

# تحقيق الأهداف المناخية عن طريق سد الثغرات في الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية

إريك ويليامز

رؤية على الأحداث

November 06, 2019

KS--2019-II10

## عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحثاً مستقلة في اقتصاديات وسياسات وتقنيات الطاقة بشتى أنواعها بالإضافة إلى الدراسات البيئية المرتبطة بها. وتتمثل مهمة كابسارك في تعزيز فهم تحديات الطاقة والفرص التي تواجه العالم اليوم وفي المستقبل من خلال بحوث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

## إشعار قانوني

© حقوق النشر 2019 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبه بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كمنصحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار.

## النقاط الرئيسية

- يقدم مفهوم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية طريقة جديدة للتعامل مع الأهداف المناخية التي تقدّر ضمناً جميع الخيارات وتشجع جميع الجهود المبذولة الرامية لتخفيف تراكم الكربون في الغلاف الجوي.
- يختلف الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية عن مفهوم الاقتصاد الدائري لأنه يركز حصراً على تدفقات الكربون والطاقة، وتمثل "الاستراتيجيات الأربع 4Rs" (الخفض وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير والإزالة) للاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية فئات من خيارات التخفيف، في حين نجد أنّ "ثلاث استراتيجيات" (باستثناء الرابعة "الإزالة") من استراتيجيات الاقتصاد الدائري تعدّ المبادئ التي تحكم سلوك الشركات والأسر.
- تشمل الاستراتيجيات الأربع للاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية ما يلي:
  1. الخفض: كفاءة استخدام الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة غير الحيوية والطاقة النووية.
  2. إعادة الاستخدام: احتجاز الكربون واستخدامه.
  3. إعادة التدوير: البواليع الطبيعية للكربون والطاقة الحيوية (البيولوجية).
  4. الإزالة: احتجاز الكربون وتخزينه (CCS) وجمع الهواء بشكلٍ مباشر والبواليع الطبيعية للكربون.
- يمكن لمفهوم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية أن يُعزز فهم ديناميات النظام وأوجه الترابط بين خيارات التخفيف، فعلى سبيل المثال تؤدي زيادة كفاءة استخدام الطاقة إلى انخفاض الحاجة إلى جميع الأجزاء الأخرى من نظام إدارة الكربون. بينما تعني زيادة عمليات الجمع المباشر للهواء إمكانية زيادة الانبعاثات المباشرة للوقود الأحفوري مع الحفاظ على تحقيق الأهداف المناخية، كما أنّ زيادة استخدام الكربون تقلل من الحاجة لتخزين الكربون.
- يكشف نهج الأنظمة هذا أيضاً عن نقاط الاختناق المفصلية المحتملة لتحقيق الاستقرار لمناخنا، فعلى سبيل المثال سيكون تحقيق الأهداف المناخية أمراً بالغ الصعوبة من دون استخدام تكنولوجيا احتجاز الكربون وتخزينه (CCS). ويعد التأكد من توفر التقنيات المتاحة والمتقنة والمجدية من حيث التكلفة في كل جزء من الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية أمراً ضرورياً لتحقيق الأهداف المناخية بتكلفة معقولة.
- إحدى أكثر السبل توفيراً للتكلفة لتشجيع الاستثمار في أنشطة الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية من خلال نظم تبادل حقوق إطلاق الانبعاثات التي يمكن تنفيذها على الصعيدين المحلي والدولي، كما تعزز نظم التبادل هذه التعاون بين أجزاء مختلفة من دورة الكربون.
- من غير المرجح أن تقوم الشركات الخاصة طواعية بأنشطة التخفيف على نطاق واسع من دون استخدام خطط مبادلة الكربون الرامية إلى توفير الحوافز.

## المقدمة

أعلن صاحب السمو الملكي الأمير عبد العزيز بن سلمان، وزير الطاقة السعودي، في الثلاثين من شهر أكتوبر إبان انعقاد "مبادرة الاستثمار الأجنبي" أن "المملكة العربية السعودية تقدم مفهوم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية... وهو نظام الحلقة المغلقة الذي يشبه إلى حد كبير ما يحدث في الطبيعة والذي سيكون عوناً على استعادة توازن دورة الكربون" بالتزامن مع هذه الرؤية الجديدة الجريئة للتصدي لتغيّر المناخ، ولقد اتبعت للمملكة العربية السعودية فرصة لتغيير النقاش حول المناخ سواء كجزء من توليها لمهام رئاسة مجموعة العشرين في عام 2020م أو في المجتمع الدولي على نطاق أوسع، واتباع المملكة لنهج يتضمن ويشجع بنحو صريح كافة الخيارات الممكنة للتخفيف من تأثيرات تغيّر المناخ. وعلى الرغم من أهمية مصادر الطاقة المتجددة وبقدر ما حققته من تقدم في السنوات الأخيرة، إلا أن قلة من المحللين يعتقدون أنه يمكن للعالم تحقيق هدف اتفاق باريس المتمثل في تحقيق توازن بين المصادر والمصارف بحلول عام 2050م من خلال مصادر الطاقة المتجددة وحدها<sup>1</sup>. ولا محالة أن المسار العالمي الهادف لتحقيق توازن في الانبعاثات الكربونية سيتضمن الوقود الأحفوري وضرورة إدارة انبعاثاته الكربونية. ويعد مفهوم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية ثمرة لفكرة الاقتصاد الدائري، وهو إطار مفيد لفهم الكيفية التي يمكن بها ربط جميع خيارات تخفيف الانبعاثات الكربونية معاً في نظام يحقق الأهداف المناخية المنصوص عليها في اتفاقية باريس.

## المناقشة

### الاقتصاد الدائري

يتعارض الاقتصاد الدائري مع المفهوم التقليدي للاقتصاد الخطي باعتباره نظاماً آتياً (ذو إتجاه واحد) لموارد مفترضة غير محدودة والقدرة غير المحدودة لامتناس المخلّفات. ويدور الاقتصاد الدائري في جوهره حول إغلاق حلقة استخدام الموارد وحماية البيئة، ويمكنه أن يشمل الإيكولوجيا الصناعية حيث تأخذ إحدى العمليات مدخلاتٍ من تيار مخلفات عملية أخرى. ويمكنه كذلك أن يشمل التصميم الإيكولوجي لتقليل الاحتياجات من الموارد من خلال تصنيع منتجات تدوم لفترة أطول، بالإضافة إلى تحويل نماذج الملكية (مثل أوبر Uber واقتصاد المشاركة) بهدف زيادة استخدام المنتجات المصنوعة (Murray et al. 2013). يمكن تمثيل فكرة الاقتصاد الدائري من خلال الاستراتيجيات الثلاث (3Rs): التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير، فكلما زاد الطلب على المنتجات قل عدد الموارد اللازمة، وكلما ارتفعت إمكانية إعادة استخدام المنتجات المصنّعة، كان الاقتصاد أكثر كفاءة في استخدام الموارد. وكلما زاد عدد المنتجات التي يتم إعادة تدويرها في نهاية عمرها الافتراضي، قلت الحاجة إلى الموارد الخام وتضاءل حجم مجارى النفايات. بينما يعد المعنى الضمني للاستراتيجيات الثلاث تسلسلاً هرمياً وأولوية، وينبغي تركيز الجهود على التخفيف في بادئ الأمر ومن ثم على إعادة استخدام ما لا يمكن تخفيضه إنتهاءً بإعادة تدوير المخلفات.

### الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية:

طالما أن مكاسب كفاءة استخدام الموارد المضمنة في المفهوم التقليدي للاقتصاد الدائري تُترجم إلى انخفاض استهلاك الطاقة بنحو مباشر، مما يؤدي بدوره إلى انخفاض الانبعاثات الكربونية، فإن التركيز الأساسي للاقتصاد

<sup>1</sup> يدور الكثير من النقاش داخل عملية اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيّر المناخ حول مصطلحي "الاصافي الصفري" و "الحياد الكربوني". في إشارة إلى اللغة الواردة في اتفاقية باريس - "التوازن بين الانبعاثات البشرية المنشأ حسب المصادر وعمليات الإزالة بواسطة مصارف الغازات الدفيئة" - ستستخدم هذه الورقة مصطلح "توازن الكربون" كبديل لـ "الحياد الكربوني" و "الاصافي الصفري".

الدائري لم يكن يندرج في تغيير المناخ فحسب. وقد طرح الباحثون ومقررو السياسات مؤخراً مفهوم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية الذي يركز حصراً على تدفق الطاقة أو الكربون عبر الاقتصاد، ويتمثل الغرض الواضح منه في إدارة الانبعاثات الكربونية.




يُقر الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية بالحاجة إلى مجموعة من خيارات تخفيف الانبعاثات الكربونية بدلاً من حصر تركيزه على خفض أو تجنب كمية الكربون التي تدخل النظام فقط. وتعتبر الاستراتيجيات الثلاث أحد المبادئ التنظيمية للاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية المستعارة من مفهوم الاقتصاد الدائري والتي يعبر عنها بالكلمات الثلاث "التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير"، إلا أن الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية يضيف كلمة رابعة لهذه الكلمات الثلاث هي "الإزالة". وتشكل هذه الكلمات الأربع الأساس لإدارة الكربون في الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية. بينما يكون التسلسل الهرمي لهذه الاستراتيجيات الأربع (4Rs) ولو اسماً كما هي الحال في الاقتصاد الدائري، على الرغم من أن التكلفة هي العامل النهائي في نشر خيارات إدارة الكربون. وينبغي اتباع كافة الخيارات الفعالة من حيث التكلفة لتخفيف الانبعاثات التي تدخل النظام.

يصف مربع النص التالي أدناه الاستراتيجيات الأربع (4Rs) –التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير والإزالة- في اقتصاد الكربون الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية والتقنيات المتصلة بكل واحدة منها.




## الاستراتيجيات الأربع (4Rs) للاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية

لاحظ أن الرموز والمصطلحات المكتوبة بالأحرف الغامقة تتعلق مباشرة بالشكل رقم (1) الذي يوضح الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية.

### الخفض

يمثل "الخفض" كافة خيارات تخفيف انبعاثات الكربون التي تقلل من كمية الكربون الداخلة إلى النظام، وتخفض **كفاءة استخدام الطاقة**  سواء على جانب العرض والطلب من استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون المرتبطة بها. وبالمثل فإنّ الخيارات المتعلقة بإمدادات الطاقة التي لا تُطلق ثاني أكسيد الكربون مثل **مصادر الطاقة غير المتجددة للكتلة الأحيائية**  و**الطاقة النووية** ، كما أنها تخفض كذلك من تدفق الكربون إلى النظام، على الرغم من أنها يمكن أن تؤدي بشكل غير مباشر إلى انبعاثات الكربون أثناء تصنيعها وبنائها وتركيبها.

### إعادة الاستخدام

يشير مصطلح "إعادة الاستخدام" في سياق الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية إلى **احتجاز**  الكربون وتخزينه واستخدامه كمدخلات في عملية كيميائية أو صناعية تحوّل الكربون إلى مادة خام أخرى مفيدة بالنسبة للصناعة، ويتناسب **الكربون واستخدامه**  تماماً مع تقاليد البيئة الصناعية من خلال "استقلاب **الكربون**"  من النفايات إلى المدخلات القيمة. فعلى سبيل المثال، تستخدم الشركة السعودية للصناعات الأساسية (سابك) نفاياتها من ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) في أكبر مصنع في العالم لاحتجاز الكربون واستخدامه، حيثُ يحوّل المصنع كمية 0.5 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً إلى مُنتجات قيمة مثل الأسمدة والميثانول (Smeets 2019)، كما يعمل الباحثون بجدٍ ونشاط على تطوير تكنولوجيا تحويل الكربون إلى وقود.

## إعادة التدوير

تمثل "إعادة التدوير" الدورة الطبيعية للكربون، حيث تقوم **البواليع الطبيعية** (مثل النباتات والتربة والمحيطات) بسحب الكربون من الغلاف الجوي ثم إطلاقه مرة أخرى من خلال التحلل والاحتراق. ويتم إعادة تدوير الكربون بنحو فعال بل ويمكن اعتبار النظام الفرعي للطاقة الحيوية عديم الانبعاثات الكربونية (محايداً كربونياً) طالما أن كمية مساوية من الكتلة الحيوية تنمو لتحل محل ما يتم حصاده كمواد خام إحيائية (مثل: الخشب ومحاصيل الوقود والطحالب وخلافها) من أجل **الطاقة الحيوية**.

## الإزالة

تمثل الاستراتيجيات الأخيرة لاقتصاد الكربون الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية إزالة الكربون من النظام، ويمكن تحويل **الكربون المحتجز** إما إلى مواد خام كما تمت مناقشته أعلاه في "إعادة الاستخدام"، أو إزالته عن طريق **تخزينه** بالطرق الكيميائية أو الجيولوجية. ويمكن احتجاز ثاني أكسيد الكربون بصورة مباشرة ناجمة عن العمليات الصناعية ونقاط الاحتراق، كما يمكن احتجازه أيضاً من الهواء بصورة مباشرة باستخدام تقنيات **الجمع المباشر للهواء**. ينتج الكربون الذي يتم احتجازه عن طريق احتراق **الطاقة الحيوية** في صافي انبعاثات الكربون السلبية ضمن النظام الفرعي للطاقة الحيوية. ويمكن كذلك إدارة الأراضي بطريقة تمكنها من أن تصبح **بالوعة طبيعية** صافية للكربون الموجود في الغلاف الجوي. ومن ناحية أخرى يمكن للبواليع الطبيعية واحتجاز وتخزين الكربون والطاقة الحيوية والجمع المباشر للهواء جميعها أن تغلق الحلقة الخاصة بالانبعاثات في أماكن أخرى والتي قد تكون صعبة أو مكلفة للغاية بحيث لا يمكن احتجازها بصورة مباشرة مثل الانبعاثات الناتجة عن احتراق وقود الطائرات.

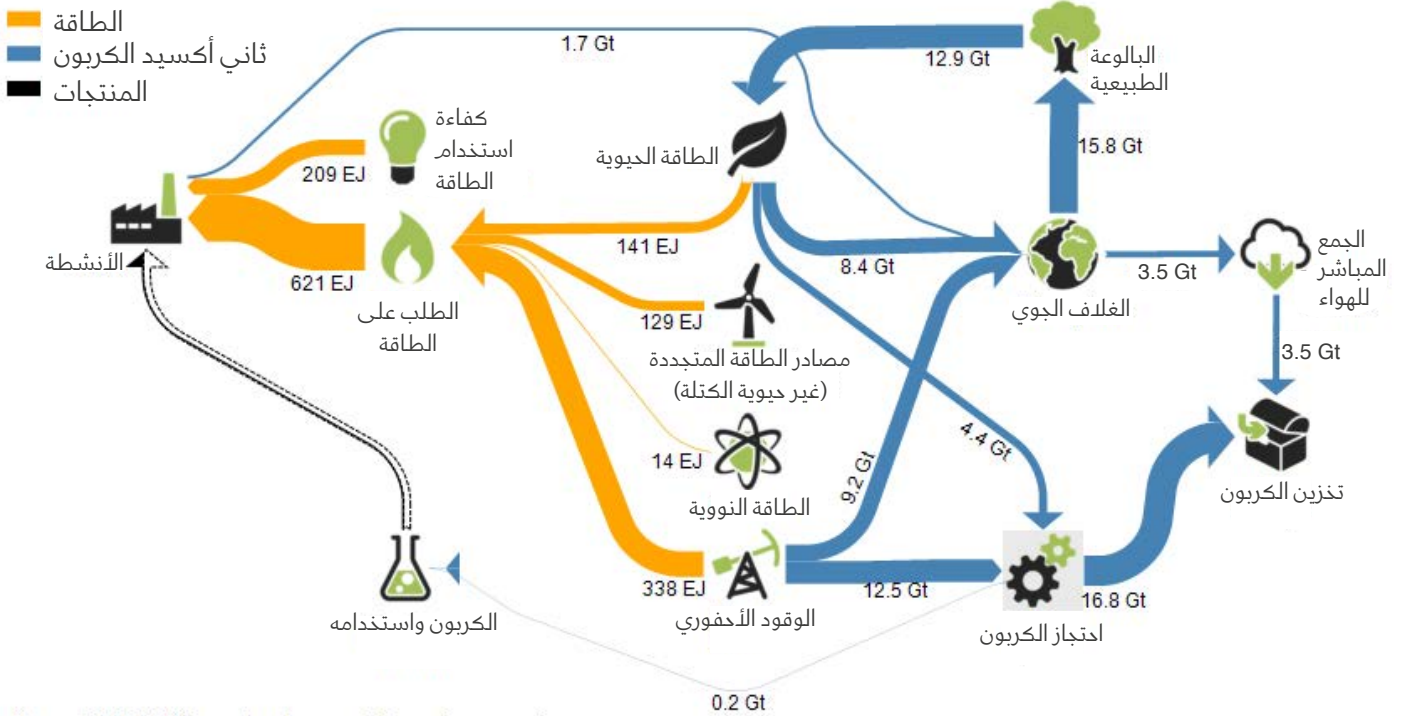
يعد الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية بمثابة بنية مفيدة لفهم الكيفية التي تتوافق بها خيارات خفض الكربون المختلفة سوية في النظام، كما أنها تكشف عن كيفية تطبيق أكثر أو أقل من خيار واحد أو خيارات أخرى للوصول إلى توازن الانبعاثات الكربونية في نهاية المطاف.

ومن ناحية أخرى، يوضح الشكل رقم (1) أدناه، الكيفية التي يمكن بها تمثيل اقتصاد دائري عالمي مُنخفض الانبعاثات الكربونية كنظامٍ لتدفقات الطاقة والكربون، حيثُ تمثل أحجام الأسهم حجم هذه التدفقات. تم اخراج الشكل على مستوى عالٍ بوصفه وسيلة لتمثيل الطابع الأساسي للنظام بعرض مُبسط، وذلك بدلاً من محاولة تمثيل جميع الروابط المعقدة المحتملة الموجودة في الواقع. تتدفق الطاقة (باللون البرتقالي) من مصادر الطاقة الأولية إلى الطلب على الطاقة والذي يقابله كفاءة استخدام الطاقة وخفض الطلب، والذي يحوّل بدوره إلى نشاط. بينما يتدفق الكربون (باللون الأزرق) من الوقود الحيوي والوقود الأحفوري إلى احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه والغلاف الجوي والجمع المباشر للهواء أو البواليع الطبيعية والعودة إلى الطاقة الحيوية.

يستخدم الشكل رقم (1) أدناه إطار عمل يستند إلى سيناريو معهد الهند للطاقة والموارد (TERI) لتحقيق هدف اتفاق باريس المتمثل في الحد من متوسط الزيادة في درجات الحرارة العالمية بما لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية (Zhang, Fujimori, and Hanaoka 2018). حيثُ يوضح السيناريو احتمالية وجود مستوى مرتفع نسبياً من استخدام الوقود

الشكل رقم (1). الاستخدام المرتفع للوقود الأحفوري في سيناريو 1.5 درجة مئوية لعام 2050م.

## الاقتصاد الدائري منخفض الانبعاثات الكربونية



سيناريو معهد الهند للطاقة والموارد لسياسة النقل منخفض الكربون 1.5 درجة مئوية، والوكالة الدولية للطاقة وتحليل كابسارك

الأحفوري في عام 2050م والذي لا يزال ضمن إطار الوفاء بتحقيق الهدف المناخي بالإبقاء على ارتفاع الحرارة في حدود لا تتجاوز 1.5 درجة مئوية. غير أنّ من شأن الافتراضات المختلفة حول نشوء التكنولوجيا في أي مرحلة في النظام أن تؤدي إلى تدفقات مختلفة من الانبعاثات الكربونية. فعلى سبيل المثال، من شأن الاعتماد الواسع النطاق على المباني التي لا تستهلك الطاقة مطلقاً (صفيرية الطاقة) أن يقلل الحاجة إلى الطلب على الطاقة ومن تدفق الكربون إلى النظام. حيث نجد أنّ هذه المباني تجمع بين التصميم الملائم للمناخ وتقنيات الاستخدام الذكي الموفرة للطاقة إلى جانب توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتكاملة في الموقع أو الطاقة الحرارية الشمسية. كما أنّ التبني العالي للطاقة المتجددة والطاقة النووية يحد من الحاجة إلى أنواع الوقود الأحفوري وتقليل كمية الكربون التي تدخل النظام، حيث أنّ كل طن من الكربون لا يدخل النظام يعتبر كمية كربون لا تحتاج عملية إدارة.

تم استقاء قيمة استخدام الكربون (0.2 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون) الواردة في الشكل رقم (1) أعلاه من تقدير حديث لاستخدام الكربون قامت بإجرائه الوكالة الدولية للطاقة (IEA 2019). ويعتبر تدفق الكربون من أجل "إعادة الاستخدام" مُنخفضاً مقارنةً بتدفقات الكربون الأخرى في النظام، إلا أنّ بإمكان التطور التكنولوجي تغيير هذه النظرة. تشير تقديرات شركة شل إلى أنه يمكن لكمية 5.7 غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون أن تكون جزءاً لا

يتجزأ من المواد من خلال استخدام الكربون (Shell 2016). وإذا تبين أن هذه التقديرات دقيقة، فيمكن لاستخدام الكربون أن يلعب دوراً بالغ الأهمية في الوصول إلى توازن الكربون. وإذا أمكن كما هو مبين في الشكل رقم (1) استخدام كمية 5.7 غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون، فإن الخط الذي يمتد من احتجاز الكربون إلى استخدامه سينمو بقدر كبير مقارنة بقيمته الحالية البالغة 0.2 غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون. وينبغي في هذه الحالة، تخزين كمية 11.1 غيغا طن فقط من ثاني أكسيد الكربون بدلاً من كمية 16.8 غيغا طن الواردة في السيناريو الأصلي. ولا ننسى أنه يمكن للمكاسب الاقتصادية الناجمة عن خلق قيمة تبلغ 5.7 طن من ثاني أكسيد الكربون أن تكون كبيرة مقارنةً بالتكلفة الاقتصادية المترتبة على القيمة المالية نظير تخزينها.

ولا يفوتنا كذلك أن نشير إلى أن عملية إعادة تدوير الكربون عبر البواليع الطبيعية والطاقة الحيوية تعد عملية بالغة الأهمية، فيما يُمكن لمحاويل الطاقة الحيوية أن تكون مصدر دخل تشتد الحاجة إليه في المناطق الريفية. كما يمكن لموارد الأراضي المُدارة بنحو جيد أن تكون مصدراً لتخزين الكربون مُنخفض التكلفة. وقد يثبت الجمع بين الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه أو استخدام الكربون أنه أداة قوية لإدارة الكربون بصفة خاصة، حيث ينتج عن الكربون الذي تتم إزالته من نظام الطاقة الحيوية تخفيضات إيجابية صافية في الانبعاثات الكربونية من الغلاف الجوي.

على الرغم من أن "الإزالة" تعتبر الخطوة الأخيرة في التسلسل الهرمي للاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية، إلا أنها لا تعتبر الوسيلة الأقل أهمية لأنها تعدّ الخيار الأخير لإدارة الكربون للوصول إلى تحقيق توازن الكربون. ويتمثل الوضع الأمثل للإدارة الكلية للكربون في عمليات التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير. ورغم ذلك، وإذا تبين قصور أو عجز هذه الوسائل فإنه يمكن لإزالة الكربون أن تكون عوناً لتحقيق الأهداف المناخية لاتفاق باريس. وتحقيقاً لهذه الغاية، فإن إزالة الكربون تعدّ شبكة الأمان في مسار تحقيق استقرار المناخ. ونلاحظ وفقاً للشكل رقم (1) أعلاه، أن كابسارك قام باحتساب كمية الكربون التي تمت إزالتها باستخدام الجمع المباشر للهواء (3.5 غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون) لتساوي انبعاثات الكربون المتبقية في الغلاف الجوي والتي يتعين احتجازها للوصول إلى تحقيق توازن الكربون في عام 2050م. بينما قد يعني تزايد علميات الجمع المباشر للهواء الحاجة إلى جهدٍ أقلّ في مكانٍ آخر في النظام. ومن ناحية أخرى، وإذا اخفقت تقنية الجمع المباشر للهواء في الوصول إلى مرحلة الاكتمال، فستزيد بالتالي الأعباء على بقية أجزاء النظام الأخرى.

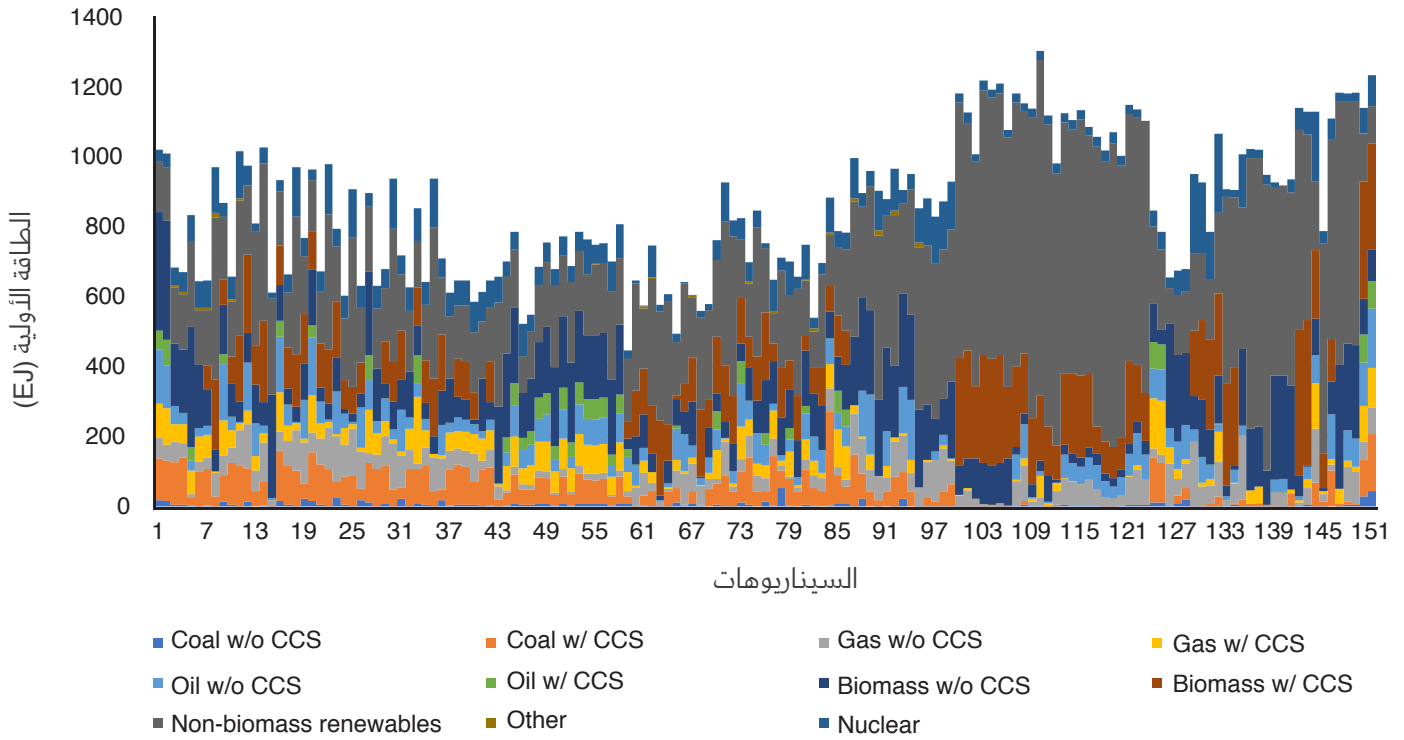
## مزيج الطاقة الأولية

إذا تطور العالم في نهاية المطاف بطريقة نفي بأهداف اتفاق باريس لتحقيق الاستقرار في المناخ، بناءً عليه فإن جميع العناصر (وربما بعضها الذي لم يتم تصوره حتى الآن) التي تم توضيحها في الشكل رقم (1) أعلاه ستضطلع بدورها. ويعتمد مقدار مساهمة كل من الاستراتيجيات الأربع –التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير والإزالة- على العديد من العوامل مثل تكاليف وأداء التقنيات وتوافر الموارد على أساس الجغرافيا والجيولوجيا والقبول العام والسياسات التمكينية.

يوضح الشكل رقم (2) أدناه مزيج الطاقة الأولية في عام 2050م بوحدة الأكساجول (exajoules (EJ) للسيناريوهات التي تؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة من 1.5 درجة مئوية إلى درجتين مئويتين في متوسط درجة الحرارة العالمية فوق مستويات ما قبل الحقبة الصناعية في عام 2100م. وهو مأخوذ من مستكشف سيناريو نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد (Huppmann et al. 2018)، (IAMC)، وهي عبارة عن قاعدة بيانات السيناريوهات التي تدعم التقرير الخاص



**الشكل رقم (2).** مزيج الطاقة الأولية في عام 2050م لسيناريوهات مستكشف سيناريو نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد للحد من متوسط الزيادة في درجات الحرارة العالمية بما لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية، مما أدى إلى زيادة تتراوح بين 1.5 درجة مئوية ودرجتين مئويتين في متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى من مستويات ما قبل الحقبة الصناعية في عام 2100م

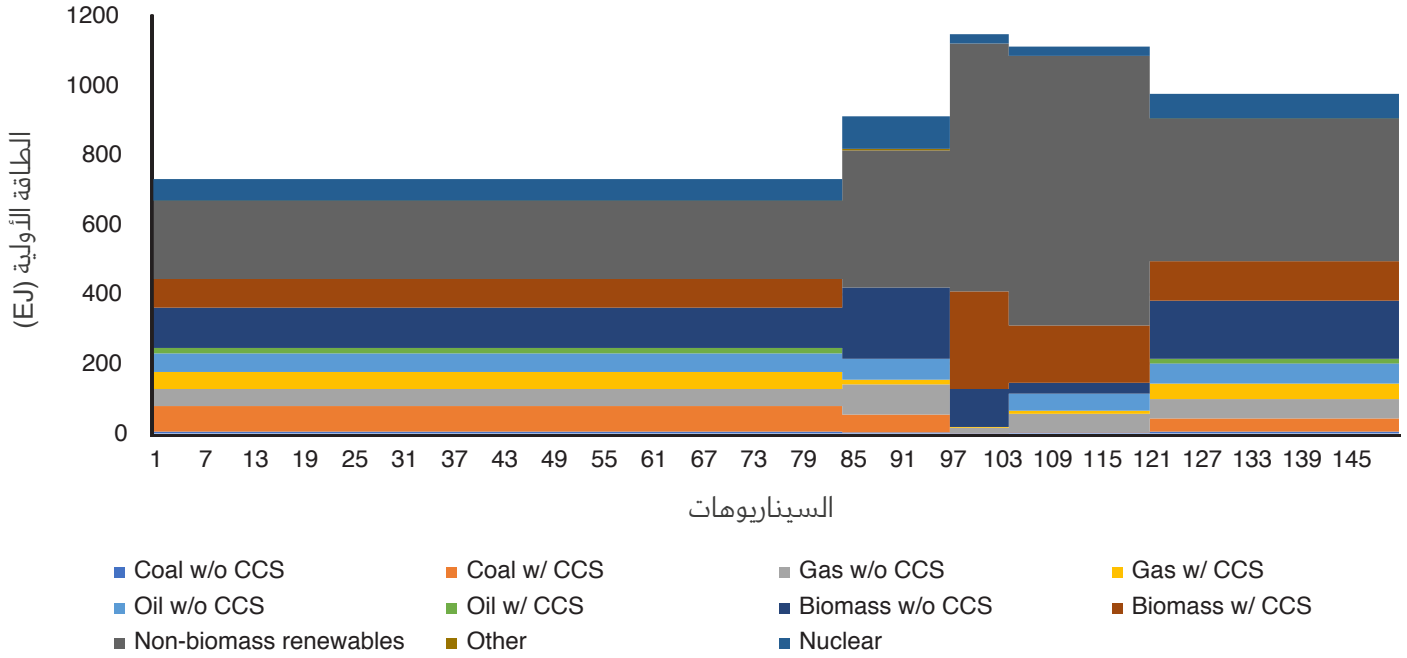


المصدر: نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد (IAMC).

للفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ عن "آثار الاحترار العالمي بنسبة 1.5 درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية" (Rogelj et al. 2018).

يتيح عدد من السيناريوهات المشاركة مخططاً بيانياً يصعب تفسيره إلى حد ما مثل الشكل رقم (2) أعلاه، ويعد تحليل المجموعة الذي يقوم بتجميع أو حشد سيناريوهات متشابهة معاً مفيداً لفهم أنواع هذه السيناريوهات. ويوضح الشكل رقم (3) نتائج تحليل المجموعات باستخدام تحليل (Matlab) الذي تم فيه تحديد أربع (4) مجموعات رئيسية تحتوي على ما لا يقل عن أربعة سيناريوهات، بالإضافة إلى مجموعة خامسة تجمع بين عدة مجموعات مع ثلاثة سيناريوهات أو أقل. ومن ثم تم تجميع هذه السيناريوهات بحسب المجموعات وتم حساب متوسط قيم طاقتها الأولية في كل مجموعة من المجموعات الخمس. ونلاحظ أن معظم السيناريوهات تقع في مجموعة تتسم بالتوازن الجيد بين جميع خيارات الطاقة الأولية، بما فيها كفاءة الطاقة وخفض الطلب (السيناريوهات "1 – 84" في الشكل رقم "3").

**الدشكـل رقم (3).** متوسط قيم مزيج الطاقة الأولية في عام 2050م المأخوذة من ست مجموعات من السيناريوهات في مستكشف سيناريو نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد للحد من متوسط الزيادة في درجات الحرارة العالمية بما لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية، مما أدى إلى زيادة تتراوح بين 1.5 درجة مئوية ودرجتين مئويتين في متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى من مستويات ما قبل الحقبة الصناعية في عام 2100م.

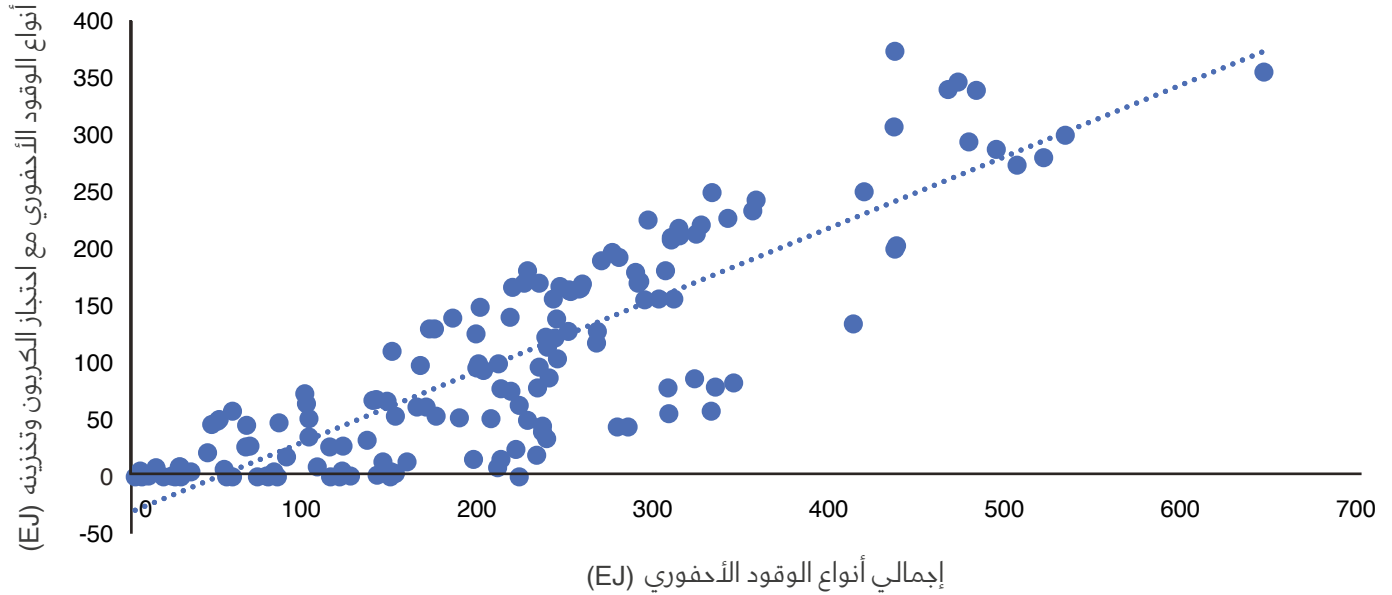


المصدر: نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد (IAMC)، وتحليل كابسارك.

لا شك أنّ الطاقة المتجددة والكتلة الحيوية وغير الحيوية تلعب جميعها كما هو متوقع دوراً بالغ الأهمية في أيّ مسارٍ يهدف لتحقيق توازن الكربون والاستقرار في المناخ، وربما يلعب الوقود الأحفوري -بنحو أقلّ من المتوقع- كذلك دوراً مهماً في معظم السيناريوهات التي تم تحليلها. حيث نجد أنّ أربع مجموعات من المجموعات الخمس -التي تمثل نسبة 95% من السيناريوهات- تُظهر أنواعاً من الوقود الأحفوري في مزيج الطاقة. فعلى سبيل المثال يساهم النفط بمقدار يتراوح بين (50 و 72 EJ) من الطاقة الأولية في عام 2050م بالنسبة لمجموعات السيناريوهات الأربعة.

كان لكل سيناريو في مستكشف سيناريو نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد -الذي ينجم عنه زيادة تتراوح بين 1.5 درجة مئوية ودرجتين مئويتين في متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى من مستويات ما قبل الحقبة الصناعية في عام 2100م- بعض الإسهام في نشر تكنولوجيا احتجاز وتخزين الكربون على الأقل بحلول عام 2050م. حيث بلغ متوسط حصة الطاقة الأولية مع احتجاز وتخزين الكربون -الذي يجمع بين احتجاز وتخزين الكربون الأحفوري والكتل الحيوية- عبر السيناريوهات نسبة 24%. تنتج نسبة 80% من السيناريوهات التي تم تحليلها ما لا يقل عن 10% من الطاقة الأولية من خلال احتجاز وتخزين الكربون. وتوضح العلاقة الواضحة بين إجمالي أنواع الوقود الأحفوري في مزيج الطاقة الأولية وأنواع الوقود الأحفوري التي تحتوي على احتجاز وتخزين الكربون أن احتجاز وتخزينه يتيحان زيادة استخدام الوقود الأحفوري (راجع الشكل رقم 4). تشير هذه السيناريوهات استناداً إلى فهمنا الحالي إلى أن قضية تثبيت استقرار المناخ لن تنجح من دون استخدام تقنية احتجاز وتخزينه، ورغم ذلك فإنه لم يتم نشر تكنولوجيا احتجاز الكربون وتخزينه على نطاقٍ واسع حتى الآن.

**الدشكـل رقم (4).** العلاقة بين إجمالي أنواع الوقود الأحفوري والوقود الأحفوري مع احتجاز الكربون وتخزينه في عام 2050م للسـيناريوهات الواردة في في مستكشـف سيناريو نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد للحد من متوسط الزيادة في درجات الحرارة العالمية بما لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية، مما أدى إلى زيادة تتراوح بين 1.5 درجة مئوية ودرجتين مئويتين في متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى من مستويات ما قبل الحقبة الصناعية في عام 2100م.



المصدر: نمذجة التقييم المتكامل للاتحاد (IAMC).

من المرجح أن يلعب الوقود الكربوني دوراً بالغ الأهمية في مزيج الطاقة العالمي في المستقبل، ولا تقل أهميته عن الحد من الكربون عن طريق نشر مقاييس كفاءة استخدام الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة والطاقة النووية، إلا أن من المهم التفكير في مجموعة واسعة من الخيارات المتعلقة بكيفية إعادة استخدام وإعادة تدوير وإزالة الكربون الذي سيستمر وجوده في النظام.

## السياسات التمكينية

رغم أن الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية إطار مُفيد لتحقيق توازن الكربون، إلا أن من غير المرجح حدوث هذا بشكل طبيعي وعضوي. ولن يكون هنالك حافز كبير لتطوير التكنولوجيا ونشرها بدون استخدام سياسات التمكين، وستستمر عملية إغلاق الحلقة في الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية في العقود المقبلة. وستحدد الاقتصاديات والملاءمة الاجتماعية في نهاية المطاف حجم الدور الذي يلعبه كل عنصر في الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية. كما أن السياسات التي تنقل الاستثمار نحو إغلاق الحلقة الخاصة باستخدام الموارد من خلال توفير حوافز للتقنيات في كل السياسات الأربع –التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير والإزالة- تعدُّ بأعظم فرص النجاح. حيثُ تشمل هذه السياسات اتحادات تمويل البحث والتطوير من القطاعين العام والخاص في مختلف البلدان والشركات والإعانات المالية لتعويض مخاطر التقنيات غير المثبتة والحوافز الضريبية والإعانات المباشرة للاستثمار في رؤوس الأموال والتمويل القائم على النتائج (مثل: أموال كل وحدة من الطاقة المنتجة) من بين أمور أخرى (Grubb 2004، مجموعة البنك الدولي وكلية فرانكفورت للإدارة المالية 2017).

يعني التنوع الجغرافي والميزة النسبية أنّ الشركات والدول ستستفيد من التعاون في الجهود المبذولة لإغلاق الحلقة، ويوفر تنوع الأوقاف والظروف بين البلدان المختلفة فرصاً كبيرة لتحقيق المكاسب الناتجة عن زيادة الكفاءة من التجارة. يوفر تبادل حصص الكربون سبيلاً لإغلاق الحلقة دون إثقال كاهل الشركات والبلدان التي ليس لديها مجموعة متنوعة من الخيارات لخفض الكربون وإعادة استخدامه وإعادة تدويره وإزالته<sup>2</sup>. بينما يوفر تبادل حصص الكربون في الوقت ذاته حافزاً للشركات والدول التي لديها وفرة من خيارات الاستراتيجيات الرباعية للقيام بأكثر مما تحتاجه لجعل انبعاثاتها الكربونية متوازنة. فعلى سبيل المثال، يمنع تبادل حصص الكربون الدول التي لا تتمتع بقدرة تخزين الكربون خياراً لمواصلة استخدام الوقود الأحفوري عن طريق الدفع للشركات الأخرى والبلدان ذات القدرة التخزينية لتخزين المزيد من الكربون.

يمكن استخدام آليات التبادل بطرقٍ أخرى لمساعدة التقنيات في الوصول إلى الاستغلال التجاري، فعلى سبيل المثال طور كابسارك فكرة عن آلية مبتكرة بموجب المادة السادسة (6) من اتفاقية باريس لتنشئ وحدة تخزين الكربون (CSU) وهي منفصلة عن أي نوعٍ من وحدات الحد من الكربون المستمدة من نظامٍ أوسع لتبادل حصص الكربون. بالإضافة إلى أنّ تسعير إزالة الكربون يوفر حافزاً إضافياً لاستغلال تكنولوجيا التخزين وكذلك لتسهيل الابتعاد عن التفكير الخطي بشأن تخفيف الانبعاثات فقط نحو التفكير الدائري حيث يتم تسعير كل من الانبعاثات وعمليات الإزالة. ولقد حدد بحث حديث أعده باحثو كابسارك بعض لبنات بناء السياسات المفيدة لمثل هذا النهج (Zakkour and Heidug 2019).

## الخاتمة

يقدم الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية طريقةً مفيدة للتوصل لفهم مجموعة واسعة من خيارات التخفيف من حدة التغيير في المناخ من خلال نهج الأنظمة، كما يكشف عن الدرجة التي تُمكن كل عنصر داخل النظام من الإسهام في الحل، وذلك نسبةً إلى فعاليته من حيث التكلفة ومدى توافره. كذلك يكشف الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية عن الكيفية التي تمكّن نقاط الاختناق في أيّ من الاستراتيجيات الأربع –التخفيف وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير والإزالة- من أنّ تجعل تدفقات الكربون في النظام غير قابلة للإدارة في حالة عدم توفر التكنولوجيا الرئيسية. فعلى سبيل المثال: من غير المحتمل تحقيق استقرار المناخ من دون استخدام تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه. وتحدد نقاط الاختناق المُحتملة بدورها أولويات سياسة التكنولوجيا، بينما تقوم شركات مثل الشركة السعودية للصناعات الأساسية (سابك) بتطوير تقنيات لاستخدام الكربون، إلا أنّ هذا يتم على نطاق ضيق للغاية. سيتطلب القيام بدور أكبر في استخدام الكربون إبلء مزيدٍ من الاهتمام وتوفير الحوافز من مجتمعات الأعمال والسياسة. وأخيراً، يؤكد الاقتصاد الدائري مُنخفض الانبعاثات الكربونية كذلك على القيمة التي يتمتع بها نظام تبادل حصص الكربون في تعزيز التعاون بين الشركات والدول وإغلاق الحلقات من خلال مؤشرات الأسعار والحوافز الاقتصادية وخفض التكاليف الإجمالية.

## نبذة عن الباحثين

إريك وليامز: زميل باحث عمل قبل انضمامه لكابسارك خبيراً اقتصادياً في هيئة مرافق كارولينا الشمالية، وكان مستشاراً لمنظمة التعاون والتنمية الاقتصادية. وقبل ذلك، التحق ببرنامج الدكتوراه في جامعة ديوك لدراسة نمذجة

<sup>2</sup> يجب أن تدعم أطر محاسبة الكربون أنظمة تبادل حصص خفض الانبعاثات الكربونية وتبادل حصص تخزين الكربون، ونعدّ سلامة طن واحد من الكربون المخفض أو المخزن عنصراً أساسياً لضمان توفر الثقة في أيّ نظام تبادل تجاري. وينبغي على القواعد أن توازن بين تبسيط متطلبات المحاسبة حتى لا تثبط النشاط مع الحفاظ على توفر الثقة الكافية في الإطار.

أنظمة الطاقة. وتشمل خبرة إيريك أيضًا العمل خبيراً اقتصادياً في مجال الطاقة والبيئة في الوكالة الدولية للطاقة الذرية، وشارك في إدارة مشروع شراكة سياسة تغير المناخ في معهد نيكولاس لحلول السياسات البيئية في جامعة ديوك في الولايات المتحدة الأمريكية. كما عمل أيضًا مديرًا ومحلل سياسات أول في مركز سياسة الهواء النقي- منظمة غير حكومية في واشنطن العاصمة- وعمل أيضًا في إدارة معلومات الطاقة بالولايات المتحدة وفي مركز أبحاث معهد تايلوس في بوسطن.

## المراجع

Grubb, Michael. 2004. "Technology Innovation and Climate Change Policy: An Overview of Issues and Options." *Keio Economic Studies* no. 41 (2):103-132.

Huppmann, Daniel, Elmar Kriegler, Volker Krey, Keywan Riahi, Joeri Rogelj, Steven K. Rose, John Weyant, Nico Bauer, Christoph Bertram, Valentina Bosetti, Katherine Calvin, Jonathan Doelman, Laurent Drouet, Johannes Emmerling, Stefan Frank, Shinichiro Fujimori, David Gernaat, Arnulf Grubler, Celine Guivarch, Martin Haigh, Christian Holz, Gokul Iyer, Etsushi Kato, Kimon Keramidas, Alban Kitous, Florian Leblanc, Jing-Yu Liu, Konstantin Löffler, Gunnar Luderer, Adriana Marcucci, David McCollum, Silvana Mima, Alexander Popp, Ronald D. Sands, Fuminori Sano, Jessica Strefler, Junichi Tsutsui, Detlef Van Vuuren, Zoi Vrontisi, Marshall Wise, and Runsen Zhang. 2018. IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis.

International Energy Agency (IEA). 2019. "Transforming Industry through CCUS."

Rogelj, Joeri, Drew Shindell, Kejun Jiang, Solomone Fifita, Piers Forster, Veronika Ginzburg, Collins Handa, Haroon Kheshgi, Shigeki Kobayashi, Elmar Kriegler, Luis Mundaca, Roland Séférian, and Mario V. Vilariño. 2018. "Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development." In *Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Shell. 2016. "A Better Life with a Healthy Planet: Pathways to Net-Zero Emissions."

Smeets, Pieter. 2019. "SABIC contributions to A+ 4Rs."

World Bank Group, and Frankfurt School of Finance and Management. 2017. "Results-Based Climate Finance in Practice: Delivering Climate Finance for Low-Carbon Development."

Zakkour, Paul, and Wolfgang Heidug. 2019. "A Mechanism for CCS in the Post-Paris Era." KAPSARC Discussion Paper.

Zhang, Runsen, Shinichiro Fujimori, and Tatsuya Hanaoka. 2018. "The contribution of transport policies to the mitigation potential and cost of 2°C and 1.5°C goals." *Environmental Research Letters* no. 13 (5):054008. doi: [10.1088/1748-9326/aabb0d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabb0d).



[www.kapsarc.org](http://www.kapsarc.org)