حساب الكربون

إحداث انخفاض كبير في انبعاثات غاز الدفيئة يتطلب حساب التكلفة اللازمة لذلك على المدى الطويل

كينيث غيلينغهام

يوجد اتفاق واضح بين العلماء على أن تغير المناخ تصاحبه كوارث طبيعية أكثر تواترا وكثافة بدءا من موجات الجفاف وحرائق الغابات وحتى الأعاصير والفيضانات الساحلية. وفي حين لا يمكن تحديد حجم الضرر الاقتصادي بدقة، توجد شواهد قوية على أن الضرر قد يكون شديدا للغاية. ويكمن التحدي الذي يواجه صناع السياسات في تحديد حجم الإنفاق على تدابير الحد من انبعاثات غاز الدفيئة. وللقيام بذلك، يتعين أن يكون بمقدورهم مقارنة تكاليف الخيارات المختلفة، بما في ذلك مصادر الطاقة المتجددة والسيارات الكهربائية.

وقد أصبح هذا التحدي أكثر إلحاحا في عالم السياسات في ظل تأكيد علماء المناخ على ضرورة أن يكون تخفيض الانبعاثات سريعا وعميقا بهدف الوصول بمستوى الانبعاثات الصافي إلى صفر بحلول عام ٢٠٥٠، إن لم يكن قبل ذلك (راجع دراسة Millar and others 2017). وسوف يتطلب تحقيق هذا الهدف الذي أقرته بلدان عديدة بالفعل إحداث تحول كبير في مصادر الطاقة المستخدمة لتوفير

بعض الأنشطة التي تبدو مكلفة على المدى القصير قد يثبت على المدى الطويل في الواقع أنها نُهج منخفضة التكلفة حسب فرضية محفزات الابتكار.

الكهرباء اللازمة للاقتصاد العالمي، وتجاوز وتيرة التقدم التكنولوجي المعتادة. وتشير توقعات تقرير آفاق الطاقة الدولية لعام ٢٠١٩ الصادر عن إدارة معلومات الطاقة الأمريكية بالفعل إلى أن الوقود الأحفوري سيظل يستخدم في توليد ٥٧٪ من الكهرباء في عام ٢٠٥٠.

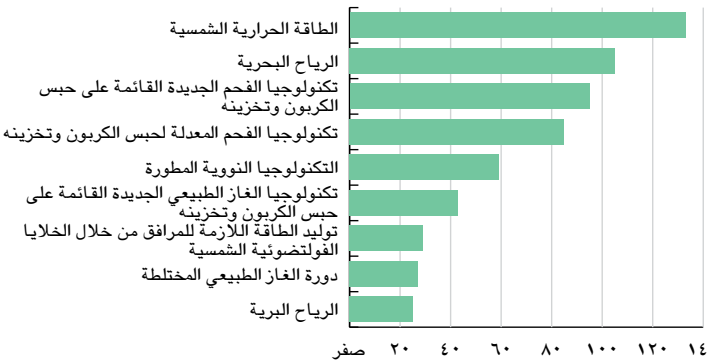
كم سيكلفنا تجاوز وتيرة التقدم المعتادة والاقتراب بشدة من تحقيق هدف الانبعاثات الصافية الصفرية بحلول عام ٢٠٥٠؟ للإجابة عن هذا السؤال، من المهم التمييز بين التكلفة على المدى القصير والتكلفة على المدى الطويل. فعلى المدى القصير، توجد وسائل غير مكلفة للحد من الانبعاثات، ولكن كلما زاد حجم التخفيض المرتقب ارتفعت التكلفة سريعا. ولكن بعض الأنشطة التي تبدو مكلفة على المدى القصير — لا سيما المنطوية على استخدام تكنولوجيات جديدة منخفضة الكربون — قد يثبت على المدى الطويل في الواقع أنها نُهج منخفضة التكلفة حسب فرضية محفزات الابتكار. ويعني ذلك أن تكلفة التخفيف من حدة الانبعاثات على المدى الأطول قد تكون أقل من الافتراضات الشائعة.

الرسم البياني ١

مقارنة التكاليف

تعد تكنولوجيات الطاقة المتجددة من التكنولوجيات الأقل تكلفة على الإطلاق مقارنة بالتكنولوجيات المستخدمة حاليا في توليد الكهرباء من الفحم.

(بالدولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون، على أساس قيمة الدولار في عام ٢٠١٧)



المصدر: دراسة Kenneth Gillingham and James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions," *Journal of Economic Perspectives* 32, no. 4 (Fall 2018): 53-72.

ملحوظة: التقديرات مشتقة من تقرير آفاق الطاقة السنوي لعام ٢٠١٨ الصادر عن إدارة معلومات الطاقة. وتعكس التنبؤات التكاليف المتوقعة للمحطات التي تبدأ عملها في عام ٢٠٢٢. ولا تتضمن التكلفة الخصومات الضريبية أو أشكال الدعم الفيدرالية الأخرى على الطاقة المتجددة.

تكلفة التكنولوجيا على المدى القصير

لحساب تكلفة الحد من انبعاثات غاز الدفيئة على المدى القصير، يقدر الاقتصاديون التكلفة المسبقة ويقسمونها على كمية ثاني أكسيد الكربون التي يتم حبسها بالطن (أو ما يعادله). فعلى سبيل المثال، لنفترض أن الحكومة تنفق ٢٠ مليون دولار أمريكي للتشجيع على تطوير مزارع الرياح لتوليد الكهرباء والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمليون طن. بذلك ستكون تكلفة الحد من الانبعاثات ٢٠ دولارا للطن. وتمثل هذه الطريقة وسيلة مفيدة لمقارنة تكلفة مختلف سبل الحد من الانبعاثات.

ويتعين بالطبع توخي الحذر عند تفسير النتائج التي تركز على نوع واحد من التكنولوجيات أو السياسات. فعلى سبيل المثال، قد تتداخل السياسات، وقد تتفاوت التكلفة المصاحبة لاستخدام تكنولوجيا ما حسب المكان وحسب كيفية تطبيق هذه التكنولوجيا. وتتغير تقديرات هذه التكلفة من عام لآخر. وقد تراجعت بالطبع تكلفة توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح تراجعا سريعا خلال العقد الماضي، ويبدو أنها ستواصل تراجعها.

وقد قمت أنا وزميلي جيمس ستوك بتقدير التكلفة غير المدعومة لمختلف التكنولوجيات المستخدمة في الحد من انبعاثات غاز الدفيئة بعد الاطلاع على الدراسات الاقتصادية الأخيرة وتقرير آفاق الطاقة السنوي لعام ٢٠١٨ الصادر عن إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (الرسم البياني ١). وقد تم حساب التكلفة على أساس حجم توليد الكهرباء من الفحم في الوقت الحالي، وهو معيار مفيد نظرا لأن الفحم هو الوقود الأكثر كثافة من حيث حجم انبعاثات الكربون الناتجة عنه. وسيكون على صناع السياسات في العديد من البلدان اتخاذ قرار بشأن ما إذا كان سيتم إغلاق محطات توليد الكهرباء التي تستخدم الفحم حاليا في مسيرتهم نحو القضاء على انبعاثات الكربون. وهذه التقديرات عبارة عن متوسطات من الولايات المتحدة، لذلك ينبغي توخي الحذر عند تطبيقها على بلدان أخرى.

وأكثر ما يثير الدهشة أن تكنولوجيات الطاقة المتجددة هي الأقل تكلفة على الإطلاق. (ومن الممكن تطبيق هذه النتيجة خارج الولايات المتحدة نظرا لأن معظم هذه التكنولوجيات لإنتاج الطاقة المتجددة يتم تداولها في الأسواق العالمية). وواقع الأمر أن تكلفة استخدام طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية قد تكون أقل من التنبؤات إذا ما تم أخذ الدعم الضمني أو الدعم الصريح في الحسبان. غير

أن هذه التقديرات لا تراعي الانقطاعات في توليد الطاقة المتجددة — فالشمس لا تشرق والرياح لا تهب طيلة الوقت (دراسة Joskow 2019). وفي الحالات التي تستخدم فيها كميات كبيرة من الطاقة، يجب استخدام تكنولوجيات التخزين كأداة مكملة للطاقة المتجددة، مثل تخزين الطاقة الكهرومائية أو البطاريات أو غير ذلك من أشكال توليد الطاقة التي يمكن أن تسد الفجوة سريعا عند خفوت الرياح أو الطاقة الشمسية.

وفي الولايات المتحدة، يتمثل أحد بدائل الفحم في محطات توليد الطاقة منخفضة التكلفة والكربون التي تجمع بين توربينات الغاز والبخار لزيادة الكفاءة. ويطلق على هذا الحل توليد الطاقة من خلال دورة الغاز الطبيعي المختلطة، ويقوم على الاستفادة من مخزون الغاز الصخري الوفير منخفض التكلفة. ولكن ينبغي التعامل مع هذه التقديرات بحذر: فالتكلفة التقديرية البالغة ٢٧ دولارا أمريكيا للطن تفترض عدم تسرب الميثان من الآبار والأنابيب أو مرافق التخزين. فالميثان من غازات الدفيئة القوية، ويتضح من حادث التسرب الكبير في منشأة أليسو كانيون في كاليفورنيا عام ٢٠١٥ أن توليد الكهرباء باستخدام الغاز الطبيعي قد ينتج عنه قدر أعلى من انبعاثات غاز الدفيئة — مما يؤدي بالتالي إلى ارتفاع تكلفة إزالة طن واحد من إجمالي حجم انبعاثات غازات الدفيئة.

التكلفة الاجتماعية

لفهم أهمية الإنفاق على الحد من هذه الانبعاثات، يمكننا مقارنة التكلفة المالية بتقديرات التكلفة الاجتماعية للكربون التي تقيس الضرر التراكمي الناتج عن انبعاث طن واحد من ثاني أكسيد الكربون وغيره من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. وتتضمن هذه الأضرار التراكمية عوامل مثل الخسائر (أو المكاسب في المناخ الشمالي) في قطاع الزراعة نتيجة الاحترار العالمي، والفيضانات الناجمة عن ارتفاع منسوب البحار، والدمار الناتج عن اشتداد الأعاصير المدارية وزيادة حرائق الغابات. وفي ضوء جميع هذه الاعتبارات، قدرت إدارة الرئيس باراك أوباما أن التكلفة الاجتماعية ستبلغ ٥٠ دولارا لطن ثاني أكسيد الكربون في عام ٢٠١٩.

وعند استخدام تقديرات التكلفة الاجتماعية للكربون، ثبت أن بعض تكنولوجيات الحد من الانبعاثات أقل تكلفة من الكربون (مما يشير إلى ضرورة استخدامها دون مزيد من التفكير) وأن البعض الآخر أعلى تكلفة، مثل الطاقة الحرارية الشمسية والرياح البحرية. وقد يكون من المفيد استخدام معايير أخرى بخلاف التكلفة التقديرية البالغة ٥٠ دولارا أمريكيا للطن. فعلى سبيل المثال، تشير التقديرات الواردة في تقرير صدر مؤخرا عن صندوق النقد الدولي إلى أن فرض ضريبة بقيمة ٧٥ دولارا أمريكيا على طن ثاني أكسيد الكربون في جميع أنحاء العالم سيؤدي إلى الحد من الاحترار العالمي بحيث يتجاوز مستويات ما قبل التطور الصناعي بدرجتين مئويتين فقط، وهو أحد أهداف اتفاقية باريس. وفي حالة استخدام هذا التقدير (٧٥ دولارا أمريكيا) بدلا من التكلفة

الجدول ١

تفاوت كبير

تشير الدراسات الاقتصادية إلى تفاوت كبير في تكلفة التدابير المتخذة على المدى القصير للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

التدابير المتخذة على مستوى السياسات	التكلفة التقديرية للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (بالدولار الأمريكي للطن، حسب قيمة الدولار في ٢٠١٧)
سلوكيات كفاءة الطاقة	١٩٠−
إنتاج الإيثانول من نشا الذرة	١٨−+٣١٠
إعادة إحياء الغابات	١−١٠
معايير حافظة الطاقة المتجددة	٠−١٩٠
معايير متوسط استهلاك الوقود	١١٠−+٣١٠
صرف دعم لمستخدمي طاقة الرياح	٢−٢٦٠
خطط الطاقة النظيفة	١١
ضرائب البنزين	١٨−٤٧
تنظيم حرق الميثان	٢٠
الحد من تأجير الفحم الفيدرالي	٣٣−٦٨
سياسات الانبعاثات الزراعية	٥٠−٦٥
المعايير الوطنية للطاقة النظيفة	٥١−١١٠
إدارة التربة	٥٧
سياسات إدارة الثروة الحيوانية	٧١
التوسع المركز في استخدام الطاقة الشمسية	١٠٠
صرف دعم لمستخدمي الوقود المتجدد	١٠٠
معايير الوقود منخفض الكربون	١٠٠−٢,٩٠٠
صرف دعم لمستخدمي نظم الخلايا الفولتضوئية الشمسية	١٤٠−٢,١٠٠
وقود الديزل الحيوي	١٥٠−٤٢٠
برامج كفاءة الطاقة	٢٥٠−٣٠٠
الخصم النقدي على إحلال السيارات القديمة	٢٧٠−٤٢٠
برامج إعانات لحماية المنازل من العوامل الجوية وتخفيض استهلاك الطاقة	٣٥٠
الدعم المخصص لبطاريات السيارات الكهربائية	٣٥٠−٦٤٠

المصدر: دراسة Kenneth Gillingham and James H. Stock, "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions," *Journal of Economic Perspectives* 32, no. 4 (Fall 2018): 53–72.

ملحوظة: السياسات الواردة في هذا الجدول من مختلف بلدان العالم، ولكن معظمها من الولايات المتحدة. ويتم تحويل تكلفة غازات الدفيئة الأخرى بخلاف ثاني أكسيد الكربون إلى معادل ثاني أكسيد الكربون على أساس تأثيرها المحتمل على الاحترار العالمي. وتستند التقديرات إما إلى دراسات فردية أو مجموعة من التقديرات المستمدة من دراسات مختلفة.

الاجتماعية التقديرية البالغة ٥٠ دولارا أمريكيا، تصبح التكنولوجيا النووية المطورة من البدائل الأخرى الأقل تكلفة مقارنة بالتكلفة الاجتماعية للكربون.

تكلفة السياسات على المدى القصير

تناولنا في هذا المقال حتى الآن التكلفة الحالية للتكنولوجيات غير المدعومة، وهو تحليل مفيد لفهم المسار الذي ستتخذه الأسواق في المستقبل القريب. ومن الواضح أنه مع توقف محطات التوليد القديمة عن العمل وبناء محطات جديدة، سيكون هناك تحول نحو التكنولوجيات القائمة على الطاقة المتجددة بغض النظر عن السياسات المطبقة. غير أن هذا التحول قد يكون أبطأ مما يتطلبه تحقيق الأهداف الطموحة التي وضعها الكثير من الحكومات. لذلك فمن المهم أيضا تحديد تكلفة الحد من الانبعاثات حسب مختلف السياسات التي يمكن أن تطبقها الحكومات.

وباستعراض الدراسات الاقتصادية، يتضح وجود تفاوت كبير بين تكاليف مختلف السياسات التي تم تنفيذها وتقييمها (الجدول ١). وتعتبر تدخلات كفاءة الطاقة من الحلول البسيطة منخفضة التكلفة التي تسهم بالفعل في توفير الأموال. وغالبا ما يشار لمثل هذه التدخلات في الاقتصاد السلوكي باسم «المحفزات» نظرا لأنها تنطوي ببساطة على تقديم معلومة ما أو إعادة صياغتها للتأثير على القرارات المرتبطة باستهلاك الطاقة أو «تحفيزها» على مراعاة البيئة بشكل أكبر. ومن الأمثلة المعروفة على ذلك التقارير المرفقة بفواتير الكهرباء التي تقارن استهلاك الأسرة للكهرباء باستهلاك الأسر في المنازل المجاورة. وتعد هذه التدخلات منخفضة التكلفة، كما أن من شأنها الحد من استخدام الكهرباء بحوالي ٢٪، مما يحقق وفورات صافية بالتالي. وبالرغم من أن مردود هذه التدابير قد يعوض تكلفتها، فإنها تؤدي عادة إلى انخفاض طفيف في حجم الانبعاثات، وبالتالي يعتبر دورها محدودا نسبيا في جهود القضاء على الكربون الأوسع نطاقا.

وتوجد كذلك العديد من السياسات مرتفعة التكلفة التي تبدو باهظة للغاية بالنظر إلى تكلفتها الثابتة على المدى القصير. وأخص بالذكر السياسات الهادفة إلى التشجيع على توليد المزيد من الطاقة المتجددة والمساعدة في القضاء على الكربون في قطاع النقل. ويعد دعم السيارات الكهربائية هو الأعلى تكلفة على الإطلاق في الواقع. والسبب في ذلك أنه يتم شحن هذه السيارات باستخدام مصادر الوقود الأحفوري في العديد من البلدان، مما يحد من الوفورات المحتملة في حجم الانبعاثات.

ولكن هذه التكنولوجيات قد تصبح أقل كلفة في نهاية المطاف عن تقديرات المدى القصير الواردة في الجدول. ويرجع ذلك إلى أن العديد منها قد تكون له فوائد جانبية مثل الحد من تلوث الهواء؛ مما قد يزيد من الإقبال على استخدامها حتى إذا كانت تسبب مستوى مرتفع من الانبعاثات الكربونية. علاوة على ذلك، فإن حجم تخفيض الانبعاثات وتكلفة خفض الطن الواحد منها باستخدام هذه التكنولوجيات قد يختلفان للغاية على المدى الطويل بفضل تأثير التطورات التكنولوجية المستحدثة خصيصا لتعزيز هذه التكنولوجيات وتخفيض تكلفتها.

ديناميكية التكاليف على المدى الطويل

لماذا تساهم الآثار الانتشارية للابتكارات في إحداث التحول المنشود؟ يمثل تغير المناخ مشكلة طويلة الأجل تمتد لأجيال متتالية، ويظل ثاني أكسيد الكربون عالقا في الغلاف الجوي لمئات أو آلاف السنين. لذلك فإن التغير التكنولوجي والابتكار عاملان أساسيان في الجهود المبذولة على المدى الأطول للحد من تغير المناخ من خلال استحداث بدائل للوقود الأحفوري. وبينما تتاح في الوقت الحالي تكنولوجيات قادرة على الحد من الانبعاثات بدرجة كبيرة، يشهد نظام الطاقة زخما كبيرا يساهم في استقراره، كما يوجد أيضا مجال واسع لمزيد من الانخفاض في تكلفة التكنولوجيا. وتقتضي هذه الاعتبارات تبني منظور ديناميكي طويل الأجل يعكس الدور المحتمل للإنفاق الحالي على التكنولوجيا الجديدة في تخفيض تكلفة الحد من الانبعاثات مستقبلا.

ويوجد عدد من الأسباب التي تفسر أهمية تبني هذا المنظور الديناميكي طويل الأجل. فخبراء الاقتصاد يدركون أن البحث والتطوير تتولد عنهما آثار انتشارية نظرا لأن الشركات لا يمكنها غالبا احتكار المكاسب المترتبة على البحوث والتطوير سوى بشكل جزئي. فعلى سبيل المثال، يمكن لأي شركة الاستفادة من أي ابتكار بمجرد انتهاء مدة حمايته المكفولة بشهادة براءة الاختراع. وفي حالات أخرى أيضا، تؤدي التطورات الهندسية والإدارية الناتجة عن استحداث تكنولوجيا جديدة إلى تخفيض تكلفة هذه التكنولوجيا (وهو ما يعرف غالبا باسم «التعلم بالممارسة»)، وقد تستفيد شركات أخرى من انخفاض التكلفة ولو بشكل جزئي. فعلى سبيل المثال، توجد شواهد على أن الشركات في قطاع أشباه الموصلات نجحت في تخفيض تكلفة إنتاجها من خلال إنتاج المزيد من كل جيل من أجيال أشباه الموصلات، وأن هذا التخفيض انتشرت آثاره إلى شركات أخرى (راجع دراسة Irwin and Klenow 1994). وقد توجد كذلك آثار شبكية إيجابية، حيث يستفيد المجتمع من تطبيق معيار موحد، كإنتاج قابس واحد لشحن جميع السيارات الكهربائية. وهذه الآثار الانتشارية جميعها بأنواعها الثلاثة تتيح للشركات الأخرى تخفيض تكلفتها، وهو ما يسهم في زيادة الرفاهية الاجتماعية ويشكل دافعا اقتصاديا لوضع سياسات دقيقة لتعزيز هذه الآثار الانتشارية.

وبخلاف هذه الآثار، تؤكد الدراسات الاقتصادية الأخيرة بشأن ابتكارات الطاقة النظيفة على أن السياسات المثلى قد تختلف على المدى الطويل نظرا لأن الإنفاق الحالي قد تكون له آثار على المدى الطويل. فبعض نهج الحد من الانبعاثات الأعلى تكلفة على المدى القصير قد تشجع على استحداث ابتكارات من شأنها تخفيض التكلفة على المدى الطويل مقارنة بالنهج الحالية. ولننظر على سبيل المثال في الدعم على السيارات الكهربائية التي تشمل تكنولوجيات سريعة التطور مثل البطاريات. فإذا كان من شأن سياسات

التغير التكنولوجي والابتكار عاملان أساسيان في الجهود المبذولة على المدى الأطول للحد من تغير المناخ من خلال استحداث بدائل للوقود الأحفوري.

التكنولوجيا النظيفة الحالية إحداث تراجع كبير في التكلفة مستقبلا، قد يكون من المنطقي اختيار البدائل الأعلى تكلفة حاليا (راجع دراسة Acemoglu and others 2016، ودراسة Vogt-Schilb and others 2018). ومن حيث المبدأ، تظل هذه النتيجة صحيحة حتى ولو طبقت شركة واحدة الابتكار منخفض الكربون (وهو ما يعني عدم وجود آثار انتشارية لهذا الابتكار)، بالرغم من أنه ستكون هناك بالتأكيد آثار انتشارية في الواقع العملي، مما سيؤدي إلى تراجع التكلفة على المدى الطويل. والفكرة الأساسية هنا هي أنه عند اختيار المجتمع للوسيلة الأفضل للتصدي لتغير المناخ، فإن القرارات المثلى على المدى الطويل قد تختلف عن القرارات قصيرة النظر وقصيرة المدى. وليس من السهل بالطبع توقع النتائج التي ستسفر عنها التكنولوجيا، ولذلك فإن أي قرار ينطوي على قدر من عدم اليقين. ولكننا نعلم أن احتمالات تحقيق قفزات عملاقة تقل في حالة استخدام التكنولوجيات الناضجة عنها في حالة استخدام التكنولوجيات الوليدة. لذلك فإن المنظور طويل الأجل ينطبق فقط على التكنولوجيات الأحدث منخفضة الكربون التي لديها إمكانات حقيقية للحد من التكلفة مستقبلا.

نقطة تحول

نعود الآن إلى سؤالنا الأصلي. هل من الممكن الحد من انبعاثات الكربون بدرجة كافية للاقتراب بشدة من تحقيق هدف الانبعاثات الصافية الصفرية بحلول عام ٢٠٥٠؟ نعم، أصبح هذا الأمر ممكنا حتى في الوقت الحالي — فالتكنولوجيات اللازمة لذلك موجودة بالفعل. ولكن هذا التحول الهائل في نظام الطاقة سيكون مكلفا وصعبا إذا ما حاولنا إتمام هذا التحول في خطوة واحدة، لا سيما بسبب التكلفة الضخمة لهذا التحول على المدى القصير في البلدان النامية المعتمدة على الوقود الأحفوري. وتوجد بالطبع تدابير غير مكلفة يمكن تنفيذها حاليا، بما في ذلك صون الطاقة، ومحفزات الكفاءة، وإحلال الطاقة المتجددة محل الوقود الأحفوري في توليد الطاقة الكهربائية. وإذا ما أخذنا في الحسبان التكلفة الاجتماعية التقديرية للكربون، ستكون هذه التدابير أقل تكلفة بالفعل مقارنة بالتكلفة الناتجة عن أضرار تغير المناخ التي سيمكن تجنبها من خلال هذه التدابير. ولكن العديد من النهج الأخرى تعد مكلفة للغاية على المدى القصير، لا سيما الجهود المبذولة للتشجيع على استخدام التكنولوجيات الجديدة منخفضة الكربون. غير أن السياسات التي تنطوي على إمكانات قوية لتشجيع الابتكار قد تؤدي إلى تراجع كبير في التكلفة الإجمالية على المدى الأطول.

لذلك يتعين عند التفكير في سبل التصدي لتغير المناخ تبني منظور طويل الأجل قائم على الابتكار. فابتكارات مثل المفاعلات النووية المدمجة الصغيرة وتكنولوجيات حبس الكربون قد تكون بمثابة نقطة تحول في تخفيض انبعاثات غاز الدفيئة الصافية إلى مستوى الصفر بتكلفة منخفضة. وبالطبع، كما يقول عالم الفيزياء الدانمركي نيلز بور، فإن «التنبؤ أمر صعب للغاية، لا سيما التنبؤ بالمستقبل». ونظرا لأن المسار المستقبلي للتكنولوجيا غير معلوم، فإن أقصى ما يمكننا فعله هو التنبؤ بتكلفة تحقيق هدف الانبعاثات الصافية الصفرية. ومع ذلك، يمكننا التخطيط للمستقبل دون الشعور بالأسف من خلال تقديم حوافز للتشجيع على استخدام وسائل منخفضة التكلفة للحد من انبعاثات غازات الدفيئة والابتكارات منخفضة الكربون، مثل اعتماد نظام لتسعير الكربون على مستوى الاقتصاد ككل، مع القيام في الوقت نفسه بتنفيذ استثمارات رشيدة في التكنولوجيات الجديدة. FD

كينيث غيلينغهام أستاذ مساعد في علوم اقتصاديات البيئة والطاقة في جامعة ييل. وهذا المقال منقول بتصرف من مقال آخر له أعده بالتعاون مع جيمس ستوك عام ٢٠١٨ بعنوان "The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions" ونشر في مجلة الآفاق الاقتصادية (*Journal of Economic Perspectives*).

المراجع:

Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, and William Kerr. 2016. "Transition to Clean Technology." *Journal of Political Economy* 124, no. 1: 52–104. https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/684511

Irwin, Douglas, and Peter Klenow. 1994. "Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry." *Journal of Political Economy* 102, no. 6: 1200–27. https://doi.org/10.1086/261968

Joskow, Paul L. 2019. "Challenges for Wholesale Electricity Markets with Intermittent Renewable Generation at Scale: The US Experience." *Oxford Review of Economic Policy* 35, no. 2: 291–331. https://doi.org/10.1093/oxrep/grz001

Millar, Richard J., Jan S. Fuglestvedt, Pierre Friedlingstein, and others. 2017. "Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C." *Nature Geoscience* 10: 741–47. https://www.nature.com/articles/ngeo3031

Vogt-Schilb, Adrian, Guy Meunier, and Stephane Hallegatte. 2018. "When Starting With the Most Expensive Option Makes Sense: Optimal Timing, Cost and Sectoral Allocation of Abatement Investment." *Journal of Environmental Economics and Management* 88: 210–33. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001