مارك ماسلين

تغيُّر المناخ

مقدمة قصيرة جدًّا

ترجمة أمنية طلعت

تغيُّر المناخ

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
مارك ماسلين

ترجمة
أمنية طلعت

مراجعة
هاني فتحي سليمان

هنـــداوي

تغيُّر المناخ

مارك ماسلين

Climate Change

Mark Maslin

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

يورك هاوس، شييت ستريت، ونسدور، 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 ٣٨٥٧ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢١.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٥.

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 © Eco-Climate Limited 2021. *Climate Change: A Very Short Introduction* was originally published in English in 2021. 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

شكر وتقدير	٩
تمهيد الطبعة الرابعة	١١
١- ما المقصود بتغيُّر المناخ؟	١٣
٢- تاريخ تغيُّر المناخ	٢٥
٣- أدلة تغيُّر المناخ	٣٩
٤- نمذجة المناخ المستقبلي	٥٧
٥- تأثيرات تغيُّر المناخ	٧٩
٦- مفاجآت المناخ	١٠٥
٧- سياسات تغيُّر المناخ	١٢١
٨- الحلول	١٣٧
٩- تغيير مستقبلنا	١٦٣
قراءات إضافية	١٧٣
مصادر الصور	١٧٩

إهداء إلى كريس بيس (١٩٦٨–٢٠٠٦) ونيك شاكلتون (١٩٣٧–٢٠٠٦) وآن ماسلين (١٩٤٣–٢٠٢٠) الذين لا يعرفون المستحيل، وإنما يرون الحلول دومًا.

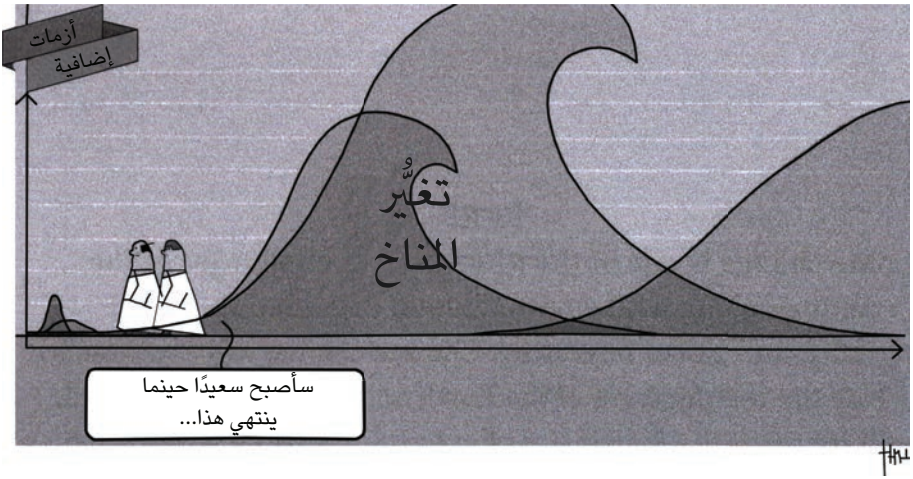
شكر وتقدير

يتقدَّم المؤلف بخالص الشكر إلى الأشخاص الآتية أسماؤهم: يوهانا، ألكسندرا، آبي، على تجاوزهم فترة الإغلاق العام معًا ومنحي الفرصة لكتابة الطبعة الرابعة؛ وأتوجه بالشكر إلى مايلز إيرفينج على رسوماته الممتازة؛ وإلى محررَيَّ في دار نشر جامعة أكسفورد، وجيني نوجي ولاثا مينون؛ وكل الموظفين الرائعين في جامعة كلية لندن، ومجموعة سوبرا ستيريا، وشركة شيب إنكلودد، ومنصة ذا كونفرسيشن، وشركة ريزيتيك المحدودة؛ ريتشارد بيتس، ومارك براندون، وأندرو شيبرد، وإريك وولف، وغيرهم من المراجعين، على تعليقاتهم الثاقبة والمفيدة للغاية التي قدموها في الطبعات المختلفة من هذا الكتاب؛ وكذلك كل زملائي الرائعين والمخلصين في مجالات علم المناخ، وعلم المناخ القديم، والجيولوجيا، والجغرافيا، والعلوم الاجتماعية، والاقتصاد، والطب، والهندسة، والعلوم الإنسانية، والفنون، الذين يواصلون السعي لفهم تأثيرنا في مناخ كوكبنا ووضع تنبؤات بشأنه والحد منه.

تمهيد الطبعة الرابعة

يمثِّل تغيُّر المناخ أحد التحديات الأربعة الرئيسية التي تحدِّد ملامح القرن الحادي والعشرين، إلى جانب التدهور البيئي، وغياب المساواة، وانعدام الأمن على مستوى العالم. سيستمر تغيُّر المناخ في رفع درجة حرارة الأرض وزيادة مستوى سطح البحر عالميًّا. كما سيزيد من تواتر الظواهر الجوية المتطرفة مثل الجفاف وموجات الحر والفيضانات والعواصف، وهو ما من شأنه أن يهدِّد صحة مليارات الأشخاص ومصادر رزقهم. وستعتمد حدَّة التأثيرات الناجمة عن تغيُّر المناخ على ما نتخذه الآن من إجراءات للحد من انبعاثات غازات الدفيئة.

على مدار العقود الثلاثة الماضية، تضاعفت كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة نتيجة الأنشطة البشرية. ويمثِّل هذا إخفاقًا جماعيًّا لزعماء العالم في التركيز على الأزمة المناخية. وصحيحٌ أن عامَي ٢٠٢٠ و٢٠٢١ كانا تحت هيمنة جائحة كوفيد-١٩، لكن المشهد الجيوسياسي المتعلق بتغيُّر المناخ شهد تحولات جذرية (انظر شكل ١). وفي يونيو ٢٠١٩، أجرى البرلمان البريطاني تعديلًا على قانون تغيُّر المناخ لعام ٢٠٠٨، مُلزِمًا الحكومة بخفض انبعاثات المملكة المتحدة من غازات الدفيئة إلى مستوى الصفر بحلول عام ٢٠٥٠. وفي عام ٢٠٢١، أعلنت المملكة المتحدة عن هدف مرحلي يتمثَّل في خفض انبعاثات الكربون بنسبة ٧٨٪ بحلول عام ٢٠٣٠. كما أعلنت المفوضية الأوروبية أن الاتحاد الأوروبي سيخفِّض انبعاثاته من غازات الدفيئة بنسبة لا تقل عن ٥٥٪ عن المستويات التي بلغها عام ١٩٩٠ وذلك بحلول عام ٢٠٣٠، بدلًا من نسبة ٤٠٪ المتفق عليها قبل ست سنوات. وهذه خطوة كبيرة نحو تعهُّد الاتحاد الأوروبي العام بتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام ٢٠٥٠. وفي سبتمبر ٢٠٢٠، أعلن الرئيس الصيني شي جين بينغ، عبر الفيديو خلال الجمعية العامة للأمم المتحدة في نيويورك، أن الصين تهدف إلى بلوغ ذروة الانبعاثات قبل عام ٢٠٣٠،



شكل ١: تسطيح المنحنى: مقارنة بين جائحة كوفيد-١٩ وتغيُّر المناخ.

يليها هدف طويل الأمد يتمثَّل في تحقيق الحياد الكربوني بحلول عام ٢٠٦٠. وتُعَد الصين أكبر مصدر لانبعاثات الكربون في العالم؛ إذ تمثِّل نحو ٢٨٪ من إجمالي الانبعاثات العالمية، ولم تكن قد التزمت في السابق بأي هدف طويل الأجل لخفض الانبعاثات.

في عام ٢٠٢١، شاركت الولايات المتحدة — ثاني أكبر مصدر للانبعاثات عالميًّا إذ تمثِّل انبعاثاتها نحو ١٥٪ من إجمالي الانبعاثات العالمية — في المفاوضات المتعلقة بالمناخ من جديد. وكان الرئيس ترامب في عام ٢٠٢٠ قد أخرج الولايات المتحدة من اتفاق باريس لعام ٢٠١٥. إلا أن الرئيس بايدن أعاد الولايات المتحدة إلى الاتفاق، وأصبح مدافعًا قويًّا عن العمل الدولي الجماعي لمواجهة تغيُّر المناخ. في عام ٢٠٢١، أعلنت الولايات المتحدة عن هدفٍ يتمثَّل في خفض انبعاثات الكربون بنسبة ٥٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠، وتعهدت بالوصول إلى صافي الانبعاثات الصفري من الكربون بحلول عام ٢٠٥٠. كما أعاد الرئيس بايدن العمل باللوائح البيئية التي كان قد ألغاها الرئيس ترامب، ووضع سياسات رئيسية للحد من انبعاثات غازات الدفيئة، وزاد بشدة من التمويل الفيدرالي للطاقة المتجددة والاقتصاد الأخضر في الولايات المتحدة. للمرة الأولى منذ أكثر من عقد، هناك آمال معلقة في أن تتمكن دول العالم من خفض انبعاثات غازات الدفيئة إلى حد كبير، والبدء في رحلة نحو عالم أنظف، وأكثر خضرة وأمانًا وصحة واستدامة.

الفصل الأول

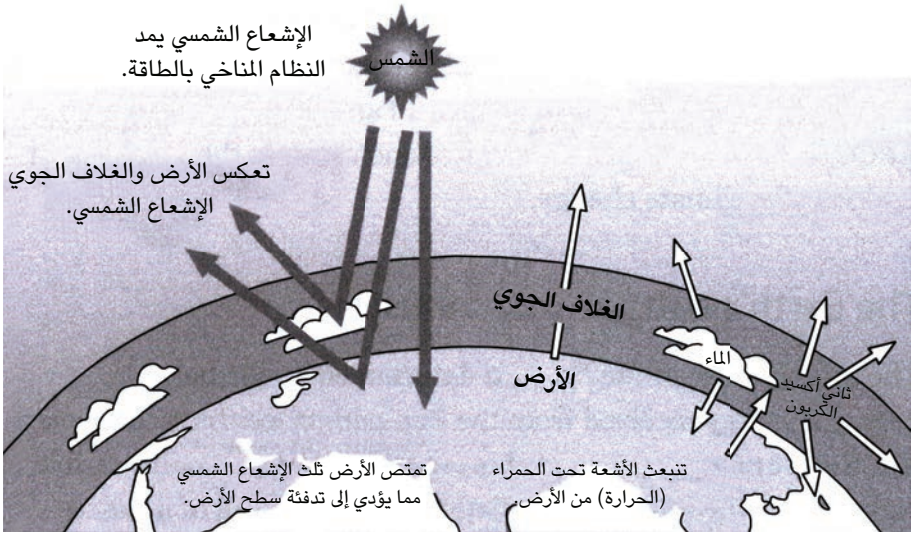
ما المقصود بتغيُّر المناخ؟

يمثِّل تغيُّر المناخ المستقبلي واحدًا من أبرز تحديات القرن الحادي والعشرين، إلى جانب غياب المساواة والتدهور البيئي وانعدام الأمن على الصعيد العالمي. وتكمن المشكلة في أن «تغيُّر المناخ» لم يعد مجرد قضية علمية بحتة، بل امتدت آثاره لتشمل علم الاقتصاد، وعلم الاجتماع، والجغرافيا السياسية، والسياسات الوطنية والمحلية، والقانون، والصحة، على سبيل المثال لا الحصر. سيتناول هذا الفصل دور غازات الدفيئة في تهدئة المناخ العالمي في الماضي، وأسباب ارتفاع مستوياتها منذ الثورة الصناعية، ولماذا أصبحت تعتبر الآن ملوثات خطرة. كما سيبحث هذا الفصل في البلدان التي أنتجت أكبر كميات من غازات الدفيئة الناتجة عن الأنشطة البشرية، وكيف يتغيَّر هذا الوضع مع التطور الاقتصادي السريع. وسيعرِّف أيضًا الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ ودورها في الحرص على جمع وتقييم أحدث الأدلة المتعلقة بتغيُّر المناخ.

غازات الدفيئة الطبيعية للأرض

تتحدد درجة حرارة الأرض من خلال التوازن بين الطاقة المستقبَلة من الشمس والطاقة المنبعثة إلى الفضاء. وتتألف الطاقة الشمسية من إشعاع قصير الموجة (يتمثَّل بشكل أساسي في الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية)، وتمرُّ معظم هذه الطاقة عبر الغلاف الجوي دون عائق (انظر شكل ١-١). لكن يُستثنى منها فحسب الأشعة فوق البنفسجية الضارَّة ذات الطاقة العالية التي تمتصُّها طبقة الأوزون في الغلاف الجوي. ينعكس نحو ثلث الطاقة الشمسية مباشرةً إلى الفضاء، بينما يمتص سطح الأرض ما تبقَّى من الطاقة الشمسية التي لم تنعكس إلى الفضاء. تعمل هذه الطاقة على تدفئة اليابسة والمحيطات،

ثم تبث هذه الحرارة مجددًا على هيئة الأشعة تحت الحمراء الطويلة الموجة أو ما يُعرف بالإشعاع «الحراري».



شكل ١-١: تأثير الدفيئة. تحتجز غازات الدفيئة جزءًا من حرارة الأرض قبل أن تطلقها لتدفئة الغلاف الجوي.

تُعرف غازات الدفيئة بأنها الغازات المكونة للغلاف الجوي، مثل بخار الماء وثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز، حيث تمتص جزءًا من الأشعة الطويلة الموجة، مما يؤدي إلى تسخين الغلاف الجوي. وقد جرى قياس هذا التأثير في الغلاف الجوي، ويمكن محاكاته مرارًا وتكرارًا في المختبر. ولولا هذا التأثير الطبيعي لغازات الدفيئة، لانخفضت درجة حرارة الأرض بما لا يقل عن ٣٥ درجة مئوية، مما قد يؤدي إلى وصول بعض المناطق الاستوائية إلى نحو −١٠ درجة مئوية. منذ الثورة الصناعية، صرنا نحرق الوقود الأحفوري (مثل النفط والفحم والغاز الطبيعي) الذي ترسَّب منذ مئات ملايين السنين، مما تسبَّب في انبعاث الكربون مجددًا إلى الغلاف الجوي على هيئة غازَي ثاني أكسيد الكربون والميثان،

وذلك يؤدي بدوره إلى زيادة «ظاهرة الدفيئة» وارتفاع درجة حرارة كوكب الأرض. إننا فعليًّا نحرق ضوء الشمس المخزَّن في شكل وقود أحفوري.

المناخ في الماضي

أعيد تمثيل تغيُّر المناخ في العصر الجيولوجي الماضي باستخدام مجموعة من السجلات الأرشيفية الرئيسية التي تضم بيانات عن رواسب البحار والبحيرات، والعينات اللُّبيَّة الجليدية، ورواسب الكهوف، وحلقات الأشجار. تكشف هذه السجلات المختلفة أنه على مدى الخمسين مليون سنة الماضية، كان مناخ الأرض يتجه نحو البرودة منتقلًا مما يُعرف بـ «عالم الدفيئة» الذي ساد في العصر الإيوسيني حيث الظروف الجوية الدافئة والمعتدلة، إلى «عالم الجليد» الأكثر برودة وديناميكية في الوقت الحاضر. من المنظور الجيولوجي، قد يبدو غريبًا أن كوكبنا شديد البرودة، في حين أن هذا الكتاب كله يتناول ظاهرة الاحترار السريع لكوكب الأرض. لكن يعود السبب في ذلك إلى أن مناخ الأرض بات شديد الحساسية تجاه التغيُّرات في غازات الدفيئة نتيجة وجود صفائح جليدية ضخمة في كلٍّ من القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا) وجرينلاند، وكذلك في الجليد البحري شبه الدائم في المحيط القطبي الشمالي.

بدأ التبريد العالمي الطويل الأمد للأرض مع التكون الجليدي للقارة القطبية الجنوبية منذ نحو ٣٥ مليون سنة، ثم تسارَع مع العصور الجليدية الكبرى في نصف الكرة الشمالي التي بدأت منذ ٢٫٥ مليون سنة. منذ بداية هذه العصور الجليدية الكبرى، مرَّ مناخ الأرض بدورةٍ انتقل فيها بين ظروف جوية مشابهة أو حتى أدفأ قليلًا مقارنةً بما عليه الحال اليوم، ثم إلى أطوار جليدية كاملة تشكَّلت خلالها طبقات جليدية بسُمك يزيد على ثلاثة كيلومترات فوق أجزاء كبيرة من أمريكا الشمالية وأوروبا. بين ٢٫٥ مليون سنة ومليون سنة مضت، كانت الفترات الجليدية تتكرر كل ٤١ ألف سنة، لكن منذ مليون سنة أصبحت تتكرر كل ١٠٠ ألف سنة.

إن السبب الرئيسي في حدوث الدورات الجليدية الكبرى هو التغيُّرات في موضع مدار الأرض بالنسبة إلى الشمس. ففي الواقع، قضت الأرض أكثر من ٨٠٪ من آخر ٢٫٥ مليون سنة في ظروف أكثر برودة من الوقت الحالي. أما الفترة الدفيئة الحالية التي تفصل بين عصرين جليديين — المعروفة باسم حقبة الهولوسين — فقد بدأت قبل نحو ١٠ آلاف سنة، وتُعَد مثالًا على فترات الدفء القصيرة التي تفصل بين عصر جليدي وآخر. وتزامنت بداية

فترة الهولوسين مع الانتهاء السريع والمثير للعصر الجليدي الأخير: حيث ارتفعت درجات الحرارة بمقدار ٦ درجات مئوية خلال أقل من ٤ آلاف سنة، وارتفع مستوى سطح البحر بمقدار ١٢٠ مترًا، وزاد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بمقدار الثلث، في حين تضاعف تركيز الميثان في الغلاف الجوي.

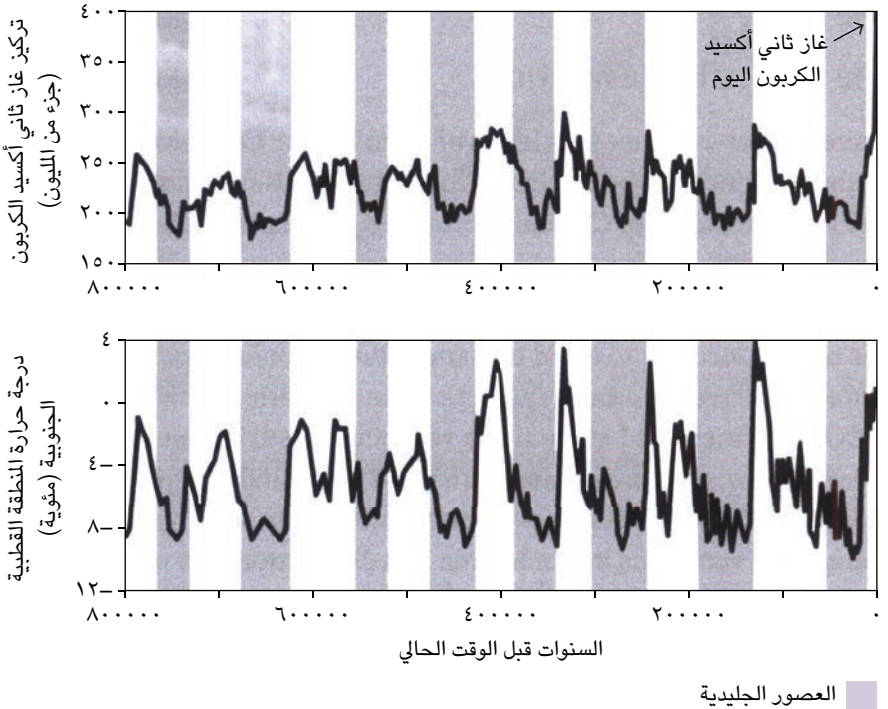
مع ذلك كانت التغييرات في الماضي أبطأ بكثير من تلك التي نشهدها في الوقت الحاضر. يشير جيمس لوفلوك، في كتابه «عصور الغايا» إلى أن الفترات الدافئة التي تفصل بين العصور الجليدية مثل الهولوسين هي بمثابة حالة محمومة تطرأ على كوكبنا الذي شهد بوضوح على مدار ٢,٥ مليون سنة درجة حرارة عالمية أكثر برودة. يعتقد لوفلوك أن الاحترار العالمي هو نتيجة التدخل البشري الذي زاد من تفاقم هذه الحالة المحمومة بالفعل. تُناقَش هذه التغيُّرات المناخية الواسعة النطاق في الماضي بمزيد من التفصيل في كتاب «المناخ: مقدمة قصيرة جدًّا».

التفاوتات السابقة في تركيز ثاني أكسيد الكربون

يستند أحد الأدلة العلمية، التي تُظهِر أن غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يشكل عنصرًا مهمًّا في المناخ العالمي، إلى دراسة المناخ في الماضي. كما أن الأدلة على التغيُّرات السابقة في غازات الدفيئة ودرجات الحرارة تستند إلى العينات اللُّبيَّة الجليدية المستخرجة من كلٍّ من القطب الجنوبي وجرينلاند. فحينما يتساقط الثلج، يكون خفيفًا ورقيقًا ويحتوي على كمية كبيرة من الهواء. ومع تزايد تساقط الثلج، فإن الثلج الأقدم ينضغط ببطء ليشكل طبقة جليدية تُحتجَز فيها فقاعات هوائية. ومن خلال استخراج الهواء من هذه الفقاعات المحتجزة في الجليد القديم، يمكن للعلماء قياس نسبة غازات الدفيئة التي كانت موجودة في الغلاف الجوي في الماضي. عكف العلماء على الحفر لعمقٍ يتجاوز الميلين في طبقات الجليد بجرينلاند والقطب الجنوبي، مما مكنهم من تصوُّر كمية غازات الدفيئة الموجودة في الغلاف الجوي على مدى المليون سنة الماضية. وعن طريق دراسة نظائر الأكسجين والهيدروجين في المياه المتجمدة التي تشكل اللُّب الجليدي، يمكن تقدير درجة الحرارة الجوية فوق طبقة الجليد عندما تجمَّدت المياه لأول مرة.

جاءت النتائج لافتةً للنظر: تتناسب نسبة غازات الدفيئة، مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان في الغلاف الجوي، طرديًّا مع درجات الحرارة خلال الـ ٨٠٠ ألف سنة الماضية (انظر شكل ١-٢). ويمكن أن يُلاحظ بوضوح في درجات الحرارة وفي محتوى الغلاف

الجوي من غازات الدفيئة التغيُّرات الدورية في المناخ بين الفترات الجليدية والفترات الدفيئة. هذا يدعم بقوةٍ الفكرة القائلة بأن هناك ارتباطًا وثيقًا بين غازات الدفيئة في الغلاف الجوي ودرجة حرارة الأرض؛ فعندما يزيد ثاني أكسيد الكربون والميثان، ترتفع درجات الحرارة العالمية، والعكس صحيح عند انخفاضهما.



شكل ١-٢: غازات الدفيئة ودرجات الحرارة خلال الدورات الجليدية الثماني الماضية المسجلة في لُب الجليد.

المزارعون الأوائل

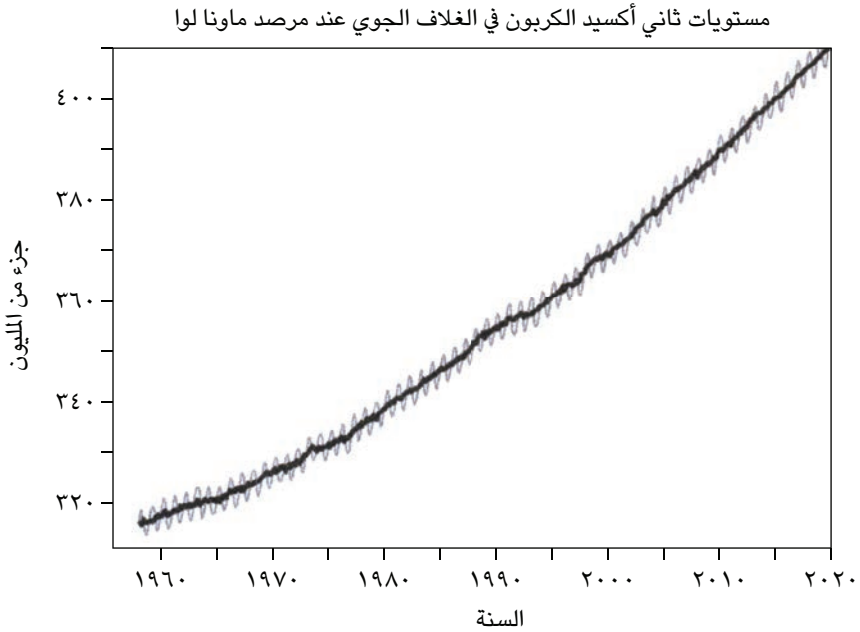
تُظهر الأدلة العالية الدقة المستمَدَّة من العينات اللُّبِّيَّة الجليدية في جرينلاند وأطراف القارة القطبية الجنوبية أن نسبة غازات الدفيئة في الغلاف الجوي ارتفعت قليلًا قبل الثورة

الصناعية في القرن ١٨. أشار بيل روديمان، أستاذ علم المناخ القديم بجامعة فرجينيا، إلى أن المزارعين الأوائل كانوا السبب في تراجع هذا الانخفاض الطبيعي في غازات الدفيئة. فقد أدت إزالة الغابات والغطاء النباتي إلى زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قبل نحو ٧ آلاف عام، في حين أدى التوسع في زراعة الأرز في حقولٍ مغمورة بالمياه وتربية الماشية إلى ارتفاع نسبة غاز الميثان في الغلاف الجوي قبل نحو ٥ آلاف عام. ومن ثَم، يبدو أن تفاعلات البشر الأوائل مع البيئة قد أدت إلى زيادة طفيفة في غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، وكانت هذه الزيادة كافية لتأخير بداية العصر الجليدي التالي حتى قبل الثورة الصناعية؛ ولولا تأثير البشر لكان من الممكن أن يبدأ العصر الجليدي تدريجيًّا في أي وقت خلال الألف سنة المقبلة.

الثورة الصناعية

هناك أدلة واضحة على أن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي استمرت في الارتفاع منذ بداية الثورة الصناعية. بدأت أولى قياسات تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عام ١٩٥٨ على قمة جبل ماونا لوا في هاواي، على ارتفاع يقارب أربعة آلاف متر. وقد أجريت هذه القياسات في هذا الموقع النائي لتجنب التلوث الناتج عن المصادر المحلية. تُظهر السجلات بوضوح أن تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد ارتفعت سنويًّا منذ عام ١٩٥٨. فمتوسط التركيز الذي كان نحو ٣١٦ جزءًا من المليون من حيث الحجم عام ١٩٥٨ قد ارتفع الآن متجاوزًا ٤٢٠ جزءًا من المليون من حيث الحجم (انظر شكل ١-٣). وتُعزى التقلبات السنوية في مرصد ماونا لوا إلى امتصاص النباتات النامية غاز ثاني أكسيد الكربون. إذ يصل امتصاص الغاز إلى ذروته خلال فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي؛ وذلك بسبب اتساع رقعة اليابسة، ومن ثَم تشهد نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي انخفاضًا كل ربيع، لكن مع الأسف، لا يؤدي هذا الانخفاض إلى أي تغيير في الاتجاه العام نحو الارتفاع المستمر في القيم الإجمالية.

يمكن دمج بيانات ثاني أكسيد الكربون المستمَدَّة من مرصد ماونا لوا مع الأدلة التفصيلية المستمَدَّة من العينات اللُّبيَّة الجليدية لإنشاء سجلٍّ كامل يوضح تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ بداية الثورة الصناعية. ويتضح من هذه البيانات



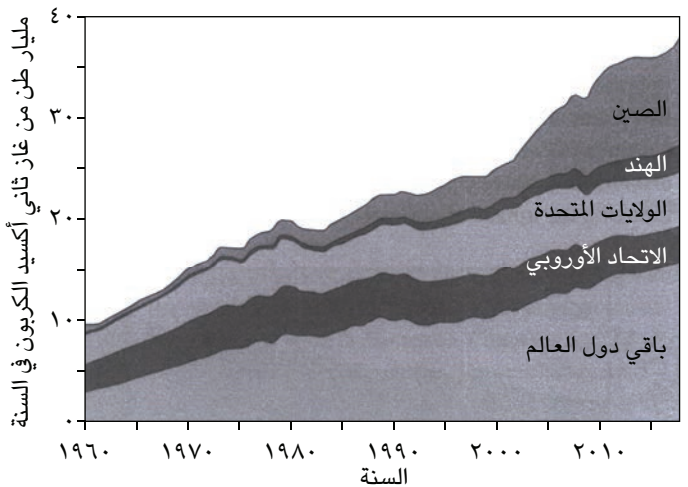
شكل ١-٣: قياسات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من مرصد ماونا لوا.

أن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد ارتفع من نحو ٢٨٠ جزءًا من المليون قبل الثورة الصناعية إلى أكثر من ٤٢٠ جزءًا من المليون من حيث الحجم حاليًّا، مما يمثِّل زيادةً تتجاوز ٤٥٪. لوضع هذه الزيادة في سياقها، تُظهر الأدلة المستمَدَّة من العينات اللُّبيَّة الجليدية أنه على مدار الـ ٨٠٠ ألف سنة الماضية، تراوحت التغيُّرات الطبيعية في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بين نحو ٢٠٠ و٢٨٠ جزءًا من المليون من حيث الحجم. أما الفرق بين الفترات الدافئة والباردة، فبلغ نحو ٨٠ جزءًا من المليون، أي أقل من كمية التلوث الناتج عن ثاني أكسيد الكربون الذي أطلقناه في الغلاف الجوي خلال الـ ١٠٠ سنة الماضية.

إن مستوى التلوث البشري الذي تسببنا فيه خلال قرنٍ واحد قد فاق التغيُّرات الطبيعية التي استغرقت آلاف السنين.

مَن المسئول عن التلوث؟

تأسَّست اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ لإرساء أول اتفاق دولي للحد من انبعاثات غازات الدفيئة على مستوى العالم. هذه ليست مهمة سهلة؛ إذ لا تنتج الدول نسبًا متساوية من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ووفقًا للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ (انظر مربع ١)، فإن المصدر الرئيسي لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون هو احتراق الوقود الأحفوري؛ حيث يأتي أكثر من ٨٥٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية من إنتاج الطاقة، والعمليات الصناعية، والنقل. ولا تتوزع هذه الانبعاثات بالتساوي في أنحاء العالم بسبب التوزيع المتفاوت للصناعة والثروات: فنجد أن أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا تُصْدر أكثر من ٩٠٪ من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن الصناعة في العالم (انظر شكل ١-٤). بالإضافة إلى أن الدول المتقدمة، على مر التاريخ، قد أنتجت كميات أكبر بكثير مقارنةً بالدول الأقل تطورًا.



شكل ١-٤: انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التاريخية تبعًا للمنطقة.

المربع ١: ما الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ؟

أنشئت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ في عام ١٩٨٨ بمشاركة من برنامج الأمم المتحدة للبيئة والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية، بهدف مواجهة القضايا المتعلقة بظاهرة الاحترار العالمي. وتهدف الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ إلى إجراء تقييم مستمر للوقوف على الجوانب المختلفة لظاهرة تغيُّر المناخ من بينها التأثير العلمي والبيئي والاجتماعي والاقتصادي، بالإضافة إلى وضع استراتيجيات الاستجابة لهذه الآثار. لا تهتم الهيئة بإجراء أبحاث علمية مستقلة، بل تُعنى بتجميع الأبحاث الرئيسية المنشورة في كل أنحاء العالم والوصول إلى إجماع علمي حول النتائج. وقد أصدرت الهيئة ستة تقارير رئيسية في الأعوام ١٩٩٠ و١٩٩٦ و٢٠٠١ و٢٠٠٧ و٢٠١٣/٢٠١٤ و٢٠٢١/٢٠٢٢، إلى جانب العديد من التقارير المتخصصة حول موضوعات مثل سيناريوهات انبعاثات الكربون، ومصادر الطاقة البديلة، والمحيطات، واستخدام اليابسة، والظواهر الجوية المتطرفة.

تُعرف الهيئة الحكومية الدولية باعتبارها أكثر الجهات المرجعية على الصعيدين العلمي والتقني في مجال تغيُّر المناخ، حيث كان لتقييماتها تأثير عميق على مفاوضي اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ. يُنظَّم عمل الهيئة إلى ثلاث فِرق عمل إضافةً إلى فريق خاص لحساب كمية غازات الدفيئة التي تنتجها كل دولة. يتولى كلَّ فريق من الفرق الأربع رئيسان مشاركان (أحدهما من دولةٍ متقدمة والآخر من دولة نامية) ووحدة دعم تقني. تقيِّم مجموعة العمل الأولى الجوانب العلمية للنظام المناخي وتغيُّر المناخ؛ بينما تتعامل مجموعة العمل الثانية مع تحديد نقاط الضعف في الأنظمة البشرية والطبيعية أمام تغيُّر المناخ، فضلًا عن خيارات التكيف معه؛ أما مجموعة العمل الثالثة، فتختص بتقييم الخيارات المتاحة للحد من انبعاثات غازات الدفيئة وسبل التخفيف من تأثيرات تغيُّر المناخ.

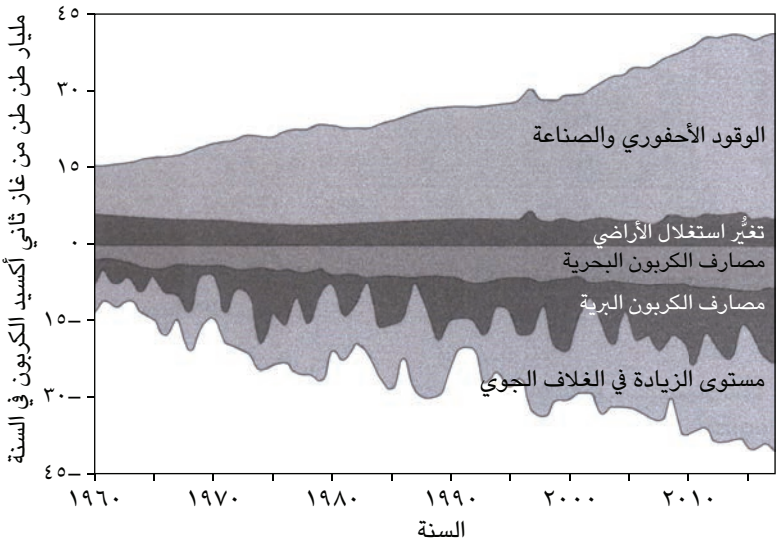
تقدِّم الهيئة الحكومية الدولية إلى الحكومات معلومات علمية وتقنية واجتماعية واقتصادية لها علاقة بتقييم المخاطر المحتملة ووضع خطط الاستجابات المناسبة لمواجهة تغيُّر المناخ العالمي. نُشِر أحدث التقارير الصادرة عن مجموعات العمل الثلاث بمشاركة نحو ٥٠٠ خبير من نحو ١٢٠ دولة في إعداد تقارير الهيئة ومراجعتها وإعداد صياغتها النهائية، بالإضافة إلى آلاف الخبراء الآخرين الذين شاركوا في عملية المراجعة. تأخذ الحكومات والمنظمات الدولية — بما في ذلك المنظمات غير الحكومية — على عاتقها تعيين مؤلفي تقارير الهيئة الحكومية الدولية. كما تُعَد هذه التقارير مرجعًا أساسيًّا للمهتمين بقضية تغيُّر المناخ، ولهذا أُدرجت ضمن قسم «قراءات إضافية» في نهاية هذا الكتاب. عام ٢٠٠٨، مُنحت الهيئة الحكومية الدولية، إلى جانب الخبير البيئي آل جور، جائزة نوبل للسلام تقديرًا لكل الجهود التي بذلتها الهيئة الحكومية الدولية خلال العشرين عامًا السابقة.

تأتي التغييرات التي طرأت على استغلال الأراضي بوصفها ثاني أكبر مصدر لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالميًّا؛ إذ تمثِّل نسبةً تتراوح بين ١٠٪ و١٥٪ من إجمالي انبعاثات هذا الغاز. وتصدر هذه الانبعاثات في المقام الأول من قطع الغابات لأغراض الزراعة أو التوسع العمراني أو إنشاء الطرق. فعند قطع الغابات المطيرة، غالبًا ما تتحول الأراضي إلى مراعٍ أقل إنتاجيةً وذات قدرة أقل بكثير على تخزين ثاني أكسيد الكربون. في هذه الحالة، يختلف نمط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون حيث تتحمل أمريكا الجنوبية وآسيا وأفريقيا مسئولية أكثر من ٩٠٪ من الانبعاثات الناتجة عن التغييرات في استغلال الأراضي الحالية. ويثير ذلك تساؤلات أخلاقية مهمة؛ إذ من الصعب مطالبة هذه الدول بوقف إزالة الغابات، في حين أن ذلك قد حدث بالفعل في معظم أنحاء أمريكا الشمالية وأوروبا قبل بداية القرن العشرين. وفيما يتعلق بكمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة، لا يزال تأثير العمليات الصناعية يفوق بدرجةٍ كبيرة تأثير التغييرات في استغلال الأراضي.

لقد أطلقنا في الغلاف الجوي قرابة نصف تريليون طن من الكربون منذ الثورة الصناعية، لكن هذه الكمية لا تمثِّل إلا نصف إجمالي انبعاثاتنا. أما النصف الآخر، فقد امتصته الأرض إذ ذهب ٢٥٪ منه إلى المحيطات و٢٥٪ إلى المحيط الحيوي على اليابسة. أعرَبَ العلماء عن قلقهم من أن قدرة الأرض على استيعاب هذا التلوث قد لا تستمر بالمعدل نفسه في المستقبل. ويُعزى سبب ذلك إلى أنه مع ارتفاع درجات الحرارة العالمية، سترتفع حرارة المحيطات، مما يقلل من قدرتها على الاحتفاظ بثاني أكسيد الكربون المذاب. ومع استمرارنا في قطع الغابات وتحويل الأراضي لأغراض الزراعة والتوسع العمراني، ستتضاءل مساحة الغطاء النباتي القادرة على امتصاص ثاني أكسيد الكربون، مما سيقلل مرة أخرى من امتصاص التلوث الكربوني الذي نتسبب فيه (انظر الشكل ١-٥).

ثَمة أدلة واضحة تشير إلى أن تركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي في ارتفاعٍ مستمر منذ الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر. وأصبحت تركيزات ثاني أكسيد الكربون والميثان في الغلاف الجوي أعلى الآن مما كانت عليه خلال ما لا يقل عن ثلاثة ملايين سنة. وخلال ١٠٠ عام، أطلقنا في الغلاف الجوي كمية من الكربون تزيد مرة ونصفًا عن الكمية التي انبعثت على مدار أربعة آلاف عام خلال الفترة الانتقالية من العصر الجليدي الأخير إلى الفترة الدفيئة الحالية.

أجمعت الآراء العلمية الحالية على أن التغيُّرات الحديثة في تركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي قد تسببت بالفعل في ارتفاع درجات الحرارة عالميًّا. فمنذ عام ١٨٨٠،



شكل ١-٥: المصارف والمصادر العالمية التاريخية لثاني أكسيد الكربون.

ارتفع متوسط درجة حرارة سطح الأرض بمقدار ١,١ درجة مئوية. وقد صاحب هذا الاحترارَ ارتفاعٌ كبير في درجة حرارة المحيطات، وزيادة مستوى سطح البحر بأكثر من ٢٤ سنتيمترًا، وانخفاض بنسبة ٥٠٪ في جليد بحر القطب الشمالي، فضلًا عن تزايد عدد الظواهر الجوية المتطرفة. وكلما تمادينا في إطلاق المزيد من الكربون إلى الغلاف الجوي، تفاقمت الآثار الناتجة عن تغيُّر المناخ مما يفرض تهديدات وتحديات أكبر على المجتمعات البشرية.

تستعرض الفصول المتبقية من هذا الكتاب الأسس العلمية لتغيُّر المناخ والسياسات المتعلقة به والحلول المحتملة لمواجهته. فيناقش الفصل الثاني بروز تغيُّر المناخ باعتباره قضية عالمية. ويتناول الفصلان الثالث والرابع الأدلة العلمية الحالية على تغيُّر المناخ، وكيف يقوم العلماء بنمذجة المستقبل لتقييم تأثير الانبعاثات الكربونية العالمية على مناخنا. ويبحث الفصلان الخامس والسادس في تأثيرات تلك التغيُّرات المناخية المستقبلية، واحتمالية وجود مفاجآت خفية في النظام المناخي قد تُفاقِم من حدة تغيُّر المناخ. أما الفصلان السابع والثامن، فيتناولان الجوانب السياسية لتغيُّر المناخ، بالإضافة إلى الحلول

السياسية والاقتصادية والتكنولوجية الممكنة المتاحة لنا. وأخيرًا، يقدم الفصل التاسع رؤًى متعددة للمستقبل بناءً على الانبعاثات الكربونية المستقبلية ويناقش كيفية حل أزمة تغيُّر المناخ.

الفصل الثاني

تاريخ تغيُّر المناخ

يتوقع العلماء أنه إذا واصلنا مسارنا الحالي لانبعاثات الكربون، فقد ترتفع درجة حرارة الكوكب بما يتراوح بين ١,٥ درجة مئوية و٤,٧ درجة مئوية خلال الثمانين عامًا القادمة، وهو ما قد يتسبَّب في خسارة كبيرة تمثِّل نحو ٢٠٪ من إجمالي الناتج المحلي العالمي وفقًا لتقديرات الاقتصاديين. لمواجهة مثل هذا التهديد، من الضروري فهم تاريخ تغيُّر المناخ والأدلة التي تدعمه. كانت الأسس العلمية لتغيُّر المناخ متوفرة بالفعل في أواخر خمسينيات القرن العشرين، لكنها لم تنل الاهتمام الكافي حتى أواخر ثمانينيات القرن ذاته. ومنذ ذلك الحين، برز تغيُّر المناخ باعتباره من أكبر القضايا العلمية والسياسية التي تواجه البشرية.

علمٌ قديم

تاريخ علم تغيُّر المناخ طويل، ويمكن القول إنه بدأ عام ١٨٥٦ عندما نشرت يونيس نيوتن فوت (عالمة أمريكية وكذلك مخترعة وناشطة في مجال حقوق المرأة) ورقةً بحثيةً أظهرت فيها تأثير الدفيئة لغاز ثاني أكسيد الكربون. استخدمت فوت أسطوانات زجاجية ومقياس حرارة زئبقيًّا، وأثبتت أنه عند ملئها بغازات مختلفة ووضعها في ضوء الشمس المباشر، فإن الأسطوانة التي تحتوي على ثاني أكسيد الكربون تكون الأكثر اختزانًا للحرارة. وبالنظر إلى تاريخ الأرض، وضعت فوت نظريةً مفادها أن وجود مثل هذا الغاز في الغلاف الجوي من شأنه أن يزيد من حرارة كوكبنا.

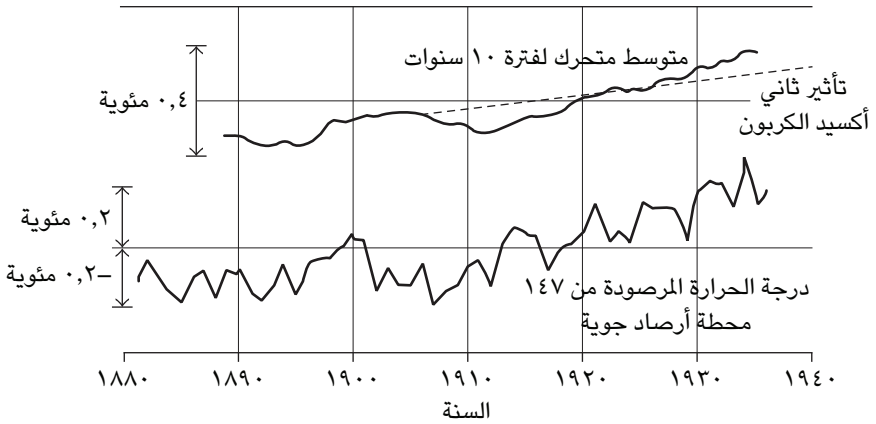
ولم تكد تمرُّ ثلاث سنوات على ذلك حتى عمد جون تايندال، أستاذ الفلسفة الطبيعية في المعهد الملكي في لندن، إلى إثبات وقياس تأثير الدفيئة لغازات مختلفة. وباستخدامه

أجهزةً تعتمد على تقنية الثرموبيل لقياس الحرارة، كان له السبق في قياس القدرة النسبية لغازات، مثل النيتروجين والأكسجين وبخار الماء وثاني أكسيد الكربون والميثان والأوزون، على امتصاص الأشعة تحت الحمراء (الحرارة). وخَلَص إلى أن بخار الماء هو أقوى الغازات الماصة للحرارة المنبعثة في الغلاف الجوي، وأنه الغاز الرئيسي الذي يتحكم في درجة حرارة الهواء على الأرض.

استكمالًا لجهود سابقة لعلماء مثل تايندال وجوزيف فوريه وكلود بويي، في عام ١٨٩٦، تمكَّن العالم السويدي سفانت أرينيوس المختص في الكيمياء والفيزياء من حساب مقدار التغيُّر الذي سيحدث في درجة حرارة الأرض في ضوء التغييرات في غازات الدفيئة. وقدَّر أنه في حالة انخفاض تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى النصف، ستنخفض درجة حرارة الأرض بمقدار أربع درجات مئوية، وأن هذا ربما كان سببًا رئيسيًّا لعصور الجليد؛ بينما إذا تضاعف تركيز ثاني أكسيد الكربون، فإن درجة الحرارة العالمية سترتفع بمقدار أربع درجات مئوية. واستنتج أن الانبعاثات البشرية المنشأ لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري ستكون كافية للتسبب في الاحترار العالمي.

وفي عام ١٩٣٨ عمد المهندس والمخترع جاي ستيوارت كاليندار إلى جمع ١٤٧ قياسًا لدرجات الحرارة من كل أنحاء العالم على مدار الخمسين عامًا الماضية، وأظهر أن العالم في الواقع كان يشهد احترارًا (الشكل ٢-١). ومستعينًا ببعض القياسات المتاحة لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، أمكنه اقتراح أنَّ تضاعف ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي سيؤدي إلى ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار درجتين مئويتين؛ أي نصف الرقم الذي أشار إليه أرينيوس. لاقت نتائج كاليندار تشكيكًا في البداية، لكن أبحاثه التي نُشرت في الأربعينيات والخمسينيات من القرن العشرين دفعت علماء آخرين إلى التحقيق في التغيُّرات التي طرأت على تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي والعوامل المتحكمة فيها.

شهدت الحرب العالمية الثانية تحسنًا هائلًا في مجال التكنولوجيا، من بين ذلك تطوير تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء، وفي أعقاب الحرب بوقتٍ قصير، تمكَّن العلماء من إثبات أن غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي العلوي يمتص الحرارة عند ضغط منخفض؛ ومن ثَم إثبات ظاهرة الدفيئة. قُوبلت المخاوف بشأن احتمالية حدوث الاحترار العالمي بالتجاهل في البداية؛ إذ ذهب العلماء إلى أن المحيطات



شكل ٢-١: تجميع جاي كاليندار لدرجات الحرارة العالمية.

ستمتص ببساطة أيَّ كميات زائدة من غاز ثاني أكسيد الكربون الناجم عن الأنشطة البشرية. وقد أعرب روجر ريفيل، مدير معهد سكريبس لعلوم المحيطات في كاليفورنيا، عن قلقه إزاء هذا التجاهل. فمن خلال دراساته لكيمياء سطح المحيطات، اكتشف أن المحيطات تعيد جزءًا كبيرًا من ثاني أكسيد الكربون الذي تمتصه إلى الغلاف الجوي. كان ذلك اكتشافًا عظيمًا، وأظهر أنه بسبب الخصائص الفريدة لكيمياء المحيطات، لن تصبح المحيطات مصرفًا كاملًا يمتص ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الأنشطة البشرية كما كان يُعتقد في البداية. نعلم الآن أن المحيطات تمتص نحو ربع إجمالي الإنتاج السنوي من ثاني أكسيد الكربون الناجم عن الأنشطة البشرية (انظر شكل ١-٥).

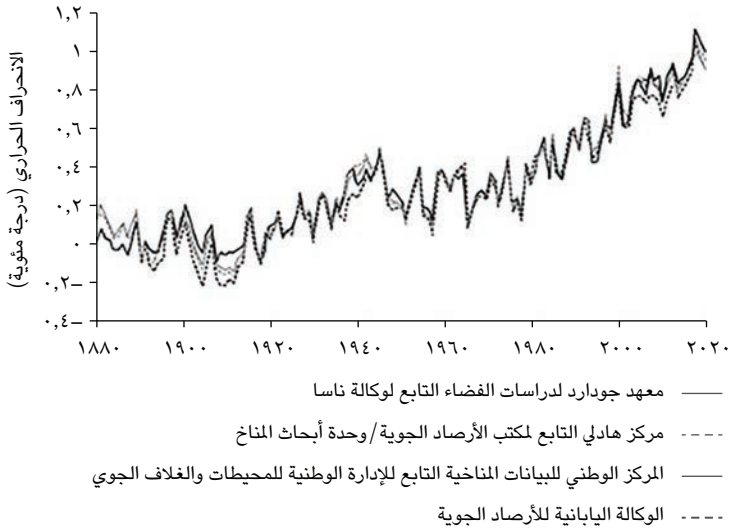
أنجز تشارلز كيلينج، الذي عيَّنه روجر ريفيل، الخطوة المهمة التالية نحو علم تغيُّر المناخ. ففي أواخر الخمسينيات وأوائل الستينيات من القرن العشرين، استخدم كيلينج أحدث التقنيات المتوفرة في ذلك الوقت لقياس تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في القارة القطبية الجنوبية ومرصد ماونا لوا. وقد أظهرت منحنيات كيلينج لثاني أكسيد الكربون ارتفاعًا مستمرًّا وباعثًا على القلق في مستويات ثاني أكسيد الكربون سنويًّا منذ أول قياس له عام ١٩٥٨، وقد أصبحت هذه المنحنيات واحدة من أشهر الصور الرمزية التي توضح ظاهرة الاحترار العالمي (انظر الشكل ١-٣).

لماذا تأخَّر الاعتراف بتغيُّر المناخ؟

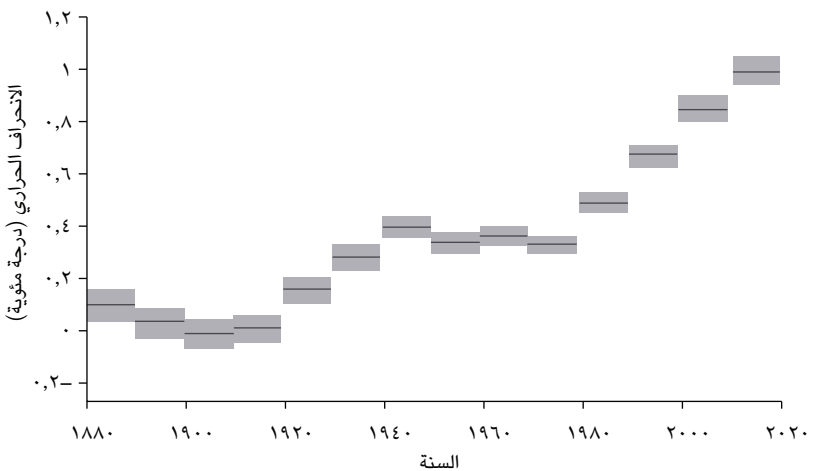
عام ١٩٥٩، نشر الفيزيائي جيلبرت بلاس مقالًا في مجلة «ساينتفيك أمريكان» يصرح فيه بأن درجة حرارة العالم سترتفع بمقدار ثلاث درجات مئوية بحلول نهاية القرن. ونشر محررو المجلة صورة مرفقة بالمقال تُظهر دخان الفحم المتصاعد من المصانع، وكتبوا تعليقًا أسفل منها: «الإنسان يُخل بتوازن العمليات الطبيعية بإضافته مليارات الأطنان من ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي كل عام». كان هذا شبيهًا بما تتداوله آلاف المقالات الصحفية والتقارير الإخبارية التلفزيونية والأفلام الوثائقية التي شاهدناها جميعًا منذ أواخر الثمانينيات. والسؤال الذي يطرح نفسه هنا، لماذا حدث هذا التأخير بين قبول العلماء لعلم دراسة الاحترار العالمي وإدراك العامة من خارج الأوساط العلمية للتهديد الحقيقي لظاهرة الاحترار العالمي في مطلع القرن الحادي والعشرين؟

إن الأسباب الرئيسية لتأخر الاعتراف بتغيُّر المناخ تُعزى إلى عدم ارتفاع درجات الحرارة العالمية وغياب الوعي البيئي على مستوى العالم. يُحسَب المتوسط العالمي لدرجة الحرارة عن طريق تجميع كل درجات الحرارة البرية والبحرية المتاحة. منذ عام ١٩٤٠ حتى منتصف السبعينيات، بدا أن منحنى درجات الحرارة العالمية يتجه نحو انخفاض طفيف (انظر الشكل ٢-٢). ودفع ذلك العديد من العلماء إلى مناقشة ما إذا كانت الأرض على أعتاب دخول العصر الجليدي العظيم التالي. لكن زيادة المعرفة بالمناخات السابقة في السبعينيات والثمانينيات أثبتت أن هذا الاحتمال غير مرجح بدرجة كبيرة؛ إذ إن العصور الجليدية تستغرق آلاف السنين حتى تتشكل.

مع ذلك، لم يُستبعد سيناريو التبريد العالمي إلا في أواخر الثمانينيات عندما بدأ متوسط درجات الحرارة السنوية العالمية في الارتفاع. وبحلول أواخر الثمانينيات، أخذ منحنى متوسط درجات الحرارة السنوية العالمية يرتفع ارتفاعًا حادًّا إلى درجة أنه أعيد النظر في الأدلة السابقة التي تعود إلى أواخر الخمسينيات والستينيات وبرزت نظرية الاحترار العالمي إلى الواجهة. وفي الواقع، عام ١٩٨٨، طُلب من البروفيسور جيم هانسن — مدير معهد جودارد لدراسات الفضاء التابع لوكالة ناسا — أن يدلي بشهادته حول هذه المسألة أمام لجنة مجلس الشيوخ الأمريكي المعنية بالطاقة والموارد الطبيعية. فصرَّح قائلًا: «لقد وصل الاحترار العالمي إلى مستوًى يجعلنا نقول بقدرٍ كبير من الثقة إن العلاقة بين ظاهرة الدفيئة والاحترار المرصود علاقة سبب ونتيجة ... وهو يحدث بالفعل الآن.» حظيت هذه الشهادة بتغطية واسعة في وسائل الإعلام، ومن هنا أصبح الاحترار العالمي قضية سائدة في الأوساط العامة.



(أ) درجات الحرارة العالمية لسطح الأرض



(ب) المتوسط العقدي

شكل ٢-٢: التفاوت في درجات حرارة سطح الأرض على مدار آخر الـ ١٥٠ سنة الأخيرة.

يبدو إذَن أن الاعتراف بتغيُّر المناخ في نهاية المطاف كان مدفوعًا بارتفاع متوسط درجة الحرارة السنوي العالمي. إذ استُعرضت وجُمِعت في التقرير العلمي الأخير لعام ٢٠٢١، الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، مجموعة واسعة من البيانات. ويُظهر التقرير صحة الاتجاه العام في درجة الحرارة العالمية الذي جرى التعرُّف عليه لأول مرة في أواخر الثمانينيات من القرن العشرين، وأن هذا الاتجاه الاحتراري استمر دون توقف حتى يومنا هذا (انظر الشكل ٢-٢).

لم يكن الارتفاع في متوسط درجات الحرارة السنوي العالمي المسجَّل هو السبب الوحيد وراء تصدُّر قضية الاحترار العالمي من جديد. ففي أواخر السبعينيات والثمانينيات، حدثت تطورات كبيرة في نمذجة المناخ العالمي. وقد أسفرت هذه النماذج الجديدة، التي حاكت الدوران العام بين الغلاف الجوي والمحيطات، عن تقديرات تشير إلى ارتفاع ملحوظ في درجات الحرارة الناتجة عن مضاعفة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، وهو أقرب في الواقع إلى حسابات أرينيوس الأصلية. بحلول الثمانينيات، ظهرت مخاوف علمية بشأن غاز الميثان وغيره من غازات الدفيئة عدا ثاني أكسيد الكربون، وكذلك بشأن دور المحيطات باعتبارها ناقلًا للحرارة. ظلت نماذج الدوران العام تشهد تحسنًا ملحوظًا، كما زاد عدد الفِرق العلمية العاكفة على تطوير هذه النماذج خلال ثمانينيات القرن العشرين وتسعينياته. عام ١٩٩٢، أُجريت أول مقارنة شاملة لنتائج ١٤ نموذجًا من النماذج المناخية العالمية، وكانت النتائج متوافقة إجمالًا، مما أكد أن زيادة غازات الدفيئة ستؤدي إلى حدوث احترار عالمي ملحوظ.

تصاعُد الحراك الاجتماعي العالمي من أجل البيئة

شهدت الثمانينيات توسعًا شعبيًّا هائلًا في الحَراك البيئي، خاصةً في الولايات المتحدة وكندا والمملكة المتحدة؛ يُعزى جزءٌ من السبب إلى ردود الفعل الغاضبة تجاه الحكومات اليمينية في ثمانينيات القرن العشرين وتوسع الاقتصاد الاستهلاكي؛ أما الجزء الآخر فيرجع إلى تزايد الأخبار المتعلقة بالبيئة في وسائل الإعلام. وقد بشَّر هذا بميلاد عصر جديد من الوعي البيئي العالمي وظهور المنظمات غير الحكومية المتعددة الجنسيات. يمكن إرجاع السبب في هذا الوعي البيئي المتزايد إلى عدد من المحطات الرئيسية: تشمل هذه المحطات نشر كتاب «الربيع الصامت» لمؤلفه راشيل كارسون عام ١٩٦٢؛ صورة الأرض كما تبدو من القمر عام ١٩٦٩؛ تقرير نادي روما عام ١٩٧٢ حول حدود النمو؛ حادث المفاعل النووي

في جزيرة ثري مايل عام ١٩٧٩؛ الحادث النووي في تشرنوبل عام ١٩٨٦؛ تسرب النفط من الناقلة إكسون فالديز عام ١٩٨٩ (على الرغم من أن الحوادث الثلاث الأخيرة تسببت في مشكلات بيئية كانت جميعها ذات تأثيرات إقليمية ومحدودة جغرافيًّا باقتصارها على المناطق التي وقعت فيها).

كان اكتشاف استنفاد الأوزون فوق القارة القطبية الجنوبية — الذي توصلت إليه هيئة المسح البريطانية للقطب الجنوبي عام ١٩٨٥ — دليلًا على الترابط بين عناصر البيئة على مستوى العالم. وكان وراء «ثقب» الأوزون سبب دولي ملموس متمثل في استخدام مركبات الكلوروفلوروكربون التي أدت إلى ظهور مجال جديد في السياسة، وهو الإدارة الدولية للبيئة. تبع ذلك مجموعة من الاتفاقيات الرئيسية: اتفاقية فيينا لحماية طبقة الأوزون عام ١٩٨٥، وبروتوكول مونتريال بشأن المواد المستنفدة لطبقة الأوزون عام ١٩٨٧، والتعديلات والتغييرات في بروتوكول لندن عام ١٩٩٠ وكوبنهاجن عام ١٩٩٢. وقد اعتبرت هذه الاتفاقيات أمثلة للدبلوماسية البيئية الناجحة.

لقد عبَّر كبار الساسة في ذلك الوقت عن إقرارهم وتأييدهم لهذه المخاوف البيئية العالمية الجديدة والقدرة على التعامل معها على الصعيد الدولي. فقد ألقت مارجريت تاتشر — رئيسة وزراء المملكة المتحدة عام ١٩٨٩ — خطابًا أمام الأمم المتحدة أوجزت فيه الأسس العلمية لتغيُّر المناخ والتهديد الذي يفرضه على كل الدول والإجراءات المطلوبة لتفادي هذه الأزمة. فأوجزت بقولها: «يجب أن نعمل من خلال هذه المنظمة العظيمة ووكلائها لضمان التوصل إلى اتفاقيات عالمية حول كيفية التعامل مع آثار تغيُّر المناخ، وتآكل طبقة الأوزون، وفقدان الأنواع الحية النادرة.» كما ألقى جورج بوش الأب، رئيس الولايات المتحدة الأسبق، خطابات مماثلة من بينها خطاب ألقاه عام ١٩٩٢ في الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي حيث قدم الخطوط العريضة لمبادراته الخاصة «السماء الصافية» والمعنية بتغيُّر المناخ العالمي.

أنشئت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ عام ١٩٨٨، وأصدرت أول تقرير علمي لها عام ١٩٩٠. وبعد عامين وبدعم من قادة العالم، عقدت الأمم المتحدة قمة الأرض في ريو دي جانيرو التي عُرفت رسميًّا باسم مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالبيئة والتنمية؛ بهدف مساعدة الدول الأعضاء على التعاون في تحقيق الاستدامة وحماية البيئة العالمية. حققت القمة نجاحًا مشهودًا وتمخض عنها إعلان ريو بشأن البيئة والتنمية، ومبادرة الاستدامة المحلية المعروفة باسم جدول أعمال القرن الحادي والعشرين، ومبادئ

الغابات. كما أسفرت القمة عن إرساء اتفاقية الأمم المتحدة لمكافحة التصحر، واتفاقية التنوع البيولوجي، واتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ التي تشكِّل أساس المفاوضات الرامية إلى الحد من انبعاثات غازات الدفيئة على مستوى العالم. وقد أرست قمة الأرض في ريو أيضًا الركائز الأساسية للأهداف الإنمائية للألفية وأهداف التنمية المستدامة التي أُعلن عنها بعد ذلك.

مشاركة علماء الاقتصاد

كان لعلماء الاقتصاد دورٌ في دراسة تغيُّر المناخ منذ بداية عمل الهيئة الحكومية الدولية. وقد كان لمنشورَين محدَّدين من علماء اقتصاد تأثيرات مختلفة تمامًا على النقاش الدائر حول تغيُّر المناخ. أولهما كتاب مثير للجدل صدر باللغة الإنجليزية عام ٢٠٠١ بعنوان «البيئي المتشكك» من تأليف بجورن لومبورج. في هذا الكتاب وفي إصدارات لاحقة، يجادل بأن تكلفة خفض انبعاثات غازات الدفيئة عالميًّا مرتفعة للغاية، وأن الفقراء هم الأكثر تضررًا من ذلك؛ لذا علينا بدلًا من ذلك أن نحد من الفقر من خلال التنمية السريعة للدول الفقيرة.

ثمة مشكلتان محوريتان في هذا النهج. أُولاهما هي الانخفاض النسبي لتكلفة التحوُّل إلى اقتصاد منخفض الكربون مما قد يعزز ذلك من النمو الاقتصادي. وثانيتهما، أنه مستبعَد تمامًا توقُّع أن تتجه الدول الغنية إلى تحويل الأموال إلى الدول الأفقر بالقدر اللازم للحد من الفقر لمجرد تجنب خفض انبعاثات الدفيئة.

أما الإسهام الفارق الثاني فهو إصدار تقرير ستيرن عام ٢٠٠٦ (الذي نُشر ٢٠٠٧) بتكليف من الحكومة البريطانية حيث تناول اقتصاديات تغيُّر المناخ. أشرف على التقرير السير نيكولاس ستيرن، مستشار الحكومة البريطانية آنذاك في مجال اقتصاديات تغيُّر المناخ والتنمية، وكان يقدم تقاريره لرئيس الوزراء توني بلير. ويفيد التقرير بأنه إذا لم نُقدِم على اتخاذ أي إجراء، فإن تأثير تغيُّر المناخ قد يكلف سنويًّا ما بين ٥٪ و٢٠٪ من إجمالي الناتج العالمي. وهذا يعني أن العالم بأسره سيخسر خُمس ما يكسبه لمعالجة تلك التأثيرات (نوقش ذلك في الفصل الخامس).

هذا بطبيعة الحال يضع تأثيرات تغيُّر المناخ على نطاق اقتصادي مختلف تمامًا عما تصوره لومبورج. لكن تقرير ستيرن يقدم بعض الأخبار السارة، إذ يجادل بأنه إذا بذلنا ما في وسعنا لتقليص انبعاثات غازات الدفيئة على مستوى العالم ولضمان التكيُّف مع

الآثار القادمة لتغيُّر المناخ، فإن هذا سيكلفنا فقط ١٪ من إجمالي الناتج المحلي العالمي كل عام.

انتقد علماء الاقتصاد تقرير ستيرن، متسائلين، على سبيل المثال، عما إذا كان قد استخدم معدل الخصم الضمني الصحيح. يشير معدل الخصم الضمني إلى النسبة التي يعتمدها علماء الاقتصاد عند احتساب أن الاستهلاك المستقبلي بطبيعة الحال تكون قيمته أقل مقارنةً بالاستهلاك في الوقت الحاضر. بعبارة أخرى، يجب خصم الاستهلاك المستقبلي لمجرد وقوعه في المستقبل؛ لأن الناس عادة تؤثِر المنافع الحالية على المنافع المستقبلية. استخدم ويليام نوردهاس، الحائز على جائزة نوبل، معدلات خصم ضمني تصل إلى ٣٪ محاججًا بأن الناس تُقدِّر اليوم قيمة الفوائد البيئية التي ستتحقق بعد ٢٥ عامًا بنصف القيمة التي يقدرون بها تحقيق الفائدة نفسها في الوقت الحالي.

تعرَّض ويليام نوردهاس في الآونة الأخيرة لانتقادات شديدة بسبب ادعائه أن ارتفاع درجة حرارة الأرض بمقدار أربع درجات مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية لن يؤدي إلا إلى انخفاض نصيب الفرد من إجمالي الناتج المحلي بنسبة تتراوح بين ٢٪ و٤٪. لكن الثغرة الأساسية في نموذج نوردهاس هو استخدامه لدالة الضرر الخطية بدلًا من دالة الضرر التربيعية، وهذا يعني أنه حتى المستويات الكارثية لتغيُّر المناخ لا تسبب أضرارًا اقتصادية بالغة وفقًا لهذا النموذج الاقتصادي. انتُقِد أيضًا تقرير ستيرن بسبب تفاؤله المفرط بشأن تكاليف التحول إلى اقتصاد منخفض الكربون. ففي يونيو ٢٠٠٨، راجع ستيرن تقديراته بشأن التكاليف ورفعها إلى ٢٪ من إجمالي الناتج المحلي العالمي. ومع ذلك، أحدث تقرير ستيرن صدمة مزلزلة على مستوى العالم. فقد بدا كأن الناس يقولون لأنفسهم: «إذا كان الاقتصاديون قلقين بشأن تكلفة تغيُّر المناخ، فلا بد أن الأمر جدِّيٌّ بالفعل.»

لم تتوقف إسهامات علماء الاقتصاد في مناقشة قضايا تغيُّر المناخ عند هذا الحد، إنما ظهر عدد من الكتب والأبحاث لها تأثير عميق حيث شككت في فهمنا للاقتصاد وعلاقته بالبيئة. من بين هذه الكتب، كتاب تيم جاكسون «ازدهار دون نمو» الذي نُشر لأول مرة عام ٢٠٠٩ وشكَّك من خلاله في الرأي التقليدي القائل بأن النمو الاقتصادي ضروري أو حتى مرغوب فيه. عام ٢٠١٧، نشرت عالمة الاقتصاد كيت راوورث كتابًا بعنوان «اقتصاد الدونات»، حيث تستعرض من خلاله سبع طرق أخفق فيها «الاقتصاد الكلاسيكي»، مؤكدةً أن الحدود البيئية وحقوق الإنسان الرئيسية لا بد أن تكون في صلب

الفكر الاقتصادي. ولأول مرة منذ جيلين، يتعرض الاقتصاد الكلاسيكي لانتقادات مستمرة على يد جيلٍ جديد من علماء اقتصاد القرن الحادي والعشرين المتميزين بديناميكيتهم ونهجهم الابتكاري؛ إذ يرون أن الصحة البيئية ورفاهة الإنسان عنصران لا ينفصلان عن الاقتصاد العالمي. ويتمحور هذا الرأي حول كيفية التصدي لتغيُّر المناخ مع تحسين حياة الأفراد.

تغيُّر المناخ ووسائل الإعلام

كان الاهتمام الإعلامي المكثف سببًا آخر في بروز تغيُّر المناخ باعتباره قضية عالمية كبرى. ويرجع ذلك إلى أن تغيُّر المناخ يُعَد مادة خصبة لوسائل الإعلام: قصة مثيرة عن نهاية العالم كما نعرفه مع شخصيات بارزة تجادل في عدم واقعية هذا الأمر. وقد عمدت أغلب المقالات في الصحف البريطانية والأمريكية والأسترالية خلال تسعينيات القرن العشرين إلى التشكيك في صحة الادعاءات المتعلقة بتغيُّر المناخ. سعت محاولات متكررة إلى تعزيز التشكيك في العلم، من خلال اتباع استراتيجيات التعميم والمبالغة في إبراز الخلافات داخل المجتمع العلمي، والأهم من ذلك، التشكيك في مصداقية العلماء والمؤسسات العلمية.

هناك تفسيران محتملان لهذا الجدل العلمي العام المدعوم إعلاميًّا على نحوٍ استثنائي. أولهما أن منكري تغيُّر المناخ، وجماعات الضغط الصناعية التي لا ترغب في رؤية إجراءات سياسية تُتخذ لمواجهة تغيُّر المناخ، ينتهزون هذا الجدل الدائر حول النُّهج والشكوك العلمية ليتخذوا منها ذريعة مناسبة لتأجيل إجراءات مواجهة تغيُّر المناخ. في الواقع، اكتُشف عام ٢٠١٩ أن خمسًا من كُبريات شركات النفط المدرَجة في البورصة قد أنفقت أكثر من ٢٠٠ مليون دولار أمريكي لممارسة الضغط من أجل التحكم في السياسات المناخية المُلزِمة أو تأخيرها أو حتى منعها.

ثانيهما أن الالتزام الأخلاقي لوسائل الإعلام بتقديم تغطية متوازنة — عند تطبيقه بطريقة غير مناسبة — يلفت انتباهًا غير مبرر إلى الآراء النقدية عندما تكون هامشية وخارج نطاق ما يُعتبر عادةً «علمًا جيدًا». في المملكة المتحدة، تعرَّضت هيئة الإذاعة البريطانية «بي بي سي» لانتقادات متزايدة لتقديمها المستمر لهذا التوازن الزائف حيث كانت تُجرى عادةً مواجهة خبير متخصص في علم المناخ مع سياسي مخضرم أو ضيفٍ مدفوع الأجر.

خارج نطاق وسائل الإعلام التقليدية، انتقل هذا الجدل المزعوم حول تغيُّر المناخ إلى وسائل التواصل الاجتماعي حيث يعمد منكرو قضية تغيُّر المناخ إلى انتقاد الأدلة وآراء العلماء كلما سنحت الفرصة. لقد أثَّر انتشار هذه الأخبار الزائفة على العديد من مجالات العلوم من بينها التطعيمات وجهود مكافحة جائحة كوفيد-١٩ فضلًا عن تغيُّر المناخ. وبذلك يساهم التوازن الزائف في النقاش الإعلامي، والأخبار الزائفة، وحملات وسائل التواصل الاجتماعي مجتمعين في تكوين انطباع عام بأن علم دراسة تغيُّر المناخ «محل خلاف»، رغم مجادلة الكثيرين بوجود أدلة علمية دامغة تؤكد حدوث تغيُّر المناخ، كما تؤكد حقيقة أن الأنشطة البشرية هي المحرك الرئيسي له.

لكن الأوضاع تتغيَّر، ومنذ بضع سنواتٍ كشف استطلاع رأي في العديد من البلدان أن الغالبية العظمى من الناس قد أدركوا أن تغيُّر المناخ قضية حقيقية ويشكل تهديدًا جسيمًا. وقد توصَّل الناس إلى تلك الحقيقة في المقام الأول من خلال تجاربهم الشخصية أو مشاهدتهم ظواهر مناخية متطرفة في كل أنحاء العالم. وباتت تُعرَض بانتظامٍ الآن أخبارٌ عن تغيُّر المناخ، بل استمرت مثل هذه الأخبار حتى في أثناء جائحة كوفيد-١٩ الأخيرة. لقد ساهمت أفلام وثائقية بارزة في جذب اهتمامٍ واسع إلى هذه القضية؛ من بين تلك الوثائقيات: «الحقيقة المزعجة» (آن إنكونفنيانت تروث) لآل جور، و«الحياة على كوكبنا» (لايف أون آور بلانت) لديفيد أتينبورو، و«تغيُّر المناخ: الحقائق» (كلايمت تشينج: ذا فاكتس) لقناة «بي بي سي» الأولى.

الحراك الاجتماعي العالمي الجديد من أجل البيئة

في عامَي ٢٠٠٨ و٢٠٠٩، شهد العالم موجةً ثانية من الوعي الاجتماعي بتغيُّر المناخ. لكن في هذه الموجة كان التركيز منصبًّا على الأمل في التوصل إلى اتفاق مناخي كبير خلال مؤتمرات كوبنهاجن للمناخ. لكن مؤتمر كوبنهاجن باء بفشل ذريع نتيجة غياب القيادة الدولية، ووضْع الولايات المتحدة بعض العراقيل، بالإضافة إلى القلق العالمي بشأن التعامل مع الأزمة المالية العالمية في عام ٢٠٠٨. وظلَّ الوضع على حاله حتى انعقاد مؤتمر باريس للمناخ عام ٢٠١٥ لاستعادة مسار المفاوضات. وعلى مدار ما يقرب من ١٠ أعوام، تراجع الحراك بسبب التركيز على الاقتصاد العالمي. لكن تبدَّل هذا الوضع تمامًا عام ٢٠١٨، عندما بدأت الموجة الثالثة من الحراك الاجتماعي العالمي من أجل البيئة.

في مايو ٢٠١٨، تأسست في المملكة المتحدة مجموعة احتجاجية تُدعى «تمرد ضد الانقراض»، وأُطلِقت رسميًّا في أكتوبر من العام نفسه بدعم ما يزيد على ١٠٠ أكاديمي مطالبين باتخاذ إجراءات لمواجهة تغيُّر المناخ. تهدف جماعة «تمرد ضد الانقراض» إلى استخدام العصيان المدني السلمي لإجبار الحكومات حول العالم على تجنُّب تجاوز الحدود الحرجة في النظام المناخي وفقدان التنوع البيولوجي، وهذا إجراء من شأنه أن يحول دون حدوث انهيار اجتماعي وبيئي. في نوفمبر ٢٠١٨ وأبريل ٢٠١٩، نظمت المجموعة احتجاجات أدت إلى شل الحركة وسط لندن، وانتشرت عضوية مجموعة «تمرد ضد الانقراض» لتشمل ما لا يقل عن ٦٠ مدينة أخرى حول العالم.

في أغسطس ٢٠١٨، بدأت الطفلة السويدية جريتا تونبر، البالغة من العمر ١٥ عامًا، تقضي أيامها المدرسية خارج البرلمان السويدي وهي تحمل لافتةً مكتوبًا عليها باللغة السويدية «إضراب مدرسي من أجل المناخ»، لتطالب باتخاذ إجراء أقوى لمواجهة تغيُّر المناخ. وسرعان ما انتشرت رسالتها. وبعد فترة وجيزة، بدأ طلاب آخرون حول العالم تنظيم إضرابات مدرسية مماثلة يوم الجمعة من كل شهر، وأطلقوا على حركتهم «أيام الجمعة من أجل المستقبل». وقُدِّر أنه مع نهاية عام ٢٠١٩ قد نُظِّم ٤٥٠٠ إضراب مدرسي في أكثر من ١٥٠ دولة، وشارك فيها نحو أربعة ملايين طالب من مختلف أنحاء العالم.

في عامَي ٢٠١٨ و٢٠١٩، نشرت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ ثلاثة تقارير ذات تأثير بالغ. نُشِر أولها عام ٢٠١٨ بعنوان «تقرير خاص عن الاحترار العالمي بمقدار ١,٥ درجة مئوية»؛ حيث وثق الخطوات التي يتعين اتخاذها إذا كان من المفترض أن يظل ارتفاع درجة الحرارة العالمية عند ١,٥ درجة مئوية فقط. كما عرض أيضًا أهداف التنمية المستدامة والتفاعلات الإيجابية والسلبية لتخفيف آثار تغيُّر المناخ. أما التقرير الثاني، فقد كان تقريرًا خاصًّا عن الأرض حيث تناول تأثير تغيُّر المناخ في التصحر وإدارة الأراضي والأمن الغذائي والأنظمة البيئية البرية. أما التقرير الثالث فكان تقريرًا خاصًّا عن المحيط والغلاف الجليدي واستعرض تأثيرات تغيُّر المناخ في سرعة ذوبان الصفائح الجليدية والأنهار الجليدية الجبلية والجليد البحري، وما يترتب على ذلك من ارتفاع مستوى سطح البحر وتأثُّر الأنظمة البيئية البحرية.

ألهم هذا الحراك الاجتماعي الجديد، وأحدث ما توصَّل إليه العلم، العديدَ من الشركات لتولي دور ريادي في مواجهة تغيُّر المناخ. فقد وضعت شركة مايكروسوفت برنامجًا لقطاع التكنولوجيا يرمي إلى تحقيق هدفٍ طموح يتمثَّل في تحقيق سلبية الكربون بحلول

عام ٢٠٣٠. وبحلول عام ٢٠٥٠، تسعى الشركة إلى إزالة التلوث الكربوني من الغلاف الجوي الذي تسببت الشركة وسلسلة التوريد الخاصة بها في إطلاقه منذ تأسيس الشركة عام ١٩٧٥. ووضعت شركة سكاي برنامجًا لقطاع الإعلام تتعهد فيه بأن تحقق الشركة وسلسلة التوريد الخاصة بها أرصدة انبعاثات كربونية سلبية بحلول عام ٢٠٣٠. كما أعلنت شركة بي بي أيضًا أنها ستصبح محايدة كربونيًّا بحلول عام ٢٠٥٠ عن طريق خفض أو إزالة ما يزيد على ٤١٥ مليون طن من انبعاثات الكربون. تمثِّل هذه الشركات جزءًا من مجموعة تضم ما يزيد على ألف شركة عالمية تعهدت بتبنِّي أهداف تستند إلى أُسُس علمية. وتعني هذه الأهداف المستندة إلى أُسُس علمية من منظور عملي أن كل هذه الشركات ستصل إلى صافي الانبعاثات الكربونية الصفري بحلول عام ٢٠٥٠.

في ظل هذا الضغط، بدأت الحكومات حول العالم، عام ٢٠١٩، تعلن أننا في الحقيقة بصدد حالة طوارئ مناخية، وأنه لا بد من اتخاذ إجراءات لمواجهتها. وفي وقت نشر هذا الكتاب، أعلنت أكثر من ١٤٠٠ حكومة محلية وأكثر من ٣٥ دولة حالة الطوارئ المناخية. وعلى الرغم من أن العالم بأسره كان تركيزه منصبًّا على مواجهة جائحة كوفيد-١٩ عام ٢٠٢٠، ظل تغيُّر المناخ قضية رئيسية. وقد شهدت وسائل الإعلام ومنصات التواصل الاجتماعي نقاشات مكثفة حول كيفية إعادة بناء الاقتصاد العالمي في مرحلة ما بعد كوفيد-١٩ بطريقة أكثر استدامة وأقل انبعاثًا للكربون. نوقش في الفصل التاسع العديد من هذه الأفكار التي جرى تنفيذ كثير منها في وقتٍ سابق.

الفصل الثالث

أدلة تغيُّر المناخ

ليس العِلم نظامًا عقائديًّا. إنما هو منهج عقلاني منطقي يتطور بناءً على ملاحظات تفصيلية، وتجارب لاختبار الأفكار والنظريات باستمرار، وإخضاعها للاختبار مرة أخرى. كما أنه أساس مجتمعنا العالمي. لذا، لا يمكنك أن تنتقي وتختار من الأدلة العلمية ما تريد أن تؤمن به وما تريد أن تنكره. على سبيل المثال، ليس بمقدورك أن تقرر أنك تؤمن بالمضادات الحيوية (لأنها قد تنقذ حياتك) أو بأن الأنابيب المعدنية الثقيلة المزودة بجناحين يمكنها التحليق (لأننا نريد السفر في عطلة)، وفي الوقت نفسه تنكر أن التدخين يسبب السرطان، أو أن فيروس نقص المناعة البشرية يسبب الإيدز، أو أن غازات الدفيئة تسبِّب تغيُّر المناخ. في هذا الفصل، أقدِّم الأدلة العلمية التي تُثبت أن تغيُّر المناخ الناجم عن الأنشطة البشرية قد بدأ بالفعل.

وزن الأدلة

إذا كنا قد قررنا أن نفهم تغيُّر المناخ، فلا بد أن نفهم آلية تطبيق العلوم. يحث مبدأ «وزن الأدلة» على الحاجة المستمرة لجمع بيانات جديدة وإجراء تجارب جديدة لاختبار أفكارنا ونظرياتنا المتعلقة بالمناخ. خلال الأربعين عامًا الماضية، لا بد أن نظرية تغيُّر المناخ كانت من بين أكثر الأفكار التي اختُبرت من كل جوانبها في مجال العلوم. هناك ست قنوات رئيسية من الأدلة يجب أن نأخذها بعين الاعتبار:

(١) تتبَّعنا الارتفاع في غازات الدفيئة في الغلاف الجوي وفهمنا دورها في التغيُّرات المناخية السابقة.

(٢) استنتجنا من القياسات المخبرية وقياسات الغلاف الجوي أن غازات الدفيئة تمتص الحرارة بالفعل عندما تكون موجودة في الغلاف الجوي. يلخص الجدول ٣-١ أحدث ما توصلنا إليه من فهم لغازات الدفيئة الأساسية.

(٣) رصدنا تغييرات ملحوظة في درجات حرارة الأرض وارتفاعًا في مستوى سطح البحر على مدار القرن الماضي.

(٤) حللنا التأثيرات الناجمة عن التغير الطبيعي في المناخ، من بين ذلك البقع الشمسية والثورات البركانية، ورغم أنها أساسية لفهم نمط التغيُّرات في درجات الحرارة على مدار الـ ١٥٠ سنة الأخيرة، لا يمكنها تفسير الاتجاه الاحتراري (الشكل ١-٥).

(٥) رصدنا تغيُّرات مؤثرة في النظام المناخي للأرض، من بينها ذوبان الصفائح الجليدية في جرينلاند والقطب الجنوبي الغربي؛ وتراجع جليد البحر القطبي الشمالي؛ وتراجع الأنهار الجليدية الجبلية في كل القارات؛ وتقلُّص التربة الصقيعيَّة وزيادة عمق طبقتها النشطة (الطبقة العلوية من التربة الصقيعيَّة التي تذوب كل صيف).

(٦) نحن نتابع باستمرارٍ الطقس العالمي وقد شاهدنا تحولات كبيرة في عدد الأحداث المناخية القصوى ودرجة شدتها: وقد ثبتَ أن تغيُّر المناخ أصبح عاملًا مساهمًا مهمًّا في العديد من هذه الأحداث الجوية القاسية.

سوف نعرض في هذا الفصل الأدلة المتعلقة بالتغيُّرات في درجة الحرارة العالمية، وهطول الأمطار، ومستوى سطح البحر، والظواهر الجوية المتطرفة.

درجة الحرارة

يمكن تقدير درجات الحرارة بالاستعانة بعدَّة مصادر سواء كانت تعتمد على مقياس الحرارة المباشر أو مؤشرات بديلة. وتُعَد المؤشرات البديلة هي المتغيِّرات التي تقاس في حال عدم توفر القياسات المباشرة أو عدم إمكان الحصول عليها. على سبيل المثال، تُعَد قياسات الأقمار الصناعية للأشعة تحت الحمراء (الحرارة) من أمثلة المؤشرات البديلة التي يمكن استخدامها لتقدير درجات حرارة سطح الأرض.

سُجِّلت قياسات درجة حرارة الهواء باستخدام أجهزة قياس الحرارة المباشرة في عدة مواقع في أمريكا الشمالية وأوروبا منذ عام ١٧٦٠. ومع ذلك، لم يشهد عدد مواقع الرصد تزايدًا بما يكفي لتوفير تغطية جغرافية عالمية تتيح حساب متوسط درجة الحرارة الأرض

جدول ٣-١: غازات الدفيئة الرئيسة وقدرتها النسبية على رفع درجة حرارة الغلاف الجوي.

غازات الدفيئة	الصيغة الكيميائية	العمر الافتراضي (بالسنوات)	مستويات ما قبل الصناعة	مستويات عام ٢٠١٨	المصدر البشري	احتمالية الاحترار العالمي (مقارنة بتركيز ثاني أكسيد الكربون)	
						٢٠ سنة	١٠٠ سنة
ثاني أكسيد الكربون	CO_2		٢٧٨ جزءًا من المليون	٤٠٧ أجزاء من المليون (زيادة < ٤٥٪)	احتراق الوقود الأحفوري، تغييرات استغلال الأراضي، إنتاج الأسمنت	١	١
الميثان	CH_4	١٢,٤	٧٠٠ جزء من المليار	١٨٥٩ جزء من المليار (زيادة ٢٥٠٪)	الوقود الأحفوري، حقول الأرز، مقالب النفايات، الماشية	٩٦	٣٢
أكسيد النيتروز	N_2O	١٢١	٢٧٥ جزءًا من المليار	٣٣١ جزءًا من المليار (زيادة < ٢٠٪)	عمليات صناعة الأسمدة، احتراق الوقود الأحفوري	٢٦٤	٢٦٥
مركب الكلوروفلوروكربون-١٢	CCl_2F_2	١٠٠	غير موجود بصورة طبيعية	٥٠٨ أجزاء من التريليون	المبردات السائلة، الفوم	١٠٨٠٠	١٠٢٠٠

غازات الدفيئة	الصيغة الكيميائية	العمر الافتراضي (بالسنوات)	مستويات ما قبل الصناعة	مستويات عام ٢٠١٨	المصدر البشري	احتمالية الاحترار العالمي (مقارنة بتركيز ثاني أكسيد الكربون)	
مركب الهيدروكلوروفلوروكربون-٢٢	$CHClF_2$	١١,٩	غير موجود بصورة طبيعية	٢٤٤ جزءًا من التريليون	المبردات السائلة	٥٢٨٠	١٧٦٠
بيرفلورو ميثان	CF_4	٥٠٠٠٠	٠*	٧٩ جزءًا من التريليون	إنتاج الألومنيوم	٤٨٨٠	٦٦٣٠
سداسي فلوريد الكبريت	SF_6	٣٢٠٠	٠*	٩,٥٩ أجزاء من التريليون	سائل عزل كهربائي	١٧٥٠٠	٢٣٥٠٠

* الكميات الضئيلة موجودة بصورة طبيعية.

عالميًّا إلا بحلول منتصف القرن التاسع عشر. إذ بدأت السفن تسجل قياسات درجات حرارة سطح البحر ودرجات حرارة الهواء البحري بانتظام منذ منتصف القرن التاسع عشر، لكن التغطية في نصف الكرة الجنوبي لا تزال ضعيفة للغاية حتى يومنا هذا. تتطلب كل هذه المجموعات من البيانات عدة تصحيحات لمراعاة الظروف المتغيِّرة وتقنيات القياس. بالنسبة إلى بيانات الأرض، على سبيل المثال، تُعايَن كل محطة للتأكد من عدم تغيُّر الظروف مع مرور الوقت نتيجة تغييرات في موقع القياس أو الأدوات المستخدمة أو أماكن حِفظ الأدوات أو حتى طرق حساب المعدلات الشهرية. يجب كذلك مراعاة توسُّع المدن حول بعض مواقع القياس؛ وهو ما قد يؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة الناتج عن تأثير الجزيرة الحرارية الحضرية. أقرَّ التقرير العلمي الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ بأن تأثير الجزر الحرارية الحضرية حقيقية واقعة، وفي حال عدم تصحيح البيانات لأخذه في الحسبان، سيظل تأثيره هامشيًّا في تجميع درجة الحرارة العالمية (أقل من ٠,٠٠٦ مئوية).

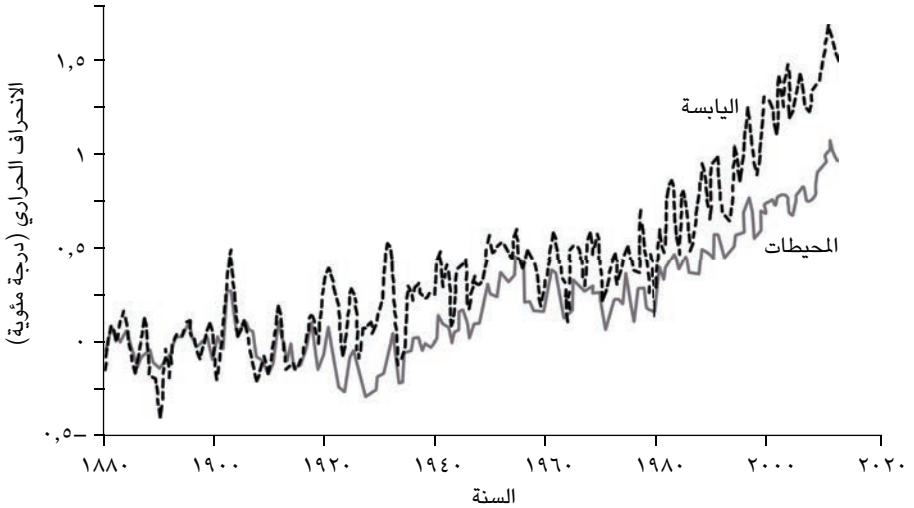
بالنسبة إلى درجة حرارة سطح البحر ومتوسط درجة حرارة الهواء، يجب تطبيق عدد من التصحيحات. أولًا، حتى عام ١٩٤١، أُجري معظم قياسات درجة حرارة سطح البحر في مياه البحر التي تُرفع على سطح السفينة في دلو. منذ عام ١٩٤١، أُجري معظم القياسات عند مداخل المياه الخاصة بمحركات السفن. ثانيًا، بين عامَي ١٨٥٦ و١٩١٠، حدث تحوُّل من الدلاء الخشبية إلى الدلاء القماشية، مما يُغير من مستوى التبريد الناتج عن التبخر الذي يحدث أثناء رفع المياه على سطح السفينة. بالإضافة إلى ذلك، شهدت تلك الفترة تحولًا تدريجيًّا من استخدام السفن الشراعية إلى السفن البخارية، مما أدى إلى تغييرات في ارتفاع أسطح السفن وسرعتها، وكلاهما يمكن أن يؤثر على عملية التبريد التبخيري للدلاء المستخدمة في القياس. أما التصحيح الرئيسي الآخر الذي يجب إجراؤه فهو التوزيع العالمي لمحطات الأرصاد الجوية على مر الزمن، والذي شهد تباينات كبيرة منذ عام ١٨٧٠.

عكف على جمع قياسات درجات الحرارة العالمية عددٌ من الجهات حول العالم من بينها مكتب الأرصاد الجوية في المملكة المتحدة، والإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا)، والإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي، ووكالة الأرصاد الجوية اليابانية (انظر الشكل ٢-٢). عام ٢٠١٢، قام البروفيسور ريتشارد مولر — وهو فيزيائي عُرف سابقًا بتشكيكه في تغيُّر المناخ — بالتعاون مع فريقه في جامعة بيركلي بجمع قياسات

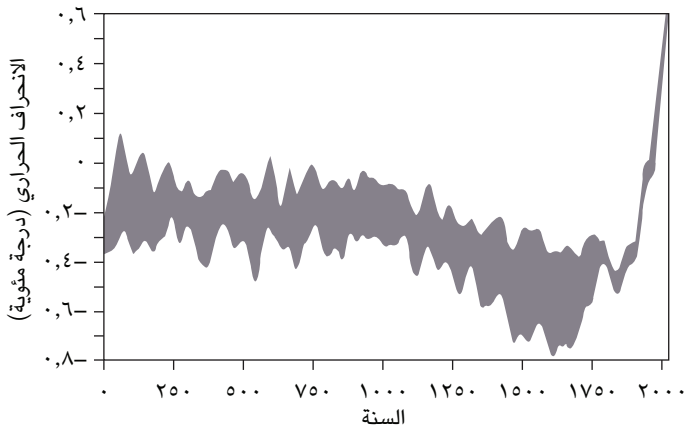
درجات الحرارة العالمية خلال الـ ٢٥٠ عامًا الماضية. ونظرًا لأن فريقه لم يراعِ كل التصحيحات اللازمة، جاءت تقديراتهم لظاهرة الاحترار العالمي أعلى من تلك التي قدمتها المجموعات الأخرى. ومن ثَم أُجريت مراجعة لهذه التقديرات، وعليها أعلن مولر صراحةً أنه غيَّر رأيه مؤكدًا أن تغيُّر المناخ واقع حقيقي يحدث، وأن المتسبب في حدوثه هو النشاط البشري.

من خلال إجراء كل التصحيحات الضرورية، أصبح ممكنًا إنشاء سجل متسلسل لدرجات حرارة سطح الأرض يغطي الفترة بين عام ١٨٨٠ و٢٠٢٠، حيث يظهر ارتفاع ملحوظ في درجات الحرارة يتراوح بين ١,٠ و١,٣ درجة مئوية، مع أخذ أن ١,١ هو الارتفاع الأكثر احتمالًا خلال هذه الفترة (الشكل ٢-٢) في الاعتبار. تدعم تلك الملاحظاتِ البياناتُ التي جُمعَت على مدار ٦٠ عامًا بواسطة بالونات الطقس والأقمار الصناعية. فعلى سبيل المثال، يوجد أكثر من ٨٠٠ محطة رصد جوي تطلِق لمرَّتين يوميًّا مسبار الرياح الراداري (إحدى أدوات الرصد الجوي)، أو بالوناتٍ لقياس درجة الحرارة والرطوبة النسبية والضغط الجوي عبر الغلاف الجوي حتى ارتفاع يصل إلى نحو ٢٠ كيلومترًا حيث تنفجر عند ذلك الارتفاع. تُظهر لنا سجلات درجات الحرارة أيضًا احترار اليابسة بوتيرة أسرع من المحيطات. فمنذ عام ١٨٥٠، ارتفعت درجة حرارة اليابسة بمقدار ١,٤٤ درجة مئوية، بينما ارتفعت حرارة المحيطات بمقدار ٠,٨٩ درجة مئوية (انظر الشكل ٣-١).

أعيد كذلك تمثيل درجات الحرارة العالمية لفتراتٍ زمنية تعود إلى ما قبل استخدام الأدوات أو أجهزة قياس الحرارة. ولتقدير درجات الحرارة المحلية، استخدمت مؤشرات مناخية قديمة مثل سُمك حلقات الأشجار والبنية النظائرية للعينات اللُّبِّيَّة الجليدية أو الرواسب الكهفية. ويُظهر الجمع بين القياسات الآلية لمتوسط درجات الحرارة العالمية وقياسات درجات الحرارة المناخية القديمة التي غطت فترة زمنية أطول، ارتفاعًا حادًّا في القياسات الأخيرة، وهو تمثيل للاحترار العالمي أشير إليه باسم «عصا الهوكي». وفي دراسة نشرتها مجلة «نيتشر» عام ٢٠١٩، بقيادة رافائيل نويكوم في مركز أوشجر لأبحاث تغيُّر المناخ (جامعة برن، سويسرا)، استخدم الباحثون أكثر من ٧٠٠ قياس مناخي قديم، وأوضحوا أنه خلال الألفَي عام الماضية كانت المرة الوحيدة التي شهد فيها العالم بأسره تغيرًا للمناخ في الوقت نفسه وفي الاتجاه نفسه هي فترة ١٥٠ سنة الأخيرة، إذ شهد ما يزيد على ٩٨٪ من سطح الكوكب ارتفاعًا في درجات الحرارة (انظر الشكل ٣-٢).



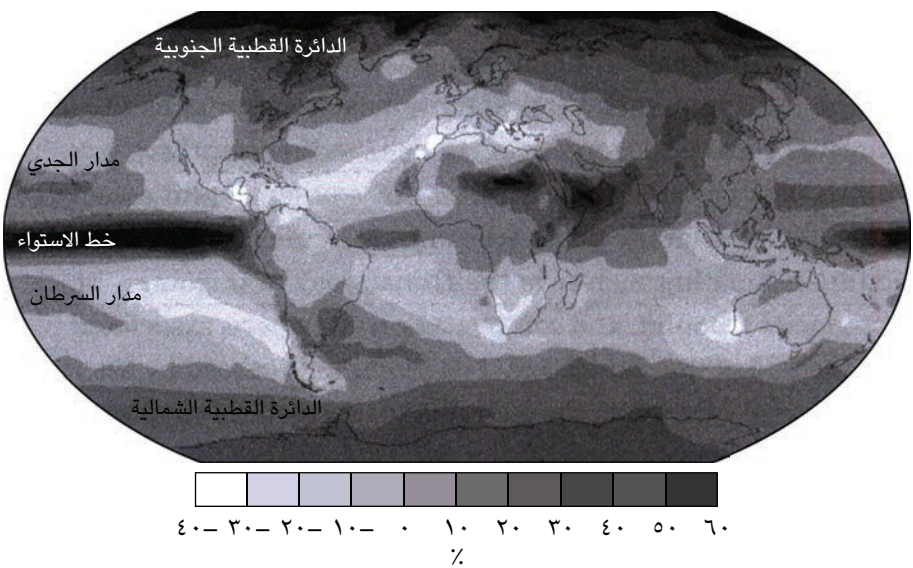
شكل ٣-١: درجات حرارة اليابسة والمحيطات منذ عام ١٨٥٠.



شكل ٣-٢: إعادة تمثيل درجات الحرارة في نصف الكرة الشمالي خلال الـ ٢٠٠٠ سنة الأخيرة.

الهطول

هناك مجموعتان رئيسيتان من البيانات العالمية الخاصة بالهطول: «هولم» وشبكة المناخ العالمية التاريخية. على عكس بيانات درجات الحرارة، فإن بيانات هطول الأمطار والثلوج، مع الأسف، ليست موثقة بدقة ولم تُسجَّل على مدار فترات زمنية طويلة. ومن المعلوم أيضًا أن الهطول فوق اليابسة يميل إلى أن يُقدَّر بأقل من الواقع بنسبة تصل إلى ١٠-١٥٪ بسبب تأثير تدفق الهواء حول أطباق التجميع. ومن دون تصحيح هذا التأثير، ربما يُلاحَظ أن هناك اتجاهًا زائفًا نحو زيادة الهطول على المستوى العالمي. رغم هذه المشكلات، يبدو أن هناك زيادة ملحوظة في معدلات الهطول خلال الـ ٢٥ سنة الماضية (انظر الشكل ٣-٣)، خاصةً في دوائر العرض الوسطى لنصف الكرة الشمالي. وتدعم هذه الملاحظةَ أدلةٌ تشير إلى أن المحتوى المائي في الغلاف الجوي قد ازداد فوق اليابسة والمحيطات منذ ثمانينيات القرن العشرين، وكذلك ازداد في الجزء العلوي من طبقة التروبوسفير. ويتماشى هذا مع بخار الماء الإضافي الذي يستطيع الغلافُ الجوي الأكثر دفئًا استيعابه.

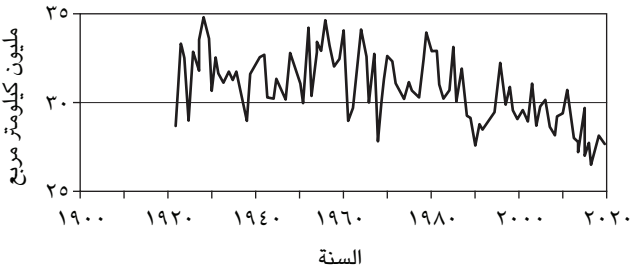


شكل ٣-٣: التغيُّرات في مستويات الهطول عالميًّا (١٩٠٠–٢٠١٨)

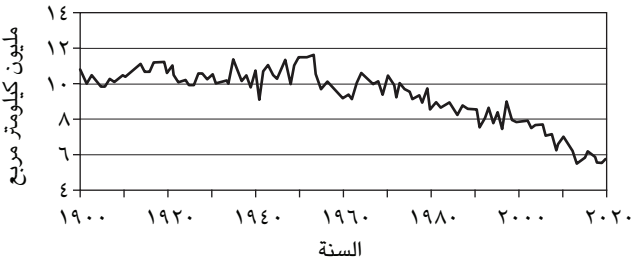
تتوفر أدلة على أن الهطول يشهد زيادة عالمية، لكن تزداد هذه الأدلة قوةً عند النظر في كل منطقة على نحوٍ مستقل. يشير أحدث تقرير صادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ إلى وجود زيادة ملحوظة في الهطول في المناطق الشرقية من أمريكا الشمالية والجنوبية، وأوروبا الشمالية، وشمال ووسط آسيا. كما يبدو أن موسمية الهطول متغيِّرة، على سبيل المثال في المناطق الواقعة على دوائر عرض عالية بنصف الكرة الشمالي، حيث تزداد الأمطار في الشتاء وتنخفض في الصيف. كما رُصِدت اتجاهات الجفاف على المدى الطويل في منطقة الساحل، وحوض البحر الأبيض المتوسط، وجنوب أفريقيا، وبعض مناطق جنوب آسيا. كما رُصد أيضًا زيادة كمية الأمطار التي تتساقط أثناء فترات الأمطار الغزيرة أو القصوى.

مستوى سطح البحر النسبي العالمي

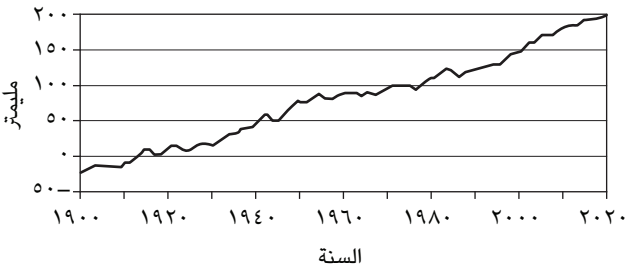
جمعت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ أيضًا كل البيانات الحالية بشأن مستويات سطح البحر العالمية. فأظهرت البيانات أنه بين عامَي ١٩٠١ و٢٠١٨، ارتفع مستوى سطح البحر عالميًّا بأكثر من ٢٤ سم (انظر الشكل ٣-٤). ومع ذلك يُعَد قياس التغيُّر في مستوى سطح البحر معقدًا، حيث تُستمد التغيُّرات النسبية في مستوى البحر من مجموعتين مختلفتين تمامًا من البيانات، وهما مقياس المد والجزر والأقمار الصناعية. في النظام التقليدي لمقياس المد والجزر، يُقاس مستوى سطح البحر بالنسبة إلى نقطة مرجعية ثابتة على اليابسة. تكمن المشكلة الرئيسية في أن سطح الأرض أكثر ديناميكية مما يتصور البعض، حيث يشهد الكثير من الحركات العمودية مما يؤدي إلى دمج هذه الحركات في القياسات. قد تحدث الحركات العمودية للأرض نتيجة الانضغاط الجيولوجي الطبيعي لرواسب الدلتا، أو سحب المياه الجوفية من المستودعات الجوفية الساحلية، أو الارتفاع الناتج عن تصادم الصفائح التكتونية (وأشد مظاهره هو تكوُّن الجبال كما في جبال الهيمالايا)، أو استمرار الارتداد التدريجي للأرض بعد انتهاء الفترة الجليدية، وما يرافقه من تعويض جيولوجي في مناطق أخرى مرتبط بانتهاء العصر الجليدي الأخير. يحدث الارتداد نتيجة الإزالة السريعة للوزن عند ذوبان الصفائح الجليدية الضخمة، مما يسمح للأرض التي تعرضت لضغط الوزن بالارتفاع تدريجيًّا حتى تعود إلى وضعها الأصلي. ومثال لذلك هو اسكتلندا التي ترتفع بمعدل ثلاثة مليمترات سنويًّا، بينما لا تزال إنجلترا تهبط بمعدل مليمترين سنويًّا رغم ذوبان الصفيحة الجليدية في اسكتلندا منذ



(أ) الغطاء الجليدي أثناء فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي



(ب) امتداد الجليد البحري في القطب الشمالي صيفًا



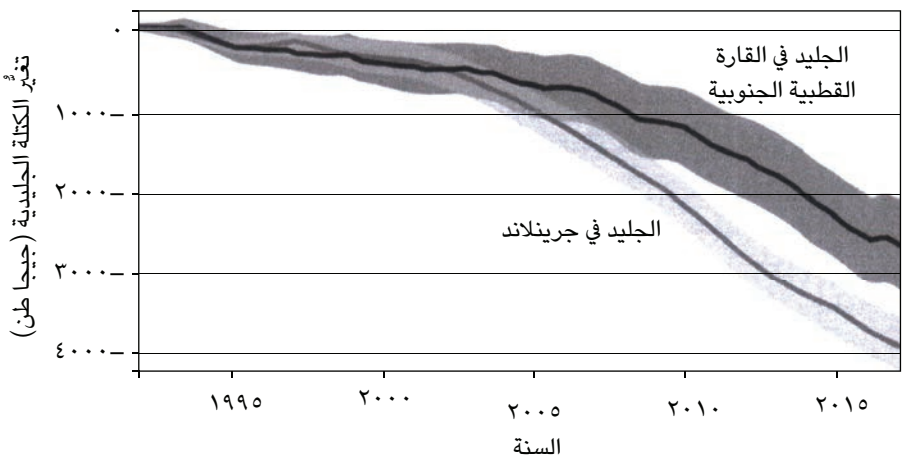
(جـ) متوسط التغيُّر في مستوى سطح البحر عالميًّا

شكل ٣-٤: مؤشرات تغيُّر المناخ.

١٠ آلاف سنة. في المقابل، تكمن مشكلة بيانات الأقمار الصناعية في قِصَر الفترة الزمنية التي تغطيها. فقد كان أفضل ما توصلت إليه بيانات الأقمار الصناعية تلك التي صدرت في يناير ١٩٩٣، حيث أظهرت ارتفاعًا في مستوى سطح البحر يزيد على ٣٥ مليمترًا لكل

عقد. وهذا يعني أن بيانات الأقمار الصناعية يجب دمجها مع بيانات مقاييس المد والجزر لدراسة الاتجاهات الطويلة الأجل.

خلاصة القول أنه بين عامَي ١٩٠١ و٢٠١٨، ارتفع متوسط مستوى سطح البحر عالميًّا بمعدل نحو ٢ملم سنويًّا، مع رصد أسرع ارتفاع في مستوى سطح البحر بين عامَي ٢٠٠٨ و٢٠١٨ بمعدل ٤,٢ مليمترات سنويًّا. ويرجع ارتفاع مستوى سطح البحر خلال الـ ٣٠ عامًا الماضية إلى العوامل الآتية: ٣٩٪ من التمدد الحراري للمحيطات؛ ٩٪ من الصفيحة الجليدية في القارة القطبية الجنوبية؛ ١٢٪ تقريبًا من الصفيحة الجليدية في جرينلاند؛ ٢٧٪ من الأنهار الجليدية وغيرها من الأغطية الجليدية؛ و١٣٪ تقريبًا نتيجة انخفاض إجمالي المخزون المائي في اليابسة (انظر شكل ٣-٥). ساهمت الصفائح الجليدية في جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية في الارتفاع الأخير لمستوى سطح البحر، ويبدو أن تأثير تلك المساهمة في تسارُع مستمر. كما تشير التقديرات الحالية إلى أن جرينلاند تفقد أكثر من ٢٣٠ جيجا طن من الجليد سنويًّا، وهو ما يمثِّل زيادةً قَدرُها سبعة أضعاف منذ أوائل تسعينيات القرن العشرين. في الوقت نفسه، تفقد القارة القطبية الجنوبية نحو ١٥٠ جيجا طن من الجليد سنويًّا، وهو ما يمثِّل زيادةً قَدرُها خمسة أضعاف منذ أوائل التسعينيات، وتأتي معظم هذه الخسائر من شمال شبه الجزيرة القطبية الجنوبية وقطاع بحر أموندسن في غرب القارة.



شكل ٣-٥: ذوبان الصفائح الجليدية في المنطقة القطبية الجنوبية وجرينلاند.

أدلة أخرى على الاحترار العالمي

تُستخلص الأدلة الأخرى على تغيُّر المناخ من دوائر العرض العالية ومن مراقبة الظواهر الجوية المتطرفة. فقد تراجع متوسط الامتداد السنوي للجليد البحري في القطب الشمالي بين عامَي ١٩٧٩ و٢٠١٨ بمعدل يتراوح إجمالًا بين ٣,٥٪ و٤,١٪ لكل عقد، مما يعني خسارةً تتراوح بين ٠,٤٥ و٠,٥١ مليون كيلومتر مربع لكل عقد. أما الحد الأدنى للجليد البحري في فصل الصيف فقد شهد انخفاضًا أكبر بمعدل ١٢,٨٪ لكل عقد، أي ما يعادل خسارةً قَدرُها مليون كيلومتر مربع لكل عقد. وفي المقابل، شهد متوسط الامتداد السنوي للجليد البحري في القطب الجنوبي بين عامَي ١٩٧٩ و٢٠١٨ تقلبات ملحوظة بين ارتفاع وانخفاض في القياسات دون أن يظهر اتجاه واضح عند مراجعة البيانات المستمَدَّة من عمليات الرصد المستمرة عبر الأقمار الصناعية لهذه الفترة.

هناك أيضًا أدلة مستمَدَّة من مناطق التربة الصقيعية. توجد التربة الصقيعية في المناطق الواقعة على دوائر عرض عالية أو على ارتفاعٍ عالٍ حيث يكون المناخ قارص البرودة إلى درجة أن الأرض تصبح متجمدة حتى عمق كبير. وخلال أشهر الصيف، تصبح الطبقة العلوية من التربة بنحو نصف متر دافئة بما يكفي لتذوب؛ ولذا يُطلق عليها «الطبقة النشطة». على مدار الخمسين عامًا الماضية، ارتفعت درجة الحرارة في ألاسكا بمقدار ثلاث درجات مئوية، بينما ارتفعت بمقدار درجتين مئويتين في التربة الصقيعية بشمال أوروبا وروسيا؛ وهذا دليل على امتداد الطبقة النشطة من التربة الصقيعية إلى عمقٍ أكبر. منذ عام ١٩٠٠، انخفض الحد الأقصى من المساحة التي تغطيها التربة الصقيعية الموسمية في نصف الكرة الشمالي بنسبة ٧٪، مع تراجع أكبر في فصل الربيع يصل إلى ١٥٪. هذا التغيُّر المتزايد والسريع في الغلاف المتجمد سيؤدي إلى زيادة المخاطر الطبيعية التي تهدد السكان والبنى وروابط الاتصال. وقد شاهدنا تلك المخاطر بالفعل متمثلةً في أضرار لحقت بالأبنية والطرق وخطوط الأنابيب، مثل خطوط النفط في ألاسكا. إلى جانب ذلك، هناك أدلة على تراجع معظم الأنهار الجليدية التي لا تُعَد جزءًا من الصفائح الجليدية، إن لم تكن جميعها. كما انخفض بدرجة كبيرةٍ إجمالي كميات الثلوج المتساقطة، وغطاء الثلوج والجليد السنوي خاصةً في نصف الكرة الشمالي (انظر الشكل ٣-٤). بين عام ١٩٢٢ و٢٠١٨، فُقِد في كل عقدٍ أكثر من ٠,٢٧ مليون كيلومتر مربع من الثلوج والغطاء الجليدي. في المنطقة القطبية الشمالية، تراجعت مدة تغطية الجليد بمعدل يتراوح بين

٣ و٥ أيام كل عقد، مع حدوث تراجع أكبر في منطقة القطب الشمالي الأوراسي (بمقدار ١٢,٦ يومًا تقريبًا) ومنطقة القطب الشمالي في أمريكا الشمالية (بمقدار ٦,٢ أيام).

هناك أيضًا أدلة على أن فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي يبدأ الآن في وقتٍ أبكر من ذي قبل. تُظهر قياسات الغطاء الجليدي، التي جُمعت منذ عام ١٦٩٣، لنهر تورنيو في فنلندا أن ذوبان النهر المتجمد في فصل الربيع يحدث الآن في وقت أبكر بشهر عن ذي قبل. في كيوتو باليابان، تظهر زهور الكرز الشهيرة الآن قبل ٢١ يومًا من موعدها قبل ١٠٠ عام. وفي فرنسا، أصبح حصاد العنب في مدينة بوون يبدأ الآن قبل ١٠ أيام مما كان عليه قبل ١٠٠ عام. أما في بريطانيا، من بين العديد من المؤشرات على قدوم الربيع في وقت أبكر، ثمة دليل على تعشيش الطيور الآن قبل أكثر من ١٢ يومًا مما كان عليه الحال قبل ٤٥ عامًا. كما أن أنواع الحشرات، بما في ذلك النحل والنمل الأبيض، التي تحتاج إلى الطقس الدافئ للبقاء على قيد الحياة، باتت تتحرك نحو الشمال، وقد وصل بعضها إلى إنجلترا بعد عبورها القنال الإنجليزي من فرنسا. في غضون ذلك، في الولايات المتحدة، بدأت الأنواع النشطة في أوائل الربيع، مثل الليلك وزهرة العسل، في بسط أوراقها قبل ثلاثة أسابيع مما كانت عليه قبل ٤٠ عامًا.

الظروف الجوية المتطرفة

يشير التقرير الأخير الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ أنه من شبه المؤكد أن تغيُّر المناخ الناجم عن أنشطة بشرية قد تسبَّب في زيادة تكرار موجات الحر وشدتها، وكذلك انخفاض موجات البرد الشديدة في أغلب القارات. فقد زاد تكرار موجات الحر وشدتها في أوروبا، وآسيا، وأمريكا، وأستراليا. كما شهد العقد الماضي أرقامًا قياسية في موجات الحر التي ضربت أستراليا وكندا وتشيلي والصين والهند واليابان والشرق الأوسط وباكستان والولايات المتحدة.

يُعَد تغيُّر المناخ أيضًا السبب الرئيسي وراء شدة الهطول الغزير الذي رُصد في مناطق قارية ونتج عنه غالبًا حدوث فيضانات. وقد سُجلت أرقامٌ قياسية للفيضانات الجارفة خلال العقد الماضي في البرازيل وبريطانيا وكندا وتشيلي والصين وشرق أفريقيا وأوروبا والهند وإندونيسيا واليابان وكوريا والشرق الأوسط ونيجيريا وباكستان وجنوب أفريقيا وتايلاند والولايات المتحدة وفيتنام.

كان لتغيُّر المناخ الناجم عن الأنشطة البشرية أيضًا دور في تشكيل التوزيع العالمي للأعاصير الاستوائية وشدتها. ففي عام ٢٠٢٠، أجرى جيمس بي كوسين من الإدارة

الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي دراسةً بالتعاون مع زملائه، حيث أظهرت زيادةً نسبتها ١٥٪ في وقوع أكثر الأعاصير المدمرة حول العالم على مدار الـ ٤٠ عامًا الماضية. وكانت الزيادة الأكثر وضوحًا هي ٤٩٪ لكل عقد في الأعاصير الكبرى التي ضربت المحيط الأطلسي الشمالي، وزيادة ١٨٪ لكل عقد في الأعاصير الكبرى التي ضربت جنوب المحيط الهندي. بإيجاز، زاد عدد الأعاصير الاستوائية التي نشأت في شمال المحيط الأطلسي والمحيط الهادئ وجنوب المحيط الهندي، كما زادت التباينات من عام إلى آخر. على سبيل المثال، في عام ٢٠١٩، ضربت المحيطَ الهندي أربعةُ أعاصير هائلة، حيث كان اثنان منها في جنوب المحيط الهندي غير مسبوقَين. اتَّسم موسم الأعاصير في جنوب غرب المحيط الهندي في العامين ٢٠١٨-٢٠١٩ بأنه الموسم الأكثر خسارة مالية ونشاطًا منذ بدء التسجيلات الموثوقة التي بدأت عام ١٩٦٧. وفي عام ٢٠٢٠، تَشكَّل الإعصار الفائق القوة «أمفان» في شمال المحيط الهندي وضرب ولاية غرب البنغال، مما أثَّر على قرابة ٤٠ مليون نسمة، وتسبَّب في أضرار تجاوزت ١٣ مليار دولار أمريكي.

والسبب وراء تأكُّد العلماء أن العديد من هذه الظواهر الجوية المتطرفة ازدادت سوءًا بسبب تغيُّر المناخ هو مجالٌ جديد يُعرف بعلم الإسناد. فالتقدم في قوة معالجة الكمبيوتر وتحسين طرق نمذجة العوامل المؤثرة في الطقس يسمح للعلماء بإجراء محاكاة للظواهر الجوية في منطقة ما، سواء كانت تحت تأثير غازات الدفيئة الناتجة عن الأنشطة البشرية أو من دونها. هذا من شأنه أن يتيح لنا تحديد مدى مساهمة تغيُّر المناخ في حدوث ظواهر مناخية متطرفة بعينها؛ وفي حال مساهمته، يمكننا تحديد ما إذا كان قد زاد من شدة الظاهرة أو تكرارها أو كلا الأمرين. خضع أكثر من ١١٣ ظاهرة جوية متطرفة وقعت بين عامَي ٢٠١٥ و٢٠٢٠ لدراسة باستخدام علم الإسناد: وُجد أن ٧٠٪ من هذه الظواهر شهدت زيادة في تكرار حدوثها أو في شدتها بسبب تغيُّر المناخ؛ بينما شهد ٢٦٪ منها انخفاضًا في تكرار حدوثها بسبب تغيُّر المناخ؛ بينما لم يُظهر ٤٪ منها أي تأثر بتغيُّر المناخ.

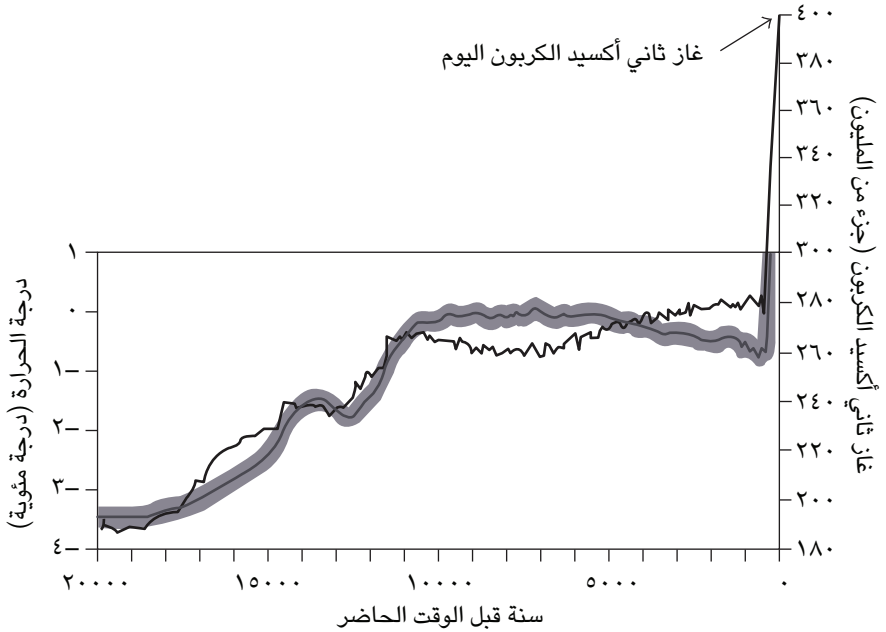
ماذا يدَّعي منكرو تغيُّر المناخ؟

إن إحدى أفضل الطرق لتلخيص الأدلة على تغيُّر المناخ هي مراجعة ما يدعيه منكرو تغيُّر المناخ على أحدث ما توصلت إليه العلوم الحديثة.

تشير بيانات العينات اللُّبِّيَّة الجليدية إلى أن ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يستجيب لدرجة الحرارة العالمية، ومن ثَم لا يمكن أن يكون سببًا في تغيُّر درجة الحرارة العالمية. في نهاية العصر الجليدي الأخير، ارتفعت درجة حرارة الأرض. وتوصلنا من العينات اللُّبِّيَّة الجليدية في جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية أن درجة حرارة نصفَي الكرة الشمالي والجنوبي قد ارتفعت في أوقات مختلفة وبمعدلات مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، ثمة ظواهر مناخية على نطاق زمني يمتد لآلاف السنين، حيث انفصلت كميات هائلة من الجليد عن الصفيحة الجليدية الذائبة في أمريكا الشمالية، مما أدى إلى إغراق شمال المحيط الأطلسي بالمياه العذبة، وتغيير دوران المحيطات، وتبريد نصف الكرة الشمالي.

من بين هذه الظواهر ظاهرة هاينريش ١ التي حدثت منذ ١٥ ألف سنة، والظاهرة الأخرى هي فترة درياس الأصغر التي شهدها كوكب الأرض منذ نحو ١٢ ألف سنة. بسبب ظاهرة تُعرف باسم «أرجوحة المناخ القطبي» عندما يشهد نصف الكرة الشمالي انخفاضًا في درجات الحرارة، تنتقل الحرارة جنوبًا عبر التيارات المحيطية، مما يؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة في نصف الكرة الجنوبي. لذلك، عند مقارنة سجل درجات الحرارة المستخرجة من العينات اللُّبِّيَّة الجليدية مع مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي التي أعيد تمثيلها، نلاحظ وجود فترات تبدو فيها العلاقة بينهما متبادلة. وحتى نتعمق في فهم العلاقة بين درجات الحرارة العالمية وثاني أكسيد الكربون، قام البروفسور جيرمي شاكن من جامعة هارفارد بالتعاون مع زملائه بإنشاء سجل مرجعي مجمَّع لكل سجلات درجات الحرارة خلال نهاية العصر الجليدي الأخير (انظر شكل ٣-٦). وكشف هذا السجل أن التغيُّر في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يسبق ارتفاع درجات الحرارة العالمية، مما يعزز ثقتنا في مساهمته في احترار الأرض مع انتهاء العصر الجليدي الأخير.

غاز ثاني أكسيد الكربون لا يمثِّل إلا جزءًا صغيرًا من الغلاف الجوي، وبذلك ليس متوقعًا أن يتسبَّب في ارتفاع كبير بدرجات الحرارة. هذه ليست إلا محاولة لطرح حجة بديهية مبسَّطة، لكنها خاطئة تمامًا. أولًا، أجرى العلماء تجارب متكررة في المختبر، وسجلوا قياسات في الغلاف الجوي حيث أثبتت مرارًا وتكرارًا تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون. ثانيًا، ردًّا على الحجة «البديهية» التي تزعم بأن كميات ضئيلة من أي مادة لا تسبب أي تأثير يُذكر، فإن ٠٫١ جرام من السيانيد كافٍ لقتل شخص بالغ، وهو ما



شكل ٣-٦: التغيُّرات في درجات الحرارة العالمية وغاز ثاني أكسيد الكربون على مدار الـ ٢٠ ألف سنة الأخيرة.

يمثِّل نحو ٠,٠٠٠١٪ من وزن الإنسان. في المقابل، يشكل غاز ثاني أكسيد الكربون حاليًّا ٠,٠٤٪ من الغلاف الجوي، إلا أنه يُعَد مكونًا قويًّا من غازات الدفيئة. وفي الوقت نفسه يظل النيتروجين الذي يشكل ٧٨٪ من الغلاف الجوي غازًا خاملًا للغاية.

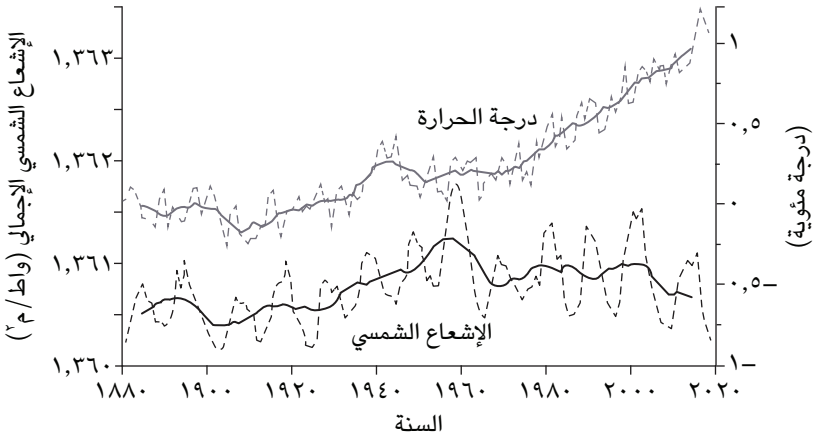
أُجريت تصحيحات أو تعديلات على كل مجموعات البيانات لتعكس الاحترار العالمي. بالنسبة إلى من لا يشاركون بانتظام في مجال البحث العلمي، تبدو مسألة تعديل البيانات هي المشكلة الكبرى في الجدال القائم حول حدوث تغيُّر المناخ. وكما أُشير أعلاه، فإن كل مجموعات البيانات المناخية التي تغطي آخر ١٥٠ عامًا تحتاج إلى بعض التعديلات. ومع ذلك، فإن هذا الإجراء جزء من عملية البحث العلمي. على سبيل المثال، في عام ٢٠١٢، نشر مولر ومجموعته البحثية في جامعة بيركلي سجلاتٍ مجمَّعةً لدرجات الحرارة العالمية، حيث أظهرت ارتفاعًا بمقدار ١,٥ درجة مئوية على مدار الـ ٢٥٠ عامًا

الماضية. كان هذا الرقم أعلى بكثير من التقديرات الأخرى؛ إذ لم تعدِّل مجموعة بيركلي كل السجلات المناخية. يشهد العلم تطورًا تدريجيًّا حيث يكتسب فهمًا أعمق ورؤًى أكثر دقة عن مجموعات البيانات التي يستخدمها.

هذا التشكيك المستمر في كل البيانات وتفسيراتها هو جوهر العلم: فكل تصحيح أو تعديل جديد هو ثمرة فهم أعمق للبيانات ولنظام المناخ، ومن ثَم فإن كل دراسة جديدة تعزز ثقتنا في النتائج. ولهذا السبب أشار تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ إلى «أهمية الأدلة»، حيث تزداد ثقتنا في العلم عندما نحصل على نتائج متشابهة من مصادر مختلفة تمامًا.

ترجع التغيُّرات في درجات الحرارة العالمية إلى التغيُّرات التي تحدث في نشاط الشمس. يتفق كلٌّ من منكري تغيُّر المناخ وعلماء المناخ على أن البقع الشمسية والنشاط البركاني يؤثران في المناخ ودرجات الحرارة العالمية. لكن الخلاف بين الفريقين يكمن في أن المنكرين يُصرون على أن تلك التغيُّرات الطبيعية هي العامل الرئيسي المتحكم في المناخ. هناك أدلة تشير إلى أن دورة الشمس التي تستمر ١١ عامًا، ويتفاوت أثناءها إنتاج الطاقة الشمسية بنحو ٠٫١٪، يمكن أن تؤثر في تركيزات الأوزون ودرجات الحرارة والرياح في طبقة الستراتوسفير. ولكن تأثير هذه التغيُّرات ضئيل جدًّا في درجات الحرارة سطح الأرض. يُظهر الشكل ٣-٧ أنه منذ عام ١٨٨٠، ازداد الإشعاع الشمسي تدريجيًّا حتى وصل إلى ذروته في عام ١٩٥٥ تقريبًا، ومنذ ذلك الحين هو آخذ في الانخفاض. لذا، على مدار الخمسين عامًا الماضية، حينما ارتفعت درجات الحرارة العالمية ارتفاعًا كبيرًا، شهدنا في الواقع انخفاضًا في إنتاج الطاقة الشمسية.

على مدار الـ ١٥٠ عامًا الماضية، أمكن تسجيل تغيُّرات كبيرة في المناخ، وهي تغيُّرات مختلفة اختلافًا ملحوظًا عن تلك التي حدثت على الأقل خلال الـ ٢٠٠٠ عام الماضية. تشمل هذه التغيُّرات ارتفاعًا في متوسط درجات الحرارة العالمية بمقدار ١٫١ درجة مئوية؛ وارتفاع مستوى سطح البحر بأكثر من ٢٤سم؛ وتغيُّرات كبيرة في مواسم الهطول وشدتها؛ وتغيُّر أنماط الطقس؛ وتسارُع ذوبان الصفائح الجليدية في جرينلاند وغرب القارة القطبية الجنوبية؛ وتراجعًا ملحوظًا في الجليد البحري بالقطب الشمالي، وتقريبًا في كل الأنهار الجليدية القارية. ووفقًا للإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي في الولايات المتحدة، فإنه بين عامَي ١٨٨٠ و٢٠٢٠، سُجلت السنوات العشر الأكثر دفئًا خلال السنوات الخمس عشرة الماضية، حيث كانت سنة ٢٠٢٠ هي السنة الأكثر دفئًا بالتساوي



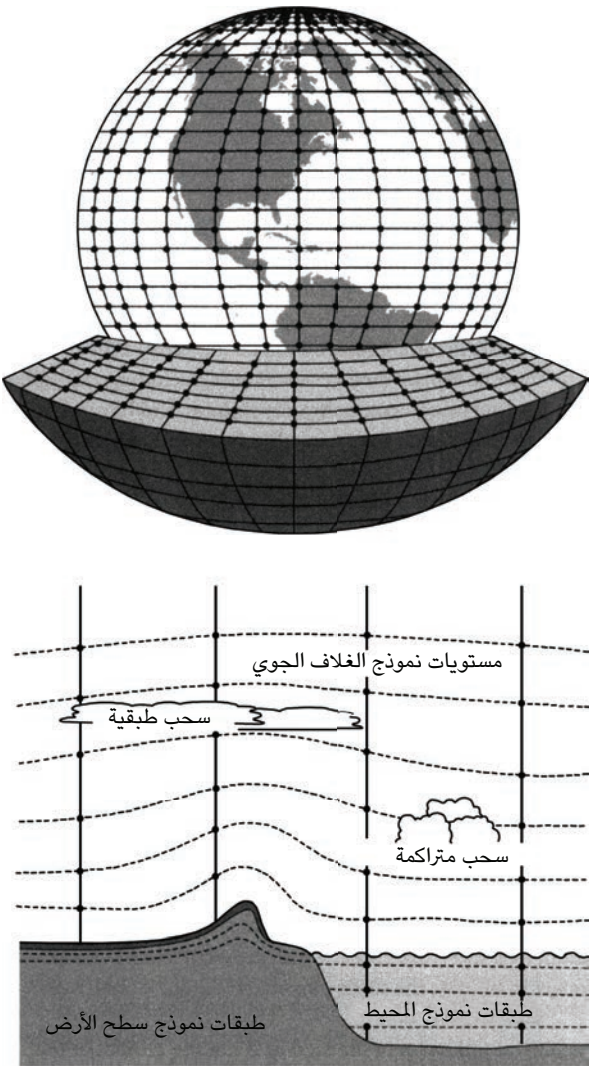
شكل ٣-٧: البقع الشمسية ودرجات الحرارة العالمية.

مع سنة ٢٠١٦، تليها سنوات ٢٠١٩، ٢٠١٥، ٢٠١٧، ٢٠١٨، ٢٠١٤، ٢٠١٠، ٢٠١٣، و٢٠٠٥. أفاد تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ الصادر عام ٢٠٢١ إلى أن الأدلة على تغيُّر المناخ واضحة وبيِّنة، وتزداد الثقة في أن هذا الاحترار ناتج عن انبعاثات غازات الدفيئة التي يتسبب فيها النشاط البشري. ويدعم هذا التقرير ستة أدلة رئيسية: (١) أُجريَ قياس لارتفاع غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، وأظهرت البنية النظائرية لهذه الغازات أن الجزء الأكبر من الكربون الإضافي ينتج عن حرق الوقود الأحفوري؛ (٢) تُظهر القياسات المختبرية والغلاف الجوي أن هذه الغازات تمتص الحرارة؛ (٣) لوحظت تغيُّرات كبيرة في درجات الحرارة العالمية وارتفاع مستوى سطح البحر على مدار القرن الماضي؛ (٤) لوحظت تغييرات كبيرة أخرى في الغلاف الجليدي والمحيطات واليابسة والغلاف الجوي، بما في ذلك تراجع الصفائح الجليدية والجليد البحري والأنهار الجليدية، بالإضافة إلى الظواهر الجوية المتطرفة، وتُعزى هذه التغيرات مباشرةً إلى تأثير تغيُّر المناخ؛ (٥) هناك أدلة واضحة على أن العمليات الطبيعية، مثل البقع الشمسية والثوران البركاني، لا يمكنها تفسير الاتجاه نحو الاحترار الذي حدث على مدار الـ ١٠٠ عام الماضية؛ (٦) أصبح لدينا الآن فهمٌ أعمق للتغيُّرات المناخية الطويلة الأمد التي شهدها الماضي والدور الحاسم لغازات الدفيئة في تنظيم مناخ كوكبنا.

الفصل الرابع

نمذجة المناخ المستقبلي

تُسيِّر كل المجتمعات البشرية حياتها بناءً على معرفتها بأحوال الطقس في المستقبل. على سبيل المثال، يعرف المزارعون في الهند موعد هطول الأمطار الموسمية في العام المقبل، ومن ثَم يعرفون متى ينبغي لهم زراعة محاصيلهم. ويعرف المزارعون في إندونيسيا أن هناك موسمين للأمطار كل عام، وبذلك سيتسنَّى لهم الحصول على حصادَين في العام المقبل. هذا يعتمد على معرفتهم السابقة بأحوال الطقس، حيث كانت الأمطار الموسمية تهطل دائمًا في الوقت نفسه تقريبًا كل عام حسب ما علَق في أذهانهم. لكن الحاجة إلى التنبؤ بالطقس أعمق من ذلك؛ إذ يؤثر في كل جوانب حياتنا. صُمِّم ما لدينا من منازل وطرق وسكك حديدية ومطارات ومكاتب وسيارات وقطارات وما إلى ذلك لتتناسب مع طبيعة المناخ المحلي. على سبيل المثال، تُجهَّز كل المنازل في إنجلترا بنظام تدفئة مركزي، إذ تكون درجة الحرارة في الخارج عادةً أدنى من ٢٠ درجة مئوية؛ غير أنها لا تحتوي على أجهزة تكييف الهواء، إذ من النادر أن تتجاوز درجة الحرارة ٢٦ درجة مئوية؛ بينما العكس صحيح في أستراليا، حيث تُجهَّز معظم المنازل بأجهزة تكييف الهواء، ونادرًا ما تُجهَّز بنظام تدفئة مركزي. بات التنبؤ بالمناخ المستقبلي أمرًا ضروريًّا الآن؛ إذ لم نعد قادرين على الاعتماد على سجلات الطقس السابقة لتخبرنا بما يحمله المستقبل. ونحتاج أيضًا إلى فهم عواقب أفعالنا. فعلى سبيل المثال، إذا أبقينا على المعدل الحالي لانبعاثات غازات الدفيئة، فإلى أي مدًى سيحدث تغيُّر مناخي؟ ومن ثَم، علينا تطوير طرق جديدة لفهم السيناريوهات المستقبلية المحتملة. ولذلك عمدنا إلى نمذجة المستقبل (انظر شكل ٤-١).



شكل ٤-١: البنية العامة لنموذج تغيُّر المناخ.

النماذج

تتدرج نماذج المناخ في تعقيدها بدءًا من النماذج الصندوقية البسيطة نسبيًّا إلى النماذج المناخية العالمية الثلاثية الأبعاد الشديدة التعقيد. لكل نموذج منها دورٌ في دراسة وتعزيز فهمنا لنظام المناخ العالمي. تُستخدم النماذج المناخية العالمية الثلاثية الأبعاد المعقدة في التنبؤ بمناخ العالم المستقبلي. تعتمد هذه النماذج المناخية الشاملة على قوانين فيزيائية تمثلها معادلات رياضية، ويُستخدم في حلها شبكة ثلاثية الأبعاد تغطي الكرة الأرضية. وللحصول على المحاكاة الأقرب إلى الواقع، يجب تمثيل كل المكونات الرئيسية لنظام المناخ في نماذج فرعية من بينها الغلاف الجوي، والمحيطات، وسطح الأرض (التضاريس)، والغلاف الجليدي، والغلاف الحيوي، بالإضافة إلى العمليات التي تحدث داخلها وبينها.

على مدار الأربعين عامًا الماضية، شهدت نماذج المناخ تقدمًا هائلًا. ويُعزى ذلك التقدم إلى زيادة معرفتنا بنظام المناخ، وكذلك بسبب النمو المتسارع في قوة نظم الحواسيب. فقد شهدت الدقة المكانية تطورًا هائلًا منذ أول تقرير أصدرته الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ عام ١٩٩٠ وصولًا إلى تقريرها الأخير الصادر عام ٢٠٢١. ويتميز الجيل الحالي من النماذج المناخية العالمية الثلاثية الأبعاد الشديدة التعقيد بوجود طبقات متعددة في الغلاف الجوي واليابسة والمحيطات، وأن بمقدوره تحقيق دقة مكانية تصل إلى أكثر من نقطة واحدة لكل ٣٠ كيلومترًا × ٣٠ كيلومترًا. أثناء تشغيل النموذج، عادةً ما تُحَل المعادلات لكل «نصف ساعة» من الواقع الفعلي المحاكي. إن العديد من العمليات الفيزيائية مثل كيمياء الغلاف الجوي، وتكوُّن السحب، وإنتاج الهباء الجوي وحركته (الجسيمات العالقة في الهواء)، وتأثير الحمل الحراري في المحيطات، تحدث على نطاقات أصغر بكثير مما يمكن أن تستوعبه النماذج المناخية الرئيسية. ولذلك، تُجمَّع تأثيرات هذه العمليات الصغيرة معًا فيما يُعرف بـ «التمثيل بالمعامِلات». يجرى التحقق من صحة كل هذه التمثيلات باستخدام نموذج منفصل يعرف بـ «نماذج العمليات الصغيرة»، وذلك لضمان دقة تمثيل تأثيرات هذه العمليات الصغيرة عند دمجها في النماذج الأكبر.

إن المجهول الأكبر في هذه النماذج ليس في الفيزياء أو الكيمياء أو الأحياء، إنما في تقدير انبعاثات غازات الدفيئة العالمية في المستقبل على مدى الـ ٨٠ عامًا القادمة. وتعتمد هذه التقديرات على العديد من المتغيرات بدءًا من الاقتصاد العالمي وصولًا إلى نمط الحياة الشخصية. ومن ثَم، يجري تشغيل نماذج فردية عدة مرات مع سيناريوهات انبعاثات مختلفة للوصول إلى مجموعة من التغيُّرات التي قد تحدث في المستقبل. في الواقع، جمع

تقرير التقييم الأخير (السادس) الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ نتائجَ العديد من التجارب المستمَدَّة مما يزيد على ١٠٠ نموذج مناخي مميز طوَّرها ٤٩ مجموعة نمذجة دولية، كل تلك النماذج هي جزء من المشروعات الأخيرة للمقارنة بين النماذج المزدوجة. وبطبيعة الحال، مع استمرار زيادة قدرة المعالجة الحاسوبية، سيستمر تحسين تمثيل الأنظمة المناخية المقترنة وتوسيع النطاق الجغرافي لهذه النماذج.

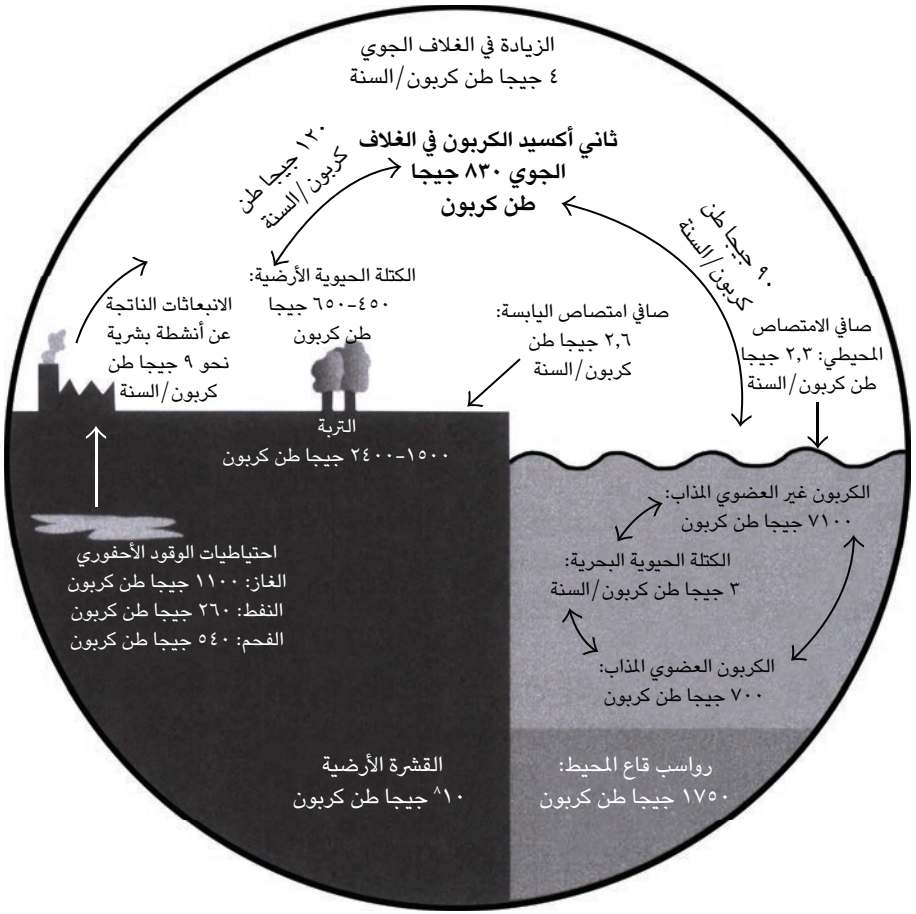
دورة الكربون

إن دورة الكربون هي صميم النماذج المناخية نظرًا لأهميتها في تقدير مصير انبعاث ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الأنشطة البشرية، وكذلك غاز الميثان. وتُعَد دورة الكربون معقدة حيث تضم مصادر ومصارف لغاز ثاني أكسيد الكربون. تمتص دورة الكربون الطبيعية الحالية نصف انبعاثات الكربون، ولا ينتهي المطاف بهذه الانبعاثات في الغلاف الجوي، إنما في المحيطات والغلاف الحيوي الأرضي. يعرض الشكل ٤-٢ خزانات الكربون بالجيجا طن (جيجا طن أو مليار طن) والتدفقات الكربونية (ما يدخل ويخرج من الكربون بالجيجا طن في العام). تُظهِر هذه الأرقام التوضيحية التغييرات التي حدثت منذ الثورة الصناعية. كما تتزايد الأدلة على تفاوت التدفقات من عام لآخر.

هذا لأن النظام الكربوني، على عكس الصورة الثابتة التي تُظهرها أشكال مثل الشكل الآتي، نظامٌ ديناميكي ومرتبط بالنظام المناخي على نطاقات زمنية موسمية وسنوية وعقدية. وقد أصبح واضحًا أن سطح المحيط والغلاف الحيوي الأرضي يمتص كلٌّ منهما نحو ٢٥٪ من انبعاثات الكربون التي ننتجها سنويًّا. ومع استمرار ارتفاع حرارة المحيطات، تقل قدرتها على احتواء ثاني أكسيد الكربون المذاب، مما يعني انخفاض قدرتها على امتصاص الكربون. وبينما نواصل عمليات إزالة الغابات وتغيير استغلال الأراضي على نحوٍ جذري، تتضاءل قدرة الغلاف الحيوي للأرض على امتصاص الكربون.

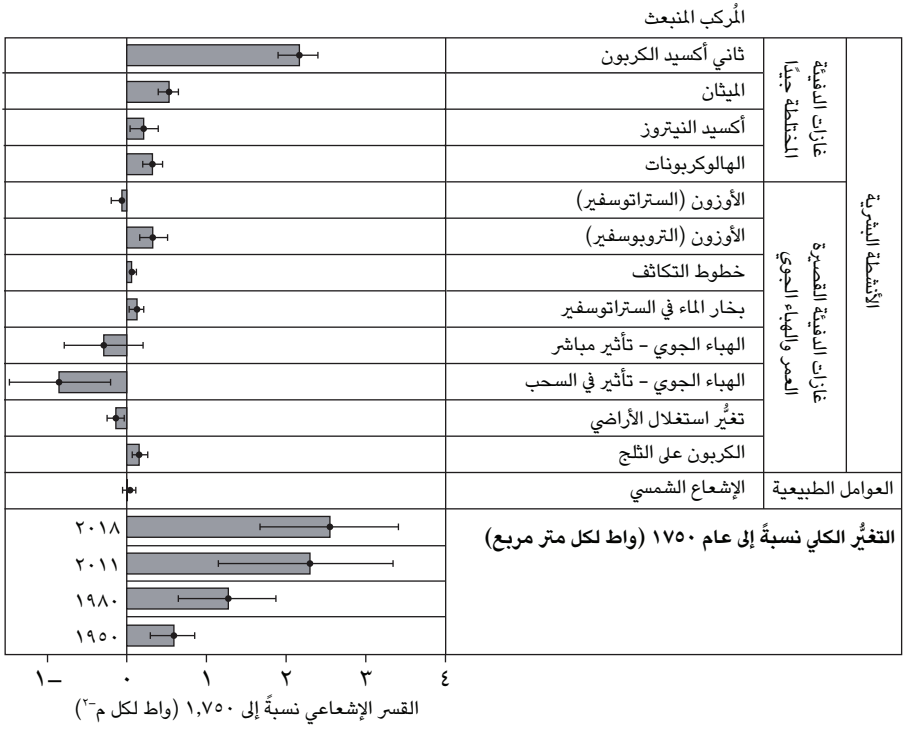
تأثيرات الاحترار والتبريد

إن النظام المناخي للأرض معقد؛ إذ إنه يتأثر بظاهرة التبريد، إلى جانب تأثره بالاحترار الناتج عن غازات الدفيئة (انظر الشكل ٤-٣). وتشمل هذه التأثيرات كمية الهباء الجوي



شكل ٤-٢: دورة الكربون، بالجيجا طن.

في الهواء (الذي ينتج كثيرٌ منه من التلوث البشري، مثل انبعاثات الكبريت من محطات الطاقة)، التي تؤثر تأثيرًا مباشرًا في نسبة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض. وللهباء الجوي تأثير كبير في درجات الحرارة المحلية والإقليمية. تُظهر عمليات المحاكاة الحاسوبية لتغيُّر المناخ أن المناطق الصناعية على كوكب الأرض لم تشهد ارتفاعًا في درجات الحرارة بالقدر المتوقع من ارتفاع غازات الدفيئة وحدها. وقد تأكدت هذه الظاهرة المعروفة



شكل ٤-٣: القسر الإشعاعي بين عامَي ١٧٥٠ و٢٠١٨.

باسم «الإعتام العالمي»، أو على نحوٍ أدق «الإعتام الإقليمي»، من خلال قياسات حقيقية لدرجات الحرارة والهباء الجوي. يُعَد بخار الماء من غازات الدفيئة، ولكن في الوقت نفسه، تعكس الأسطح البيضاء العليا للسحب الإشعاع الشمسي إلى الفضاء. يُطلق على مستوى انعكاسية السطح اسم «البياض». تمتلك السحب والجليد مستوًى عاليًا من الانعكاسية، مما يعني أنها تعكس كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي بعيدًا عن سطح الأرض. كما أن زيادة الهباء الجوي في الغلاف الجوي تؤدي إلى زيادة نسبة الغطاء السحابي، حيث توفر هذه الجسيمات نقاطًا يتكثف حولها بخار الماء. لذا أصبح أحد التحديات الرئيسية التي تواجه علماء المناخ التنبؤ بما سيحدث لكمية السحب وأنواعها، وقدرتها على التسبب في الاحترار أو التبريد.

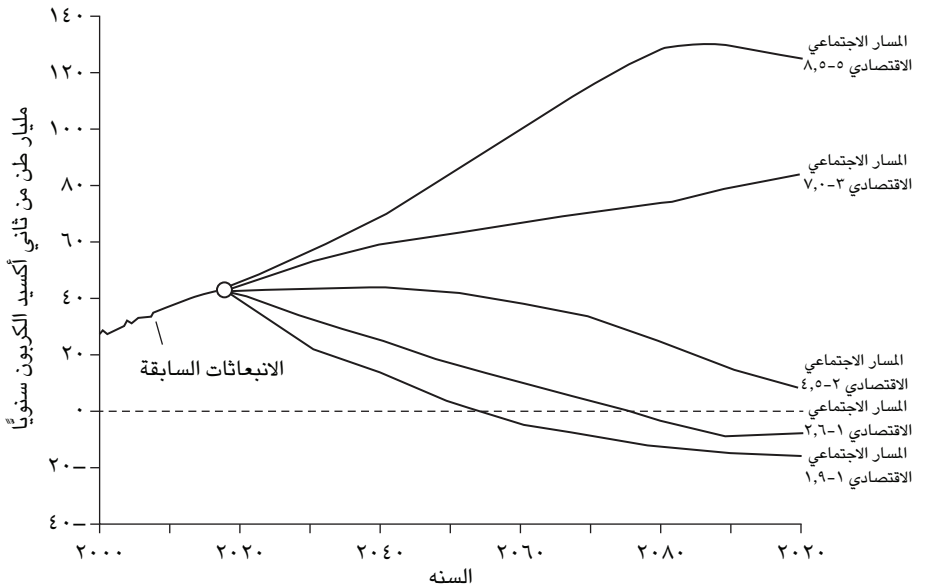
نماذج الانبعاثات في المستقبل

كما أسلفنا، فإن إحدى المشكلات الرئيسية التي تعترض محاولة التنبؤ بالمناخ المستقبلي هي توقُّع كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التي ستُنتَج في المستقبل. ستتأثر تلك الكمية بعدة عوامل، من بينها النمو السكاني والنمو الاقتصادي والتنمية واستخدام الوقود الأحفوري ومعدل التحوُّل إلى الطاقة البديلة ومعدل إزالة الغابات وفعالية الاتفاقيات الدولية لخفض الانبعاثات. ومن بين كل الأنظمة التي نحاول نمذجتها لمحاكاة المستقبل، يظل النظام البشري هو الأكثر تعقيدًا وصعوبةً في التنبؤ به على الإطلاق. إذا كنت تريد أن تفهم إشكالية التنبؤ بما سيحدث خلال الـ ٨٠ عامًا القادمة، فتخيَّلْ نفسك في عام ١٩٢٠، وتخيل ما كنت ستتوقع أن يكون عليه العالم في القرن الحادي والعشرين. في بداية القرن العشرين، كانت الإمبراطورية البريطانية القوة العالمية المسيطرة بفضل الثورة الصناعية واستخدام الفحم. هل كنت ستتوقع التحول إلى اقتصادٍ عالمي يعتمد على النفط بعد الحرب العالمية الثانية؟ أو الانتشار الهائل لاستخدام السيارات؟ أو توفر السفر الجوي بوجه عام؟ حتى قبل ٣٠ عامًا فقط، كان من الصعب التنبؤ بوجود شركات طيران اقتصادية تتيح رحلاتٍ جوية بتكلفة منخفضة عبر أوروبا والولايات المتحدة وآسيا.

استخدم أول تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ افتراضاتٍ مبسَّطة للغاية حول انبعاثات غازات الدفيئة على مدار الـ ١٠٠ عام القادمة. بدءًا من عام ٢٠٠٠ فصاعدًا، استخدمَت النماذجُ المناخية سيناريوهاتٍ أكثر تفصيلًا سُجِّلت في تقرير خاص بالهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ (التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات الصادر عام ٢٠٠٠). وفي عام ٢٠١٣، استخدم تقريرُ التقييم الخامس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ مسارات تركيز تمثيلية أكثر تطورًا حيث راعت مدخلات متغيِّرة أوسع نطاقًا مستمَدَّة من النماذج الاجتماعية الاقتصادية، من بينها السكان واستغلال الأراضي وكثافة الطاقة واستهلاك الطاقة والتنمية المتفاوتة بين المناطق. تحددت مسارات التركيز التمثيلية بناءً على القسر الإشعاعي النهائي الذي سيتحقق بحلول عام ٢١٠٠، وتتراوح هذه السيناريوهات بين ٢٫٦ و٨٫٥ واط لكل متر مربع. يُعرف القسر الإشعاعي على أنه الفرق بين ضوء الشمس (الطاقة المشعة) الذي تستقبله الأرض والطاقة التي تبثُّها الأرض مرة أخرى إلى الفضاء، ويقاس هذا الفرق بوحدات واط لكل متر مربع من سطح الأرض. في تقرير التقييم السادس الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ لعام ٢٠٢١، أضيف المسار التمثيلي للتركيز ١٫٩ ليعكس تطلعات اتفاق

باريس ٢٠١٥ للحد من ارتفاع درجة الحرارة العالمية إلى ١,٥ درجة مئوية فقط فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية.

يستخدم كذلك تقرير التقييم السادس الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ مسارات اجتماعية اقتصادية مشتركة طُوِّرت لتغطية مجموعة واسعة من السيناريوهات المستقبلية المحتملة. تمثِّل هذه المسارات مجموعة من خمسة سيناريوهات وقوًى دافعة قد تشكل الاقتصاد العالمي وانبعاثاته في المستقبل (انظر شكل ٤-٤). حدد هذه المساراتِ كيوان رياحي وزملاؤه، عام ٢٠١٧، في ورقة بحثية نُشرت في مجلة التغيُّر البيئي العالمي كما هو موضح أدناه.



شكل ٤-٤: سيناريوهات انبعاث الكربون المستقبلية.

- **المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك ١: انتهاج المسار الأخضر**

تحديات منخفضة للتخفيف من الانبعاثات والتكيُّف مع آثارها: في هذا السيناريو، يتحول العالم بخطًى تدريجية لكن ثابتة نحو مسار أكثر استدامة، مع

تحقيق تنمية اقتصادية شاملة ومراعية للبيئة. فتتحسن إدارة الموارد العالمية المشتركة ببطء، وتسرِّع الاستثمارات في التعليم والصحة من الانتقال الديموجرافي الذي يؤدي إلى تقليل عدد السكان، ويتحول التركيز من النمو الاقتصادي إلى تركيز أوسع على رفاهة الإنسان. وسيتراجع غياب المساواة بين الدول وداخلها بفضل الالتزام المتزايد بتحقيق أهداف التنمية. كما سيتجه الاستهلاك نحو تقليل الاعتماد على المواد وتعزيز كفاءة المتاح منها، بالإضافة إلى تقليل استهلاك الموارد والطاقة.

- **المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك ٢: منتصف الطريق**

تحديات متوسطة للتخفيف من الانبعاثات والتكيف معها: في هذا السيناريو، يتبع العالم مسارًا لا تشهد فيه الاتجاهات الاجتماعية والاقتصادية والتكنولوجية تحولات ملحوظة عن الأنماط التاريخية. وتسير التنمية وزيادة الدخل على نحوٍ غير متساوٍ، حيث تحقِّق بعض الدول تقدمًا نسبيًّا، بينما تفشل دول أخرى في الوفاء بالتوقعات. وستعمل المؤسسات العالمية والوطنية نحو تحقيق أهداف التنمية المستدامة لكن بوتيرة بطيئة. تشهد الأنظمة البيئية تدهورًا رغم وجود بعض التحسينات، ويحدث انخفاض عام في كثافة استخدام الموارد والطاقة. ويصبح النمو السكاني العالمي متوسطًا ويستقر في النصف الثاني من القرن. يستمر عدم تكافؤ الدخول أو لا يشهد سوى تحسن بطيء، وتظل التحديات أمام تقليل قابلية التأثر بالتغيُّرات الاجتماعية والبيئية قائمة.

- **المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك ٣: التنافس الإقليمي، طريق وعر**

تحديات كبيرة للتخفيف من الانبعاثات والتكيف معها: في هذا السيناريو، يشهد العالم صحوةً قومية واهتمامًا بالتنافسية والأمن، وكذلك نزاعات إقليمية تدفع الدول إلى التركيز المتزايد على القضايا المحلية أو الإقليمية على أفضل تقدير. تتغيَّر السياسات بمرور الوقت لتصبح أكثر تركيزًا على قضايا الأمن الوطني والإقليمي. وتركز الدول على تحقيق أهداف متعلقة بالطاقة والأمن الغذائي داخل مناطقها على حساب التنمية الشاملة. يفترض هذا السيناريو أيضًا انخفاض الاستثمارات في التعليم والتطوير التكنولوجي. أما التنمية الاقتصادية فستمضي بوتيرة بطيئة، وسيعتمد الاستهلاك اعتمادًا كثيفًا على الموارد، وسيستمر غياب المساواة أو سيتفاقم مع مرور الوقت. سيشهد النمو السكاني انخفاضًا في الدول الصناعية وارتفاعًا في الدول النامية. ويؤدي تراجع الأولوية الدولية لمعالجة القضايا البيئية إلى تدهور بيئي شديد في بعض المناطق.

• **المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك ٤: غياب المساواة – طريق منقسم**

تحديات منخفضة للتخفيف من الانبعاثات، ولكن تحديات عالية للتكيف مع آثارها: في هذا السيناريو، يؤدي الاستثمار غير المتكافئ في رأس المال البشري، إلى جانب تزايد الفجوات في الفرص الاقتصادية والقوة السياسية، إلى زيادة عدم المساواة والتقسيمات الطبقية سواء بين الدول أو داخلها. ومع مرور الوقت، تتسع الهوة بين مجتمع متصل عالميًّا يساهم في القطاعات المعتمدة على المعرفة ورأس المال في الاقتصاد العالمي، ومجموعة المجتمعات المنفصلة ذات الدخل المنخفض والمستوى التعليمي المتدني التي تعمل في اقتصاد يعتمد على العمالة الكثيفة والتكنولوجيا المنخفضة. يتفكك التماسك الاجتماعي، ويزداد شيوع النزاعات والاضطرابات. في المقابل، تصبح التنمية محورًا أساسيًّا في الاقتصاد عالي التكنولوجيا. ويعمد قطاع الطاقة المرتبط عالميًّا بتنويع مصادره، حيث تشمل الاستثمارات كلًّا من الوقود العالي الكربون مثل الفحم والنفط غير التقليدي، وكذلك مصادر الطاقة المنخفضة الكربون. وتركز السياسات البيئية على القضايا المحلية في المناطق المتوسطة والمرتفعة الدخل.

• **المسار الاقتصادي الاجتماعي المشترك ٥: التنمية المدفوعة بالوقود الأحفوري – نهج الطريق السريع**

تحديات كبيرة لتخفيف الانبعاثات، لكن تحديات منخفضة للتكيف مع آثارها: في هذا السيناريو، يضع العالم مزيدًا من الثقة في الأسواق التنافسية والابتكارات والمجتمعات التشاركية لتحقيق التقدم التكنولوجي السريع وتطوير رأس المال البشري باعتباره مسارًا نحو التنمية المستدامة. كما يزداد اندماج الأسواق العالمية. وتتركز استثمارات قوية في الصحة والتعليم والمؤسسات لتعزيز رأس المال البشري والاجتماعي. وفي الوقت نفسه، يرتبط الدفع نحو التنمية الاقتصادية والاجتماعية باستغلال موارد الوقود الأحفوري الوفيرة واعتماد أنماط حياة تعتمد اعتمادًا مكثفًا على الموارد والطاقة في جميع أنحاء العالم. كل هذه العوامل تؤدي إلى تحقيق نمو سريع في الاقتصاد العالمي، بينما يصل تعداد السكان العالمي إلى ذروته وينخفض في القرن الحادي والعشرين. تدار المشكلات البيئية المحلية مثل تلوث الهواء إدارة ناجحة. ويدعم هذا السيناريو الإيمان بقدرة البشر على إدارة النظم الاجتماعية والبيئية بفاعلية، بما في ذلك استخدام الهندسة الجيولوجية إذا لزم الأمر.

هذه سيناريوهات توضح المسارات المختلفة التي قد يسلكها مجتمعنا في المستقبل. يظهر سيناريو المسارين الأول والثاني نظرةً متفائلة بشأن التطور البشري حيث يفسح

كلاهما مجالًا لتحقيق «استثمارات ضخمة في التعليم والصحة، ونمو اقتصادي سريع، وإنشاء مؤسسات فعَّالة». الفرق هو أن سيناريو المسار الخامس يعتمد اعتمادًا مكثفًا على الطاقة المشتقة من الوقود الأحفوري، في حين أن سيناريو المسار الأول يطرح افتراضًا بالتحول إلى الطاقة المتجددة. لكن سيناريو المسارين الثالث والرابع يعكس نظرة متشائمة بشأن المستقبل، أما سيناريو المسار الثاني فهو سيناريو وسطي حسبما ذكر. إن السيناريوهات المستخدمة في تقرير التقييم السادس هي مزيج من سيناريوهات المسارات الاقتصادية الاجتماعية المشتركة ومسارات التركيز التمثيلية، مما يقدم بذلك سيناريو ونتيجة واضحَين. يُعزى ذلك إلى أن سيناريوهات المسارات الاقتصادية الاجتماعية المشتركة لا تشمل أي تدابير لتخفيف الانبعاثات؛ لذا يمكن للاقتصاد العالمي العالي الانبعاثات أن يتبع مسارًا ذا تركيز منخفض من خلال اعتماد عدد كبير من تدابير التخفيف. إذا بحثنا في كل المسارات الاقتصادية الاجتماعية المشتركة ومسارات التركيز التمثيلية، فسنجد أن بعضها غير مرجح بدرجة كبيرة، في حين أن البعض الآخر يكاد يكون مستحيلًا، مثل المسار المشترك الخامس ومسار التركيز ١,٩. يركز تقرير التقييم السادس على خمسة سيناريوهات رئيسية هي: المسار المشترك الأول مع مسار التركيز ١,٩، والمسار المشترك الأول مع مسار التركيز ٢,٦، والمسار المشترك الثاني مع مسار التركيز ٤,٥، والمسار المشترك الثالث مع مسار التركيز ٧,٠، والمسار المشترك الخامس مع مسار التركيز ٨,٥ (انظر الجدول ٤-١).

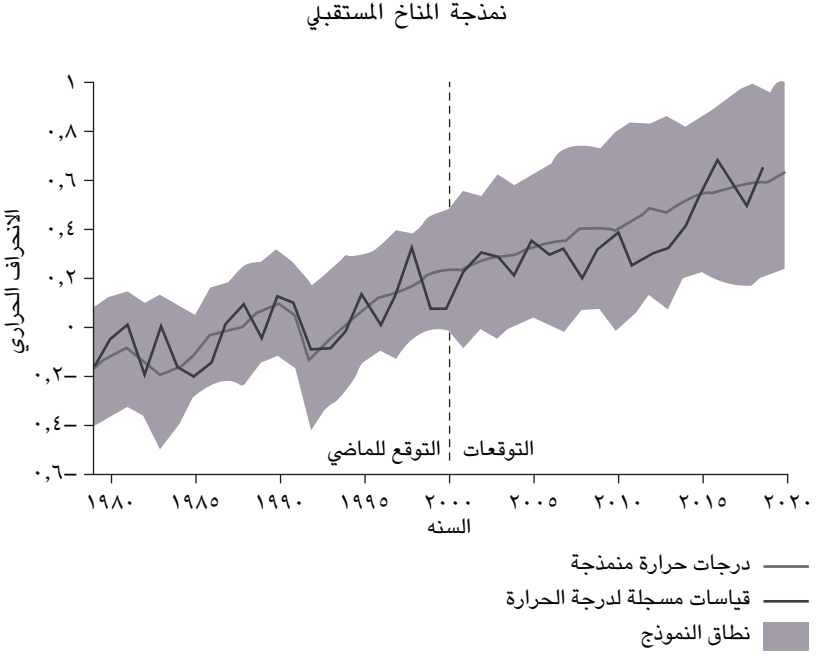
عدم اليقين في النماذج

في تقرير التقييم السادس الأخير الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، استُخدمت سيناريوهات الانبعاثات الماضية والمستقبلية في نحو ١٠٠ نموذج مستقل ومميز للدوران العام. يتميز كل نموذج منها بتصميم مستقل ومعاملات مميزة لتمثيل العمليات الرئيسية. تُعتبر استقلالية كل نموذج أمرًا بالغ الأهمية، حيث تستمد الثقة في النتائج من تشغيل النماذج عدة مرات، والحصول منها على توقعات متشابهة للمناخ في المستقبل. بالإضافة إلى ذلك، تساعد الاختلافات بين النماذج في فهم حدود ومزايا كلٍّ منها على حِدَة. داخل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ ولاعتبارات سياسية، يُفترض أن كل النماذج ومخرجاتها تتمتع بالمستوى نفسه من الصلاحية. هذا على الرغم من أن بعض النماذج معروف بأنها تعطي نتائج أفضل من غيرها عند اختبارها ومقارنتها بالواقع

جدول ٤-١: تعريف مسار التركيز التمثيلي.

مسار التركيز التمثيلي	الوصف
مسار التركيز التمثيلي ٨,٥	مسار يزداد فيه القسر الإشعاعي ليؤدي إلى تركيز ٨,٥ واط لكل متر مربع (تقريبًا ١٠٠٠ جزء من المليون من ثاني أكسيد الكربون بين عامَي ٢٠٨١ و٢١٠٠)
مسار التركيز التمثيلي ٧	مسار يستقر فيه القسر الإشعاعي عند ٧ واط لكل متر مربع (تقريبًا ٨٠٠ جزء من المليون من ثاني أكسيد الكربون بين ٢٠٨١ و٢١٠٠)
مسار التركيز ٤,٥	مسار يستقر فيه القسر الإشعاعي عند ٤,٥ واط لكل متر مربع (تقريبًا ٦٠٠ جزء من المليون من ثاني أكسيد الكربون بين ٢٠٨١ و٢١٠٠)
مسار التركيز التمثيلي ٢,٦ (يُعرف أيضًا بمعدلات الارتفاع والانخفاض لمسار التركيز ٢,٦)	مسار يبلغ فيه القسر الإشعاعي ذروته عند تقريبًا ٣ واط لكل متر مربع (يصل إلى ذروته عند تقريبًا ٤٩٠ جزءًا في المليون من ثاني أكسيد الكربون، ثم ينخفض إلى تقريبًا ٤٥٠ جزءًا في المليون من ثاني أكسيد الكربون بين عامَي ٢٠٨١ و٢١٠٠؛ مما يؤدي إلى تركيز ٢,٦ واط لكل متر مربع بحلول عام ٢١٠٠)
مسار التركيز التمثيلي ١,٩ (يُطلق عليه أيضًا سيناريو التركيز ١,٥ درجة مئوية)	مسار يصل فيه القسر الإشعاعي إلى ذروته عند تقريبًا ١,٩ واط لكل متر مربع (تقريبًا ٤٠٠ جزء من المليون بين عامَي ٢٠٨١ و٢١٠٠؛ تستلزم كل المسارات الاجتماعية الاقتصادية المشتركة انبعاثات عالمية سلبية لتحقيق هذا المسار)

الذي قدمته السجلات التاريخية وسجلات المناخ القديم. علاوة على ذلك، وعلى الرغم من أننا نفهم عدم اليقين داخل نموذج واحد، لا يوجد حاليًّا أي أساس نظري حقيقي لقياس عدم اليقين في العديد من النماذج. تجمع الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ كل النماذج المستخدمة في كل مرة تشغيل، ثم تعرض المتوسط الحسابي وعدم اليقين بين النماذج. ويتضح بهذه الطريقة أن هناك اختلافات في مخرجات النماذج، لكنها، بوجه عام، تتفق وتعرض تصورات مستقبلية مختلفة تمامًا بناءً على السيناريو الذي نتبعه.



شكل ٤-٥: توقعات النماذج المناخية مقارنة بالبيانات المناخية الفعلية (٢٠٠٠-٢٠٢٠).

تُعَد مستويات عدم اليقين في تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ لعام ٢٠٢١ أعلى قليلًا من تلك التي أشارت إليها تقارير سابقة. ويُعزى ذلك إلى فهمنا الأعمق للعمليات المناخية وقدرتنا على قياس مدى عدم اليقين في معرفتنا. لذلك، على الرغم من زيادة ثقتنا في النماذج المناخية، اتسع أيضًا نطاق النتائج المحتملة لأي تأثير محدد لغازات الدفيئة. تُعَد إحدى الطرق لاختبار النماذج وقياس عدم اليقين فيها هي مقارنة توقعاتها مع النتائج الفعلية في العالم الحقيقي. نُفِّذ مشروع المقارنة بين النماذج المزدوجة قبل إصدار تقرير التقييم الثالث الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ عام ٢٠٠١، ويمكننا استخدام تنبؤات تلك النماذج لمقارنتها مع البيانات الفعلية التي تمثِّل الـ ٢٠ عامًا التالية. كما يتضح من الشكل ٤-٥، فإن الاحترار العالمي الذي توقعته النماذج المناخية السابقة كان دقيقًا للغاية، وقد مر الآن أكثر من ٢٠ عامًا لتحسين النماذج وزيادة العدد الذي نستخدمه في تنبؤاتنا.

درجات الحرارة العالمية والهطول والجليد البحري ومستوى سطح البحر

أجري تشغيل ما بين ١٠ و٣٦ نموذجًا مناخيًّا لكلٍّ من مسارات التركيز التمثيلية والمسارات الاجتماعية الاقتصادية المشتركة الخمسة في تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ الصادر عام ٢٠٢١، وذلك لإصدار سيناريوهات عن التغييرات التي قد تحدث بحلول عام ٢١٠٠ في درجات الحرارة العالمية وهطول الأمطار والجليد البحري وارتفاع مستوى البحر. تشير هذه النماذج المناخية إلى أنه بناءً على انبعاثات غازات الدفيئة لدينا، قد يرتفع متوسط درجة حرارة سطح الأرض بين ١,٣ درجة مئوية و٥,٥ درجات مئوية بين عامَي ٢٠٨١ و٢١٠٠ مقارنة بما قبل الثورة الصناعية (١٨٥٠–١٩٠٠): انظر جدول ٤-٢. في كل السيناريوهات باستثناء المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك الأول مع مسار التركيز ١,٩، سترتفع درجات الحرارة العالمية إلى أكثر من ١,٥ درجة مئوية بين عامَي ٢٠٢١ و٢٠٤١، حيث تكون أفضل التقديرات في عام ٢٠٣٠. كما تُظهر النماذج أن ارتفاع درجة الحرارة سيكون موزعًا على نحوٍ غير متساوٍ، حيث ستشهد اليابسة أعلى ارتفاعات في درجات الحرارة.

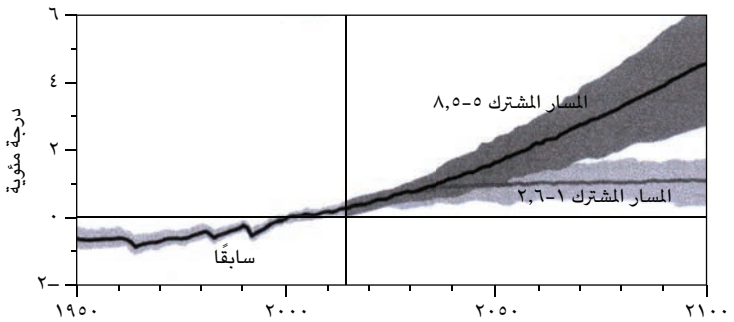
جدول ٤-٢: توقعات درجات الحرارة والهطول ومستوى سطح البحر.

المسارات الاجتماعية الاقتصادية المشتركة	تغيُّرات درجات الحرارة بين عامَي ٢٠٨١–٢١٠٠ بالنسبة إلى ما قبل الثورة الصناعية (درجة مئوية)	ارتفاع مستوى سطح البحر العالمي بين ٢٠٨١–٢١٠٠ مقارنة بالفترة ١٩٩٠–٢٠١٤ (متر)	ارتفاع الهطول العالمي بين عامَي ٢٠٨١–٢١٠٠ مقارنة بالفترة ١٩٩٠–٢٠١٤(٪)
المسار المشترك ٥ مسار التركيز ٨,٥	٤,٧ (٣,٤–٥,٥)	٠,٧٣ (٠,٥٠–١,٠٧)	٨,٢٪ (٢,٥–١٣,٨٪)
المسار المشترك ٣ مسار التركيز ٧	٣,٩ (٢,٨–٤,٦)	٠,٦٥ (٠,٤١–١,٠٠)	٥,٥٪ (٠,٥–١٠,٤٪)
المسار المشترك ٢ مسار التركيز ٤,٥	٢,٩ (٢,١–٣,٣)	٠,٥٥ (٠,٢٨–٠,٨٩)	٤,٧٪ (١,٧–٦,٤٪)

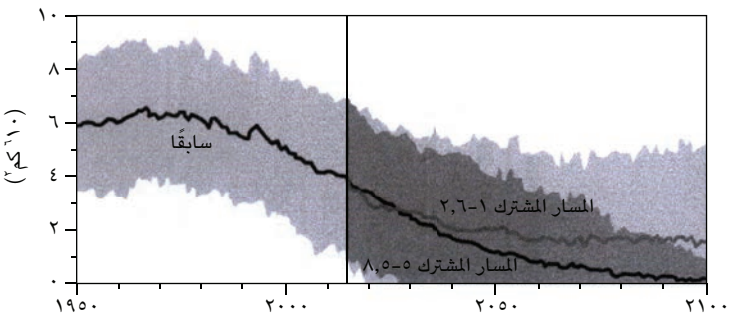
المسارات الاجتماعية الاقتصادية المشتركة	تغيُّرات درجات الحرارة بين عامَي ٢٠٨١–٢١٠٠ بالنسبة إلى ما قبل الثورة الصناعية (درجة مئوية)	ارتفاع مستوى سطح البحر العالمي بين ٢٠٨١–٢١٠٠ مقارنة بالفترة ١٩٩٠–٢٠١٤ (متر)	ارتفاع الهطول العالمي بين عامَي ٢٠٨١–٢١٠٠ مقارنة بالفترة ١٩٩٠–٢٠١٤(٪)
المسار المشترك ١ مسار التركيز ٢,٦	١,٩ (٢,٢–١,٤)	٠,٤١ (٠,٧١–٠,٢٩)	٣,٢٪ (٥,٦٪–٠,٧)
المسار المشترك ١ مسار التركيز ١,٩	١,٥ (١,٧–١,١)	لم يستكمل بعد	٢.٧٪ (٤,٨٪–٠,٦)

يعتمد ازدياد مستوى سطح البحر في المستقبل على المسار الاجتماعي الاقتصادي المشترك الذي نتبعه حيث قد يتراوح بين ٠,٣٢ متر و٠,٨٢ متر خلال العقدين الأخيرين من هذا القرن (انظر جدول ٤-٢ وشكل ٤-٦). ومع أخذ ارتفاع فِعلي قدرُه ٢٠سم بعين الاعتبار، فإن إجمالي الارتفاع يتراوح بين ٠,٥٢ متر و١,٠٢ متر. وعند النظر إلى مستوى سطح البحر المتوقع عام ٢١٠٠، تظهر النماذج زيادةً في متوسط مستوى سطح البحر العالمي يتراوح بين ٢٧سم و٩٨سم. وهذا مشابه للتوقعات التي وردت في تقرير الهيئة الحكومية الدولية لتغيُّر المناخ لعام ٢٠٠٧ لكنه أكثر تطرفًا، حيث أشار التقرير إلى ارتفاع في مستوى سطح البحر بمعدل يتراوح بين ٢٨سم و٧٩سم بحلول عام ٢١٠٠.

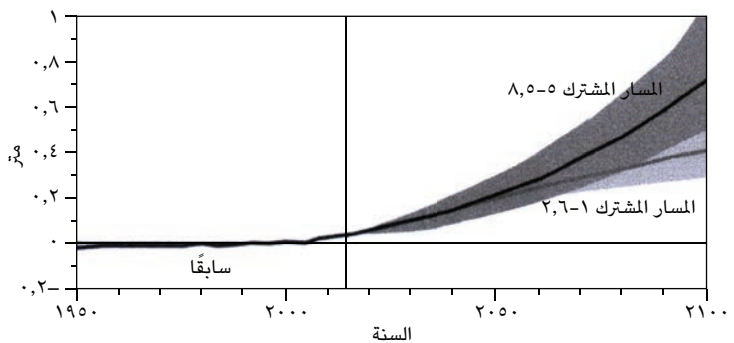
من المرجَّح للغاية أن يرتفع كلٌّ من متوسط الهطول على اليابسة والمحيطات في كل سيناريوهات المسارات الاجتماعية والاقتصادية المشتركة الخمسة (انظر جدول ٤-٢). وسيرتفع متوسط الهطول السنوي العالمي على اليابسة بحلول الفترة ٢٠٨١–٢١٠٠ مقارنة بالفترة ١٩٩٥–٢٠١٤ بنسبة ٢,٧٪ (ضمن نطاق ٠,٦٪–٤,٨٪) في سيناريو الانبعاثات المنخفضة للمسار المشترك ١–١,٩؛ وبنسبة ٨,٢٪ (ضمن نطاق ٢,٥٪–١٣,٨٪) في سيناريو الانبعاثات العالية للمسار المشترك ٥–٨,٥. وبناءً على كل السيناريوهات، فمن المتوقع أن يزداد متوسط الهطول على اليابسة بنحو ١–٣٪ لكل درجة مئوية واحدة من الاحترار العالمي.



(أ) متوسط التغيُّر في درجات حرارة سطح الأرض عالميًّا



(ب) منطقة الجليد البحري في المنطقة القطبية الشمالية (سبتمبر)



(جـ) متوسط الارتفاع في سطح البحر عالميًّا

شكل ٤-٦: درجات الحرارة العالمية، والجليد البحري في القطب الشمالي، ومستوى سطح البحر في القرن الحادي والعشرين.

في أسوأ ثلاثة سيناريوهات ضمن المسارات الاجتماعية الاقتصادية المشتركة (المسار المشترك ٢–٤,٥، المسار المشترك ٣–٧,٠، المسار المشترك ٥–٨,٥) سيصبح المحيط المتجمد الشمالي فعليًّا خاليًا من الجليد (تقل مساحة الغطاء الجليدي عن مليون كيلومتر مربع) في شهر سبتمبر (الشهر الذي يبلغ فيه الجليد الحد الأدنى) بحلول الفترة ٢٠٨١–٢١٠٠.

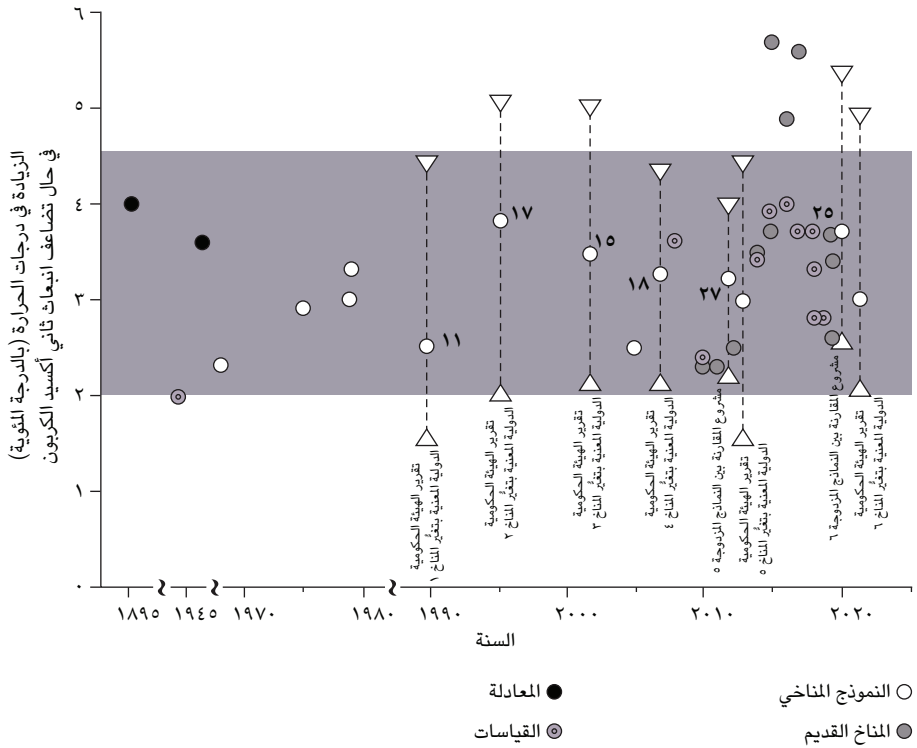
ماذا يدَّعي منكرو تغيُّر المناخ؟

إن إحدى أفضل الطرق لتلخيص المشكلات المتصورة عن نمذجة تغيُّر المناخ هي مراجعة ما يقوله منكرو تغيُّر المناخ.

تُقدم النماذج المختلفة نتائج مختلفة، فكيف يمكننا الوثوق بأيٍّ منها؟ هذا رد شائع من العديد من الأشخاص غير الملمِّين بالنمذجة؛ إذ إن ثمة شعورًا بأن العلم يجب أن يكون قادرًا بطريقةٍ ما على التنبؤ بمستقبل دقيق تمامًا. ومع ذلك، لا نقدِّم توقعات بمثل هذه الدقة في أي مجال آخر من مجالات الحياة. على سبيل المثال، لن يمكنك أن تتوقع توقعًا مثاليًّا أي حصان سيفوز في السباق أو أي فريق سينتصر في مباراة كرة القدم. والحقيقة هي أن النماذج المناخية جميعها غير دقيقة تمامًا؛ لأنها تقدم مجموعة من السيناريوهات المحتملة في المستقبل. لكن يعزز رؤيتَنا المستقبلية استخدامُ أكثر من نموذج واحد؛ لأن كل نموذج طوَّرته مجموعات مختلفة من العلماء حول العالم مستندين على افتراضات مختلفة، وأجهزة كمبيوتر متنوعة، ولغات برمجة متباينة؛ ومن ثَم فإن كل نموذج يقدم تنبؤات مستقبلية مستقلة. ما يمنح العلماء الثقة في نتائج النماذج هو اتفاقها جميعًا على الاتجاه نفسه في توقعات درجة الحرارة العالمية ومستوى سطح البحر خلال الـ ٨٠ عامًا القادمة. ومن أهم نقاط القوة في تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ لعام ٢٠٢١ أنها استخدمت ما يزيد على ١٠٠ نموذج متميز أنتجته ٤٩ مجموعة نمذجة مختلفة حول العالم، مقارنة بعدد ٤٠ نموذجًا في عام ٢٠١٣، و٢٣ نموذجًا في عام ٢٠٠٧، و٧ نماذج فقط في عام ٢٠٠١.

النماذج المناخية شديدة الحساسية للتغيُّرات في ثاني أكسيد الكربون. لغضِّ الطرف عن أهمية تغيُّر المناخ، يرى العديد من منكريه أن النماذج شديدة الحساسية للتغيُّرات في غازات الدفيئة. وهذه حجة نمطية تدَّعي أن «الأمر ليس سيئًا كما تعتقد». إن مزية وجود العديد من النماذج المناخية هي أن العلماء يمكنهم أيضًا إعطاء تقدير لمدى ثقتهم في نتائج النماذج والتحقق من مدى حساسيتها عند مقارنتها بعضها ببعض

وبالبيانات الواقعية. من الاختبارات الرئيسية لنماذج المناخ اختبار حساسية توازن المناخ حيث يتنبأ النموذج بمقدار التغيُّر في درجة الحرارة العالمية في حال مضاعفة مستويات ثاني أكسيد الكربون عما كانت عليه قبل الثورة الصناعية. جاءت هذه النتائج متسقة للغاية على مدى الـ ٥٠ عامًا الماضية (الشكل ٤-٧)، ويشير تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ لعام ٢٠٢١ إلى أن نطاق النماذج الأكثر حداثة يتراوح بين ٢,٥٠ درجة مئوية و٥,٤٣ درجة مئوية (أي بمتوسط ٣,٧٤ درجة مئوية)، وهو ما يتفق مع قياسات أخرى.



شكل ٤-٧: حساسية توازن المناخ.

تخفق النماذج المناخية في إعادة تمثيل المتغيرات الطبيعية. يجادل العديد من منكري تغيُّر المناخ بأن اتجاه الاحترار الحالي ناتج عن متغيرات طبيعية. لكن العلماء

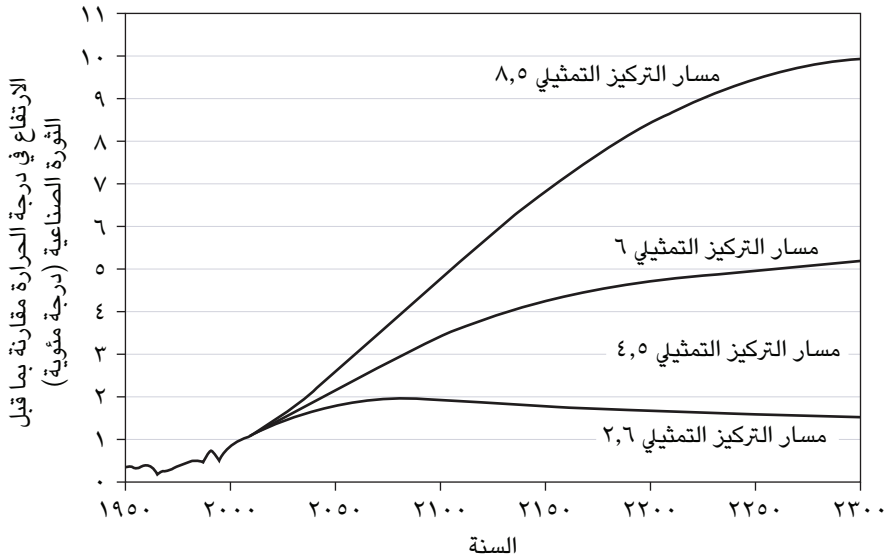
يدرجون في كل النماذج المناخية المتغيرات الطبيعية كافة، بما في ذلك تلك التي تساهم في تبريد المناخ. وعند دمج كل معارفنا العلمية المتعلقة بالعوامل الطبيعية (مثل الإشعاع الشمسي، والبراكين، والهباء الجوي، والأوزون) والعوامل البشرية (مثل غازات الدفيئة وتغيُّر استغلال الأراضي) التي تؤثر في ارتفاع درجات الحرارة وانخفاضها، يتضح أن ١٠٠٪ من الاحترار المرصود خلال السنوات الـ ١٥٠ الماضية يُعزى إلى النشاط البشري.

للسحب تأثيرٌ تفاعلي في المناخ العالمي يُسهم في التخفيف من الآثار المترتبة على تغيُّر المناخ. كما كانت الحال منذ أول تقرير أصدرته الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ عام ١٩٩٠، فإن أحد جوانب عدم اليقين في النماذج المناخية هو دور السحب وتفاعلها مع الإشعاع. بمقدور السحب أن تمتص الإشعاع وتعكسه، مما يؤدي إلى تبريد سطح الأرض، وكذلك يمكنها أن تمتص الإشعاع الطويل الموجة وتبثه، مما يؤدي إلى احترار سطح الأرض. يعتمد التفاعل المتبادل بين هذه التأثيرات على عدة عوامل: ارتفاع السحب، سُمكها، وخصائصها الإشعاعية. تعتمد الخصائص الإشعاعية وتكوين السحب وتطورها على توزيع بخار الماء في الغلاف الجوي، وكذلك قطرات الماء، وجسيمات الثلج، والهباء الجوي، وسُمك السحب. كما أن الأساس الفيزيائي لكيفية تمثيل السحب بيانيًّا أو بالمُعامِلات في النماذج المناخية قد شهد تحسنًا كبيرًا من خلال دمج تمثيلات الخصائص الميكروفيزيائية للسحب في معادلات ميزانية ماء السحب. يوضح الشكل ٤-٣ أنه حتى في حال تطبيق أقصى قيمة للتبريد الناتج عن السحب، فإن عوامل الاحترار الناتجة عن غازات الدفيئة لا تزال أكبر بثلاثة أضعاف.

لا بد أن السبب وراء تغيُّر المناخ هو الأشعة الكونية المجرية. الأشعة الكونية المجرية هي إشعاع عالي الطاقة ينشأ خارج نظامنا الشمسي وقد يأتي حتى من مجرات بعيدة. قد أُشير إلى أنها تساعد هذه الأشعة في تشكيل السحب أو «تكوينها». ومن ثَم، فإن انخفاض الأشعة الكونية المجرية التي تصل إلى الأرض يعني انخفاض عدد السحب، وكذلك انعكاس كمية أقل من أشعة الشمس إلى الفضاء مما يؤدي إلى احترار الأرض.

لكن تبرز مشكلتان مع هذا الطرح. أولًا، تُظهر الأدلة العلمية أن الأشعة الكونية ليست فعَّالة بدرجة كبيرة في تكوين السحب. ثانيًا، على مدار الـ ٥٠ عامًا الماضية، زاد معدل تدفق الأشعة الكونية حيث سجلت مستويات قياسية في السنوات الأخيرة. لو كانت هذه الفكرة صحيحة، لساهمت الأشعة الكونية في تبريد الأرض، وهو ما لم يحدث.

تتعلق نمذجة تغيُّر المناخ المستقبلي بفهم العمليات الفيزيائية الأساسية لنظام المناخ. أُصدِرت خمسة سيناريوهات جديدة للانبعاثات أُدرجت في تقرير العلوم الصادر عن الهيئة



شكل ٤-٨: درجات حرارة سطح الأرض (١٩٥٠–٢٣٠٠).

الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ عام ٢٠٢١، حيث استُخدمت مجموعة واسعة من المدخلات المتعلقة بنماذج المسارات الاقتصادية الاجتماعية، بما في ذلك السكان، استغلال الأراضي، كثافة الطاقة، استخدام الطاقة، والتنمية الإقليمية المتفاوتة. طُوِّر أحد هذه المسارات (المسار الاقتصادي الاجتماعي المشترك الأول –١,٩) لإحاطة صانعي السياسات علمًا بكيفية تحقيق الهدف المنشود المتمثل في حصر الاحترار عند ١,٥ درجة مئوية فقط، وفقًا لِما حدَّده مؤتمر باريس ٢٠١٥ لتغيُّر المناخ. واستُخدم ما يزيد على ١٠٠ نموذج مناخي في تطوير سيناريوهات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، وبذلك تقدم أدلة لها ثِقل كبير. باستخدام المسارات الأساسية الواقعية الثلاثة لانبعاثات الكربون على مدار الـ ٨٠ عامًا القادمة، تشير النماذج المناخية إلى احتمالية ارتفاع متوسط درجة حرارة سطح الأرض بمقدار يتراوح بين ٢,١ درجة مئوية و٥,٥ درجة مئوية بحلول عام ٢١٠٠. ومع ذلك، لا بد أن نتذكر أن التغيُّر في درجات الحرارة لن يتغيَّر بمجرد حلول عام ٢١٠٠. يوضح الشكل ٤-٨ كيف يمكن أن تستمر درجات الحرارة في الارتفاع إلى مستويات تتجاوز تلك التي سُجلت في هذا القرن اعتمادًا على مسار الانبعاث المختار.

وباستخدام المسارات الرئيسية الثلاثة الواقعية لانبعاثات الكربون، تتوقع النماذج أيضًا زيادة في متوسط مستوى سطح البحر العالمي تتراوح بين ٠,٥٠ متر و١,٣ متر بحلول عام ٢١٠٠ مقارنةً بما قبل الثورة الصناعية.

الفصل الخامس

تأثيرات تغيُّر المناخ

يقيِّم هذا الفصل التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ والكيفية التي تتغيَّر بها هذه التأثيرات من حيث الحجم والشدة مع تفاقم الاحترار العالمي. يتناول تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، تحت عنوان «التأثيرات، التكيُّف، الضعف»، التأثيرات المحتملة على المستوى الإقليمي، إلى جانب دراسة تلك التأثيرات عبر قطاعات مختلفة، مثل موارد المياه العذبة، والنظم البيئية، والنظم الساحلية والبحرية، والأمن الغذائي، وصحة الإنسان. كما يُعَد ضروريًّا تقدير مدى وحجم تأثير تغيُّر المناخ على المستويين الوطني والمحلي. هناك أيضًا عدد من التقارير والأدوات الوطنية الممتازة، مثل تقييم المناخ الوطني في الولايات المتحدة وبرنامج تأثيرات المناخ في المملكة المتحدة، وكلاهما يوفران أدوات تفاعلية لفهم التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ داخل بلدانهما. في هذا الفصل، تُصنَّف التأثيرات المحتملة إلى مجالات رئيسية: الحرارة الشديدة والجفاف، العواصف والفيضانات، الزراعة، تحمُّض المحيطات، التنوع البيولوجي، صحة الإنسان.

ما مستوى تغيُّر المناخ الذي يُعَد خطيرًا؟

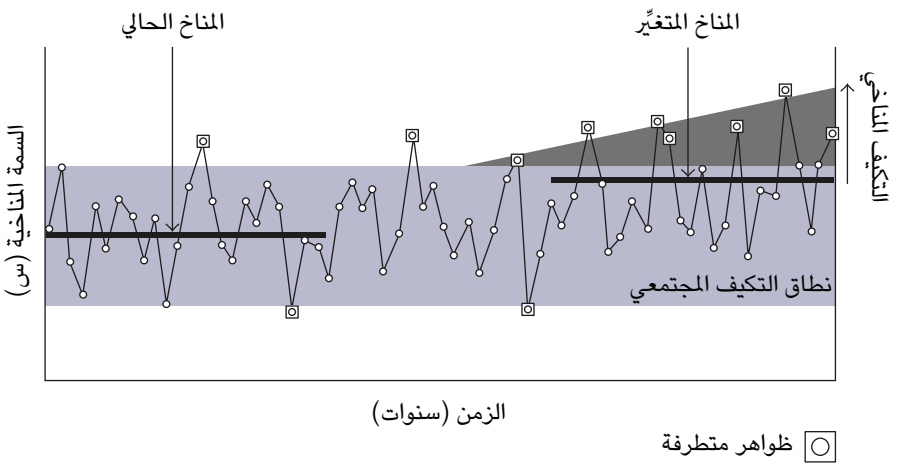
من أهم الأسئلة التي يواجهها صانعو السياسات: ما مستوى تغيُّر المناخ الذي يُعَد خطيرًا؟ ذلك لأننا إذا كنا بصدد خفض الانبعاثات العالمية من غازات الدفيئة، فنحن بحاجة إلى هدف واقعي يحدد مستوى تغيُّر المناخ الذي يمكننا التكيف معه. في فبراير عام ٢٠٠٥، دعت الحكومة البريطانية إلى عقد اجتماع علمي دولي في مدينة إكزيتر بالمملكة المتحدة لمناقشة هذا الموضوع تحديدًا. اتخذ هذا الاجتماع العلمي صبغة سياسية للغاية، حيث كانت الحكومة البريطانية تسعى إلى الحصول على توصية لتقديمها في اجتماع مجموعة

الثماني في جلين إيجلز. ترأست بريطانيا في ذلك الوقت كلًّا من مجموعة الثماني والاتحاد الأوروبي، وكان رئيس الوزراء البريطاني آنذاك — توني بلير — يطمح إلى دفع أجندته المشتركة على الساحة الدولية ساعيًا إلى الحد من تغيُّر المناخ وتخفيف وطأة الفقر في أفريقيا. أشارت الاجتماعات والكثير من الأبحاث الداعمة في ذلك الوقت إلى وضع حد للارتفاع في درجة الحرارة بمقدار درجتين مئويتين أعلى من متوسط درجة الحرارة ما قبل الثورة الصناعية: ويبدو أنه سيوجد رابحون وخاسرون بسبب التغيُّرات المناخية الإقليمية في حال بلوغ ما دون الحد المقرر، بينما في حال تجاوزه سيصبح الجميع خاسرين. وقد اتضح الآن أنه بسبب تأثيرات الأحداث الجوية المتطرفة، لا توجد في الواقع أي مناطق مستفيدة من الاحترار بمقدار درجتين مئويتين. في اجتماع مفاوضات تغيُّر المناخ في باريس عام ٢٠١٥، شدَّد تحالف الدول الجزرية الصغيرة وبعض الدول النامية الرئيسية أنه حتى المقدار الصغير من الاحترار سيكون مدمرًا لبلدانهم. استقر اتفاق باريس للمناخ على درجتين مئويتين كهدف رئيسي، لكنه أضاف أنه يطمح إلى الوصول إلى ١,٥ درجة مئوية. ومن ثم، دعم التقرير الخاص بشأن الاحترار العالمي بمقدار ١,٥ مئوية الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية عام ٢٠١٨، هذا الهدف الأدنى حيث أظهر أنه يوجد زيادة ملموسة في تأثيرات تغيُّر المناخ على المستويين الإقليمي والوطني عند ارتفاع الاحترار بمقدار يتراوح بين ١,٥ إلى ٢,٠ درجة مئوية.

الظواهر الجوية المتطرفة ونطاق التكيف المجتمعي

إن المشكلة الوحيدة الكبرى في تغيُّر المناخ هي عجزنا عن التنبؤ بتأثيراته على المستقبل. يمكن للبشرية أن تعيش وتظل على قيد الحياة، بل تزدهر في ظل مناخات متطرفة بدءًا من القطب الشمالي وصولًا إلى الصحراء الكبرى، لكن تنشأ المشكلات عند تجاوز الحدود القصوى المتوقعة للتغيُّرات المناخية المحلية. على سبيل المثال، يمكن اعتبار موجات الحرارة والعواصف والجفاف والفيضانات التي تضرب منطقة ما مناخًا طبيعيًّا إلى حدٍّ ما في منطقة أخرى. يُعزى ذلك إلى أن لكل مجتمع نطاقَ تكيُّف، أي نطاقًا معينًا للطقس يمكنه التعامل معه. يوضح الشكل ٥-١ التأثير النظري لدمج حدود التكيف المجتمعي مع تغيُّر المناخ. في ظل طبيعة مناخنا الحالي، يشمل نطاق التكيف تقريبًا كل التقلبات في الطقس مع احتمالية التعرض لظاهرة أو ظاهرتين جويتين متطرفتين. قد تحدث هذه الظاهرة مرةً كل ٢٠٠ عام، وتفوق قدرة التكيف لدى تلك المجتمعات. ومع تحرك المناخ

بتدرجٍ سلس نحو متوسطه الجديد، إذا ظل نطاق التكيف كما هو، فسيحدث المزيد من الظواهر الجوية المتطرفة. ومن ثَم، فإن ما قد يحدث مرةً كل ٢٠٠ عام سيحدث مرةً كل ٥٠ عامًا. الجيد في الأمر أن نطاق التكيف المجتمعي يتسم بالمرونة، ويمكنه التواؤم مع التغيُّرات في الحدود الأساسية ومع تزايد تكرار الظواهر الجوية المتطرفة، ما دام هناك علم مناخي قوي يوفر إرشادات واضحة بشأن نوعية التغيُّرات التي ستحدث. إن سرعة اتساع نطاق التكيف المجتمعي تعتمد على الجانب الذي تأثر في المجتمع: قد يحدث التكيف على مستوى السلوك الفردي بسرعةٍ كبيرة للغاية، بينما قد يستغرق بناء البنية التحتية الكبرى عقودًا لاستكمالها. أحد أكبر التحديات التي يطرحها تغيُّر المناخ هو بناء مجتمعات مرنة وسريعة التكيف مع مستقبل متغيِّر.



شكل ٥-١: تغيُّر المناخ، نطاق التكيف المجتمعي، الظروف الجوية المتطرفة.

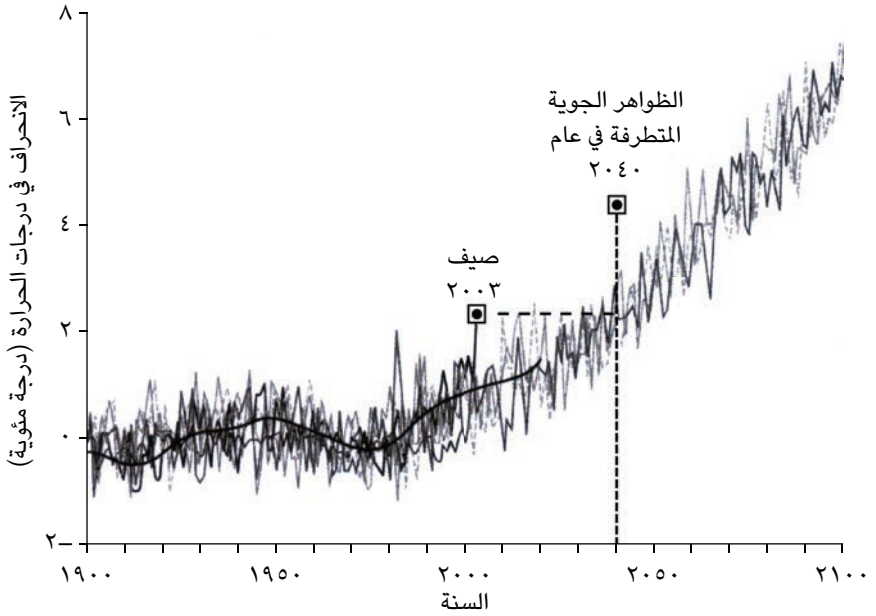
الحرارة الشديدة والجفاف وحرائق الغابات

مع ازدياد درجات الحرارة العالمية، تزداد موجات الحر. ومع تزايد التفاوت في معدلات هطول الأمطار وتركُّزِها في أحداث هطول أكثر كثافة، تصبح فترات الجفاف أطول ويتسع نطاقه. وعند اجتماع الحرارة الشديدة مع الجفاف، تكون النتيجة زيادة حرائق الغابات المدمرة.

يُشار إلى موجات الحر غالبًا بأنها «القاتل الصامت». تؤثر موجات الحر على كبار السن أكثر من غيرهم؛ فاستمرار ارتفاع درجات الحرارة ليلًا يؤدي إلى الوفاة، حيث تتراجع قدرة كبار السن على تنظيم درجة حرارة أجسامهم أثناء النوم. في تقرير «لانسيت كاونت داون» عام ٢٠٢٠، جرى تتبُّع معدلات الوفاة العالمية المرتبطة بالحرارة لمن تتجاوز أعمارهم ٦٥ عامًا منذ عام ١٩٨٠. أظهر التقرير ارتفاعًا كبيرًا في تعرض كبار السن لموجات الحر منذ عام ٢٠١٠، وذلك بسبب اجتماع عاملين رئيسيين، وهما زيادة تكرار موجات الحر وارتفاع نسبة الشيخوخة بين السكان. في عام ٢٠٢٠، سُجلت ٤٧٥ مليون ظاهرة تعرض لموجات الحر؛ مما تسبَّب في أكثر من ٢,٩ مليار يوم من تعرض كبار السن لموجات الحر.

تأثير موجات الحر والجفاف نسبي، حيث يعتمد على مكان حدوثهما، وما إذا كانت المنطقة المتضررة قد اتخذت بالفعل تدابير للتكيف مع تأثيراتها. فموجة الحر التي ضربت أوروبا عام ٢٠٠٣ أودت بحياة ٧٠ ألف شخص. وكانت فرنسا الأكثر تضررًا، حيث سجلت ١٤٨٠٠ حالة وفاة خلال الأسابيع الثلاثة الأولى من شهر أغسطس، وارتفعت الوفيات في باريس بنسبة ١٤٠٪. بعد موجة الحر المشار إليها، تبيَّن أن السبب في هذا العدد من الوفيات كان الضعف الشديد في استجابة المنظومة الصحية العامة. على إثر ذلك، شهدت سياسات العديد من البلدان تغييراتٍ جذريةً شملت تحسين آليات التنبؤ بموجات الحر والاستعدادات لحالات الطوارئ، وتحسين تصميم الأبنية وتكييف الهواء داخل المستشفيات ودور رعاية المسنين، وتعزيز تدريب العاملين في القطاع الصحي، والتركيز على تغطية إعلامية مسئولة تشمل تقديم توصياتٍ صحية، وإجراء زيارات منتظمة تستهدف أكثر أفراد السكان ضعفًا. حالت هذه السياسات الجديدة التي عُمِّمت في كل أنحاء أوروبا دون وقوع أعداد كبيرة من الوفيات خلال موجات الحر التي حدثت بعد ذلك، مثل موجة الحر عام ٢٠١٨. من بين الأسباب التي تجعل فهم تأثيرات تغيُّر المناخ أمرًا صعبًا هو قدرة الأفراد والمجتمعات على التكيُّف بسرعة مع الظروف الجديدة. يبين الشكل ٥-٢ موجة الحر التي ضربت أوروبا عام ٢٠٠٣ في سياق درجات حرارة الصيف على مدى الـ ١٠٠ سنة الماضية، وتلك المتوقعة خلال الـ ١٠٠ عام القادمة. وما يتضح لنا هو أن درجة الحرارة أثناء موجة الحر عام ٢٠٠٣ قد تكون هي درجة الحرارة العادية في صيف ٢٠٥٠، وقد تحدث موجات حر أشد من هذا المستوى الجديد. ومع ذلك، يتطلب التكيف مع موجات الحر تخطيطًا وموارد وأموالًا؛ وإذا كان ممكنًا توفير ذلك في

معظم أنحاء أوروبا، فهناك العديد من مناطق العالم لا تشهد هذه الاستعدادات نتيجة الفقر والافتقار إلى حوكمة جيدة.



شكل ٥-٢: مقارنة موجة الحر في عام ٢٠٠٣ بدرجات حرارة الصيف في الماضي والمستقبل.

يُعَد الجفاف كذلك قاتلًا صامتًا رئيسيًّا ينبغي أخذه في الاعتبار. يحدث الجفاف عندما تمر منطقة بفترة طويلة دون توفر إمدادات كافية من المياه، سواء كانت مياهًا سطحية أو جوفية. ربما يستمر الجفاف أشهرًا أو سنوات، ويحدث عادةً عند استمرار سقوط أمطار دون المعدل المتوسط على منطقةٍ ما. يخلِّف الجفاف تأثيرًا كبيرًا على النظام البيئي المحلي والزراعة، ويؤدي كذلك إلى انخفاض نمو المزروعات والمحاصيل، ونُفُوق الماشية. ورغم أن الجفاف قد يستمر عدة سنوات، فإنه حتى الجفاف القصير والشديد قد يسبب ضررًا جسيمًا ويضر بالاقتصاد المحلي. وقد أدى الجفاف الممتد لفترات طويلة إلى حدوث مجاعات وهجرات جماعية وأزمات إنسانية. فمن منظور الأمراض، يُعَد الجفاف

أسوأ بكثير من الفيضانات بسبب نقص مياه الشرب العذبة وانتشار برك المياه الراكدة التي تؤدي إلى تَفشِّي الأمراض. في عام ٢٠١٩، تأثرت مساحة اليابسة العالمية بما يقرب من ثلاثة أضعاف المساحة التي تأثرت بالجفاف الممتد بين عامَي ١٩٨٦ و٢٠٠٥. وبات من أبرز المخاوف المتعلقة بتغيُّر المناخ أن المناطق المعرضة للجفاف ستواجه هذه الظاهرة على نحوٍ متكرر، وأن المناطق التي لم تشهد الجفاف من قبلُ ستبدأ في التعرض له.

لقد شهدت ١١٤ من أصل ١٩٦ دولة زيادةً في خطر حرائق الغابات في الفترة ما بين ٢٠١٦–٢٠١٩ مقارنة بالفترة الأساسية ٢٠٠١–٢٠٠٤. وعلى مدار هذه الفترة، حدثت زيادة عالمية بلغت نحو ٧٢ ألف شخص يوميًّا معرَّضين لخطر حرائق الغابات سنويًّا. وقد حدثت زيادات ملموسة في أستراليا ونصف الكرة الجنوبي وأفريقيا والبرازيل والولايات المتحدة. وقد سجلت الولايات المتحدة فترات حرائق قياسية في الأعوام ٢٠١٧ و٢٠١٨ و٢٠٢٠.

في أستراليا، أصبح موسم حرائق الغابات عامَي ٢٠١٩–٢٠٢٠ معروفًا بالصيف الأسود. طوال الصيف، اشتعلت مئات الحرائق أغلبها في جنوب شرق البلاد بسبب درجات الحرارة القياسية والجفاف الممتد. تسببت الحرائق في احتراق ما يقرب من ٧٢ ألف ميل مربع، وتدمير نحو ١٠ آلاف مبنًى، وقتل ما لا يقل عن ٤٥٠ شخصًا ومليار حيوان. ويبدو أن بعض الحيوانات المهددة بالانقراض قد باتت في طريقها إلى ذلك. مع زيادة حوادث الجفاف والحرارة الشديدة، سيظل خطر حرائق الغابات آخذًا في التوسع عبر أنحاء الأرض.

العواصف والفيضانات

تُعَد العواصف والفيضانات من الكوارث الطبيعية الكبرى. فخلال العقدين الماضيين، كانت مسئولة عن ثلاثة أرباع الخسائر المؤمَّن عليها عالميًّا، وعن أكثر من نصف الوفيات والخسائر الاقتصادية الناجمة عن الكوارث الطبيعية. لذا، من الضروري أن نعرف الاحتمالات التي قد تحدُث في المستقبل. هناك أدلة على أن المناطق المعتدلة، وخاصة في نصف الكرة الشمالي، أصبحت أكثر تعرضًا للعواصف خلال الـ ٥٠ عامًا الماضية. كما أظهرت أحداث الفيضانات اتجاهًا تصاعديًّا منذ عام ٢٠٠٥ حيث غُمر بالفيضانات نحو ثلاثة أضعاف مساحة الأرض المغمورة بالفيضانات في عام ٢٠١٩ (٠,٥٥–١,٥٪ من مساحة سطح الأرض) مقارنة بالفترة ١٩٨٦–٢٠٠٥. لم يكن هذا التضاعف نتيجة زيادة

الفيضانات في منطقة جغرافية محددة، إنما نتيجة اتساع نطاق الفياضات في كل أنحاء العالم. تشير نماذج المناخ إلى أن النسبة المئوية للأمطار التي تُصنَّف بأنها أمطار غزيرة قد زادت وستستمر في الزيادة، وكذلك الحال بالنسبة إلى معدل تفاوتها من عام لآخر. وهذا بدوره سيزيد من تكرار أحداث الفيضانات وشدتها.

يعيش خُمسا سكان العالم في نطاق الرياح الموسمية التي تجلب الأمطار لتدبَّ الحياة على وجه الأرض. تنشط الرياح الموسمية نتيجة التباين في درجات الحرارة بين القارات والمحيطات. إذ تهبُّ الرياح السطحية المحمَّلة بالرطوبة من المحيط الهندي إلى القارة الآسيوية، ومن المحيط الأطلسي إلى غرب إفريقيا خلال فصول الصيف في نصف الكرة الشمالي عندما تصبح الكتل الأرضية أكثر دفئًا بكثير من المحيطات المجاورة. في الشتاء، تصبح القارات أكثر برودة من المحيطات المجاورة، فينشأ ضغط جوي مرتفع على السطح، مما يتسبَّب في هبوب رياح السطح باتجاه المحيط. تشير النماذج المناخية إلى زيادة في قوة الرياح الموسمية الصيفية نتيجة الاحترار العالمي خلال الـ ١٠٠ عام المقبلة. هناك ثلاثة أسباب تفسر حدوث هذا: (١) يؤدي الاحترار العالمي إلى ارتفاع درجات الحرارة في القارات خلال فصل الصيف بمعدل أعلى من ارتفاعها فوق المحيطات في الصيف، وهذا يُعَد القوة الدافعة الأساسية لنظام الرياح الموسمية؛ (٢) سيؤدي انخفاض الغطاء الثلجي في هضبة التبت — وهو أمر متوقَّع في ظل عالم أكثر دفئًا — إلى زيادة هذا الفرق في درجة الحرارة بين البر والبحر، مما يؤدي إلى زيادة قوة الرياح الموسمية الصيفية في آسيا؛ (٣) ارتفاع درجات الحرارة يعني أن الهواء سيكون قادرًا على الاحتفاظ بكمية أكبر من بخار الماء، مما يسمح للرياح الموسمية بحمل قدر أكبر من الرطوبة. بالنسبة إلى الرياح الموسمية الصيفية في آسيا، فإنها قد تؤدي إلى زيادة متوسط هطول الأمطار بنسبة تتراوح بين ١٠–٢٠٪، مع تفاوت سنوي يتراوح بين ٢٥–١٠٠٪ وزيادة ملحوظة في عدد الأيام التي تشهد هطول أمطار غزيرة. أكثر ما يثير القلق في نتائج النماذج المناخية هو الزيادة المتوقعة في تفاوت هطول الأمطار بين السنوات إذ من الوارد أن يتضاعف، مما يجعل من الصعب للغاية التنبؤ بكمية الأمطار التي ستسقط كل عام؛ وهي معلومة لا غنى للمزارعين عنها.

إن أحد أكثر المجالات الخلافية في علم تغيُّر المناخ هو دراسة وتوقع الأعاصير المدارية المستقبلية، المعروفة أيضًا بالأعاصير الاستوائية. وهناك أدلة واضحة على زيادة عدد الأعاصير وشدتها على مدى العقود الأربعة الماضية في المحيط الأطلسي الشمالي، والمحيط

الهندي الجنوبي، والمحيط الهادي. يُعزى ذلك إلى أن عدد الأعاصير وشدَّتها يرتبطان ارتباطًا مباشرًا بدرجة حرارة سطح البحر. وحيث إنه لا يمكن أن يبدأ تكوُّن الأعاصير إلا إذا كانت درجة حرارة سطح البحر أعلى من ٢٦ درجة مئوية، فمن المنطقي أن تزيد الأعاصير في عالم أكثر احترارًا. إلا أن التكون الفعلي للأعاصير أقل ندرة بكثير من الفرص التي تتيح حدوثها. فلا يتسبب سوى ١٠٪ من مراكز الضغط المنخفض فوق المحيطات الاستوائية في تشكيل أعاصير مكتملة. ولفهم نشوء العواصف الاستوائية، يجب أن يؤخذ في الاعتبار عوامل أخرى مثل قص الرياح الذي يساعد في بدء دوران الهواء الصاعد. في سنة ذات معدل حوادث جوية مرتفع، ربما تتطور ٥٠ عاصفة استوائية كحدٍّ أقصى إلى مستويات الأعاصير. لكن التنبؤ بمستوى الكارثة أمرٌ صعب، حيث إن عدد الأعاصير ليس عاملًا حاسمًا، إنما العامل الحاسم هو ما إذا كانت ستصل إلى اليابسة، ومدى شدتها ومدة تأثيرها بعد وصولها إليها.

عندما تضرب الأعاصير البلدان المتقدمة، يتمثَّل الضرر الرئيسي عادةً في الخسائر الاقتصادية، بينما في البلدان النامية تكون الخسائر في الأرواح. على سبيل المثال، تسبَّب إعصار كاترينا الذي ضرب مدينة نيو أورليانز عام ٢٠٠٥ في مقتل أكثر من ١٨٠٠ شخص، ووقوع خسائر اقتصادية تجاوزت ١٥٠ مليار دولار أمريكي. وفي المقابل، فإن إعصار ميتش الذي ضرب أمريكا الوسطى عام ١٩٩٨ أودى بحياة ما لا يقل عن ١١ ألف شخص، وأدى إلى تشرد ١,٥ مليون شخص، ووقوع خسائر اقتصادية بقيمة ٦ مليارات دولار أمريكي. وفي عام ٢٠١٣، دمر إعصار هايان — أقوى إعصار مداري على الإطلاق — مناطق واسعة من جنوب شرق آسيا، وبالأخص الفلبين، متسببًا في تضرر ١١ مليون شخص، ووفاة ما يزيد على ٦٣٠٠ شخص، وفقدان ١٠٠٠ آخر، بينما بلغت الخسائر المادية ٢,٢ مليار دولار أمريكي فحسب.

يُعَد من أهم وأغرب عناصر المناخ العالمي التبديل الدوري لاتجاه تيارات المحيط والرياح وشدتهما في المحيط الهادي. كانت هذه الظاهرة تُعرف في البداية باسم النِّينْيو (تعني الطفل المقدس في الإسبانية) حيث تظهر عادةً في عيد الميلاد، وباتت الآن تُعرف عادةً كجزء من تذبذب النينيو الجنوبي، وهي ظاهرة تحدث عادةً كل ثلاث سنوات إلى سبع. وقد تستمر من عدة أشهر إلى أكثر من سنة. يتأرجح تذبذب نينيو الجنوبي تأرجحًا بين ثلاثة أنماط مناخية: الظروف «الطبيعية»، وظاهرة لا نينيا (التي تمثِّل النظير الأبرد من ظاهرة النينيو)، وظاهرة النينيو. ارتبطت ظروف ظاهرة النينو بتغييرات في أنماط

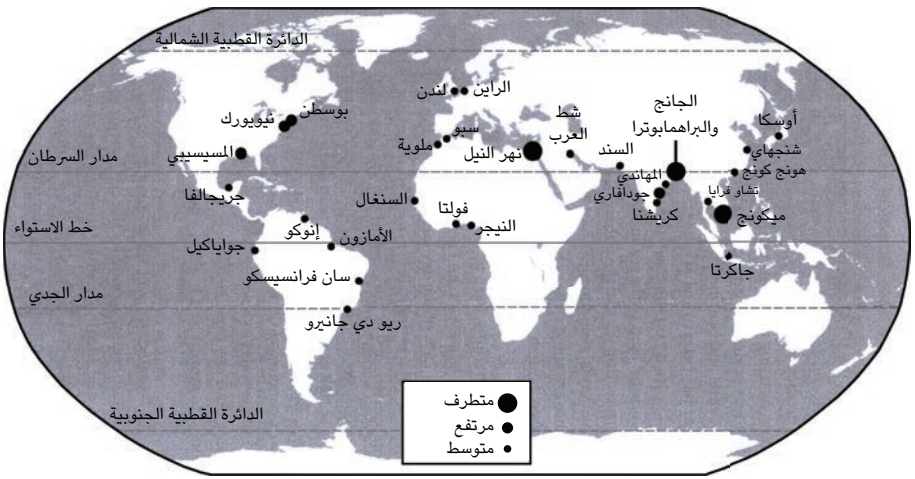
الرياح الموسمية والعواصف، وانتشار الجفاف في كل أنحاء العالم. كانت ظروف ظاهرة النينيو لعامَي ١٩٩٧–١٩٩٨ هي الأقوى على الإطلاق، وتسببت في حدوث موجات جفاف في جنوب الولايات المتحدة وشرق أفريقيا وشمال الهند وشمال شرق البرازيل وأستراليا. في إندونيسيا، خرجت حرائق الغابات عن السيطرة بسبب الجفاف الشديد. بينما شهدت كاليفورنيا وأجزاء من أمريكا الجنوبية وسريلانكا وشرق ووسط أفريقيا أمطارًا غزيرة وفيضانات كارثية.

ترتبط حالة تذبذب النينيو الجنوبي أيضًا بموقع الأعاصير المدارية في المحيط الأطلسي وبمرَّات حدوثها. هناك أيضًا جدال واسع حول ما إذا كانت هذه الظاهرة قد تأثرت بتغيُّر المناخ. عادةً ما تتكرر ظروف ظاهرة النينيو كل سنتين إلى ٦ سنوات، واستمرت على مدار الـ ٤٠ سنة الماضية دون اتباع نمط واضح. كما تكشف إعادة تمثيل المناخ في الماضي باستخدام الشعاب المرجانية في المحيط الهادئ الغربي عن تقلبات في درجة حرارة سطح البحر تعود إلى ١٥٠ عامًا، أي قبل سجلاتنا التاريخية بكثير. تُظهر درجة حرارة سطح البحر تحولات في تيار المحيط التي تصاحب التحولات في تذبذب النينيو الجنوبي، وتكشف عن وجود تغيُّرين جذريين في تكرار ظاهرة النينيو وشدة حدوثها. أولًا حدث تحول في مطلع القرن العشرين من دورةٍ مدتها ١٠ سنوات إلى ١٥، إلى دورةٍ مدتها من ٣ سنوات إلى ٧. ثانيًا، في عام ١٩٧٦، حدث تحول حادٌّ في وتيرة وشدة ظاهرة النينيو، حيث أصبحت تحدث في دورة مدتها بين سنتين و٤ سنوات. تتفق كل نماذج المناخ على أن تذبذب النينيو الجنوبي سيستمر في المستقبل، وفي سيناريوهات الانبعاثات الأعلى في النصف الثاني من هذا القرن، ستصبح التقلبات في تلك الظاهرة أشد تطرفًا؛ مما يتسبَّب في هطول المزيد من الأمطار وتزايد موجات الجفاف، وهذا بدوره سيؤثر على عدد وشدة العواصف المدارية بطرقٍ يصعب توقُّعها.

السواحل

كما رأينا، يُفيد تقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ بأن مستوى سطح البحر قد يرتفع بين ٥٠سم و١٣٠سم بحلول عام ٢١٠٠ مقارنةً بعصر ما قبل الثورة الصناعية. وهذه التوقعات تثير قلقًا كبيرًا لدى قاطني المناطق الساحلية، حيث إن ارتفاع مستويات البحر سيقلل من فعالية الدفاعات الساحلية ضد العواصف والفيضانات، ويزيد من عدم استقرار المنحدرات والشواطئ. في العالم المتقدم، تأتي الاستجابة لهذه المخاطر

في إضافة بضع أقدام إلى ارتفاع الجدران البحرية حول المنشآت الساحلية، والتخلي عن بعض الأراضي الزراعية المنخفضة الجودة لصالح البحر (حيث لم يعد مجديًا تحمُّل تكلفة حمايتها)، وتعزيز الحماية القانونية للأراضي الرطبة الساحلية التي تُعَد بمثابة أفضل دفاع طبيعي أمام البحر. وعلى الصعيد العالمي، توجد بعض الدول التي تعتمد على جزر صغيرة ودلتاوات نهرية، حيث تواجه وضعًا يتطلب تدخلًا عاجلًا (انظر الشكل ٥-٣).



شكل ٥-٣: المناطق الأكثر عرضةً لخطر ارتفاع مستوى سطح البحر.

بالنسبة إلى الدول الجزرية الصغيرة، مثل المالديف في المحيط الهندي وجزر مارشال في المحيط الهادئ، فإن ارتفاع مستوى سطح البحر قد يغمر ما يصل إلى ٧٥٪ من الأراضي الجافة، وهذا بدوره يجعل الجزر غير صالحة للسكن. ومن اللافت للنظر أن هذه الدول، التي تعتمد اعتمادًا أساسيًّا على السياحة، لديها بعض من أعلى معدلات انبعاث الوقود الأحفوري للفرد الواحد. ومن بين التجمعات السكانية الكبرى المعرضة للخطر تلك التي تعيش بجانب دلتاوات الأنهار، كما هي الحال في بنجلاديش ومصر ونيجيريا وتايلاند، على سبيل المثال. وقد خلص تقرير البنك الدولي إلى أن الأنشطة البشرية على الدلتا، مثل بناء السدود واستخراج المياه العذبة، كانت سببًا في هبوط هذه المناطق بمعدل

أسرع بكثير من أي ارتفاع متوقع في مستوى سطح البحر، مما يزيد من ضعفها أمام العواصف والفيضانات.

في حالة بنجلاديش، يقع أكثر من ثلاثة أرباع الدولة ضمن المنطقة الدلتاوية التي تشكَّلت عند التقاء أنهار الجانج والبراهمابوترا وميجنا. في حين يقع أكثر من نصف البلاد على ارتفاع أقل من ٥ أمتار فوق مستوى سطح البحر، مما يجعل الفيضانات ظاهرة شائعة. خلال الرياح الموسمية الصيفية، يغمر الفيضان ربع مساحة هذه الدولة. لكن هذه الفيضانات، مثل فيضانات النيل، تجلب معها الحياة والدمار على حدٍّ سواء. فتروي المياه الأرض ويزيد الطميُ الأرضَ خصوبةً. تدعم دلتا البنغال الخصبة واحدة من أكثر الكثافات السكانية في العالم، حيث يعيش أكثر من ١١٠ ملايين شخص على مساحة ١٤٠ ألف كيلومتر مربع. تستقبل دلتا البنغال كل عام ما يزيد على مليار طن من الرواسب وألف كيلومتر مكعب من المياه العذبة. يعمل هذا الوزن من الرواسب على موازنة التآكل الذي تتعرض له الدلتا بفعل العمليات الطبيعية والنشاط البشري. ومع ذلك، أقيمت سدود عند أنهار الجانج وبراهمابوترا وميجنا للري وتوليد الطاقة، مما منع انتقال الطمي باتجاه مجرى النهر. فيتسبب تراجع كمية الرواسب في هبوط الدلتا. ثم يأتي الاستخراج السريع للمياه العذبة ليزيد الوضع سوءًا.

منذ ثمانينيات القرن العشرين، حُفِر ١٠٠ ألف بئر أنبوبية و٢٠ ألف بئر عميقة، مما ساهم في زيادة استخراج المياه العذبة بمعدل ستة أضعاف. تُعَد هذه الآبار ضرورية لتحسين جودة حياة قاطني هذه المنطقة، إلا أنها تسببت في هبوط أرضي يصل إلى ٢٫٥سم في السنة، وهو من بين أعلى المعدلات في العالم. بعد أن استخدم البنك الدولي تقديرات لمعدل الهبوط الأرضي وارتفاع مستوى سطح البحر بسبب الاحترار العالمي، فإنه قدَّر أن مستوى البحر النسبي في بنجلاديش قد يرتفع بمقدار ١٫٨ متر بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين. وقدَّر البنك الدولي أنه قد يؤدي ذلك في أسوأ السيناريوهات إلى فقدان ما يصل إلى ١٦٪ من الأراضي التي تُؤوي ١٣٪ من السكان، وتسهم بنسبة ١٢٪ من إجمالي الناتج المحلي الحالي. للأسف، لا يأخذ هذا السيناريو في الاعتبار أيًّا من مظاهر الدمار الذي سيلحق بغابات المنغروف والصيد المرتبط بها. علاوة على ذلك، فإن ازدياد توغل المياه المالحة نحو اليابسة سيؤدي إلى مزيد من التدهور في جودة المياه والزراعة.

إن العديد من المدن الكبرى حول العالم معرضة لخطر الفيضانات؛ لأنها بُنيت بالقرب من الأنهار أو السواحل من أجل تسهيل حركة التجارة عبر المحيطات. ومن الأمثلة على المدن الحالية الأكثر عرضة لخطر الفياضات في آسيا: دكا (٢٠٫٣ مليون نسمة

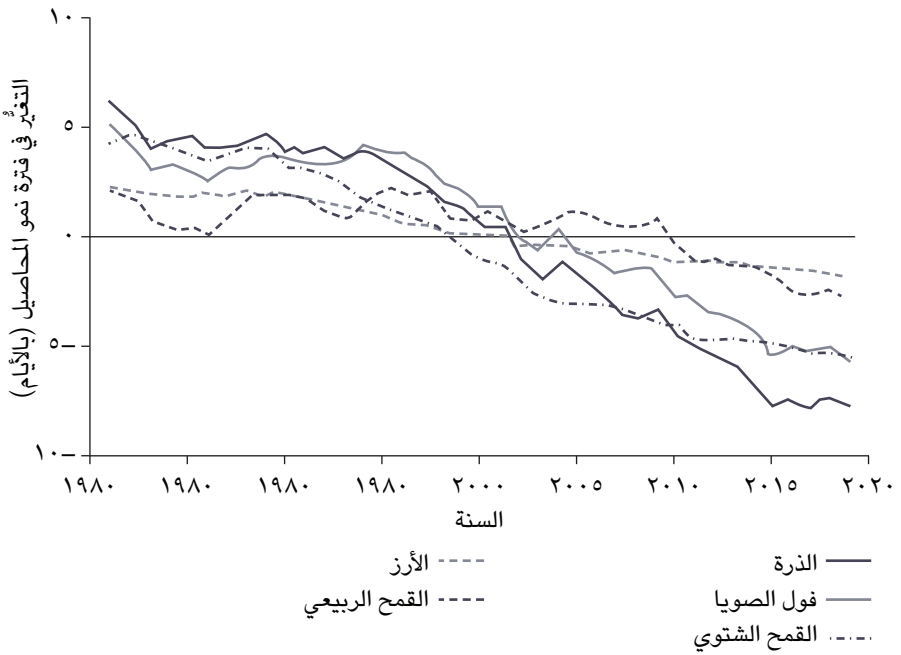
اليوم)، شنجهاي (١٧,٥ مليونًا)، غوانجو (١٣ مليونًا)، شنزن (١٢,٥ مليونًا)، جاكرتا (١٠,٨ ملايين)، بانكوك (١٠,٥ ملايين)، هونغ كونغ (٨,٤ ملايين)، مدينة هو تشي منه (٨,٣ ملايين)، وأوساكا (٥,٢ ملايين)؛ أما في أمريكا الشمالية: فنيويورك (١٨,٨ مليونًا)، بوسطن (٤,٩ ملايين)، ميامي (٢,٧ مليون)، ونيو أورليانز (٠,٤ مليون)؛ بينما في أمريكا الجنوبية: جواياكيل (٢,٩ مليون)، ريو دي جانيرو (١,٨ مليون)؛ وفي أفريقيا: أبيدجان (٣,٧ ملايين)، والإسكندرية (٣,٠ ملايين)؛ وفي أوروبا: لندن (٨,٩ ملايين) ولاهاي (٢,٥ مليون).

لنتناول حالة مدينة لندن على سبيل المثال. يحمي سدُّ نهر التايمز مدينة لندن من الفيضانات في الوقت الحالي. بُني ذلك السد استجابةً للفيضانات الكارثية التي حدثت عام ١٩٥٣، وصار جاهزًا للاستخدام عام ١٩٨٢ (لكنه افتُتح رسميًّا في ٨ مايو ١٩٨٤). يحمي سد التايمز مساحة ١٥٠ كيلومترًا مربعًا من مدينة لندن، وعقارات لا تقل قيمتها عن ١,٥ تريليون جنيه إسترليني. وبفضل بُعد نظر المستشارين العلميين للحكومة البريطانية، أقيم السد ليتحمل حدوث فيضان مرةً واحدةً كل ٢٠٠٠ سنة. لكن مع ارتفاع مستوى سطح البحر بسبب تغيُّر المناخ، سينخفض المدى الزمني لهذه الحماية بحلول عام ٢٠٣٠ ليتحمل حدوث فيضان واحد كلَّ ١٠٠٠ سنة. وبحلول عام ٢٠٢٠، كان السد قد أُغلق ١٩٣ مرة منذ إنشائه قبل ٣٨ عامًا؛ وقد حدث أكثر من ٤٠٪ من هذه الإغلاقات خلال الـ ١٠ سنوات الأخيرة. يُعَد الاقتصاد البريطاني سادس أكبر اقتصاد على مستوى العالم، إذ يُدِرُّ نحو ١,٤ تريليون جنيه إسترليني في السنة عبر مدينة لندن التي هي أيضًا واحدة من المراكز الرئيسية الثلاثة، إلى جانب نيويورك وطوكيو، لتداول الأسهم على مدار ٢٤ ساعة. إذا تعرَّضت لندن لفيضان كبير فإن ذلك لن يؤثر على اقتصاد المملكة المتحدة فحسب، بل يمكن أن يعطل التجارة العالمية أيضًا. لهذا وضعت وكالة البيئة البريطانية خططًا لحماية مدينة لندن من ارتفاع كبير في مستوى سطح البحر في المستقبل، بما في ذلك خطط لبناء سد جديد بين مدينتَي إسكس وكِنت تحسُّبًا لارتفاع محتمل في مستوى سطح البحر يصل إلى أربعة أمتار. لكن معظم المدن الأخرى حول العالم ليس لديها الموارد حتى تخطط لهذا النوع من الحماية.

وفقًا لتقديرات تقرير «لانسيت كاونت داون»، فإنه في غياب التدخل، سيكون ما بين ١٤٥ مليون و٥٦٥ مليون شخص عرضة للتأثر والتشرد نتيجة ارتفاع مستوى البحر في المستقبل.

الزراعة

من بين المخاوف الكبرى التي يثيرها تغيُّر المناخ تأثيره المستقبلي في الزراعة على الصعيدين العالمي والإقليمي. السؤال الرئيسي هنا هو ما إذا كان العالم سيتمكن من تلبية احتياجاته الغذائية في ظل سرعة تغيُّر المناخ والزيادة السكانية المتوقعة بمقدار ٢ مليار شخص بحلول عام ٢٠٥٠. يستعرض الشكل ٥-٤ الانخفاض الواقع بالفعل في محاصيل الحبوب. ففي حين تشير النماذج إلى احتمالية ارتفاع الإنتاج الزراعي في المناطق الواقعة على دوائر عرض مرتفعة بسبب طول موسم نمو المحاصيل وانخفاض الأضرار الناجمة عن الصقيع، إلا أن بعض هذه المكاسب ستقابلها زيادة في تلف المحاصيل بسبب الظواهر الجوية المتطرفة. أما في المناطق المدارية وشبه المدارية، فسينخفض الإنتاج الزراعي بدرجة كبيرة نتيجة الارتفاع الشديد في درجات الحرارة وزيادة تقلبات هطول الأمطار.



شكل ٥-٤: التغيُّرات في محاصيل الحبوب بين عام ١٩٨٠ و٢٠٢٠.

سوف تُشكل درجات الحرارة المرتفعة والرطوبة أيضًا تحديًا أمام العديد من المجتمعات التي تعتمد بشدة على الزراعة المعيشية، حيث إن درجات الحرارة المرتفعة ومستويات الرطوبة العالية ستزيدان من صعوبة العمل خارج الأبنية كما ستزيدان احتمالية الإصابة بفرط الحرارة. وهذا من شأنه أن يؤثر على صحة أي شخص يضطر للعمل خارج الأبنية بانتظام، بما في ذلك عمال البناء والمزارعين. أُهدر على مستوى العالم ٢٧٨ مليار ساعة عمل محتملة عام ٢٠١٩ بسبب الظروف الجوية القاسية، أي بزيادةٍ قدرها ٩٢ مليار ساعة مقارنة بعام ٢٠٠٠. تمثِّل سبع دول (كمبوديا، الهند، الصين، إندونيسيا، نيجيريا، البرازيل، الولايات المتحدة) ما يقرب من ٦٠٪ من إجمالي الساعات المهدرة عالميًّا في عام ٢٠١٩، حيث شهدت الهند أكبر خسارة على الإطلاق. وفي الدول الست الأولى، كان العمال الزراعيون هم الأكثر تأثرًا بفقدان ساعات العمل.

إن تقييم التأثير الكلي لتغيُّر المناخ في الزراعة يُعَد أمرًا صعبًا؛ حيث إن الإنتاج الزراعي لا يرتبط ارتباطًا وثيقًا بتوفير الغذاء لسكان العالم بقدر ارتباطه بالتجارة والاقتصاد. لهذا السبب، يحتفظ الاتحاد الأوروبي بمخزون من الغذاء، في حين تتجه العديد من الدول النامية إلى تصدير محاصيل نقدية (مثل السكر، والكاكاو، والقهوة، والشاي، والمطاط)، لكنها تعجز عن تلبية الاحتياجات الغذائية لسكانها بالقدر الكافي. مثال بسيط على ذلك هو دولة بنين في غرب أفريقيا، حيث يمكن لمزارعي القطن الحصول على إنتاجية من القطن تزيد من ٤ أضعاف إلى ٨ لكل هكتار على منافسيهم الأمريكيين في تكساس. ومع ذلك، بسبب دعم الولايات المتحدة لمزارعيها، فهذا يعني أن القطن الأمريكي أرخص من القطن القادم من بنين. يتلقى مزارعو القطن في الولايات المتحدة حاليًّا دعمًا ماليًّا يفوق ٤ مليارات دولار أمريكي، وهو ما يعادل ضعف إجمالي الناتج المحلي لبنين تقريبًا. في عام ٢٠٠٢، رفعت البرازيل قضية أمام منظمة التجارة الدولية ضد الولايات المتحدة بسبب الدعم غير العادل وتشويه التجارة. وفازت البرازيل بقضيتها عام ٢٠٠٥؛ ومع ذلك، بعد مرور ١٥ عامًا، لا تزال الولايات المتحدة تناقش التغييرات التي يجب إجراؤها بشأن دعمها الزراعي. لذا، حتى إذا أدى تغيُّر المناخ إلى انخفاض إنتاجية القطن في تكساس، فإن ذلك لن يغير من قوى السوق المتحيزة التي لا تزال تعمل بطريقة غير قانونية.

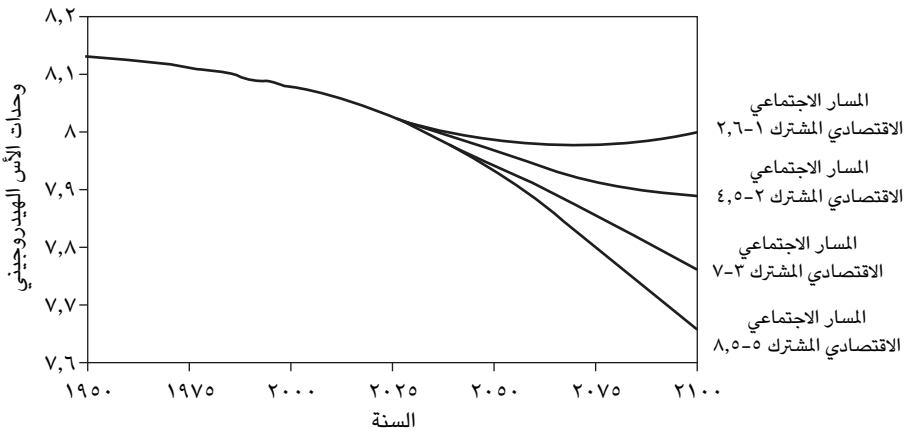
يمكن للأسواق أن تزيد من اتساع الفجوة بين تأثير تغيُّر المناخ على الزراعة في الدول المتقدمة والنامية. قد تؤدي التغيُّرات في العرض والطلب إلى استفادة الدول المصدرة

للمنتجات الزراعية ماديًّا حتى مع انخفاض الإمدادات؛ لأن الأسعار ترتفع مع ندرة المنتج. العامل الآخر غير المعروف تمامًا هو مدى قدرة قطاع الزراعة في دولة ما على التكيف. على سبيل المثال، تفترض النماذج المناخية أن مستويات الإنتاج في الدول النامية ستنخفض بدرجة أكبر مقارنة بالدول المتقدمة؛ لأن قدرتها المتوقعة على التكيف أقل من تلك الموجودة في الدول المتقدمة. ومع ذلك، يظل هذا مجرد افتراض لا يستند إلى سوابق تاريخية مماثلة، وبما أن هذه التأثيرات في الزراعة ستحدث على مدار القرن القادم، فقد يتمكن العديد من الدول النامية من اللحاق بالعالم المتقدم من حيث القدرة على التكيف.

تمثِّل زراعة البن في أوغندا مثالًا بارزًا على المشكلات الإقليمية التي قد يسببها تغيُّر المناخ. فمن المتوقع أن تنكمش المساحة الإجمالية الصالحة لزراعة قهوة الروبوستا انكماشًا حادًّا إلى ١٠٪ فقط من المساحة الحالية إذا ارتفعت درجة الحرارة بمقدار درجتين مئويتين. وستظل المناطق المرتفعة فقط مناسبة لزراعة البن، بينما ستصبح المناطق الأخرى شديدة الحرارة. ومع ذلك، لا يمكن لأحد أن يجزم ما إذا كانت هذه المساحات المتبقية ستُدِرُّ دخلًا أكبر أو أقل للبلاد؛ لأنه إذا تأثرت المناطق الأخرى لزراعة القهوة حول العالم، فقد ترتفع أسعار حبوب القهوة نتيجة ندرتها. هذا يبرز مدى هشاشة اقتصادات العديد من الدول النامية، التي تعتمد اعتمادًا كبيرًا على منتج زراعي أو اثنين، أمام تأثير الاحترار العالمي؛ إذ يصعب التنبؤ بالتغيُّرات التي سيسببها الاحترار العالمي في إنتاج المحاصيل وقيمتها النقدية. ومن ثَم، فإن أحد أشكال التكيف الرئيسية مع الاحترار العالمي يجب أن تتمثل في توسيع القاعدة الاقتصادية والزراعية للدول الأكثر عرضة للخطر. وبالطبع، يُعَد تنفيذ ذلك على أرض الواقع أكثر صعوبة من تحقيقه نظريًّا، ومن الواضح أن الدعم الزراعي المقدَّم من الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والصين، بالإضافة إلى الاتفاقيات التجارية العالمية الأحادية الجانب الحالية، له تأثير أكبر على الإنتاج الزراعي العالمي وقدرة الدول على تحقيق الاكتفاء الذاتي مقارنة بأي تأثير محتمل لتغيُّر المناخ. بل يبدو أن الحلول أصبحت أكثر بعدًا مع فشل مفاوضات منظمة التجارة الدولية.

تحمض المحيطات

أظهرت القياسات المباشرة لكيمياء مياه المحيطات انخفاضًا في الأس الهيدروجيني، مما يعني ارتفاع حموضة المحيطات (انظر الشكل ٥-٥). يُعزى ذلك إلى انحلال غاز ثاني



شكل ٥-٥: تحمض المحيطات.

أكسيد الكربون في المياه السطحية للمحيط. يتحكم في هذه العملية عاملان رئيسيان، وهما كمية غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ودرجة حرارة المحيط. امتصت المحيطات بالفعل نحو ثلث غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الأنشطة البشرية، مما أدى إلى انخفاض مطرد في مستويات الحموضة في المحيط. لكن مع زيادة غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في المستقبل، سيستمر ارتفاع كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنحل في المحيط. بعض الكائنات البحرية، مثل الشعاب المرجانية، والمثقبات، والكوكوليثات والمحاريات، لديها أصداف من كربونات الكالسيوم تذوب في الأحماض. وتظهر التجارب المختبرية والميدانية أن زيادة الحموضة في المياه، نتيجة ارتفاع مستويات غاز ثاني أكسيد الكربون المنحل، تؤدي إلى تشوُّه أصداف بعض الأنواع البحرية وتبطئ نموها، على الرغم من أن تأثير ذلك يختلف بين الأنواع. كما يغير التحمض من دورة المغذيات والعديد من العناصر والمركبات الأخرى في المحيط، ومن المرجح أن يغير كذلك من المزايا التنافسية بين الأنواع، مما يؤثر في النظم البيئية البحرية والشبكة الغذائية. هذا من شأنه أن يثير مخاوف كبرى نظرًا لأن صيد الأسماك لا يزال مصدرًا مهمًّا للغذاء، حيث يصل إنتاج الصيد التجاري إلى نحو ٩٥ مليون طن من الأسماك، بينما تنتج مزارع الأسماك سنويًّا ٥٠ مليون طن إضافية.

التنوع البيولوجي

يشهد العالم حاليًّا تناقصًا في التنوع البيولوجي بسبب الأنشطة البشرية التي تشمل إزالة الغابات والزراعة والتوسع الحضري واستغلال المعادن. وتفوق معدلات الانقراض الحالية المعدل الطبيعي الأساسي بنحو ١٠٠ مرة إلى ١٠٠٠، وسوف يؤدي تغيُّر المناخ إلى تفاقم هذا التراجع في التنوع البيولوجي. تُدرج تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ الأنواعَ الآتية باعتبارها الأكثر عرضة للخطر بسبب تغيُّر المناخ: غوريلا الجبال في أفريقيا، والبرمائيات التي تعيش في غابات الضباب في المناطق الاستوائية الحديثة، والدب المقنع في جبال الأنديز، وطيور الغابات في تنزانيا، وطائر الكيتزال البرَّاق في أمريكا الوسطى، والنمر البنغالي وأنواع أخرى لا توجد إلا في أراضي سونداربانس الرطبة، والنباتات الحساسة لهطول الأمطار التي لا تنمو إلا في مملكة الكيب النباتية بجنوب أفريقيا، بالإضافة إلى الدببة القطبية والبطاريق التي تعيش بالقرب من المناطق القطبية. والسبب الرئيسي لتهديد هذه الأنواع هو عجزها عن الهجرة استجابةً لتغيُّر المناخ، إما بسبب موقعها الجغرافي المحدود وإما بسبب التعدي البشري على موائلها، خاصةً عبر الزراعة والتوسع الحضري. مثال على الحالة الأولى هو الغابات الضبابية في المناطق الاستوائية الحديثة: فمع تغيُّر المناخ ستنتقل هذه الغابات إلى ارتفاعات أعلى على المنحدرات الجبلية بحثًا عن الظروف المناخية المناسبة، حتى تصل إلى نقطة لا يبقى بعدها أي ارتفاع لتصعد إليه.

تُعَد الشعاب المرجانية مثالًا على أحد الأنظمة البيئية البحرية المهددة بالخطر. فالشعاب المرجانية تمثِّل مصدرًا اقتصاديًّا قيمًا لصيد الأسماك والأنشطة الترفيهية والسياحة وحماية السواحل. وتشير بعض التقديرات إلى أن الخسائر العالمية الناجمة عن اختفاء الشعاب المرجانية قد تصل إلى مئات المليارات من الدولارات كل عام. بالإضافة إلى ذلك، تُعَد الشعاب أحد أكبر مستودعات التنوع البيولوجي البحري عالميًّا. لقد شهدت السنوات القليلة الماضية تراجعات غير مسبوقة في صحة الشعاب المرجانية. حيث فقد الحيد المرجاني العظيم في أستراليا نحو ٥٠٪ من شعابه الصلبة في الأعوام الأخيرة نتيجة ظاهرة التبييض التي كان سببها ارتفاع درجات حرارة المياه إلى مستوياتٍ قصوى. ويُعَد الحيد المرجاني العظيم أكبر مجموعة شعاب مرجانية في العالم، حيث تتكون مما يزيد على ٢٩٠٠ شعاب مرجانية فردية، و٩٠٠ جزيرة تمتد على مسافة تزيد على ١٤٠٠ ميل. وفي مناطق أخرى، نفق ما يصل إلى ٧٠٪ من الشعاب المرجانية خلال موسم واحد. شهدت السنوات الأخيرة زيادةً ملحوظة في تنوع أمراض الشعاب المرجانية ومعدل انتشارها

وضراوتها، حيث سُجِّلت حالات نفوق جماعي في ولاية فلوريدا وأجزاء واسعة من منطقة البحر الكاريبي. بالإضافة إلى ذلك، قد تؤدي زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى خفض معدلات التكلس في الشعاب المرجانية المكوِّنة للشعاب، مما يتسبَّب في ضعف الهياكل، وانخفاض معدلات النمو، وزيادة القابلية للتآكل. وتشير نتائج النماذج إلى أن هذه الآثار ستكون أكثر حدة عند الحدود الحالية لتوزيع الشعاب المرجانية. من منظور يغلب عليه الطابع النظري، نشر عالم الأحياء كريس توماس وزملاؤه بحثًا في مجلة «نيتشر» يبحث في الزيادة المحتملة لمعدلات الانقراض على مدى الـ ٥٠ عامًا القادمة في مناطق رئيسية مثل المكسيك ومنطقة الأمازون وأستراليا. تشير النماذج النظرية إلى أن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار درجتين مئويتين بحلول عام ٢٠٥٠ قد يؤدي إلى انقراض ربع الأنواع الخاضعة إلى الدراسة. وقد تعرضت هذه الدراسة لانتقادات نظرًا لأن نماذجها قد طرحت افتراضات تحتمل الصحة والخطأ؛ على سبيل المثال، تفترض النماذج أننا نعرف النطاق المناخي الكامل الذي يمكن لكل نوع أن يعيش فيه، وكذلك العلاقة الدقيقة بين تقلص الموائل ومعدلات الانقراض. لذلك، يجب النظر إلى هذه النتائج على أنها تشير إلى الاتجاه المحتمل لمعدلات الانقراض، وليس بالضرورة إلى الحجم الدقيق لها. ومع ذلك، تُظهر هذه الدراسة ودراسات علمية أخرى حجم التهديد الكبير الذي يواجه التنوع البيولوجي على المستويين الإقليمي والعالمي، كما تُبرز حساسية النظم البيولوجية لحجم ومعدل الاحترار الذي سيحدث في المستقبل.

ولحماية التنوع الحيوي فوائد كبيرة أخرى للمجتمع البشري. ففي عام ٢٠٢٠، توقفت الحياة في العالم بسبب جائحة كوفيد-١٩. وكانت أحد الأسباب التي جعلت كوفيد-١٩ مرضًا تنفسيًّا معقدًا وخطيرًا، بل مميتًا، أنه فيروس حيواني المنشأ انتقل من حيوانٍ آخر وتحوَّر ليصيب الإنسان. ومن ثَم، يحمل الفيروس بصمة وراثية غير معروفة لأجهزتنا المناعية، مما يؤخر قدرتنا على تطوير أجسام مضادة قادرة على مكافحة العدوى. يبدو أنه من المرجح على نحو متزايد أن التجارة غير القانونية في الحيوانات المهددة بالانقراض مثل الخفافيش وآكل النمل الحرشفي عبر «الأسواق الرطبة» غير الإنسانية في الصين وجنوب شرق آسيا هي ما سمحت بانتقال الفيروس بين الأنواع. استُدل على المخاطر العالية جدًّا لتفشي مثل هذه الفيروسات الحيوانية المنشأ من مراتٍ سابقة تفشَّت فيها فيروسات مثل إنفلونزا الطيور المرتبطة بفيروس «إتش ٥ إن ١» عام ١٩٩٦، وتفشي مرض السارس في عام ٢٠٠٢-٢٠٠٣. في كلتا المرتين، حُظرت

الأسواق الرطبة الصينية مؤقتًا ثم سُمح لها باستكمال نشاطها. ومن هنا تنشأ حاجة ملحة لحماية التنوع البيولوجي والحياة البرية واحترامهما لمنع تفشي مثل هذه الأمراض الحيوانية المنشأ. يتعين على الحكومة الصينية والحكومات الأخرى تعزيز التغيير الثقافي إلى جانب فرض قيود تنظيمية تدريجية لحماية الحياة البرية؛ ومن ثَم حماية البشر أيضًا.

الصحة البشرية

الآثار الصحية المحتملة لتغيُّر المناخ هائلة حيث ستشكل إدارتها تحديًا جسيمًا. فمن المتوقع أن يؤدي تغيُّر المناخ إلى زيادة الوفيات الناجمة عن موجات الحر والجفاف، وحرائق الغابات، والعواصف، والفيضانات. كما يُهدد الإنتاجَ الغذائي درجاتُ الحرارة المرتفعة ومعدلاتُ هطول الأمطار المتفاوتة. يُعزى ذلك إلى انخفاض الإنتاجية نتيجة زيادة المخاطر التي يتعرض لها العاملون بانتظام في الهواء الطلق مثل عمال البناء والمزارعين. كما أشير إلى احتمالية انخفاض معدل الوفيات في بعض البلدان، نظرًا لوفاة العديد من كبار السن بسبب الطقس البارد، ومن ثَم فإن فصول الشتاء الأكثر دفئًا قد تقلل من هذه الوفيات. إلا أن هذا الرأي ثبت عدم صحته، حيث كشفت أبحاث حديثة أن تحسين المساكن والرعاية الصحية وارتفاع الدخل وزيادة الوعي بمخاطر البرد هي المسئولة عن انخفاض وفيات الشتاء في المملكة المتحدة منذ عام ١٩٥٠، بينما في الولايات المتحدة كانت الوفيات المرتبطة بحرارة الصيف أعلى بمعدل أربعة أضعاف الوفيات الناجمة عن البرد خلال العقود الثلاثة الماضية. ومن ثَم، فإن تكيف العديد من المجتمعات مع المناخ البارد وتحسين الحماية للأفراد الأكثر عرضة للمخاطر يعني أن فصول الشتاء الأكثر دفئًا لن يكون لها تأثير يُذكر — إن وُجد — في خفض معدل الوفيات.

في تقرير صدَر عام ٢٠٠٩ من كلية لندن الجامعية، ونُشر في دورية «لانسيت» تحت عنوان «إدارة الآثار الصحية لتغيُّر المناخ»، جرى تحديد مجالين رئيسيين قد يؤثران في صحة مليارات الأشخاص وهما: المياه والغذاء. فالتهديد الأشد خطورة على صحة الإنسان هو انعدام القدرة على الوصول إلى مياه الشرب العذبة. فلا يزال يوجد حتى يومنا هذا مليار شخص ليس لديهم مصدر دائم لمياه شرب نظيفة وآمنة. وشح المياه النظيفة لا يقتصر تأثيره على حدوث مشكلات صحية كبيرة مثل الجفاف، بل إن المياه الملوثة أيضًا تحتوي على عدد هائل من الأمراض والطفيليات. كما أن الزيادة السكانية على مستوى العالم، خاصةً في المناطق الحضرية، تُشكل ضغطًا كبيرًا على الموارد المائية. فمن المتوقع

أن تؤدي تأثيرات تغيُّر المناخ — بما في ذلك التغيُّرات في درجات الحرارة وهطول الأمطار ومستويات سطح البحر — إلى عواقب متفاوتة على توفر المياه العذبة حول العالم. فعلى سبيل المثال، ستؤثر التغيُّرات في جريان الأنهار على إنتاجية الأنهار والخزانات، ومن ثَم تجديد إمدادات المياه الجوفية. كما أن ارتفاع معدل التبخر سيؤثر على موارد المياه، وسيسهم في ملوحة الأراضي الزراعية المروية. وقد يؤدي ارتفاع مستوى سطح البحر إلى تسرب المياه المالحة إلى طبقات المياه الجوفية الساحلية. حاليًّا، يعيش نحو مليارَي شخص، أي ربع سكان العالم، في دول تعاني من إجهادٍ مائي. وتشير التقديرات إلى أنه في حال عدم اتخاذ أي إجراءات للتخفيف من تغيُّر المناخ، فقد تصل هذه النسبة إلى ٥٠٪ من سكان العالم بحلول عام ٢٠٥٠. وسيتركز ٨٠٪ من هؤلاء في الدول النامية.

من المرجح أن يكون لتغيُّر المناخ التأثير الأكبر في البلدان التي يرتفع فيها معدل الاستهلاك النسبي مقارنة بالإمدادات المتاحة. أما المناطق التي تتمتع بوفرة في الموارد المائية فستحصل على ما يفوق احتياجها نتيجة زيادة الفيضانات. وكما أشير سابقًا، فإن النماذج الحاسوبية تتنبأ بهطول أمطار أكثر غزارة، مما يترتب عليه حدوث فيضانات جارفة في أوروبا، بينما — وعلى سبيل المفارقة — قد لا تتأثر نسبيًّا البلدان التي تعاني حاليًّا من شح المياه (مثل تلك التي تعتمد على تحلية المياه). أما البلدان التي تقع بين هذين الطرفين، ولا تمتلك تاريخًا أو بنية تحتية للتعامل مع نقص المياه، فستكون الأكثر تضررًا. وفي وسط آسيا وشمال أفريقيا وجنوبها، ستتراجع معدلات هطول الأمطار بدرجة كبيرة، كما ستتفاقم جودة المياه نتيجة ارتفاع درجات الحرارة وزيادة جريان الملوثات. أضف إلى ذلك الزيادةَ المتوقعة في التفاوت السنوي لهطول الأمطار، مما سيجعل الجفاف أكثر شيوعًا. لذا، فإن الدول التي صُنِّفت على أنها الأكثر عرضة للخطر هي التي تحتاج إلى البدء في التخطيط منذ الآن للحفاظ على مواردها المائية والتعامل مع المخاطر المتزايدة للفيضانات أو أحدهما؛ لأن ما يهدد صحة الإنسان هو انعدام البنية التحتية لمواجهة الجفاف والفيضانات وليس نقص المياه أو وفرتها.

يعتمد الأمن الغذائي على ثلاث ركائز أساسية: (١) توافر الغذاء – هل يُنتج ما يكفي؟ (٢) إمكانية الحصول على الغذاء – هل يمكن للناس تحمل تكلفته؟ (٣) والاستقرار – هل الغذاء متوفر دائمًا؟ وفقًا لبرنامج الأغذية العالمي التابع للأمم المتحدة، فإننا ننتج حاليًّا غذاءً يكفي احتياجات ١٠ مليارات شخص، وهو ما يغطي بسهولةٍ الزيادة السكانية المتوقعة خلال هذا القرن. لكن هناك ٨٢١ مليون شخص على حافة المجاعة اليوم، أي

بزيادةٍ قدرها ٢٥ مليون شخص خلال خمس سنوات فقط. وهذا ببساطة لأنه ليس لديهم مال كافٍ لشراء الطعام. يشكل تغيُّر المناخ تهديدًا على توافر الغذاء واستقراره، حيث يؤثر على إنتاج الغذاء والسلع الزراعية الأخرى. يجب أيضًا الأخذ في الحسبان الظواهر الجوية المتطرفة. مع تزايد عولمة الاقتصاد، أصبح عدد قليل جدًّا من الدول مكتفيًا ذاتيًّا من الغذاء الأساسي، ومن ثَم تُعَد الواردات الغذائية ذات أهمية كبيرة. يمكن أن تتأثر تكلفة المواد الغذائية الأساسية تأثرًا كبيرًا بالطلب العالمي، والدعم الزراعي الوطني، وحظر التصدير، والكوارث الطبيعية، لكن التأثير الأكبر يأتي من المضاربة على الغذاء في الأسواق العالمية. في عامَي ٢٠٠٨-٢٠٠٩، شهدت أسعار الغذاء ارتفاعًا بنسبة ٦٠٪، بينما في عامَي ٢٠١١-٢٠١٢ قفزت الأسعار بنسبة ٤٠٪، وارتبطت كلتا الزيادتين بالمضاربة على الغذاء. لذا، يمكن ربط عجز الكثيرين على تحمل تكلفة الغذاء الأساسي، وما يترتب عليه من سوء تغذية ومجاعات، مباشرةً بالمضاربة على أسعار الغذاء في الأسواق العالمية في لندن ونيويورك وطوكيو.

يشكل انتقالُ الأمراض المعدية التي تتأثر مباشرة بالعوامل المناخية تهديدًا آخر لصحة الإنسان. سيؤثر تغيُّر المناخ بالأخص على الأمراض المحمولة بالنواقل؛ أي الأمراض التي تنقلها كائنات حية أخرى، مثل الملاريا التي ينقلها البعوض. تتميز العوامل المعدية والكائنات الحاملة لها بحساسيتها لعوامل مثل درجة الحرارة، ودرجة حرارة المياه السطحية، والرطوبة، والرياح، ورطوبة التربة، والتغيُّرات في توزيع الغابات. لذا، من المتوقع أن يؤثر تغيُّر المناخ والأنماط الجوية المتغيِّرة على المدى (خطوط الطول ودوائر العرض)، والشدة، وموسمية العديد من الأمراض المعدية الأخرى التي تنقلها الحشرات. على سبيل المثال، ثمة علاقة قوية بين ارتفاع درجة حرارة سطح البحر ومستوى سطح البحر، وشدة وباء الكوليرا في بنجلاديش. ومع تغيُّر المناخ المتوقع في المستقبل والارتفاع الناتج عنه في مستوى سطح البحر النسبي لبنجلاديش، قد تصبح أوبئة الكوليرا أكثر شيوعًا.

بوجه عام، فإن ارتفاع مستوى الاحترار والرطوبة الناجمة عن تغيُّر المناخ سيعزز انتقال الأمراض. وفي ظل الزيادة المحتملة لانتقال العديد من هذه الأمراض كنتيجة تلقائية لتغيُّر المناخ، يجب أن نتذكر أن قدرتنا على السيطرة على الأمراض ستتغيَّر أيضًا. يمكن توقع وجود لقاحات جديدة أو محسَّنة؛ يمكن السيطرة على بعض الأنواع الناقلة للعدوى باستخدام المبيدات الحشرية. ومع ذلك، هناك أيضًا بعض الشكوك والمخاطر: على سبيل المثال، استخدام المبيدات الحشرية على المدى الطويل يعزز تكاثر السلالات المقاوِمة، فضلًا عن القضاء على العديد من المفترسات الطبيعية للآفات.

من أبرز الأمراض المحمولة بالنواقل الملاريا حيث يُصاب حاليًّا نحو ٥٠٠ مليون شخص حول العالم. يُعَد النوع الطفيلي المسبِّب للملاريا هو المتصورة النشيطة التي تنقلها بعوضة الأنوفيلة. ويؤثر في قدرة البعوض على نقل الملاريا عاملان مناخيان أساسيان، هما درجة الحرارة وهطول الأمطار. تشير التقييمات حول التأثير المحتمل لتغيُّر المناخ العالمي في معدلات الإصابة بالملاريا إلى زيادة واسعة النطاق في المخاطر بسبب توسع المناطق المواتية لانتقال المرض. وبالفعل في السنوات الخمس الماضية، كانت المناطق المرتفعة المواتية لانتقال الملاريا في أفريقيا أعلى بنسبة ٣٩٪، وفي شرق آسيا أعلى بنسبة ١٥٠٪ مقارنة بمنتصف خمسينيات القرن العشرين. وتشير النماذج الرياضية التي تحدد المناطق ذات درجات الحرارة المناسبة لبعوض الملاريا إلى أنه بحلول ثمانينيات القرن الحادي والعشرين، قد تزيد نسبة تعرض البشر للملاريا إلى ٢–٤٪ (ما يعادل ٢٦٠–٣٢٠ مليون شخص). تظهر الزيادة المتوقعة بوضوحٍ أكبر عند حدود المناطق المتوطنة بالملاريا وفي المرتفعات داخل تلك المناطق. يجب تفسير التغيُّرات في خطر الإصابة بالملاريا على أساس الظروف البيئية المحلية، وتأثيرات التنمية الاجتماعية الاقتصادية، وبرامج أو قدرات مكافحة الملاريا. كما أن تغيُّر المناخ سيخلق ظروفًا مثالية لتكاثر بعوض الأنوفيلة في جنوب إنجلترا، وأوروبا القارية، وشمال الولايات المتحدة.

ومع ذلك، ينبغي ملاحظة أن انتشار العديد من الأمراض الاستوائية مرتبط بالتنمية. فحتى أربعينيات القرن العشرين، كان مرض الملاريا متوطنًا في فنلندا وبولندا وروسيا، و٣٦ ولاية أمريكية بما في ذلك واشنطن، وأوريجون وأيداهو ومونتانا ونورث داكوتا ونيويورك وبنسلفانيا ونيوجيرسي. لذلك، على الرغم من أن تغيُّر المناخ قادر على توسيع نطاق انتشار العديد من هذه الأمراض الاستوائية، فإن تجربة أوروبا والولايات المتحدة تشير إلى أن مكافحة الملاريا ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالتنمية والموارد: التنمية لضمان المراقبة الفعالة للمرض، والموارد لتأمين جهود قوية للقضاء على البعوض وأماكن تكاثره.

ستتفاقم تأثيرات تغيُّر المناخ مع ارتفاع درجة حرارة الأرض. وسيؤثر تغيُّر المناخ في فترة رجوع موجات الحر والجفاف وحرائق الغابات والعواصف والفيضانات وشدتها. كما ستصبح المدن والبلدات الساحلية معرضة للخطر على وجه الخصوص مع ارتفاع مستوى سطح البحر، مما سيزيد من تأثيرات الفيضانات وهبوب العواصف. كذلك سيصبح أمن المياه والغذاء والصحة العامة من أبرز المشكلات التي ستواجه كل الدول. لن يُستثنى كذلك التنوع البيولوجي العالمي ورفاهية مليارات الأشخاص من التهديدات التي يفرضها

تغيُّر المناخ. لقد حاولت في الجدول ٥-١ تلخيص التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ. ورغم أن العديد من الزملاء يضعون خططًا للتعامل مع أوضاع العالم حينما ترتفع درجة حرارته بمقدار أربع درجات مئوية، فإن نصيحتي البسيطة هي: دعونا لا نصل إلى تلك الأوضاع.

جدول ٥-١: التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ.

ارتفاع درجات الحرارة عن مستويات ما قبل الثورة الصناعية	التأثيرات المحتملة لتغير المناخ
١,٥ درجة مئوية	• تأثيرات جسيمة على النظام البيئي للشعاب المرجانية في المياه الدافئة. • تأثيرات كبيرة على النظم البيئية والأنواع المعرضة للخطر (المناطق القطبية، والأراضي الرطبة، والغابات الضبابية). • زيادة الفيضانات الساحلية والنهرية. • زيادة الظواهر الجوية المتطرفة. • زيادة تفشي الأمراض المعدية المدارية. • زيادة الوفيات والأمراض المرتبطة بالحرارة.
٢-٣ درجات مئوية	• النزوح من جزر المالديف والمارشال وتوفالو والعديد من الدول الجزرية الصغيرة. • نُفوق كبير في نظام الشعاب المرجانية في المياه الدافئة. • تغييرات كبيرة في المناطق القطبية مع وقوع خسائر كبيرة في الجليد البحري القطبي. • زيادة كبيرة في الظواهر الجوية المتطرفة وانتشار الأمراض المعدية. • زيادة كبيرة في الأمراض والوفيات المرتبطة بارتفاع درجات الحرارة، لا سيما في المناطق الواقعة على دوائر عرض منخفضة. • تأثيرات كبيرة على النظم البيئية والأنواع المعرضة للخطر (المناطق القطبية، والأراضي الرطبة، والغابات الضبابية، وغابات المنجروف). • زيادة كبيرة في الفيضانات الساحلية والنهرية حول العالم. • تأثيرات كبيرة في مصايد الأسماك الواقعة على دوائر عرض منخفضة. • انخفاض في غلات المحاصيل والإنتاجية لا سيما في المناطق المدارية وشبه المدارية.

ارتفاع درجات الحرارة عن مستويات ما قبل الثورة الصناعية	التأثيرات المحتملة لتغير المناخ
٣-٤ درجات مئوية	• تأثيرات كبيرة على كل النظم البيئية بما في ذلك زيادة كبيرة في انقراض الأنواع. • نفوق كل الشعاب المرجانية في المياه الدافئة والباردة. • ذوبان البحر الجليدي تمامًا في القطب الشمالي خلال فصل الصيف، وارتفاع درجة حرارة القطب الشمالي بمقدار ٨ درجات مئوية. • اختفاء غالبية الأنهار الجليدية الجبلية بما في ذلك جميع الغطاء الثلجي على جبل كليمنجارو (تنزانيا). • زيادة كبيرة في الظواهر الجوية المتطرفة وانتشار الأمراض المعدية. • انخفاض كبير في الإنتاج الزراعي والسمكي والموارد المائية المتاحة. • سيصبح الأمن الغذائي والمائي من القضايا السياسية والإنسانية الكبرى. • زيادة الهجرة الجماعية القسرية بسبب الظروف البيئية. • انخفاض مصارف الكربون في اليابسة والمحيطات، مما يسرع من وتيرة تغيُّر المناخ.
٥-٤ درجات مئوية	• خسائر كارثية في النظم البيئية ونفوق الأنواع حول العالم. • تسارع ذوبان الصفائح الجليدية في غرب القطب الجنوبي وجرينلاند، مما يؤدي إلى ارتفاع كبير في مستوى سطح البحر عالميًّا. • تأثر خُمس سكان العالم بالفيضانات والنزوح من المدن الساحلية الكبرى. • تسارع الهجرة الجماعية القسرية بسبب العوامل البيئية، وتصاعد النزاعات حول الموارد. • في العديد من البلدان، تظل درجات الحرارة الصيفية باستمرار فوق ٤٠ درجة مئوية. • يصبح شائعًا موجات الحر التي تصل درجات حرارتها إلى ٥٠ درجة مئوية. • يعاني أكثر من ٣,٥ مليارات شخص من الإجهاد المائي. • تتسبب حرائق الغابات في تلوث هوائي كبير وأزمات صحية للإنسان. • ينهار الإنتاج الغذائي العالمي، مما يؤدي إلى انتشار سوء التغذية والمجاعة.

ارتفاع درجات الحرارة عن مستويات ما قبل الثورة الصناعية	التأثيرات المحتملة لتغير المناخ
٥-٦ درجات مئوية فأعلى	لا داعي للوصول إلى هذا الوضع.

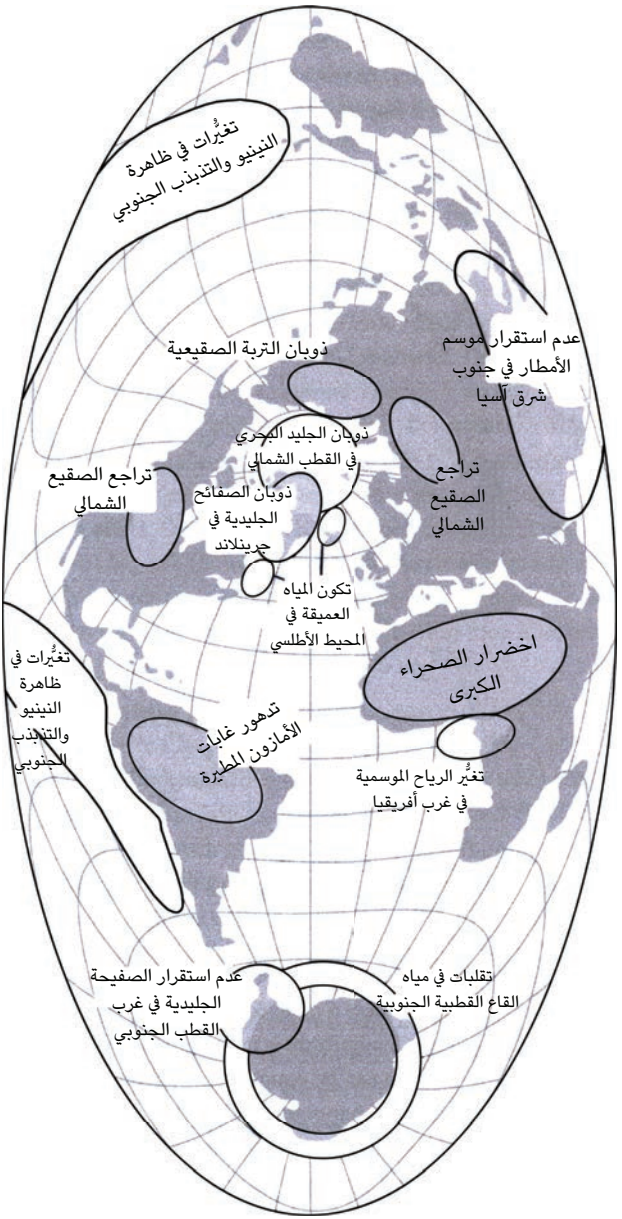
الفصل السادس

مفاجآت المناخ

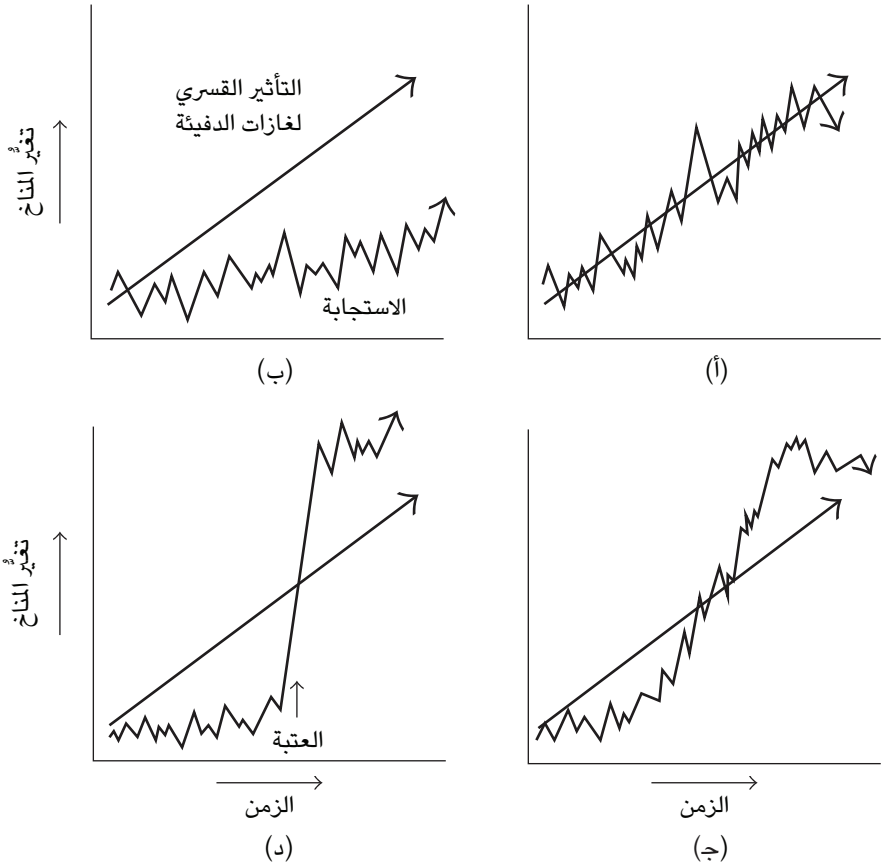
نحن نغيِّر بنية الغلاف الجوي على نحوٍ يتجاوز أي شيء شهدته الأرض على مدار الثلاثة ملايين سنة الماضية. وبذلك فإننا نتجه إلى منطقة مجهولة، ومن ثَم قد تمتد الشكوك العلمية إلى آفاقٍ واسعة. ندرك من واقع دراستنا للسجلات الماضية أن النظام المناخي يمكن أن يتحول إلى حالة جديدة بسرعة كبيرة بمجرد تجاوز عتبةٍ معينة. على سبيل المثال، تشير سجلات العينات الجليدية إلى أن نصف الاحترار الذي شهدته جرينلاند في نهاية العصر الجليدي الأخير لم يحدث إلا في بضعة عقود فقط. يستكشف هذا الفصل إمكانية وجود عتبات أو نقاط تحول في النظام المناخي قد تحدث مع استمرارنا في رفع درجة حرارة الكوكب. يوضح الشكل ٦-١ نقاط التحول الرئيسية التي أثارت قلق العلماء على مدار العقود الثلاثة الماضية. ويناقش كذلك الذوبان النهائي للغطاء الجليدي في جرينلاند وغرب القارة القطبية الجنوبية أو أحدهما، وتباطؤ دوران المحيط العميق في شمال الأطلسي، والانبعاث الهائل لغاز الميثان الناتج عن ذوبان هيدرات الغاز، والتدهور التدريجي لغابات الأمازون المطيرة.

العتبات ونقاط التحول

إن العلاقة بين عامل القسر المناخي، مثل غازات الدفيئة، واستجابة المناخ هي علاقة معقدة. في عالمٍ مثالي، كانت ستصبح هذه العلاقة بسيطة مع وجود تأخير في الاستجابة ضئيل أو معدوم، لكننا نعلم أن ثمة قصورًا ذاتيًّا داخل النظام المناخي بحيث تظهر الاستجابة لعامل القسر المناخي بين ١٠ أعوام إلى٢٠ حسب حجم الانبعاثات. لذلك، يمكننا



شكل ٦-١: نقاط التحول في النظام المناخي.



شكل ٦-٢: تأثير غازات الدفيئة واستجابة النظام المناخي.

دراسة كيفية استجابة عناصر مختلفة من النظام المناخي لتغيُّر المناخ من خلال أربعة سيناريوهات (انظر الشكل ٦-٢):

(أ) استجابة خطية لكنها متأخرة (الشكل ٦-٢أ). في هذه الحالة، يستجيب النظام المناخي لزيادة غازات الدفيئة استجابةً متأخرة لكنها مباشرة، حيث يتناسب حجم الاستجابة مع عامل القسر الإضافي. يمكن مقارنة هذا السيناريو بدفع سيارة على طريق مستوٍ. في البداية لا يحدث شيء؛ إذ يجب التغلب على الاحتكاك قبل أن تبدأ السيارة في

التحرك. بمجرد حدوث ذلك، يُستخدم معظم الطاقة الموظَّفة في الدفع لتحريك السيارة إلى الأمام. مثال على هذا هو ارتفاع حرارة المحيطات الذي يتأخر حدوثه نتيجة القصور الذاتي الحراري لمثل هذه المسطحات المائية الضخمة.

(ب) استجابة خفيفة أو محدودة (الشكل ٦-٢ب). في هذه الحالة، قد يكون تأثير غازات الدفيئة قويًّا، ويكون الجزء المعني من النظام المناخي محميًّا بطريقة ما، فتصبح الاستجابة ضئيلة جدًّا. يمكن تشبيه ذلك بمحاولة دفع سيارة إلى أعلى تل: بغض النظر عن مقدار الطاقة التي تبذلها في محاولة دفع السيارة، فإنها لن تتحرك كثيرًا. مثال على ذلك الصفيحة الجليدية في شرق المنطقة القطبية الجنوبية التي ظلت مستقرة في ظل درجات حرارة كانت أعلى بكثير من درجات الحرارة الحالية.

(ج) استجابة متأخرة وغير خطية (انظر الشكل ٦-٢ج). في هذه الحالة، يُظهِر النظام المناخي استجابة أولية بطيئة تجاه التأثيرات الناجمة عن غازات الدفيئة، لكن استجابته بعد ذلك تصبح غير خطية. وهذا احتمال وارد ما لم ندرك مدى قدرة النظام المناخي على مفاقمة التغيُّرات. يمكن تشبيه هذا السيناريو بسيارة قريبة من قمة تل: إذ يتطلب دفع السيارة إلى قمة التل بعض الجهد؛ ومن ثَم بعض الوقت؛ وهذا ما يُسمَّى بتأثير المقاومة. بمجرد وصول السيارة إلى القمة، يتطلب دفعها لأسفل جهدًا بسيطًا؛ ومن ثَم تبدأ في النزول سريعًا من التل سواء بمساعدة أو من دونها. وفي حال وصولها إلى السفح، تستمر السيارة في الحركة بعض الوقت — وهو ما يُعرف بتجاوز الاستجابة — ثم تتباطأ من تلقاء نفسها وتستقر في حالة جديدة.

(د) الاستجابة العتبية (انظر الشكل ٦-٢د) في هذه الحالة، تكون الاستجابة في البداية ضئيلة جدًّا في ذلك الجزء من النظام المناخي تجاه قسر غازات الدفيئة. ومع ذلك، عند الوصول إلى عتبة معينة، تحدث كل الاستجابات خلال فترة زمنية قصيرة جدًّا، وفي خطوة واحدة كبيرة. في العديد من الحالات، قد تكون الاستجابة أكبر بكثير مما يمكن توقعه من حجم القسر، ويمكن الإشارة إلى هذا بمصطلح «تجاوز الاستجابة». هذا السيناريو يشبه مشهدًا في نهاية الفيلم الأصلي «المهمة الإيطالية» (ذا إيتاليان جوب)، حيث كانت الحافلة معلقة على حافة الجرف: ما دامت التغييرات ضئيلة للغاية، فلن يحدث شيء على الإطلاق. لكن عند الوصول إلى نقطةٍ حرجة (يمثلها الوزن في هذه الحالة)، تهوي الحافلة (وسبائك الذهب المسروقة) من الجرف إلى وادٍ ضيق أدناه. المثال الذي ينطبق على هذا المشهد قد يكون الصفائح الجليدية في جرينلاند التي بدأت في الذوبان؛ فقد يتسارع ذوبانها فجأة، مما يسبب انهيارًا كارثيًّا.

في حالات أيضًا تصبح فيها العتبة نقطة تحوُّل. يمكنك التفكير في العتبة باعتبارها نقطة يحدث عندها تغيير في النظام يمكن تداركه. لكن نقطة التحول هي عتبة عند تجاوزها، ينتقل النظام إلى حالة لا رجعة فيها. إحدى التعقيدات الإضافية عند تقييم ما إذا كان تغيُّر المناخ سيتسبَّب في عتبة بسيطة أو نقطة تحول هي تفرعات داخل النظام المناخي. هذا يعني أن القوة المطلوبة لدفع النظام المناخي في اتجاهٍ واحد متجاوزًا العتبة يختلف عن قوة الدفع المطلوبة للرجوع عنه. هذا يعني أنه بمجرد تجاوز عتبة المناخ، يصبح من الصعب كثيرًا دفعه في الاتجاه المعاكس، وفي بعض الحالات قد يكون في الواقع غير قابل للرجوع عنه.

يشيع استخدام مصطلح «نقاط التحول» في مناقشات وأبحاث تغيُّر المناخ. لكن يجب التأني عند استخدامه نظرًا لوجود استخدامين له. أولهما، الإشارة إلى نقاط تحول المناخ، وهي تحولات واسعة النطاق في نظام المناخ لا رجعة فيها، مثل ذوبان الجليد الذي لا رجعة فيه أو إطلاق كميات ضخمة من غاز الميثان من قاع المحيطات. أما الاستخدام الآخر فيتعلق بنقاط التحول المجتمعية التي تحدث عندما يؤثر تغيُّر المناخ تأثيرًا كبيرًا في منطقة أو بلدٍ ما. على سبيل المثال، يُعَد الانزياح الشمالي لحزام الأمطار الموسمية في جنوب شرق آسيا مسافة ٢٠٠ ميل (٣٢٢ كيلومترًا تقريبًا) تحولًا طفيفًا من الناحية المناخية، وليس نقطة تحول مناخية جذرية. لكن بالنسبة إلى الدول التي لم تعد تهطل فيها الأمطار، أو تلك التي تهطل فيها لأول مرة، فإن مثل هذا الانزياح يُشكل نقطة تحول مناخية كبرى؛ لأن طقسها قد تغيَّر إلى الأبد.

ذوبان الصفائح الجليدية

إن توقعات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ بشأن ارتفاع مستوى سطح البحر بحلول عام ٢١٠٠ — في حالة عدم فرض قيود كبيرة على انبعاثات الكربون — تتراوح بين ٠٫٥٠ متر و١٫٣ متر. وأكبر مصدر لعدم اليقين في هذه التقديرات هو مدى مساهمة ذوبان الصفائح الجليدية في جرينلاند والمنطقة القطبية الجنوبية بحلول نهاية القرن. يُقدَّر حاليًّا أن جرينلاند تفقد أكثر من ٢٣٠ جيجا طن من الجليد سنويًّا، أي بزيادة تعادل سبعة أضعاف عما كانت عليه منذ مطلع تسعينيات القرن العشرين. أما المنطقة القطبية الجنوبية، فإنها تفقد نحو ١٥٠ جيجا طن سنويًّا، أي زيادة خمسة أضعاف خلال الفترة ذاتها. ويأتي معظم هذا الفقد من منطقتَي شبه الجزيرة الشمالية للقطب

الجنوبي وقطاع بحر أموندسن في غرب القطب الجنوبي. تُشكِّل جرينلاند والقطب الجنوبي معًا إحدى المفاجآت المناخية المحتملة الأكثر إثارةً للقلق. إذا ذابت الصفائح الجليدية الكبيرة هناك بالكامل، فإن إسهامها في ارتفاع مستوى سطح البحر عالميًّا سيكون على النحو الآتي: قرابة ٧ أمتار من جرينلاند، وقرابة ٨,٥ أمتار من الصفائح الجليدية في غرب القطب الجنوبي، ونحو ٦٥ مترًا من الصفائح الجليدية في شرق القطب الجنوبي. هذا بالمقارنة مع ٠,٣ متر فحسب إذا ذابت كل الأنهار الجليدية الجبلية. تُظهر بيانات المناخ القديم أن الصفائح الجليدية الضخمة في شرق القطب الجنوبي قد تشكَّلت قبل ٣٥ مليون سنة بسبب العزل التكتوني التدريجي للقطب الجنوبي، وأنها قد ظلت مستقرة بالفعل في مناخات أكثر دفئًا بكثير. لذلك، لدى علماء المناخ درجة عالية جدًّا من الثقة في أن الصفائح الجليدية في شرق القطب الجنوبي ستبقى مستقرة خلال هذا القرن.

يساور العلماءَ قلقٌ كبير من تسارع ذوبان الجليد في جرينلاند أو غرب القطب الجنوبي بوتيرة سريعة خلال الـ ١٠٠ سنة القادمة. حتى لو كانت كل هذه الصفائح الجليدية قد بدأت مرحلة الذوبان، فهناك قيد فيزيائي على السرعة التي يذوب بها الجليد. يُعزى ذلك إلى الوقت الذي تستغرقه الحرارة حتى تتغلغل إلى الصفائح الجليدية. تخيل أنك تُسقِط مكعب الثلج في كوب من القهوة الساخنة. أنت تعلم أنه سيذوب بالكامل، لكن الحرارة تستغرق وقتًا حتى تتغلغل إلى وسط مكعب الثلج. يتدفق معظم الجليد من الصفائح الجليدية عبر تيارات جليدية للوصول إلى البحر، وهناك حد لكمية الجليد التي يمكن لهذه التيارات أن تنقلها. وفقًا لأسوأ السيناريوهات التي يطرحها علماء بارزون في علم الجليد، فإن هذه الصفائح الجليدية قد تساهم في رفع مستوى سطح البحر بما يتراوح بين متر واحد و١,٥ متر بحلول نهاية هذا القرن، مما يُهدد سكان العديد من المناطق الساحلية حول العالم. هناك كذلك جدل علمي حول مصير الصفائح الجليدية في جرينلاند والقطب الجنوبي خلال الـ ١٠٠ عام القادمة. حتى لو لم يحدث ذوبان كبير خلال هذا القرن، فإننا نكون قد بدأنا الطريق نحو ذوبان لا رجعة فيه خلال القرن التالي. إن انبعاثات الكربون التي نُطلقها خلال العقود القليلة القادمة قد تحدد المستقبل البعيد للصفائح الجليدية ومصادر رزق مليارات الأشخاص الذين يعيشون بالقرب من السواحل.

دوران المحيط العميق

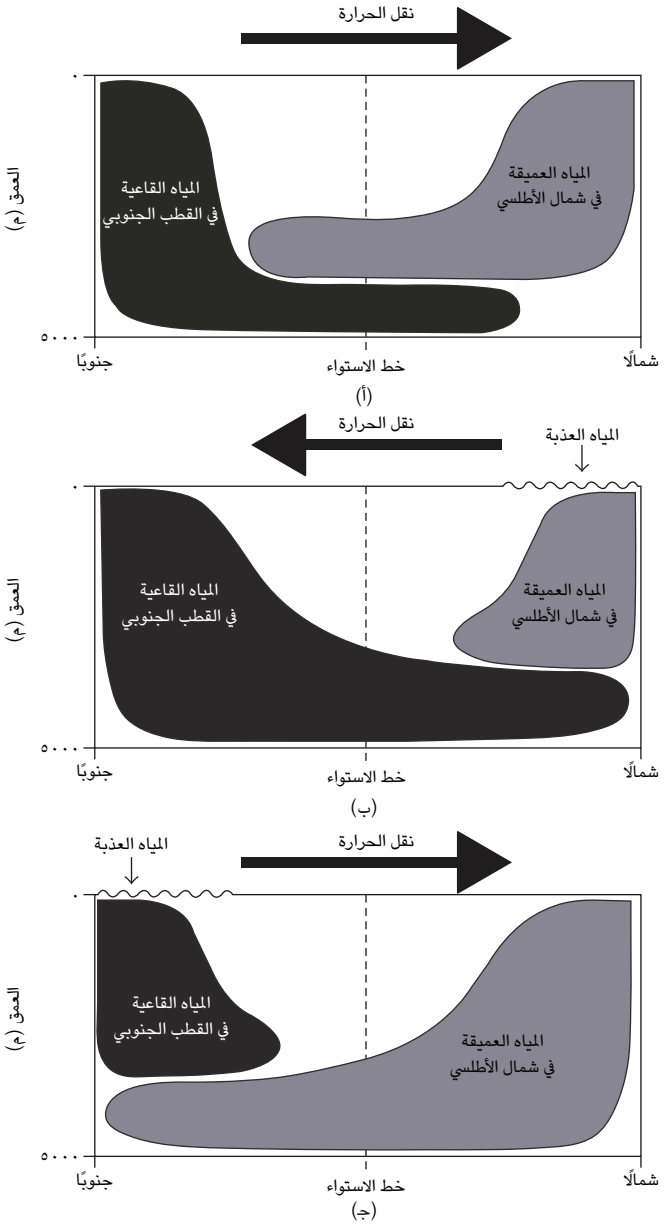
يُعَد دوران المحيط أحد العوامل الرئيسية التي تتحكم في مناخ كوكبنا. في الواقع، إن المحيط العميق هو وحده المؤهل لتحفيز واستدامة التغيُّرات المناخية الداخلية الطويلة الأجل (من مئات إلى آلاف السنين)؛ وذلك لِكِبَر حجمه، وقدرته على اختزان الحرارة، وقصوره الذاتي. في شمال المحيط الأطلسي، يحمل تيار الخليج المتجه نحو الشمال الشرقي، مياهًا سطحية دافئة ومالحة من خليج المكسيك وصولًا إلى البحار النوردية. تزداد ملوحة تيار الخليج بسبب كمية التبخر الهائلة التي تحدث في منطقة البحر الكاريبي، مما يؤدي إلى إزالة الرطوبة من المياه السطحية وتركيز الأملاح في مياه البحر. بينما يتدفق تيار الخليج شمالًا، يبرد تدريجيًّا. ويؤدي الجمع بين ارتفاع نسبة الملوحة والانخفاض التدريجي في درجة الحرارة إلى زيادة كثافة المياه السطحية. ومن ثَم، عندما تصل المياه إلى المحيطات ذات الملوحة المنخفضة نسبيًّا شمال آيسلندا، تكون المياه السطحية قد بردت بدرجة كافية لتصبح كثيفة بما يكفي لتغوص في أعماق المحيط. فيساعد «السحب» الناتج عن غوص هذه الكتلة المائية الكثيفة في الحفاظ على قوة تيار الخليج الدافئ، مما يضمن استمرار تدفق تيار المياه الاستوائية الدافئة إلى شمال شرق المحيط الأطلسي، مُرسلًا كتلًا هوائية معتدلة عبر القارة الأوروبية. ووفقًا للحسابات، فإن تيار الخليج يوفر طاقة تعادل ٢٧ ألف ضعف الطاقة التي تولدها كل محطات الطاقة في بريطانيا مجتمعة. وإن كنت في شك من مدى فائدة تيار الخليج للمناخ الأوروبي، يمكنك المقارنة بين فصل الشتاء في المناطق الواقعة على دائرة العرض نفسها لكنها على جانبَي المحيط الأطلسي؛ مثلًا قارنْ لندن بمنطقة لابرادور، أو لشبونة بمدينة نيويورك. أو الأفضل من ذلك هو المقارنة بين غرب أوروبا والساحل الغربي لأمريكا الشمالية، حيث توجد علاقة جغرافية مشابهة بين المحيط والقارة؛ فكِّر في ألاسكا واسكتلندا الواقعتين على نفس دائرة العرض تقريبًا.

تصل المياه العميقة التي تكوَّنت حديثًا إلى عمق يتراوح بين ٢٠٠٠ متر و٣٥٠٠ متر في المحيط، ثم تتدفق جنوبًا عبر المحيط الأطلسي، وهو ما يُعرَف باسم «المياه العميقة في شمال المحيط الأطلسي». وفي جنوب المحيط الأطلسي، تلتقي المياه العميقة لشمال المحيط الأطلسي بنوع آخر من المياه العميقة التي تكونت في المحيط الجنوبي، وتُعرَف باسم «مياه القاع القطبية الجنوبية». لكن هذا النوع من المياه يتشكل بطريقة مختلفة عن تلك التي تشكَّلت بها المياه العميقة في شمال الأطلسي. يحاط القطب الجنوبي بالجليد البحري، وتتكون المياه العميقة في المناطق الساحلية الخالية من الجليد أو في الفجوات الكبيرة في

الجليد البحري. تدفع الرياح القطبية الجنوبية الجليدَ البحري بعيدًا عن الحافة القارية، مما يؤدي إلى تكوُّن تلك الفجوات. وتتميز هذه الرياح ببرودتها الشديدة إلى درجة أنها تبرِّد المياه السطحية المكشوفة إلى ما دون درجة التجمد. وهذا بدوره يؤدي إلى تكوُّن المزيد من الجليد البحري وطرد الأملاح، فينتج عن ذلك تكون المياه الأشد برودة وملوحة في العالم. تتدفق مياه القاع القطبية الجنوبية حول القطب الجنوبي، وتخترق شمال الأطلسي حيث تتدفق من أسفل المياه العميقة في شمال الأطلسي الأكثر دفئًا، ومن ثَم الأقل كثافةً نسبيًّا (انظر الشكل ٦-٣أ). وكذلك تتدفق مياه القاع القطبية الجنوبية إلى كلٍّ من المحيطين الهندي والهادي.

هذا التوازن بين المياه العميقة في شمال الأطلسي ومياه القاع القطبية الجنوبية له دور بالغ الأهمية في الحفاظ على مناخنا الحالي، حيث لا يكتفي بالحفاظ على تدفق تيار الخليج عبر أوروبا، إنما يحافظ أيضًا على التوازن المناسب بين تبادل الحرارة في النصفين الشمالي والجنوبي. أظهر العلماء أن دوران المياه العميقة يمكن أن يضعف أو «يتوقف» لو تدفق ما يكفي من المياه العذبة لجعل المياه السطحية خفيفة للغاية بحيث لا تغوص. استُمدت هذه الأدلة من كلٍّ من النماذج الحاسوبية ودراسة المناخات في السابق. وعلى إثر ذلك، صاغ العلماء مصطلح «تقليص الكثافة» ليعني إزالة الكثافة عن طريق إضافة المياه العذبة وتسخين الماء، أو إحداهما، مما يمنع مياه البحر أن تكون كثيفة بما يكفي لتغوص. كما رأينا، هناك مخاوف بالفعل من أن يتسبب الاحترار العالمي في ذوبان كبير للصفائح الجليدية القطبية. وهذا سيؤدي إلى تدفق المزيد من المياه العذبة إلى المحيطات القطبية. لذلك قد يؤدي تغيُّر المناخ إلى تراجع المياه العميقة في شمال الأطلسي وضعف تيار الخليج الدافئ (انظر الشكل ٦-٣ب). هذا سيتسبَّب في شتاء أوروبي أكثر برودة وأحوال جوية أكثر تطرفًا. لكن يُلاحظ تأثير تيار الخليج الدافئ بشكل رئيسي في الشتاء ومحدودية تأثيره في درجات حرارة الصيف. لذا، إذا توقف تيار الخليج، فإن الاحترار العالمي سيظل سببًا في ارتفاع درجات حرارة الصيف في أوروبا. وسينتهي الحال في أوروبا بمناخ موسمي متطرف، مشابه جدًّا لمثيله في ألاسكا.

السيناريو المعاكس هو أنه إذا بدأ ذوبان الصفائح الجليدية في القطب الجنوبي بشكل كبير قبل جليد جرينلاند والمنطقة القطبية الشمالية، فقد تصبح العواقب مختلفة تمامًا. إذا تدفقت كمية كافية من مياه الجليد الذائب إلى المحيط الجنوبي، فسيتراجع تدفق المياه العميقة في المحيط الجنوبي تراجعًا كبيرًا. بما أن النظام المائي العميق هو توازن



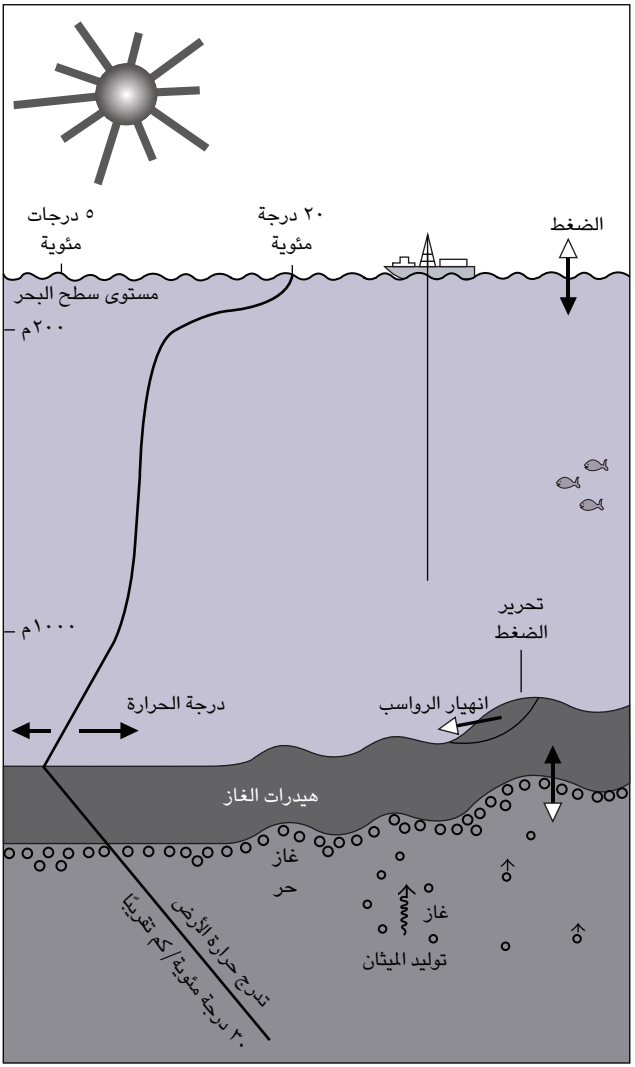
شكل ٦-٣: التغيُّر في دوران المحيط العميق بناءً على تدفقات المياه العذبة.

بين المياه العميقة في شمال الأطلسي ومياه القاع القطبية الجنوبية، فإنه إذا انخفض تدفُّق مياه القاع في القطب الجنوبي، فستزداد المياه العميقة في شمال الأطلسي وتتمدد (الشكل ٦-٣ج). تكمن المشكلة في أن المياه العميقة في شمال الأطلسي أكثر دفئًا من مياه القاع في المحيط الجنوبي، وحيث إنه إذا قمت بتسخين سائل فإنه يتمدد، ستشغل المياه العميقة في شمال الأطلسي مساحة أكبر. لذا فإن أي زيادة في المياه العميقة في شمال الأطلسي قد تعني ارتفاعًا في مستوى سطح البحر. وقد أشارت نماذج حاسوبية — صمَّمتُها بالتعاون مع دان سيدوف (الذي يعمل الآن في الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي) — أن مثل هذا السيناريو سيؤدي إلى زيادة في مستوى سطح البحر تتجاوز المتر.

لقد مر أكثر من ٣٠ عامًا منذ أن طُرِح احتمال حدوث توقف كارثي لدوران المحيط العميق؛ ولهذا بُذِلت جهود هائلة في هذا الصدد. أظهرت عمليات المراقبة ضعف تيار الخليج بنسبة ١٥٪ منذ منتصف القرن العشرين. كما تشير الأدلة المجمعة من مراقبة المحيطات وتوقعات النماذج المناخية المستقبلية في أحدث تقرير للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، إلى أن توقف تيار الخليج يُعَد أمرًا مستبعدًا تمامًا في القرن الحادي والعشرين. كما تظهر النماذج ضعفًا كبيرًا في انقلاب دوران المحيط الأطلسي الشمالي في هذا القرن، لا سيما في سيناريوهات الانبعاثات المرتفعة، وتكمن المشكلة في جهلنا بنقطة التحول المحتملة التي قد تؤدي إلى توقف دوران المحيط العميق. علاوة على ذلك، إذا تسارع ذوبان جرينلاند أو غرب القطب الجنوبي، فسوف تتدفق كميات هائلة من المياه العذبة إلى المحيطات، مما يسبب اضطرابًا كبيرًا في دوران المحيط العميق.

هيدرات الغاز

يُخزَّن تحت محيطات العالم والتربة الصقيعية كمية كبيرة من الكربون في شكل غاز الميثان. يُحتجز هذا الغاز داخل قفصٍ صلب من جزيئات الماء في درجات حرارة منخفضة وضغط مرتفع أو إحداهما. يُنتَج غاز الميثان من تحلل المواد العضوية في أعماق رواسب المحيطات وفي التربة تحت التربة الصقيعية (انظر الشكل ٦-٤). قد تشهد خزانات هيدرات الغاز حالة غير مستقرة؛ إذ إن ارتفاع درجة الحرارة أو انخفاض الضغط قد يؤدي إلى زعزعة استقرارها وإطلاق غاز الميثان المحتجز. ويؤدي تغيُّر المناخ إلى ارتفاع درجة حرارة كلٍّ من المحيطات والتربة الصقيعية، مما يهدد استقرار هيدرات الغاز. يُعَد غاز الميثان أحد غازات الدفيئة القوية إلى درجة أن قوتها تعادل ٢١ ضعف قوة ثاني أكسيد الكربون



شكل ٦-٤: هيدرات الغاز في بيئة بحرية.

(انظر الجدول ٣-١). إذا أطلقت كمية كافية من غاز الميثان، فإنه سيؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة العالمية، مما يترتب على ذلك إطلاق المزيد من هيدرات الغاز وتسارع التأثير الناتج. ليس لدى العلماء فكرة واضحة عن كمية الميثان المخزنة في هيدرات الغاز تحت أقدامنا: لكن تتراوح التقديرات بين ١٠٠٠ جيجا طن و١٠ آلاف (مقارنة بنحو ٨٠٠ جيجا طن من الكربون الموجودة حاليًّا في الغلاف الجوي)، وهو ما يُعَد نطاقًا هائلًا. سيصبح من الصعب جدًّا تقييم الخطر الذي تفرضه هيدرات الغاز في ظل غياب تقديرات أكثر دقة.

إن السبب وراء قلق العلماء الشديد بشأن هذه القضية هو وجود أدلة تشير إلى حدوث تأثير مفرط لظاهرة الدفيئة قبل ٥٥ مليون سنة، خلال ما يُعرف بالحد الأقصى للحرارة في العصر الباليوسيني-الإيوسيني. خلال هذه الظاهرة الحرارية، يعتقد العلماء أنه أُطلق نحو ١٥٠٠ جيجا طن من هيدرات الغاز. وقد أدى هذا الضخ الهائل لغاز الميثان في الغلاف الجوي إلى تسارع ظاهرة الاحتباس الحراري الطبيعي، مما ترتب عليه ارتفاع إضافي في درجة الحرارة بمقدار ٥ درجات مئوية. لكن لا يزال هناك جدل كبير حول الحد الأقصى للحرارة في العصر الباليوسيني-الإيوسيني. على سبيل المثال، هل كان إطلاق غاز الميثان من هيدرات الغاز هو السبب الرئيسي للاحترار، أم إطلاق ثاني أكسيد الكربون الناتج عن مرحلة من النشاط البركاني الهائل الذي حدث في الفترة نفسها تقريبًا؟

تُجمِع الآراء الحالية على أن احتياطيات الهيدرات الغازية في المحيط ستظل على الأرجح مستقرة في هذا القرن. تشكل الهيدرات الغازية طبقة صلبة في قاع المحيط. ويتحكم في عمق هذه الطبقة تدرُّجُ الحرارة الأرضية، فكلما وصلت لنقطة أعمق في الرواسب البحرية، ارتفعت الحرارة بمعدل نحو ٣٠ درجة مئوية/كم. وعند عمقٍ معين، تصبح الحرارة مرتفعة للغاية بحيث لا يمكن لهيدرات الغاز أن تبقى، فيتجمع غاز الميثان هناك كغازٍ حر في الرواسب. مع تغيُّر درجات حرارة المحيط، يجب أن تنتقل التغيُّرات الحرارية عبر طبقة الهيدرات الغازية الصلبة إلى الطبقة السفلية حتى يذوب جزء منها. إذا كانت هذه العملية بطيئة بما يكفي، فإن الغاز المحرر ينتقل لأعلى في عمود رواسب المحيط، ويتجمد مرة أخرى عند مستوًى أعلى. ومع ذلك، إذا لم يوضع حد لانبعاثات الكربون، فقد نشهد تسارعًا في هذه العملية بحلول القرن القادم، مما يؤدي إلى إطلاق جزء من غاز الميثان المخزَّن في أعماق المحيطات.

من الواضح أن هيدرات الغاز الموجودة أسفل ما كان يُعرف سابقًا بالتربة الصقيعية تذوب بالفعل، حيث رُصِدت فقاعات غازية في العديد من البحيرات الكندية والسيبيرية.

مع ارتفاع درجات الحرارة في القطب الشمالي، سترتفع درجات الحرارة بمقدار ضعف المتوسط العالمي في المناطق القطبية الشمالية، مما سيُعجِّل من ذوبان هيدرات الغاز. ومع ذلك، لا يزال لدينا نقص في المعلومات حول كمية غاز الميثان المخزنة تحت مناطق التربة الصقيعية في العالم. لذلك، في الوقت الحالي، تشير أفضل التقديرات لدينا إلى أن الاحترار العالمي بمقدار ٣ درجات مئوية قد يؤدي إلى إطلاق ما بين ٣٥ جيجا طن و٩٤٠ من الكربون، مما قد يضيف إلى درجات الحرارة العالمية بين ٠,٠٢ إلى ٠,٥ درجة مئوية.

تدهور الأمازون

في عام ١٥٤٢، قاد فرانسيسكو دي أوريانا أول رحلة بحرية أوروبية إلى نهر الأمازون. في أثناء هذه الرحلة الجريئة، واجهت البعثة مقاومة كبيرة من الهنود المحليين؛ حيث كانت نساء إحدى القبائل محاربات شرسات لدرجة أنهن كن يدفعن المحاربين الذكور أمامهن بالرماح. وهكذا سُمي النهر تيمنًا بالمحاربات الشهيرات في الأساطير اليونانية اللاتي عُرِفن بالأمازونيات. وهذا يجعل فرانسيسكو دي أوريانا واحدًا من المستكشفين الأقل حظًّا في ذلك العصر؛ لأنه في الظروف العادية كان من المفترض أن يُسمى النهر باسمه. يصب نهر الأمازون نحو ٢٠٪ من إجمالي المياه العذبة التي تصل إلى المحيطات. ويُعَد حوض الأمازون هو أكبر حوض تصريف في العالم؛ إذ يغطي مساحة تبلغ ٧٠٥٠٠٠٠ كيلومتر مربع؛ أي ما يعادل تقريبًا مساحة أوروبا. نهر الأمازون هو نتاج الرياح الموسمية التي تضرب الأمازون، وتجلب معها كل صيف أمطارًا غزيرة. وهذا بدوره يُنتج الامتداد المذهل من الغابات المطيرة التي تدعم أعلى تنوع بيولوجي وأكبر عدد من الأنواع في أي منطقة في العالم.

تُعَد غابات الأمازون المطيرة مهمَّةً في سياق تغيُّر المناخ؛ لأنها مخزن طبيعي هائل للكربون. في الأصل، كان يُعتقد أن الغابات المطيرة المستقرة مثل الأمازون قد وصلت إلى مرحلة النضج البيئي. لكن الدراسات التفصيلية التي أجريت على كل الغابات المطيرة في العالم على مدى العقود الأربعة الماضية أظهرت أن هذا الاعتقاد غير صحيح. في تسعينيات القرن العشرين، ساهمت الغابات الاستوائية السليمة — تلك التي لم تتأثر بالقطع أو الحرائق — في امتصاص نحو ٤٦ مليار طن من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. لكن المفاجأة هي تراجع هذا الامتصاص إلى ما يقدر بنحو ٢٥ مليار طن في العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين. يبلغ الفرق في القدرة على الامتصاص ٢١ مليار طن من

ثاني أكسيد الكربون، هو ما يعادل انبعاثات الوقود الأحفوري لعقدٍ كامل في المملكة المتحدة وألمانيا وفرنسا وكندا مجتمعة. عكفت على جمع كل هذه البيانات شبكةُ مرصد الغابات المطيرة الأفريقية وشبكة جرد غابات الأمازون المطيرة. وجرى تتبع أكثر من ٣٠٠ ألف شجرة، بالإضافة إلى قياس ما يزيد على مليون قطر شجرة في ١٧ دولة، ثم تولت جامعة ليدز (عبر مؤسسة forestplots.net المعنية بأبحاث الأشجار وتتبعها) إدارة هذه البيانات وتوحيدها.

انطلقت بوادر القلق بشأن احتمالية تدهور غابات الأمازون المطيرة من دراسة رائدة نشرَها عام ٢٠٠٠ زملاءُ في مركز هادلي التابع لمكتب الأرصاد الجوية في المملكة المتحدة. كان نموذجهم المناخي هو الأول من نوعه الذي يُدرِج التأثير التفاعلي بين الغطاء النباتي والمناخ، ويشير إلى أن الاحترار العالمي بحلول عام ٢٠٥٠ قد يُطيل موسم الجفاف الشتوي في منطقة الأمازون. ولكي تبقى غابات الأمازون المطيرة على قيد الحياة، فإن احتياجها لا يقتصر على كمية كبيرة من الأمطار خلال الموسم الرطب، لكنها تحتاج أيضًا إلى موسم جفاف قصير نسبيًّا حتى لا تجف. وفقًا لنموذج مركز هادلي، يمكن أن يتسبب تغيُّر المناخ في تحول المناخ العالمي نحو حالة أشبه بظاهرة النينيو، بالإضافة إلى تعرض أمريكا الجنوبية إلى موسم جفاف أطول بكثير. يستخدم كيم ستانلي روبنسون، في روايته «أربعون علامة للمطر»، مصطلح «هايبرنينو» للإشارة إلى الحالة المناخية الجديدة. لا يمكن لغابات الأمازون المطيرة الصمود أمام هذا الفصل الجاف الذي سيمتد فترةً أطول، وسيحل محلها السافانا (المراعي العشبية الجافة) التي يمكن العثور عليها حاليًّا إلى الشرق والجنوب من حوض الأمازون. والسبب في هذا الإحلال هو أن فترات الجفاف الممتدة ستؤدي إلى حرائق الغابات التي تدمر أجزاءً كبيرة من الغابات المطيرة. وهذا بالضبط ما شوهد خلال موجتَي الجفاف الشديدتين اللتين ضربتا الأمازون في عامَي ٢٠٠٥ و٢٠١٠. كما أن حرائق الغابات تعيد الكربون المخزن في الغابات المطيرة إلى الغلاف الجوي، مما يُسرع من وتيرة تغيُّر المناخ. بعد ذلك، ستسيطر السافانا على تلك المناطق المحروقة؛ لأنها متكيفة مع موسم الجفاف الطويل، لكن إمكانية تخزين الكربون في السافانا لكل كيلومتر مربع أقل بكثير مقارنة بالغابات المطيرة.

تُعَد نمذجة استجابة غابات الأمازون لتغيُّر المناخ أمرًا معقدًا بسبب وجود تأثيرات تفاعلية إيجابية وسلبية. على سبيل المثال، تؤدي المستويات المرتفعة من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى إضفاء تأثير «التسميد الكربوني» على النباتات والأشجار،

مما يعزز عملية التمثيل الضوئي والنمو. كما تجعل النباتات أكثر كفاءة في استخدام المياه؛ ومن ثَم أكثر تحملًا للجفاف؛ مما يعوض بعض التأثيرات الناتجة عن موسم الجفاف الأطول المتوقع. لم تكشف النماذج المناخية الأخرى عن مثل هذا التدهور الحاد، كما أن المراجعة الحالية التي اضطلعت بها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ تشير إلى استبعاد استمرار تدهور غابات الأمازون المطيرة خلال هذا القرن إذا بقيت غابات الأمازون على حالها. والإشكالية الكبرى تكمن في الجزئية الأخيرة؛ إذ شهدت معدلات إزالة الغابات في ظل قيادة الرئيس البرازيلي جايير بولسونارو ارتفاعًا، مصحوبةً بزيادة في حرائق الغابات التي اندلعت في مناطق كثيرة لم تكن تعاني منها سابقًا؛ وهذا يشير إلى أن الكثير منها أُشعِل عمدًا. إن إزالة وقطع غابات الأمازون والغابات الأخرى المطيرة حول العالم سيجعلها أكثر هشاشة أمام تغيُّر المناخ، مما يزيد بشدة من احتمالية تعرُّضها لتدهور كارثي.

لقد أثر تغيُّر المناخ الناجم عن الأنشطة البشرية بالفعل في كوكبنا، وقد يكون له تأثير جذري أكبر خلال الـ ٨٠ عامًا القادمة. بالإضافة إلى ذلك، يعرب العلماء باستمرار عن مخاوفهم من المفاجآت المحتملة في النظام المناخي العالمي التي ربما تُسهم في تفاقم تغيُّر المناخ في المستقبل. وكما ذكرنا من قبل، تشمل هذه الاحتمالات بدء ذوبان جرينلاند و/أو القارة القطبية الجنوبية على نحو لا رجعة فيه؛ مما قد يؤدي إلى ارتفاع مستوى سطح البحر عدة أمتار خلال القرن القادم. كما قد يتغيَّر دوران المحيط العميق المعتمد على شمال المحيط الأطلسي، مما يؤدي إلى حدوث ظواهر طقس موسمية متطرفة في أوروبا. وقد تبدأ غابات الأمازون المطيرة في التدهور نتيجة التأثيرات المشتركة لإزالة الغابات وتغيُّر المناخ، مما يتسبَّب في فقدان قدر هائل من التنوع البيولوجي وزيادة انبعاثات الكربون إلى الغلاف الجوي، وعليه يتفاقم الاحترار العالمي. أخيرًا، هناك خطر إطلاق كميات إضافية من غاز الميثان المنبعث من هيدرات الغاز الموجودة تحت المحيطات والتربة الصقيعية، مما قد يُعجِّل من وتيرة تغيُّر المناخ. إحدى الطرق لضمان تجنب أسوأ آثار تغيُّر المناخ وتقليل احتمالية المفاجآت المناخية تتمثل في الحفاظ على تغيُّر المناخ عند أدنى مستوًى ممكن. يتطلع زعماء عالمنا إلى محاولة الحد من تغيُّر المناخ عند مستوًى يزيد بمقدار ١,٥ درجة مئوية فقط عن مستويات ما قبل الثورة الصناعية. في الفصل السابع، نستعرض كيف توصلوا إلى هذا القرار وكيف يأملون في تحقيقه.

الفصل السابع

سياسات تغيُّر المناخ

مقدمة

إن النهج الأكثر منطقية لمشكلة تغيُّر المناخ هو خفض انبعاثات غازات الدفيئة خفضًا كبيرًا. في اجتماع باريس للمناخ عام ٢٠١٥، اتفق قادة العالم على ضرورة الحفاظ على الزيادة في درجة الحرارة العالمية ما دون ٢ درجة مئوية، مع السعي إلى تحقيق الهدف المثالي، وهو ١,٥ درجة مئوية. على الرغم من هذا الاتفاق، استمرت انبعاثات الكربون العالمية في الارتفاع كل عام. وكان الاستثناء الوحيد هو عام ٢٠٢٠ عندما أدى الإغلاق العالمي على إثر جائحة كوفيد-١٩ إلى خفض الانبعاثات بنحو ٧٪. وكان لتوقف كل الرحلات الجوية وحركة السيارات حول العالم تأثيرٌ محدود في إجمالي التلوث بغازات الدفيئة. في الواقع، كانت انبعاثات الكربون العالمية في عام ٢٠٢٠ في ظل الجائحة مماثلة لتلك التي رُصدت في عام ٢٠٠٦. ويُعزى ذلك إلى محدودية التغيير في إنتاج الطاقة خلال الجائحة؛ لكن كانت هناك دعوات من قطاع الأعمال والمجتمع المدني حول العالم بأن يكون التعافي بعد الجائحة منخفض الكربون.

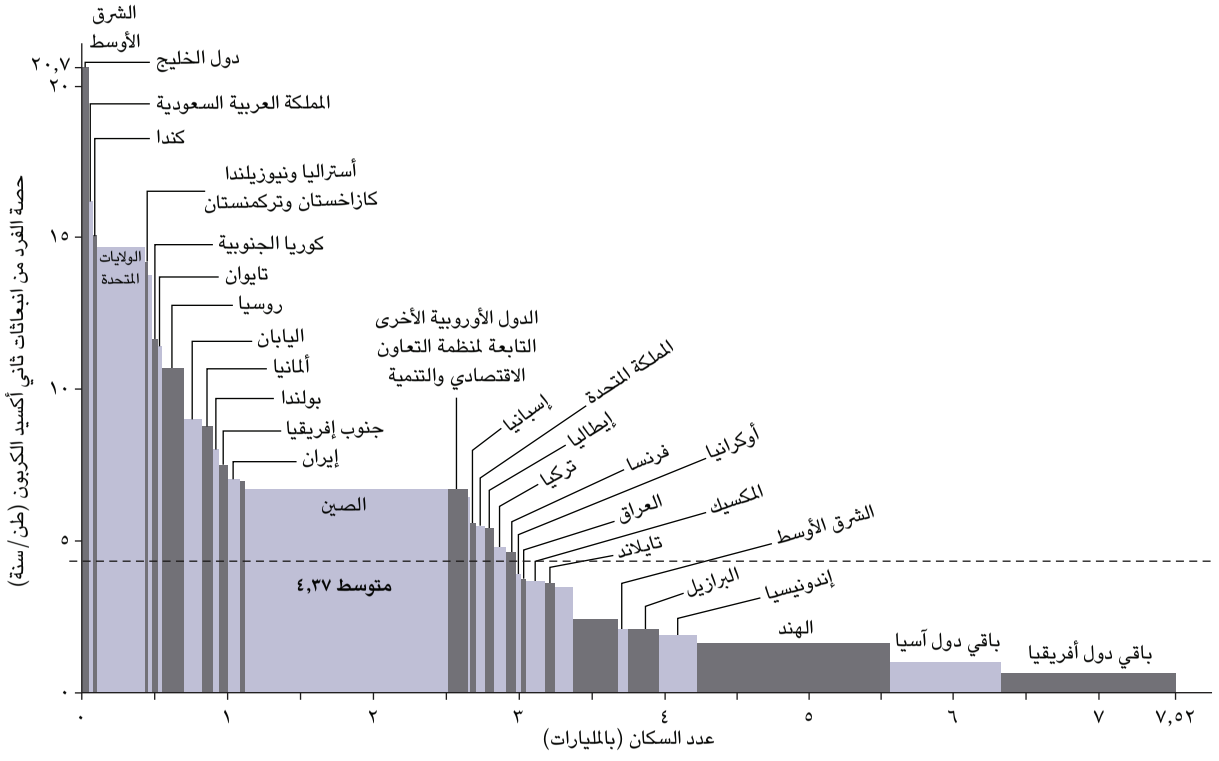
مفاوضات تغيُّر المناخ

تأسست اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ خلال قمة الأرض في ريو دي جانيرو عام ١٩٩٢ بهدف التفاوض على اتفاقية عالمية تسعى إلى تقليل انبعاثات غازات الدفيئة والحد من تأثير تغيُّر المناخ. دخلت الاتفاقية حيز التنفيذ رسميًّا في ٢١ مارس ١٩٩٤. وفي مارس ٢٠١٤، أصبحت تضم ١٩٦ طرفًا. تتضمن الاتفاقية عددًا من المبادئ الراسخة من بينها الاتفاق بالإجماع بين كل الأطراف، وتفاوت المسئوليات. والسبب في ذلك

المبدأ الأخير هو إقرار الاتفاقية بتفاوت انبعاثات غازات الدفيئة من دولة إلى أخرى، مما يستدعي تفاوت الجهود التي تبذلها للحد من انبعاثاتها (انظر شكل ٧-١). على سبيل المثال، في الولايات المتحدة، ينبعث من كل شخص في المتوسط ١٠ أضعاف كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة من شخص في الهند. ولتمثيل هذا التفاوت في إطار رسمي خلال المفاوضات، جرى الإقرار بمجموعتين مختلفتين من الأطراف: دول المرفق الأول التي تشمل كل الدول المتقدمة؛ والدول غير المدرجة في المرفق الأول، وتشمل الدول الأقل نموًا والدول التي تشهد تطورًا سريعًا. وفيما بعد، قُسِّم المرفق الأول عندما جادلت بعض الدول بأن اقتصاداتها في مرحلة انتقالية. ونتيجة لذلك، وُضعت الدول الأغنى في فئة إضافية وهي المرفق الثاني. تُولي الاتفاقية اهتمامًا بمبدأ التقليص والتقارب: الفكرة هي أنه واجب على كل دولة التقليلُ من انبعاثاتها، وأن تجتمع على تحقيق صافي الانبعاثات الصفري. وقد انبثق هدف صافي الانبعاثات الصفري من التقرير البارز المنشور عام ٢٠١٨، والصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ حول ارتفاع درجة حرارة الأرض بمقدار ١,٥ درجة مئوية، حيث أظهر بوضوح أنه من أجل تحقيق هدف ١,٥ درجة مئوية، يجب الوصول إلى انبعاثات كربونية صفرية بحلول عام ٢٠٥٠ تقريبًا، ثم تحقيق قيم سالبة من الانبعاثات الكربونية خلال بقية القرن.

كيوتو ١٩٩٧

منذ تأسيس اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ كانت دول العالم «الأطراف» تجتمع سنويًّا في مؤتمر الأطراف لدفع المفاوضات قُدمًا. وبعد خمس سنوات فقط من إنشاء الاتفاقية خلال الدورة الثالثة لمؤتمر الأطراف في ١٣ ديسمبر ١٩٩٧، جرت صياغة أول اتفاقية دولية، وهي بروتوكول كيوتو. نص البروتوكول على المبادئ العامة لمعاهدةٍ عالمية تهدف إلى خفض انبعاثات غازات الدفيئة، ونصَّت بالأخص على أن تسعى كل الدول المتقدمة إلى خفض انبعاثاتها بحلول الفترة ٢٠٠٨–٢٠١٢ بنسبة ٥,٢٪ مقارنة بمستوياتها عام ١٩٩٠. جرى التصديق على بروتوكول كيوتو وتوقيعه في مدينة بون في ٢٣ يوليو ٢٠٠١؛ وبذلك أصبح معاهدةً قانونية. انسحبت الولايات المتحدة، تحت قيادة الرئيس بوش، من مفاوضات المناخ في مارس ٢٠٠١، ومن ثَم لم توقع على بروتوكول كيوتو خلال اجتماع بون. فكان هذا الانسحاب ضربة قاسية للمعاهدة نظرًا لأن الولايات المتحدة تنتج نحو ربع نسبة تلوث ثاني أكسيد الكربون في العالم. علاوة على ذلك، خُفِّضت



شكل ٧-١: انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل فرد وفقًا لكل دولة وتعدادها السكاني.

الأهداف التي حددها بروتوكول كيوتو خلال اجتماع بون لضمان انضمام اليابان وكندا وأستراليا. وأخيرًا، جعلت أستراليا بروتوكول كيوتو مُلزمًا قانونيًّا في ديسمبر ٢٠٠٧.

لم تضم المعاهدةُ دولًا نامية. وكان الهدف من ذلك تحقيق العدالة في توزيع المسئولية بناءً على الإرث التاريخي للانبعاثات التي تسببت بها الدول المتقدمة. وكان يُفترض حينها أن الدول النامية ستنضم إلى الاتفاقية التي ستُعقَد بعد عام ٢٠١٢. دخل بروتوكول كيوتو حيز التنفيذ في ١٦ فبراير ٢٠٠٥ بعد أن صادقت روسيا على المعاهدة، وبذلك استُوفي الشرط الذي يقضي بتوقيع ما لا يقل عن ٥٥ دولة تمثِّل أكثر من ٥٥٪ من الانبعاثات العالمية.

كوبنهاجن ٢٠٠٩

عُلِّقت آمال ضخمة على الدورة ١٥ لمؤتمر الأطراف (كوبنهاجن) المنعقد في ٢٠٠٩، على الرغم من أنها جاءت بعد عام من الأزمة المالية العالمية. وكان يُتوقع طرح التزامات جديدة قابلة للقياس لضمان الانتقال السلس من بروتوكول كيوتو إلى اتفاقية ما بعد عام ٢٠١٢. حينها نُصِّب باراك أوباما رئيسًا للولايات المتحدة. وكان الاتحاد الأوروبي قد أعدَّ خطةً غير مشروطة لتخفيض الانبعاثات بنسبة ٢٠٪ بحلول عام ٢٠٢٠ استنادًا إلى مستويات الانبعاث عام ١٩٩٠، إلى جانب تحديد هدف مشروط يرتفع إلى ٣٠٪ إذا تبنت الدول المتقدمة الأخرى أهدافًا ملزمة. وكان معظم الدول المتقدمة الأخرى لديها ما تقدمه. فالنرويج كانت على استعداد لتخفيض الانبعاثات بنسبة ٤٠٪، واليابان بنسبة ٢٥٪ استنادًا إلى الخط الأساسي للانبعاثات عام ١٩٩٠. حتى الولايات المتحدة الأمريكية عرضت تخفيضًا بنسبة ١٧٪ استنادًا إلى الخط الأساسي للانبعاثات عام ٢٠٠٥، وهو ما يعادل انخفاضًا نسبته ٤٪ مقارنة بمستويات الانبعاث عام ١٩٩٠. لكن مؤتمر كوبنهاجن شهد فشلًا ذريعًا. أولًا، كانت الحكومة الدنماركية قد أساءت تقدير أهمية المؤتمر واستضافته في مكان صغير للغاية. لذلك، في الأسبوع الثاني عندما وصل كل وزراء الدول رفيعي المستوى وفرق الدعم الخاصة بهم، لم يكن هناك مساحة كافية مما أدى إلى حرمان العديد من المنظمات غير الحكومية من دخول مفاوضات المؤتمر. ثانيًا، كان واضحًا أن المفاوضين كانوا غير مستعدين لوصول الوزراء؛ وعليه لم يتم التوصُّل لأي اتفاق. أدى ذلك إلى تسريب ما يُعرف باسم «النص الدنماركي» الذي يحمل عنوانًا فرعيًّا، وهو «اتفاقية كوبنهاجن» الذي تضمن إجراءات مقترحة للحد من ارتفاع متوسط درجة الحرارة العالمية

إلى ٢ درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية. أثار ذلك جدلًا بين الدول المتقدمة والدول النامية حيث كان النص جديدًا تمامًا، وظهر فجأة في منتصف المؤتمر. فاتهمت الدولُ النامية الدولَ المتقدمة بالعمل خلف الأبواب المغلقة وإبرام اتفاقية تناسبها دون طلب موافقة الدول النامية. واستنكر رئيس مجموعة ٧٧، لومومبا ستانيسلاوس دي أبينج قائلًا: «إنه نص غير متوازن إلى حد كبير، ويهدف إلى الإفشال التام لمفاوضات دامت لعامين. إنه لم يعترف بمقترحات الدول النامية ولم يعكس صوتها.»

جاءت من الولايات المتحدة الضربة القاضية لإبرام اتفاقية بشأن أهدافٍ ملزمة. وصل باراك أوباما قبل يومين فقط من نهاية المؤتمر، وعقد اجتماعًا بين الولايات المتحدة والدول الأساسية (البرازيل، جنوب أفريقيا، الهند، والصين) مستبعدًا دول الأمم المتحدة الأخرى، ووضع ما يُعرف بـ «اتفاق كوبنهاجن». اعترف اتفاق كوبنهاجن بالأساس العلمي الذي يدعو إلى ضرورة إبقاء الارتفاع في درجات الحرارة دون درجتين مئويتين، لكنه لم يتضمن الأساس الزمني لتحقيق هذا الهدف، ولا الالتزامات اللازمة لخفض الانبعاثات التي تُعَد ضرورية لتحقيق هذا الهدف. أُهمِلت المقترحات السابقة التي كانت تهدف إلى الحد من ارتفاع درجات الحرارة إلى ١,٥ درجة مئوية، وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة ٨٠٪ بحلول عام ٢٠٥٠. وكان الاتفاق الذي جرى التوصل إليه غير ملزم، حيث أُمهلَت الدول حتى يناير ٢٠١٠ لتقديم أهدافها الطوعية. كما أُوضِح أن أي دولة وقَّعت على اتفاق كوبنهاجن تكون بذلك قد خرجت من بروتوكول كيوتو. ومن ثَم، تمكنت الولايات المتحدة من الابتعاد عن الأهداف الملزمة لبروتوكول كيوتو الذي كان من المفترض أن يسري تنفيذه حتى عام ٢٠١٢، وتبنت بدلًا من ذلك نهجًا ضعيفًا يعتمد على الالتزامات الطوعية. لخص الوفد البوليفي الطريقة التي جرى التوصل بها إلى اتفاق كوبنهاجن بأنها كانت «غير ديمقراطية، وغير شفافة، وغير مقبولة». كما كان الوضع القانوني لاتفاق كوبنهاجن غير واضح؛ إذ اكتفت الأطراف بأخذه بعين الاعتبار دون الموافقة عليه رسميًّا، في حين وافقت عليه ١٢٢ دولة، ثم ارتفع العدد لاحقًا إلى ١٣٩ دولة.

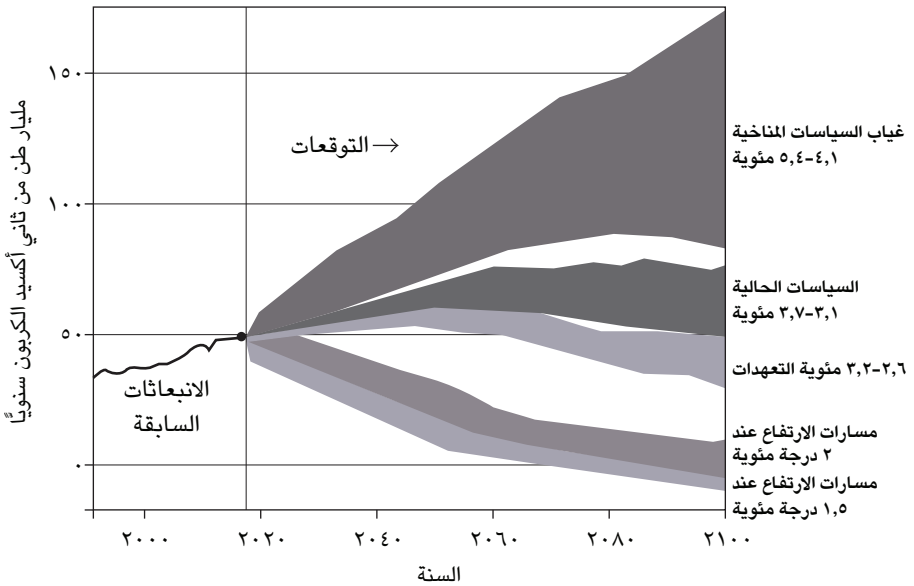
تلقَّت الثقة في مفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ ضربة أخرى عندما كُشف في يناير ٢٠١٤ أن المفاوضين التابعين للحكومة الأمريكية كانوا قد حصلوا على معلومات أثناء المؤتمر من خلال التنصت على اجتماعات وفود أخرى مشاركة في المؤتمر. وأظهرت الوثائق التي سرَّبها إدوارد سنودن كيف كانت وكالة الأمن القومي الأمريكية تراقب الاتصالات بين الدول قبل المؤتمر وأثناءه. وكشفت الوثائق المسرَّبة أن

وكالة الأمن القومي قدمت للمندوبين الأمريكيين تفاصيل مسبقة عن الخطة الدنماركية من أجل «إنقاذ» المحادثات في حال فشلها، وكذلك تفاصيل عن جهود الصين قبل المؤتمر لتنسيق موقفها مع موقف الهند.

باريس ٢٠١٥

إن فشل الدورة ١٥ من مؤتمر الأطراف في كوبنهاجن والالتزامات الطوعية التي نتجت عنه قد ألقى بظلاله فترةً طويلة على اجتماعات مؤتمر الأطراف اللاحقة، وازداد الوضع سوءًا بعد الخبر الذي سربته ويكيليكس بشأن تخفيض التمويل الأمريكي المقدم لبوليفيا والإكوادور بسبب معارضتهما لاتفاق كوبنهاجن. استغرقت المفاوضات أكثر من خمس سنوات حتى تتعافى من الفوضى التي أثارها باراك أوباما والمفاوضون الأمريكيون. في الدورة ١٦ من مؤتمر الأطراف المنعقد في كانكون والدورة ١٧ من المؤتمر نفسه في ديربان، أعيدت مفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ ببطء إلى المسار الصحيح بهدف الوصول إلى أهداف ملزمة قانونيًّا. أُحرِز تقدمٌ كبير في المبادرة المعززة لخفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الغابات وتدهورها، بما في ذلك حماية السكان المحليين، وهو ما سنناقشه لاحقًا في هذا الفصل. ومع ذلك، في الدورة ١٨ لمؤتمر الأطراف المنعقد في الدوحة في ديسمبر ٢٠١٢، جرى الاتفاق على فترة التزام ثانية تبدأ في ١ يناير ٢٠١٣، وكان من المقرَّر لها أن تستمر ٨ سنوات. وقد ضمن ذلك بقاء كل آليات كيوتو وقواعد المحاسبة دون المساس بهما خلال هذه الفترة، مع إمكان قيام الأطراف بمراجعة التزاماتهم بهدف زيادتها. وقد وضع كل هذا الأساس الضروري لاتفاقية مناخية عالمية مستقبلية تحققت في الدورة ٢١ من مؤتمر الأطراف في باريس عام ٢٠١٥ (انظر الشكل ٧-٢).

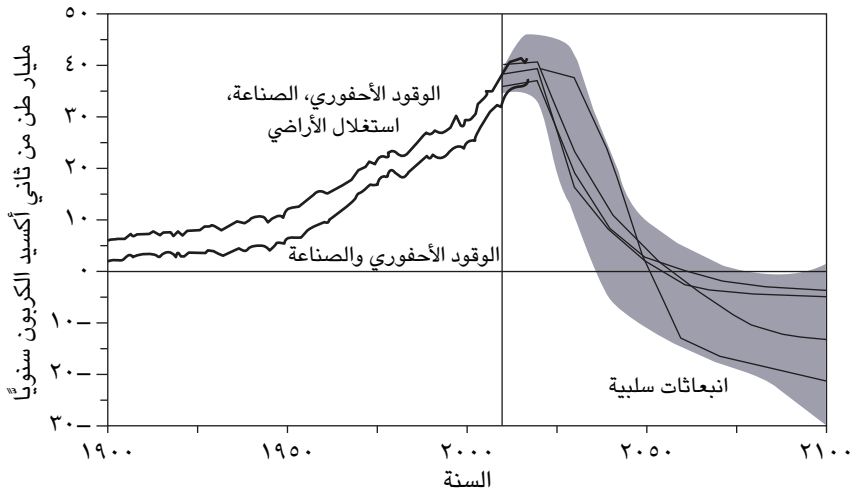
حققت مفاوضات المناخ في باريس عام ٢٠١٥ نجاحًا كبيرًا؛ والسبب الرئيسي في ذلك أن المضيفين الفرنسيين فهموا جيدًا لعبة التفاوض الدولية، واستخدموا كل الحيل الممكنة لدفع الدول إلى التعاون من أجل التوصل إلى اتفاق يوقع عليه الجميع. ينص الاتفاق على التزام الأطراف بالحفاظ على درجات الحرارة عند مستوًى «أقل كثيرًا من درجتين مئويتين فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية، وبَذْل الجهود للحد من زيادة درجة الحرارة إلى ١,٥ درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية. كانت قمة باريس بمثابة لعبة بوكر جيوسياسية تحمل مجازفاتٍ كبيرة. والمفاجأة أن الدول الأقل نفوذًا كان أداؤها أفضل مما كان متوقعًا. خضعت محادثات المناخ إلى تحالفات دولية متغيِّرة



شكل ٧-٢: الاحترار العالمي المحتمل في المستقبل بناءً على انبعاثات الكربون المتفاوتة.

تجاوزت الانقسامات التقليدية بين دول الشمال الغنية ودول الجنوب الفقيرة. وفي صلب هذه التحالفات، كانت أولًا الدبلوماسية الأمريكية-الصينية حيث اتفقت الدولتان على الحد من الانبعاثات. ثانيًا، نجح تجمع دوليٌّ جديد يُعرف باسم منتدى قابلية التأثر بالمناخ في دفع هدف ١,٥ درجة مئوية إلى صدارة الأجندة السياسية إلى الحد الذي جعله يُذكر ضمن الأهداف الرئيسية للاتفاق. سمح الدعم السياسي من اتفاق باريس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ بكتابة التقرير التاريخي حول الاحترار العالمي بمقدار ١,٥ درجة مئوية، والذي نُشر في عام ٢٠١٨. وقد وثق هذا التقرير الزيادة الملحوظة في التأثيرات نتيجة ارتفاع درجات الحرارة بين ١,٥ درجة مئوية و٢,٠ درجة مئوية. كما وثَّق التقرير كيفية تحقيق زيادة في درجة الحرارة بمقدار ١,٥ درجة مئوية؛ وهو ما يتطلب، كما ذُكِر سابقًا، الوصول إلى صافي انبعاثات كربونية صفري بحلول عام ٢٠٥٠، ثم تنقية الغلاف الجوي من الكربون لبقية القرن (انظر الشكل ٧-٣). كلما وصل العالم إلى مستوى الصافي الصفري بوتيرة أسرع، قلَّت الحاجة إلى استخراج الكربون من الغلاف الجوي خلال الفترة الممتدة بين عامَي ٢٠٥٠ و٢١٠٠. لم يكن اتفاق باريس سوى بداية

لهذه العملية؛ إذ إنه حتى عند احتساب كل التعهدات الوطنية وافتراض تنفيذها بالكامل، سيظل العالم يواجه ارتفاعًا في درجات الحرارة بنحو ٣ درجات مئوية (انظر شكل ٧-٢).



شكل ٧-٣: عالمٌ ترتفع فيه درجات الحرارة بمقدار ١,٥ درجة مئوية.

في عام ٢٠١٧، تعرَّض اتفاق باريس لانتكاسة كبيرة. فقد أعلن الرئيس ترامب عن انسحاب الولايات المتحدة من الاتفاق حيث رأى أنه غير عادل ومنحاز لصالح الدول النامية. ووفقًا للمادة ٢٨ من اتفاق باريس، لا يمكن لأي دولة تقديم إشعار بالانسحاب من الاتفاق قبل مرور ٣ سنوات على تاريخ بدء سريانه في تلك الدولة. وبذلك، كان أقرب تاريخ ممكن لانسحاب الولايات المتحدة فعليًّا هو ٤ نوفمبر ٢٠٢٠، أي بعد يوم واحد من الانتخابات الرئاسية الأمريكية لعام ٢٠٢٠. وكان من بين أول الإجراءات التي اتخذها الرئيس المنتخب حديثًا — جو بايدن — هو إعادة انضمام الولايات المتحدة إلى اتفاق باريس.

واجه الرئيس الجديد حينها تحدياتٍ إضافية؛ إذ إنه خلال السنوات الأربعة من رئاسة ترامب، أُلغِي ما يقرب من ١٠٠ قانون ولائحة بيئية أو كانت في طريقها إلى الإلغاء. وشملت هذه التعديلات التراجع عن معايير كفاءة الوقود وانبعاثات المركبات التي وضعتها إدارة أوباما، والتخفيف من معايير انبعاثات الفحم لمحطات الطاقة التي تعمل

بالفحم، بالإضافة إلى إضعاف لوائح الإضاءة الفعالة، مما يعني أن المصابيح الكهربائية الأقل كفاءة لا تزال متاحة للبيع بعد عام ٢٠٢٠.

وافق الرئيس ترامب على خطَّي أنابيب نفط كانا موضع جدل («كيستون إكس إل» و«داكوتا أكسيس»)، وسمح بالتنقيب عن النفط في معظم المياه الأمريكية، كما فتح ملجأ الأحياء البرية الوطني في القطب الشمالي أمام عمليات الحفر والتنقيب، مما أدى إلى توسع هائل في استكشاف النفط والغاز. في عام ٢٠٢١، ألغى الرئيس بايدن كل هذه الأوامر التنفيذية، وأعاد انضمام الولايات المتحدة إلى اتفاق باريس، واستثمر بكثافة في التكنولوجيا والبنية التحتية المنخفضة الكربون، كما تعهَّد بخفض انبعاثات الكربون في الولايات المتحدة بنسبة ٥٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠، وتحقيق صافي الانبعاثات الصفري بحلول عام ٢٠٥٠.

مؤتمرا جلاسكو ٢٠٢١، وشرم الشيخ ٢٠٢٢

في عام ٢٠٢١، استضافت المملكة المتحدة وإيطاليا مؤتمر الأطراف في دورته ٢٦ في مدينة جلاسكو بعد تأجيله عامًا بسبب جائحة كوفيد-١٩. كان هذا المؤتمر أول تقييم عالمي عقب اتفاق باريس، حيث قدمت الدول مساهماتها المحددة وطنيًّا أو تعهداتها بخفض انبعاثات غازات الدفيئة. تكشف المساهمات المقدمة أن أكثر من ٩٠٪ من إجمالي الناتج المحلي العالمي أصبح الآن خاضعًا لأهداف تحقيق صافي الانبعاثات الصفري. وفي حال تنفيذ كل هذه المساهمات الوطنية، فمن الممكن إبقاء الارتفاع في درجة الحرارة العالمية بين ٢,٤ درجة مئوية و٢,٧ درجة مئوية. ومع ذلك، لا يزال هذا بعيدًا كل البعد عن الهدف المحدد في اتفاق باريس، وهو ١,٥ درجة مئوية، والذي أُعيد التأكيد عليه في ميثاق جلاسكو للمناخ الذي وقَّعت عليه كل الدول البالغ عددها ١٩٧ دولة. لذلك، طُلب من الدول تقديم مساهمات محددة وطنيًّا جديدة وأكثر طموحًا لمؤتمر الأطراف في دورته ٢٧ في مصر عام ٢٠٢٢، مما كسر دورة السنوات الخمس لاتفاق باريس. ومع ذلك، لم يتحقق الهدف المنشود، وعليه أُطلِقت دعوة جديدة لعقد الدورة ٢٨ من مؤتمر الأطراف في الإمارات العربية المتحدة. دعا ميثاق جلاسكو للمناخ أيضًا إلى التخفيض التدريجي لاستخدام الفحم ورفع الدعم عن الوقود الأحفوري غير الفعال، وكانت هذه هي المرة الأولى التي يُذكر فيها الوقود الأحفوري في أي معاهدة مناخية دولية. كما نجح مؤتمر الأطراف في دورته ٢٦ في استكمال المادة ٦ التي تتضمن القواعد واللوائح المنظمة لمراقبة وتداول

انبعاثات الكربون ومصارفها بين الدول والشركات الأخرى. في عام ٢٠٢٢، لم يُحرز تقدم كبير خلال الدورة ٢٧ من مؤتمر الأطراف في شرم الشيخ. وجرى التوصل إلى اتفاق لإنشاء صندوق «الخسائر والأضرار»، إلا أن مسألة مَن سيدفع ومَن يحق له المطالبة لا تزال بحاجة إلى اتفاق في الاجتماعات المستقبلية. أما الوعد الذي قُطِع عام ٢٠١٠ بتقديم ١٠٠ مليار دولار أمريكي سنويًّا من الدول المتقدمة إلى الدول النامية لدعم عملية خفض الكربون بوتيرة سريعة، فلم يتحقق بعد.

هل اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ بها خلل؟

لقد أُشير إلى عدة ثغرات في نهج اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ. وفيما يأتي أبرزها:

عدم تحقيق التقدم الكافي. تُعَد الثغرة الأولى في إجراءات الاتفاقية هي أنه بالرغم من مرور ٢٥ عامًا من المفاوضات، لم تُسفر الاتفاقية عن أي اتفاقٍ دائم. وكما سلف ذِكره، فإن اتفاق باريس الحالي، حتى في حال الوفاء بكل التعهدات، سيؤدي إلى ارتفاع في درجة حرارة الأرض لا يقل عن ٣ درجات مئوية (انظر الشكل ٧-٢) بالإضافة إلى التأثيرات المرتبطة بذلك والموضَّحة في الجدول ٥-١.

غياب آلية التنفيذ. إن المشكلة الأساسية مع الاتفاقيات والمعاهدات الدولية هي غياب وسائل حقيقية للتنفيذ. وكانت هذه إحدى الحجج التي استخدمتها الولايات المتحدة عند اقتراح اتفاقية كوبنهاجن التي تنص على أنه حتى الأهداف الملزمة هي في الواقع طوعية، حيث تُقرر البلدان ما إذا كانت ستمتثل لها أم لا. ولهذا السبب، تُعَد السياسات والقوانين ضرورية على المستوى الإقليمي، كما هو الحال في الاتحاد الأوروبي وعلى المستوى الوطني، مثل قانون تغيُّر المناخ في المملكة المتحدة. فالسبيل الوحيد لتطبيق المعاهدات الدولية على أرض الواقع هو القوانين الإقليمية والوطنية. كما أن هذا النهج في الحوكمة المتعددة المستويات ضروري أيضًا لمنع التلاعب بأنظمة معينة.

الاستعمار الأخضر. أثار العديد من اختصاصي العلوم الاجتماعية والسياسية شكوكًا فلسفية وأخلاقية حول مفاوضات المناخ ككلٍّ. وكان مصدر القلق الرئيسي هو أن هذه المفاوضات تعكس طابعًا استعماريًّا، حيث يُنظر إلى البلدان الغنية المتقدمة على أنها تُملي على البلدان الأفقر كيف ومتى يجب أن تتطور. لسنوات عديدة، عارضت بلدان مثل الهند والصين الدعوات الرامية إلى خفض انبعاثاتها، متعللةً بأن ذلك سيضر بتطورها

ومحاولاتها التخفيف من معدلات الفقر. فيما دعمت دولٌ أخرى بعض التدابير مثل آلية التنمية النظيفة التي تسمح للبلدان المتقدمة بدفع تكاليف تخفيض الانبعاثات في بلد نامٍ، وبذلك يحتسب ضمن هدفها الوطني لتخفيض الانبعاثات. كما أنها تقدم فائدة تنموية، حيث ستُحوَّل الأموال من البلدان الغنية إلى البلدان الأفقر. ولكن ٨٠٪ من اعتمادات المشروعات في إطار آلية التنمية النظيفة خُصصت إلى الصين والبرازيل والهند وكوريا، والبلدان النامية الأغنى؛ لذا لم تصل التمويلات إلى أفقر البلدان في العالم. كما اشترت المملكة المتحدة وهولندا ٦٠٪ من اعتمادات الكربون، مما أدى إلى حدوث اختلال في التوزيع المالي.

النهج القومي مقابل القطاعي. ثمة مشكلة أخرى في النهج الذي تتبعه اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ، حيث إنها متجذرة في مفهوم الدولة القومية وتشكل قضية رئيسية في عالم رأسمالي عالمي قائم على ما يُعتقَد أنه مبدأ التجارة الحرة. فعلى سبيل المثال، إذا أرادت الولايات المتحدة الأمريكية من خلال اتفاق باريس أن تخفض انبعاثات الكربون الناتجة عن الصناعات الثقيلة، فيمكنها فرض ضريبة كربون على إنتاج الفولاذ والخرسانة. ولكن إذا لم تُفرض قيود مماثلة في دول أخرى، فستصبح منتجاتها أرخص سعرًا، حتى عند احتساب تكلفة النقل بحرًا أو جوًّا أو برًّا إلى الولايات المتحدة، مما قد يؤدي في النهاية إلى زيادة إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. قد تقوِّض النظم الاقتصادية العالمية أي محاولات وطنية لاتخاذ التدابير الصحيحة وخفض انبعاثاتها. قد يكون النهج البديل حينها هو إبرام اتفاقيات عالمية على مستوى القطاعات. على سبيل المثال، يمكن التوصل إلى اتفاق عالمي يحدد كمية الكربون المسموح بانبعاثها لكل طن من الفولاذ أو الخرسانة المُنتجة. عندئذٍ، يمكن لكل الدول الاتفاق على شراء الفولاذ أو الخرسانة المنتجة وفقًا لهذا النهج المنخفض الانبعاثات، مما سيؤدي إلى إرساء نظام تجاري أكثر إنصافًا، حيث لا تتكبد الدول خسائر نتيجة إجراء تغييرات في صناعاتها لخفض انبعاثات غازات الدفيئة. تكمن المشكلة بالطبع في كيفية مراقبة مثل هذا النظام عبر العديد من القطاعات الصناعية المختلفة.

تداول الكربون

دافع العديد من السياسيين عن اعتماد خطط لتداول حقوق إطلاق الكربون سواء على المستوى الإقليمي أو العالمي. ويُعَد نظام «تحديد سقف الانبعاثات وتداولها» من أكثر الأنظمة نجاحًا حيث يحدد السياسيون سقفًا للانبعاثات، وهو الحد الأقصى المسموح به

من التلوث، ثم ينشأ نظام تداول يتيح للصناعات المختلفة تداول حقوق إطلاق الانبعاثات الكربونية. ومن المُسلَّم به أن الصناعات المختلفة قادرة على تقليل انبعاثاتها بمعدلات وتكاليف متفاوتة، لكن هذا النظام يسمح بالتوصُّل إلى النهج الأكثر فعالية من حيث التكلفة. وقد أثبت هذا النوع من الأنظمة نجاحه في الولايات المتحدة بالحد من تلوث الهواء عن طريق تداول حقوق إطلاق انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروز. فقد ألزم قانون الهواء النقي الأمريكي عام ١٩٩٠ شركات المرافق الكهربائية بخفض انبعاثاتها من هذه الملوثات بمقدار ٨,٥ ملايين طن مقارنة بمستويات عام ١٩٨٠. وأشارت التقديرات الأولية في عام ١٩٨٩ إلى أن تكلفة الامتثال لهذا القانون ستبلغ ٧,٤ مليارات دولار أمريكي، في حين أشار تقريرٌ صدر عام ١٩٩٨، مستندًا إلى بيانات الامتثال الفعلية، إلى أن التكلفة كانت أقل من مليار دولار أمريكي.

تغطي برامج وطنية أو إقليمية لتداول الكربون حاليًّا ما يزيد على ١٣٪ من انبعاثات الكربون العالمية. وتشمل هذه الأنظمة برامج في الولايات المتحدة وكندا والصين وكوريا الجنوبية واليابان والبرازيل والأرجنتين وجنوب أفريقيا والاتحاد الأوروبي. يُعَد مخطط تداول حقوق إطلاق الانبعاثات التابع للاتحاد الأوروبي هو البرنامج الأكبر والأطول لتبادل حقوق إطلاق الكربون. فهو يغطي أكثر من ١١ ألف منشأة يصل صافي استهلاكها من الطاقة إلى ٢٠ ميجا واط، ويشمل قطاعات توليد الكهرباء، إنتاج المعادن الحديدية، صناعة الأسمنت، مصافي تكرير البترول، صناعة اللُّب والورق، صناعة الزجاج. يشمل مخطط تداول حقوق إطلاق الانبعاثات ٣١ دولة من بينها ٢٨ دولة من الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي، بالإضافة إلى آيسلندا والنرويج وليختنشتاين. كما يشمل هذا المخطط نصف انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الاتحاد الأوروبي، و٤٠٪ من إجمالي انبعاثاته من غازات الدفيئة. وفقًا لنظام «تحديد سقف الانبعاثات وتداولها»، يُحدَّد سقف الانبعاثات بناءً على إجمالي غازات الدفيئة التي قد تطلقها المنشآت في كل دولة. تُطرَح «حصص الانبعاثات» بعد ذلك في مزاد أو تخصص لجهة أخرى دون مقابل، ويمكن بعد ذلك تداولها. يتعين على المنشآت مراقبة انبعاثاتها من ثاني أكسيد الكربون والإبلاغ عنها، مما يضمن تقديم ما يكفي من حصص الانبعاثات إلى السلطات المختصة لتغطية انبعاثاتها. في حال تجاوز الانبعاثات الحد المسموح به وفقًا للحصة المخصصة، يجب على المنشأة شراء حصص إضافية من منشآت أخرى. وعلى العكس، إذا تمكنت المنشأة من خفض انبعاثاتها على نحوٍ فعَّال، يمكنها بيع الرصيد المتبقي من حصتها في إطلاق الانبعاثات. يسمح هذا النظام

بالتوصُّل إلى أكثر الطرق فعالية من حيث التكلفة لخفض الانبعاثات دون تدخل كبير من الحكومة. نُظِّم مخطط تداول حقوق إطلاق الانبعاثات على أربع مراحل: ٢٠٠٥–٢٠٠٧، ٢٠٠٨–٢٠١٢، ٢٠١٣–٢٠٢٠، و٢٠٢١–٢٠٣٠. في كل مرحلة، انخفض العدد الإجمالي للأرصدة المتاحة، بينما ارتفع عدد القطاعات والصناعات المساهمة؛ وقد اعتُمد هذا النهج التدريجي لدفع الانبعاثات نحو الانخفاض بأسرع ما يمكن. في عام ٢٠٢٠، قُدِّر أن مخطط تداول حقوق إطلاق الانبعاثات التابع للاتحاد الأوروبي قد ساهم في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بأكثر من مليار طن بين عامَي ٢٠٠٨ و٢٠١٦، أي ما يعادل ٣٫٨٪ من إجمالي الانبعاثات على مستوى الاتحاد الأوروبي. ومع ذلك، تعرض ذلك المخطط لانتقادات بسبب عدم دقة الحدود القصوى للانبعاثات، مما أدى إلى انخفاض كبير في سعر حصص الكربون. في المملكة المتحدة، كان إضافة «حد أدنى لسعر الكربون» أو الحد الأدنى لسعر الكربون الذي حددته الحكومة أمرًا ضروريًّا لإخراج الفحم من مزيج مصادر الطاقة.

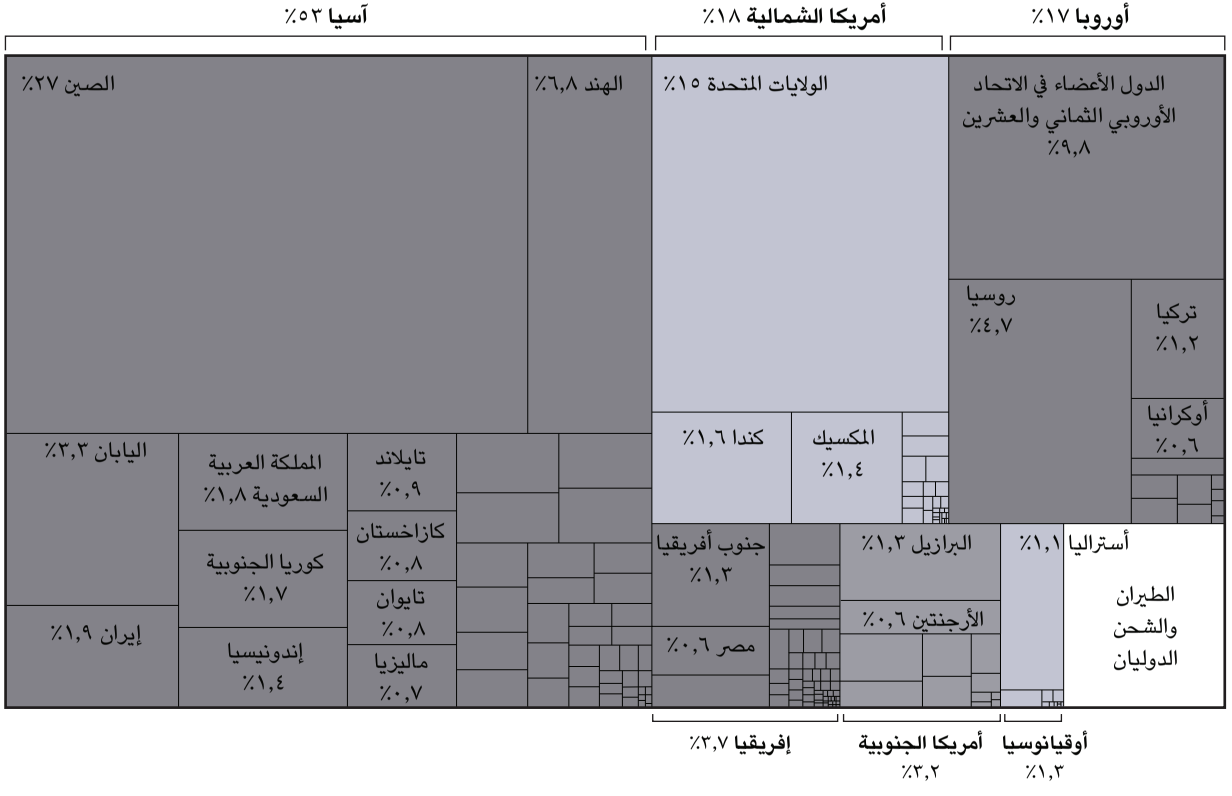
مبادرة خفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الغابات وتدهورها

إن فكرة تطوير وسيلة لمكافحة إزالة الغابات في إطار مفاوضات تغيُّر المناخِ طُرِحَت لأول مرة في الدورة ١١ من مؤتمر الأطراف عام ٢٠٠٥ في مونتريال، وأُطلِق عليها «مبادرة خفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الغابات وتدهورها». وجرى الاتفاق مبدئيًّا على برنامج الأمم المتحدة لخفض الانبعاثات الناتجة عن إزالة الغابات وتدهورها في الدورة ١٣ من مؤتمر الأطراف عام ٢٠٠٧ في بالي. ثم أُدخلت تعديلات على البرنامج ليصبح «المبادرة المعززة لخفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الغابات وتدهورها»، حيث تشير كلمة «المعززة» إلى مجموعة من الضمانات لحماية السكان المحليين، بالإضافة إلى ضمانات لحماية النظام البيئي والتنوُّع الحيوي المحلي. يُنظر إلى مبادرة خفض الانبعاثات أو النسخة المعززة منها على أنها حل مربح للجميع، حيث يمكنه حماية الغابات والأنظمة البيئية، وتعزيز إعادة التشجير، وحماية سكان الغابات وتعويضهم عن فقدان مصادر دخلهم نتيجة استغلال أراضيهم التي خضعت للحراجة. وقبل انطلاق وتمويل أي مشروع ضمن المبادرة المعززة، يجب التثبت منه لضمان تحقيق نتائج مربحة لكل الأطراف.

في الدورة ١٩ من مؤتمر الأطراف المنعقد في عام ٢٠١٣، أخضِعت مبادرة خفض الانبعاثات إلى عملية تطوير أخرى، وجرى الاتفاق على «إطار وارسو للمبادرة المعززة

لخفض الانبعاثات»، حيث تضمن كيفية المراقبة والقياس والإبلاغ والتحقق من التغيُّرات في الغابات والاعتمادات المرتبطة بها. وقد استُكملت باقي القرارات المعلَّقة بشأن المبادرة المعززة في الدورة ٢١ من مؤتمر الأطراف في باريس عام ٢٠١٥، بما في ذلك كيفية الإبلاغ عن تدابير الحماية باستخدام أساليب غير قائمة على السوق، وكيفية احتساب المزايا غير المرتبطة بالكربون. وهكذا، بحلول عام ٢٠١٥، اكتمل دليل قواعد اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ الخاص بالمبادرة المعززة لخفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الأشجار وتدهورها. وقد شُجعت كل الدول على تنفيذ المبادرة المعززة لخفض الانبعاثات ودعمها، حيث ورد ذلك في المادة ٥ من اتفاق باريس. وكان ذلك جزءًا من مادة أوسع نطاقًا تنص على ضرورة أن تتخذ كل الدول إجراءات لحماية وتعزيز مصارف ومخزونات غازات الدفيئة، مثل الغابات.

في عام ٢٠٠٩، أدى التعنت الأمريكي وتداعيات الأزمة المالية العالمية إلى فشل مفاوضات المناخ في كوبنهاجن في التوصل إلى أي اتفاق بعد بروتوكول كيوتو. واستغرقت إعادة المفاوضات المناخية إلى مسارها الصحيح ست سنوات بالتزامن مع نجاح مؤتمر الأطراف في الدورة ٢١ وتوقيع اتفاق باريس. في عام ٢٠٢٠، تأجل مؤتمر الأطراف في دورته ٢٦ في جلاسكو بسبب جائحة كوفيد-١٩، لكن على عكس الأزمة المالية العالمية، لم تؤدِّ الجائحة العالمية إلى عرقلة مفاوضات المناخ. بل على النقيض، ارتفعت أصواتٌ من شركات ومؤسسات وأفراد في كل أنحاء العالم تنادي بجعل العالم أفضل وأكثر صحة وأمانًا بعد الجائحة. جاء ذلك نتيجة إدراك العالم لإمكانية وجود علاقة مختلفة بين الحكومة والصناعة والمجتمع المدني حيث تُمنح الأولوية للصحة ورفاهية المواطنين على المكاسب الاقتصادية للدول أو لأقلية صغيرة من الأفراد. إن الحديث الجديد عن تحقيق صافي انبعاثات الكربون الصفري عالميًّا بحلول عام ٢٠٥٠ قوي للغاية؛ إذ إنه غيَّر مسار النقاش من مقدار ما يمكننا خفضه من الانبعاثات إلى الموعد الذي نتخلص فيه من انبعاثات الكربون تمامًا. فالتحدي كبير؛ لأن علينا في أقل من ٣٠ عامًا أن ننتقل من إطلاق أكثر من ٤٠ مليار طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًّا إلى معدل صفري (انظر الشكل ٧-٤). لا يتردد اتفاق باريس في التأكيد على أنه إذا أردنا تحقيق استقرار في تغيُّر المناخ حتى عند مستوى درجتين مئويتين، فإننا نحتاج إلى تحول كامل في توليد الطاقة والصناعة والبنية التحتية وسلوكيات الأفراد حول العالم. إننا نحتاج في الواقع إلى استخدام كل الحلول المتاحة لمواجهة تغيُّر المناخ.



شكل ٧-٤: نِسب انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل دولة.

الفصل الثامن

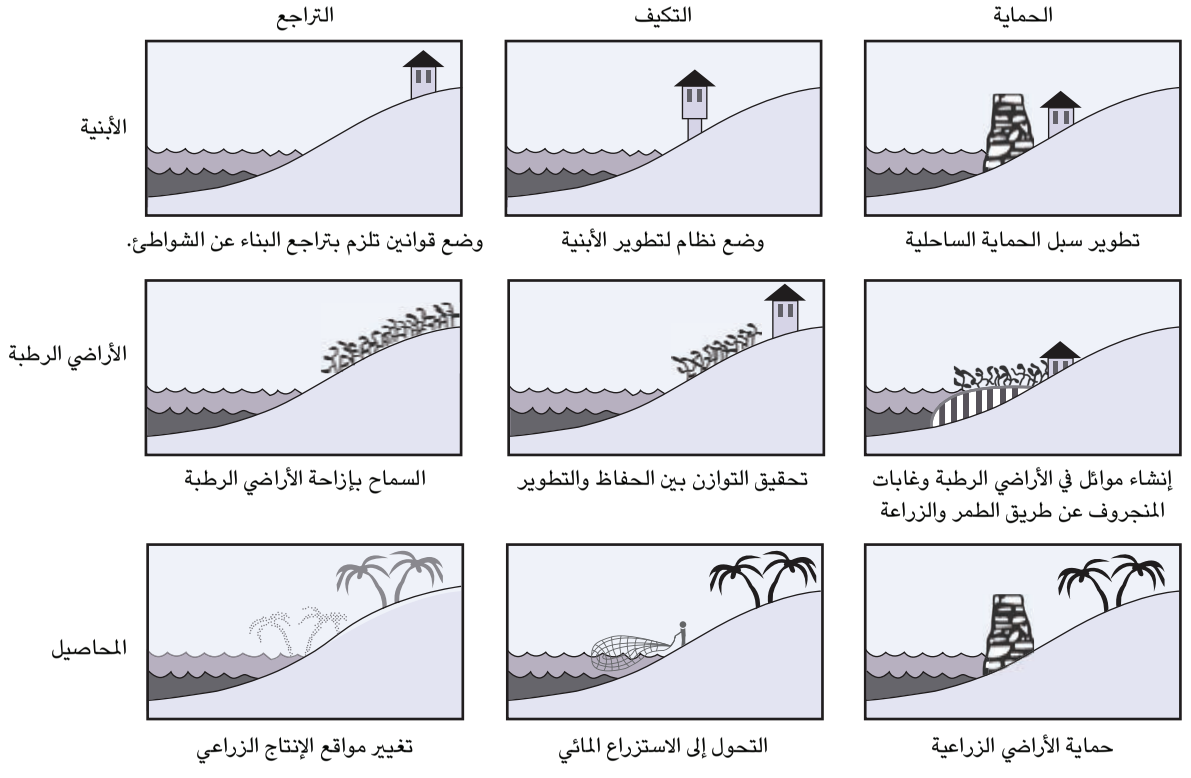
الحلول

مقدمة

هناك ثلاثة أنواع من الحلول لمواجهة تغيُّر المناخ. الحل الأول هو التكيُّف متمثلًا في توفير الحماية للسكان من تأثيرات تغيُّر المناخ. والحل الثاني هو التخفيف الذي يهدف في أبسط معانيه إلى تقليل بصمتنا الكربونية؛ ومن ثَم عكس اتجاه انبعاثات غازات الدفيئة المتزايدة دائمًا. وثالثهما هو الهندسة الجيولوجية التي تتضمن استخراج ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع من الغلاف الجوي أو تعديل المناخ العالمي.

التكيف

لقد بدأت تأثيرات تغيُّر المناخ تفرض نفسها بوضوح، ومن المتوقع أن تزداد تلك التأثيرات مع استمرار الارتفاع في درجات الحرارة العالمية. وفي التقرير الثاني من التقييم السادس الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، استُعرِضت تأثيرات تغيُّر المناخ ومدى حساسية كل بيئة وطنية ونظام اجتماعي واقتصادي وقابليتها للتكيف والتأثر. تقدم الهيئة الحكومية الدولية ستة أسباب واضحة لضرورة التكيف مع تغيُّر المناخ: (١) لا يمكن تجنب تأثيرات تغيُّر المناخ حتى لو خُفِّضت الانبعاثات بسرعة إلى الصفر (انظر الفصل ٤)؛ (٢) التكيف الاستباقي والاحترازي أكثر فاعلية وأقل تكلفة من الحلول الطارئة القسرية في اللحظة الأخيرة؛ (٣) قد يكون تغيُّر المناخ أكثر سرعةً ووضوحًا مما تشير إليه التقديرات الحالية، كما يرجح حدوث ظواهر مناخية غير متوقعة ومتطرفة؛ (٤) يمكن تحقيق فوائد فورية من تحسين التكيف مع التقلبات المناخية والظواهر الجوية المتطرفة (على سبيل المثال، فيما يتعلق بمخاطر العواصف، سيصبح من الضروري تطبيق قوانين



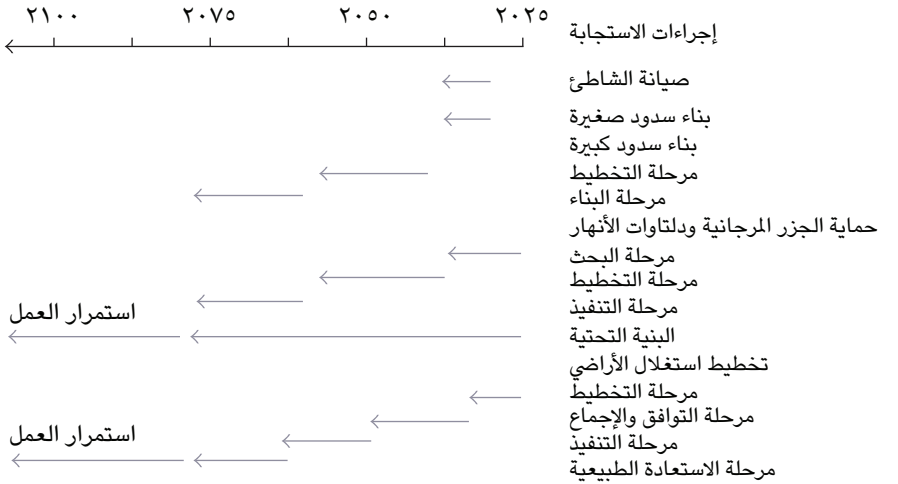
شكل ٨-١: استراتيجيات نماذج الاستجابة لارتفاع مستوى سطح البحر في المستقبل.

بناء صارمة وتحسين ممارسات الإخلاء)؛ (٥) يمكن تحقيق فوائد فورية أيضًا من خلال إلغاء السياسات والممارسات غير الملائمة مع التكيف (مثل البناء على السهول الفيضية والسواحل المعرضة للخطر)؛ (٦) يجلب تغيُّر المناخ فرصًا وتهديدات أيضًا. يعرض الشكل ٨-١ مثالًا لكيفية تكيف الدول مع الارتفاع المتوقع في مستوى سطح البحر.

يتمثَّل التهديد الأساسي الناشئ عن تغيُّر المناخ في عدم القدرة على التنبؤ به (انظر الفصل السادس). كما أُشير سابقًا، يستطيع البشر العيش ضمن نطاق واسع من المناخات، بدءًا من الصحاري الحارقة وصولًا إلى المناطق القطبية المتجمدة، لكننا استطعنا التأقلم مع هذه البيئات بفضل قدرتنا على التنبؤ بالظروف الجوية المتطرفة التي يجب علينا مواجهتها. ومع ازدياد تأثيرات تغيُّر المناخ، ستصبح الأحوال الجوية أكثر تطرفًا وأقل قابلية للتنبؤ بها. لذا، فإن التكيف على المستويين المادي والاجتماعي ضروري لحماية حياة الناس وسبل عيشهم.

تتطلب التكيفات المادية منا أن نفكر في كيفية تغيير بنيتنا التحتية. على سبيل المثال، هل سنحتاج إلى بناء تحصينات بحرية أكثر كفاءة، أو بناء المزيد من الخزانات، أو استعادة الأراضي الرطبة، أو تزويد الأبنية بأنظمة تكييف الهواء؟ في العديد من الدول، قد يستغرق تخطيط هذه المشروعات الكبرى للبنية التحتية وتطويرها وبنائها مدةً تصل إلى ٣٠ عامًا. إذا أخذنا كمثال قضيةَ ارتفاع مستوى سطح البحر (انظر الشكل ٨-٢)، فقد يستغرق إجراء الأبحاث ووضع الخطط المناسبة لمواجهته ١٠ سنوات. ثم قد تتطلب الإجراءات الاستشارية والقانونية الكاملة ١٠ سنوات إضافية، يليها ١٠ سنوات أخرى لتنفيذ تلك التغييرات. وقد يستغرق الأمر عقدًا إضافيًّا حتى تكتمل عملية الاستعادة الطبيعية التي تحقق التكيف الكامل مع ارتفاع مستوى سطح البحر (الشكل ٨-٢). يُعَد حاجز نهر التيمز مثالًا جيدًا لذلك حيث يحمي لندن حاليًّا من الفيضانات: فقد جرى تطويره استجابةً للفيضانات الجارفة التي وقعت عام ١٩٥٣، لكنه لم يُفتتح رسميًّا حتى عام ١٩٨٤، أي بعد ٣١ عامًا.

يجب علينا أيضًا أن نأخذ التكيفات الاجتماعية والتغيُّرات في سلوك الأفراد في الاعتبار. فبعد موجة الحر التي ضربت أوروبا عام ٢٠٠٣، أعادت فرنسا تقييم استجابتها الصحية للأزمة من كل الجوانب. لقد غيَّرت كل شيء، بما في ذلك: سبل التواصل مع الجمهور، الفحوصات الصحية للأفراد الأكثر ضعفًا، الاستجابات الصحية المحلية، بالإضافة إلى إجراءات دخول المستشفيات والخطط العلاجية. تُقدَّر نسبة انخفاض عدد الوفيات في



شكل ٨-٢: المدد الزمنية لاستراتيجيات الاستجابة الرامية إلى مواجهة تغيُّر المناخ.

موجات الحر التالية بأكثر من ٧٥٪ بفضل هذه التكيفات الاجتماعية. في حين ستتمثل القضية الرئيسية في العديد من الدول في الأمن الغذائي والمائي، وعليه سيصبح ضروريًّا وضع السياسات التي تضمن حصول الناس على الغذاء والمياه النظيفة حتى عند عجزهم عن دفع ثمنها. بطرق عديدة، تُعَد الحوكمة الرشيدة أهم أشكال التكيف مع تغيُّر المناخ، حيث يتيح صياغة السياسات وتنفيذها لحماية الفئات الأكثر ضعفًا في المجتمع.

ومع ذلك، ثمة حدود للتكيف. ففي بعض المناطق، قد تصبح تأثيرات تغيُّر المناخ جسيمةً إلى حدٍّ يتجاوز قدراتنا أو إمكاناتنا المالية على حماية السكان الذين يعيشون هناك. إن استمرار ارتفاع مستوى سطح البحر سيعني أن العديد من الدول الجزرية الصغيرة قد تصبح غير صالحة للسكن، مما سيجبر سكانها على النزوح. في عام ٢٠١٩، أعلن الرئيس الإندونيسي جوكو ويدودو عن نقل العاصمة الوطنية من جاكرتا الواقعة على جزيرة جاوة، إلى مقاطعة كالمنتان الشرقية في جزيرة بورنيو. كان أحد أسباب هذا القرار هو تخفيف الضغط عن العاصمة ومعالجة عدم المساواة في إندونيسيا، وثمة سبب آخر هو غرق جاكرتا. فبالرغم من وجود حاجز بحري مصمَّم لحماية السكان، تنخفض المناطق الواقعة شمال جاكرتا بنحو ٢٥ سنتيمترًا سنويًّا نتيجة الهبوط الأرضي. ويعود ذلك إلى ارتفاع مستوى سطح البحر والاستخراج المستمر للمياه العذبة من الطبقات الجوفية السطحية، مما يؤدي إلى حدوث هبوطٍ أرضي.

المشكلة الأخرى هي أن التكيف يتطلب استثمار الأموال في الوقت الحاضر، ولكن العديد من الدول لا تمتلك تلك الأموال، وحتى إذا تمكنت من جمعها، فإن مواطنيها غير مستعدين لدفع ضرائب إضافية لحماية أنفسهم في المستقبل، حيث إن معظمهم يؤثِرون اللحظة الراهنة. تتبع العديد من الدول دورات انتخابية قصيرة تتراوح مدتها بين ٤ سنوات و٥؛ مما يعني أن الساسة يفكرون دائمًا في المدى القصير ونادرًا ما يولون اهتمامًا إلى المدى البعيد، وهذا من شأنه أن يجعل رؤيتهم قاصرة كما يقيد قدرتهم على الاستثمار في مشروعات التكيف. وهذا على الرغم من حقيقة أن كل استراتيجيات التكيف المذكورة ستؤدي على المدى الطويل إلى توفير الأموال على المستوى المحلي والوطني والعالمي.

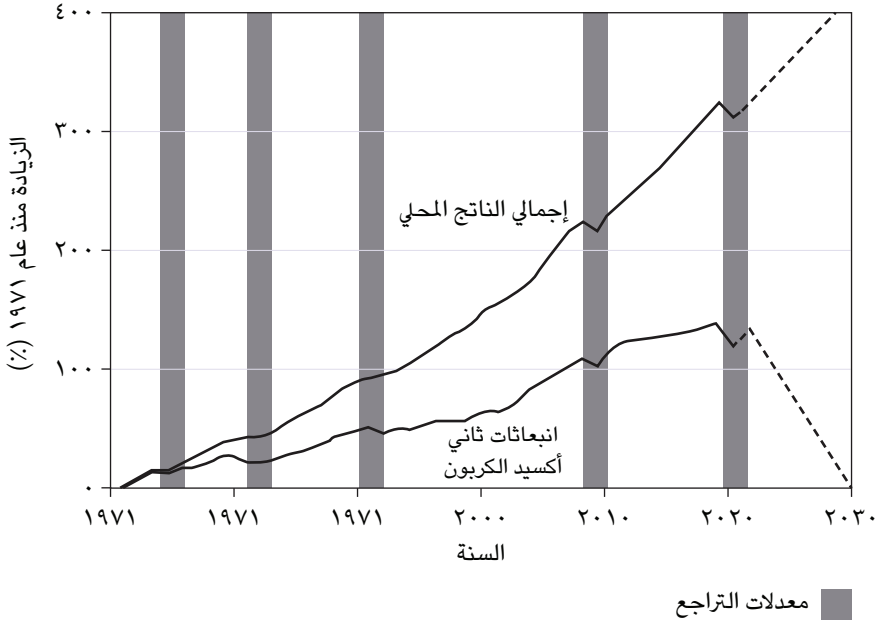
التخفيف

إن الحاجة إلى خفض الانبعاثات الكربونية العالمية إلى النصف بحلول عام ٢٠٣٠، وتحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام ٢٠٥٠ تُعَد تحدِّيًا بالغ الصعوبة، وهذا يعني استخدام كل الحلول المتاحة في أسرع وقتٍ ممكن. وثمة خبر سار. لقد أصبح نمو إجمالي الناتج المحلي والانبعاثات الكربونية منفصلين تمامًا خلال العقد الماضي، حيث شهد العالم ارتفاعًا كبيرًا في إجمالي الناتج المحلي مقارنةً بزيادة صغيرة نسبيًّا في الانبعاثات الكربونية (انظر شكل ٨-٣). وما نحتاج إليه الآن هو عكس هذه العلاقة بحيث يؤدي ارتفاع إجمالي الناتج المحلي إلى انخفاض الانبعاثات الكربونية. في عام ٢٠٢٠، نشرت كلٌّ من الوكالة الدولية للطاقة وصندوق النقد الدولي تقريرًا يوصي باستثمارات ضخمة في مجال الطاقة النظيفة، مما سيوفر ملايين الوظائف الجديدة. وقد اتضح خلال جائحة كوفيد-١٩ أن توليد الطاقة واستهلاكها هما المفتاحان الأساسيان لخفض الانبعاثات الكربونية.

يحدد التقرير خططًا لإجراء تجديدات لأعدادٍ كبيرة من المنازل، وإجراءات إصلاحية لدعم الوقود الأحفوري، والتوسع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة وشبكات الكهرباء. وستجري مناقشة بعضٍ من هذه الجوانب فيما يأتي.

الطاقة البديلة أو المتجددة أو النظيفة

كان الوقود الأحفوري اكتشافًا مذهلًا، حيث سمح للعالم أن يتطور بمعدل أسرع من أي وقتٍ آخر في التاريخ. فالمستوى المعيشي المرتفع في العالم المتقدم يعتمد على الوقود



شكل ٨-٣: مقارنة نمو إجمالي الناتج المحلي بزيادة انبعاثات الكربون منذ عام ١٩٧١.

الأحفوري الرخيص والآمن نسبيًّا. لكن احتراق الوقود الأحفوري أسفر عن عواقب لم تكن مقصودة، وهي تغيُّر المناخ العالمي. لذا نحن نحتاج في القرن الحادي والعشرين إلى التحول من الطاقة الناتجة عن الوقود الأحفوري إلى الطاقة المنخفضة الكربون أو الطاقة المحايدة كربونيًّا. وهذا يشمل الطاقة الشمسية، والطاقة الحيوية، وطاقة الرياح، والطاقة المائية، والطاقة الموجية، وطاقة المد والجزر.

الطاقة الشمسية. يصل متوسط الطاقة التي تستقبلها الأرض من الشمس إلى ٣٤٣ واط/م٢، ومع ذلك فإن الكوكب ككلٍّ لا يستقبل سوى جزأين من المليار من إجمالي الطاقة التي ترسلها الشمس. تُعَد الشمس المصدر الرئيسي للطاقة الذي كانت ولا تزال تعتمد عليه النباتات لمليارات السنين. في الوقت الحالي، يمكننا تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى حرارة أو كهرباء، كما يمكننا استغلالها في عملية البناء الضوئي لزراعة النباتات التي يمكن استخدامها لإنتاج الوقود الحيوي. أبسط الطرق للاستفادة من الطاقة الشمسية هي التسخين بالطاقة الشمسية. على نطاق صغير، يمكن تزويد أسطح المنازل والأبنية

الأخرى في الدول المشمسة بألواح التسخين الشمسي لتسخين المياه، مما يتيح للناس الاستمتاع بحمامٍ ساخن خالٍ من الكربون. أما على نطاق واسع، فتُستخدم مرايا القطع المكافئ لتركيز الطاقة الشمسية من أجل إنتاج سوائل ساخنة (الماء أو الزيت) لتشغيل التوربينات وتوليد الكهرباء. ويمكن القول إن أفضل الأماكن لإنشاء محطات توليد الطاقة الحرارية الشمسية هي الصحاري الواقعة على دوائر عرض منخفضة، حيث يكون عدد الأيام الغائمة قليلًا جدًّا على مدار العام. وقد بدأ بناء محطات الطاقة الحرارية الشمسية في ولاية كاليفورنيا منذ ثمانينيات القرن العشرين، وتوسع بناؤها الآن في العديد من البلدان الأخرى. تُحوِّل الألواح الكهروضوئية الشمسية ضوء الشمس مباشرةً إلى كهرباء. فعندما تصطدم الأشعة الفردية القادمة من الشمس باللوح الشمسي وتُحرِّر الإلكترونات داخله، يتولد تيار كهربائي. إن المزية الأساسية في الألواح الشمسية هي إمكانية وضعها في الأماكن التي تحتاج إلى الطاقة، مما يتيح تفادي البنية التحتية المعقدة التي تُستخدم عادةً لنقل الكهرباء. وعلى مدار العقد الماضي، شهدت كفاءة الألواح الشمسية زيادة هائلة، حيث تبلغ كفاءة أفضل الألواح الشمسية المتوفرة تجاريًّا نحو ٢٣٪، وهو ما يفوق بكثير كفاءة عملية التمثيل الضوئي التي تبلغ نحو ١٪ فقط. وجديرٌ بالذكر أن كفاءة الألواح الشمسية تزداد خلال فصل الشتاء؛ إذ إنها تعمل على نحو أفضل في ظل درجات الحرارة المنخفضة، إلا أنها، بطبيعة الحال، تنتج كهرباء أقل خلال هذا الفصل نظرًا لِقصر النهار وانخفاض شدة أشعة الشمس. كما أن هناك انخفاضًا كبيرًا في أسعارها نتيجة الاستثمارات الضخمة في هذه التقنية.

الوقود الحيوي. هو ناتج عن تحويل الطاقة الشمسية عبر عملية التمثيل الضوئي إلى كتلة حيوية نباتية يمكن استخدامها بعد ذلك لإنتاج وقود سائل أو صلب. يعتمد الاقتصاد العالمي على استخدام الوقود الأحفوري السائل، لا سيما في قطاع النقل. لذلك، على المدى القصير، قد تصبح أنواع الوقود المستخرجة من النباتات وسيلة انتقالية منخفضة الكربون لتشغيل السيارات والسفن والطائرات. وفي النهاية، تُعَد السيارات الكهربائية هي المستقبل، حيث يمكن إنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيلها بطريقة محايدة كربونيًّا. ومع ذلك، فإن هذا المصدر من الطاقة لا يُعَد خيارًا متاحًا للطائرات. فالوقود التقليدي المستخدم في الطيران، «الكيروسين»، يجمع بين انخفاض الوزن والإنتاجية العالية الطاقة. تُجرى حاليًّا أبحاث على إمكانية إنتاج وقود حيوي، حيث يكون خفيف الوزن وقويًّا بما يكفي ليحل محل الكيروسين. تحولت العديد من محطات توليد الطاقة حول العالم بحيث

يمكنها حرق الكريات الخشبية بدلًا من الفحم أو الغاز الطبيعي لإنتاج البخار اللازم لتشغيل التوربينات وتوليد الكهرباء. لكن الأصوات الناقدة جادلت في أن كريات الخشب ليست مستدامة ولا تتمتع ببصمة كربونية منخفضة كما هو مزعوم.

طاقة الرياح. تُعَد توربينات الرياح وسيلة فعَّالة لتوليد الكهرباء شريطة أن تكون كبيرة الحجم، ويُفضَّل أن يكون موقعها في عُرض البحر. من الناحية المثالية، نحتاج إلى توربينات بحجم تمثال الحرية لتحقيق أقصى قدر من الفعالية. أنشئ مشروع «مصفوفة لندن» في مصبِّ نهر التيمز، على بعد ١٢ ميلًا من ساحل كِنت، ويضم ١٧٥ توربينًا. ومن المتوقع أن يُنتِج أكثر من ٢٥٠٠ ميجا واط، مما يجعله أكبر مزرعة رياح بحرية في العالم. ويمكن لهذا المشروع أن يشغِّل ما يصل إلى نصف مليون منزل، ويقلِّل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الضارة بنحو مليون طن سنويًّا. توجد بعض المشكلات المتعلقة بتوربينات الرياح. فأولًا، لا توفر مصدرًا ثابتًا للكهرباء؛ فإذا لم تهب الرياح أو إذا هبت بقوة شديدة، فلن تتولد أي كهرباء. ثانيًا، لا يُحبها الناس؛ إذ يرونها قبيحة المنظر ومزعجة ومثيرة للقلق بسبب التأثيرات التي قد تخلِّفها على الموائل الطبيعية المحلية. غير أن كل هذه المشكلات يسهل التغلب عليها من خلال إنشاء مزارع الرياح في أماكن نائية بعيدًا في عُرض البحر، وبعيدًا عن المناطق الخاصة ذات الأهمية العلمية أو الطبيعية. وقد أظهرت الأبحاث الحديثة عدم وجود تأثير يُذكر أو أي تأثير على الإطلاق على الحياة البرية المحلية حتى عند إنشاء توربينات الرياح بالقرب من اليابسة. وتشير إحدى الدراسات إلى أن الرياح، من حيث المبدأ، يمكنها أن تُنتج عالميًّا أكثر من ١٢٥ ألف تيرا واط في الساعة، وهو ما يعادل خمسة أضعاف متطلبات الكهرباء العالمية الحالية.

طاقة الأمواج والمد والجزر. قد تصبح طاقة الأمواج والمد والجزر أيضًا مصدرًا مهمًّا للطاقة في المستقبل. فالفكرة بسيطة: وهي تحويل الحركة المستمرة للمحيط على هيئة أمواج إلى كهرباء. لكن ذلك نظريًّا أسهل مما يبدو عليه في الواقع العملي؛ إذ يشير الخبراء في هذا المجال إلى أن تكنولوجيا طاقة الأمواج متأخرة بـ ٢٠ عامًا عن تكنولوجيا الألواح الشمسية. لكن طاقة المد والجزر تتمتع بمزيَّة رئيسية مقارنةً بالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وهي الثبات. فمن أجل الحفاظ على استقرار إمدادات الطاقة في أي بلد، يجب ضمان إنتاج ما لا يقل عن ٢٠٪ من الطاقة على نحوٍ مستمر، وهو ما يُعرَف بالمتطلب الأساسي. ومع التحول إلى مصادر الطاقة البديلة، لا بد من تطوير مصادر جديدة للطاقة تضمن توفير هذا الحد الأدنى الثابت من الإنتاج.

الطاقة الكهرومائية. تُعَد الطاقة الكهرومائية مصدرًا مهمًّا للطاقة على مستوى العالم، حيث وفرت عام ٢٠١٠ نسبة بلغت ٥٪ من إجمالي الطاقة العالمية. ويأتي معظم إنتاج الكهرباء من مشروعات السدود الكبرى. غير أن هذه المشروعات قد تثير مشكلات أخلاقية كبرى لأنها تستلزم إغراق مساحات شاسعة من الأراضي خلف السد، مما يؤدي إلى تهجير أعداد كبيرة من السكان وتدمير البيئة المحلية. كما أن السد يعمل على إبطاء تدفق المياه إلى النهر، مما يمنع ترسيب الطمي الغني بالمغذيات في المناطق الواقعة عند المصب. وإذا كان النهر يعبر حدودًا وطنية، فقد تنشأ خلافات حول حقوق المياه والطمي. فعلى سبيل المثال أحد الأسباب وراء غرق بنجلاديش يتمثَّل في نقص الطمي الناتج عن بناء السدود على الأنهار الرئيسية في الهند. كما أن هناك جدلًا حول مقدار ما توفره محطات الطاقة الكهرومائية من انبعاثات غازات الدفيئة، فصحيحٌ أن إنتاج الكهرباء ذاته لا يتسبَّب في انبعاثات كربونية، لكن تحلل النباتات المتعفنة في المنطقة التي غمرتها المياه خلف السد يؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من غاز الميثان.

الطاقة الحرارية الجوفية. توجد تحت أقدامنا في أعماق الأرض صخور منصهرة شديدة السخونة. في بعض المواقع، مثل آيسلندا وكينيا، تقترب هذه الصخور الساخنة جدًّا من سطح الأرض، ويمكن استخدامها لتسخين المياه وتحويلها إلى بخار. تُعَد هذه الطاقة مصدرًا ممتازًا خاليًا من الكربون، حيث يُستخدَم جزء من الكهرباء المُولَّدة من البخار لضخ المياه نحو الصخور الساخنة. لكن للأسف، توافرها محدود بسبب العوامل الجغرافية. ومع ذلك، هناك طريقة أخرى يمكن من خلالها الاستفادة من حرارة الأرض. إذ يمكن أن تحتوي كل الأبنية الجديدة على حفرة عميقة تحتها مزودة بمضخات حرارية أرضية. يمكن عندئذٍ ضخ المياه الباردة إلى هذه الحفر، فتعمل حرارة الأرض على تدفئة المياه، مما يقلل من تكلفة توفير المياه الساخنة للأبنية. كما يمكن استخدام هذه الطريقة في معظم أنحاء العالم.

الانشطار النووي. تُولَّد الطاقة عند انقسام ذراتٍ ثقيلة مثل اليورانيوم في عملية تُعرف بالانشطار النووي. تتميز هذه العملية بأن بصمتها الكربونية منخفضة للغاية، إلا أن كميات هائلة من الكربون تنبعث أثناء تعدين اليورانيوم، وبناء محطات الطاقة النووية، وتفكيكها، وكذلك أثناء تخزين النفايات النووية والتخلص منها بطرقٍ آمنة. في الوقت الحالي، تولِّد الطاقة النووية ٥٪ من الطاقة العالمية. يتميز الجيل الجديد من محطات الطاقة النووية بدرجة عالية من الكفاءة، حيث تحقق قرابة ٩٠٪ من إنتاج

الطاقة الممكن نظريًّا. أما العيوب الرئيسية للطاقة النووية فتتمثل في إنتاج مستويات عالية من النفايات المشعة، بالإضافة إلى المخاوف المتعلقة بالسلامة، ومع ذلك فقد ساهمت التحسينات في الكفاءة في تقليل مستويات النفايات، كما أن الجيل الجديد من المفاعلات النووية مزوَّد بأحدث مزايا الأمان المدمجة. ورغم هذه التطورات، فإن كارثة تشرنوبيل عام ١٩٨٦ وكارثة فوكوشيما دايتشي النووية عام ٢٠١١ أظهرتا أن المحطات النووية لا تزال غير آمنة؛ إذ تبقى عُرضة للأخطاء البشرية والمخاطر الطبيعية. على الجانب الآخر، تتمثل مزايا الطاقة النووية في كونها مصدرًا موثوقًا للطاقة، ويمكنها توفير الحمل الأساسي المطلوب في مزيج الطاقة، بالإضافة إلى أن تقنيتها متاحة بالفعل، وخضعت لاختبارات شاملة.

الاندماج النووي. ما يحدث في هذه العملية هو تولُّد الطاقة عند اندماج نواتَي ذرتين صغيرتين معًا. وهي العملية ذاتها التي تُضيء الشمس وكل النجوم الأخرى على كوكبنا. ترتكز الفكرة على إمكانية دمج الشكل الثقيل من الهيدروجين الموجود في مياه البحر وهو الديوتيريوم، مع النظير الثقيل الآخر للهيدروجين وهو التريتيوم؛ ولا ينتج عن هذه العملية أي نفايات سوى غاز الهيليوم غير المشع. وبالطبع تكمن المشكلة في تحفيز تلك النوى على الاندماج. في الشمس، يحدث الاندماج في النواة عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة للغاية. لقد أُحرزت تقدمات كبيرة في تقنيات الاندماج النووي على مستوى العالم، لكن ما هو مطلوب الآن هو ضخ استثمارات ضخمة لجعل الاندماج قابلًا للتطبيق تجاريًّا.

احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

قد يكون التخلص من ثاني أكسيد الكربون أثناء العمليات الصناعية أمرًا معقدًا ومكلفًا؛ إذ لا يقتصر الأمر على التخلص من الغاز فحسب، بل يوجِب أيضًا إيجاد وسيلة لتخزينه. ففي التقرير الخاص بشأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه الذي نُشر عام ٢٠٠٥، وصدر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ، أُشير إلى وجود التقنية اللازمة لاحتجاز الكربون وتخزينه، إلا أن الخبرة التجارية محدودة فيما يتعلق بدمج كل المكونات المطلوبة لإنشاء أنظمة متكاملة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على النطاقات اللازمة مستقبلًا. ومن المتوقع أن ترتفع تكاليف إنتاج الطاقة التي تتضمن تقنية احتجاز الكربون وتخزينه بنسبة لا تقل عن ١٥٪، وقد تصل الزيادة إلى ١٠٠٪. لا يتعين تخزين كل ثاني أكسيد الكربون المستخرج؛ فقد يُستخدم جزء منه في عمليات استخراج النفط،

وصناعة الأغذية، والتصنيع الكيميائي (لإنتاج كربونات الصوديوم، واليوريا، والميثانول)، وكذلك في صناعات معالجة المعادن. كما يمكن الاستفادة من ثاني أكسيد الكربون في إنتاج مواد البناء والمذيبات ومركبات التنظيف والتعبئة والتغليف، ومعالجة مياه الصرف الصحي. يتعين في الواقع تخزين معظم ثاني أكسيد الكربون الذي احتُجز من العمليات الصناعية. وقد قُدِّر نظريًّا أن ما يصل إلى ثلثَي ثاني أكسيد الكربون الناتج عن احتراق إجمالي احتياطيات النفط والغاز في العالم يمكن تخزينه في الخزانات المناسبة. وتشير التقديرات إلى إمكانية تخزين ما بين ٩٠ و٤٠٠ جيجا طن في حقول الغاز الطبيعي وحدها، بالإضافة إلى ٩٠ جيجا طن أخرى في الطبقات الجوفية المائية.

يمكن استخدام المحيطات أيضًا لإزالة غاز ثاني أكسيد الكربون. وقد شملت الاقتراحات تخزينه عبر كب الهيدرات: حيث يؤدي مزج ثاني أكسيد الكربون بالماء تحت ضغط عالٍ ودرجات حرارة منخفضة إلى تكوُّن مادة صلبة أو هيدرات يكون وزنها أثقل من المياه المحيطة بها، ومن ثَم تهبط إلى القاع (انظر شكل ٦-٤). وكذلك أشار مقترح أحدث إلى حقن ثاني أكسيد الكربون، على عمق نصف ميل، في الصخور البركانية المتصدعة بين التدفقات الهائلة من الحمم البركانية. وحينها سيذيب الماء الحمضي المعادن التي في الصخور، وبالأخص الكالسيوم والألومنيوم. وعندما يتحد ثاني أكسيد الكربون مع الكالسيوم وتتكون بيكربونات الكالسيوم، فإنه لن يتمكن من التحرر أو الهروب. وإذا تسرب إلى المحيط، فإن أيونات البيكربونات تصبح غير ضارَّة نسبيًّا. مع تخزين الكربون في المحيطات، ثمة تعقيد إضافي يتمثَّل في دوران المحيطات، مما يعني أن أي كمية من ثاني أكسيد الكربون التي ستُغرَق في المحيط سيعود جزءٌ منها في النهاية إلى الغلاف الجوي. علاوة على ذلك، لا يزال العلماء غير متأكدين تمامًا من تأثير هذا الحل في الأنظمة البيئية البحرية.

إن المشكلة الكبرى في كل هذه الأساليب الخاصة بتخزين ثاني أكسيد الكربون هي مسألة السلامة. يُعَد ثاني أكسيد الكربون غازًا شديد الخطورة؛ لأنه أثقل من الهواء، وقد يتسبَّب في الاختناق. وقد تجلى هذا الخطر بوضوحٍ عام ١٩٨٦، عندما أدى انبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون من بحيرة نيوس غرب الكاميرون إلى مقتل أكثر من ١٧٠٠ شخص ونفوق أعداد كبيرة من الماشية على امتداد ٢٥ كيلومترًا. ورغم وقوع كوارث مشابهة فيما مضى، لم يسبق أن تعرَّض هذا العدد الكبير من البشر والحيوانات للاختناق بهذا الحجم وفي فترة وجيزة كهذه. يعتقد العلماء الآن أن ثاني أكسيد الكربون

المذاب — الذي مصدره بركان قريب — قد تسرَّب إلى البحيرة عبر الينابيع الموجودة أسفلها، وبقي محتجزًا في المياه العميقة بفعل ضغط المياه أعلاه. وفي عام ١٩٨٦، تسبَّبت انهيارات أرضية في اضطراب مياه البحيرة، مما أدى إلى انقلاب كامل لمياهها وانبعاث سريع لجميع كميات ثاني أكسيد الكربون المحتجزة. ومع ذلك، تُضَخ كميات هائلة من ثاني أكسيد الكربون القديم إلى مختلف أنحاء الولايات المتحدة لتعزيز استخراج النفط دون الإبلاغ عن أي حوادث كبرى. ويرى المهندسون العاملون في خطوط الأنابيب هذه أنها أكثر أمانًا من خطوط أنابيب الغاز والنفط، التي تمرُّ العديد منها عبر كبريات المدن الأمريكية.

النقل

تُعَد وسائل النقل أحد التحديات التي تواجه جهود التخفيف من انبعاثات غازات الدفيئة. في الوقت الحالي، تمثِّل وسائل النقل ١٤٪ من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة على مستوى العالم. وفي العديد من الدول المتقدمة، تشهد انبعاثات الكربون الناجمة عن إنتاج الطاقة والقطاعات التجارية والسكنية انخفاضًا، رغم النمو الاقتصادي السنوي؛ لكن انبعاثات وسائل النقل، خاصةً السيارات والطيران، لا تزال في ازدياد. يطمح الكثيرون في العالم النامي إلى تحقيق المستوى نفسه من امتلاك السيارات والسفر الدولي كما هي الحال في الدول المتقدمة، مما يعني أن هناك احتمالًا لنمو هائل في انبعاثات قطاع النقل.

شهدت السيارات الكهربائية على مدار العقد الماضي تحسنًا ملحوظًا من حيث مداها التشغيلي وأداؤها، وتبلور قبول عامٌّ بأنها تُمثِّل مستقبل النقل. عجَّل من انتشار هذا القبول جائحة عام ٢٠٢٠ حينما كادت أن تتوقف حركة المرور على الطرق في العديد من المناطق بسبب إغلاق الأنشطة التجارية، فلاحظ الجميع التحسن الهائل في جودة الهواء. إذا حدث تحوُّل كامل إلى المركبات الكهربائية، أي بنسبة ١٠٠٪، فسيؤدي ذلك إلى خفض تلوث الهواء بنسبة ٥٠٪. أما الـ ٥٠٪ الأخرى المساهمة في تلوث الهواء، فترجع إلى التآكل المستمر للإطارات، وبطانات المكابح، ومادة خرسانة الأسفلت المستخدمة على الطرق. قد يكون للسيارات الكهربائية تأثير كبير على خفض انبعاثات الكربون، لكن ذلك يعتمد على ضمان توفير مصدر كهرباء منخفض الكربون أو محايد كربونيًّا. في المملكة المتحدة، لن تُباع سوى السيارات الكهربائية اعتبارًا من عام ٢٠٣٤، وستُحظَر المحركات التي تعمل بالوقود الأحفوري بحلول عام ٢٠٤٠، بينما في ولاية كاليفورنيا، يجب أن تكون كل

المركبات الجديدة المطروحة للبيع اعتبارًا من عام ٢٠٣٥ لا تتسبَّب في أي انبعاثات على الإطلاق.

يمثِّل الشحن والطيران الدوليان ٣٫٢٪ من انبعاثات غازات الدفيئة العالمية سنويًّا. أصبحت الطائرات هدفًا سائغًا للمهتمين بتغيُّر المناخ؛ إذ إن رحلات الطيران الدولية باتت رمزًا بارزًا على الاستهلاك، ولم تُغطها أبدًا أي معاهدة دولية. لذا، بات من الضروري تقديم حوافز تحث على تحسين كفاءة استهلاك الكربون في الرحلات الجوية، وجعلها في نهاية المطاف محايدة كربونيًّا قدر الإمكان. لكن المشكلة الأساسية تكمن في أن المعاهدات الدولية الحالية تحظر فرض أي ضرائب على وقود الطيران. وُقِّعت عام ١٩٤٤ اتفاقية الطيران المدني الدولي — والمعروفة أيضًا باسم «اتفاقية شيكاغو» — وجرى تعديلها ثماني مرات. تتناول هذه الاتفاقية القواعد واللوائح اللازمة التي تتيح تسيير الرحلات الجوية بين الدول. كما تنص على إعفاء الوقود والزيت وقطع الغيار والمعدات الأساسية والمخزون الجوي من أي نوع من الضرائب، مما يعني أن فرض ضريبة كربونية على وقود الطيران بهدف تعزيز الكفاءة غير مسموح به حاليًّا. وهذا أمرٌ مؤسف؛ لأننا لا نستطيع فقط بناء طائرات أكثر كفاءة بكثير في الوقت الحاضر، بل هناك أيضًا بدائل وقود يمكننا استخدامها. يمكن تطوير الوقود الحيوي ليُستخدم كمادة مضافة أو حتى كبديل عن وقود الطائرات التقليدي، وهو الكيروسين. بل إنه من الممكن تصنيع الكيروسين الصناعي من خلال استخراج ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي ودمجه مع الماء. هذه العملية تتطلب كميات هائلة من الطاقة، ولكن في حال استخدام الكهرباء المولَّدة من مصادر متجددة، فمن الممكن إنتاج وقود طيران يساهم في خفض انبعاثات الكربون. ومع ذلك، فإن نجاح هذا يعتمد على وجود لوائح تنظيمية أو فرض ضريبة على استهلاك الكربون تجعل إنتاج الكيروسين الصناعي مُجديًا من الناحية الاقتصادية. على المدى القصير، وفي ظل غياب حلٍّ حقيقي لوقود الطيران، تحرص شركات الطيران إلى المشاركة في تجارة الكربون. وبهذه الطريقة، يمكن لشركات الطيران تعويض انبعاثاتها الكربونية من خلال ضمان خفض قدر مماثل من الانبعاثات في أماكن أخرى.

الخيار الآخر هو إقناع الأفراد باستخدام وسائل النقل العام بدلًا من سياراتهم أو الطائرات. فمن الواضح لمعظم الناس أن توفير حافلات كهربائية يسهل الوصول إليها وبرسومٍ منخفضة، إلى جانب سيارات الأجرة وخطوط المترو والسكك الحديدية، سيساعد في تقليل عدد الرحلات بالسيارات. كما يمكن لوسائل النقل العام أن تساهم في

شحن البضائع وتسليمها، حيث يمكن استخدام شبكة السكك الحديدية خلال الليل لنقل البضائع داخل البلاد وبين الدول. ويمكن أيضًا استخدام السكك الحديدية كبديل عن الرحلات الجوية الداخلية والدولية. وقد قُدِّر أن جميع الرحلات الجوية الداخلية بين المدن الأمريكية التي تقل المسافة بينها عن ٦٠٠ ميل يمكن أن تحل محلها قطارات كهربائية فائقة السرعة تسير بسرعة تتجاوز ٢٠٠ ميل في الساعة، مما يوفر وسيلة تنقل أسرع وأكثر أمانًا وأقل مساهمةً في تلوُّث البيئة. وهذا من شأنه أن يُغني عن ٨٠٪ من الرحلات الجوية داخل الولايات المتحدة، لكنه يتطلب تشغيل قطارات فائقة السرعة على طول الساحلين الشرقي والغربي، مع ربطهما بمركزَي النقل الرئيسيين في شيكاغو وأطلانطا. يوجد بالفعل هذا النوع من شبكات القطارات فائقة السرعة في اليابان وكوريا الجنوبية وأجزاء من الصين والاتحاد الأوروبي، وكل ما تحتاجه هو توسيع نطاقها لتشمل بقية أنحاء العالم.

لقد عززت جائحة كوفيد-١٩ خلال عامَي ٢٠٢٠/٢٠٢١ استخدام الإنترنت وعقد مؤتمرات عبر الفيديو، حيث أثبتت إمكانية تجنب قدر كبير من التنقلات بعد أن وجد كثير من الناس راحةً أكبر في العمل من المنزل. كما أثبتت هذه الجائحة إمكانية عقد العديد من الاجتماعات الدولية، بما في ذلك المؤتمرات العلمية الضخمة، بنجاحٍ كبير باستخدام تقنيات الوصول عن بُعد. وإذا أدى ذلك إلى تراجع على المدى الطويل في السفر المحلي والدولي، فسيصبح حينها إزالة الكربون من شبكات النقل لدينا أكثر سهولة.

الدعم على الوقود الأحفوري

إن إحدى المشكلات السياسية الكبرى المتعلقة بخفض انبعاثات الكربون ترتبط بدعم الطاقة. فأولًا، هناك دعم هائل على الوقود الأحفوري، مما يجعل النفط والغاز والفحم أرخص نسبيًّا. وثانيًا، هناك مقاومة لتقديم الدعم والحوافز الضريبية إلى شركات الطاقة من أجل بناء وتوفير طاقة متجددة بأسعار تنافسية. يشير تقرير حديث صادر عن صندوق النقد الدولي إلى أن صناعة الوقود الأحفوري تتلقى أكثر من ٥,٢ تريليونات دولار سنويًّا في شكل دعم (أي ما يقرب من ضعف إجمالي الناتج المحلي السنوي للمملكة المتحدة) شاملًا المدفوعات المباشرة، والتخفيضات الضريبية، وتخفيض أسعار التجزئة، فضلًا عن تكلفة الأضرار الناجمة عن تغيُّر المناخ. من هذا المبلغ، تقدم الحكومات ما لا يقل عن ٧٧٥ مليار دولار أمريكي إلى تريليون دولار أمريكي كدعم، بالإضافة إلى

ما لا يقل عن ٤٤٤ مليار دولار سنويًّا كتمويل مباشر لشركات النفط والغاز والفحم لدعم عمليات الاستكشاف والاستخراج والتطوير. هناك أيضًا تكلفة أمنية هائلة مرتبطة بالوقود الأحفوري. فجزء كبير من السياسات الخارجية والاستراتيجيات العسكرية للعديد من الدول يتضمن حماية خطوط الشحن الخاصة بالوقود الأحفوري. على سبيل المثال، ينفق الجيش الأمريكي ما لا يقل عن ٨١ مليار دولار أمريكي سنويًّا لحماية إمدادات النفط. وعلى النقيض من ذلك، لا توجد حاملات طائرات تحمي سلاسل توريد توربينات الرياح أو الاحتياطيات الاستراتيجية من السيليكون المستخدم في الألواح الشمسية.

يشير تقرير صندوق النقد الدولي إلى أن دعم الوقود الأحفوري يمثِّل ٨٥٪ من إجمالي الدعم العالمي، وأنه لا يزال يشغل جزءًا كبيرًا من السياسات المحلية. ويعتقد صندوق النقد الدولي أنه لو كانت الدول قد خفَّضت في عام ٢٠١٥ الدعم على الوقود الأحفوري بما يعكس سعره الحقيقي، لكانت الانبعاثات الكربونية انخفضت عالميًّا بنسبة ٢٨٪، وتراجعت الوفيات نتيجة تلوث الهواء بالوقود الأحفوري بنسبة ٤٦٪، وحققت الحكومات زيادة في الدخل بنسبة ٣٫٨٪ من إجمالي الناتج المحلي. لكن على ما يبدو أن دعم الوقود الأحفوري قد ألحق ضررًا بالبيئة والاقتصاد.

فلماذا يستمر إذن دعم الوقود الأحفوري؟ قد يُعزى السبب إلى ملكية الشركات الكبرى للنفط والغاز. فمن بين ٢٦ شركة كبرى في مجال النفط والغاز، هناك فقط ٧ شركات يملكها قطاع خاص؛ بينما الـ ١٩ شركة المتبقية تملكها دولٌ امتلاكًا جزئيًّا أو كليًّا. ومن ثَم، تُدرُّ الشركات التي تملكها الدولة مكاسب طائلة لصالح الدولة، وستظل تلك الشركات تُمنح الدعم الحكومي في هيئة دعم مالي وتخفيضات ضريبية حتى تضمن الاحتفاظ بمكانتها التنافسية أمام الدول الأخرى المنتجة للنفط والغاز. لكن من المتوقع أن يزداد الوضع سوءًا مع تقنية التكسير الهيدروليكي وثورة الغاز الصخري، بعد أن اكتشفت العديد من البلدان، مثل الولايات المتحدة والمملكة المتحدة، مستودعات جديدة من الغاز الطبيعي تحت الأرض.

تداول الكربون، الضرائب، المعاوضة

هناك ثلاثة نُهُج رئيسية يمكن اتباعها لتقليل انبعاثات الكربون إلى الصافي الصفري. يتمثَّل النهج الأول في فرض ضريبة انبعاثات الكربون على الأنشطة والسلع التي تنتج كميات كبيرة من الكربون. يتفق معظم الاقتصاديين على أن الضرائب الكربونية هي

الوسيلة الأكثر كفاءة وفعالية للحد من الانبعاثات دون الإضرار بالاقتصاد. ولتجنُّب الوقوع في فخ الضرائب الرجعية، ينبغي تخصيص الإيرادات من الضرائب لدعم الفئات الأقل حظًّا في المجتمع والأكثر تأثرًا بهذه الضرائب. طُبِّقت الضرائب على الانبعاثات الكربونية في ٢٥ دولة، بينما فرضت ٤٦ دولة أحد أشكال التسعير على الكربون، سواء من خلال فرض ضرائب على الانبعاثات الكربونية أو نظم تداول الانبعاثات.

أما النهج الثاني، فهو «تداول الكربون» كما ناقشه الفصل السابع، حيث تُحدَّد انبعاثات الكربون من خلال إصدار تصاريح الكربون. قد يؤدي تداول الكربون إلى تحفيز الابتكار وخفض التكاليف. كما يُعَد وسيلة لجعل الطاقة المتجددة واحتجاز الكربون وتخزينه مجديًا من الناحية الاقتصادية. تسمح بعض أنظمة تداول الانبعاثات للشركات بشراء معاوضات كربونية، سواء على المستوى الوطني أو الدولي لتُحتسب ضمن إجمالي انبعاثاتها.

تُعرَّف معاوضة الكربون بأنه تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أو غيره من غازات الدفيئة بهدف موازنة الانبعاثات الناتجة في أماكن أخرى. ويمكن تحقيق ذلك إما عن طريق زيادة تخزين الكربون من خلال برامج إعادة التشجير، أو عبر إزالة الانبعاثات أو إيقاف مصدرها، مثل إغلاق محطة لتوليد كهرباء تعمل بالفحم. يتوفر نظامان رئيسيان لمعاوضة الكربون وهما: آلية التنمية النظيفة التابعة للأمم المتحدة والأسواق الطوعية. تناول الفصل السابع آلية التنمية النظيفة، وهي تتضمن تمويل برامج معتمدة من الأمم المتحدة في الدول النامية لتحقيق تخفيضات كبيرة في انبعاثات غازات الدفيئة. أما نظام الأسواق الطوعية، فقد بلغ ذروته من حيث الحجم في عام ٢٠٠٨، لكنه شهد زيادة كبيرة منذ عام ٢٠١٨. ويعود ذلك إلى تبني عدد كبير من الشركات حول العالم أهدافًا تستند إلى أُسُس علمية، مما يعني أنها تسعى إلى تحقيق الحياد الكربوني بحلول عام ٢٠٥٠ إن لم يكن قبل ذلك. ومن بين هذه الشركات ١٥ شركة طيران، مثل إيزي جيت والخطوط الجوية البريطانية وطيران الإمارات التي أعلنت جميعها عن مخططات رئيسية لمعاوضة الكربون.

تُعَد معاوضة الكربون أداة سياسية مهمة يمكنها المساهمة في تقليل إجمالي الانبعاثات، خاصةً في القطاعات التي يصعب حاليًّا خفض الانبعاثات فيها. لذا ظهرت الحاجة إلى وضع لوائح وطنية ودولية جديدة لضمان المراقبة والتحقق الفعالين من برامج التعويض. علاوة على ذلك، يلزم وجود رقابة لضمان عدم تلاعب الشركات بالنظام

عبر اختلاق انبعاثات متعمدة للحصول على أموال مقابل وقفها. على سبيل المثال، ربحت إحدى الشركات الصينية ٥٠٠ مليون دولار أمريكي من معاوضات الكربون عن طريق تركيب محرقة بقيمة ٥ ملايين دولار أمريكي لحرق مركبات الهيدروفلوروكربون الناتجة عن تصنيع المبردات. وقد سارت العديد من الشركات على هذا النهج إلى أن صارت مركبات الهيدروفلوروكربون مستبعدة من برامج معاوضة الكربون.

إعادة التحريج وتجديد الحياة البرية

إحدى أهم الطرق لإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي هي إعادة التحريج وتجديد الحياة البرية. منذ بداية الزراعة، يُقدَّر أن البشر قد قطعوا ٣ تريليونات شجرة، أي نحو نصف الأشجار على الأرض. لذا، فنحن نعلم أن كوكب الأرض لديه القدرة على استيعاب مساحة أكبر من الغابات. قد تصبح استعادة الموائل وإعادة التحريج أسهل في المستقبل؛ إذ إن العالم سيصبح بالفعل مكانًا أكثر بريَّة. قد يبدو هذا متناقضًا؛ نظرًا لأن عدد سكان العالم سيرتفع من ٧٫٨ مليارات اليوم إلى ١٠ مليارات نسمة بحلول عام ٢٠٥٠، ولكن بحلول ذلك الوقت، سيعيش نحو ٧٠٪ منا في المدن، وسنكون قد هجرنا العديد من المناطق الريفية النائية، مما يجعلها مناسبة لاستعادة الحياة البرية فيها. شهدت أوروبا عودة نمو ٢٫٢ مليون هكتار من الغابات سنويًّا بين عامَي ٢٠٠٠ و٢٠١٥. وفي إسبانيا، ازدادت مساحة الرقعة الخضراء من ٨٪ من مساحة البلاد في عام ١٩٠٠ إلى ٢٥٪ اليوم، بينما في المملكة المتحدة، تراجعت مساحة الرقعة الخضراء إلى ٥٪ بعد الحرب العالمية الأولى، لكنها عادت الآن إلى ١٣٪.

إن إعادة التحريج على نطاقٍ واسع ليست مجرد حلم بعيد المنال؛ بل قد يعود بنفع حقيقي على البشر. في أواخر تسعينيات القرن العشرين، وصل التدهور البيئي في غرب الصين إلى مستويات حرجة حيث تحولت مساحات شاسعة إلى ما يشبه المناطق شبه الصحراوية في الغرب الأوسط الأمريكي خلال ثلاثينيات القرن العشرين. أطلقت ستة برامج جريئة استهدفت إعادة تحريج ما يزيد على ١٠٠ مليون هكتار من الأراضي. وكان برنامج «الحبوب مقابل الخضرة» هو الأبرز والأكثر شهرة من بين تلك البرامج. أثمرت هذه المبادرات الأساسية لزراعة الأشجار عن نتائج مذهلة حيث استقرت التربة بفعل الأشجار، مما أدى إلى تقليل التعرية إلى حد كبير والتخفيف من تأثيرات الفيضانات. أضافت الأشجار الرطوبة إلى الغلاف الجوي من خلال عملية النتح، مما أدى إلى خفض

معدل التبخر وفقدان المياه. وعندما وصلت الغابات إلى حجم ومساحة حرجة، بدأت أنماط هطول الأمطار في الاستقرار. كل هذه العوامل مجتمعةً ساهمت في تعزيز الإنتاج الزراعي المحلي. كما ساعد البرنامج الدائم في التخفيف من حدة الفقر، حيث تلقَّى المزارعون مدفوعات مباشرة مقابل ترك أراضيهم لإعادة تحريجها. كان هذا مثالًا رائعًا على الحلول الرابحة التي يحتاجها العالم لمواجهة تغيُّر المناخ، حيث عزز تخزين الكربون، وحسَّن البيئة المحلية، وساعد في الحد من الفقر المدقع.

في عام ٢٠١٩، زعم الباحثون في مجلة «ساينس» أن تغطية ٩٠٠ مليون هكتار من الأراضي — ما يقارب حجم الولايات المتحدة القارية — بتريليون شجرة يمكن أن تخزن ما يصل إلى ٢٠٥ مليارات طن من الكربون، نحو ثلثَي الكربون الذي أطلقه البشر بالفعل في الجو. لقد جذب شعار «تريليون شجرة» اهتمام الجمهور، بل إن الرئيس ترامب أعلن في منتدى دافوس أن هذه فكرة جيدة. المشكلة الوحيدة أن البحث الذي أنتج هذا الرقم المرتفع من الانبعاثات الكربونية كان قائمًا على أخطاء جوهرية، وفي الواقع تشير اللجنة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ ودراسات أخرى إلى أن الغابات الجديدة قد تخزن في المتوسط ٥٧ مليار طن إضافي من الكربون بحلول نهاية القرن. لكن لا يزال هذا الرقم كبيرًا، ولكن بالنظر إلى أننا نطلق ١١ مليار طن من الكربون في الجو سنويًّا، فإن هذا لا يمثِّل إلا ٥ سنوات من التلوث الناتج عن النشاط البشري. لذلك لا يُعَد إعادة التحريج بديلًا عن الخفض السريع والعميق لانبعاثات الوقود الأحفوري لدينا. ولكن في وقت لاحق من هذا القرن، سنحتاج إلى خفض انبعاثات الكربون إلى قيم سالبة للحفاظ على الاحترار العالمي عند ١,٥ درجة مئوية، وهو ما يمكن تحقيقه عن طريق إعادة التحريج.

انضمت بالفعل ٦٣ دولة إلى تحدي بون، وتعهدت بإعادة تأهيل ٣٥٠ مليون هكتار من الأراضي المتدهورة عالميًّا إلى غابات. وهذه المساحة تعادل ١٥ ضعف مساحة المملكة المتحدة. لكن هناك قضية أخرى. فإعادة التحريج على نطاق واسع لا تؤتي ثمارها إلا إذا جرى الحفاظ على الغطاء الأخضر الحالي في العالم، والعمل على زيادة رقعته. وكما ذكرنا سابقًا، ازداد معدل إزالة الغابات في غابة الأمازون المطيرة — وهي الأكبر في العالم — منذ أن تولى السلطة الرئيس البرازيلي اليميني المتطرف جايير بولسونارو. وتشير التقديرات الحالية إلى أنه تُزال كل دقيقة مساحات من الغابات المطيرة بحجم ملعب كرة قدم.

إن القيد الأساسي في إعادة التحريج والتشجير هو المساحة المتاحة من الأراضي، حيث لا تستوعب الأشجار سوى كمية محدودة من الكربون. ولا بد أن نتذكر أيضًا

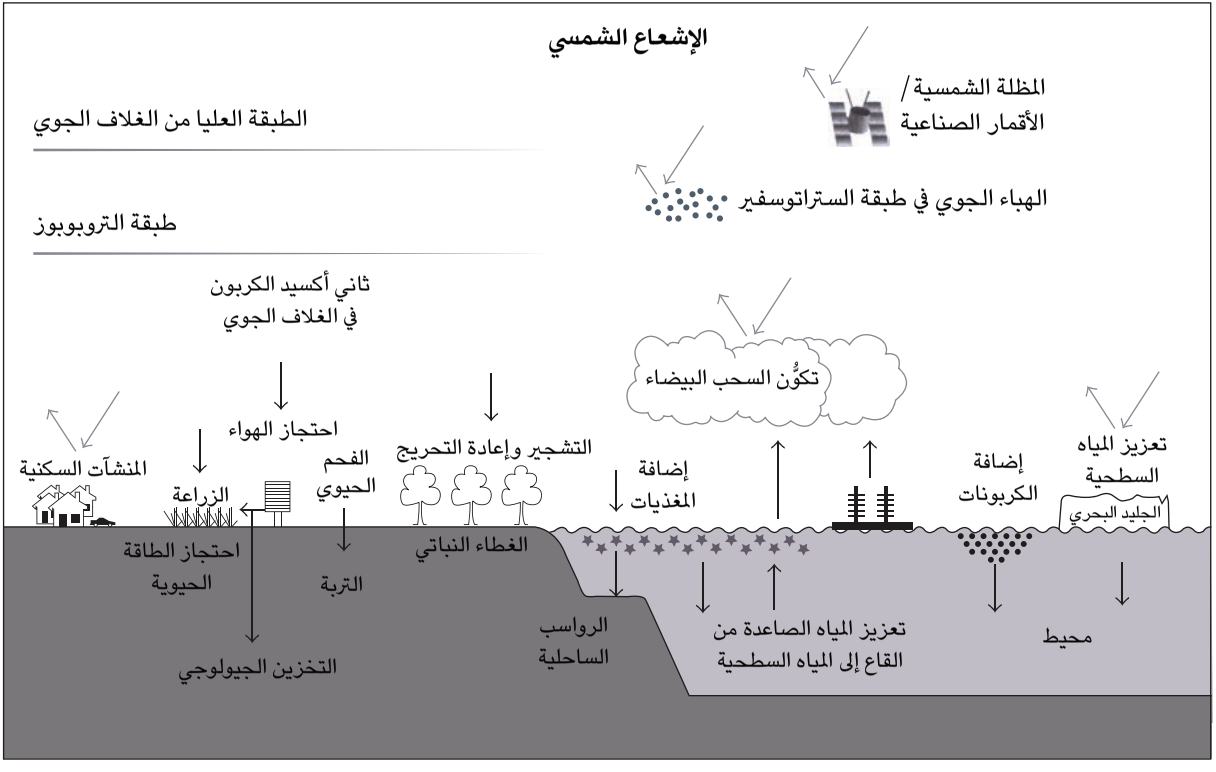
أن إعادة التحريج ليست دائمًا الخيار الأفضل، ولهذا يُستخدم مصطلح «تجديد الحياة البرية» جنبًا إلى جنب مع إعادة التحريج. على سبيل المثال، قد يكون لتجفيف الأراضي الرطبة أو الأراضي الخثيَّة من أجل زراعة الغابات أثر عكسي، حيث ستصبح القدرة على تخزين الكربون أقل، بينما ستكون خسائر التنوع البيولوجي كبيرة. لذا، يجب تطبيق المشروع الأكثر ملاءمة لاستعادة الحياة البرية في كل منطقة من العالم. قد يشمل ذلك إعادة ترطيب الأراضي الرطبة، أو الحفاظ على المستنقعات الخثية، أو إعادة إنماء غابات المانجروف، أو الإبقاء على المراعي المفتوحة. إذا كانت منطقة ما مناسبة لإعادة التحريج، فيجب اتخاذ قرارات بشأن الأنواع النباتية الأكثر ملاءمة وفقًا للمناخ الحالي والمستقبلي، مع مراعاة كيفية تعزيز التنوع البيولوجي المحلي والخدمات البيئية الأخرى. ومن بين الانتقادات الموجهة إلى «تحدي بون» أن نحو نصف التعهدات تتعلق بإقامة غابات تجارية واسعة النطاق. ومثل هذه الغابات لا تحتجز الكربون إلا أثناء نمو الأشجار، فيما يُعاد إطلاق جزء كبير من هذا الكربون عند قطع الأشجار. وعلى أي حال، فإن مزارع الغابات ذات النوع الواحد من الأشجار ضارة بالتنوع البيولوجي.

الهندسة الجيولوجية أو الحلول التقنية

الهندسة الجيولوجية هي المصطلح العام المستخدم للتقنيات التي يمكن استخدامها إما لإزالة غازات الدفيئة من الغلاف الجوي وإما لتغيير مناخ الأرض (انظر الشكل ٨-٤). تتنوع الأفكار المطروحة تحت مظلة الهندسة الجيولوجية بين أفكارٍ معقولة جدًّا وأخرى جنونية تمامًا. فالهندسة الجيولوجية ليست بديلًا عن التخفيضات الهائلة في انبعاثات غازات الدفيئة العالمية. لكن يرى معظم الناس حلول الهندسة الجيولوجية كخطة احتياطية إذا كنا غير قادرين أو غير راغبين في خفض انبعاثات غازات الدفيئة بالسرعة الكافية.

إزالة ثاني أكسيد الكربون. هناك ثلاثة نُهُج رئيسية لإزالة ثاني أكسيد الكربون الجوي وتخزينه: النهج البيولوجي والنهج الفيزيائي والنهج الكيميائي.

(١) **إزالة ثاني أكسيد الكربون بيولوجيًّا**. يحاول بعض الباحثين إدراج إعادة التحريج وتجديد الحياة البرية ضمن الهندسة الجيولوجية حتى تبدو أكثر قبولًا. إلا أن هذا الأمر غير مناسب؛ لأن هذه الأساليب تفتقر إلى المتطلبات الهندسية الأساسية. أحد المقترحات الهندسية لتعزيز الامتصاص البيولوجي لثاني أكسيد الكربون هي تسميد



شكل ٨-٤: نطاق نُهج الهندسة الجيولوجية.

المحيطات بالحديد. أشار عالم المحيطات الراحل جون مارتن إلى تراجع النشاط البيولوجي للعديد من المحيطات بسبب نقص العديد من العناصر المغذية الدقيقة الهامة، وعلى رأسها الحديد الذي يسمح بنمو النباتات في المياه السطحية. تحتاج النباتات البحرية إلى كميات ضئيلة من الحديد التي لا يمكن أن تنمو من دونها. وفي معظم المحيطات، يحمل الهباءُ غبارًا غنيًّا بالحديد من اليابسة، لكن يبدو أن مساحات شاسعة من المحيط الهادي والمحيط المتجمد الجنوبي لا تتلقى كميات كافية من هذا الغبار، مما يجعلها تفتقر إلى الحديد. وبناءً على ذلك، اقترح مارتن تسميد المحيط بالحديد لتحفيز الإنتاجية البحرية. إذ ستؤدي عملية التمثيل الضوئي الإضافية إلى تحويل المزيد من ثاني أكسيد الكربون في المياه السطحية إلى مادة عضوية. وعند نفوق الكائنات الحية، تهبط هذه المادة العضوية إلى قاع المحيط، حيث تأخذ معها الكمية الإضافية من الكربون وتخزنها في الرواسب. يُعاد تزويد المياه السطحية التي انخفض فيها ثاني أكسيد الكربون بثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. وباختصار، فقد يساعد تسميد محيطات العالم في إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وتخزينه في الرواسب العميقة لقاع البحر. لقد ظهر تباين شديد في نتائج التجارب التي اختبرت هذه الفرضية، حيث لم تُظهر بعض التجارب أي تأثيرات على الإطلاق، في حين أظهرت تجارب أخرى أن كمية الحديد المطلوبة هائلة. ومع ذلك، فإن العيب الأكبر هو أنه بمجرد التوقف عن إضافة الحديد الإضافي، سيتحرر معظم ثاني أكسيد الكربون المخزَّن، حيث لا يُسمح إلا لكمية ضئيلة جدًّا من المادة العضوية بالترسب من المنطقة الضوئية سنويًّا. كما أن تسميد المحيطات سيؤثر تأثيرًا هائلًا في النظم البيئية البحرية والتنوع الحيوي؛ نظرًا لأن هذه عملية متعمدة لإغناء المحيطات بالمغذيات على نطاق واسع.

(٢) **إزالة ثاني أكسيد الكربون فيزيائيًّا**. من الممكن إزالة ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء. ومع ذلك، بالنظر إلى أن ثاني أكسيد الكربون لا يشكل سوى ٠٫٠٤٪ من الغلاف الجوي، فإن هذه العملية أكثر صعوبةً وتكلفةً مما قد يبدو عليه الأمر. وقد ظهرت فكرة في البداية تقترح تصنيع أشجار صناعية أو بلاستيكية. فقام الفيزيائي النظري كلاوس لاكنر، والمهندس ألين رايت، بدعم من عالم المناخ والي بروكر، بتصميم بلاستيك قادر على الارتباط بثاني أكسيد الكربون وامتصاصه من الغلاف الجوي. بعد ذلك يتحرر ثاني أكسيد الكربون من البلاستيك، وينتقل إلى مرحلة التخزين. تتمثل المشكلة الأولى في المياه، فحينما يبتل البلاستيك فإنه يطلق ثاني أكسيد الكربون ويذوب

في الماء، مما يعني أن الأشجار البلاستيكية يجب أن توضع في مناطق شديدة الجفاف، أو أن تُزوَّد بمظلات ضخمة لحمايتها. أما المشكلة الثانية، فهي القدر المطلوب من الطاقة لبناء هذه الأشجار البلاستيكية وتشغيلها، ثم تخزين ثاني أكسيد الكربون الناتج منها. والمشكلة الثالثة تتعلق بالحجم؛ إذ يتطلب التعامل مع انبعاثات الكربون في الولايات المتحدة وحدها عشرات الملايين من هذه الأشجار الصناعية العملاقة. المِيزة التي تتمتع بها هذه الأشجار البلاستيكية مقارنة بالأشجار الطبيعية هي أنها لا تقتصر على دورة نمو واحدة، كما أن ثاني أكسيد الكربون يمكن نظريًّا تخزينه إلى أجل غير مسمًّى. تتطور بوتيرة سريعة تقنيات أخرى لإزالة ثاني أكسيد الكربون سواء من مصدره أو من الغلاف الجوي. على سبيل المثال، تعتمد تقنية «كلايم وركس» على مراوح عملاقة لجمع ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء، مما يوفر ثاني أكسيد كربون نقيًّا يمكن استخدامه في العمليات الصناعية أو حتى في تصنيع الوقود الاصطناعي. لكن المشكلة الآن تتعلق بالتكلفة والتمويل أكثر من كونها مشكلة هندسية.

(٣) **إزالة ثاني أكسيد الكربون كيميائيًّا.** يُزال ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي بشكلٍ طبيعي على مدى مئات وآلاف السنين من خلال عملية التجوية بمعدل ٠٫١ جيجا طن من الكربون سنويًّا، إلا أن هذا المعدل أقل بمائة مرة من كمية الانبعاثات التي نطلقها. وحدها تجوية المعادن السيليكاتية تؤثر في مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي؛ إذ إن تجوية الصخور الكربونية بواسطة حمض الكربونيك تؤدي إلى إعادة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي. تشمل نواتج تفاعلات التحلل المائي التي تؤثر في المعادن السيليكاتية أيونات البيكربونات التي تخضع لعملية الأيض في العوالق البحرية، وتتحول إلى كربونات الكالسيوم. وفي النهاية، تترسب بقايا هياكل الكائنات البحرية المتكونة من الكلسيت في قاع البحر العميق، مما يؤدي إلى انفصالها عن دورة الكربون البيوجيوكيميائية العالمية طوال مدة دورة حياة القشرة المحيطية التي ترسبت عليها.

هناك عدد من أفكار الهندسة الجيولوجية التي تهدف إلى تعزيز تفاعلات التجوية الطبيعية. من بين الاقتراحات إضافة معادن السيليكات إلى التربة المستخدمة في الزراعة. وهذا يؤدي بدوره إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وتحويله إلى معادن كربونات وأيونات بيكربونات ذائبة في الماء. إلا أن نطاق تطبيق هذه العملية واسعًا، كما أن تأثيراتها في التربة وخصوبتها لا تزال غير معروفة. وثمة اقتراح آخر يتمثَّل في

تعزيز معدل تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الصخور البازلتية والأوليفينية في القشرة الأرضية. يُحقن ثاني أكسيد الكربون المركز في باطن الأرض، ويكوِّن الكربونات في الأعماق الجوفية. ومن الأمثلة على ذلك مشروع «كارب فيكس» في محطة الطاقة الحرارية الجوفية «أون باور» في آيسلندا، حيث تُستخدَم تقنية «كلايم وركس» لاستخلاص ثاني أكسيد الكربون النقي وضخه في التكوينات الصخرية البازلتية تحت سطح الأرض. توفر هذه العملية الطاقة الحرارية الجوفية المتجددة اللازمة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء وضخه، حيث تشير التقديرات الأولية إلى أن هذا النظام يمكن أن يزيل على نحوٍ دائم ٤٠٠٠ طن من ثاني أكسيد الكربون من الهواء سنويًّا. لوضع ذلك في السياق، قد تحتاج آيسلندا إلى ١٠٠٠ منشأة مماثلة لإزالة إجمالي انبعاثاتها السنوية الحالية من الكربون. أما الجانب الإيجابي، فهو أن هذا المشروع قد أتاح لنا الآن نظامًا معتمدًا ومختبرًا آمنًا لاحتجاز الكربون وتخزينه.

إدارة الإشعاع الشمسي. إن تقليل كمية ضوء الشمس التي تصل إلى الأرض أو تمتصها يؤدي إلى خفض إجمالي ميزانية الطاقة، وقد يصبح كوكب الأرض على إثر ذلك أشد برودةً. وكما يتضح مما سبق، فإن بعض حلول الهندسة الجيولوجية لا تزال مجرد أفكار تتطلب الكثير من العمل لمعرفة مدى قابلية تطبيقها. ينطبق هذا خصوصًا على أفكار إدارة الإشعاع الشمسي التي قد تبدو كأنها مستوحاة من أفلام هوليوودية رديئة. تشمل هذه المقترحات تغيير مستوى عاكسية سطح الأرض (راجع الفصل الرابع) لزيادة كمية الطاقة الشمسية المنعكسة إلى الفضاء، بهدف موازنة الاحترار الناجم عن تغيُّر المناخ (انظر الشكل ٨-٤). ومن بين الأفكار المطروحة لزيادة مستوى العاكسية، إقامة مرايا ضخمة في الفضاء، وضخ الهباء الجوي في الغلاف الجوي، وجعل المحاصيل أكثر عاكسية، وطلاء كل الأسطح باللون الأبيض، وزيادة الغطاء السحابي الأبيض، وتغطية مساحات شاسعة من صحاري العالم بألواح من البولي إيثيلين والألومنيوم العاكس.

تكمن المشكلة الأساسية في كل هذه النهج في أننا لا نملك أي وسيلة للتنبؤ بتأثيرها الشامل في المناخ. لنتأمل فكرة المرايا في الفضاء التي طرحها روجر آنجل، مدير مركز البصريات الفلكية التكيفية بجامعة أريزونا. أولًا، ستكون هذه الفكرة مكلفة للغاية، إذ تتطلب ١٦ تريليون مركبة فضائية خفيفة الوزن وشفافة، بتكلفة لا تقل عن تريليون دولار أمريكي، وسيستغرق إطلاقها ٣٠ عامًا. ثانيًا، على غرار كل أفكار الهندسة الجيولوجية الرامية إلى تغيير مستوى عاكسية الأرض، ربما لا تكون هذه الفكرة مجدية على نحو ما نأمل. تهدف هذه النُّهج إلى خفض متوسط درجة حرارة الأرض، لكنها قد تؤثر في

توزيع درجات الحرارة حسب دوائر العرض، وهو ما يُعَد العامل الأساسي الذي يتحكم في المناخ. أظهرت بعض النماذج المناخية أن هذه النُّهج قد تؤدي إلى مناخ عالمي مختلف، حيث قد تصبح المناطق الاستوائية أبرد بمقدار ١,٥ درجة مئوية، بينما تصبح المناطق الواقعة على دوائر عرض عالية أكثر دفئًا بمقدار ١,٥ درجة مئوية، في حين تتغيَّر معدلات الهطول على نحوٍ غير متوقع في مختلف أنحاء العالم.

حوكمة الهندسة الجيولوجية

تتمثل إحدى القضايا الرئيسية المتعلقة بالهندسة الجيولوجية في كيفية حوكمة المجموعات والشركات والدول التي تتدخل في نظام المناخ العالمي. ظهرت العديد من القضايا الأخلاقية عند التفكير في كيفية تأثير التغيُّرات المناخية الإقليمية والعالمية في الدول على نحوٍ متفاوت. قد تبدو النتائج إيجابية بوجهٍ عام، لكن حتى التغييرات الطفيفة في أنماط هطول الأمطار قد تؤدي إلى هطول أمطار غزيرة أو شحيحة على بعض البلدان، مما قد يؤدي إلى حدوث كوارث محتملة. تبرز ثلاث وجهات نظر رئيسية بشأن الهندسة الجيولوجية: (١) أنها وسيلة لشراء بعض الوقت حتى تلحق مفاوضات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المناخ بالركب، مما يتيح تحقيق صافي الانبعاثات الصفري بحلول عام ٢٠٥٠؛ أو (٢) أنها تمثِّل تلاعبًا خطيرًا بنظام الأرض، وقد يكون غير أخلاقي في جوهره؛ أو (٣) أنها مجرد بوليصة تأمين لدعم جهود التخفيف والتكيف في حال لم تكن كافية بمفردها. حتى لو سُمح بمواصلة الأبحاث في هذا المجال وأصبح من الضروري اللجوء إلى حلول الهندسة الجيولوجية، فكما هي الحال مع العديد من المجالات الناشئة في التكنولوجيا الحديثة، ستكون هناك حاجة إلى أطر حوكمة ولوائح تنظيمية مرنة جديدة. يوجد حاليًّا العديد من المعاهدات الدولية المرتبطة بالهندسة الجيولوجية، لكن يبدو أنه لا توجد أداة واحدة تنطبق عليها. لذا، فإن الهندسة الجيولوجية، مثلها مثل تغيُّر المناخ، تتحدى رؤيتنا لعالم قائم على الدول القومية، مما يستلزم استحداث أساليب جديدة للحوكمة في المستقبل.

إذا أردنا حل مشكلات تغيُّر المناخ، فإننا بحاجة إلى معالجة قضيتين أساسيتين. الأولى هي كيف يمكننا تقليل انبعاثات غازات الدفيئة إلى الصافي الصفري، مع تمكين الدول الأكثر فقرًا من تحقيق التنمية. يبلغ عدد سكان العالم حاليًّا ما يزيد قليلًا عن ٧,٨ مليارات نسمة، ومن المرجح أن يرتفع هذا العدد ويستقر عند ١٠ مليارات بحلول عام ٢٠٥٠. وسيؤدي ذلك إلى أن ٨ مليارات شخص سيسعون إلى اتباع نمط الحياة نفسه

الذي يتمتع به سكان العالم المتقدم، مما قد يؤدي إلى زيادة هائلة في انبعاثات غازات الدفيئة خلال هذا القرن إذا سلكوا مسار التنمية نفسه لتحقيق هذا الحلم الاستهلاكي. أما القضية الثانية فهي ما إذا كنا كمجتمع مستعدين للاستثمار بنسبة صغيرة نسبيًّا — تتراوح بين ١–٣٪ من إجمالي الناتج المحلي العالمي — لتجنب فاتورة أكبر بكثير في المستقبل. وإذا كنا مستعدين، فإننا نمتلك حاليًّا التكنولوجيا اللازمة لحماية سكاننا من تأثيرات تغيُّر المناخ وللتخفيف من الانبعاثات الهائلة المتوقعة لغازات الدفيئة خلال الـ ٨٠ عامًا القادمة. إذ لكلٍّ من كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة واحتجاز الكربون وتخزينه وتداول الكربون ومعاوضة الكربون، أدوار تؤديها. لا بد أن نأخذ في الاعتبار أيضًا «التقنيات الثورية»، وهي تقنيات جديدة ربما لم نفكر في أنها قد تغيِّر من طريقة إنتاجنا أو استخدامنا للطاقة. على سبيل المثال، لا يستطيع معظمنا تخيل الحياة من دون هاتف محمول أو كمبيوتر رغم أن هذه التكنولوجيا لم تنتشر إلا منذ بضعة عقود فقط، مما يثبت مدى سرعتنا في اعتياد التغيير. هناك أيضًا فرص هائلة لتحقيق أرباح كبيرة من التغييرات المحيطة باستخدامنا للطاقة وأنماط حياتنا الشخصية، وكما سنرى في الفصل التاسع، قد تكون هناك العديد من الحالات المربحة للطرفين حيث يمكن تحسين جودة الحياة وتحقيق الاستقرار المناخي في الوقت نفسه.

الفصل التاسع

تغيير مستقبلنا

مقدمة

يجب أن يُنظر إلى تحدي تغيُّر المناخ في إطار المشهد السياسي والاقتصادي السائد حاليًّا. ولا يمكننا أن نتطلع إلى بناء أنظمة قادرة على تقليل الانبعاثات الكربونية بوتيرة سريعة إلا من خلال فهم الأسباب المجتمعية والاقتصادية الجذرية المسببة لها. وفي الوقت نفسه الذي نعالج فيه تغيُّر المناخ، من الضروري أن نتأكد من أننا نعالج التحديات العالمية الأخرى، مثل الفقر وغياب المساواة على مستوى العالم وتدهور البيئة وعدم الأمان العالمي. كما تحتاج السياسات المستقبلية والاتفاقيات الدولية إلى تقديم حلول مربحة للطرفين تعالج أكبر التحديات التي تواجه البشرية في القرن الحادي والعشرين.

إدارة الكوكب

يواجه العلماء صعوبة في التعامل مع حقيقة أنه، على الرغم من الثقل الهائل للأدلة التي تشير إلى تغيُّر المناخ، لا تزال أقلية صغيرة، ولكنها صاخبة ومؤثرة، تنكر حدوث تغيُّر المناخ. وقد استجاب العلماء لهذا بالتركيز على جمع المزيد من الأدلة. يُطلق على هذا النهج اسم استجابة «نموذج العجز»، حيث يفترض العلماء عدم اتخاذ القرارات المتعلقة بالتخفيف من تأثيرات تغيُّر المناخ بسبب نقص المعلومات.

مع ذلك، اكتشف علماء الاجتماع أن قبول تغيُّر المناخ لا يرتبط بالعلم بقدر ما يرتبط بالسياسة. فقبول تغيُّر المناخ يمثِّل تحديًا للرؤية النيوليبرالية الأنجلو-أمريكية التي يتبناها العديد من الاقتصاديين والسياسيين التقليديين. يكشف تغيُّر المناخ عن فشل جوهري في السوق، وهو ما يفرض على الحكومات أن تعمل بشكل جماعي لتنظيم

العمليات الصناعية والتجارية. ومن المفارقات البارزة أن السياسيين الذين ينكرون تغيُّر المناخ بسبب تهديداته المفترضة لقيم السوق الحر، هم أنفسهم الأكثر دعمًا لتقديم أكثر من ٥ تريليونات دولار أمريكي من الدعم السنوي لصناعة الوقود الأحفوري. فمن غير الصحيح تمامًا الاعتقاد بوجود سوق حر؛ إذ إن العديد من الدول تؤيد بكل ترحيب تقديمَ الدعم المالي وفرض قيود على الواردات.

تجسِّد الليبرالية الحديثة مجموعة من المعتقدات التي تشمل: ضرورة أن تكون الأسواق حرة، وأن يكون تدخل الدولة محدودًا قدر الإمكان، وضمان حقوق ملكية خاصة قوية، وفرض ضرائب منخفضة، وتعزيز النزعة الفردية. يستند جوهر الليبرالية الحديثة على افتراض أنها توفر حلًّا قائمًا على السوق يسمح للجميع بأن يصبحوا أكثر ثراءً. وقد شكَّل هذا المفهوم، المعروف باسم «الاقتصاد المتدرج»، الركيزة الأساسية لليبرالية الحديثة على مدار الـ ٤٠ عامًا الماضية، إلا أنه لا يوجد أي دليل على تحققه. يعيش نصف سكان العالم على أقل من ٥ دولارات أمريكية ونصف دولار يوميًّا. وفي الواقع، قدَّرت منظمة أوكسفام أن أغنى ٢٦ شخصًا في العالم يمتلكون حاليًّا مقدار الثروة نفسه الذي يمتلكه أفقر ٣,٨ مليارات شخص مجتمعين. وقد صرَّح صندوق النقد الدولي مؤخرًا بأن الجيل الأخير من السياسات الاقتصادية ربما يكون قد فشل تمامًا.

لقد غيَّرت جائحة كوفيد-١٩ العالمية التي بدأت في عام ٢٠٢٠ نظرة الكثيرين إلى الليبرالية الحديثة. فقد أدرك المواطنون في كل أنحاء العالم أنه قد يوجد شكل مختلف من العلاقات بين الحكومة والصناعة والمجتمع المدني، وهي علاقة تُمنح فيها الأولوية للصحة والرفاهية على المكاسب الاقتصادية للدولة أو للأقليات. عندما تواجه المجتمعات أزمة حقيقية تتطلب استجابة قوية ومنسَّقة، فإنها تلجأ إلى الدولة وإلى الخبراء العلميين، ودعم المجتمع المدني. قد يؤدي القطاع الخاص دورًا مهمًّا، مثل تأمين الإمدادات الغذائية في مواجهة موجات التهافت على الشراء، أو إعادة تنظيم إنتاج المستلزمات الطبية الأساسية أو تطوير اللقاحات. ولكن، في المقابل، تلجأ العديد من الشركات إلى الدولة بحثًا عن القروض وحزم الإنقاذ المالي.

في ضوء التحديات الطويلة الأجل التي يفرضها تغيُّر المناخ وفقدان التنوع البيولوجي واحتمالية تكرار الأوبئة، فإن الدرس الأهم الذي نتعلمه من جائحة كوفيد-١٩ هو فشل الأسواق الحرة في حمايتنا. وبدلًا من ذلك، فإن السبيل الأمثل لمواجهة تغيُّر المناخ وسائر تحديات القرن الحادي والعشرين يكمن في تدخل حكومي موجَّه من قِبل الخبراء، يعزز

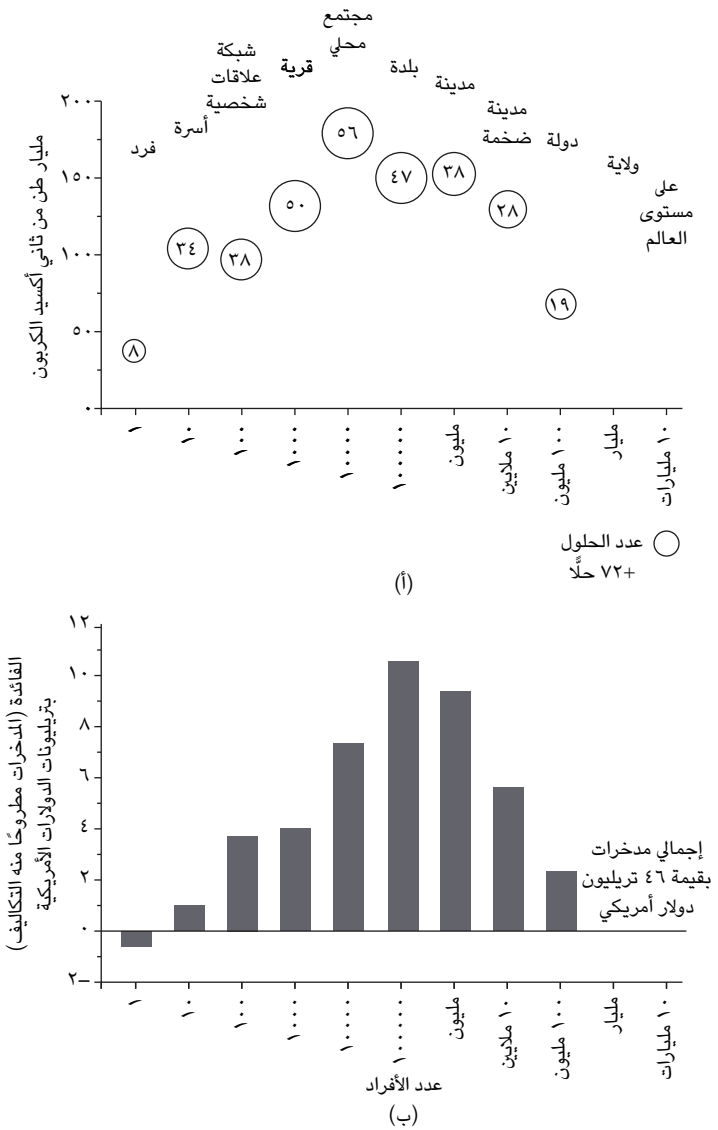
دور المجتمعات ويثمِّن قيمتها، ويحظى بدعم قطاع أعمال نشط ومساند. ما نحتاجه هو عصرٌ جديد من إدارة الكوكب تقوده الحكومات وترتكز فيه على نظريات اقتصادية جديدة.

اتخاذ الإجراءات

طرح الفصل الثامن الحلول المحتملة لتقليل انبعاثات الكربون العالمية، ولكن إذا كنا نطمح إلى تحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام ٢٠٥٠، فيجب علينا تنفيذ كل هذه الحلول. لقد حدد مشروع «داون درو» (المتاح على https://drawdown.org/) أكثر من ٨٠ حلًّا رئيسيًّا يمكن تطبيقه على مستويات مختلفة لإزالة الانبعاثات المطلوبة والبالغة ١٠٥٠ جيجا طن من الكربون بحلول عام ٢٠٥٠. يوضح الشكل ٩-١، المستند إلى أعمال أفيت بهاوميك وزملائه، عدد الحلول التي يمكن تنفيذها في كل مستوًى، بدءًا من مستوى الأفراد وصولًا إلى المستوى العالمي. يمكن للإجراءات التي يتخذها الأفراد والعائلات أن تساهم في إزالة ١٤٪ من إجمالي ١٠٥٠ جيجا طن من الكربون المطلوب، بينما قد تساهم الإجراءات المتخذة على مستوى المدن والمجتمعات في إزالة ٣١٪، في حين أن التدابير المتخذة على مستوى المدن والولايات قد تساهم في إزالة ٣٣٪. وهذا الطرح بمثابة رد حاسم على منكري تغيُّر المناخ الذين يدَّعون أن المسئولية تقع على عاتق الأفراد وليس الشركات أو الحكومات. هذا التحول في إلقاء اللوم يسمح لمنكري تغيُّر المناخ بمواصلة دعم صناعة الوقود الأحفوري، بحجة أنها ببساطة تُلبي متطلبات السوق. يُعَد العمل الفردي والجماعي أمرًا مهمًّا؛ إذ يُظهر للحكومات والشركات جدية الأفراد في اتخاذ الإجراءات لمواجهة تغيُّر المناخ، لكنه ليس الحل. تصبح حلول تغيُّر المناخ أكثر فاعلية عندما يأتي تنفيذها من المجتمع وصولًا إلى المستوى الوطني. تحقق كل هذه الحلول مكاسب متبادلة، وإذا ما جُمعت معًا، فقد يصل صافي الفائدة (أي المدخرات مطروحًا منه التكاليف) إلى أكثر من ٤٦ تريليون دولار أمريكي.

الحكومات والمؤسسات والمجتمع المدني

إن الخفض الفعال في انبعاثات الكربون يتطلب شراكة بين الحكومة — على مستويَيها المحلي والوطني — والشركات، والمجتمع المدني، على أن يكون ذلك مدعومًا ومُعزَّزًا بتغيير في سلوك الأفراد.



شكل ٩-١: الحلول المحتملة لمواجهة تغيُّر المناخ من المستوى الفردي إلى المستوى العالمي.

تتحكم الحكومات في تطلعات المجتمع المدني من خلال سيادة القانون وتطوير السياسات. ومن الواضح أن الحكومات بمقدورها استخدام الحوافز والدعم المالي والضرائب واللوائح لجعل مجتمعاتنا أكثر استدامة ومحايدة كربونيًّا. كما تُعَد الحكومات المحرِّك الرئيسي للابتكار، وذلك من خلال الاستثمار في أبحاث الجامعات، وتمويل الأبحاث والتطوير الصناعيين، وتعزيز الطلب عبر الحوافز. كما في وسع الحكومات أن تسهِّل الانتقال السريع من الوقود الأحفوري إلى الطاقة المتجددة، وتضمن أن تكون الأبنية محايدة كربونيًّا، وتشجع إعادة التشجير وتجديد الحياة البرية في مساحات شاسعة، وتعزز أساليب الزراعة المنخفضة الانبعاثات والأنظمة الغذائية التي تعتمد اعتمادًا أكبر على النباتات، إضافةً إلى دعم الفئات الأشد فقرًا في المجتمع للمساعدة في تعزيز القدرة على الصمود أمام التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ.

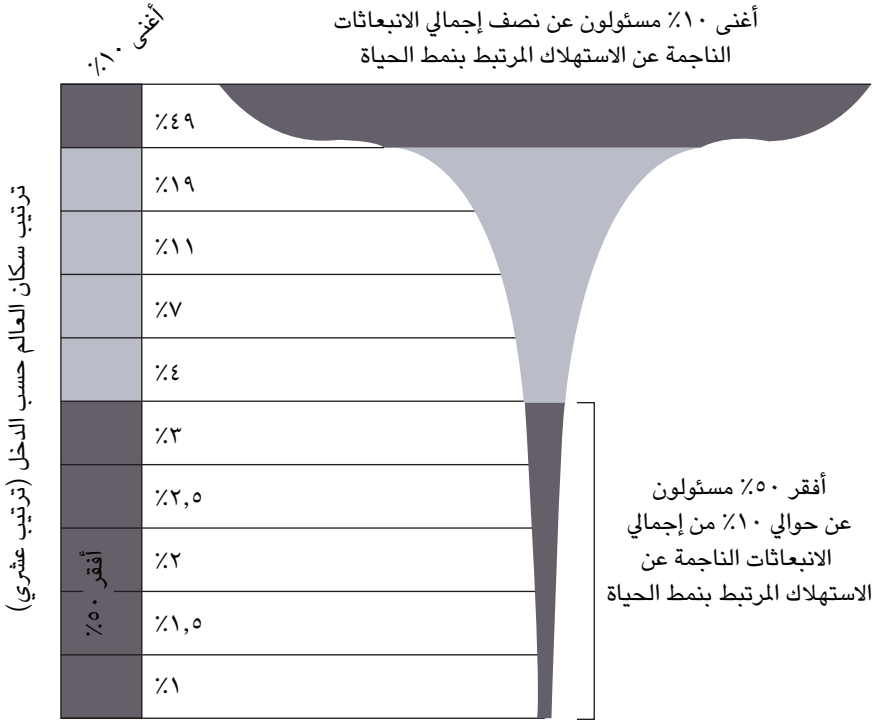
تجني أكبر ١٠٠ شركة حول العالم أكثر من ١٥ تريليون دولار أمريكي من العائدات سنويًّا. وتتحكم الشركات في حياتنا بطرق عديدة، حيث تؤثر على ما نأكله، وما نشتريه، وما نشاهده، وحتى من سنمنحه صوتنا. وقد بدأت العديد من هذه الشركات بالفعل في التغيير، متبنية أهدافًا مستندة إلى أُسُس علمية، لتحقيق صافي انبعاثات كربونية صفري بحلول عام ٢٠٥٠. يتمثَّل التحدي الذي يواجه قطاع الأعمال والصناعة، إذا ما أرادوا الاحتفاظ بمكانتهم وموثوقيتهم في القرن الحادي والعشرين، في تغيير علاقتهم بالبيئة والمجتمع. إن النموذج الاقتصادي الخطي التقليدي، «الاستخراج، التصنيع، التخلص»، يعتمد على كميات كبيرة من المواد والطاقة الرخيصة المتوفرة. لكننا اليوم نقترب من الحدود الفيزيائية لهذا النموذج. فتخرج إلى النور نظريات اقتصادية جديدة شاملة تكشف عن القضايا الأساسية المرتبطة بثقافة الشركات الاستهلاكية القائمة على هدر الموارد. ويُعَد الاقتصاد الدائري ضرورة حتمية إذا أرادت الشركات أن تكون جزءًا من حل مشكلة تغيُّر المناخ. يعمل الاقتصاد الدائري على تقليل كمية الموارد إلى الحد الأدنى وتعظيم قيمة المنتجات والمواد طوال دورة حياتها، وذلك بتطبيق عمليتَي إعادة الاستخدام وإعادة التدوير. قد يساهم تطبيق نموذج الاقتصاد الدائري في تحقيق مكاسب تصل إلى ١,٨ تريليون يورو لصالح الاقتصاد الأوروبي. لذا، يتعيَّن على الشركات التخطيط وتطوير منتجات تتمتع بعمر تشغيلي طويل وبقابليتها للترقية وإمكانية إعادة تدويرها. كما يجب عليها العمل على استبعاد النفايات والتلوث من أنظمتها الإنتاجية.

على الرغم من أن الإجراءات الفردية لن تسهم إلا بقدر ضئيل في تقليل انبعاثات الكربون، فإنها ذات أهمية بالغة؛ إذ تبعث برسالة قوية إلى كلٍّ من الحكومات والشركات

مفادها أن المواطنين يرغبون في تغييرات جذرية ويدعمونها. لقد كان للأفعال الفردية تأثير ملموس. إذ أدت إضرابات المدارس من أجل المناخ واحتجاجات التمرد ضد الانقراض إلى جمع مجموعات متنوعة من الأفراد من مختلف أنحاء العالم تحت مظلة واحدة، مطالبين الحكومات بأخذ مسألة حماية كوكبنا على محمل الجد. بدأ التغيير بالفعل، حيث أعلنت أكثر من ١٤٠٠ حكومة محلية وأكثر من ٣٥ دولة أننا نواجه حالة طوارئ مناخية. ومع ذلك، ينبغي أن نتذكر أن المسئولية عن الأزمة المناخية الحالية ليست متساوية بين الجميع: إذ إن ٥٠٪ من انبعاثات الكربون المرتبطة مباشرة بأنماط الحياة تصدر عن أغنى ١٠٪ من سكان العالم (انظر الشكل ٩-٢)، في حين أن أفقر ٥٠٪ من المجتمع العالمي لا يتسببون إلا في ١٠٪ من التلوث. لذلك، فإن اتخاذ إجراءات فردية من قِبل الفئات الأكثر ثراءً في المجتمع قد يكون له تأثير كبير في إجمالي الانبعاثات الكربونية العالمية.

المؤسسات الدولية

من أجل دعم وتشجيع وفرض التغيير الإيجابي عند الضرورة، نحتاج إلى منظمات دولية تكون على قدر تحديات القرن الحادي والعشرين. تأسست العديد من هذه المنظمات، مثل الأمم المتحدة، والبنك الدولي، وصندوق النقد الدولي، مباشرة بعد الحرب العالمية الثانية. أما منظمات أخرى مثل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية ومنظمة الدول المصدرة للنفط، فقد أُنشِئت في أوائل ستينيات القرن العشرين. هناك حاجة إلى أن تمثِّل هذه المؤسسات الدولية كل سكان العالم، وأن تضمن حوكمة عادلة ومنصفة. يمكن إعادة تصميم البنك الدولي وصندوق النقد بحيث يركزان على تطوير الاقتصاد الأخضر المستدام، ودعم أهداف صافي الانبعاثات الصفرية، والتخفيف من حدة الفقر، على أن تكون أهداف التنمية المستدامة في صميم كل قراراتهما. إن الهدف الحالي لمنظمة التجارة العالمية هو ضمان تدفق التجارة بسلاسة وعلى نحو متوقع وحر قدرَ الإمكان، ولكن تشجيع التجارة والاستهلاك يزيد من صعوبة خفض الانبعاثات الكربونية العالمية. كما يمكن أن يعيق اللوائح وتدابير الحماية البيئية المؤثرة على المستويات المحلية والوطنية والدولية. وربما يمكن لمنظمة التجارة الدولية أن تتحول إلى «منظمة الاستدامة العالمية»، بحيث يكون هدفها الأول الدعم والمساعدة في إعادة هيكلة اقتصاد الدول التي تعتمد على تصدير الوقود الأحفوري.



شكل ٩-٢: انبعاثات الكربون الناتجة عن أنماط الحياة على مستوى العالم مصنفةً بحسب فئات الدخل.

إحدى التغييرات السريعة والبسيطة التي يمكن إجراؤها هي ترقية برنامج الأمم المتحدة للبيئة، نظرًا لوضعه الثانوي داخل منظومة الأمم المتحدة، حيث يأتي في مرتبة أدنى من التجارة، والصحة، والعمل؛ بل من الشئون البحرية، والملكية الفكرية، والسياحة. تُعَد ميزانية برنامج الأمم المتحدة للبيئة محدودة؛ إذ لا تتجاوز ربع ميزانية منظمة الصحة العالمية التابعة للأمم المتحدة، ولا تشكل سوى عُشر ميزانية برنامج الأغذية العالمي التابع للأمم المتحدة، على الرغم من دوره المركزي في كلٍّ من الصحة والأمن الغذائي. إذا جرى ترقية برنامج الأمم المتحدة للبيئة لتصير منظمة الأمم المتحدة للبيئة العالمية، ومُنحت ميزانية تعادل على الأقل ميزانية منظمة الصحة العالمية، فسيكون بإمكانها الإشراف

على أهداف التنمية المستدامة، واتفاقية التنوع البيولوجي، واتفاقية تغيُّر المناخ، لضمان التعزيز المتبادل بين الأهداف وعدم تعارضها، مما يكفل إيجاد حلول تحقق مكاسب للجميع.

الخاتمة

يُعَد تغيُّر المناخ أحد المجالات العلمية القليلة التي تدفعنا إلى إعادة النظر في الأسس التي تقوم عليها المجتمعات الحديثة. فهو موضوع يثير الجدل بين السياسيين، ويؤجج التنافس بين الدول، ويطرح تساؤلات حول دور الشركات في المجتمع، ويناقش الخيارات الفردية لأنماط الحياة، وفي نهاية المطاف، يسلط الضوء على علاقة البشرية ببقية الكوكب. لا يمكننا مواجهة واحدة من أعظم الأزمات التي واجهتها الإنسانية على الإطلاق إلا من خلال التعاون المشترك. فلا يوجد أدنى شك في أن تغيُّر المناخ سيتسارع خلال هذا القرن؛ إذ تشير أفضل التقديرات إلى أن متوسط درجة حرارة سطح الأرض سيرتفع بمقدار يتراوح بين ٢,١ و٥,٥ درجات مئوية بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين. ومن المتوقع أن يرتفع مستوى سطح البحر بما يتراوح بين ٥٠سم و١٣٠سم بحلول عام ٢١٠٠، مما سيؤدي إلى تغيُّرات كبيرة في أنماط الطقس وزيادة الظواهر المناخية المتطرفة. وقد تعهَّد قادة العالم بالحدِّ من ارتفاع درجات الحرارة العالمية بحيث لا يتجاوز درجتين مئويتين، وإن أمكن إبقاؤه دون ١,٥ درجة مئوية. وقد أثبت هذا الكتاب أن لدينا من العلوم ما يمكِّننا من فهم أسباب تغيُّر المناخ وتداعياته، إلى جانب الحلول المحتملة لمواجهته. كما نملك التكنولوجيا والموارد والتمويل اللازمين للتعامل مع هذه الأزمة. غير أن ما ينقصنا حاليًّا هو الإرادة السياسية والسياسات التي تُمكِّننا من تنفيذ الحلول الإيجابية التي تحقق المنفعة للجميع، من أجل بناء عالم أكثر أمانًا وصحةً وازدهارًا. ومع تزايد الوعي بالأزمة البيئية التي تواجه كوكب الأرض، يتصاعد الضغط الجماهيري مطالبًا بالتغيير، وعلى إثره بدأت سياسات وأفكار جديدة في الظهور. والسؤال المطروح هو ما إذا كانت ستأتي هذه التغييرات بالسرعة الكافية لتمكين العالم من تحقيق صافي انبعاثات كربونية صفرية بحلول عام ٢٠٥٠ (انظر الشكل ٩-٣).

شكل ٩-٣: رسم كاريكاتيري من صحيفة «يو إس إيه توداي» بشأن مؤتمر المناخ في كوبنهاجن.

قراءات إضافية

تاريخ تغير المناخ

Corfee-Morlot, J., et al. Climate science in the public sphere, *Philosophical Transactions A of the Royal Society*, 365/1860 (2007): 2741–76.

Leggett, J. K. *The Winning of the Carbon War: Power and Politics on the Front Lines of Climate and Clean Energy* (Crux Publishing, 2018).

Lewis, S. L. and M. A. Maslin *The Human Planet: How Humans Caused the Anthropocene* (Penguin and Yale University Press, 2018).

Mann, M. *The New Climate War: The Fight to Take Back Our Planet* (PublicAffairs, 2021).

Oreskes, N. and M. Conway *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming* (Bloomsbury, 2012).

Ruddiman, W. F. *Plows, Plagues, and Petroleum: How Humans Took Control of Climate* (Princeton Science Library, 2016).

Weart, S. R. *The Discovery of Global Warming, New Histories of Science, Technology, and Medicine* (Harvard University Press, 2008).

العلم

Archer, D. *Global Warming: Understanding the Forecast*, 2nd edn (John Wiley & Sons, 2011).

Dessler, A. E. *The Science and Politics of Global Climate Change: A Guide to the Debate*, 3rd edn (Cambridge University Press, 2019).

Emanuel, K. *What We Know about Climate Change*, updated edn (The MIT Press, 2018).

Houghton, J. T. *Global Warming: The Complete Briefing*, 5th edn (Cambridge University Press, 2015).

IPCC, Climate Change 2021—The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2021).

Lenton, T. *Earth System Science: A Very Short Introduction* (OUP, 2016).

Maslin, M. The five corrupt pillars of climate change denial (The Conversation, 2019). https://theconversation.com/the-five-corrupt-pillars-of-climate-change-denial-122893

Maslin, M. Five climate change science misconceptions—debunked (The Conversation, 2019). https://theconversation.com/five-climate-change-science-misconceptions-debunked-122570

Maslin, M. A. and S. Randalls (eds) *Routledge Major Work Collection: Future Climate Change: Critical Concepts in the Environment* (4 volumes containing reproductions of eighty-five of the most important papers published on climate change) (Routledge, 2012).

National Climate Assessment. Volume I: Climate Science Special Report (2018). https://science2017.globalchange.gov/

Romm, J. *Climate Change: What Everyone Needs to Know* (OUP, 2018).

التأثيرات

Costello, A., et al. Managing the health effects of climate change, *The Lancet*, 373 (2009): 1693–733.

Garcia R. A., et al. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity, *Science*, 344 (2014): 486–96.

IPCC, Climate Change 2021—Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

National Climate Assessment. Volume II: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States (2018) https://nca2018.globalchange.gov/

Stern, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review* (Cambridge University Press, 2007).

Watts, N., et al., The 2020 Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change (The Lancet, 2020).

السياسة والحوكمة

Figueres, C. and T. Rivett-Carnac. *The Future We Choose: Surviving the Climate Crisis* (Manilla Press, 2020).

Giddens, A. *The Politics of Climate Change*, 2nd edn (Polity Press, 2011).

Grubb, M. *Planetary Economics: Energy, Climate Change and the Three Domains of Sustainable Development* (Routledge, 2014).

Gupta, J. *The History of Global Climate Governance* (Cambridge University Press, 2014).

IPCC, Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Klein, N. *On Fire: The Burning Case for a Green New Deal* (Allen Lane, 2019).

Labatt S. and R. R. White *Carbon Finance* (Wiley, 2007).

Metcalf, G. E. *Paying for Pollution: Why a Carbon Tax is Good for America* (OUP, 2019).

Meyer, A. *Contraction and Convergence: The Global Solution to Climate Change* (Green Books, 2015).

Oxfam, Policy Paper—Confronting Carbon Inequality: Putting climate justice at the heart of the COVID-19 recovery (Oxfam, 2020).

https://oxfamilibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/621052/mb-confronting-carbon-inequality-210920-en.pdf

Thunberg, G. *No One Is Too Small to Make a Difference*, paperback (Penguin, 2019).

الحلول

Buck, H. J. *After Geoengineering: Climate Tragedy, Repair, and Restoration* (Verso, 2019).

Centre for Alternative Technology (CAT), *Zero Carbon Britain: Rising to the Climate Emergency* (CAT Publications, 2019). https://www.cat.org.uk/new-report-zero-carbon-britain-rising-to-the-climate-emergency

Cole, L. *Who Cares Wins: Reason for Optimism in Our Changing World* (Penguin, 2020).

Georgeson, L., M. Poessinouw, and M. Maslin *Assessing the Definition and Measurement of the Global Green Economy* (Geo: Geography and Environment, 2017). doi: 10.1002/geo2.36.

Goodall, C. *What We Need to Do Now: For a Zero Carbon Future* (Profile Books, 2020).

Hawken, P. *Drawdown: The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming* (Penguin, 2018).

Helm, D. *Net Zero: How We Stop Causing Climate Change* (William Collins, 2020).

IPCC, Climate Change 2021—Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jackson, T. *Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet* (Routledge, 2016).

Maslin, M. Stabilising the global population is not a solution to the climate emergency (The Conversation, 2019). https://theconversation.com/

stabilising-the-global-population-is-not-a-solution-to-the-climate-emergency-but-we-should-do-it-anyway-126446

Morton, O. *The Planet Remade: How Geoengineering Could Change the World* (Granta, 2016).

Roaf, S., et al. *Adapting Building and Cities for Climate Change* (Routledge, 2009).

Royal Society, Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty: The Royal Society Science Policy Centre Report, *The Royal Society*, 10/09 (2009): 81.

قراءات عامة

Berners-Lee, M. *There Is No Planet B: A Handbook for the Make or Break Years* (Cambridge University Press, 2019).

Flannery, T. *Atmosphere of Hope: Solutions to the Climate Crisis* (Penguin, 2015).

Hayhoe, K. *The Answer to Climate Change: And Why We Can Have Hope* (Atria/One Signal Publishers, 2021).

Lynas, M. *Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency* (Fourth Estate, 2020).

Mazzucato, M. *The Value of Everything: Making and Taking in the Global Economy* (Penguin 2019).

Raworth, K. *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist* (Random House, 2017).

Royal Society, People and the planet, The Royal Society Science Policy Centre Report, *The Royal Society*, 01/12 (2012): 81.

Sachs, J. *The Ages of Globalization* (Columbia University Press, 2020).

Wallace-Wells, D. *The Uninhabitable Earth: A Story of the Future* (Penguin, 2019).

مصادر الصور

(1) Flattening the curve: comparing Covid–19 and climate change (© Statistically Insignificant by Raf S).

(1–1) The greenhouse effect.

(1–2) Greenhouse gases and temperature for the past eight glacial cycles recorded in ice cores.

(1–3) Mauna Loa observatory atmospheric carbon dioxide measurements.

(1–4) Historic carbon dioxide emissions by region.

(1–5) Historic global sinks and sources of carbon dioxide.

(2–1) Guy Callendar's 1938 global temperature compilation.

(2–2) Variation of the Earth's surface temperature over the last 150 years.

(3–1) Land and ocean temperatures since 1850.

(3–2) Northern Hemisphere temperature reconstruction for the last 2,000 years.

(3–3) Global precipitation changes (1900–2018).

(3–4) Indicators of climate change.

(3–5) Melting of Antarctic and Greenland ice sheets.

(3–6) Global temperatures and carbon dioxide changes for the last 20,000 years.

(3–7) Sunspot and global temperatures.

(4–1) Generic structure of a global climate model.

(4–2) The carbon cycle, in gigatonnes of carbon.
(4–3) Radiative forcings between 1750 and 2018.
(4–4) Future carbon–emission scenarios.
(4–5) Climate model predictions compared with climate data (2000–20).
(4–6) Global temperatures, Arctic sea ice, and sea level in the 21st century.
(4–7) Equilibrium climate sensitivity.
(4–8) Global surface temperatures (1950–2300).
(5–1) Climate change, societal coping range, and extreme events.
(5–2) Comparison of the 2003 heat wave with past and future summer temperatures.
(5–3) Areas most at risk from sea–level rise.
(5–4) Changes in cereal grain yields between 1980 and 2020.
(5–5) Ocean acidification.
(6–1) Tipping points in the climate system.
(6–2) Greenhouse gas forcing and the response of the climate system.
(6–3) Deep–ocean circulation changes depending on freshwater inputs.
(6–4) Gas hydrates in a marine setting.
(7–1) Carbon dioxide emissions per capita by country and population.
(7–2) Potential future global warming based on different carbon emissions.
(7–3) Achieving a 1.5°C world.
(7–4) Country carbon dioxide emissions in percentages.
(8–1) Model response strategies for future sea–level rise.
(8–2) Lead times for response strategies to combat climate change.
(8–3) Comparison of GDP and carbon–emission growth since 1971.
(8–4) The range of geoengineering approaches.
(9–1) Potential climate change solutions from the individual to global scale.
(9–2) Global lifestyle carbon emissions by income group.
(9–3) *USA Today* cartoon of the Copenhagen climate conference (© Joel Pitt).

هنـــداوي