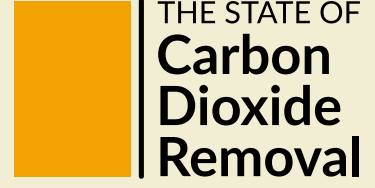


الملخص التنفيذي



تقييم علمي عالمي ومستقل لإزالة ثاني أكسيد الكربون

الطبعة الثالثة | 2026

تعاون علمي بقيادة مورغان ر.
إدواردز (جامعة ويسكونسن-ماديسون)،
وأوليفر غيدن (المعهد الألماني للشؤون الدولية
والأمنية، SWP)، وماثيو ج. غيدن (جامعة
ماريلاند)، ووليام ف. لامب (معهد بوتسدام
لأبحاث آثار المناخ، PIK)، ويان ك. مينكس (معهد
بوتسدام لأبحاث آثار المناخ، PIK)، وغريغوري ف.
نيميت (جامعة ويسكونسن-ماديسون)،
وستيفن م. سميث (جامعة أكسفورد).

شكر وتقدير:

تمت الترجمة بواسطة Strategic Agenda.
مع شكر خاص للدكتور حسن مسلماني، مدير
أبحاث إدارة الكربون في معهد أكسفورد
لدراسات الطاقة، لمساهمته بوقته وخبرته في
مراجعة الدقة الفنية لترجمة هذا التقرير.
التصميم (Designers For Climate Studios)
والتنسيق: فوتيني سباغوبولو، استوديوهات
"ديزاينرز فور كلايمت"

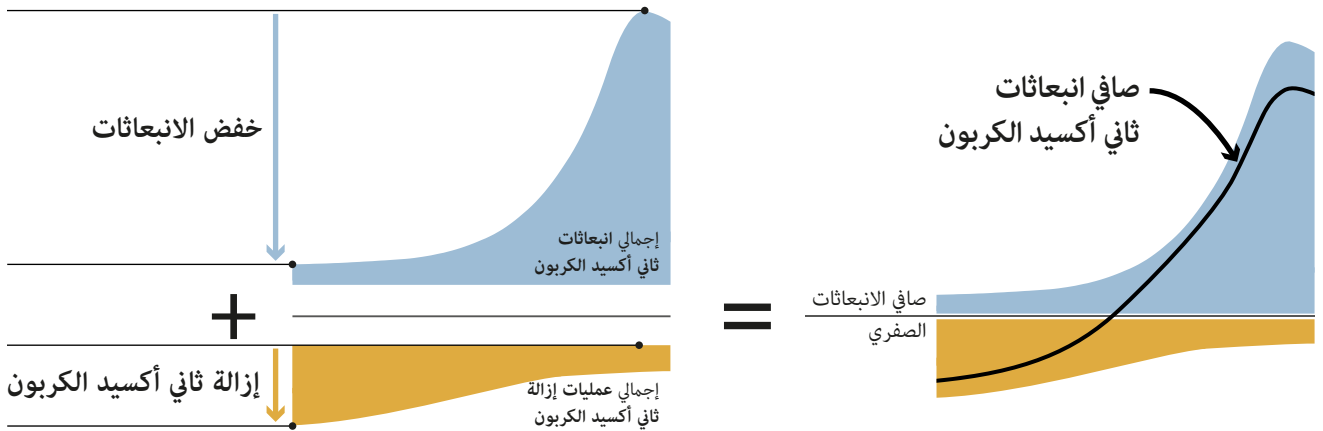
منظرٌ جويٌّ من أعلى لشاطئٍ بحريٍّ صخري. تصوير: بيتر بونيف

الملخص التنفيذي

1- يلزم كلٌّ من إزالة ثاني أكسيد الكربون وخفض الانبعاثات معاً لبلوغ درجة الحرارة المستهدفة بموجب اتفاق باريس.

تتكون إزالة ثاني أكسيد الكربون من أنشطة بشرية تلتقط ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، وتخزنه بشكل دائم في خزانات جيولوجية أو برية أو محيطية، أو في المنتجات. وطالما استمرت انبعاث غازات الدفيئة، ستظل إزالة ثاني أكسيد الكربون ضروريةً لوقف ارتفاع درجة الحرارة العالمية. كل سيناريو يبلغ صافي الانبعاثات الصفري ويوقف ارتفاع درجة الحرارة العالمية ينشر قدراً إضافياً من إزالة ثاني أكسيد الكربون على نطاق الغيغاطن. عبر السيناريوهات الفعالة من حيث التكلفة والمتوافقة مع اتفاق باريس، يساهم خفض الانبعاثات بنسبة 80% على الأقل من الجهد المبذول لتحقيق صافي الانبعاثات الصفري من ثاني أكسيد الكربون، وتساهم إزالة ثاني أكسيد الكربون بالباقي.

إن كلاً من إزالة ثاني أكسيد الكربون وخفض الانبعاثات مطلوبان لتحقيق الأهداف المناخية



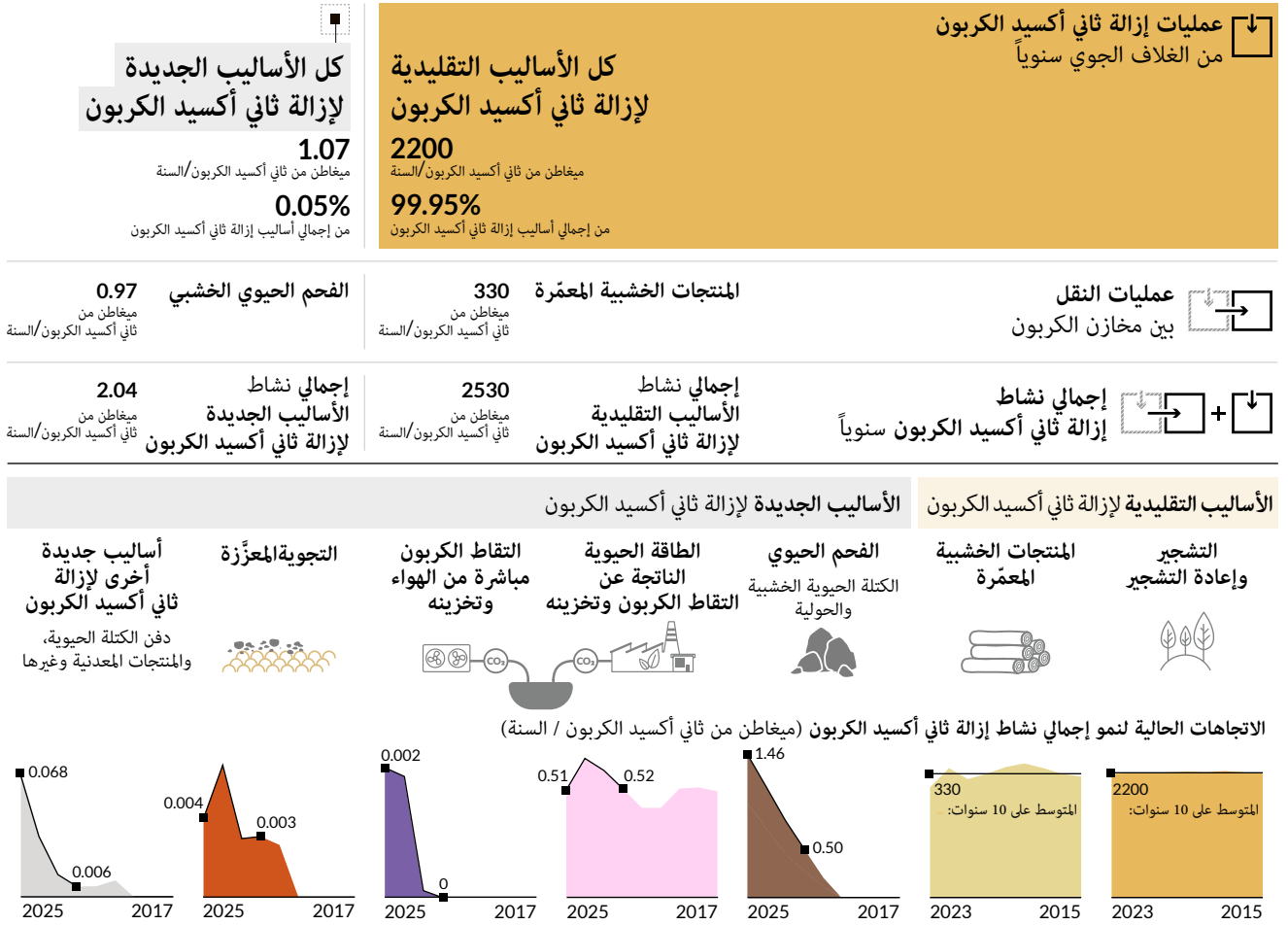
2- هناك العديد من أساليب إزالة ثاني أكسيد الكربون، وهي تشمل نطاقات واسعة من التكاليف والإمكانات والقبول الاجتماعي.

تتكون إزالة ثاني أكسيد الكربون من "الأساليب التقليدية"، وهي أساليب راسخة تشمل إلى حد كبير الغابات والتربة، و"الأساليب الجديدة"، مثل الفحم الحيوي، والتجوية المحسنة، والتقاط الكربون مباشرة من الهواء وتخزينه. تتفاوت التكاليف المتوقعة لعمليات الإزالة تفاوتاً كبيراً، من أقل من 10 دولارات للطن إلى أكثر من 1000 دولار للطن، وتتجاوز الحدود العليا لمعظم الأساليب 200 دولار للطن، أي ما يفوق أسعار الكربون الحالية بكثير. توجد فروقات كبيرة في تقديرات التكلفة حتى داخل كل أسلوب من أساليب إزالة ثاني أكسيد الكربون. بالنسبة للعديد من الأساليب، سيعتمد توسيع النطاق على انخفاض التكاليف. ولإمكانات الإزالة المستقلة نطاقات واسعة مماثلة، إذ تبلغ التقديرات الأدنى الأكثر موثوقية لمعظم الأساليب نحو 1 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. وتشمل أسباب عدم اليقين ضعف الفهم العلمي، وتوافر البيانات، والتعاريف غير المتسقة، والافتراضات المتعلقة بالاستدامة والديمومة. تتضمن التكاليف هذه المشكلات بالإضافة إلى الاختلافات في تعاريف حدود النظام، وما إذا كانت المنافع المشتركة وتكاليف الرصد والإبلاغ والتحقق مشمولة. إن الدعم العام غير مؤكّد، فهو ينطوي على مخاوف بشأن النظم البيئية والحوكمة، ويعتمد على إشراك فئات جماهيرية متنوعة وإيصال المنافع المحلية. إن الإلمام العام بعملية إزالة ثاني أكسيد الكربون منخفض، كما تراجعت تغطية وسائل الإعلام الإخبارية لها بشكل عام، وكذلك كحصة من إجمالي التغطية المناخية. بالنسبة لكل أسلوب، سيكون إثبات الموثوقية والفعالية أمراً حاسماً لتحقيق الإمكانات.

3- إن عمليات الإزالة الحالية تأتي بالكامل تقريباً من الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون القائمة على الأراضي؛ وتنمو الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون بسرعة ولكنها لا تزال تشكل جزءاً ضئيلاً من إجمالي عمليات الإزالة.

يبلغ إجمالي عمليات الإزالة 2.2 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وهو ما يعادل 5% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. تمثل الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون 99.9% من هذا الإجمالي، مع أكبر المساهمات من الصين والولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والبرازيل وروسيا. تبلغ الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون 0.002 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وكانت تنمو بمعدل 40% سنوياً، وهو ما يشبه التقنيات الناجحة مثل الطاقة الشمسية، ولكنه غير كافٍ لتوسيع النطاق المطلوب لتحقيق درجة الحرارة المستهدفة بموجب اتفاق باريس. يستأثر الفحم الحيوي والطاقة الحيوية الناتجة عن التقاط الكربون وتخزينه بكامل عمليات الإزالة الجديدة تقريباً. وستبلغ هذه المشروعات، إضافة إلى ما هو قيد الإنشاء منها، قدرته قدرها 0.008 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في عام 2030، وإن لم يُن في السنوات الأخيرة سوى 20% من القدرة المخطّط لها.

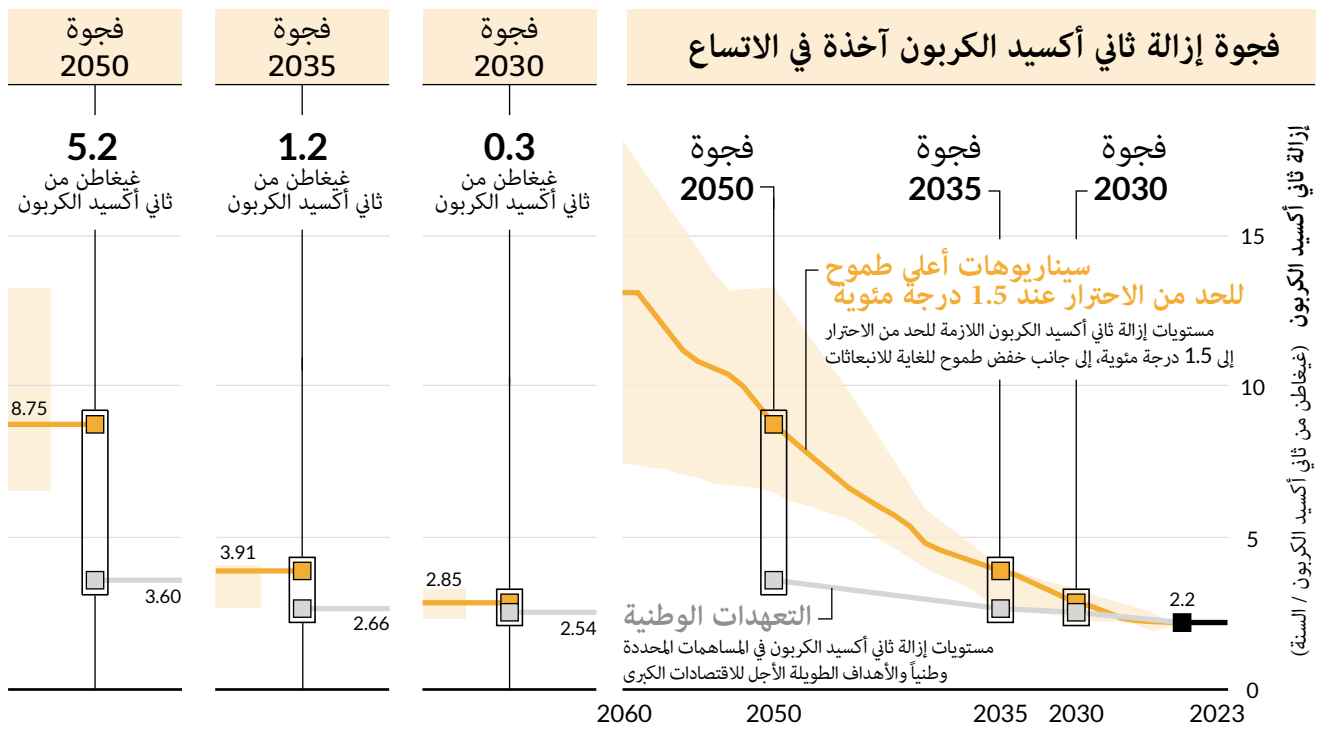
تأتي إزالة ثاني أكسيد الكربون حالياً بالكامل تقريباً من الأساليب التقليدية، ولكن الأساليب الجديدة في تزايد



4- توجد فجوة كبيرة ومتنامية بين كمية إزالة ثاني أكسيد الكربون في التعهدات الوطنية وتلك الموجودة في السيناريوهات المتوافقة مع اتفاق باريس؛ ويتم نشر كل من الأساليب الجديدة والتقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون في كل سيناريو.

تصل التعهدات الوطنية، مع الأخذ في الاعتبار أحدث المساهمات المحددة وطنياً، إلى 2.5 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً من إزالة ثاني أكسيد الكربون في عام 2030، ولكن المستوى المتوسط في السيناريوهات المتوافقة مع اتفاق باريس والأعلى طموحاً يبلغ 2.9 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. وينتج عن ذلك فجوة تبلغ 0.3 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. ولإغلاق فجوة عام 2030، يتعين مضاعفة الطموح العام تقريباً (أي من 0.3+ غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً إلى 0.6+ غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في عام 2030) من خلال تعهدات جديدة ومنقحة. وتنمو الفجوة بسرعة إلى 1.2 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في عام 2035 و2.5 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في عام 2050، مع انخفاض التعهدات في كلا العاملين عن المستويات الموجودة في جميع السيناريوهات المتوافقة مع اتفاق باريس. وتصل

الإعلانات الصادرة عن الشركات إلى أكثر من 5 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في عام 2050، وهو أعلى بكثير من التعهدات الوطنية. ولكن ستظل هناك فجوة تبلغ عدة غيغاطنات من ثاني أكسيد الكربون، كما أن المصدقية في هذه الإعلانات منخفضة. لا يشير سوى نحو ثلث البلدان إلى الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون في استراتيجياتها لمنتصف القرن. بينما تلعب الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون الدور الأقوى في المدى القريب، فإن الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون تتوسع بمعدل خمسة بين عامي 2030 و2035 وتتسارع لتتجاوز 3.5 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً بحلول عام 2050 في السيناريوهات التي تم تقييمها. ونظراً لاستمرار نمو الانبعاثات منذ النسخة الثانية، فقد نمت فجوة إزالة ثاني أكسيد الكربون أيضاً، وستستمر في الاتساع دون اتخاذ إجراءات هامة في المدى القريب لخفض الانبعاثات



5- تقع إزالة ثاني أكسيد الكربون في سياق أوسع يشمل أهدافاً متعددة وآثاراً جانبية.

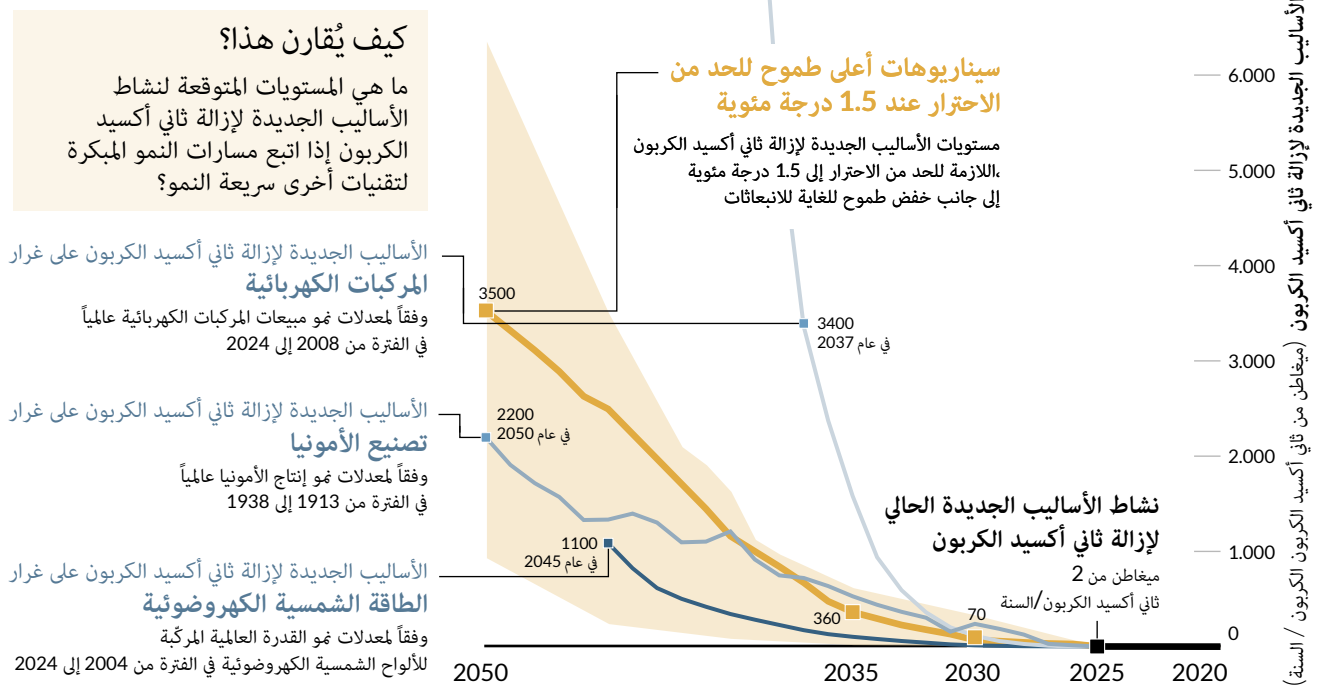
لقد تم تنفيذ السياسات التي تدعم الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون لسنوات عديدة وكانت مدفوعة بمجموعة متنوعة من الأهداف، بما في ذلك استعادة النظام البيئي، وحماية التنوع البيولوجي، والفرص الاقتصادية، فضلاً عن استقرار المناخ. وتتأثر المواقف تجاه إزالة ثاني أكسيد الكربون بمجموعة واسعة من العوامل بما في ذلك المردود المالي، والمنافع المشتركة، والثقة في الجهات الفاعلة، وتجنب إلحاق الضرر بالنظم البيئية. وبالمثل، فإن أكثر من نصف التمويل المقدم في شكل منح لأبحاث إزالة ثاني أكسيد الكربون يذهب لمشروعات توصف بأنها تستهدف أهدافاً أخرى غير إزالة ثاني أكسيد الكربون، مثل المشروعات التي تركز على حرائق الغابات والطاقة النظيفة. ويمكن للتأثيرات التي تتجاوز إزالة الكربون أن تشكل بشكل كبير إمكانات وجدوى أساليب إزالة ثاني أكسيد الكربون. وتختلف هذه الآثار الجانبية باختلاف سيناريوهات

النشر، وتزداد عادةً مع زيادة الحجم وتشمل عواقب على التنوع البيولوجي، واستهلاك الموارد، واستخدام الطاقة، وإنتاج الغذاء. تتنافس بعض عناصر إزالة ثاني أكسيد الكربون مع إجراءات مناخية أخرى (مثل قيود الكتلة الحيوية) بينما يوفر بعضها الآخر تآزراً ويولد منافع مشتركة. على سبيل المثال، يمكن للفحم الحيوي والتجوية المحسنة زيادة غلات المحاصيل، في حين يمكن للمنتجات الخشبية المعمرة تجنب الانبعاثات الناتجة عن إنتاج سلع مماثلة عبر عمليات كثيفة الانبعاثات. ويمكن لتصميم السياسات أن يؤدي دوراً مهماً في تعزيز المنافع المشتركة وتجنب الأضرار لنتائج أكثر استدامة.

6- الطلب على إزالة ثاني أكسيد الكربون حاسمٌ لسدّ فجوة الإزالة. في حين نما النشاط الابتكاري، أصبحت التوقعات بشأن وجود طلب كبير ومتنامٍ هشة.

شهد مجال إزالة ثاني أكسيد الكربون نمواً في البحث والتطوير والمنشورات والعروض الإيضاحية والأسواق المتخصصة الطوعية وتمويل الشركات الناشئة، وإن كان نمواً غير مطرد وتخلّلت استثناءات، في مقدمتها تسجيل براءات الاختراع عالية القيمة الذي تراجع في السنوات الأخيرة. إن استمرار تمويل شركات إزالة ثاني أكسيد الكربون أمرٌ لافت في ظلّ تراجع التمويل المناخي عموماً، الذي تمثّل الإزالة منه الآن 3%. في العام الماضي، تم توقيع عقود لـ 0.04 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون من عمليات الإزالة في سوق الكربون التطوعي، حيث تأتي المشتريات من معظم الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون. ويمتد الابتكار إلى ابتكار السياسات حيث تستكشف الولايات القضائية مثل الاتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة وسويسرا بنشاط إدراج الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون في الأطر التنظيمية. علاوة على ذلك، يعد التعلم بالممارسة أمراً مركزياً للابتكار، ويعتمد ذلك على توقعات الطلب، كما هو الحال مع الجوانب الأخرى لتوسيع النطاق. ستحتاج الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون إلى النمو بمعدلات طموحة للغاية، تقع بين تلك التي شوهدت في الخلايا الشمسية الكهروضوئية والمركبات الكهربائية، والتي كانت أسرع التقنيات المناخية نمواً. تواجه الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون تحديات مختلفة في توسيع النطاق بما في ذلك التنافس على الأراضي، وقابلية الانعكاس، وضعف تأثير التخصيب بثاني أكسيد الكربون مع انخفاض الانبعاثات. ولكن الطلب المستقبلي على إزالة ثاني أكسيد الكربون أصبح غير مؤكد. ولا تزال معظم السياسات تركز على إمدادات إزالة ثاني أكسيد الكربون، وتعتبر الأسعار في الأسواق الناشئة، مثل المادة 6 من اتفاق باريس وخطة تعويض الكربون وخفضه للطيران الدولي (CORSIA)، منخفضة مقارنة بالتكاليف الحالية للعديد من الأساليب. إن تفكيك السياسات والتقلبات في الولايات المتحدة يقوضان مصداقية السياسات ويضعان ضغوطاً على الولايات القضائية الأخرى لتبني سياسات من شأنها خلق طلب قوي ومعالجة فجوة إزالة ثاني أكسيد الكربون.

إن التوسع في الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون اللازمة لتحقيق هدف 1.5 درجة مئوية سريع للغاية ولكنه ليس غير مسبوق

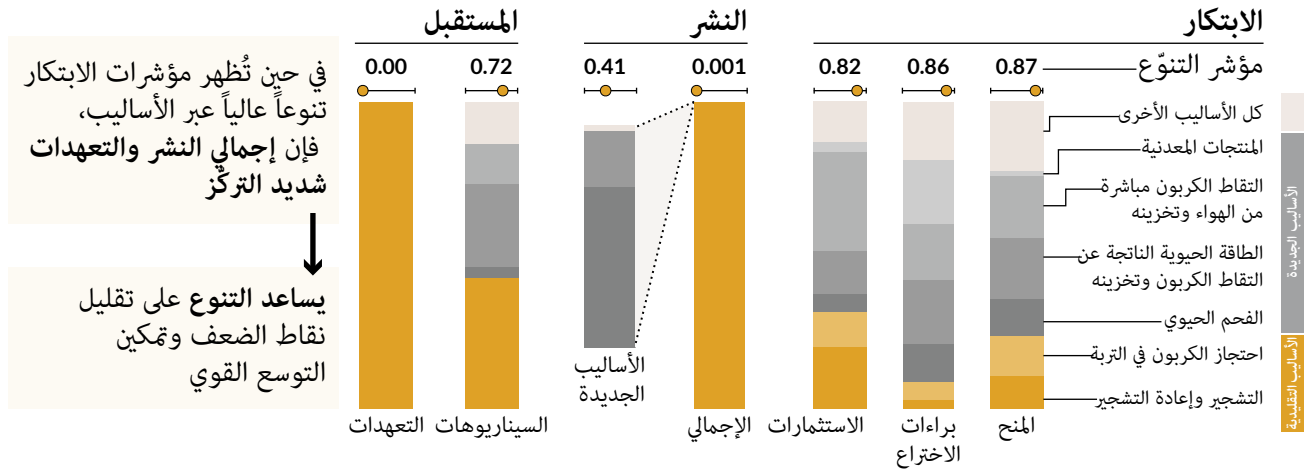


7- إن الجوانب الهامة لنظام إزالة ثاني أكسيد الكربون مركزة للغاية، مما يخلق نقاط ضعف، وسوف يستفيد النظام من التنوع عبر الأساليب والجهات الفاعلة والبلدان.

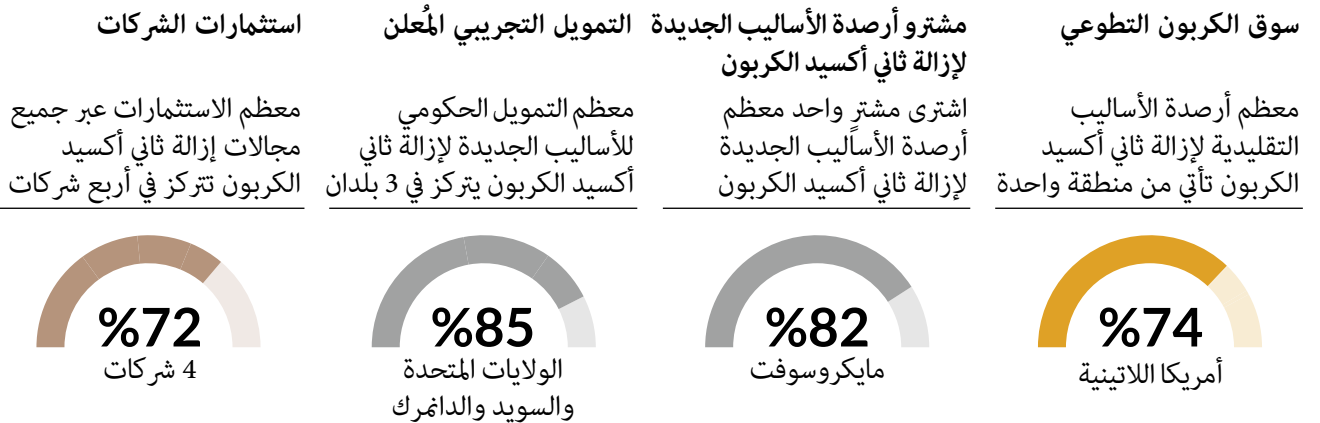
تعتبر مؤشرات الابتكار في المراحل المبكرة، مثل المنح واستثمارات الشركات الناشئة وبراءات الاختراع، متنوعة عموماً عبر الأساليب، لكن مؤشرات المراحل اللاحقة ليست كذلك. تركز كل من نشر وتعهدات إزالة ثاني أكسيد الكربون في أسلوب واحد (التشجير وإعادة التشجير)؛ ويوجد أكثر من ثلثي الأساليب التقليدية لإزالة ثاني أكسيد الكربون في الأسواق التطوعية في أمريكا اللاتينية؛ وتتركز الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون في أسلوبين (الفحم الحيوي والطاقة الحيوية الناتجة عن التقاط الكربون وتخزينه)؛ ويهيمن مشر واحد على مشتريات الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون (مايكروسوفت)؛ ويتركز معظم تمويل المشروعات الإيضاحية في عدد قليل من البلدان والمشروعات (السويد والدايمرك والولايات المتحدة)؛ وتركز استثمارات الشركات الناشئة على شركات أقل وأكثر نضجاً. وبينما يؤدي المبادرون الأوائل أدواراً مهمة، فإذا لم تنتشر أفعالهم على نطاق أوسع، تظهر نقاط الضعف، كما يتضح من تأثير تفكيك السياسة المناخية الأمريكية وتعديلات مايكروسوفت الأخيرة على وتيرة مشترياتها. علاوة على ذلك، فإن الأساليب التقليدية عرضة للتغير البيئي وتحول الحوافز في استخدام الأراضي، ما يعني وجود فوائد قوية للحفاظ على محفظة متنوعة من الأساليب.

نقص التنوع يخلق ضعفاً في منظومة إزالة ثاني أكسيد الكربون

تركز أساليب إزالة ثاني أكسيد الكربون



تركز الجهات الفاعلة في مجال إزالة ثاني أكسيد الكربون



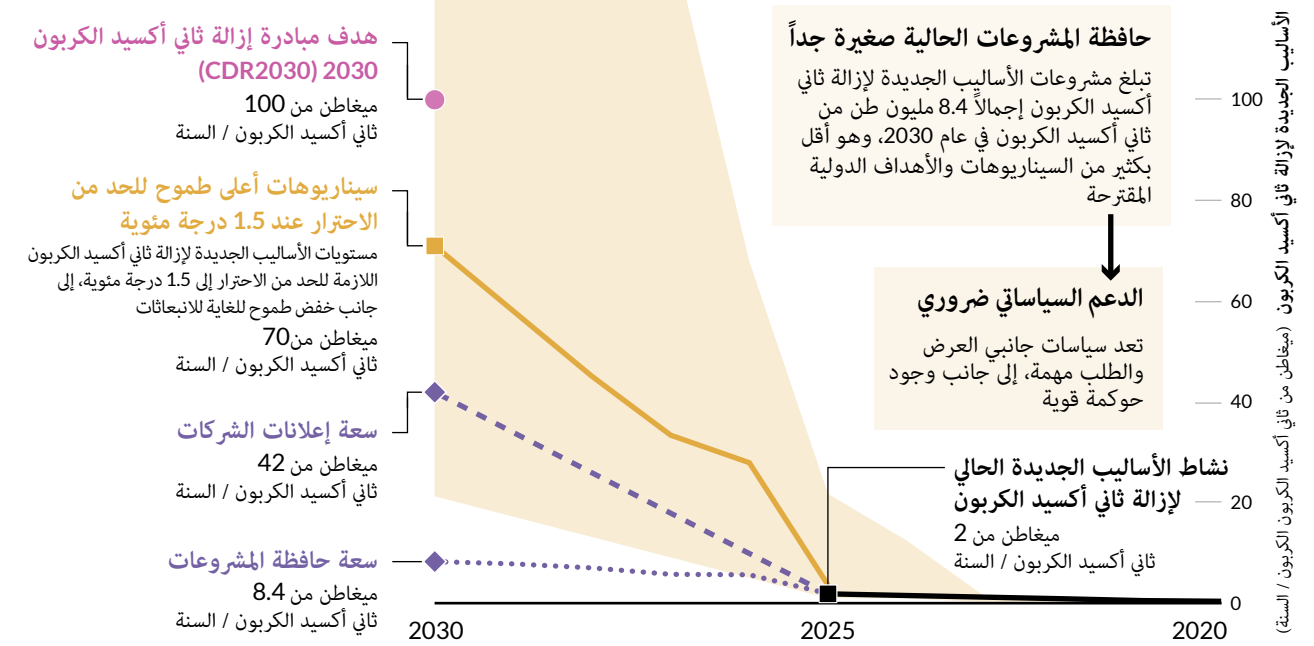
لا يقود نشاط إزالة ثاني أكسيد الكربون والدعم السياسي حالياً سوى حفنة من الشركات والبلدان. وقد يؤدي فقدان إحدى هذه الجهات الفاعلة الرئيسية إلى الإضرار بتطور إزالة ثاني أكسيد الكربون.

8- إن سد فجوة إزالة ثاني أكسيد الكربون أمر ملح لأن النشر عملية تدريجية. ومن ثم تُعد الفترة 2026-2030 حاسمة لترسيخ دور إزالة ثاني أكسيد الكربون في الحد من الأضرار المناخية.

إن تأخير خفض الانبعاثات من شأنه أن يزيد من الحاجة إلى نشر عمليات الإزالة، وخاصة الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون، إذا كان لابد من تحقيق درجة الحرارة المستهدفة بموجب اتفاق باريس. إن تأخير خفض الانبعاثات لمدة عشر سنوات من شأنه أن يرفع ذروة درجة الحرارة ويزيد بشكل كبير من الاحتياجات التراكمية لإزالة ثاني أكسيد الكربون. إن الاعتماد على مثل هذه المستويات العالية من إزالة ثاني أكسيد الكربون (عند الحدود العليا للإمكانات) ينطوي على مخاطر تجاوز عتبات الاستدامة. وعلى

العكس من ذلك، فإن خفض الانبعاثات بسرعة أكبر من شأنه أن يسمح بتوسيع نطاق عمليات الإزالة بشكل أكثر اعتدالاً ويقلل من ضغوط الاستدامة المرتبطة بالأراضي والمياه والنظم البيئية والطلب على الموارد. تمر الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون بمرحلة تكوينية، والتي تحتاج خلالها إلى ترسيخ شرعية وإثبات الموثوقية والنمو بشكل كافٍ لجعل مساهمتها على المدى الطويل في هدف اتفاق باريس ممكنة. وبينما ينمو نشاط إزالة ثاني أكسيد الكربون عموماً عبر المؤشرات، فإن العديد منها يكشف عن دعم هش واعتماد على عدد قليل من العناصر الحاسمة. وبالتالي، تحتاج إزالة ثاني أكسيد الكربون بشكل عاجل إلى التغلب على نقاط الضعف هذه وتطوير نظام سياسات قوي. يجب أن تكون فوائد السياسات واضحة وتمتد إلى ما هو أبعد من الأهداف المناخية. ويمكن للحكومة الدولية أن تلعب دوراً رئيسياً في تنسيق العمل ونشر المعرفة حول ما هو فعال. وقبل كل شيء، ستتطلب السنوات الخمس المقبلة سياسات لترسيخ توقعات قوية ومتنامية للطلب على عمليات الإزالة.

السنوات الخمس المقبلة حاسمة لترسيخ الأساليب الجديدة لإزالة ثاني أكسيد الكربون





THE STATE OF
**Carbon
Dioxide
Removal**

