مؤسسة دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE FOUNDATION

مايو 2023

الكربون:
قطاع مستقبلي بقيمة 15 تريليون دولار

يُنشر هذا التقرير بموجب ترخيص المشاع الإبداعي باستثناء النصوص أو الشعارات أو الصور التي تملكها جهات أخرى. يُسمح بنسخ محتوى التقرير وتوزيعه على أن تنسبه إلى مصدره الأصلي، وتبيّن إن أجريت عليه أي تغيرات، وتضيف رابطاً إلى الترخيص. يتوفر الترخيص على الرابط التالي: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.

يستثني هذا الإشعار أيضاً على وجه التحديد العلامات التجارية لاسم مؤسسة دبي للمستقبل وشعاره من نطاق ترخيص المشاع الإبداعي.

الفهـــــــرس

01 الملخص التنفيذي ..... صـ 4

02 الغلاف الجوي للأرض ..... صـ 7

الوضع الحالي

الكربون الزائد

03 قيمة الكربون ..... صـ 8

أسواق الكربون

تعويض الكربون

تحول الكربون إلى سلعة

04 طرق إزالة الكربون ..... صـ 10

دورة الكربون الطبيعية

إزالة الكربون الناتج عن النشاط البشري

تمعدُن ثاني أكسيد الكربون

تحسين مستوى القلوية في المحيطات

عزل الكربون في التربة

تحسين إدارة الغابات والتشجير وإعادة التشجير وتشجير الأراضي الزراعية

الكربون الأزرق

الفحم الحيوي

تقنية "الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه"

الالتقاط المباشر من الهواء

05 استخدامات الكربون ..... صـ 21

استخدامات الكربون الحالية

استخدامات الكربون الناشئة

الوقود الاصطناعي

الخرسانة المكثفة

الاستخدامات الأخرى

06 الخاتمة ..... صـ 25

07 التوصيات ..... صـ 26

الحوافز المباشرة

النظام البيئي الداعم

08 شكر و تقدير ..... صـ 28

01

الملخص التنفيذي

تراكمت الانبعاثات الضارة الناتجة عن النشاط البشري في الغلاف الجوي لكوكب الأرض منذ الثورة الصناعية الأولى لتصل إلى نحو تريليون طن من ثاني أكسيد الكربون، وهذا ما أدى إلى ارتفاع في درجة الحرارة العالمية بحوالي درجة مئوية واحدة حتى الآن.

ووفقاً للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيّر المناخ والتابعة للأمم المتحدة، لن يكون خفض الانبعاثات كافياً للحد من ارتفاع درجة الحرارة العالمية بمقدار 1.5 درجة مئوية، بل يجب علينا أيضاً إزالة كمية كبيرة من الكربون المتراكم حالياً في الغلاف الجوي.[1]

ويسعى المبتكرون ورواد الأعمال لمواجهة هذا التحدي من خلال تطوير مبادرات لإزالة الكربون عبر الطبيعة أو عبر توظيف التقنيات المتقدمة، ويحصل مطورو المبادرات المماثلة على مقابل مادي عند إزالة الكربون من خلال إصدار أرصدة الكربون وبيعها، حيث يمثل كل رصيد كربون طناً واحداً من انبعاثات الكربون التي تمت إزالتها من الغلاف الجوي. وقد بلغ متوسط سعر أرصدة الكربون منذ نوفمبر 2021 أكثر من 15 دولاراً للطن،[2] ما قد يحوّل إزالة الكربون إلى قطاع مستقبلي بقيمة 15 تريليون دولار.

هناك العديد من طرق إزالة الكربون مثل التجوية المحسَّنة والتمثيل الضوئي المحسَّن والحلول الكيميائية، ونتناول في هذا التقرير بعض هذه الطرق التي تختلف بشكل كبير من حيث تكلفتها وجاهزية السوق لها وسهولة اعتمادها وتخزينها واستدامتها.

وهناك جهود مستمرة لتحسين طرق إزالة الكربون المتاحة وخفض تكاليفها، وابتكار طرق جديدة عبر البحث والتطوير.

وفي العادة يتم عزل الكربون المُلتقَط أو استخدامه، إلا أن استخدامه قد يكون أفضل من مجرد عزله، ويتوقف ذلك على طريقة الاستخدام والفوائد الناتجة عنها. وتتعدد الاستخدامات الناشئة للكربون الملتقَط، ومن بين الاستخدامات ذات التأثير المباشر: إنتاج الوقود الاصطناعي النظيف الذي يمكن استعماله في المركبات ذات محركات الاحتراق الداخلي حول العالم، وكذلك استخدام الكربون في الخرسانة المكثفة والتي يمكن من خلالها إزالة الكربون المنبعث من قطاع ينتج نحو 7% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم.[3] مع العلم أن بعض الاستخدامات مثل احتراق الوقود الاصطناعي تتسبب في عودة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي مرة أخرى.

وتمتلك دبي المقومات التي تؤهلها لتصبح مركزاً عالمياً لإزالة الكربون، ومصدّراً مهماً لأرصدة الكربون بسبب مواردها الشمسية المتوفرة على مدار العام، وتركيزها على الابتكار، ونظامها البيئي الرائد، وقربها من التكوينات الجيولوجية المناسبة لعزل ثاني أكسيد الكربون لفترة طويلة. وبناءً عليه، نقدّم في هذا التقرير عدداً من التوصيات لتحفيز قطاع إزالة الكربون في دبي.

بلغ متوسط سعر أرصدة الكربون منذ نوفمبر 2021 أكثر من 15 دولاراً للطن، ما قد يحوّل إزالة الكربون إلى قطاع مستقبلي بقيمة 15 تريليون دولار.

02 الغلاف الجوي للأرض

الوضع الحالي

يتكون الغلاف الجوي للأرض بشكل أساسي من النيتروجين (78%) والأكسجين (21%) ويحتوي أيضاً على كميات صغيرة من الأرغون (0.93%) وبعض الغازات الأخرى (0.04%) مثل ثاني أكسيد الكربون والنيون والهيليوم.[4]

ولا شك أن العالم قد استفاد من النمو الاقتصادي غير المسبوق الذي تم تحقيقه خلال القرنين الماضيين، إلا أن هذا النمو قد تسبب في تبعات سلبية مثل تغيّر المناخ وارتفاع درجة الحرارة العالمية؛ فقد ارتفع متوسط درجة حرارة سطح كوكب الأرض بنحو درجة مئوية واحدة منذ أواخر القرن التاسع عشر،[5] وأكد العلماء أن هذا الارتفاع في درجة الحرارة العالمية مرتبط بالنشاط البشري.[6]

وقد كان هذا النمو خلال القرنين التاسع عشر والعشرين معتمداً بشكل كبير على حرق الوقود الأحفوري في دول العالَم التي كانت في طور التحول إلى النموذج الصناعي، ما أدى إلى انبعاث كميات كبيرة من غازات الدفيئة التي تحبس الحرارة وتتسبب في ارتفاع درجة الحرارة العالمية. وتسبب النشاط البشري في انبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون منذ بداية العصر الصناعي، لدرجة أن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي تَضاعفَ تقريباً؛ فقد كانت نسبته تناهز 280 جزءاً في المليون قبل الثورة الصناعية الأولى في أواخر القرن الثامن عشر،[7] فيما تبلغ الآن أكثر من 425 جزءاً في المليون حسب البيانات الصادرة في أغسطس 2022.[8]

الكربون الزائد

انبعث حوالي 950 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون الزائد بين عامَي 1850 و2019، بسبب الأنشطة البشرية مثل حرق الوقود الأحفوري.[9]

وفي إطار الجهود الهادفة إلى الحد من تغيّر المناخ، تسعى الحكومات والمنظمات الحكومية الدولية والمنظمات غير الحكومية ومؤسسات القطاع الخاص حول العالم، إلى الحد من انبعاث المزيد من غازات الدفيئة، وابتكار طرق لإزالة الكربون من الغلاف الجوي. ويسعى العالم إلى تعزيز جهود خفض الكربون وإزالته من الغلاف الجوي من خلال السياسات والتشريعات المتطورة وجهود التمويل الخاصة، وهذا ما يدعم تعزيز الابتكار في هذا المجال للوصول إلى طرق جديدة لالتقاط الكربون واستخدامات جديدة للكربون الملتقَط، وهذا ما سيتناوله هذا التقرير.

03 قيمة الكربون

أسواق الكربون

أسهمت أنشطة التمويل الطوعي والسياسات والتشريعات البيئية المتقدمة في تحفيز الطلب على مشاريع خفض الكربون وإزالته من الغلاف الجوي حول العالم. وتشمل مشاريع خفض الكربون التقنيات التي تخفف من كمية الانبعاثات في مصادر التلوث، بينما تهدف مشاريع إزالة الكربون إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون أو امتصاصه من الغلاف الجوي وتخزينه بشكل دائم. ويحصل مطورو هذه المشاريع على مقابل لجهودهم من خلال أسواق الكربون، التي يتم فيها تداوُل "أرصدة الكربون"، ويمثّل كل رصيد كربون طناً واحداً من ثاني أكسيد الكربون الذي تم خفضه أو إزالته من الغلاف الجوي.

جودة أرصدة الكربون

توجد العديد من العوامل المتعلقة بجودة أرصدة الكربون بما في ذلك القيمة الإضافية وازدواج الحساب والديمومة، وفيما يلي بيان لكل منها:

01

تحقيق القيمة الإضافية

يُعتبَر مشروع تعويض الكربون محققاً لقيمة إضافية إذا لم يكن هذا المشروع ممكناً لولا وجود الإيرادات أو الفوائد الناتجة عن بيع أرصدة الكربون ذات الصلة به.[10] فالغاية من أرصدة الكربون هي تشجيع المبادرات ذات القيمة الإضافية الهادفة إلى خفض الكربون وإزالته. وتُعد مشاريع خفض الكربون أو إزالته، التي تم التحقق من معايير إضافتها لقيمة جديدة بواسطة منظمات مستقلة وموثوقة، مشاريع ذات جودة أعلى من غيرها، وبالتالي تُحقق أرصدة الكربون المرتبطة بها أسعاراً أعلى.

02

منع ازدواج الحساب

لا يمكن تجاهل خطر ازدواج الحساب رغم سهولة التحقق من ملكية أرصدة الكربون، ولا يجوز بأي حال من الأحوال بيع رصيد الكربون نفسه لجهات متعددة في الوقت ذاته. وتُعتبَر مشاريع خفض الكربون أو إزالته المسجلة لدى المنظمات المستقلة والموثوقة أعلى جودة من غيرها، ومن ثمّ فإن أرصدة الكربون المرتبطة بها تُحقق أسعاراً أعلى.

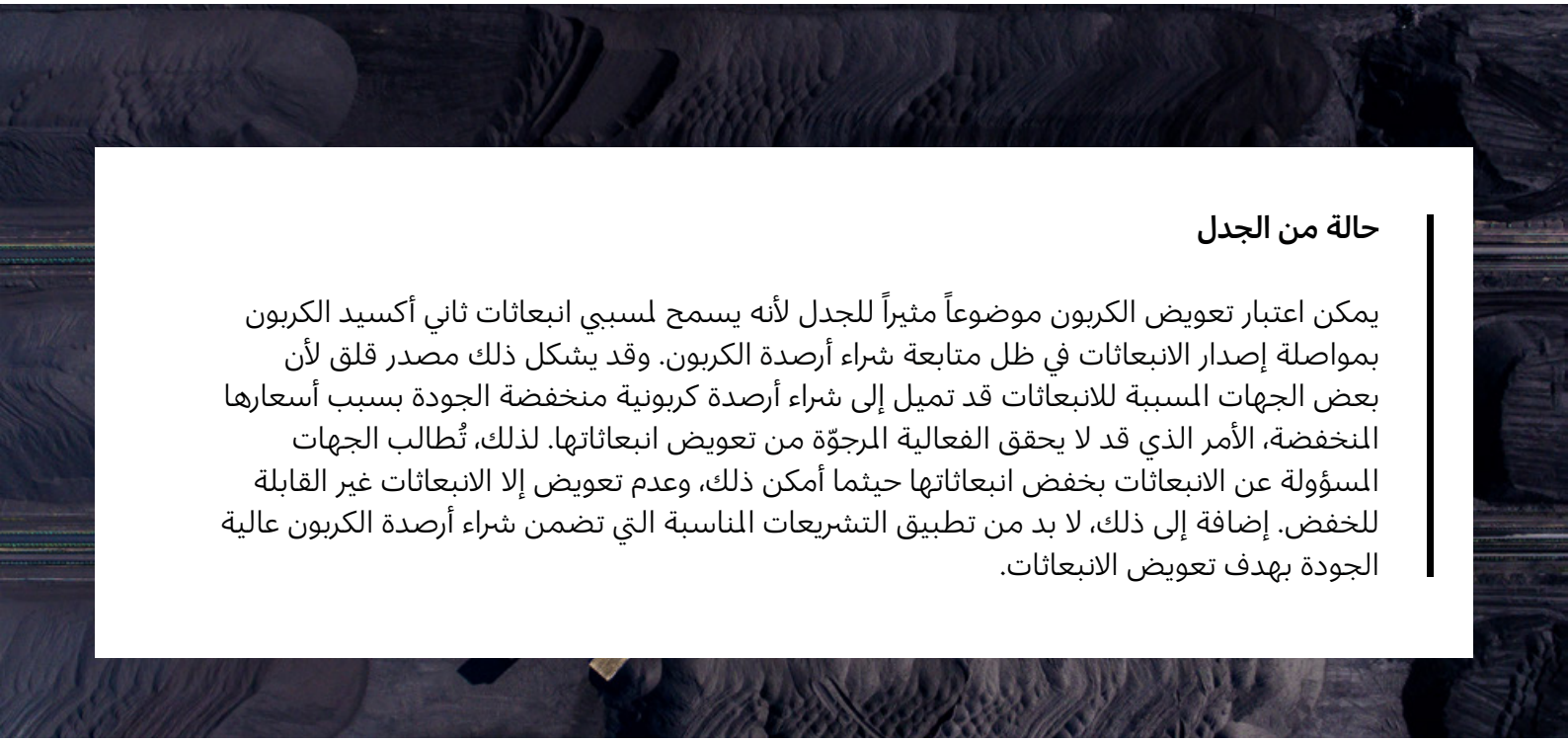
03

الديمومة

تشير الديمومة إلى مقدار الوقت الذي يدوم فيه خفض الكربون أو إزالته، فلكي تثبت فعالية تعويض الكربون، يجب ألا يعود ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي بعد فترة قصيرة من الزمن. وتُعتبَر مشاريع خفض الكربون أو إزالته التي تضمن عدم عودة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي لفترة طويلة مشاريع ذات جودة أعلى من غيرها، فتُحقق أرصدة الكربون المرتبطة بها أسعاراً أعلى. وغالباً ما يُشار إلى ذلك باسم "علاوة الديمومة".

تعويض الكربون

يتم تعويض الكربون حين يقوم الأفراد أو الشركات المسؤولة عن انبعاث ثاني أكسيد الكربون بتمويل مبادرات خفض ثاني أكسيد الكربون أو إزالته من الغلاف الجوي، في محاولةٍ لتعويض الانبعاثات التي تنتج عن أعمالها. على سبيل المثال، يمكن أن يختار أي شخص مسافر على متن طائرة تعويض الانبعاثات الناتجة عن رحلته عن طريق دفع رسوم إضافية على تذكرته تستخدمها شركة الطيران في مبادرات إزالة الكربون أو خفضه. كما يمكن لشركات التكنولوجيا التي تمتلك مراكز بيانات وتديرها، إذا كان مصدر الكهرباء الذي تعتمده غير نظيف، التعويض عن الانبعاثات التي تتأتى عن إنتاجها من خلال تمويل مشروع مخصص لخفض الكربون أو إزالته من الغلاف الجوي.



حالة من الجدل

يمكن اعتبار تعويض الكربون موضوعاً مثيراً للجدل لأنه يسمح لمسببي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمواصلة إصدار الانبعاثات في ظل متابعة شراء أرصدة الكربون. وقد يشكل ذلك مصدر قلق لأن بعض الجهات المسببة للانبعاثات قد تميل إلى شراء أرصدة كربونية منخفضة الجودة بسبب أسعارها المنخفضة، الأمر الذي قد لا يحقق الفعالية المرجوّة من تعويض انبعاثاتها. لذلك، تُطالب الجهات المسؤولة عن الانبعاثات بخفض انبعاثاتها حيثما أمكن ذلك، وعدم تعويض إلا الانبعاثات غير القابلة للخفض. إضافة إلى ذلك، لا بد من تطبيق التشريعات المناسبة التي تضمن شراء أرصدة الكربون عالية الجودة بهدف تعويض الانبعاثات.

تحول الكربون إلى سلعة

يُمكن اعتبار الكربون سلعة نظراً إلى وجود سوقٍ له وطلبٍ عليه وإلى تمتعه بقيمة في تلك السوق، ويمكن اعتبار التقاط الكربون من الجو فرصة اقتصادية واعدة ذات منافع بيئية هائلة.

يفوق سعر أرصدة الكربون في الوقت الحالي 5 دولارات لطن ثاني أكسيد الكربون الذي تم خفضه[11] و15 دولاراً لطن ثاني أكسيد الكربون الذي تمت إزالته،[12] وقد ترتفع الأسعار بسرعة بسبب الحاجة إلى اتخاذ إجراءات عاجلة للحد من تغيّر المناخ.[13] وتجدر الإشارة إلى أن هذه الأرقام تعكس متوسط الأسعار المتاحة لكنها قد تختلف حسب التقنية المستخدَمة وجودة أرصدة الكربون. ويتوقع أن تحافظ أرصدة الكربون على قيمتها إلى أن يتمكن العالَم من إزالة ما يكفي من الكربون لتغيير مسار الزيادة في درجة الحرارة العالمية، حيث يحتاج العالَم إلى إزالة ما يعادل 15 تريليون دولار (أي نحو تريليون طن من ثاني أكسيد الكربون)، حسب الأسعار الحالية، لإعادة الغلاف الجوي إلى الحالة التي كان عليها قبل الثورة الصناعية الأولى، ما قد يؤدي إلى عكس مسار تغيّر المناخ الناجم عن النشاط البشري. وبمجرد تحقيق هذا الهدف، سيكون من الضروري كل عام إزالة كمية معادِلة لانبعاثاتنا السنوية من أجل الحفاظ على صافي الانبعاثات الصفرية.

04 طرق إزالة الكربون

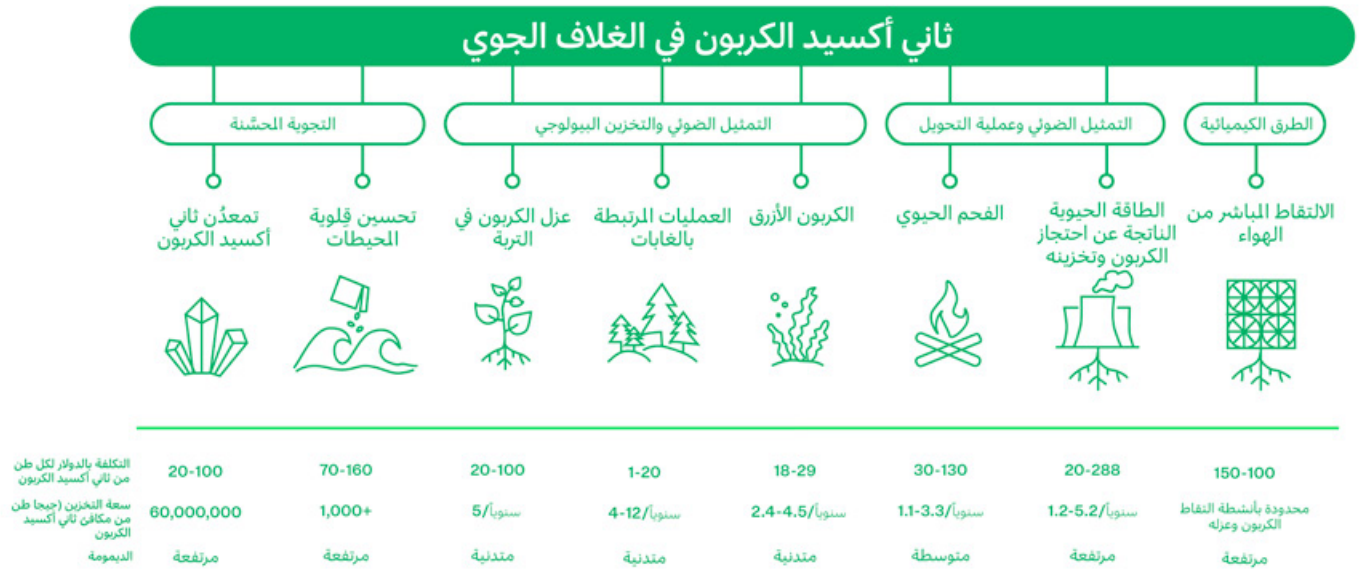
دورة الكربون الطبيعية

حافظ كوكب الأرض على استقرار دورة امتصاص ثاني أكسيد الكربون وإطلاقه حتى عصر الثورة الصناعية الأولى. وكان هناك توازن بيئي في ظل صفرية الانبعاثات الكربونية، حيث دأبت المحيطات والأرض على امتصاص ثاني أكسيد الكربون الذي يُطلِق بشكل طبيعي في الغلاف الجوي. ومع ذلك، كان يحدث في بعض الأحيان بعض الخلل في هذا التوازن نتيجة انبعاث كمية إضافية من ثاني أكسيد الكربون بسبب عمليات طبيعية. غير أن ما يحدث الآن هو اختلال هائل في هذا التوازن بسبب النشاط البشري.

وتتسبب الانبعاثات المتراكمة في امتصاص الأرض لكمية أكبر من السابق من ثاني أكسيد الكربون، ما يؤدي إلى حدوث تغييرات ضارة في أنظمتنا البيئية، مثل زيادة حموضة المحيطات.[14] ونظراً لأن كميات ثاني أكسيد الكربون التي تُطلق في الغلاف الجوي أكبر مما يمكن أن تمتصه المحيطات والأرض، فلن يكون صافي دورة الكربون الطبيعية صفرياً، وستستمر المحيطات والأرض في امتصاص كميات أكبر من أي وقتٍ مضى من ثاني أكسيد الكربون، ما يبدّل أنظمتنا البيئية بشكل دائم.

إزالة الكربون الناتج عن النشاط البشري

يعد اختلال التوازن في دورة الكربون الطبيعية سبباً ملحّاً لتحفيز مشاريع إزالة الكربون. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام عدة طرق مثل عمليات التجوية المحسَّنة والتمثيل الضوئي المحسَّن والحلول الكيميائية وغيرها. ويوضح الرسم البياني التالي الطرق الأكثر شيوعاً لإزالة الكربون، مع العلم أنه غير حصري ولا يشمل جميع الطرق.[15] كما يقدّم نبذة عامة عن كل الطرق المتاحة، بما في ذلك تقديرات التكلفة والمخاطر والتحديات المحتملة الخاصة بكلٍ منها.



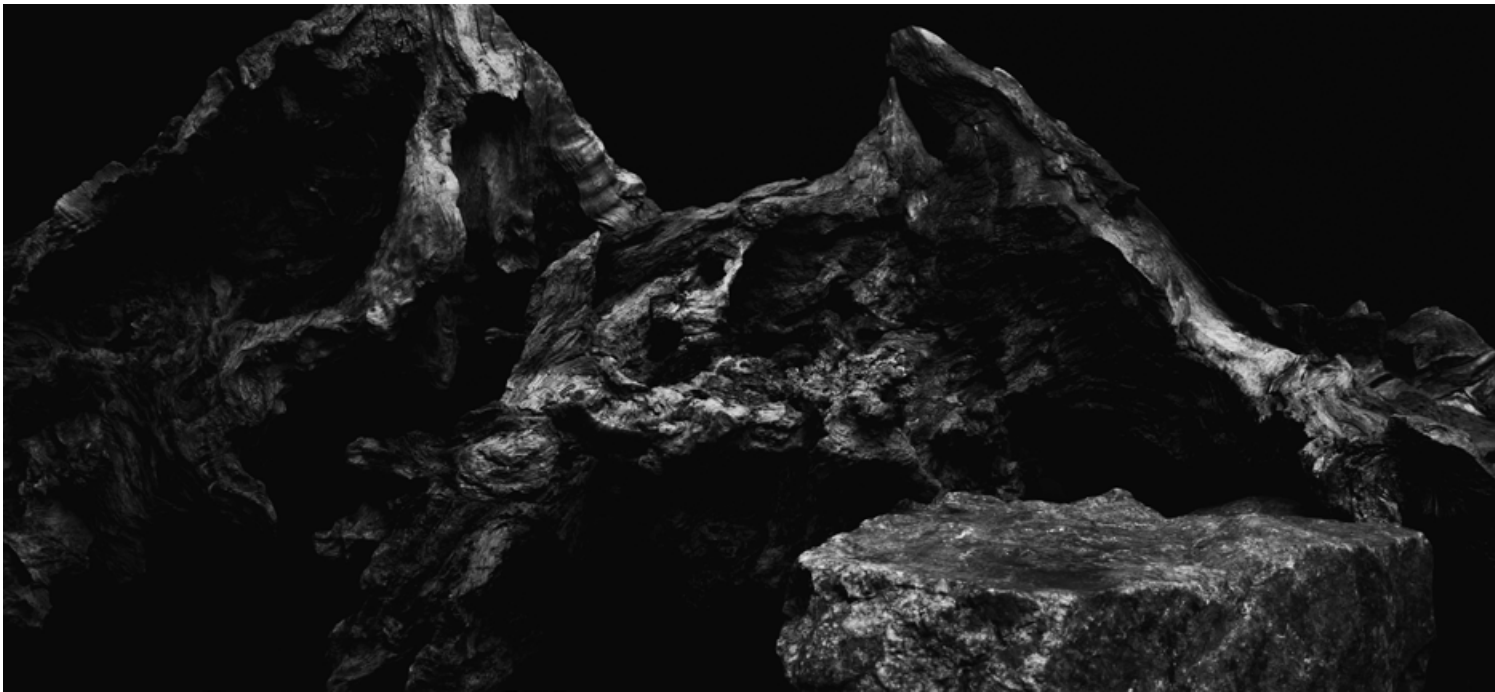
تمعدُن ثاني أكسيد الكربون

التمعدن هو عملية يتفاعل خلالها ثاني أكسيد الكربون مع مادة قلوية لتشكيل صخر كربوناتي صلب. وتَحدثُ هذه العملية بشكل طبيعي في البيئات القلوية، مثل المناطق الصخرية الغنية بالمغنيسيوم أو الكالسيوم، مثل تكوينات البازلت (البركانية) أو البيريدوتيت. ويمكن تسريع هذه العملية لإزالة ثاني أكسيد الكربون أو التقاط الكربون وعزله. ووفقاً لشركة 44.01 المتخصصة في التقاط الكربون وعزله، يظهر البيريدوتيت بشكل فريد على السطح بكميات كبيرة في دولة الإمارات العربية المتحدة وسلطنة عُمان، ما يقلل إلى حدٍ كبيرٍ من تكلفة الوصول إليه. وأوضحت الشركة أن البيريدوتيت المتوفر في المنطقة يتمتع في الإجمال بالقدرة على معدنة نحو 10 تريليون طن من ثاني أكسيد الكربون.
ويمكن تحسين تمعدن ثاني أكسيد الكربون عبر ثلاث طرق هي: [16]

التمعدن **السطحي** لثاني أكسيد الكربون
تُترك مخلفات التعدين القلوية أو الصخور القلوية على سطح الأرض لتتفاعل مع ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو، وهي عملية يمكن تعزيزها عن طريق سحق المواد المتفاعلة من أجل زيادة تعرضها للجو.

تمعدن ثاني أكسيد الكربون **في الموقع الطبيعي**
تُرسَل السوائل الغنية بثاني أكسيد الكربون تحت الأرض لتتفاعل مع المواد القلوية الموجودة تحت السطح.

تمعدن ثاني أكسيد الكربون **خارج الموقع الطبيعي**
تُستخرج المعادن وتُطحن ويتم تعريضها لثاني أكسيد الكربون في الجو، وذلك غالباً تحت درجات حرارة ونِسَب ضغط أعلى، من أجل تسريع عملية التمعدن.



تستكشف شركة الألماس "دي بيرز" آليات عزل الكربون في مناجمها في كندا وجنوب أفريقيا. وقد ثبت أن صخر الكمبرلايت - الصخر الخام المعروف باحتوائه على الألماس - يتمتع بالقدرة على تخزين كميات كبيرة من الكربون. فُتخزّن الشركة نفايات الصخور التي سبق تعدينها في سدود المخلفات فوق الأرض في مناجمها. ووفقاً لبيانات الشركة، يتمتع كل منجم بالقدرة على تعويض عشرة أضعاف انبعاثاته السنوية باستخدام مخلفات التعدين في الموقع نفسه.[17]

تقوم شركة 44.01 المتخصصة في التقاط الكربون وعزله [18] في عُمان وشركة "كاربفيكس"[19] في أيسلندا باستكشاف مشاريع تجريبية في الموقع، حيث يتم التقاط ثاني أكسيد الكربون وإذابته في المياه وحقنه تحت الأرض.

المخاطر والتحديات

تتمثل المخاوف الأساسية حول طرق عزل الكربون، مثل التمعدن في المواقع الطبيعية، في وجود احتمالات لحصول حالات تسريب، الأمر الذي من شأنه أن يعيد ثاني أكسيد الكربون المعزول إلى الغلاف الجوي، أو تلوث إمدادات المياه القريبة أو حدوث هزات أرضية نتيجة الضغط الزائد تحت الأرض. وجدير بالذكر أن العلماء في إسبانيا يجرون الأبحاث حالياً من أجل تحديد المخاطر المحتملة لعمليات عزل الكربون.[20]

التكاليف

تتراوح التكاليف المقدَّرة لعزل الكربون ما بين 20 و100 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ومع أن مخلفات التعدين هي أقل طرق عزل الكربون تكلفةً، إلا أنها قدرتها على التخزين أقل بكثير من غيرها.[21]

تحسين مستوى القلوية في المحيطات

يمتص المحيط ثاني أكسيد الكربون عبر إذابته لتكوين حمض الكربونيك، الذي يتحلل إلى أنيونات (أيونات سالبة الشحنة) تشمل البيكربونات والكربونات. وعادةً ما تُحقق الكاتيونات (الأيونات الموجبة الشحنة) المكوّنة من عناصر تشمل الكالسيوم والمغنيسيوم والصوديوم والبوتاسيوم التوازن مع هذه الأنيونات. لكن التركيز العالي لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي أدى إلى زيادة حموضة المحيطات بسبب زيادة حمض الكربونيك. لذا، يتيح تحسين مستوى القلوية في المحيطات، أي جعل المحيط أكثر قلوية (أقل حمضية) عبر إضافة مواد تفاعلية مثل هيدروكسيد الصوديوم أو كربونات الصوديوم أو الحجر الجيري، للمحيطات امتصاص نسبة أكبر من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو وتخزينه على هيئة بيكربونات وكربونات مذابة.[22] وتشبه هذه العملية تمعدن ثاني أكسيد الكربون، إلا أن ثاني أكسيد الكربون يتم عزله في حالة مذابة في المحيط وليس في حالة معدنية على الأرض أو تحتها.

المخاطر والتحديات

قد تزيد قلوية الجانب الذي يتم تحسينه في المحيط لدرجة الإضرار بالأنظمة البيئية، إلى جانب بعض المخاطر الأخرى من المنظور القانوني والتي تنشأ عن إتاحة إلقاء كميات كبيرة من المواد التفاعلية ببساطة في المحيط.[23] كما تشمل التحديات تكاليف الطاقة وتحديات انتشار القلوية وقياس معدلات إزالة الكربون. كما أن تحسين نسبة القلوية في المحيطات يعد شكلاً من أشكال الهندسة الجيولوجية، وهو أمرٌ مثير للجدل لعدم وجود دراسات واضحة وشاملة للآثار طويلة المدى في كثيرٍ من الأحيان، كما أنها تؤثر على دول متعددة أيضاً، مما يطرح أيضاً مخاطر جيوسياسية.

التكاليف

تتراوح التكاليف المقدَّرة لتحسين قلوية المحيطات ما بين 70 و160 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون، مع العلم أن تكلفة تجيير المحيطات باستخدام الدولوميت هي الأقل نسبياً، وتكلفة استخدام الحجر الجيري هي الأعلى.[24]

عزل الكربون في التربة

تعتمد عملية عزل الكربون في التربة على إجراء تغييرات في إدارة الأراضي تؤدي إلى زيادة تخزين الكربون في المواد العضوية في التربة، ما يفضي إلى إزالة الكربون من الغلاف الجوي وتحقيق صفرية الانبعاثات. [25] وقد أسفرت أنشطة إدارة الغابات وحراثة البراري والممارسات الزراعية النموذجية عن إطلاق ما يُقدَّر بنحو 133 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون من التربة على مدار الـ 12,000 عام الماضية. [26] وتسعى عملية العزل في التربة إلى إعادة بناء محتوى الكربون في التربة من خلال الممارسات الزراعية وتقنيات إدارة التربة الذكية مناخياً.

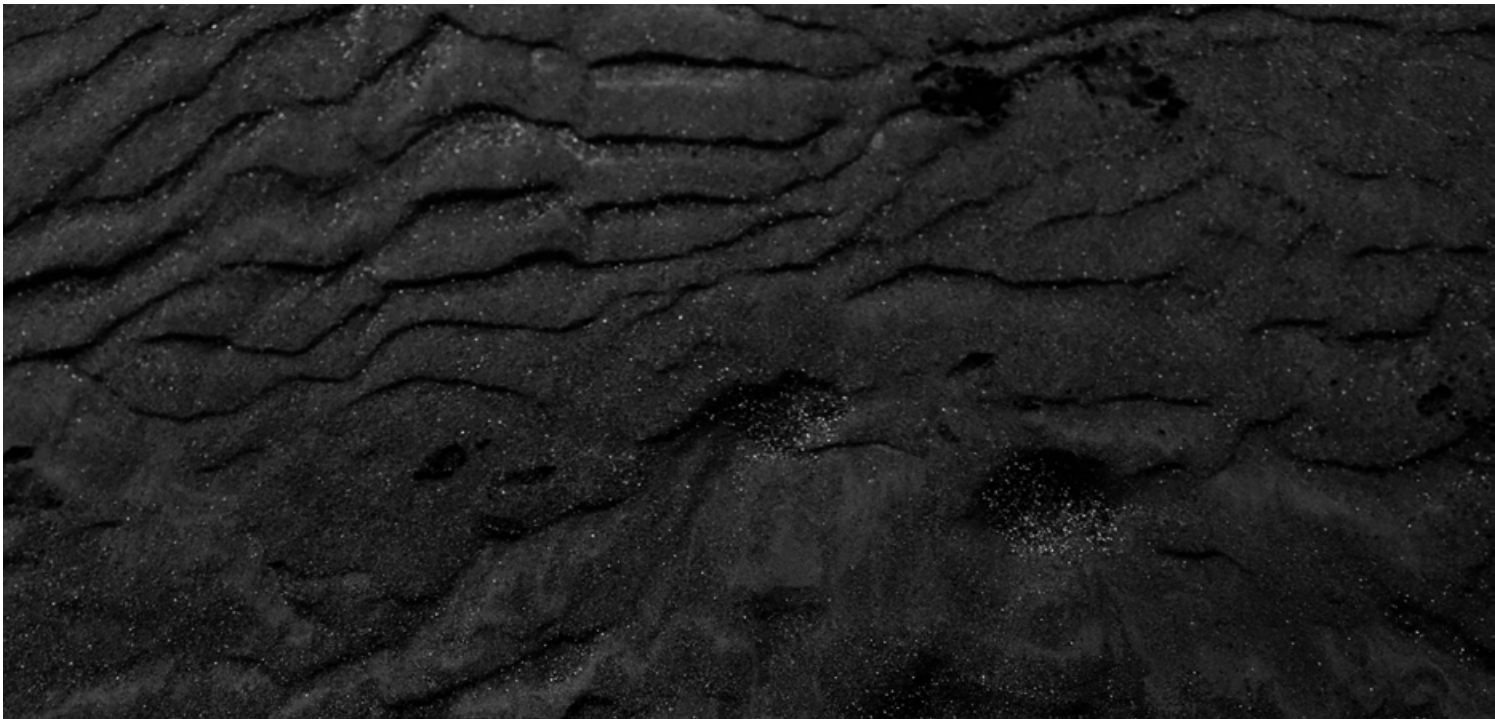
وتشمل هذه الممارسات تقليل التآكل إلى حده الأدنى وتحسين مستوى الكربون في التربة؛ حيث يمكن تقليل التآكل من خلال الزراعة منخفضة الحراثة أو الخالية من الحراثة أو عبر زراعة محاصيل تغطية التربة. كما يمكن تحسين خصوبة التربة باستخدام الأسمدة، وتقويتها بالفحم الحيوي، وترك فضلات الأوراق والمخلفات الزراعية على الأراضي الزراعية. وتختلف فعالية هذه التقنيات إلى حدٍ كبيرٍ باختلاف المناطق البيئية وأنواع المحاصيل والممارسات الزراعية ومدى عمق التربة وغيرها من العوامل.

المخاطر والتحديات

تشمل المخاطر صعوبة ضمان استمرارية عزل الكربون، والتحديات المتعلقة بالسياسات والتشريعات التنظيمية الضرورية التي تشجع على عزل الكربون في التربة.

التكاليف

تتفاوت تكاليف العزل في التربة، وقد أظهرت بعض الدراسات وجود عائدات إيجابية على الاستثمار. [27] وتشير التقديرات إلى إمكانية عزل من 1.5 إلى 2.6 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً بأسعار تتراوح بين 20 و100 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون. [28]



تحسين إدارة الغابات والتشجير وإعادة التشجير وتشجير الأراضي الزراعية

تعزل الأشجار في طور نموها الكربون الموجود في الجو في جذورها وجذوعها وأغصانها، وعبر التربة أيضاً حيث تتحلل فضلات الأوراق وتزيد من محتوى الكربون. ومن هذا المنطلق، **تبرز أربع طرق رئيسية يمكن أن تسهم بها الغابات في إزالة ثاني أكسيد الكربون الناتج عن النشاط البشري من الغلاف الجوي وهي:**

تحسين إدارة الغابات: التغييرات في الممارسات المعتمدة في الغابات والتي تزيد الكتلة الحيوية وتعزز القدرة على تخزين الكربون في الغابات. ويشمل ذلك وضع جداول زمنية أطول لقطع الأخشاب من أجل تعزيز قدرتها على تخزين الكربون، وإدارة الحرائق بشكل أفضل، وتحسين زراعة الأشجار وإدارة النباتات والأعشاب الأرضية في الغابات التي تُدار بشكل نشط.[29]

التشجير التخطيط لإنشاء غابات جديدة على الأراضي التي لم يكن بها غابات في الآونة الأخيرة. وغالباً ما يشمل ذلك الزراعة الأحادية، التي تَحدّ من التنوع البيولوجي.[30]

إعادة التشجير إعادة زراعة الغابات في المناطق التي تم تطهيرها حديثاً، أو إعادة إحياء أراضي الغابات المتضررة.[31]

تشجير الأراضي الزراعية حيث يمكن دمج الأشجار والمحاصيل والحيوانات في الأراضي الزراعية، وتحقيق عوائد مالية أكبر من تلك التي كانت ستتحقق لو تمت الزراعة بشكل منفصل.[32]

المخاطر والتحديات

توجد العديد من المخاطر المرتبطة باستخدام الغابات في إزالة ثاني أكسيد الكربون، ومن أهمها المخاوف المتعلقة بديمومة تلك الحلول، والتنافس على الأراضي، ومعيار القيمة الإضافية. فالديمومة مهددة بسبب احتمال حدوث الانتكاسات الناتجة عن حرائق الغابات أو الأمراض أو تحويل الأراضي في المستقبل. أما التنافس على الأراضي فيكون شديداً للغاية خصوصاً في برامج التشجير وزراعة الغابات على الأراضي التي لم تتشكل بها الغابات من قبل. أما معيار القيمة الإضافية، فيصعب ضمانه لأن الظروف المغايرة غير مؤكدة (ونعني بالظروف المغايرة أي ما كان سيحدث لولا هذا الإجراء)؛ فهل كانت الأرض المستصلَحة ستتحول إلى غابة حتى لو لم نتدخل؟ هذا أمر لا يمكن الجزم به. بالإضافة إلى ذلك، يختلف الحد الزمني للفصل بين التغييرات في استخدام الأراضي باختلاف وجهات النظر الشخصية؛ فما هي المدة التي يجب أن تفصل بين تطهير الغابة وإعادة التشجير حتى يُعتبَر إنشاء الغابة الجديدة بمثابة مبادرة ذات قيمة إضافية لخفض الكربون؟

التكاليف

تتفاوت تكاليف التدخل في مجال إدارة الغابات إلى حدٍ كبيرٍ لكنها منخفضة بشكل عام، وتتراوح من دولار واحد إلى 20 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.[34,33]

الكربون الأزرق

الكربون الأزرق هو الكربون المخزَّن بشكل عضوي في الأنظمة البيئية الساحلية، بما في ذلك أشجار القرم والمستنقعات والأراضي الرطبة والأعشاب البحرية ومناطق المد والجزر والمحيطات. عادة ما تتمتع المناطق الساحلية بخصوبة كبيرة وبقدرة على إنتاج الكتلة الحيوية بسرعة، لكن هناك مخاوف بشأن كمية الكربون التي تتسرب وتنضم مجدداً إلى دورة الكربون وتلك التي تُعزَل بشكل دائم.[35]

عندما يلامس الهواء سطح المحيط، ينتقل ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي إلى المياه عبر الانتشار الجزيئي. وتُعزز الرياح قدرة المحيط على امتصاص ثاني أكسيد الكربون، إذ تُحفز حركة المياه تكوين الأمواج واختلاط الطبقات السطحية، الأمر الذي يساعد ثاني أكسيد الكربون على الدخول إلى مختلف طبقات المحيط. إضافة إلى ذلك، تؤدي الأنظمة البيئية البحرية، مثل الطحالب الكبيرة والطحالب الدقيقة والشعاب المرجانية، دوراً مهماً في امتصاص ثاني أكسيد الكربون، فيما تشير الأبحاث إلى أن النباتات المجهرية الموجودة على سطح المحيط تمتص وحدها من 10 إلى 20 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً.[36] وعلى غرار النباتات البرية، تمتص النباتات الموجودة تحت الماء، مثل العوالق النباتية والأعشاب البحرية، ثاني أكسيد الكربون المُذاب من المحيط لأنها تحصل على طاقتها من خلال عملية التمثيل الضوئي، ما يساعد أيضاً على إزالة حموضة المياه.

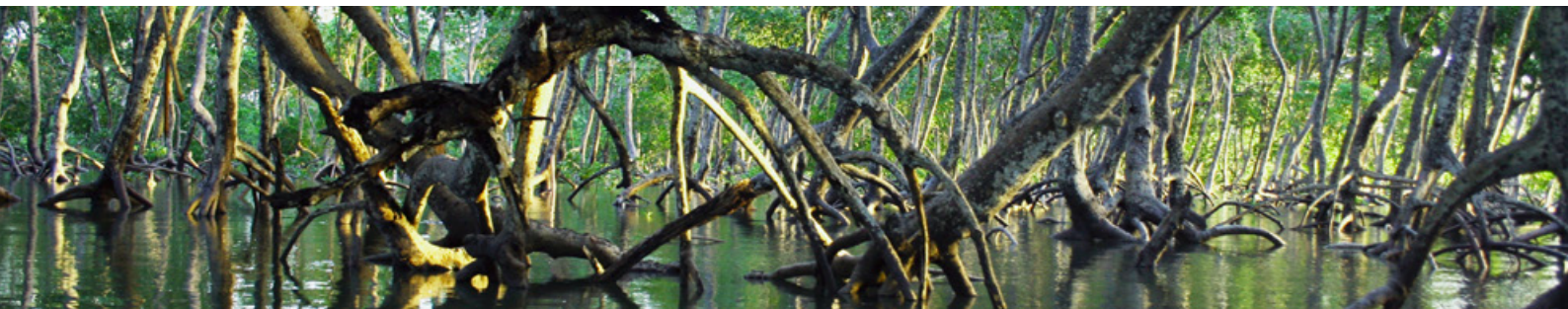
وتشمل طرق إزالة الكربون من الغلاف الجوي من خلال الكربون الأزرق مشاريع تعزيز مرونة المناطق الساحلية القائمة على الطبيعة، وإعادة زراعة أشجار القرم، والاستفادة من الأراضي الرطبة الجديدة مع ارتفاع مستويات سطح البحر، وتغيير ممارسات صيد السمك من أجل تعزيز صحة الأنظمة البيئية تحت الماء. ومع التعمق أكثر في فهم دور المحيطات في تحقيق توازن مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للأرض، يعمل المختصون أيضاً على حلول هندسية جيولوجية جديدة مثل تخصيب المحيطات، عبر إضافة العناصر الغذائية إلى الطبقات العليا من المحيط لتحفيز زيادة نشاط العوالق النباتية، وذلك في محاولةٍ تهدف إلى خفض مستويات ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو. فالعوالق النباتية مسؤولة عن معظم عمليات نقل ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي إلى المحيط، إذ يُستهلَك ثاني أكسيد الكربون خلال عملية التمثيل الضوئي ويُدمَج الكربون في العوالق النباتية، تماماً كما يتم تخزينه في الخشب وأوراق الأشجار.

المخاطر والتحديات

تشمل مخاطر عزل الكربون الأزرق فرط المغذيات والتشبّع منها، والتلوث، والصيد المفرط، وارتفاع مستوى سطح البحر، وتغيّر درجة حرارة البحر، والتنافس على موارد الأراضي الرطبة، وتطوير البنى التحتية الساحلية. إلى جانب ذلك، يصعب قياس حجم العزل ومراقبته في مختلف الطرق المرتبطة بالكربون الأزرق، كما أن ديمومته ليست مضمونة.[37] وعلى غرار الطريقة المتمثلة في تحسين نسبة القلوية في المحيطات، فإن تخصيب المحيطات هو شكل من أشكال الهندسة الجيولوجية التي قد تؤدي إلى آثار غامضة وطويلة الأجل على أنظمتنا البيئية. وقد تم حظر تخصيب المحيطات باستخدام الحديد أو المعادن الأخرى لتعزيز نمو العوالق النباتية وإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي في عام 2013 بموجب بروتوكول لندن، وهو اتفاقية عالمية تضم 53 طرفاً وتهدف إلى خفض التلوث البحري.[38] وهناك جهود حاليا لرفع هذا الحظر من خلال دراسات علمية تحدد جدوى إدارة تخصيب المحيطات وإثبات فوائدها بشكلٍ لا لبس فيه.

التكاليف

تتراوح تكاليف مشاريع الكربون الأزرق في سوق الكربون الطوعي ما بين 18 و29 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.[39]



الفحم الحيوي

الفحم الحيوي هو عبارة عن جسم صلب غني بالكربون ومصنوع من مواد عضوية تم تحويلها تحت درجات حرارة مرتفعة في ظل غياب الأكسجين، وهي عملية تسمّى التحلل الحراري. ويضمن التحلل الحراري استقرار المادة العضوية بطريقة لا تتأتى معها عودة الكربون بسرعة إلى الغلاف الجوي من خلال التحلل ودورة الكربون. ويمكن صنع الفحم الحيوي من مواد أولية مختلفة مثل النباتات المزروعة خصيصاً لتتحول إلى الفحم الحيوي، بالإضافة إلى النفايات والمخلفات الزراعية مثل سيقان النبات والأوراق المتبقية من حصاد المحاصيل. وغالباً ما يتم إرجاع هذا الفحم إلى التربة الزراعية لتحسين محتواها من الكربون.[40]

وبما أن الفحم الحيوي يتحلل بشكل أبطأ بكثير من الكتلة الحيوية غير المعالَجة، فيمكن اعتباره تقنية لإزالة ثاني أكسيد الكربون، وذلك عند النظر إليه كجزء من نظامٍ يتضمن نمو الكتلة الحيوية.

المخاطر والتحديات

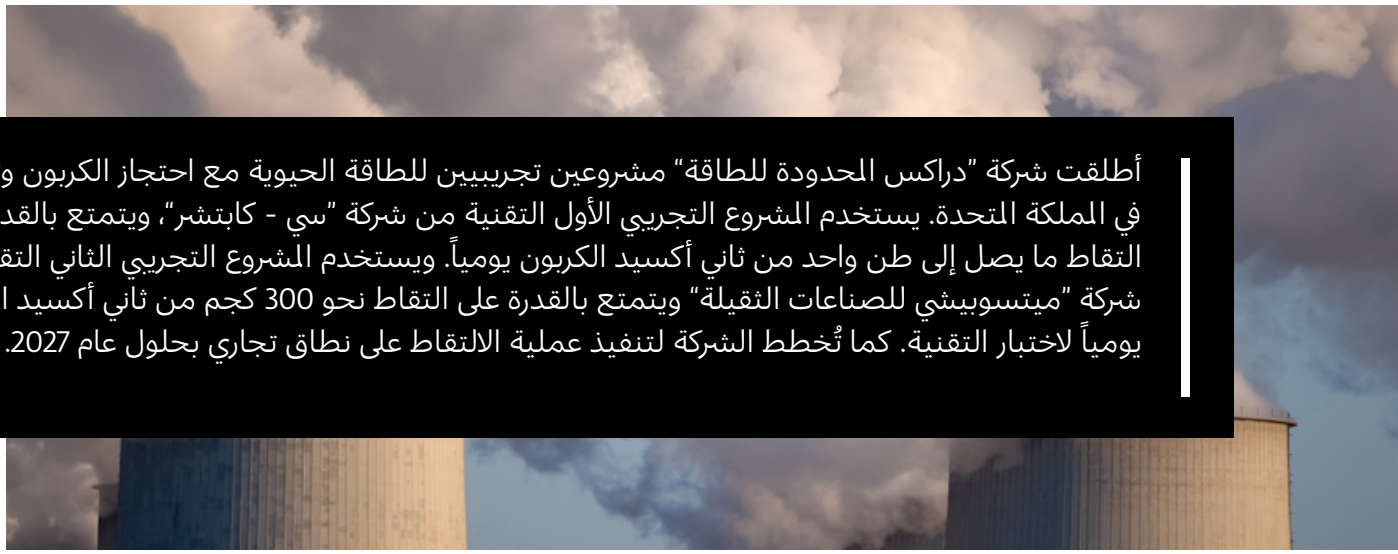
تشمل المخاطر التنافس على استخدام الأراضي، ونقل الكتلة الحيوية، وعدم وضوح التأثير الصافي الذي تُحدثه إزالة الكتلة الحيوية وعناصرها الغذائية من الأرض، وعدم الفهم الكامل لمدى صمود الفحم الحيوي في بيئات العالَم الحقيقي، خاصةً عندما يتم دمجه في التربة الزراعية المحروثة.

التكاليف

تختلف تقديرات التكاليف التي تتطلبها إزالة الكربون بواسطة الفحم الحيوي اختلافاً كبيراً، إذ تعتمد على المواد الأولية وعملية الإنتاج والنطاق والجغرافيا، حيث تتراوح بين 30 و120 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.[42,41]

تقنية «الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه»

تَجمع طريقة "الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه" بين حرق الكتلة الحيوية (أي المواد العضوية المتجددة التي تنتج عن النباتات أو الحيوانات) والتقاط الكربون الناتج عنها وتخزينه. فبينما تُزيل الكتلة الحيوية ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي أثناء نموها، يتم حرق تلك الكتلة الحيوية بعد ذلك لإنتاج الحرارة والكهرباء، أو تحويلها كيميائياً من خلال التخمير لإنتاج الوقود الحيوي السائل. وتُنتِج العمليتان ثاني أكسيد الكربون مرة أخرى الذي يمكن التقاطه وتخزينه في التكوينات الجيولوجية أو وسائل التخزين الأخرى. ويمكن استخدام الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه كطريقة لإزالة ثاني أكسيد الكربون، طالما أن حجم الانبعاثات الناتجة عن عمليات الزراعة والحصاد والنقل وتحويل الطاقة والتقاط الكربون وتخزينه أقل من حجم الانبعاثات التي يتم التقاطها وتخزينها بنجاح.[43]



أطلقت شركة "دراكس المحدودة للطاقة" مشروعين تجريبيين للطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه في المملكة المتحدة. يستخدم المشروع التجريبي الأول التقنية من شركة "سي - كابتشر"، ويتمتع بالقدرة على التقاط ما يصل إلى طن واحد من ثاني أكسيد الكربون يومياً. ويستخدم المشروع التجريبي الثاني التقنية من شركة "ميتسوبيشي للصناعات الثقيلة" ويتمتع بالقدرة على التقاط نحو 300 كجم من ثاني أكسيد الكربون يومياً لاختبار التقنية. كما تُخطط الشركة لتنفيذ عملية الالتقاط على نطاق تجاري بحلول عام 2027.[44]

المخاطر والتحديات

تشمل المخاطر محدودية المواد الأولية من الكتلة الحيوية والأراضي اللازمة لزراعتها. وإذا ما أخذنا في الاعتبار التغيّر المباشر والتقريبي في استخدام الأراضي، واستهلاك المياه، والخسارة المحتملة للتنوع البيولوجي، يصعب قياس التأثير الصافي على المستويين المناخي والبيئي. كما تواجه اعتماد طريقة الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه المزيد من التحديات، مثل تكلفة هذه التقنية، وكيفية نقل ثاني أكسيد الكربون الملتقَط من مصادر نقطية إلى مواقع مركزية لتخزين الكربون الملتقَط، فضلاً عن تكلفة هذه العملية. إلى جانب ذلك، لا بد من أخذ الأثر البيئي المترتب عن نقل الكتلة الحيوية نفسها بعين الاعتبار.

التكاليف

تتفاوت تكلفة استخدام طريقة الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه تفاوتاً كبيراً، إذ يُقدَّر أنها تتراوح بين 20 و288 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.[45] وتعتمد نسبة التكاليف على نوع المواد الأولية من الكتلة الحيوية، وعملية تحويل الطاقة، ونوع التقنية المستخدَمة لالتقاط الكربون وتخزينه، وغيرها من العوامل.[46] وتعد خطوة التقاط ثاني أكسيد الكربون هي العامل المؤثر بشكل أساسي في تكلفة طريقة الطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه؛ حيث إن عمليات الطاقة الحيوية التي تُنتج تيارات عالية النقاوة من ثاني أكسيد الكربون أكثر جدوى على الصعيد الاقتصادي من غيرها مثل احتراق الكتلة الحيوية.

الالتقاط المباشر من الهواء

تُزيل تقنية الالتقاط المباشر من الهواء ثاني أكسيد الكربون من الهواء المحيط باستخدام عملية كيميائية، حيث تدفع مجموعة مراوح الهواء إلى موصّل يحتوي على مادة صلبة أو سائلة صناعية تتفاعل كيميائياً مع ثاني أكسيد الكربون وتُزيله من الغلاف الجوي:

- تَستخدم المواد الماصة الصلبة الأمينات أو المجموعات الأمينية المرتبطة بمواد مسامية (مثل الكربون المنشَّط أو السيليكا) على شكل صفائح أو حبوب مصممة حتى تكون مساحة سطحها كبيرة جداً من أجل زيادة نسبة التلامس مع ثاني أكسيد الكربون إلى أقصى حد. وعند التلامس، يتفاعل ثاني أكسيد الكربون لتكوين رابطة كربامات.

- تَستخدم المذيبات السائلة محاليل قلوية تُضَخ فوق أشكال ذات مساحة سطحية كبيرة أو داخلها من أجل زيادة نسبة التلامس مع ثاني أكسيد الكربون إلى أقصى حد. فيتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع المحاليل القلوية لتكوين رابطة كربونات.

عند التشبع، يُسخَّن السائل أو الجسم الصلب لكسر روابط الكربامات أو الكربونات، الأمر الذي يؤدي إلى إطلاق تيار عالي النقاوة من ثاني أكسيد الكربون، وإعادة تكوين المادة التفاعلية الأولية. ويمكن بعد ذلك عزل ثاني أكسيد الكربون أو استخدامه، وإعادة استخدام المادة التفاعلية.

المخاطر والتحديات

تحتاج طريقة الالتقاط المباشر للكربون من الهواء لاستهلاك قدر كبير من الطاقة، ويتطلب استخدام الطاقة النظيفة للتسخين وتشغيل المراوح والمضخات. ولذلك فإن في المناطق التي لا تتوفر فيها الطاقة النظيفة بكثرة، لن يكون الأولوية لهذه التقنية؛ فقد يكون استخدام القدر المتوفر من الطاقة النظيفة في أغراض أخرى أكثر أهمية وفعالية في الحد من تغيّر المناخ مقارنةً باستخدامها في عزل الكربون عبر الالتقاط المباشر من الهواء.

كما يتطلب كسر الروابط الكيميائية بواسطة التسخين درجات حرارة تبلغ حوالي 900 درجة مئوية للكربونات القائمة على المذيبات السائلة، وحوالي 100 درجة مئوية للكربونات القائمة على المواد الماصة الصلبة. ودرجات الحرارة المنخفضة هذه المطلوبة للمواد الماصة الصلبة تجعلها مناسبة لمصادر الحرارة المتجددة مثل الطاقة الشمسية المركزة أو الطاقة الحرارية الأرضية. وبالنسبة إلى كلٍ من الطريقتين الصلبة والسائلة، يتطلب توفير 80% تقريباً من الطاقة المطلوبة لعملية التسخين وحوالى 20% منها للكهرباء. [47] ولكي تكون طريقة الالتقاط المباشر من الهواء مبادرة سلبية صافية في مجال إزالة ثاني أكسيد الكربون، يجب أن تتوفر إمدادات الطاقة الخاصة بها من مصادر منخفضة الكربون.

التكاليف

تعتبر تكلفة تقنية الالتقاط المباشر من الهواء مرتفعة، ويرجع ذلك إلى أنها التقنية المستخدمة لم تبلغ طور النضوج بعد، وهناك فرص للابتكار والإنتاج بحجم كبير، إضافة إلى الطلب المرتفع على الطاقة. وتتراوح هذه التكاليف حسب التقديرات بين 250 و600 دولار للطن الواحد من ثاني أكسيد الكربون.[48] وتبلغ تكاليف المنشأة التي تديرها شركة "كلايم ووركس" حوالى 600 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون،[49] ويُقدَّر انخفاض التكاليف إلى ما بين 250 و300 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2030.[50] كما أوضحت شركة "أوكسيدنتال" أن تكاليفها تتراوح بين 400 و500 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون، وستنخفض حسب التقديرات إلى ما بين 200 و250 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.[51] ويمكن أن يؤدي التعلم والابتكار والتوفر نتيجة حجم الإنتاج الكبير إلى خفض التكاليف حتى تبلغ نحو 100 دولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون،[52] إذ لوحظت انخفاضات مماثلة على صعيد التكاليف في مجال تنفيذ مشاريع طاقة الرياح والطاقة الشمسية.

وقّعت شركة "كلايم ووركس" السويسرية المتخصصة في التقاط الكربون المباشر من الهواء حديثاً اتفاقية لإزالة الكربون في المستقبل مدتها عشر سنوات مع شركة "مايكروسوفت"، حيث ستقوم الشركة بإزالة 10,000 طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي بشكل دائم لشركة "مايكروسوفت". [53]

عقدت شركة " كربون إنجينيرنغ" الكندية المتخصصة في التقاط الكربون المباشر من الهواء شراكةً مع شركة "أوكسيدنتال" وشركتها الفرعية "ون بوينت فايف" من أجل بناء أكبر معمل في العالم لالتقاط الكربون المباشر من الهواء في حوض بيرميان في تكساس. [54]

05 استخدامات الكربون*

استخدامات الكربون الحالية

في الوقت الحاضر، يُعزَل معظم الكربون الملتقَط عبر مشاريع إزالة الكربون تحت الأرض، أو يُحقَن في خلال عملية الاستخلاص المعزز للنفط. إلا أنه يمكن الاستفادة من الكربون الملتقَط من خلال استخدامه في التطبيقات التي لا تؤدي إلى إعادة انبعاثه في الغلاف الجوي، أو في تطبيقات أخرى حيث لا تتوفر بدائل لاستخدام الكربون، ما يؤدي إلى انخفاض كمية الانبعاثات بشكل عام.

ويعد الكربون مكوّناً أساسياً في العديد من الاستخدامات الصناعية، بما فيها إنتاج الحديد والصلب والألومنيوم، حيث يُستخدَم في عملية الصهر. كما أنه ضروري لإنتاج الغرافيت الذي يُستخدَم في إنتاج المحركات الكهربائية ومواد التشحيم وحتى أقلام الرصاص. وتبرز أيضاً الحاجة إلى الكربون في صنع ألياف الكربون، التي ازداد الاعتماد عليها في السنوات الأخيرة بسبب قوتها وخفة وزنها، وهي تُستخدَم على نطاق واسع في الطائرات والسلع الرياضية مثل مضارب التنس والسيارات. وتتعدد الاستخدامات الأخرى للكربون في حياتنا اليومية، فيشمل بعضها الدهانات والبطاريات والإطارات. ولدينا فرصة للتحول عند الإمكان إلى استخدام الكربون النظيف، أي الذي توفره مشاريع إزالة الكربون.

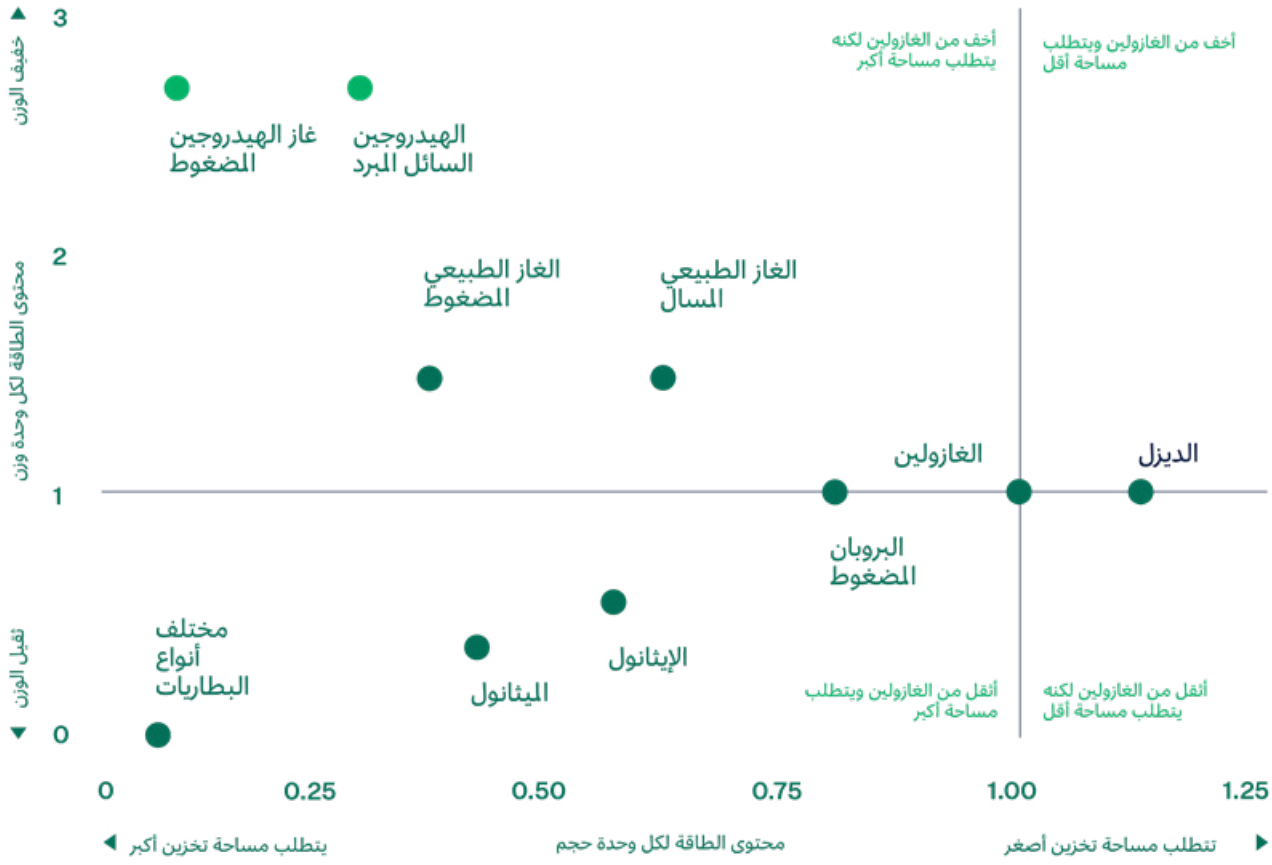
استخدامات الكربون الناشئة

الوقود الاصطناعي

أسهم الوقود الأحفوري في تحقيق نمو اقتصادي ملحوظ وتعزيز أمن الطاقة منذ الثورة الصناعية الأولى، إلا أن ذلك جاء على حساب تراكُم ثاني أكسيد الكربون في غلافنا الجوي، الأمر الذي أدى إلى تغيّر مناخي دفعَ عدة قطاعات إلى البحث عن بدائل صالحة لتحل مكان الوقود الأحفوري. ومع أن معظم القطاعات تتوجه نحو إزالة الكربون، ما زال بعضها - مثل النقل الثقيل والشحن والطيران - يعتمد على الوقود الأحفوري. فقطاع الطيران على سبيل المثال مسؤول وحده عن 2.8% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري.[55]

وتعتبر بطاريات اليوم ثقيلة جداً بالنسبة إلى مركبات الطرق الثقيلة والسفن والطائرات، وغالباً ما يُطرح استخدام خلايا وقود الهيدروجين كبديل نظيف، لكن الهيدروجين (حتى عند ضغطه أو تسييله) يعاني من تدني كثافة طاقته، ما يتطلب مساحة كبيرة.[56]

** يؤدي عدد كبير من استخدامات الكربون إلى إعادة إطلاق ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، فلا يمكن اعتبارها فعلاً في هذه الحالة بمثابة مبادرات تهدف إلى إزالة الكربون.*



المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية

ويمكن أن يشكل الوقود الاصطناعي حلاً لهذا التحدي - وليكن كمرحلة انتقالية. إذ يمكن جمع الهيدروجين منخفض الكربون مع الكربون الملتقَط من أجل إنتاج الوقود الاصطناعي النظيف. وعلى الرغم من أن استخدام هذا الوقود الاصطناعي سيؤدي حتماً إلى انبعاثات كربونية، إلا أن العملية عبارة عن حلقة محايِدة كربونياً، إذ يُعاد التقاط الكربون من الغلاف الجوي لإنتاج وقود اصطناعي أنظف.

أما سلبيات الوقود الاصطناعي فتشمل التكاليف المرتفعة وخسائر الطاقة الناتجة عن التحليل الكهربائي وعمليات التركيب ومحركات الاحتراق الداخلي التي يُستخدَم فيها الوقود الاصطناعي.[57] ومع أن المركبات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات أكثر كفاءة بكثير في النقل البري عند استخدام الكهرباء المستدامة، يمكن أن يوفر الوقود الاصطناعي حلاً فورياً للنقل من دون الحاجة إلى إجراء تغييرات جذرية كبيرة، مثل شراء مركبات حديثة ذات تقنيات جديدة. وبناءً على ما سبق، يمكن أن يكون الوقود الاصطناعي بمثابة حل انتقالي محايد كربونياً حتى يتم اعتماد تقنيات نظيفة أخرى على نطاق واسع.

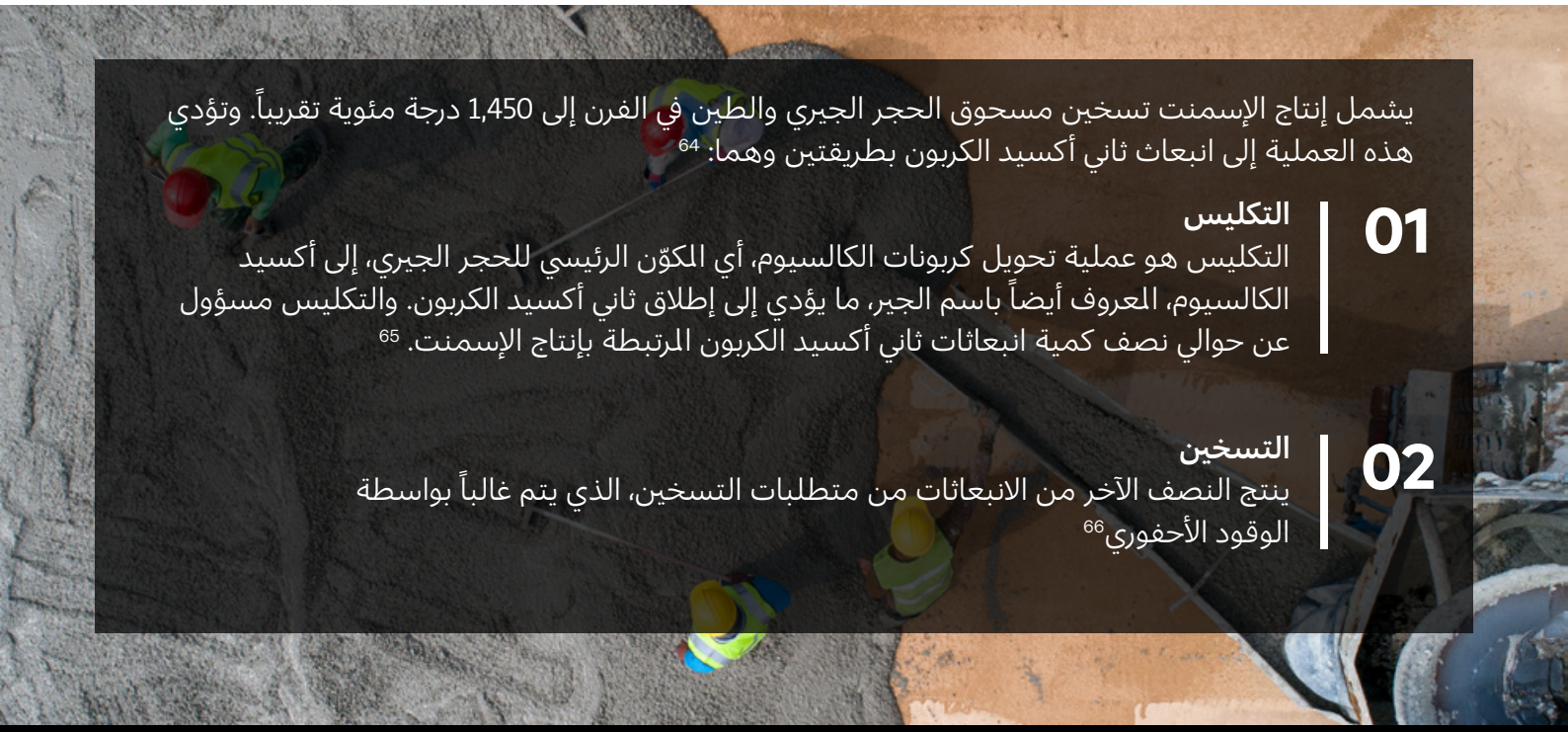
يهدف منظّمو سباقات "الفورمولا 1" إلى المساعدة في تطوير وقود مستدام بنسبة 100% يمكن استخدامه في السباقات ابتداءً من عام 2026، ثم توسيع نطاقه ليشمل استخدامات المجتمع. وسيُصنَع هذا الوقود في المختبر، باستخدام مكونات يكون مصدرها إما مشروع التقاط الكربون وإما نفايات البلدية وإما الكتلة الحيوية غير الغذائية. وسيستوفي الوقود شروط كثافة الطاقة التي تتطلبها سباقات "الفورمولا 1"، ما يجعله قابلاً للمقارنة مع الوقود الأحفوري الحالي.[58]

تسعى شركة "بورشه" إلى الحفاظ على محرك الاحتراق الداخلي من خلال استخدام الوقود الاصطناعي. إذ بدأت الشركة العمل في مصنع جديد للوقود الاصطناعي في تشيلي في عام 2021. وهي تُنتج الوقود الاصطناعي الذي سيُستخدَم أولاً في رياضة السيارات، ثم لاحقاً في المركبات الحالية غير المعدَّلة ذات محركات الاحتراق.[61,60,59]

في عام 2021، سيّرت الخطوط الجوية الملكية الهولندية "كي إل إم" أول رحلة منتظمة للركاب من أمستردام إلى مدريد كانت تزودها جزئياً بالوقود الاصطناعي الذي تُنتجه شركة "شل".[62]

الخرسانة المكثفة

الخرسانة هي أهم مواد البناء التي اعتمد عليها الإنسان حول العالم، وقد ظل الإسمنت مكوناً أساسياً لربط مكونات الخرسانة ببعضها حتى وقتٍ ليس ببعيد. إلا أن الإسمنت مسؤول عن أكثر من 7% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم،[63] لذا من شأن إيجاد بدائل له أو التقاط الانبعاثات المتعلقة بإنتاجه أن يحدث تأثيراً ملحوظاً في الحد من تغيّر المناخ. وتجدر الإشارة إلى أن التقاط الانبعاثات المرتبطة بإنتاج الإسمنت يُعتبَر عملية التقاطٍ للكربون وليس عملية إزالة له.



يشمل إنتاج الإسمنت تسخين مسحوق الحجر الجيري والطين في الفرن إلى 1,450 درجة مئوية تقريباً. وتؤدي هذه العملية إلى انبعاث ثاني أكسيد الكربون بطريقتين وهما: [64]

01 التكليس

التكليس هو عملية تحويل كربونات الكالسيوم، أي المكوّن الرئيسي للحجر الجيري، إلى أكسيد الكالسيوم، المعروف أيضاً باسم الجير، ما يؤدي إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون. والتكليس مسؤول عن حوالي نصف كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاج الإسمنت. [65]

02 التسخين

ينتج النصف الآخر من الانبعاثات من متطلبات التسخين، الذي يتم غالباً بواسطة الوقود الأحفوري[66]

تُنتج شركة "كاربيكريت" خرسانة سالبة الكربون، فتتفادى استخدام الإسمنت وبالتالي انبعاثات الكربون المرتبطة بإنتاجه، وتستخدم بدلاً منه خبث الصلب. ثم تقوم بحقن ثاني أكسيد الكربون أثناء المعالجة، وتضمن إزالة ثاني أكسيد الكربون خلال هذه العملية. [67]

تقدم شركة "سوليديا" تقنيات تصنيع الإسمنت المستدام الذي يخفّض الانبعاثات بنسبة تتراوح بين 30 و40%، وبالمعالجة المستدامة للخرسانة عبر استخدام ثاني أكسيد الكربون بدلاً من الماء. [68]

تقوم شركة "كاربون كيور" بحقن ثاني أكسيد الكربون الملتقَط في الخرسانة الحديثة عند التصنيع، فيتفاعل مع الإسمنت ليتحول إلى معدن يقوي بدوره الخرسانة نفسها.[69]

الاستخدامات الأخرى

يُستخدم الكربون في مجالات لا حصر لها في جميع أنحاء العالم. وبالإضافة إلى النقل البري، يُستخدَم الكربون الملتقَط لإنتاج أنواع أخرى من الوقود في مجال النقل، مثل وقود الطائرات النفاثة ووقود الصواريخ.[70] أما في مجال الأغذية والزراعة، فيُستخدَم الكربون الملتقَط لإنتاج صودا الخبز وأغذية الأسماك والبروتينات والتربة السليمة والأسمدة.[71] وهنا يتبين أن استخدام الكربون الملتقَط من الجو في مثل هذه التطبيقات بديل أفضل عن مجرد عزله.

06 الخاتمة

لا بد من خفض الانبعاثات للحد من تراكُم غازات الدفيئة في الغلاف الجوي وما ينتج عن ذلك من زيادة في درجة الحرارة العالمية وزيادة وتيرة الكوارث الطبيعية. إلا أن ذلك لن يكون كافياً لوقف آثار تغيّر المناخ أو عكس مسارها، إذ لن يؤدي خفض الانبعاثات سوى إلى إبطاء معدل تغيّر المناخ. فبالإضافة إلى خفض الانبعاثات، لا بد من إزالة ثاني أكسيد الكربون الزائد الذي تراكم في الغلاف الجوي.

على الرغم من تعدُّد الطرق المتاحة لإزالة الكربون، مثل التجوية المحسَّنة والتمثيل الضوئي المحسَّن، إلا أن هذه الطرق تعد طرقاً مؤقتة في الغالب ويصعب التحقق من فعاليتها أو معيار القيمة الإضافية لها. لذلك، يتطلب هذا المجال المزيد من البحث والتطوير والابتكار في طرق عالية الجودة لإزالة الكربون الناتج عن الأنشطة البشرية، خاصةً فيما يتعلق بالحلول المعدلة هندسياً مثل الالتقاط المباشر من الهواء الذي عادةً ما يكون فيه مستوى الديمومة مرتفعاً.

كما يمكن تعزيز الأثر الإيجابي في البيئة من خلال استخدام الكربون الملتقَط من الجو ليحل مكان الكربون القائم على الوقود الأحفوري في القطاعات التي لا يوجد بها بدائل للكربون، مثل الوقود المستخدَم في النقل. وإن كان حجم هذا التحدي كبيراً، فإن حجم الفرصة المتاحة أمام الراغبين في اتخاذ خطوات حقيقية في هذا المجال كبير كذلك.

07 التوصيات

تتمتع دبي، نظراً إلى الموارد الشمسية الوفيرة على مدار العام، بالقدرة على إنتاج كميات كبيرة من الطاقة المتجددة. ويُضاف إلى هذه الميزة التنافسية قُرب دبي من التكوينات الجيولوجية المناسبة لعزل ثاني أكسيد الكربون لفترات طويلة، وتركيزها على الابتكار، ونظامها البيئي الرائد، ما يمنحها قوة تنافسية لتصبح من الدول الرائدة في عملية إزالة الكربون الناتج عن النشاط البشري.

ويمكن أن تسهم التوصيات الآتية في تحويل دبي إلى مركز عالمي لإزالة الكربون وإلى مصدِّر صافٍ لأرصدة الكربون.

الحوافز المباشرة

01 **المشتريات الحكومية للوقود الاصطناعي المعتمد على تقنية الالتقاط المباشر من الهواء: التزامات السوق المسبقة التي يقدّمها تجار تجزئة الوقود في دبي لشراء الوقود الاصطناعي المعتمد على الالتقاط المباشر للكربون من الهواء بسعر تنافسي سنوياً.**

مثـــال مبادرة وزارة الدفاع الأمريكية المتقدمة بشأن الوقود الحيوي المستدام: يهدف هذا البرنامج إلى زيادة استخدام الوقود الحيوي المتقدم في المركبات والطائرات والسفن العسكرية. ورغم أن هذا البرنامج لا يخص الوقود الاصطناعي المعتمد على الالتقاط المباشر للكربون من الهواء، إلا أنه يمكن توسيعه ليشمله بما أن الأهداف هي نفسها - أي خفض انبعاثات غازات الدفيئة وتعزيز أمن الطاقة. [72]

02 **اتفاقيات شراء أرصدة الكربون محددة الكميات للمشاريع القائمة في دبي والمتعلقة بإزالة الكربون عبر الالتقاط المباشر من الهواء، وذلك من هيئات تملكها الدولة.**

مثـــال "فرونتير": هو التزام سوقي مسبق يهدف إلى تسريع تطوير تقنيات إزالة الكربون من خلال ضمان الطلب المستقبلي عليها. وتُموّل هذا الالتزام شركات "سترايب" و"ألفابت" و"شوبيفاي" و"ميتا" و"ماكنزي" والشركات التي تعتمد مبادرة "سترايب للمناخ"، حيث تلتزم هذه الشركات بشراء 925 مليون دولار من عمليات إزالة الكربون بشكل دائم بين عامي 2022 و2030. [73]

03 **تخصيص ما لا يقل عن 10% من جميع صناديق رأس المال الاستثماري التي تملكها الدولة للشركات الناشئة في مجال التقنيات المرتبطة بالمناخ.**

مثـــال "بريكثرو إنرجي فينتشرز": "بريكثرو إنرجي فينشرز" هي شركة استثمارية أسسها بيل غيتس، وتسعى إلى تمويل الشركات التي تسعى للحد من انبعاثات غازات الدفيئة في الاقتصاد العالمي وإطلاق تلك الشركات وتوسيع نطاق عملها. وقد توصلت هذه الشركة إلى جمع أكثر من مليارَي دولار كرأس مال مخصص لدعم أكثر من 90 شركة متطورة. [74]

04 **إطلاق برامج حكومية لمسرعات الأعمال تركز على تقنيات إزالة الكربون.**

مثـــال برنامج "سانشوت كاتالست" التابع لوزارة الطاقة الأمريكية: يقدّم هذا البرنامج التمويل والموارد والإرشادات والتوجيه للشركات الناشئة المتخصصة في تقنيات الطاقة الشمسية، لدعم مشاريع الطاقة الشمسية وإتاحتها بأسعار مقبولة. [75]

النظام البيئي الداعم

01

تطبيق معيار الوقود منخفض الكربون في دبي، ما يدعم استخدام الكربون، ويعزز الطلب على الوقود الاصطناعي القائم على الالتقاط المباشر للكربون من الهواء.

مثال **معيار كاليفورنيا للوقود منخفض الكربون:** هذا المعيار هو برنامج تنظيمي يهدف إلى تقليل كثافة الكربون في وقود النقل. وهو يحدد أهدافاً سنوية متناقصة لمتوسط كثافة الكربون في البنزين والديزل المتداولَين في كاليفورنيا.[76]

02

إنشاء "مختبر الكربون" لتطوير منتجات كربونية جديدة، ما يدعم استخدام الكربون ويعزز الطلب على إزالة الكربون.

مثال **المختبر الوطني للطاقة المتجددة التابع لوزارة الطاقة الأمريكية:** يُجري هذا المختبر عمليات البحث والتطوير والاختبار من أجل التوصل إلى حلول مبتكرة لمستقبل الطاقة المستدامة. وهو يقيم شراكات مع المختبرات الوطنية الأخرى والوكالات الحكومية والمؤسسات الأكاديمية وشركاء الصناعة من القطاع الخاص، وذلك لتسريع تطوير تقنيات الطاقة النظيفة المتطورة وتسويقها.[77]

شكر وتقدير

أعَدَّ هذا التقرير **فيصل كاظم**، مع مساهمات قيّمة من الزملاء في مؤسسة دبي للمستقبل:
الدكتور باتريك نوك وإيهاب خطاب وشابن بارامباث وسليم سطاس وعلياء الشامسي وإيناس دبدوب.

كما نود أن نعرب عن تقديرنا للمساهمين الخارجيين والشخصيات المشاركة في المقابلات الشخصية:

طلال حسن - الرئيس التنفيذي
شركة 44.01

جوهو ليبونن - منسق
مبادرة المؤتمر الوزاري العالمي للطاقة النظيفة حول التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

جون بروس - قسم تطوير الشركات
شركة "كاربون إنجينيرنغ"

آدم بايلين-ستيرن - مسؤول السياسات والمشاركة
شركة "كاربون إنجينيرنغ"

ديفيات رونغتا - فريق الاستثمار
صندوق حي دبي للمستقبل

بول ديفيس - كبير مستشاري السياسات
الجمعية الملكية

كاثرين بريمروز-ماثيسن - محررة

جيفري باير- مساهم معتمد في مؤسسة دبي للمستقبل

موجي كريمي - شريك مؤسس ورئيس تنفيذي
شركة "سمفيتا فاكتوري"

أميرة ياسين - مساهمة معتمدة في مؤسسة دبي للمستقبل

مهراد يغمائي - مساهم معتمد في مؤسسة دبي للمستقبل

كريس شاو - محرر/مصحح

تنوين للترجمة

المراجع

1 McKinsey Sustainability (2022) www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/sustainability-blog/now-the-ipcc-has-recognized-that-carbon-removals-are-critical-to-addressing-climate-change-its-time-to-act (accessed 30 August 2022).

2 S&P Global (2021) www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/energy-transition/061021-voluntary-carbon-markets-pricing-participants-trading-corsia-credits (accessed 7 September 2022).

3 World Energy Data (2022) www.worldenergydata.org/cement-carbon-dioxide-emissions-double-in-20-years/ (accessed 7 September 2022).

4 NASA (2019) https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/ (accessed 7 September 2022).

5 NASA (n.d.) 'Climate change evidence: how do we know? Climate change: vital signs of the planet'. https://climate.nasa.gov/evidence/ (accessed 21 October 2020).

6 IPCC (2014) 'Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. IPCC, Geneva.

7 NASA (2022) https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/graphic-the-relentless-rise-of-carbon-dioxide/ (accessed 7 September 2022).

8 Bloomberg (2022) www.bloomberg.com/graphics/climate-change-data-green/carbon-clock.html (accessed 25 August 2022).

9 The World Counts (2019) www.theworldcounts.com/challenges/climate-change/global-warming/global-co2-emissions (accessed 7 September 2022).

10 Gold Standard (2020) https://goldstandardhelp.freshdesk.com/support/solutions/articles/44001989691-what-does-additionality-mean-and-why-is-it-important- (accessed 7 September 2022).

11 S&P Global (2021) www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/energy-transition/061021-voluntary-carbon-markets-pricing-participants-trading-corsia-credits (accessed 7 September 2022).

12 Ibid.

13 McKinsey Sustainability (2021) www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge (accessed 7 September 2022).

14 US Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2020) www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification (accessed 9 September 2022).

15 Hovorka, S. and Kelemen, P. (2021) 'The building blocks of CDR systems' Chapter 2 in CDR Primer, ed. J. Wilcox, B. Kolosz and J. Freeman. https://cdrprimer.org/read/chapter-2#sec-2-1 (accessed 9 September 2022).

16 Kelemen, P. et al. (2019) 'An overview of the status and challenges of CO2 storage in minerals and geological formations'. Frontiers in Climate, 15 November. www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00009/full (accessed 9 September 2022).

17 Bloomberg (2017) www.bloomberg.com/news/articles/2017-05-03/de-beers-studies-soaking-up-carbon-into-diamond-mine-waste-rock (accessed 29 August 2022).

18 Oman Daily Observer (2021) www.omanobserver.om/article/396/Business/oman-to-host-worlds-first-solar-powered-direct-air-capture-project (accessed 29 August 2022).

19 Carbfix (2022) www.carbfix.com/currentoperations (accessed 29 August 2022).

20 European Commission (2018) https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/storing-co2-underground-can-curb-carbon-emissions-it-safe (accessed 7 September 2022)

21 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2019) 'Negative emissions technologies and reliable sequestration'. https://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda (accessed 7 September 2022).

22 NOAA (2020) 'Ocean acidification'. www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification#:~:text=Because%20of%20human%2Ddriven%20increased,the%20ocean%20becomes%20more%20acidic (accessed 7 September 2022).

23 International Maritime Organization (IMO) (2006) 'Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter'. www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Convention-on-the-Prevention-of-Marine-Pollution-by-Dumping-of-Wastes-and-Other-Matter.aspx (accessed 7 September 2022).

24 Renforth, P. and Henderson, G. (2017) 'Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration'. Reviews of Geophysics, 55(3): 636–74. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016RG000533 (accessed 7 September 2022).

25 Paustian, K. et al. (2019) 'Soil C sequestration as a biological negative emission strategy'. Frontiers in Climate, 16 October. www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00008/full (accessed 7 September 2022).

26 Sanderman, J. et al. (2017) 'Soil carbon debt of 12,000 years of human land use'. PNAS, 114(36): 9575–80. www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1706103114 (accessed 7 September 2022).

27 Smith, P. (2016) 'Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies'. Global Change Biology, 22(3) 1315–24. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13178 (accessed 7 September 2022).

28 Smith, P. et al. (2016) 'Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions'. Nature Climate Change, 6: 42–50. www.nature.com/articles/nclimate2870 (accessed 7 September 2022).

29 Putz, F.E. et al. (2008) 'Reduced-impact logging: challenges and opportunities'. Forest Ecology and Management, 256(7): 1427–33. www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112708002892?via%3Dihub (accessed 7 September 2022).

30 IPCC (2007) 'Land use, land-use change and forestry'. IPCC Special Report. https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=47 (accessed 7 September 2022).

31 Ibid.

32 World Agroforestry (2022) www.worldagroforestry.org/ (accessed 9 September 2022).

33 NASEM (2015) 'Climate intervention: carbon dioxide removal and reliable sequestration'. https://nap.nationalacademies.org/catalog/18805/climate-intervention-carbon-dioxide-removal-and-reliable-sequestration (accessed 9 September 2022).

34 Fuss, S. et al. (2018) 'Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects'. Environmental Research Letters, 13: 063002. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f (accessed 7 September 2022).

35 National Ocean Service (2022) 'What is blue carbon?' https://oceanservice.noaa.gov/facts/bluecarbon.html (accessed 9 September 2022).

36 World Economic Forum (2021) 'These tiny plants and giant animals are helping to store vast amounts of CO2 in our oceans'. www.weforum.org/agenda/2021/05/ocean-plant-whales-carbon-storage/ (accessed 23 September 2022).

37 NASEM (2019) 'Negative emissions technologies and reliable sequestration'. https://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda (accessed 7 September 2022).

38 IMO (2013) 'Resolution LP.4(8) On the amendment to the London Protocol to regulate the placement of matter for ocean fertilisation and other marine geoengineering activities'. wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/LCLPDocuments/LP.4(8).pdf

39 OPIS (2022) '"Huge momentum" is underway for blue carbon'. https://blog.opisnet.com/blue-carbon-momentum (accessed 9 September 2022).

40 Biochar International (2015) 'Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil'. www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf (accessed 9 September 2022).

41 Roberts, K.G. et al. (2010) 'Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential'. Environmental Science & Technology, 44(2): 827–33. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es902266r (accessed 7 September 2022).

42 Shackley, S. et al. (2011) 'The feasibility and costs of biochar deployment in the UK.' Carbon Management, 2(3): 335–56. www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/cmt.11.22 (accessed 7 September 2022).

43 International Renewable Energy Agency (2020) 'Reaching zero with renewables'. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_Reaching_zero_2020.pdf (accessed 9 September 2022).

44 International Energy Agency (IEA) (2022) www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/drax-beccs (accessed 29 August 2022).

45 Global CCS Institute (2019) 'Bioenergy and carbon capture and storage'. www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf (accessed 7 September 2022).

46 Fuss, S. et al. (2018) Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters, 13: 063002. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f (accessed 7 September 2022).

47 NASEM (2019) 'Negative emissions technologies and reliable sequestration'. https://nap.nationalacademies.org/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda (accessed 7 September 2022).

48 World Resources Institute (2022) www.wri.org/insights/direct-air-capture-resource-considerations-and-costs-carbon-removal#:~:text=The%20range%20of%20costs%20for,less%20than%20%2450%2Ftonne (accessed 9 September 2022).

49 S&P Global (2022) www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/042222-cost-of-capturing-co2-from-air-to-drop-to-250-300mtco2e-end-decade-climeworks (accessed 9 September 2022).

50 Tollefson, J. (2018) 'Sucking carbon dioxide from air is cheaper than scientists thought'. Nature, 558: 173. www.nature.com/articles/d41586-018-05357-w (accessed 9 September 2022).

51 Occidental (2022) www.oxy.com/globalassets/documents/investors/quarterly-earnings/oxy3q22conferencecallslides.pdf (accessed 23 February 2023).

52 Keith, D.W. et al. (2018) 'A process for capturing CO2 from the atmosphere'. Joule, 2(8): 1573–94. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118302253 (accessed 7 September 2022).

53 Climeworks (2022) https://climeworks.com/news/climeworks-extends-collaboration-with-microsoft (accessed 29 August 2022).

54 Carbon Engineering (2022) https://carbonengineering.com/news-updates/construction-direct-air-capture-texas/ (accessed 29 August 2022).

55 IEA (2020) www.iea.org/reports/tracking-aviation-2020 (accessed 7 September 2022).

56 Dubai Future Foundation (2021) 'Hydrogen: from hype to reality. www.dubaifuture.ae/wp-content/uploads/2021/10/Hydrogen-From-Hype-to-Reality-EN-v1.0.pdf (accessed 7 September 2022).

57 The Royal Society (2019) 'Sustainable synthetic carbon-based fuels for transport'. https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf (accessed 26 January 2023).

58 Formula 1 (2021) www.formula1.com/en/latest/article.watch-how-formula-1-is-striving-to-create-a-100-sustainable-fuel.1ENHVTjKDbXNOlidEJ8okc.html (accessed 25 July 2022).

59 Porsche (2021) https://dealer.porsche.com/ca/richmond/en-CA/,-w-,News-and-Events/Saving-the-Internal-Combustion-Engine (accessed 18 August 2022).

60 Autocar (2021) www.autocar.co.uk/car-news/business-environment-and-energy/porsche-breaks-ground-synthetic-fuel-plant-chile (accessed 18 August 2022).

61 Tech Crunch (2022) https://techcrunch.com/2022/12/20/porsche-pumps-first-synthetic-fuel-as-chilean-plant-finally-starts-producing/ (accessed 4 January 2023)

62 Bloomberg (2021) www.bloomberg.com/news/articles/2021-02-08/klm-makes-first-regular-flight-with-sustainable-synthetic-fuel (accessed 18 August 2022).

63 World Energy Data (2022) www.worldenergydata.org/cement-carbon-dioxide-emissions-double-in-20-years/ (accessed 7 September 2022).

64 Jacoby, M. (2020) 'Alternative materials could shrink concrete's giant carbon footprint'. Chemical & Engineering News, 22 November. https://cen.acs.org/materials/inorganic-chemistry/Alternative-materials-shrink-concretes-giant/98/i45 (accessed 29 August 2022).

65 Ibid.

66 Ibid.

67 CarbiCrete (2022) https://carbicrete.com/technology/ (accessed 18 August 2022).

68 Solidia (2022) www.solidiatech.com/solutions.html (accessed 29 August 2022).

69 CarbonCure (2022) www.carboncure.com/technologies/ (accessed 18 February 2022).

70 AirMiners (2022) https://airminers.org/index (accessed 24 August 2022).

71 Ibid.

72 American Security Project (2013) www.americansecurityproject.org/dods-biofuels-program/ (accessed 21 March 2023)

73 Frontier (n.d.) https://frontierclimate.com (accessed 21 March 2023)

74 Breakthrough Energy (n.d.) https://breakthroughenergy.org/our-work/breakthrough-energy-ventures/ (accessed 21 March 2023)

75 US Department of Energy (2015) www.energy.gov/eere/articles/sunshot-catalyst-innovators-take-software-challenges-deploy-solar-technology-across (accessed 21 March 2023).

76 International Energy Agency (2021) www.iea.org/policies/11671-california-low-carbon-fuel-standard (accessed 21 March 2023)

77 National Renewable Energy Laboratory (n.d.) www.nrel.gov/about/ (accessed 21 March 2023).

مؤسسة دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE FOUNDATION

نبذة عن مؤسسة دبي للمستقبل

تسعى مؤسسة دبي للمستقبل إلى تحقيق رؤية صاحب السمو الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم، نائب رئيس الدولة رئيس مجلس الوزراء حاكم دبي، رعاه الله، لتعزيز مكانة دبي باعتبارها مركزاً للابتكار، بالتعاون مع شركائها من الجهات الحكومية والشركات العالمية والمبتكرين والشركات الناشئة والمواهب والخبراء ورواد الأعمال من دولة الإمارات وخارجها.

وتتمثل ركائز استراتيجية المؤسسة في تخيل المستقبل وتصميمه وتنفيذه، وذلك بدعم وإشراف سمو الشيخ حمدان بن محمد بن راشد آل مكتوم، ولي عهد دبي رئيس المجلس التنفيذي رئيس مجلس أمناء مؤسسة دبي للمستقبل. وتطلق المؤسسة برامج ومبادرات محلية وعالمية ومشاريع مبتكرة ونوعية لتحقيق هذا الهدف، كما تتولى إعداد خطط واستراتيجيات مستقبلية وتقارير حول السيناريوهات المستقبلية المحتملة، بما يدعم مكانة دبي مركزاً عالمياً لتطوير وتبني أحدث الحلول والممارسات المبتكرة لخدمة الإنسانية.

وتركز المؤسسة على تحديد أبرز التحديات التي تواجه المدن والمجتمعات والقطاعات في المستقبل وتحويلها إلى فرص نمو واعدة من خلال جمع البيانات وتحليلها ودراسة التوجهات العالمية ومواكبة التغيرات المتسارعة. كما تحرص على استكشاف القطاعات الجديدة والناشئة وتكاملها مع القطاعات والصناعات القائمة.

وتشرف مؤسسة دبي للمستقبل على العديد من المشاريع والمبادرات الرائدة مثل متحف المستقبل، ومنطقة 2071، ومركز الإمارات العربية المتحدة للثورة الصناعية الرابعة، ومسرعات دبي للمستقبل، وأكاديمية دبي للمستقبل، ومنتدى دبي للمستقبل. وتسهم المؤسسة من خلال مبادراتها المعرفية ومراكزها لتصميم المستقبل في بناء قدرات المواهب، وتمكينهم وصقل مهاراتهم، بما يمكنهم من الإسهام في تحقيق التنمية المستدامة في دبي ودولة الإمارات.

dubaifuture.ae

research@dubaifuture.gov.ae

@dubaifuture