أكسيد الكربون، ستكون المنطقة الصالحة للحياة أضيق بكثير.

ووَفْق أحدث التقديرات الواردة من فريق كاستينج البحثي، تقع الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة حول الشمس حاليًّا خارج مدار المريخ (شكل ٨-٢) عند شدة سطوع تساوي ٣٥ في المائة من شدة سطوع الإشعاع الذي يصل إلى الأرض في الوقت الحاضر. وهذا يتفق مع الدليل على أنَّ سطح المريخ قد شهد تدفق مياه سائلة على سطحه في الماضي. ولكن يُتوقَّع أنَّ المريخ في مراحل حياته المبكرة، حين كانت الشمس أخفتَ وأصغرَ عمرًا، كان واقعًا خارج الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة، ويعني صِغَر حجمه (إذ تساوي كتلته ١٠ في المائة من كتلة الأرض، وما يصاحب ذلك من جاذبيةٍ ضعيفة ومجالٍ مغناطيسي غير منتظم) أنه الآن قد فقد مُعظم غِلافه الجوي ومياهه في الفضاء. ويُقدَّر أنَّ كوكب الزهرة دائمًا ما كان موجودًا داخل الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة، وهذا يتوافق مع تعرُّضه لمستوًى جامح من تأثير الدفيئة. وفي الواقع، يُقدَّر أنَّ الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة تُعَد الآن قريبة من كوكب الأرض إلى حدٍّ خطير؛ لأنَّ مجرد حدوث زيادة بسيطة تتراوح بين ١ و٣ في المائة في شدة سطوع الشمس

سيُودي بالأرض إلى مصير تأثير الدفيئة الرطب أو الجامح. ويُشير هذا إلى أنَّ الوقت المتبقي من عمر غِلاف الأرض الحيوي يتراوح بين ١٠٠ و٣٠٠ مليون سنة فقط، ولكن ينبغي النظر إلى ذلك على أنه أدنى تقدير؛ لأنه قائم على نموذج بسيط يتجاهل دوَران الغِلاف الجوي والتغيرات الحادثة في الغطاء السَّحابي. ويُتيح مثل هذا النموذج، الذي خُفِّضَت تقديراته عمدًا لأغراضٍ تحذيرية، نقطةَ انطلاقٍ جيدة لتقدير المناطق الصالحة للحياة حول النجوم الأخرى، وبذلك يقدِّم مساعدةً إرشادية لمساعي البحث عن الكواكب التي يُحتمل أن تكون صالحةً للحياة عليها خارج المجموعة الشمسية.

الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية (الكواكب الخارجية)

شهد العقدان الماضيان وحدهما اكتشاف آلاف من الكواكب تدور حول نجوم أخرى. وحتى وقت كتابة هذا الكتاب، تأكَّد وجود أكثر من ١٥٠٠ «كوكب خارج المجموعة الشمسية»، وعُثِر على أكثر من ٣٠٠٠ جسم آخر «يُحتمل» أن تكون كواكب خارج المجموعة الشمسية، وقد اكتُشفَت معظم هذه الكواكب بمرصد كبلر الفضائي، الذي يكتشف الكواكب إذا كانت «تعبُر» بيننا وبين نجمها الأم، مما يُسبِّب خفوتًا في الضوء النجمي الذي يصل إلينا. (يُتوقَّع أنَّ نسبةً مقدارها أقل من ١ في المائة من مدارات الكواكب الشبيهة بالأرض تمُرُّ عَبْر خط الرؤية بيننا وبين أي نجم؛ ولذا فإنَّ عدد النجوم التي رصَدها مرصد كبلر يبلغ أكثر من ١٩٠ ألف نجم.) وقد أعطتنا هذه العيِّنة الكبيرة فكرةً عن الشكل النموذجي للكواكب والشكل النموذجي للأنظمة الكوكبية. فالنجم يدور حوله كوكبٌ واحد على الأقل في المتوسط. ويتراوح نصف قُطر أكثر أنواع الكواكب شيوعًا بين قيمة تساوي نصف قطر الأرض وقيمة أكبر منه أربع مرات — أي تصل إلى نصف قطر كوكب نبتون — مما يجعل مجموعتنا الشمسية حالةً شاذة؛ لأنها لا تحوي كواكب ذات حجم واقع ضِمن هذا النطاق المتوسط من الأحجام. وإذا نظرنا إلى «الكواكب الأكبر كتلةً من الأرض» التي تقع خارج المجموعة الشمسية، ويتراوح نصف قطرها بين قيمة مساوية لنصف قطر الأرض وقيمة مساوية لضِعفه، نجد أنها شائعة بما يكفي لدرجة أنَّ حوالي ١٠ في المائة من نجوم النوع «جي» الشبيهة بالشمس يُقدَّر أنَّ لديها واحدًا من هذه الكواكب في المنطقة الصالحة للحياة حولها. وترتفع النسبة إلى مقدار يتراوح بين ٤٠ و٥٠ في المائة حول نجوم النوعَين «إم» و«كيه» الأبرَد والأخفَت التي رصدها مرصد كبلر. لذا ففي المرة القادمة التي تتأمل فيها سماء الليل، فكِّر في الفكرة المذهلة أنَّ نجمًا واحدًا

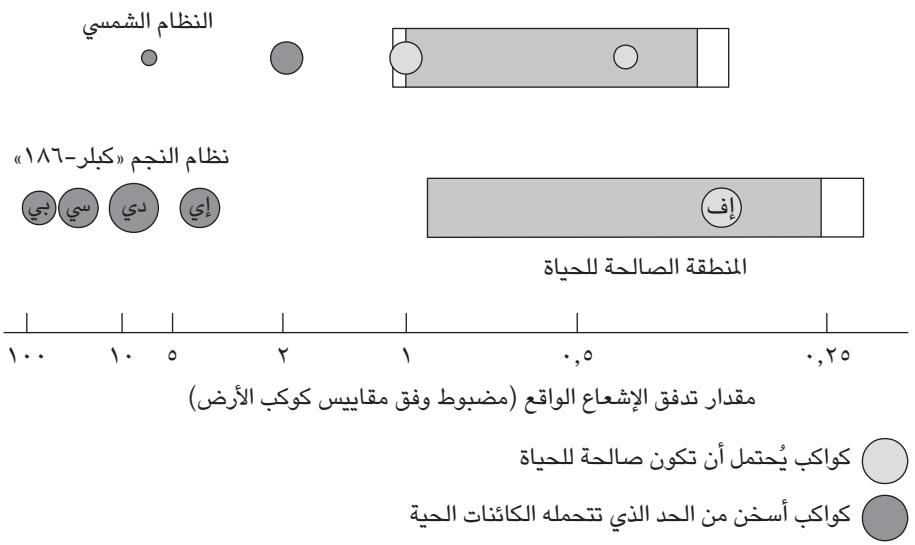
على الأقل من بين كل عشرة نجوم تراها يمكن أن يكون له كوكبٌ مجاور يحمل مياهًا سائلة على سطحه.

وبدءًا من أواخر عام ٢٠١٤، يُعَد أقربُ كوكب مُرشَّح ليكون أحد توائم كوكب الأرض هو الكوكب الذي أُطلقَ عليه، في تسميةٍ عادية غير مميزة بعض الشيء، اسم «كبلر-١٨٦إف»؛ وهو كوكب يُساوي نصف قطره نصف قطر الأرض ١,١ مرة تقريبًا، ويدور حول نجم نموذجي من نجوم النوع «إم». وتجدُر الإشارة إلى أنَّ «كبلر-١٨٦إف» هو الأبعد من بين خمسة كواكب عن نجمه الذي يدور حوله على بُعد حوالَي ٤٠ في المائة من مسافة بُعد الأرض عن الشمس. ولأنَّ نجمه أبردُ وأخفتُ من الشمس، فإنَّ هذا يجعل كوكب «كبلر-١٨٦إف» واقعًا في قلب المنطقة الصالحة للحياة حول نجمه، باتجاه الحافة الخارجية، في موضع «يشبه موضع المريخ في المنطقة الصالحة للحياة» (شكل ٨-٣). وإذا كان كوكب «كبلر-١٨٦إف» لديه غِلافٌ جوي غني بثاني أكسيد الكربون، ولديه ماء، فمن المحتمل أن يكون بعض هذا الماء موجودًا في صورةٍ سائلة على سطحه.

لا يمكن ضمان وجود كميات وفيرة من ثاني أكسيد الكربون والماء على كوكبٍ ما؛ لأنهما من المركَّبات «المتطايرة» التي تُعَد غير مستقرة عند درجات الحرارة المرتفعة بالقرب من نجم صغير العمر عندما تتشكل الكواكب الصخرية لأول مرة. إذ يمكن أن يُحبسا في الوشاح ثم يُطلقا في صورةٍ غازية إلى الغِلاف الجوي، أو يجري جلبُهما إلى الكوكب بفعل التصادمات مع النيازك والمُذنَّبات الناشئة عند مسافةٍ أبعدَ من نجمه الأم. غير أنَّ بعض عمليات محاكاة تكوُّن المجموعة الشمسية تُشير إلى أنَّ حصول الكوكب على المواد المتطايرة من هذه التصادمات محضُ صدفة. ومن ثَم، فمع أنَّ كل الكواكب الواقعة في المناطق الصالحة للحياة خارج المجموعة الشمسية من المفترض أن تستمد بعض الماء وثاني أكسيد الكربون، من المرجَّح أن تتفاوت الكمية تفاوتًا كبيرًا، ومعها صلاحية الكوكب للحياة.

اكتشاف الحياة

لا شك أنَّ اكتشاف أنَّ حوالي نصف النجوم قد يكون حولها كوكبٌ صالح للحياة يُعزز بشدة من احتمالات وجود كواكبَ أخرى تُؤوي حياةً بالقرب منا في مَجرَّتنا. صحيحٌ أنَّ هذه الاحتمالات تعتمد أيضًا على سهولة تطوُّر الحياة أو صعوبة ذلك. غير أنَّ ظهور الحياة على كوكب الأرض ظهورًا سريعًا نسبيًّا بعد عصر «القصف الشديد المتأخر» يُلمح



شكل ٨-٣: مقارنة بين النظام الشمسي (الذي يقع فيه كوكبا الأرض والمريخ في المنطقة الصالحة للحياة) ونظام النجم «كبلر-١٨٦» (الذي يقع فيه كوكب «كبلر-١٨٦إف» في المنطقة الصالحة للحياة).

بالفعل إلى أنَّ نشوء الحياة ليس بهذه الصعوبة. السؤال هنا: هل نستطيع اكتشاف الحياة على كوكبٍ واقع خارج المجموعة الشمسية إذا كانت موجودة هناك؟

لا يمكننا أن نذهب فعليًّا إلى كوكبٍ واقع خارج المجموعة الشمسية. إذ تُشير التقديرات إلى أنَّ أقرب كوكب صالح للحياة من تلك الكواكب يَبعُد عنا حوالي اثنتَي عشرة سنةً ضوئية. وإذا افترضنا أنَّ مركبةً فضائية استطاعت بلوغ مُعدَّل معقول من سرعة الهروب من الشمس يصل إلى ١٠٠كم/ث، فسيستغرق وصولها إلى هناك ٣٦ ألف عام. وحتى بعد ذلك، سيكون التواصل مع من يصل إلى هناك بطيئًا وشاقًّا؛ لأنَّ انتقال إشارات التواصل في كل اتجاه سيتعرض لتأخير مُدَّتُه اثنا عشر عامًا. لذا نحتاج إلى وسيلة لاكتشاف الحياة عن بُعد بدلًا من ذلك.

وهكذا فإنَّ هذا يُعيدنا إلى البداية؛ إلى فكرة جيم لفلوك الأصلية التي اقترح فيها اكتشاف الحياة من خلال تأثيرها على تركيب الغِلاف الجوي للكوكب (الفصل الأول).

تذكَّروا أنَّ لفلوك اقترح أنَّ البصمة التي تتركها الحياة تتمثل في اختلال توازُن خليط الغازات المكوِّنة للغِلاف الجوي. ويُعَد وجود الميثان والأكسجين معًا في الغِلاف الجوي للأرض في الوقت الحاضر مثالًا على هذا الاختلال الشديد في التوازن. أمَّا الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية، فيمكن تصوُّر وجود خلائط غازات أخرى في أغلفتها الجوية تتسم بعدم الاتزان، ولكن ربما يكون بعضها، مثل ثاني أكسيد الكبريت وكبريتيد الهيدروجين، محفوظًا وباقيًا بسبب تصاعُد الغازات من الثورانات البركانية. لذا يجب أن يقتصر البحث على أزواج الغازات التي تتسم بعدم اتزان، والتي يبدو واضحًا أنها نشأت بفعلِ كائناتٍ حية، مثل زوج الأكسجين والميثان.

وتقوم طريقة اكتشاف تلك الأزواج على استخدام مطياف للبحث عن نطاقات الامتصاص (أي نطاقات الأطوال الموجية) الخاصة بالغازات المختلفة في طيف الإشعاع القادم من كوكبٍ واقع خارج المجموعة الشمسية. فبعض الغازات لها نطاقاتُ امتصاص أكثر من نطاقات امتصاص غيرها، ويعتمد الامتصاص في كل نطاق على تركيز الغاز. وهذا يُمثِّل مشكلة؛ لأن تلك الحالة الشديدة من عدم الاتزان تعني وجود غازَين متفاعلَين متعطشَين للتفاعل معًا بسرعةٍ كبيرة؛ مما يؤدي إلى تقليل تركيزاتهما. وفي حالة الغِلاف الجوي الحالي للأرض، فإنَّ هذا يجعل تركيز الميثان حوالي جزء واحد في المليون؛ مما يعني أن نطاقاتِ امتصاصه المتواضعة لن تكون قابلةً للاكتشاف إذا كنا نرصُد الأرض من نجمٍ آخر. وعلى الجانب الآخر، سيكون الأكسجين والأوزون الناتج منه قابلَين للاكتشاف.

أمَّا حول النجوم التي تنبعث منها أشعةٌ بنفسجية أقل من الأشعة التي تبُثها الشمس، فستتباطأ التفاعلات الكيميائية في الغِلاف الجوي تباطؤًا كبيرًا؛ مما سيُتيح زيادة تركيز الغازات، وربما سيسمح باكتشاف الميثان في وجود الأكسجين، أو غيره من أزواج الغازات التي تتسم بعدم الاتزان. غير أنَّ الباحثين يُحوِّلون اهتمامهم حاليًّا إلى اكتشاف غازاتٍ مفردة «ذات بصمةٍ حيوية». وفي حالة بعض الغازات التي يُمكِن إنتاجها بطريقةٍ غير حيوية، كالأكسجين، يُواجه هذا البحث مشكلة النتائج الإيجابية الكاذبة. ومن ثَم، فإحدى الطرق البديلة هي البحث عن الغازات التي لا تنتج إلا عن وجود حياة، مثل كبريتيد ثنائي الميثيل، أو الأيزوبرين، أو كلوريد الميثيل، لكنَّ تركيزات هذه الغازات عادةً ما تكون أقل بكثير.

بالرغم من التحفظات، فإنَّ احتمال العثور على كوكبٍ آخر مأهول لم يعُد خيالًا علميًّا. ومن الممكن أن يحدُث ذلك في العَقد المقبل. صحيحٌ أنَّ هذا يُعَد تحديًا تقنيًّا هائلًا؛

لأنه يتطلب تلسكوبات فضائية باهظة الثمن، لكنَّ البعثات الفضائية التي كان مُقرَّرًا إرسالها وقت كتابة هذا الكتاب تسير في الاتجاه الصحيح نحو الهدف المنشود. وتجدُر الإشارة هنا إلى أنَّ «قمر البحث عن الكواكب الخارجية بطريقة العبور الفلكي»، الذي كان مُقرَّرًا إطلاقه في عام ٢٠١٧، سيمشِّط السماء كلها بحثًا عن كواكبَ صخريةٍ حول النجوم الساطعة القريبة. ومن المفترَض أن يُسفِر هذا عن العثور على «كواكبَ مُحتمَلة شبيهة بالأرض خارج المجموعة الشمسية» في المنطقة الصالحة للحياة حول نجومها التي تُعَد أقرب بكثير، وأشد سطوعًا بالتبعية، من تلك التي وجدها مرصد كبلر. ومن المقرَّر بعدئذٍ، أن يمتلك تلسكوب جيمس ويب الفضائي، الذي كان مُقرَّرًا إطلاقه في عام ٢٠١٨، دقة الوضوح اللازمة لبدء توصيف أغلفتها الجوية في أثناء عبورها أمام نجمها الأم. فإذا كانت الحياة موجودة وكنا محظوظين، فسيستطيع اكتشاف حياة فضائية. وإن لم يحدُث ذلك، فسينشأ جيلٌ آخر من التلسكوبات الفضائية «يستبعد» ضوء النجوم الأم أو يحجُبه، وهذا سيُعزِّز بشدة من احتمالات تحليل تركيب الأغلفة الجوية.

مُناخ الكواكب الخارجية

إنَّ الاكتشافات الحديثة التي عُثر فيها على كواكبَ خارج المجموعة الشمسية واحتمالات اكتشاف الحياة عن بُعد تجعل الوقت الحالي مناسبًا لبدء صياغة عِلم مَعني بالكواكب الصالحة للحياة بوجهٍ عام، وليس الأرض بالذات فقط. وقد بدأ بعض الباحثين بالفعل تعميمَ نماذجَ ثلاثية الأبعاد خاصة بمُناخ الأرض واستخدامها لمراجعة بعض التقديرات المتعلقة بالمنطقة الصالحة للحياة. وما يُساعدهم على ذلك أنَّ مبادئ الغِلاف الجوي ودورة المحيطات ثابتة في كل مكان، ومن بينها معادلات «نافييه-ستوكس» المَعنية بديناميكا الموائع، والجاذبية، وتأثير كوريوليس، الذي يعتمد على مُعدَّل دوران الكوكب. وقد أظهرَت دراساتٌ أولية أنَّ تأثيرات دوران الغِلاف الجوي يُمكن أن تُوسِّع الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة توسيعًا كبيرًا نحو النجم الذي تُوجد حوله؛ مما يؤخِّر حدوث تأثير الدفيئة الجامح. والسبب الرئيسي أنَّ الغِلاف الجوي الذي له ثلاثة أبعاد ويتضمَّن دورانًا من المُفترَض أن تظل فيه مناطقُ من الهواء النازل الجاف؛ ومن ثَم يُمكن أن تزداد فعالية هروب الإشعاع الحراري نحو الفضاء عَبْر تلك الأجزاء الأشد جفافًا من الغِلاف الجوي؛ مما يمنع جموح تأثير الدفيئة.

إذا أُخذ في الحُسبان بعضُ الكواكب التي تتسم بمعدَّلات دوران أبطأ من معدَّل دوران الأرض، فقد يؤدي ذلك إلى توسيع المنطقة الصالحة للحياة نحو الداخل أكثر وأكثر. إذ تُشير بعض عمليات المحاكاة إلى أنَّ غطاءً سَحابيًّا عميقًا سوف يتطور على الجانب النهاري من الكواكب البطيئة الدوران، فيعكس كثيرًا من الضوء الذي يتلقاه الكوكب من نجمه الأم إلى الفضاء. وكذلك فإنَّ انتقال الحرارة عَبْر الغِلاف الجوي سيكون فعالًا جدًّا، في ظل وجود خلايا كبيرة من الحَمل الحراري تمتد من خط الاستواء إلى القطبَين ومن الجانب النهاري من الكوكب إلى جانبه الليلي. ويُمكن أن تُسفِر هذه التأثيرات التبريدية عن توسيع الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة إلى الحد الذي يجعلها تتلقَّى ضِعف تدفُّق الإشعاع النجمي الذي تتلقاه الأرض، وبذلك تضُم في نطاقها كواكبَ قريبة من نجمها الأم قُربًا كافيًا للدرجة التي تجعلها «مقيدة تقيدًا مديًّا» به؛ حيث يبقى الكوكب مواجهًا للنجم بجانبٍ واحد دائمًا.

يبدو أنَّ الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة أقل قابليةً للتأثر بتحليل دوران الغِلاف الجوي والغطاء السَّحابي. لكن بعض النماذج الأكثر تطورًا تجد أنَّ الدخول في حالة «الكرة الثلجية» المتجمدة أصعب، وأنَّ الخروج منها أسهل، مما تقترحُه النماذج البسيطة. وعلى وجه التحديد، يمكن أن تُساعِد السُّحُب الموجودة فوق الغطاء الجليدي على إبقاء المناخ دافئًا؛ لأنها ليست عاكسة بدرجةٍ أفضل من الجليد الموجود تحتها، لكنها تحبس الإشعاع الحراري الصاعد من سطح الكوكب.

جيولوجيا الكواكب الخارجية

تفترض بعضُ التقديرات الحاليَّة للمنطقة الصالحة للحياة أن محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي للكوكب يمكن أن يستقر تلقائيًّا — بفضل التغذية المرتدة السالبة المتمثلة في تجوية السيليكات — بحيث يكون منخفضًا جدًّا عند الحافة الداخلية للمنطقة الصالحة للحياة ومرتفعًا جدًّا عند الحافة الخارجية. ويفترض هذا أنَّ الكوكب يتضمن نشاطًا تكتونيًّا، وأنَّ بعضًا من سطح مناطقه اليابسة مكشوف، لكنَّ كلا الافتراضين يُمكن أن يكون محل شك.

إن حركة الصفائح التكتونية غير مضمونة. إذ تُشير نظرياتٌ حالية إلى أنَّ حركة الصفائح التكتونية تكون أرجح على الكواكب الصخرية الأكبر حجمًا، وتُحفَّز بوجود الماء السائل. فالمريخ يفتقر إلى حركة الصفائح التكتونية، وهذا يتوافق مع حجمه الصغير،

لكن كوكب الزهرة أيضًا يفتقر إلى هذه الحركة، رغم أنه ليس أصغر من الأرض إلا بمقدارٍ ضئيل. وفي الواقع، من المتوقَّع أن يقترب حجم كوكب الأرض من الحد الأدنى لأحجام الكواكب التي تتحرك فيها الصفائح التكتونية، وربما يرجع الفضل في وجود هذه الحركة إلى الماء، وربما تكون حركة الصفائح التكتونية بدورها لازمةً للحفاظ على الماء السائل في مواجهة سطوع الشمس. أما على الكواكب الأصغر حجمًا التي تقع خارج المجموعة الشمسية ولا تتضمن حركة صفائح تكتونية، فلا تُوجد آليةٌ واضحة لإعادة تدوير الكربون الموجود في الرواسب وإرجاعه إلى الغِلاف الجوي. بل بالعكس، لن يضُخ النشاط البركاني إلا كمياتٍ صغيرة من ثاني أكسيد الكربون من وشاح الكوكب، ويمكن أن تُزال هذه الكميات بسهولة بفعل تجوية السيليكات؛ مما يؤدي إلى انخفاض مستوى ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي باستمرار، وتقييد الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة.

وصحيحٌ أنَّ افتراض وجود حركة صفائح تكتونية في «الكواكب الخارجية الأكبر كتلةً من الأرض» مبنيٌّ على أُسُس أقوى، لكنَّ وجود سطح مكشوف من اليابسة غيرُ مضمون. وهذا لأنَّ الجاذبية الأقوى الموجودة لدى الكوكب الخارجي الأكبر كتلةً من الأرض ستُقلِّل مستوى ارتفاع السطح، وهذا من المحتمل أن يُسفِر عن «عالَم مائي» لا يرتفع فيه أي شيء فوق سطح المحيط. ومع عدم وجود أسطح مكشوفة لعوامل الطقس، وعدم وجود تجوية قارية للسيليكات بالتبعية، سيتراكم ثاني أكسيد الكربون في الغِلاف الجوي. ولكن تُوجد عمليةٌ ثانية لإزالة ثاني أكسيد الكربون، من خلال التفاعل مع قاع البحر (أي البازلت) أثناء تكوُّنه عند مناطق حيد وسط المحيط. ويُعتقد أيضًا أنَّ عملية إزالة ثاني أكسيد الكربون هذه حسَّاسة لدرجة الحرارة؛ لذا يُمكِنها أن تعمل على تثبيت مستوى تركيز ثاني أكسيد الكربون واستقرار المُناخ، وإن كان عند درجة حرارة أكبر. علاوةً على ذلك، من المُتوقَّع أن يُسفِر ارتفاع ضغط قاع البحر في الكواكب الخارجية الأكبر كتلةً من الأرض عن إزالة المزيد من المياه ونقلها إلى الوشاح؛ مما يُقلِّل من حجم المحيط ويسمح بانكشاف بعض كتلة اليابسة وتفعيل التغذية المرتدة الخاصة بتجوية السيليكات.

الأغلفة الحيوية في الكواكب الخارجية

بعدما تناولنا المتطلبات الجيولوجية اللازمة ليكون أي كوكب خارج المجموعة الشمسية صالحًا للحياة، هل يُوجد أي تعميم يُمكِننا إطلاقه عن نوع الغِلاف الحيوي الذي يمكن أن يستضيفه مثل هذا الكوكب؟

أحد الاعتبارات الرئيسية لأي غِلاف حيوي هو المصدر الذي يُمِده بالطاقة. وفي حالةِ أيٍّ من الكواكب الخارجية الواقعة في المنطقة الصالحة للحياة، سيكون مصدر طاقته الرئيسي هو النجم المجاور. ومن ثَم، لكي يُحقق الغِلاف الحيوي للكوكب الخارجي وجودًا معتبرًا على النطاق العالمي، لا بد أن يُغذيه شكلٌ من أشكال عملية التمثيل الضوئي الذي ينقل الطاقة من الفوتونات إلى الإلكترونات. وتُعَد غالبية النجوم أكثر خفوتًا من الشمس؛ الأمر الذي يعني أن فوتونات الضوء المُفرَدة التي تُطلقها عادةً ما تحمل طاقةً أقل. ومن ثَم سيتعيَّن استخلاص قَدر أكبر من الفوتونات لأداء أي نوع معيَّن من التمثيل الضوئي. وتجدُر الإشارة إلى أنَّ أداء التمثيل الضوئي غير الأكسجيني على كوكب الأرض يتطلب فوتونًا واحدًا لكل إلكترون، في حين أنَّ أداء التمثيل الضوئي الأكسجيني على الأرض يتطلب فوتونَين لكل إلكترون. وكذلك استغرق تطوُّر التمثيل الضوئي الأكسجيني على كوكب الأرض ما يصل إلى مليار سنة، وقد قام على نظامَين ضوئيَّين كانا قد تطوَّرا قبله، كلٌّ على حِدة، في أنواعٍ مختلفة من التمثيل الضوئي غير الأكسجيني. أمَّا بالنسبة للكواكب الواقعة حول نجوم أكثر خفوتًا من النوع «كيه» أو «إم» (التي يتراوح لونها من البرتقالي إلى الأحمر)، فيُقدَّر أن التمثيل الضوئي الأكسجيني يمكن أن يتطلب ثلاثة فوتونات أو أكثر لكل إلكترون — وعددًا مكافئًا من الأنظمة الضوئية — مما يجعل تطوُّره أصعب. ومن ثَم، فبصفتنا حيوانات تتنفس الأكسجين، ينبغي ألا نتفاجأ بأننا ندور حول نجمٍ ساطع للغاية من نجوم النوع «جي» (التي يتراوح لونها من الأبيض إلى الأصفر)؛ لأنه قد يكون من الصعب للغاية أن يتطوَّر التمثيل الضوئي الأكسجيني حول النجوم الأكثر خفوتًا وقياسية التي تنبعث منها فوتوناتٌ ذات طاقةٍ أقل. غير أنَّ النجوم الأكثر خفوتًا تقضي وقتًا أطول في النسق الأساسي؛ مما يتيح مزيدًا من الوقت لحدوث التطور.

وبالنظر إلى هذه الاعتبارات، من المُرجَّح أن يكون التمثيل الضوئي غير الأكسجيني أكثر شيوعًا في الكون من التمثيل الضوئي الأكسجيني. ولكن في الكواكب الخارجية، يُتوقَّع أنَّ المواد التي قد تمنح الإلكترونات من أجل أداء التمثيل الضوئي الأكسجيني — مثل الهيدروجين الجُزيئي وكبريتيد الهيدروجين والحديدوز — أندر من الماء، تمامًا كما هو الحال على كوكب الأرض. وهكذا فإنَّ ذلك سيحدُّ من إنتاجية الأغلفة الحيوية غير الأكسجينية؛ مما يُتيح لها قدرًا أقل من الطاقة التي تحتاج إليها لتُغيِّر بها تركيب أغلفتها الجوية، وهذا يُصعِّب اكتشافها عن بُعد. أمَّا التمثيل الضوئي الأكسجيني، فيُمِد الغِلاف الحيوي بطاقةٍ أكثر ممَّا يحتاج إليها، وهو ما يمنحه إمكانيةً أكبر لتغيير تركيب غِلافه

الجوي، ويجعله قابلًا للاكتشاف عن بُعد. وهكذا فمع أنَّ الأغلفة الحيوية الأكسجينية ربما تكون أندَر من الأغلفة غير الأكسجينية، من المفترض أن يكون اكتشافُها أسهل. وقد يكون أفضل مكان للبحث عنها حول النجوم الأسخن، مثل شمسنا، في ظل ما تشعُّه من فوتونات ذات طاقةٍ أعلى؛ وهذه النجوم هي هدف التلسكوبات الفضائية القادمة بالفعل.

غير أنَّ البصمة الحيوية للأغلفة الحيوية الأكسجينية قد لا تكون هي العلامة الواضحة على وجود الأكسجين والأوزون في الغِلاف الجوي. فكما يُبيِّن تاريخ الأرض، يتطلب تراكم الأكسجين في الغِلاف الجوي معدلاتٍ مرتفعة من هروب الهيدروجين إلى الفضاء، وفي حالة كوكب الأرض، يستمد هذا الهروب طاقته من وجود تركيزاتٍ عالية من الميثان الحيوي. ويعتمد هروب الهيدروجين أيضًا على كتلة الكوكب، ومن المتوقَّع أن يصبح أصعب على الكواكب الخارجية الأكبر كتلةً من الأرض. وكذلك فحتى بعد وقوع «الأكسدة الكبرى» على كوكب الأرض، ظل الأكسجين عند مستوياتٍ معتدلة، وربما احتاج إلى تطوُّر الحياة البرية المعقَّدة لكي يرتفع إلى مستوياته العصرية، من خلال تعزيز عملية تجوية الفوسفور من الصخور.

هل تنطبق فرضية جايا على كواكب خارجية؟

تميل الدراسات الحالية المعنية بالمنطقة الصالحة للحياة إلى افتراض أنها مستقلة عن وجود الحياة أو عدمه. لكنَّ صلاحية كوكبٍ ما للحياة تعتمد على ما إذا كان مأهولًا أصلًا أم لا. تذكَّروا فرضية «جايا» التي اقترح لفلوك فيها أنَّ وجود الحياة على كوكب الأرض يُعزِّز صلاحيته للحياة. على الرغم من أنَّ بعض علماء نظام الأرض يختلفون بشأن الدليل على أن الحياة تؤثِّر في صلاحية كوكب الأرض للحياة، فإن معظمهم يتفقون على وجود هذا التأثير. وبالتبعية، يُمكن القول أيضًا إنَّ وجود غِلافٍ حيوي خارج المجموعة الشمسية قادر على إحداث تغيير قابل للاكتشاف في تركيب الغِلاف الجوي لكوكبه المضيف من المحتمل أن يُغيِّر صلاحية ذلك الكوكب للحياة. ولكن هل يُمكِننا إطلاق أي تعميم عن كيفية تأثير وجود الحياة على صلاحية كوكبٍ معيَّن للحياة؟

لنبدأ بالآلية الراسخة المؤكَّدة التي توسِّع المنطقة الصالحة للحياة؛ وهي التغذية المرتدة السالبة المتمثلة في تجوية السيليكات. إذ نعرف يقينًا أنَّ تجوية السيليكات على كوكب الأرض تتسارع بفعل وجود حياة على اليابسة، نتيجةً لسعيها إلى الحصول على المواد المغذية التي تحويها الصخور. وفي الواقع، يُعَد تعزيز معدل تجوية السيليكات

بفعل وجود الحياة هو السبب الأبرز وراء المستوى المنخفض جدًّا من تركيز ثاني أكسيد الكربون على كوكب الأرض في الوقت الحالي. فبدون الحياة، كان كوكب الأرض الحالي سيُصبح أسخن، وتُشير بعض عمليات المحاكاة إلى أنه كان من الممكن أن يُصبح غير صالح أصلًا للحياة المعقدة، وهذا يتفق مع فرضية جايا.

وكذلك يُمكن توقُّع أنَّ بعض الأغلفة الحيوية الموجودة على كواكب أخرى تخفض مستوى ثاني أكسيد الكربون في الأغلفة الجوية لتلك الكواكب. فأولًا، إذا تطوَّرَت عملية التمثيل الضوئي على ذلك الكوكب، فمن المُرجَّح أن يؤدي هذا إلى نقل ثاني أكسيد الكربون من الغِلاف الجوي إلى صخور قشرة الكوكب في شكل مادةٍ عضوية ميتة. وثانيًا، من المحتمل أن يكون تعزيز تجوية صخور السيليكات حلًّا عامًّا للمشكلة الشائعة المتمثلة في ندرة الفوسفور على سطح الكوكب. وبعدما يؤدي ذلك إلى انخفاض مستوى أكسيد الكربون، من المُرجَّح أن يُسفِر هذا الانخفاض عن تحريك المنطقة الصالحة للحياة على كوكبٍ مأهول نحو موضعٍ أقرب إلى نجمه، مؤديًا بذلك إلى توسيع الحافة الداخلية، لكنه في الوقت نفسه يخفض الحرارة عند الحافة الخارجية للمنطقة الصالحة للحياة، وهذا يُشكِّل معضِلةً للأغلفة الحيوية التي تبدأ الحياة بالقرب من هناك. ويُمكِننا أيضًا أن نتوقع أنَّ الأغلفة الحيوية تُنشئ تأثيراتٍ تُسبِّب ارتفاعًا عامًّا إلى حدٍّ كبير في درجات الحرارة. وتجدُر الإشارة بالأخص إلى أنَّ إعادة تدوير الكربون العضوي في صورةِ ميثان تُعَد عمليةَ أيضٍ بسيطة وقديمة جدًّا على كوكب الأرض. فالغِلاف الحيوي المبكر على كوكب الأرض قد أعاد تدوير ما يصل إلى نصف الكربون المُستخلَص في عملية التمثيل الضوئي في صورة ميثان، وتجدُر الإشارة إلى أنَّ الميثان يرفع درجة الحرارة بمقدارٍ أكبر مما يُسبِّبه ثاني أكسيد الكربون. ومن ثَم، يُقدَّر أن التأثير الإجمالي قد أدى إلى ارتفاع درجة حرارة كوكب الأرض في مراحل عمره المبكرة (بالرغم من وجود مشكلةٍ محتملة تتمثل في أنَّ النسبة بين الميثان وثاني أكسيد الكربون إذا اقترَبَت من الواحد الصحيح، فسينشأ في الغِلاف الجوي ضبابٌ يشتِّت ضوء الشمس معيدًا إياه مرةً أخرى إلى الفضاء، ويُبرِّد الكوكب المضيف).

وفي الواقع، تُوجد العديد من الطرق الممكنة التي يستطيع بها الغِلاف الحيوي أن يُسخِّن كوكبه المضيف أو يُبرِّده. فالحياة يُمكن أن تُنتِج بعض غازات الدفيئة القوية الأخرى، بما فيها أكسيد النيتروز وكبريتيد الكربونيل؛ أو يمكن أن تُولِّد تأثيراتٍ تبريدية أخرى، مثل إنتاج كبريتيد ثنائي الميثيل، فتَزيد من بياض السُّحُب. ومن المعروف أنَّ أي تأثير على المُناخ سيُولِّد بدَوره حلقةً من التغذية المرتدة؛ لأنَّ العمليات الحيوية كلها تقريبًا

تتأثر بدرجة الحرارة. وصحيحٌ أنَّ أنظمة حلقات التغذية المرتدة المتعددة الناتجة من ذلك بدأَت تصبح أشد تعقيدًا من أن نستطيع إطلاق أي تعميم عن خصائصها. ولكن يُمكن تطبيق بعض المبادئ البسيطة الخاصة بالتغذية المرتدة.

وإذا كانت بعض أشكال الحياة تجعل كوكبها أصلح للحياة، فمن المُرجَّح أن تكون هذه عمليةً تُعزز نفسها بنفسها؛ وبذلك تنشأ تغذيةٌ مرتدة موجبة ستُشجِّع على انتشار الحياة. أمَّا إذا بدأَت بعض أشكال الحياة تدفع كوكبها نحو أقصى حدود صلاحيته للحياة، فستكون هذه عملية تُقيِّد نفسها بنفسها؛ وبذلك تنشأ تغذيةٌ مرتدة سالبة ستبدأ الحد من انتشار الحياة. وليس أكيدًا ما إذا كانت هذه التغذية المرتدة ستُحدِث تأثيرًا سريعًا وقويًّا بما يكفي لمنع حدوث انقراضٍ عالمي، وسيعتمد ذلك على التفاعل بين مجموعةٍ مختلفة من التغذيات المرتدة الحيوية وغير الحيوية. لكنَّ النماذج التي تتضمَّن هذه المبادئ الأساسية تتنبأ بأنَّ وجود غِلافٍ حيوي من المُرجَّح أن يؤدي، في المتوسط، إلى تعزيز صلاحية كوكبه للحياة.

وفي ظل اقتصار حجم العينة المتاحة على كوكبٍ واحد صالح للحياة، وهو الأرض، فمن الصعب (إن لم يكن مستحيلًا كما قد يقول البعض) أن نختبر ما إذا كان من المتوقَّع عمومًا أن تؤدي وفرة الحياة على كوكبٍ ما إلى تعزيز صلاحيته للحياة أم تقليلها. ولكن إذا اكتُشف وجود حياة بالفعل على أحد الكواكب الخارجية عن بُعد في العقود القليلة القادمة، فسنبدأ تكوين عينة ذات حجم أكبر من العوالم المأهولة. وفي ظل توافُر تلسكوبات فضائية أكثر تقدمًا باستمرار، يستطيع العلماء في المستقبل أن يكتشفوا المزيد عن خصائص هذه العوالم، ويُقارِنوها بخصائص الكواكب الخارجية التي تقع في المنطقة الصالحة للحياة ولا تظهر أي علامات على أنها مأهولة. وبذلك نستطيع أخيرًا أن نختبر صحة فرضية جايا. ومهما كانت النتيجة، فسنتعلم معلوماتٍ عميقة عن طبيعة الكواكب المأهولة بوجهٍ عام، وليس الأرض بالذات فقط.

عِلم نظام الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض

تُعَد ديناميكيات المُناخ والجيولوجيا والبيولوجيا كلها متشابكةً تشابكًا سببيًّا في نظام الأرض، ومن المؤكَّد أنها متشابكة معًا في عوالمَ مأهولةٍ أخرى. ويبدأ الباحثون من خلال تعميم النماذج التي وضعناها لنظام الأرض وتطوُّره صياغةَ ما أسمِّيه «علم نظام الكواكب الخارجية الشبيهة بالأرض»؛ وهو عِلم مَعني بالعوالم الصالحة للحياة والمأهولة عمومًا.

وسوف نُصبح في العَقد القادم قادرين على اختبار صحة تنبؤات تلك النماذج استنادًا إلى أرصادٍ جديدة للكواكب الخارجية التي تقول نظرياتُنا الحالية إنها من المحتمل أن تكون صالحة للحياة. ومن المؤكَّد أننا سنشهد مفاجآت — وربما مفاجآت قوية — عن انتشار العوالم الصالحة للحياة، وانتشار الحياة، في الكون القريب منَّا. إذ ربما سنجد أنه على الرغم من وجود كل تلك الكواكب التي يُحتمل أن تكون صالحة للحياة هناك، لا تُوجد علامات على وجود حياة على أيٍّ منها. وربما سنجد قَدرًا وفيرًا من الحياة، وسنتفكر مليًّا في السبب الذي أدى إلى عدم اكتشاف أي علامة على وجود حياةٍ ذكية خارج كوكب الأرض بعد خمسين عامًا من البحث. وفي كلتا الحالتَين، من المؤكَّد أنَّ النتائج ستُغيِّر نظرتَنا إلى أنفسنا وإلى عالمنا. فأنا مُتيقِّن من أننا سنُعيد تأمُّل كوكب الأرض وحياتنا الذكية بإحساسٍ متجدد بالتعجب والعزم على الإسهام في تحقيق استدامة هذا الكوكب المذهل.

قراءات إضافية

الفصل الأول: الموطن

James Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* (Oxford University Press, 1979). A popular science classic—Lovelock's poetic description of his dawning realization of Gaia.

Earth System Sciences Committee, NASA Advisory Council, *Earth System Science Overview: A Program for Global Change* (NASA, 1986). A founding document for a new scientific field.

Martin Redfern, *The Earth: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2003). A succinct introduction to the workings of the inner Earth.

الفصل الثاني: إعادة التدوير

Lee R. Kump, James F. Kasting, and Robert G. Crane, *The Earth System*, 3rd edition (Prentice Hall, 2010). An introductory textbook to the field, nicely rooted in a systems thinking approach.

Michael C. Jacobson, Robert J. Charlson, Henning Rodhe, and Gordon H. Orians (eds), *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Change* (Academic Press, 2000). A more advanced textbook covering key aspects of Earth system science.

William H. Schlesinger and Emily S. Bernhardt, *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, 3rd edition (Academic Press, 2013). A more advanced textbook focused on biogeochemical cycling.

الفصل الثالث: التنظيم

James Lovelock, *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth* (Oxford University Press, 1988). My favourite popular science book. Lovelock transforms Gaia into a theory using simple models to explore self-regulation, and laying out the history of our planet as a system.

الفصل الرابع: ثورات

Tim Lenton and Andrew Watson, *Revolutions that Made the Earth* (Oxford University Press, 2011). Our synthesis of the pivotal events that created a world in which humans could evolve.

Charles H. Langmuir and Wally Broecker, *How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind* (Princeton University Press, 2012). Long but rewarding—a comprehensive introduction to the Earth in a universal context.

Paul G. Falkowski, *Life's Engines: How Microbes Made Earth Habitable* (Princeton University Press, 2015). An insightful and personal introduction to the organisms that really run this planet.

Donald E. Canfield, *Oxygen: A Four Billion Year History* (Princeton University Press, 2014). The pivotal gas for complex life gets a welcome biography from one of the leaders of the field.

الفصل الخامس: الأنثروبوسين

Jan Zalasiewicz, *The Earth After Us* (Oxford University Press, 2008). Both a neat introduction to geology and a long-term view of our legacy in the rock record.

Jared Diamond, *Guns, Germs and Steel: A Short History of Everybody for the Last 13,000 Years* (Vintage, 1998). A classic exposition of the differing development of societies over the Holocene.

Jared Diamond, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive* (Penguin, 2011). A provocative look at why past civilizations came to grief and what we can learn from their mistakes.

الفصل السادس: التوقع

John Houghton, *Global Warming: The Complete Briefing*, 5th edition (Cambridge University Press, 2015). The definitive summary of the complexities of climate change.

James R. Fleming, *Historical Perspectives on Climate Change* (Oxford University Press, 1998). A myth-busting series of essays on the history of thinking about climate change.

Kendal McGuffie and Ann Henderson-Sellers, *The Climate Modelling Primer*, 4th edition (Wiley-Blackwell, 2014). Makes the fiendishly complex business of climate modelling accessible.

David Archer, *The Long Thaw: How Humans are Changing the Next 100,000 Years of Earth's Climate* (Princeton University Press, 2010). The long view on the consequences of fossil fuel burning.

الفصل السابع: الاستدامة

Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, and William W. Behrens III, *The Limits to Growth* (Universe Books, 1972). A bible for the environmental movement but a heresy for many economists—either way, the systems modelling approach taken was groundbreaking.

David J. C. Mackay, *Sustainable Energy—Without the Hot Air* (UIT, 2009). A quantitative examination of what it will take to power our civilizations sustainably.

Julian M. Allwood and Jonathan M. Cullen, *Sustainable Materials—With Both Eyes Open* (UIT, 2012). A careful look at how we can be more efficient with key materials.

الفصل الثامن: التعميم

James Kasting, *How to Find a Habitable Planet* (Princeton University Press, 2012). The maestro of modelling habitable zones offers the perfect manual for the would-be planet finder.

David C. Catling, *Astrobiology: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2013). A sparkling introduction to the prospects for life elsewhere.

المراجع

The data in Figure (5–2) are from the Carbon Dioxide Information Analysis Center—Tom Boden, Bob Andres, and Gregg Marland.

The data in Figure (5–3) are from Dr Pieter Tans, ESRL/NOAA, and Dr Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography.

Figure (7–2) is based on Steffen et al. (2015) 'Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet'. *Science* 347: 736.

Figure (8–2) is based on results from Kopparapu et al. (2013) 'Habitable Zones around Main–Sequence Stars: New Estimates'. *Astrophysical Journal* 765: 131, and the habitable zone calculator from the NASA Astrobiology Institute's Virtual Planetary Laboratory.

Figure (8–3) is adapted from Quintana et al. (2014) 'An Earth–Sized Planet in the Habitable Zone of a Cool Star'. *Science* 344: 277–80.

مصادر الصور

(1–1) Atmospheric compositions of Earth, Mars, and Venus (A version of this figure first appeared in Timothy M. Lenton, 'Gaia and Natural Selection'. *Nature* 394, 439–47 (1998). Redrawn)

(1–2) Positive and negative feedback

(1–3) The silicate weathering negative feedback

(1–4) The ice–albedo positive feedback

(1–5) The 'Bretherton diagram' of fluid and biological Earth processes (Adapted and redrawn from *Earth System Science Overview: A Program for Global Change* (Washington, DC: NASA Advisory Council, 1986) Fig. 2b, p. 19)

(2–1) Fluxes of gases exchanged at the Earth's surface today and on an abiotic Earth (A version of this figure first appeared in Timothy M. Lenton, 'Gaia and Natural Selection'. *Nature* 394, 439–47 (1998). Redrawn)

(2–2) Biogeochemical cycling at Earth's surface and via the rock cycle

(2–3) The oxygen cycle

(2–4) The carbon cycle

(2–5) The phosphorus cycle

(2–6) The nitrogen cycle

(3–1) The bath metaphor of regulation

(3–2) Results from the ‘Redfield’ model

(3–3) Atmospheric oxygen regulation over Phanerozoic time

(3–4) Atmospheric CO_2 variation over Phanerozoic time

(3–5) The CLAW hypothesis of feedbacks

(3–6) The Antarctic ice core record of atmospheric CO_2 and temperature change (Figure by Andrew Watson taken from *Revolutions that Made the Earth* by Tim Lenton and Andrew Watson (Oxford: Oxford University Press, 2011) Fig. 18.3, p. 359. By permission of Oxford University Press)

(4–1) Timeline of Earth history

(4–2) Atmospheric oxygen over Earth history

(5–1) Timeline of human evolution set against environmental variability

(5–2) Escalating human fossil fuel CO_2 emissions

(5–3) The ‘Keeling curve’ of atmospheric CO_2 measurements

(5–4) The instrumental global average temperature record

(6–1) Relation of cumulative carbon emissions to global temperature change

(6–2) Map of potential tipping elements in the Earth’s climate system

(7–1) Energy and material flows

(7–2) Planetary boundaries (Adapted from Steffen et al. (2015) ‘Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet’. Science 347: 736)

(7–3) Teleological feedback within the Earth system

(8–1) A model projection of the lifespan of the biosphere

(8–2) Evolution of the Sun’s habitable zone over time

(8–3) Planetary system comparison (Adapted from Quintana et al. (2014) ‘An Earth–Sized Planet in the Habitable Zone of a Cool Star’. Science 344: 277–80)

هنـــداوي