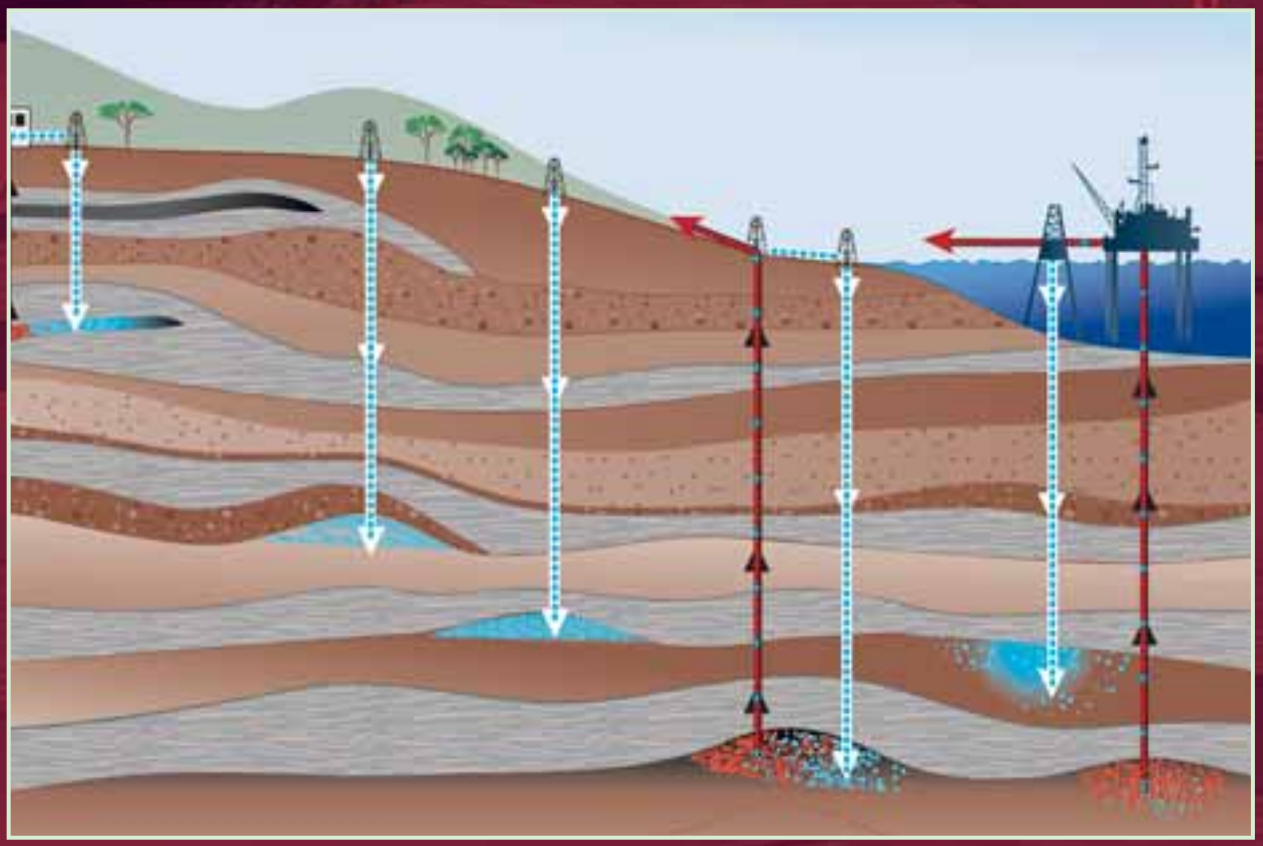
احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

ملخص لواضعي السياسات وملخص فني



الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)

WMO

UNEP

التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

ملخص لواضعي السياسات

تقرير الفريق العامل الثالث التابع للهيئة (IPCC)

و

ملخص فني

تقرير أقره الفريق العامل الثالث التابع للهيئة (IPCC)

المحررون:

Bert Metz و Ogunlade Davidson

Heleen de Coninck و Manuela Loos و Leo Meyer

أصدرت هذا التقرير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ
بناء على طلب من اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ

ISBN 92-9169-619-6

تصديـــر

أُنشئت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) في عام 1988 مشاركةً بين المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP). وتشمل اختصاصاتها ما يلي: '1' تقييم المعلومات العلمية والاجتماعية الاقتصادية المتاحة عن تغيّر المناخ وآثاره، وعن الخيارات المتاحة للتخفيف من حدة التغيّر والتأقلم معه، '2' إسداء المشورة العلمية والفنية والاقتصادية والاجتماعية، بناء على الطلب، إلى مؤتمر الأطراف (COP) في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيّر المناخ (UNFCCC). وقد أصدرت الهيئة IPCC ابتداء من عام 1990 سلسلة من تقارير التقييم والتقارير الخاصة والورقات الفنية والمنهجيات ومنتجات أخرى أصبحت أعمالاً مرجعية معيارية وانتشر استخدامها بين واضعي السياسات والعلماء وسائر الخبراء.

وفي مؤتمر الأطراف السابع (COP7)، اعتُمد مشروع قرار يدعو الهيئة (IPCC) إلى إعداد ورقة فنية بشأن التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون(1). واستجابت الهيئة لذلك في دورتها العشرين المعقودة في عام 2003 في باريس، فرنسا، فوافقت على إعداد تقرير خاص عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

وقد أعد الفريق العامل الثالث التابع للهيئة هذا المجلد، المعنون "التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) بشأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه"، وهو يركز على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كخيار للتخفيف من حدة تغيّر المناخ. ويتألف المجلد من 9 فصول تشمل مصادر ثاني أكسيد الكربون، والخصائص الفنية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه في التكوينات الجيولوجية أو في المحيطات أو المعادن، أو استخدامه في العمليات الصناعية. كما أنه يقدّر تكاليف وإمكانات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، والآثار البيئية، والمخاطر والسلامة، وانعكاسات نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على عمليات حصر غازات الاحتباس الحراري، والتصور العام، والقضايا القانونية.

ميشيل جارو
الأمين العام
للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية

وكما درجت العادة في الهيئة (IPCC)، كان النجاح في إعداد هذا التقرير مرهوناً في المقام الأول بالمعارف المتوافرة، وبحماس وتعاون مئات الخبراء من جميع أنحاء العالم في عدد كبير من التخصصات التي توجد صلة بينها على الرغم من اختلافها. ونود أن نعرب عن امتناننا لجميع المؤلفين الرئيسيين المنسقين، والمؤلفين الرئيسيين، والمؤلفين المشاركين، والمحررين المستعرضين، والخبراء المستعرضين. فقد كرّس هؤلاء الأشخاص الكثير من الوقت والجهد لإصدار هذا التقرير، ونحن نعرب عن امتناننا الشديد لالتزامهم بعملية الهيئة (IPCC). كما نود أن نشكر العاملين في وحدة الدعم الفني للفريق العامل الثالث وأمانة الهيئة (IPCC) على تفانيهم في تنسيق إصدار تقرير ناجح آخر للهيئة (IPCC). ونعرب عن امتناننا أيضاً للحكومات التي دعمت مشاركة علمائها في عملية الهيئة (IPCC)، والتي أسهمت في الصندوق الاستئماني للهيئة (IPCC) لتوفير الأموال اللازمة للمشاركة الضرورية لخبراء من البلدان النامية والبلدان ذات الاقتصادات الانتقالية. كما نود أن نعرب عن تقديرنا لحكومات النرويج واستراليا والبرازيل وإسبانيا التي استضافت دورات في بلدانها، ونخص بالشكر حكومة كندا التي استضافت حلقة عمل عن هذا الموضوع، فضلاً عن الدورة الثامنة للفريق العامل الثالث للنظر في التقرير والموافقة عليه رسمياً، في مونتريال، وحكومة هولندا التي تموّل وحدة الدعم الفني التابعة للفريق العامل الثالث.

ونود أن نُزجي الشكر بشكل خاص للدكتور Rajendra Pachauri، رئيس الهيئة (IPCC)، على توجيهه وإرشاداته للهيئة، والدكتورة Renate Christ، أمينة الهيئة IPCC، وموظفيها على ما قدموه من دعم، والبروفيسور Ogunlade Davidson، والدكتور Bert Metz، رئيسيّ الفريق العامل الثالث على قيادتهما للفريق من خلال إعداد هذا التقرير.

كلاوس طوبفير
المدير التنفيذي
لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة
والمدير العام لمكتب الأمم المتحدة في نيروبي

(1) انظر الموقع http://unfccc.int، وتقرير مؤتمر الأطراف السابع، والوثيقة FCCC/CP/2001/13/Add.1، والقرار CP.7/9 (المادة 3.14 من بروتوكول كيوتو)، ومشروع القرار CMP.1/-، الفقرة 7، الصفحة 50: "يدعو الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) إلى أن تعد، بالتعاون مع المنظمات الأخرى ذات الصلة، ورقة فنية عن تكنولوجيات الاحتجاز الجيولوجي للكربون تشمل المعلومات الراهنة، وأن تقدم تقريراً عن ذلك لينظر فيه مؤتمر الأطراف الذي يقوم مقام اجتماع الأطراف في بروتوكول كيوتو في دورته الثانية".

تمهيـــد

أُعدّ هذا التقرير الخاص عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه تحت إشراف الفريق العامل الثالث (التخفيف من حدة تغير المناخ) التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. وقد وُضع هذا التقرير بناء على دعوة من اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ خلال مؤتمر الأطراف السابع التابع لها عام 2001. وفي نيسان/أبريل 2002، قررت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ خلال دورتها التاسعة عشرة في جنيف عقد حلقة عمل، هي الحلقة التي عُقدت في تشرين الثاني/ نوفمبر 2002 في ريجينا، كندا. وكانت نتائج هذه الحلقة هي التقييم الأول للمؤلفات التي تتناول احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه واقتراح بوضع تقرير خاص. ووافقت الهيئة خلال دورتها العشرين التي عُقدت في باريس، فرنسا، عام 2003 على هذا الاقتراح ووافقت على المخطط والجدول الزمني[1]. وعهد إلى الفريق العامل الثالث بتقييم الجوانب العلمية والتقنية والبيئية والاقتصادية والاجتماعية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ولذا فإن اختصاصات التقرير تتضمن تقييم درجة التقدم التكنولوجي والإمكانات التقنية والاقتصادية للمساهمة في التخفيف من حدة تغير المناخ وتكاليف ذلك. كما تتضمن قضايا قانونية وتنظيمية والتصور العام والتأثيرات البيئية وسلامة البيئة، بجانب القضايا ذات الصلة بحصر الانخفاضات في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري واحتساب تلك الانبعاثات.

ويقيِّم هذا التقرير أولاً المؤلفات المنشورة بعد تقرير التقييم الثالث (2001) بشأن مصادر ثاني أكسيد الكربون ونظم الاحتجاز والنقل ومختلف آليات التخزين. غير أنه لا يشمل عزل الكربون البيولوجي من خلال استخدام الأراضي والتغير في استخدام الأراضي والحراجة أو تخصيب المحيطات. ويعتمد التقرير على مساهمة الفريق العامل الثالث في تقرير التقييم الثالث عن تغير المناخ الصادر عام 2001 (التخفيف) وعلى التقرير الخاص بشأن سيناريوهات الانبعاث الصادر عام 2000 فيما يتعلق باحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ضمْن مجموعة خيارات التخفيف. ويحدد التقرير الثغرات في المعارف التي تحتاج إلى معالجة من أجل تيسير عملية الانتشار على نطاق كبير.

ويتبع هيكل التقرير نسَق عناصر نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. فيحدد فصل استهلالي الإطار العام للتقييم ويقدم عرضاً عاماً موجزاً لنظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ويحدد الفصل 2 المصادر الرئيسية لثاني أكسيد الكربون المناسبة من الناحيتين التقنية والاقتصادية للاحتجاز وذلك لتقييم صلاحية نظام الاحتجاز والتخزين للتطبيق على نطاق عالمي. وتُناقش الخيارات التكنولوجية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون مناقشة مستفيضة في الفصل 3 في حين يركز الفصل 4 على طرق نقل ثاني أكسيد الكربون. ثم تتناول الفصول الثلاثة التالية كل خيار من خيارات التخزين الرئيسية وهي: التخزين الجيولوجي (الفصل 5)، والتخزين في المحيطات (الفصل 6)، وكربنة المعادن والاستخدامات الصناعية (الفصل 7). وتجري مناقشة التكاليف الشاملة للإمكانات الاقتصادية لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في الفصل 8 ويعقب ذلك بحث انعكاسات هذا النظام على عمليات حصر غازات الاحتباس الحراري وحساب الانبعاثات من تلك الغازات (الفصل 9).

وقد اشترك في وضع هذا التقرير زهاء 100 من المؤلفين الرئيسيين المنسقين و25 مؤلفاً مساهماً، وجميعهم بذلوا قدراً كبيراً من الوقت والجهد. وينتمي هؤلاء للبلدان الصناعية والبلدان النامية والبلدان التي تمر اقتصاداتها بمرحلة انتقال والمنظمات الدولية. وقد قام باستعراض التقرير أكثر من 200 شخص (خبراء وممثلين للحكومات) من جميع أنحاء العالم. وأشرف على عملية الاستعراض 19 محرراً مستعرضاً تأكدوا من نيل جميع التعليقات الاهتمام الواجب.

ووفقاً لإجراءات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، وافقت الحكومات على ملخص هذا التقرير الموجه إلى واضعي السياسات سطراً بسطر خلال دورة الفريق العامل الثالث التابع للهيئة الحكومية الدولية التي عُقدت في مونتريال، كندا، من 22 إلى 24 أيلول/ سبتمبر 2005. وخلال عملية الموافقة، أكد المؤلفون الرئيسيون أن النص المتفق عليه للملخص الموجه إلى واضعي السياسات يتسق اتساقاً كاملاً مع التقرير الكامل الأساسي والملخص الفني، وقد قبلت الحكومات كليهما ولكن تظل المسؤولية الكاملة للمؤلفين.

ونود أن نعرب عن امتناننا للحكومات التي قدمت الدعم المالي والعيني لاستضافة مختلف الاجتماعات التي كانت ضرورية لاستكمال هذا التقرير. ونتقدم بشكر خاص للحكومة الكندية لاستضافة كل من حلقة العمل في ريجينا، 22–18 تشرين الثاني/ نوفمبر 2002، ودورة الموافقة للفريق العامل الثالث التي عُقدت في مونتريال خلال الفترة 24–22 أيلول/ سبتمبر 2005. وقد اجتمع فريق صياغة هذا التقرير أربع مرات لصياغة مشروع التقرير ومناقشة نتائج جولتي الاستعراض الرسميتين المتتاليتين اللتين عقدتهما الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. وتكرمت باستضافة هذه الاجتماعات حكومة النرويج (أوسلو، تموز/ يوليو 2003)، وأستراليا (كانبيرا، كانون الأول/ ديسمبر 2003)، والبرازيل (سلفادور، آب/ أغسطس 2004) وإسبانيا (أوفييدو، نيسان/ أبريل 2005) على التوالي. وعلاوة على ذلك ساهم الكثير من الاجتماعات الفردية

[1] انظر http://www.ipcc.ch/meet/session20/finalreport20.pdf.

والمؤتمرات الإلكترونية والتفاعلات مع الحكومات في استكمال هذا التقرير بنجاح.

ونحن نؤيد كلمات الشكر التي أعرب عنها في المقدمة الأمين العام للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية والأمين التنفيذي لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة لفريق الصياغة ومحرري الاستعراض ومستعرضي التقرير من الخبراء.

ونود أن نوجه الشكر إلى موظفي وحدة الدعم الفني التابعة للفريق العامل الثالث لما قاموا به من عمل في إعداد هذا التقرير ولاسيما Heleen de Coninck لتفهمها وتنسيقها للتقرير بكفاءة، و Manuela Loos و Cora Blankendaal لما قدمتاه من دعم فني ولوجيستي وخاص بأعمال السكرتارية و Leo Meyer (رئيس وحدة الدعم الفني) لقيادته لهذه المجموعة. كما أننا نعرب عن شكرنا لـ Anita Meier لما قدمته من دعم عام، ولـ Dave Thomas و Pete Thomas و Tony Cunningham و Fran Aitkens و Ann Jenks و Ruth de Wijs لما قاموا به من تحرير للنسخة الطباعية من الوثيقة و Wout Niezen ولـ Martin Middelburg و Henk Stakelbeek و Albert van Staa و Eva Stam و Tim Huliselan لإعدادهم التصميم النهائي والأشكال البيانية الخاصة بالتقرير. ونقدم كلمة شكر خاصة لـ Lee-Anne Shepherd التي تعمل في مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون لإعدادها بمهارة الأرقام الواردة في الملخص الموجه إلى واضعي السياسات. وأخيراً وليس آخراً نود أن نعرب عن تقديرنا لـ Renate Christ وموظفيها ولـ Francis Hayes التي تعمل في المنظمة العالمية للأرصاد الجوية لعملهم الشاق دعماً للعملية.

وإننا نأمل، بصفتنا رئيسيّ الفريق العامل الثالث، ويأمل معنا الأعضاء الآخرون في مكتب الفريق، والمؤلفون الرئيسيون ووحدة الدعم الفني، أن يساعد هذا التقرير صنّاع القرار في الحكومات والقطاع الخاص، فضلاً عن القراء المهتمين في الدوائر الأكاديمية والجمهور العام، على أن يصبحوا أكثر استنارة بشأن احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون باعتباره أحد خيارات التخفيف من حدة تغير المناخ.

Bert Metz و Ogunlade Davidson
رئيسا الفريق العامل الثالث المعني بالتخفيف من حدة تغير المناخ
التابع الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

المحتويات

ملخص لواضعي السياسات

ما هو احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وكيف يمكن أن يسهم في التخفيف من حدة تغير المناخ؟ 2

ما هي خصائص احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟ 2

ما هو الوضع الحالي لتكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟ 4

ما هي العلاقة الجغرافية بين مصادر ثاني أكسيد الكربون وفرص تخزينه؟ 7

ما هي تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وما هي إمكاناته التقنية والاقتصادية؟ 8

ما هي المخاطر المحلية من حيث الصحة والسلامة والبيئة التي ينطوي عليها احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟ 11

هل يهدد التسرب المادي لثاني أكسيد الكربون المخزون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كخيار للتخفيف من آثار تغير المناخ؟ 13

ما هي القضايا القانونية والتنظيمية المتعلقة بتنفيذ عملية تخزين ثاني أكسيد الكربون؟ 14

ما هي انعكاسات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالنسبة لقوائم حصر الانبعاثات واحتسابها؟ 14

ما هي الثغرات في المعرفة؟ 14

ملخص فني

1– مقدمة هذا التقرير وإطاره 16

2– مصادر ثاني أكسيد الكربون 19

3– احتجاز ثاني أكسيد الكربون 21

4– نقل ثاني أكسيد الكربون 27

5– التخزين الجيولوجي 28

6– التخزين في المحيطات 34

7– كربنة المعادن والاستخدامات الصناعية 36

8– التكاليف والإمكانات الاقتصادية 38

9– حصر الانبعاثات واحتسابها 43

10– ثغرات المعرفة 45

المرفق الأول – مسرد المصطلحات والمختصرات 47

المرفق الثاني – قائمة التقارير الرئيسية للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) 52

التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

ملخص لواضعي السياسات

استناداً إلى مسودة أعدها:

Juan Carlos Abanades (Spain), Makoto Akai (Japan), Sally Benson (United States), Ken Caldeira (United States), Heleen de Coninck (Netherlands), Peter Cook (Australia), Ogunlade Davidson (Sierra Leone), Richard Doctor (United States), James Dooley (United States), Paul Freund (United Kingdom), John Gale (United Kingdom), Wolfgang Heidug (Germany), Howard Herzog (United States), David Keith (Canada), Marco Mazzotti (Italy and Switzerland), Bert Metz (Netherlands), Leo Meyer (Netherlands), Balgis Osman-Elasha (Sudan), Andrew Palmer (United Kingdom), Riitta Pipatti (Finland), Edward Rubin (United States), Koen Smekens (Belgium), Mohammad Soltanieh (Iran), Kelly (Kailai) Thambimuthu (Australia and Canada)

ما هو احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وكيف يمكن أن يسهم في التخفيف من حدة تغير المناخ؟

1- *احتجاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وتخزينه (CCS) هو عملية تتألف من فصْل ثاني أكسيد الكربون عن المصادر الصناعية والمتعلقة بالطاقة، ونقله إلى مكان تخزين، وعزله عن الغلاف الجوي على المدى الطويل. وهذا التقرير ينظر في عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) كخيار في مجموعة تدابير التخفيف الرامية إلى تثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي.*

من بين خيارات التخفيف الأخرى إدخال تحسينات في كفاءة الطاقة، والتحول إلى أنواع الوقود الأقل كثافة كربونية، والطاقة النووية، ومصادر الطاقة المتجددة، وتحسين المصارف البيولوجية، والحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري غير ثاني أكسيد الكربون. وينطوي احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على إمكانية الحد من التكاليف العامة للتخفيف وزيادة المرونة في تحقيق تخفيضات في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وسيتوقف تطبيق احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) على مدى النضج الفني، والتكاليف، والقدرة بوجه عام، ونشر التكنولوجيا ونقلها إلى البلدان النامية، وقدرتها على تطبيق التكنولوجيا، والجوانب التنظيمية، والقضايا البيئية، والتصور العام (الأقسام 1.1.1، و1.3، و1.7، و8.3.3.4).

2- *يبين تقرير التقييم الثالث (TAR) أن ما من خيار تكنولوجي سيوفر بمفرده جميع تخفيضات الانبعاث اللازمة لتحقيق التثبيت، وإنما ستلزم مجموعة من تدابير التخفيف من الانبعاثات.*

تتوقع معظم السيناريوهات استمرار سيطرة أنواع الوقود الأحفوري في مجال الإمداد بالطاقة الأولية حتى منتصف القرن على الأقل. وتشير أيضاً معظم النماذج، على النحو المناقش في تقرير التقييم الثالث، إلى أن الخيارات التكنولوجية المعروفة[1] يمكن أن تحقق طائفة واسعة من مستويات التثبيت في الغلاف الجوي ولكن التنفيذ سيتطلب تغييرات اجتماعية – اقتصادية ومؤسسية. وفي هذا السياق يمكن أن يؤدي توافر عمليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) ضِمْن مجموعة الخيارات إلى تيسير تحقيق أهداف التثبيت (القسمان 1.1، و1.3).

ما هي خصائص احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟

3- *من الممكن تطبيق عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون على المصادر النقاطية الكبيرة. فعندئذ يمكن ضغطه ونقله لتخزينه في التكوينات الجيولوجية، أو في المحيطات، أو في الكربونات المعدنية[2]، أو من أجل استخدامه في العمليات الصناعية.*

المصادر النقاطية الكبيرة لثاني أكسيد الكربون تشمل المنشآت الكبيرة للطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري أو بالكتلة الحيوية، والصناعات الرئيسية التي ينبعث عنها ثاني أكسيد الكربون، وإنتاج الغاز الطبيعي، ووحدات توليد الطاقة التي تعمل بالوقود التركيبي، ووحدات إنتاج الهيدروجين التي تعمل بالوقود الأحفوري (انظر الجدول م–1). وطرق التخزين التقني الممكنة هي: التخزين الجيولوجي (في التكوينات الجيولوجية، من قبيل حقول النفط والغاز، والطبقات التي تحوي فحماً ولا يمكن تعدينها، والتكوينات الملحية العميقة[3])، والتخزين في المحيطات (الإطلاق المباشر في عمود مياه المحيطات أو على قاع البحار العميق) والتثبيت الصناعي لثاني أكسيد الكربون بتحويله إلى كربونات لا عضوية. ويناقش هذا التقرير أيضاً الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون، ولكن ليس من المتوقع أن يسهم ذلك كثيراً في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (انظر الشكل م – 1) (الأقسام 1.2، و1.4، و2.2، والجدول 2.3).

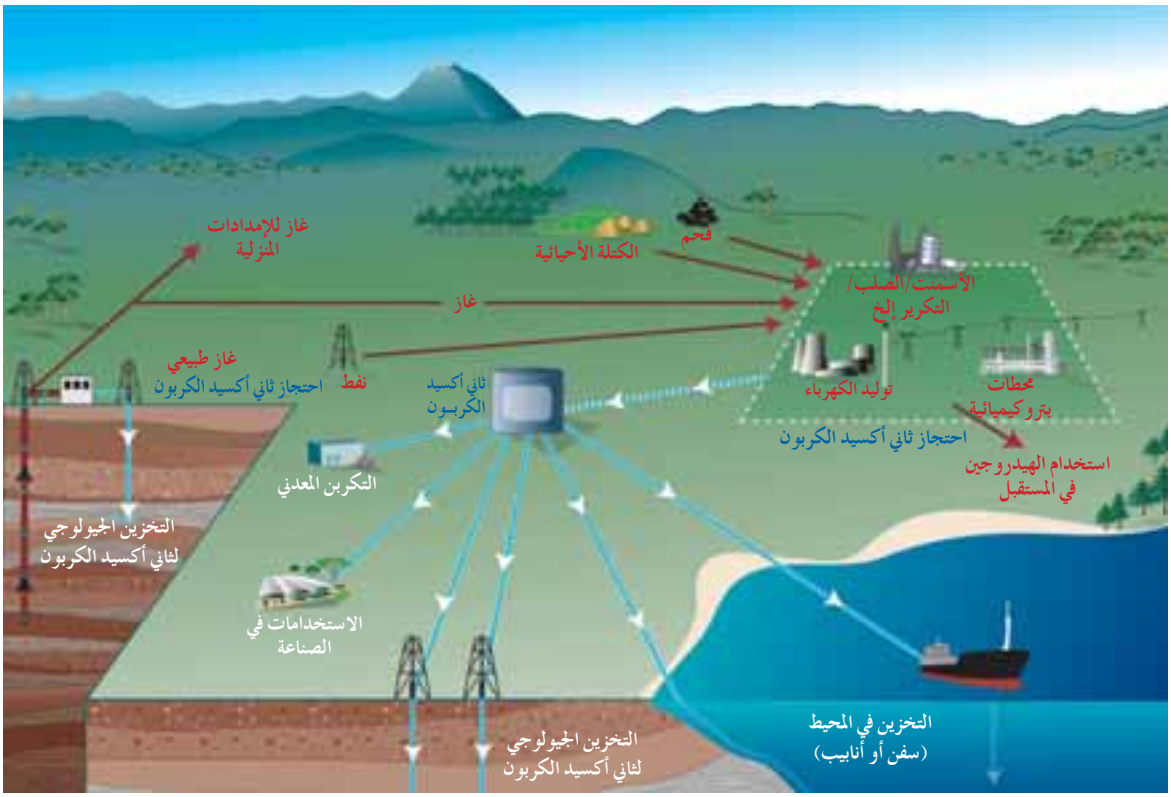
الجدول م – 1 – موجز بحسب العملية أو النشاط الصناعي لمصادر ثاني أكسيد الكربون الثابتة الكبيرة على نطاق العالم التي تتجاوز الانبعاثات منها 0.1 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون (بالأطنان المترية من ثاني أكسيد الكربون) سنوياً.

العملية	عدد المصادر	الإنبعاثات (بالأطنان المترية من ثاني أكسيد الكربون سنوياً)
أنواع الوقود الأحفوري		
الطاقة (الفحم، والغاز، والنفط، وأنواع الطاقة الأخرى)	4.942	10.539
إنتاج الأسمنت	1 175	932
معامل التكرير	638	798
صناعة الحديد والصلب	269	646
صناعة البتروكيماويات	470	379
معالجة النفط والغاز	لا تتوافر بيانات	50
المصادر الأخرى	90	33
الكتلة الحيوية		
الإيثانول الحيوي والطاقة الحيوية	303	91

(1) تشير عبارة "الخيارات التكنولوجية المعروفة" إلى التكنولوجيات المطبقة أو التي يجري تجريبها في الوقت الحاضر، كما يحال إليها في سيناريوهات التخفيف التي ترد مناقشتها في تقرير التقييم الثالث. وهي لا تشمل أي تكنولوجيات جديدة ستتطلب فتوحات تكنولوجية فارقة. ويرد في تقرير التقييم الثالث شرح للخيارات التكنولوجية المعروفة، وتشمل سيناريوهات التخفيف العديدة عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

(2) لا يشمل تخزين ثاني أكسيد الكربون على شكل كربونات معدنية الكربنة الجيولوجية العميقة أو التخزين في المحيطات مع تحسين تحييد الكربونات على النحو الذي ترد مناقشته في الفصل 6 (انظر 7.2).

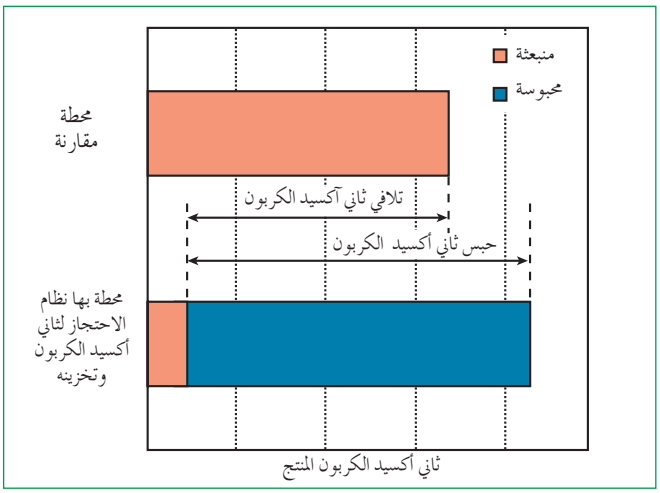
(3) التكوينات الملحية هي صخور رسوبية مشبعة بمياه تكوينات تحتوي على تركيزات عالية من الأملاح المحلولة. وهي واسعة الانتشار وتحتوي على كميات ضخمة من المياه غير الصالحة للزراعة أو للاستهلاك البشري. وبالنظر إلى احتمال حدوث زيادة في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية، قد لا تصلح المجالات الحرارية الأرضية المحتملة لتخزين ثاني أكسيد الكربون (انظر 5.3.3).



الشكل م – 1 – رسم بياني تخطيطي لنظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه الممكنة يبين المصادر التي قد تكون عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه هامة فيما يتعلق بها، ونقل ثاني أكسيد الكربون، وخيارات تخزينه (إهداء من مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون).

4- *صافي الانخفاض في الانبعاثات إلى الغلاف الجوي عن طريق احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يتوقف على نسبة ثاني أكسيد الكربون التي تُحتجز، وزيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون التي تنجم عن حدوث انخفاض في الكفاءة العامة لوحدات توليد الكهرباء أو للعمليات الصناعية نتيجة للطاقة الإضافية اللازمة للاحتجاز والنقل والتخزين، وأي تسرب من النقل، ونسبة ثاني أكسيد الكربون التي يُبقى عليها مخزونة على المدى الطويل.*

التكنولوجيا المتوافرة تحتجز حوالي 85 إلى 95% من ثاني أكسيد الكربون الذي يعالج في وحدة احتجاز. ومحطة توليد الطاقة المزودة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (بحيث يتاح لها سبيل للتخزين الجيولوجي أو للتخزين في المحيطات) ستحتاج إلى قدر من الطاقة أكبر بما يتراوح من 10 إلى 40%[4] بالمقارنة بمحطة ذات إنتاج معادل بدون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، ومعظم هذه الكمية يخصص لأغراض الاحتجاز والضغط. ومن زاوية التخزين المأمون، تتمثل النتيجة الصافية في أن محطة توليد الطاقة المزودة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يمكن أن تقلل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي بنسبة تتراوح من 80 إلى 90% تقريباً بالمقارنة بالمحطة التي لا يتوافر لديها نظام من هذا القبيل (انظر الشكل م – 2). وبالنظر إلى احتمال حدوث تسرب من خزان التخزين، تعرَّف النسبة التي تستبقى بأنها نسبة الكمية التراكمية لثاني أكسيد الكربون المحقون التي يُبقى عليها على مدى فترة زمنية محددة. وستحتاج نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه التي يتوافر فيها التخزين على شكل كربونات معدنية إلى طاقة أكبر بنسبة تتراوح من 60 إلى 180% بالمقارنة بالمحطة ذات الإنتاج المعادل بدون توافر نظام



الشكل م – 2 – إحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من محطات توليد الطاقة. وزيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون الناجمة عن حدوث انخفاض في الكفاءة العامة لمحطات توليد الطاقة نتيجة للطاقة الإضافية التي تلزم من أجل الاحتجاز والنقل والتخزين، وأي تسرب ينجم عن النقل، تؤدي إلى وجود كمية أكبر "من ثاني أكسيد الكربون الذي ينتج مقابل كل وحدة من المنتج" (العمود السفلي) بالنسبة إلى المحطة المقارنة (العمود العلوي) التي لا يتوافر لديها نظام للاحتجاز (الشكل 8.2).

[4] يمثل النطاق ثلاثة أنواع من محطات توليد الطاقة: ففي حالة محطات توليد الطاقة المختلطة الدورة التي تعمل بالغاز الطبيعي يتراوح النطاق من 11 إلى 22%، وفي حالة المحطات التي تعمل بالفحم المسحوق يتراوح النطاق من 24 إلى 40%، وفي حالة المحطات ذات الدورة المختلطة للتغويز المتكامل يتراوح النطاق من 14 إلى 25%.

لديها لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. (الأقسام 1.5.1، و1.6.3، و3.6.1.3، و7.2.7).

ما هو الوضع الحالي لتكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟

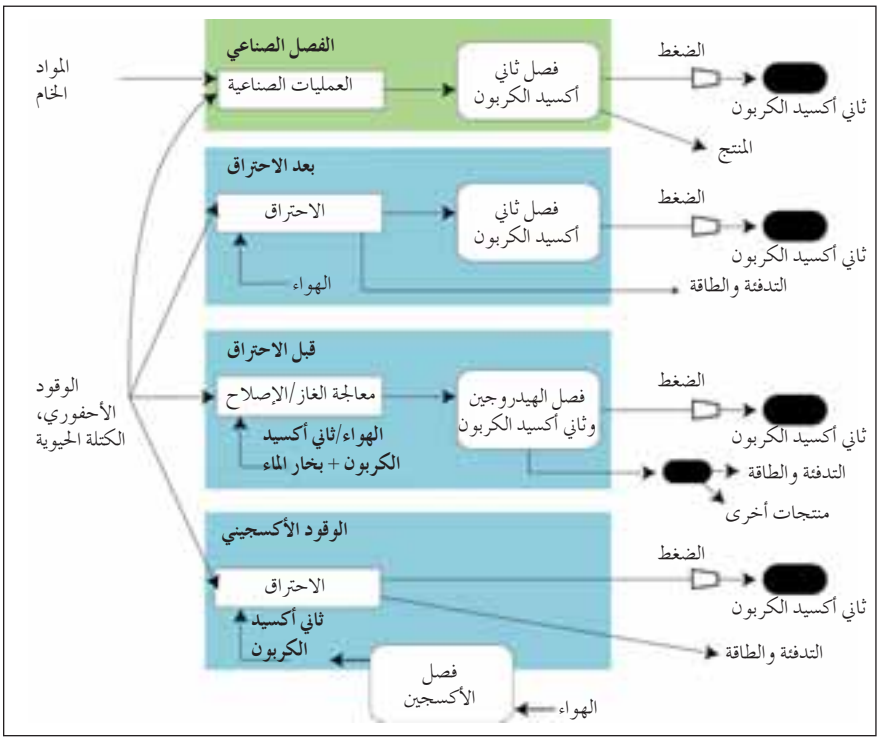
5- *توجد أنواع مختلفة من نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون هي: نظم ما بعد الاحتراق، ونظم ما قبل الاحتراق، ونظم احتراق الوقود الأكسجيني (الشكل م – 3). ونسبة تركيز ثاني أكسيد الكربون في مجرى الغاز، وضغط مجرى الغاز، ونوع الوقود (أي ما إذا كان صلباً أو غازياً) هي عوامل هامة في اختيار نظام الاحتجاز.*

احتجاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق في محطات توليد الطاقة يصلح اقتصادياً في ظل ظروف محددة[5] وهو يستخدم لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون من جزء من غازات المداخن المنبعثة من عدد من المحطات القائمة لتوليد الطاقة. ويطبَّق فصل ثاني أكسيد الكربون في صناعة معالجة الغاز الطبيعي، التي تستخدم تكنولوجيا مماثلة، في سوق ناضجة[6]. والتكنولوجيا اللازمة للاحتجاز قبل الاحتراق تُطبق على نطاق واسع في صناعة الأسمدة وفي إنتاج الهيدروجين. ومع أن الخطوات الأولية لتحويل الوقود قبل الاحتراق أكثر تعقيداً وباهظة التكلفة، فإن زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في مجرى الغاز والضغط الأعلى يجعلان عملية الفصل أسهل. أما احتراق الوقود الأكسجيني فهو في طور البيان العملي[7] ويُستخدم فيه أكسجين شديد النقاء. وهذا يؤدي إلى وجود تركيزات مرتفعة من ثاني أكسيد الكربون في مجرى الغاز ويؤدي بالتالي إلى تيسير فصل ثاني أكسيد الكربون وإلى زيادة الاحتياجات من الطاقة في عملية فصل الأكسجين عن الهواء (الأقسام 3.3، و3.4، و3.5).

6- *تُفضل خطوط الأنابيب لنقل كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون إلى مسافات تصل إلى حوالي 1.000 كيلومتر. وفي حالة الكميات الأقل من بضعة ملايين الأطنان من ثاني أكسيد الكربون سنوياً أو في حالة النقل إلى مسافات أكبر فيما وراء البحار، قد يكون استخدام السفن، حيثما يمكن ذلك، أكثر جاذبية من الناحية الاقتصادية.*

يُستخدم نقل ثاني أكسيد الكربون عن طريق خطوط أنابيب باعتباره تكنولوجيا سوق ناضجة (في الولايات المتحدة الأمريكية تنقل خطوط أنابيب تمتد مسافة تربو على 2.500 كيلومتر أكثر من 40 طناً متريا من ثاني أكسيد الكربون سنوياً). وفي معظم خطوط أنابيب الغاز تكون المضاغط الموجودة عند نهاية الإنتاج هي القوة المسببة للتدفق، ولكن بعض خطوط الأنابيب تحتاج إلى محطات مضاغط وسيطة. وثاني أكسيد الكربون الجاف لا يؤدي إلى تحات خطوط الأنابيب، حتى وإن كان يحتوي على ملوثات. وعند احتوائه على رطوبة فإنها تُزال من مجراه منعاً للتحات وتجنباً لتكاليف إقامة خطوط أنابيب مصنوعة من مادة مقاومة للتحات. والنقل البحري لثاني أكسيد الكربون، المماثل للنقل البحري لغازات النفط المسيلة، يصلح اقتصادياً في ظل ظروف محددة ولكنه يجري حالياً على نطاق صغير نتيجة لقلة الطلب عليه. ومن الممكن أيضاً نقل ثاني أكسيد الكربون بواسطة السكك الحديدية والشاحنات الصهريجية، ولكن ليس من المرجح أن تكون هذه الشاحنات خياراً جذاباً لنقل ثاني أكسيد الكربون على نطاق كبير (الأقسام 4.2.1، و4.2.2، و4.3.2 والشكلان 4.5، و4.6).

7- *تخزين ثاني أكسيد الكربون في التكوينات الجيولوجية العميقة، على البر أو في البحر، يستخدم كثرة من نفس التكنولوجيات التي استحدثتها صناعة النفط والغاز وثبتت صلاحيتها اقتصادياً في ظل ظروف محددة فيما يتعلق بحقول النفط والغاز والتكوينات الملحية،*



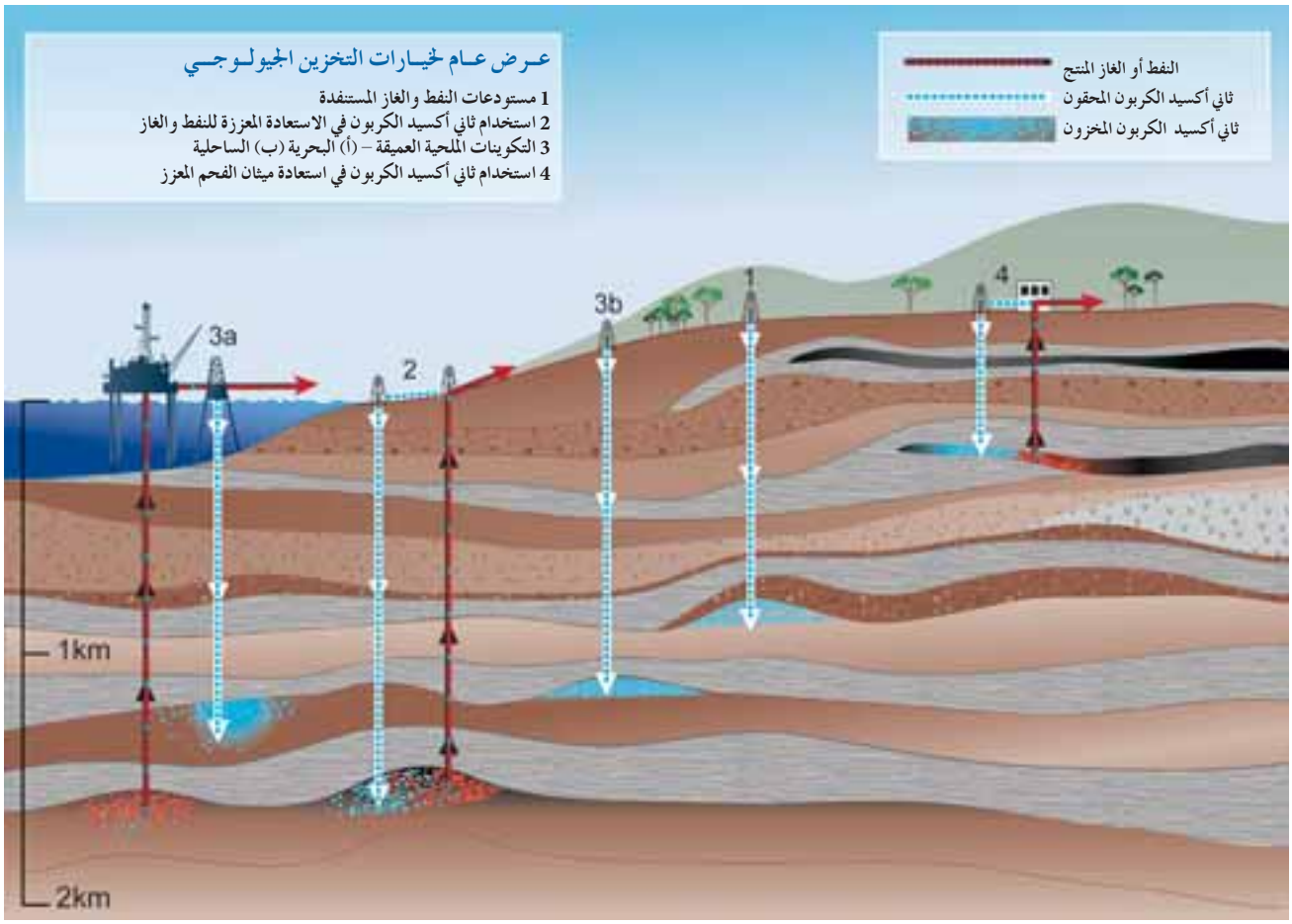
الشكل م – 3 – تصوير تخطيطي لنظم الاحتجاز. وتبين أنواع الوقود والمنتجات التي تُستخدم من أجل احتراق الوقود الأوكسجيني وما قبل الاحتراق (بما في ذلك إنتاج الهيدروجين والأسمدة)، وما بعد الاحتراق، والمصادر الصناعية لثاني أكسيد الكربون (بما في ذلك مرافق معالجة الغاز الطبيعي وإنتاج الصلب والأسمنت) (استناداً إلى الشكل 3.1) (إهداء من مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون).

---

(5) تعني عبارة "تصلح اقتصادياً في ظل ظروف محددة" أن التكنولوجيا مفهومة جيداً وتُستخدم في تطبيقات تجارية مختارة، من قبيل نظام ضريبي مؤاتٍ أو سوق خاصة، بحيث تعالج 0.1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، على الأقل، مع وجود قلة (أقل من 5) من عمليات تكرار هذه التكنولوجيا.

(6) تعني عبارة "سوق ناضجة" أن التكنولوجيا تطبق حالياً مع وجود عمليات تكرار متعددة للتكنولوجيا المتبعة على نطاق تجاري في جميع أنحاء العالم.

(7) تعني عبارة "طور البيان العملي" أن التكنولوجيا قد أقيمت وطبقت على نطاق محطة تجريبية ولكن من اللازم مزيد من التطوير لها قبل أن تصبح جاهزة لتصميم وإقامة نظام على نطاق كامل.



الشكل م – 4 – عرض عام لخيارات التخزين الجيولوجي (استنادا إلى الشكل 5.3) (إهداء من مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون).

ولكن لم تثبت صلاحيتها اقتصادياً بعد فيما يتعلق بالتخزين في الطبقات الحاملة للفحم غير القابلة للتعدين[8] (انظر الشكل م – 4).

في حالة حقن ثاني أكسيد الكربون في تكوينات ملحية أو حقول نفط أو غاز ملائمة، على أعماق أدنى من 800 متر[9]، فإن آليات حبس فيزيائية وجيوكيميائية شتى ستحول دون انتقاله إلى السطح. ومن آليات الحبس الفيزيائية الأساسية، بوجه عام، وجود صخرة سقف[10]. وقد يجري التخزين في الطبقة الحاملة للفحم على أعماق أكثر ضحالة ويعتمد على امتزاز ثاني أكسيد الكربون على الفحم، ولكن الصلاحية الفنية تتوقف إلى حد كبير على نفاذية الطبقة الحاملة للفحم. والجمع ما بين تخزين ثاني أكسيد الكربون والاستخراج المحسَّن للنفط[11] (EOR) أو، كبديل محتمل، الاستخراج المحسَّن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم (ECBM) يمكن أن يؤدي إلى إيرادات إضافية من استخراج النفط أو استخراج الغاز. وتجري زيادة تطوير تكنولوجيا حفر الآبار، وتكنولوجيا الحقن، والمحاكاة الحاسوبية لأداء خزانات تخزين، وطرق المراقبة المستمدة من التطبيقات الموجودة حالياً، لكي تُستخدم في تصميم وتشغيل مشاريع التخزين الجيولوجي.

وثمة ثلاثة مشاريع للتخزين على نطاق صناعي[12] أصبحت في طور التشغيل هي: مشروع "Sleipner" في تكوين ملحي بحري في النرويج، ومشروع "Weyburn" للاستخراج المحسن للنفط في كندا، ومشروع عين صلاح في حقل من حقول الغاز في الجزائر. ومن المخطط تنفيذ مشاريع أخرى (الأقسام 5.1.1 و5.2.2 و5.3 و5.6 و5.9.4 والأطر 5.1 و5.2 و5.3).

8- من الممكن إجراء عملية التخزين في المحيطات بطريقتين: بحقن وحل ثاني أكسيد الكربون في عمود المياه (على مستوى أدنى عادة من 1000 متر) عن طريق خط أنابيب ثابت أو سفينة متحركة، أو بإيداعه بواسطة خط أنابيب ثابت أو منصة بحرية على قاع البحر على أعماق أدنى من 3000 متر، حيث يكون ثاني أكسيد الكربون

---

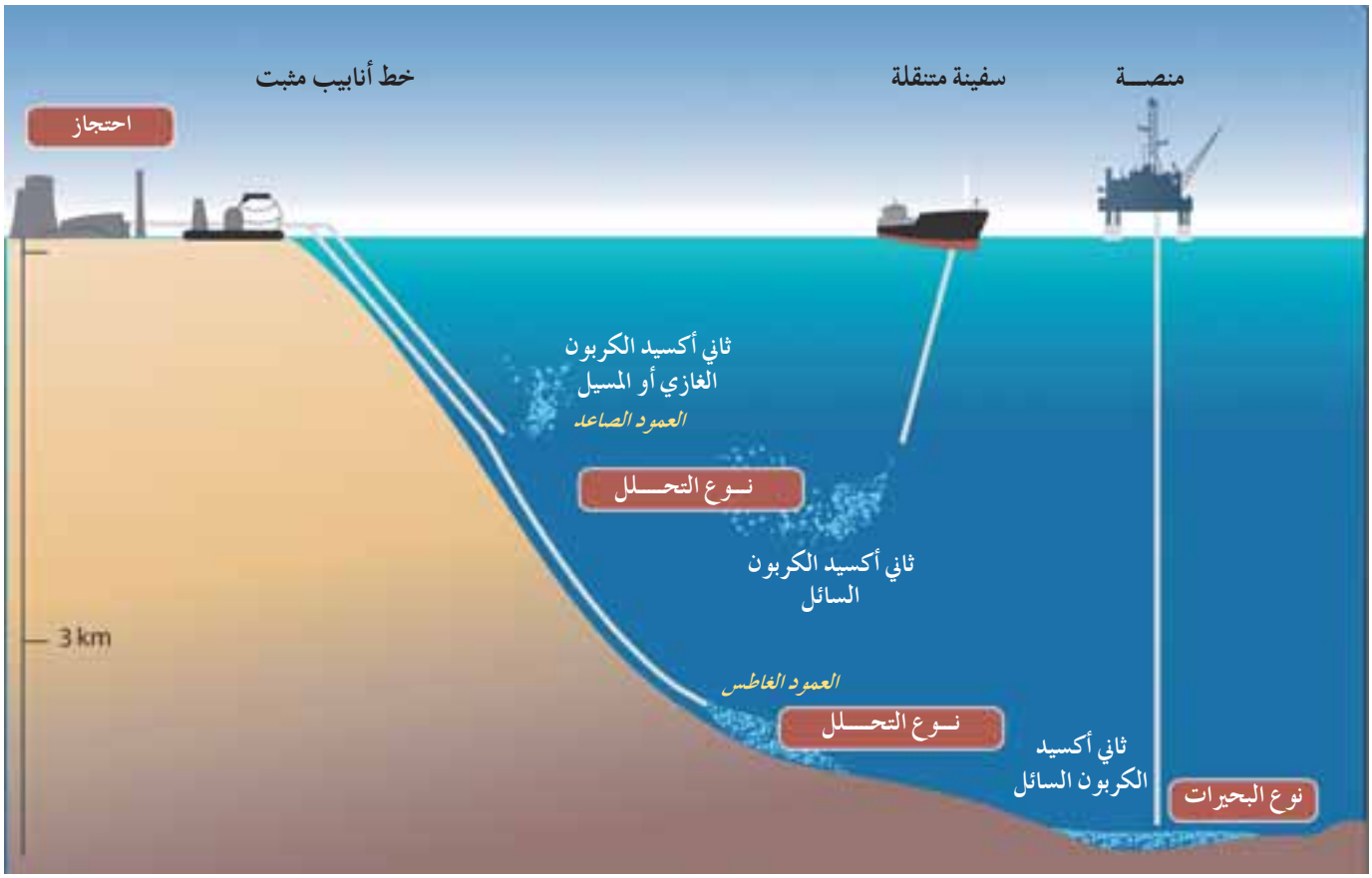
(8) الطبقة الحاملة للفحم التي ليس من المرجح تعدينها أبداً – لأنها موجودة على عمق كبير للغاية أو لأن سمكها رفيع للغاية – قد يكون من الممكن استخدامها في تخزين ثاني أكسيد الكربون. ولكن في حالة تعدين تلك الطبقة لاحقاً سينطلق ثاني أكسيد الكربون المخزون. والاستخراج المحسَّن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم (ECBM) يمكن أن يؤدي إلى زيادة إنتاج الميثان من الفحم مع تخزين ثاني أكسيد الكربون في الوقت نفسه. وسيُستخدم الميثان الناتج، ولن ينطلق إلى الغلاف الجوي (القسم 5.3.4).

(9) على أعماق أدنى مما يتراوح من 800 إلى 1000 متر يصبح ثاني أكسيد الكربون فوق حرج وتكون كثافته أشبه بكثافة السائل (ما يتراوح من حوالي 500 إلى 800 كغ في المتر المكعب) بحيث تتيح إمكانية استخدام حيز التخزين تحت الأرض بكفاءة وتحسن أمن التخزين (القسم 5.1.1).

(10) هي صخرة ذات نفاذية متدنية جداً تكون بمثابة سداد علوي يحول دون تسرب السوائل من خزان.

(11) لأغراض هذا التقرير يعني المختصر EOR الاستخراج المحسّن للنفط الذي يمثل ثاني أكسيد الكربون القوة المسببة له.

(12) تعني عبارة "النطاق الصناعي" هنا في حدود طن متري واحد من ثاني أكسيد الكربون سنويا.



الشكل م – 5 – عرض عام لمفاهيم التخزين في المحيطات. في التخزين في المحيطات "بطريقة الانحلال" ينحل ثاني أكسيد الكربون بسرعة في مياه المحيطات، بينما يكون ثاني أكسيد الكربون في حالة التخزين في المحيطات "بطريقة البحيرة" سائلاً أصلاً موجوداً على قاع البحر (إهداء من مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون).

أكثر كثافة من المياه ومن المتوقع أن يشكل "بحيرة" تؤخر انحلال ثاني أكسيد الكربون في البيئة المحيطة (انظر الشكل م – 5). أما التخزين في المحيطات وما يترتب عليه من آثار إيكولوجية فهو مازال في طوْر البحوث)[13].

سيصبح ثاني أكسيد الكربون المحلول والمتناثر جزءاً من دورة الكربون العالمية وسيتوازن في نهاية المطاف مع ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي. وفي التجارب المختبرية، والتجارب التي أجريت في المحيطات على نطاق صغير، وعمليات المحاكاة بالنماذج، دُرست التكنولوجيات والظواهر الفيزيائية والكيميائية المرتبطة بها، التي تشمل بالأخص زيادات في الحموضة (انخفاض الرقم الهيدروجيني pH) وتأثيرها على النظم الإيكولوجية البحرية، من أجل طائفة من خيارات التخزين في المحيطات (الأقسام 6.1.2 و6.2.1 و6.5 و6.7).

9- تنتج عن تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع أكسيدات الفلزات، الموجودة بوفرة في معادن السيليكات والمتوافرة بكميات صغيرة في مجاري النفايات، كربونات ثابتة. وهذه التكنولوجيا هي الآن في مرحلة البحوث، ولكن هناك تطبيقات معينة في استخدام مجاري النفايات أصبحت في طور البيان العملي.

التفاعل الطبيعي بطيء جداً وينبغي تحسينه بالمعالجة المسبقة للمعادن، التي تتسم حالياً بشدة كثافة استخدامها للطاقة (الأقسام 7.2.1 و7.2.3 و7.2.4، والإطار 7.1).

10- الاستخدامات الصناعية[14] لثاني أكسيد الكربون المحتجز كغاز أو كسائل أو كمادة تلقيم في العمليات الكيميائية التي تسفر عن منتجات قيِّمة تحتوي على الكربون هي استخدامات ممكنة ولكن ليس من المتوقع أن تسهم في التخفيف إلى حد كبير من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

إمكانات الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون ضئيلة، في الوقت الذي يُبقى فيه عموماً على ثاني أكسيد الكربون لفترات قصيرة (هي أشهر أو سنوات عادة). والعمليات التي تستخدم ثاني أكسيد الكربون المحتجز كمادة تلقيم بدلاً من مركبات الهيدروكربون الأحفورية لا تحقق دائماً تخفيضات صافية في انبعاثات الدورة العمرية (القسمان 7.3.1 و7.3.4).

11- العناصر التي تتكون منها عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه هي الآن في مراحل شتى من التطور (انظر الجدول م – 2). ومن الممكن تجميع نظم كاملة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من تكنولوجيات موجودة بلغت مرحلة النضج أو صالحة اقتصادياً في

[13] تعني عبارة "طوْر البحوث" أن العلم الأساسي مفهوم ولكن التكنولوجيا مازالت حالياً في مرحلة التصميم المفاهيمي أو الاختبار على نطاق المعمل أو المنضدة و لم يجر بيان عملي لها في وحدة نموذجية.

[14] تشير عبارة "الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون" إلى الاستخدامات التي لا تشمل الاستخراج المحسن للنفط (EOR)، الذي ترد مناقشته في الفقرة 7.

ظل ظروف محددة، وإن كانت حالة تطوير النظام بوجه عام قد تكون أقل من الحالة التي بلغها تطوير بعض عناصره كل على حدة.

لا يوجد إلا قدر ضئيل نسبياً من الخبرة فيما يتعلق بالجمع ما بين احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه في نظام متكامل تماماً. ولم يبدأ بعد استخدام نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في المحطات الكبيرة لتوليد الطاقة (وهو التطبيق الذي يحتمل أن يكون مثار اهتمام كبير) (الأقسام 1.4.4 و3.8 و5.1).

ما هي العلاقة الجغرافية بين مصادر ثاني أكسيد الكربون وفرص تخزينه؟

12- تتركز مصادر نقاطية كبيرة لثاني أكسيد الكربون على مقربة من المناطق الصناعية والحضرية الرئيسية. وتبعد مصادر كثيرة من هذا القبيل مسافة في حدود 300 كيلومتر عن المناطق التي يحتمل أن توجد فيها تكوينات مناسبة للتخزين الجيولوجي (انظر الشكل م – 6). وتشير البحوث الأولية إلى أن نسبة صغيرة من المصادر النقاطية الكبيرة الموجودة على نطاق العالم قريبة من أماكن تخزين ممكنة في المحيطات.

المؤلفات المتوافرة حالياً بشأن عمليات التوفيق بين المصادر النقاطية الكبيرة لثاني أكسيد الكربون وتكوينات التخزين الجيولوجي المناسبة هي مؤلفات محدودة. وقد يكون من الضروري إجراء تقييمات إقليمية مفصلة لتحسين المعلومات في هذا الصدد (انظر الشكل م – 6b).

وتشير دراسات السيناريوهات إلى أن عدد المصادر النقاطية الكبيرة من المتوقع أن يزيد في المستقبل وأن نسبة تتراوح من 20 إلى 40% تقريباً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية الناجمة عن الوقود الأحفوري يمكن، بحلول عام 2050 وفي ظل المعوقات التقنية المتوقعة، أن تكون مناسبة تقنياً للاحتجاز، وهي تشمل نسبة تتراوح من 30 إلى 60% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من توليد الكهرباء ونسبة تتراوح من 30 إلى 40% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الصناعة. ومن الممكن أيضاً أن تكون الانبعاثات من المرافق الكبيرة لتحويل الكتلة الحيوية مناسبة فنياً للاحتجاز. ولم يُدرس قرب المصادر النقاطية في المستقبل من مواقع التخزين الممكنة (القسمان 2.3 و2.4).

13- يتيح احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه التحكم في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من إنتاج الكهرباء أو الهيدروجين باستخدام الوقود الأحفوري، وهو ما يمكن أن يقلل على المدى الأطول جزءاً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتناثرة الناجمة عن نظم النقل والإمداد بالطاقة الموزعة.

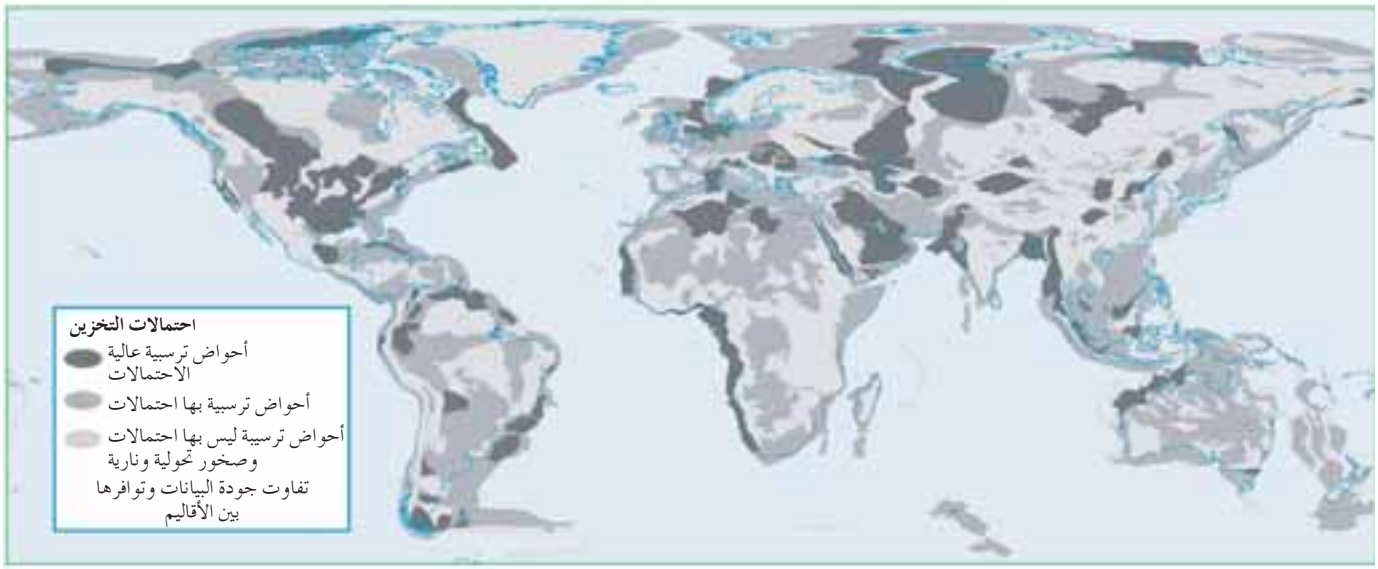
من الممكن استخدام الكهرباء في المركبات، ومن الممكن استخدام الهيدروجين في خلايا الوقود، بما في ذلك في قطاع النقل. وتحويل الغاز والفحم مع الفصل المتكامل لثاني أكسيد الكربون (بدون تخزين) هو الخيار المهيمن حالياً لإنتاج الهيدروجين. أما إنتاج الهيدروجين أو الكهرباء باستخدام مزيد من الوقود الأحفوري أو الكتلة الحيوية فهو سيسفر عن زيادة عدد المصادر الكبيرة لثاني أكسيد الكربون المناسبة تقنياً للاحتجاز والتخزين. ومن الصعب في الوقت الحاضر وضع إسقاطات لعدد هذه المصادر وأماكنها وأحجامها المحتملة (القسم 2.5.1).

الجدول م – 2 – الحالة الراهنة للتطور التكنولوجي لعناصر نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وتشير علامة X إلى أعلى مستوى للنضج لكل عنصر.

عنصر احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	تكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	طور البحوث (13)	طور البيان العملي (7)	صالح اقتصادياً في ظل ظروف محددة (5)	سوق ناضجة (6)
الاحتجاز	ما بعد الاحتراق			X	
	ما قبل الاحتراق			X	
	احتراق الوقود الأوكسجيني		X		
	الفصل الصناعي (معالجة الغاز الطبيعي، وإنتاج غاز النشادر)				X
النقل	خطوط الأنابيب				X
	النقل البحري			X	
التخزين الجيولوجي	الاستخراج المحسن للنفط (EOR)				X (1)
	حقول الغاز أو النفط			X	
	التكوينات الملحية			X	
	الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم (ECBM)		X		
التخزين في المحيطات	الحقن المباشر (طريقة الانحلال)	X			
	الحقن المباشر (طريقة البحيرة)	X			
الكربنة المعدنية	معادن السيليكات الطبيعية	X			
	مواد النفايات		X		
الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون					X

(1) حقن ثاني أكسيد الكربون من أجل الاستخراج المحسن للنفط (EOR) هو تكنولوجيا سوق ناضجة، ولكن عند استخدام هذه التكنولوجيا في تخزين ثاني أكسيد الكربون فإنها تصبح "صالحة اقتصادياً في ظل ظروف محددة".

الشكل م – 6a – التوزيع العالمي للمصادر الثابتة الكبيرة لثاني أكسيد الكربون (الشكل 2.3) (استناداً إلى تجميع للمعلومات المتوافرة للجمهور العام عن مصادر الانبعاث العالمية؛ تقرير الوكالة الدولية للطاقة عن غازات الاحتباس الحراري 2002)



الشكل م – 6b – مناطق الأحواض الرسوبية التي يُحتمل أن توجد فيها تكوينات ملحية أو حقول نفط أو غاز أو طبقات حاملة للفحم مناسبة. وأماكن التخزين في الطبقات الحاملة للفحم مشمولة جزئياً فقط. والاحتمالية هي التقييم الكمي لاحتمال وجود مكان تخزين ملائم في منطقة بعينها استناداً إلى المعلومات المتوافرة. وينبغي اعتبار هذا الرقم مؤشراً يهتدى به فقط لأنه يستند إلى بيانات جزئية، قد تتباين جودتها من إقليم إلى آخر وقد تتغير بمرور الوقت ومتي استجدت معلومات جديدة (الشكل 2.4) (إهداء من هيئة علوم الأرض في أستراليا).

ما هي تكاليف[15] احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وما هي إمكاناته التقنية والاقتصادية؟

14- يقدر أن تطبيق نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في مجال إنتاج الكهرباء، في ظل ظروف عام 2002، سيؤدي إلى زيادة تكاليف توليد الكهرباء بما يتراوح من 0.01 من المائة إلى 0.05 دولار أمريكي تقريباً لكل كيلوواط ساعة[16]، تبعاً للوقود المستخدم، والتكنولوجيا المحددة، والموقع، والظروف الوطنية. وإدراج منافع الاستخراج المحسن للنفط من شأنه أن يقلل من التكاليف الإضافية لإنتاج الكهرباء الناجمة عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بما يتراوح من 0.01 إلى 0.02 دولار أمريكي للكيلوواط/ساعة تقريباً[17] (انظر

[15] لا تشير كلمة "التكاليف"، كما هي مستخدمة في هذا التقرير، سوى إلى أسعار السوق ولكنها لا تشمل التكاليف الخارجية من قبيل الأضرار البيئية والتكاليف المجتمعية الأوسع نطاقاً التي قد ترتبط باستخدام نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. و لم يُبذل حتى الآن إلا قدر ضئيل من الجهد لتقييم هذه التكاليف الخارجية وتحديدها كمياً.

[16] جميع التكاليف المذكورة في هذا التقرير معبر عنها بسعر الدولار الأمريكي في عام 2002.

[17] استناداً إلى أسعار النفط التي تتراوح من 15إلى 20 دولاراً أمريكياً لكل برميل، على النحو المستخدم في المؤلفات المتوافرة.

الجدول م – 3 للاطلاع على تكاليف إنتاج الكهرباء بقيمتها المطلقة وانظر الجدول م – 4 للاطلاع على التكاليف بالدولار الأمريكي في حالة تجنب كل طن من ثاني أكسيد الكربون). والزيادات في أسعار السوق لأنواع الوقود المستخدمة في توليد الطاقة تنحو عموماً إلى زيادة تكلفة احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. والأثر الكمي لسعر النفط على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه غير مؤكد. إلا أن الإيرادات من الاستخراج المحسن للنفط ستكون أعلى عموماً مع ارتفاع أسعار النفط. ومع أن تطبيق نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في مجال إنتاج الطاقة القائم على الكتلة الحيوية على النطاق الصغير الحالي من شأنه أن يؤدي إلى زيادة كبيرة في تكاليف الكهرباء، فإن الإشعال المختلط للكتلة الحيوية في محطة أكبر لتوليد الطاقة تعمل بإشعال الفحم مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه سيكون أجدى من حيث التكلفة.

تتباين التكاليف تبايناً كبيراً في القيمة المطلقة والنسبية من بلد إلى آخر. وبالنظر إلى عدم إقامة نظام لدورة الغاز الطبيعي المختلطة، أو نظام للفحم المسحوق، أو نظام للدورة المختلطة للتغويز المتكامل، على نطاق كامل مع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، لا يمكن ذكر تكاليف هذه النظم بدرجة كبيرة من الثقة في الوقت الحاضر. فتكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يمكن أن تنخفض في المستقبل بواسطة البحوث والتطوير التكنولوجي ووفورات الحجم. ومن الممكن أيضاً أن تؤدي وفورات الحجم إلى خفض كبير بمرور الوقت في تكلفة نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه القائمة على الكتلة الحيوية. وتطبيق نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في المنشآت التي تستخدم فيها الكتلة الحيوية كوقود أو في منشآت التحويل بالإشعال المختلط من شأنه أن يؤدي إلى انبعاثات أقل أو سالبة[18] من ثاني أكسيد الكربون، مما يمكن أن يقلل من تكاليف هذا الخيار، تبعاً للقيمة السوقية لتخفيضات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (الأقسام 2.5.3، و3.7.1، و3.7.13، و8.2.4).

15- من المتوقع أن يؤدي تعديل المحطات القائمة بتزويدها بنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون إلى تكاليف أعلى وإلى انخفاض كبير في الكفاءة بوجه عام بالمقارنة بمحطات الطاقة المقامة حديثاً المزودة بنظام الاحتجاز. وقد تنخفض المساوئ، من حيث التكاليف، التي ينطوي عليها التعديل في حالة بعض المحطات الجديدة نسبياً والمحطات القائمة ذات الكفاءة العالية أو في حالة تحسين مستوى محطة تحسيناً كبيراً أو إعادة بنائها.

تتباين تكاليف تزويد المنشآت القائمة بنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. فمن الأسهل تزويد المصادر الصناعية لثاني أكسيد الكربون بنظام فصله، بينما تحتاج نظم المحطات المتكاملة للطاقة تعديلاً أعمق. وعملاً على خفض تكاليف التعديل في المستقبل من الممكن أن يُراعى في تصميمات المحطات الجديدة تطبيق نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مستقبلاً (القسمان 3.1.4، و3.7.5).

16- في معظم نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه نجد أن تكلفة الاحتجاز (ومن بينها الضغط) هي أكبر عنصر من عناصر التكلفة.

تتباين تكاليف مختلف عناصر نظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه تبايناً واسعاً، تبعاً للمحطة المقارنة والتفاوت الواسع في حالات مصدر ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه (انظر الجدول م – 5). ومن الممكن تخفيض تكلفة الاحتجاز، خلال العقد المقبل، بنسبة تتراوح من 20 إلى 30% وينبغي أن يكون بالامكان تحقيق المزيد بواسطة التكنولوجيات الجديدة التي مازالت في طور البحث أو البيان العملي. ومن الممكن أن تنخفض ببطء تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مع زيادة نضج التكنولوجيا وزيادة النطاق (الأقسام 1.5.3، و3.7.13، و8.2).

17- تشير نماذج الطاقة والنماذج الاقتصادية إلى أن المساهمة الرئيسية لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في التخفيف من حدة تغير المناخ ستتأتى من استخدام النظام في قطاع الكهرباء. وتشير معظم النماذج بالصيغة التي جرى تقييمها في هذا التقرير إلى أن نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يبدأ استخدامها على مستوى كبير عندما تبدأ أسعار ثاني أكسيد الكربون في بلوغ ما يقرب من 30–25 دولاراً أمريكياً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون.

من الممكن أن تؤدي احتمالات الاحتجاز المنخفض التكلفة (في معالجة الغاز وفي صنع الهيدروجين وغاز النشادر، حيث يجري بالفعل فصل ثاني أكسيد الكربون) بالاقتران مع قِصَرْ مسافات النقل (<50 كلم) وخيارات تخزين تدر إيرادات (من قبيل الاستخراج المحسن للنفط) إلى التخزين المحدود لثاني أكسيد الكربون (ما يصل إلى 360 طناً متريا من ثاني أكسيد

الجدول م – 3 – تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه: تكاليف إنتاج الكهرباء في حالة أنواع مختلفة من التوليد، بدون الاحتجاز وباستخدام نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ككل. وتكلفة نظام كامل لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من أجل توليد الكهرباء من محطة كبيرة مقامة حديثاً وتستخدم الوقود الأحفوري تتوقف على عدد من العوامل، من بينها خصائص المحطة ونظام الاحتجاز، والسمات المحددة لموقع التخزين، وكمية ثاني أكسيد الكربون، ومسافة النقل اللازمة. وتفترض الأرقام تجربة محطة كبيرة. ويُفترض أن أسعار الغاز تبلغ ما يتراوح من 2.8 إلى 4.4 دولار أمريكي لكل غيغاجول، وأن أسعار الفحم تبلغ ما يتراوح من دولار أمريكي واحد إلى 1.5 دولار لكل غيغاجول (استناداً إلى الجدولين 8.3 و8.4).

نظام محطة الطاقة	دورة الغاز الطبيعي المختلطة (بالدولار الأمريكي لكل كيلوواط/ساعة)	الفحم المسحوق (بالدولار الأمريكي لكل كيلوواط/ساعة)	دورة التغويز المختلطة المتكاملة (بالدولار الأمريكي لكل كيلوواط/ساعة)
بدون احتجاز (المحطة المقارنة)	0.05–0.03	0.05–0.04	0.06–0.04
مع الاحتجاز والتخزين الجيولوجي	0.08–0.04	0.10–0.06	0.09–0.05
مع الاحتجاز والاستخراج المحسن للنفط [17]	0.07–0.04	0.08–0.05	0.07–0.04

[18] إذا جُمعت، مثلاً، الكتلة الحيوية بمعدل غير قابل للاستدامة (أي بسرعة أكبر من سرعة تجدد نموها سنوياً) قد لا يكون صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناجمة عن النشاط سالباً.

الجدول م – 4 – تكاليف تجنب ثاني أكسيد الكربون في حالة وجود نظام احتجازه وتخزينه الكامل من أجل توليد الكهرباء، وفي حالة توليفات مختلفة من المحطات المقارنة التي لا تحتجز ثاني أكسيد الكربون وتخزنه والمحطات التي تحتجز ثاني أكسيد الكربون وتخزنه (جيولوجياً وللاستخراج المحسن للنفط)[19]. وكمية ثاني أكسيد الكربون المتجنبة هي الفارق بين الانبعاثات من المحطة المقارنة والانبعاثات من المحطة التي يطبق فيها نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ويُفترض أن أسعار الغاز تبلغ ما يتراوح من 2.8 إلى 4.4 دولار أمريكي لكل غيغاجول، وأن أسعار الفحم تبلغ ما يتراوح من دولار واحد إلى 1.5 دولار أمريكي لكل غيغاجول. (الجدول 8.4). طن من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب بواسطة الاستخراج المحسن للنفط.

نوع محطة الطاقة التي تستخدم نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	المحطة المقارنة التي تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة بالدولار الأمريكي لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب	المحطة المقارنة التي تستخدم الفحم المسحوق بالدولار الأمريكي لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب
محطة لديها نظام للاحتجاز وللتخزين الجيولوجي		
دورة الفحم الطبيعي المختلطة	90–40	60–20
الفحم المسحوق	270–70	70–30
الدورة المختلطة للتغويز المتكامل	220–40	70–20
محطة لديها نظام للاحتجاز وللاستخراج المحسن للنفط[17]		
دورة الغاز الطبيعي المختلطة	70–20	30–0
الفحم المسحوق	240–50	40–10
الدورة المختلطة للتغويز المتكامل	190–20	40–0

الجدول م – 5 – نطاقات التكلفة في عام 2002 فيما يتعلق بعناصر نظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه عند تطبيقه على نوع بعينه من محطات الطاقة أو من المصادر الصناعية. وليس من السهل تلخيص تكاليف كل عنصر من العناصر على حدة لحساب تكاليف النظام الكامل لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالدولارات الأمريكية مقابل كمية ثاني أكسيد الكربون المتجنبة. وجميع الأرقام تمثل تكاليف منشآت جديدة كبيرة النطاق، مع افتراض أن أسعار الغاز الطبيعي تتراوح من 2.8 إلى 4.4 دولار أمريكي لكل غيغاجول، وأن أسعار الفحم تتراوح من دولار واحد إلى 1.5 دولار أمريكي لكل غيغاجول (الأقسام 5.9.5، و8.2.1، و8.2.2، و8.2.3، والجدولان 8.1 و8.2).

عناصر نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	نطاق التكاليف	الملاحظات
احتجاز من محطة طاقة تعمل بإشعال الفحم أو الغاز	75–15 دولاراً أمريكياً لكل طن صافٍ من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب	صافي تكاليف ثاني أكسيد الكربون المحتجز، بالمقارنة بنفس المحطة بدون احتجاز
احتجاز من إنتاج الهيدروجين وغاز النشادر أو معالجة الغاز	5 دولارات إلى 55 دولاراً أمريكياً لكل طن صافٍ من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب	ينطبق هذا على المصادر ذات درجة النقاء العالية التي تتطلب تجفيفاً وضغطاً بسيطين
احتجاز من مصادر صناعية أخرى	115–25 دولاراً أمريكياً لكل طن صافٍ من ثاني أكسيد الكربون	هذا النطاق يصور استخدام عدد من التكنولوجيات وأنواع الوقود المختلفة
النقل	8–1 دولارات أمريكية لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُنقل	لكل 250 كلم من خط أنابيب أو نقل بحري لمعدلات دفق كتلي تتراوح من 5 أطنان مترية (على أعلى مستوى) إلى 40 طناً متريا (على أعلى مستوى) من ثاني أكسيد الكربون سنوياً
التخزين الجيولوجي[أ]	0.5 دولار إلى 8 دولارات أمريكية لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُحقن	مع استبعاد الإيرادات المحتملة من الاستخراج المحسن للنفط أو الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
التخزين الجيولوجي: المراقبة والتحقق	0.3–0.1 دولار أمريكي لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُحقن	يشمل هذا المراقبة قبل الحقن والمراقبة أثناء الحقن وبعدها، ويتوقف على المتطلبات التنظيمية
التخزين في المحيطات	5 دولارات إلى 30 دولاراً أمريكياً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُحقن	بما في ذلك النقل البحري الذي يتراوح من 100 إلى 500 كلم، مع استبعاد المراقبة والتحقق
الكربنة المعدنية	50 دولاراً إلى 100 دولار أمريكي لكل طن صافٍ من ثاني أكسيد الكربون يُعدن	نطاق أفضل حالة مدروسة. ويشمل استخدام الطاقة الإضافي لأغراض الكربنة

[أ] قد تكون هناك تكاليف إضافية على المدى الطويل من أجل الإصلاح والتبعات القانونية.

[19] لم تدرج الدورة المتكاملة للتغويز المجمع بوصفها محطة قوى مرجعية تبنى هذه الأيام لأن هذه التكنولوجيا لم تستخدم بعد على نطاق واسع في قطاع الكهرباء، وهي في العادة أكثر تكلفة من محطات الفحم المحروق. وتجنبت التكلفة الزائدة في الدولارات لكل طن من ثاني أكسيد الكربون لأي محطة للدورة المتكاملة للتغويز المجمع عندما يطبق الاحتجاز (CCS) لتتراوح بين 15 و55 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون، تتجنب بالتخزين الجيولوجي، وبين 5– إلى 30 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون تتجنب مع الاستخراج والاحتجاز المحسن للنفط.

الكربون سنوياً) في حالة وجود حوافز متدنية أو في حالة عدم وجود حوافز (الأقسام 2.2.1.3، و2.3، و2.4، و8.3.2.1).

18- تشير القرائن المتوافرة إلى أن من المرجح[20]، على نطاق العالم، وجود إمكانات تقنية[21] لقدرة تخزين ثاني أكسيد الكربون في التكوينات الجيولوجية[22] تبلغ حوالي 2000 غيغاطن (545 غيغاطناً من الكربون).

من الممكن أن تكون هناك قدرة أكبر كثيراً على التخزين الجيولوجي في التكوينات الملحية، ولكن تقديرات الحد الأقصى غير مؤكدة نتيجة لعدم وجود معلومات وعدم وجود منهجية متفق عليها. أما قدرة خزانات النفط والغاز فهي معروفة بدرجة أفضل. وقدرة التخزين التقنية في الطبقات الحاملة للفحم أصغر كثيراً ومعروفة بدرجة أقل.

وتشير تقديرات النماذج للقدرة على تخزين ثاني أكسيد الكربون في المحيطات إلى أن هذه القدرة يمكن أن تكون في حدود الآلاف من غيغا أطنان ثاني أكسيد الكربون، تبعاً لمستوى التثبيت المفترض في الغلاف الجوي[23] وتبعاً للمعوقات البيئية من قبيل حدوث تغير في الرقم الهيدروجيني pH في المحيطات. ولا يتسنى حالياً تحديد مدى إمكانية استخدام الكربنة المعدنية، بالنظر إلى أنها تتوقف على الكمية غير المعروفة من احتياطيات السيليكات التي يمكن استغلالها تقنياً وعلى قضايا بيئية من قبيل حجم التصرف في النواتج (الأقسام 5.3، و6.3.1، و7.2.3، والجدول 5.2).

19- في معظم سيناريوهات تثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي التي تتراوح من 450 إلى 750 جزءاً في المليون حسب الحجم من ثاني أكسيد الكربون، وفي مجموعة من خيارات التخفيف الأقل تكلفة، ستبلغ القدرة الاقتصادية[24] على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ما يتراوح من 220 إلى 2.200 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون (600–60 غيغاطن من الكربون) تراكمياً، مما يعني أن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يسهم بنسبة تتراوح من 15 إلى 55% في جُهد التخفيف التراكمي على نطاق العالم حتى سنة 2100، كمتوسط عبر نطاق من سيناريوهات خط الأساس. ومن المرجح[20] أن القدرة التقنية[21] على التخزين الجيولوجي تكفي لتغطية أعلى مستوى لنطاق القدرة الاقتصادية، ولكن قد لا يكون ذلك صحيحاً في حالة أقاليم محددة.

أوجه عدم اليقين في تقديرات القدرة الاقتصادية هذه كبيرة. ولكي يحقق احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه قدرة اقتصادية من هذا القبيل، ستلزم إقامة عدة مئات أو آلاف من نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون خلال القرن المقبل، بحيث يحتجز كل منها ما يتراوح من طن متري واحد إلى 5 أطنان مترية من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. ومن المرجح أن يكون التنفيذ الفعلي لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، كما هو الحال فيما يتعلق بخيارات التخفيف الأخرى، أقل من القدرة الاقتصادية وذلك نتيجة لعوامل من قبيل التأثيرات البيئية، ومخاطر التسرب، وعدم وجود إطار قانوني واضح أو قبول عام (الأقسام 1.4.4، و5.3.7، و8.3.1، و8.3.3، و8.3.3.4).

20- في معظم دراسات السيناريوهات، يزيد على امتداد القرن دور احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في مجموعات تدابير التخفيف، ويتبين أن إدراجه في مجموعة من تدابير التخفيف يقلل تكاليف تثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تبلغ 30% أو أكثر.

من جوانب قدرة نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على المنافسة من حيث التكاليف أن تكنولوجيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه تتواءم مع معظم البنى التحتية الحالية للطاقة.

والمساهمة العالمية الممكنة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كجزء من مجموعة تدابير للتخفيف تصورها الأمثلة المبينة في الشكل م – 7. والمدى الحالي للتحليلات في هذا الميدان محدود، وقد يكون من الضروري إجراء مزيد من التقييمات لتحسين المعلومات (الأقسام 1.5، و8.3.3، و8.3.3.4، والإطار 8.3).

ما هي المخاطر المحلية من حيث الصحة والسلامة والبيئة التي ينطوي عليها احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟

21- إن المخاطر[25] المحلية المرتبطة بنقل ثاني أكسيد الكربون بواسطة خط أنابيب قد تكون مماثلة لمخاطر خطوط الأنابيب الهيدروكربونية التي تعمل فعلاً أو أقل منها.

في حالة خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون القائمة، ومعظمها في مناطق ذات كثافة سكانية منخفضة، نجد أن أعداد الحوادث المبلغ عنها لكل كيلومتر من خط الأنابيب منخفضة للغاية وتماثل عدد الحوادث المتعلقة بخطوط الأنابيب الهيدروكربونية. وحدوث إطلاق مفاجئ وكبير لثاني أكسيد الكربون من شأنه أن يشكل أخطاراً فورية على حياة الإنسان وصحته، في حالة التعرض لتركيزات من ثاني أكسيد الكربون أكبر من 7–10% بحسب الحجم في الهواء. ويتطلب نقل ثاني أكسيد الكربون بواسطة خطوط الأنابيب عبر مناطق مأهولة بالسكان اهتماماً باختيار الطرق، والحماية من الضغط المفرط، واكتشاف التسرب، وعوامل أخرى تتعلق بالتصميم. وليس من المتوقع نشوء عوائق رئيسية فيما يتعلق بتصميم خطوط أنابيب لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (القسم 4.4.2، والمرفق الأول – 2.3.1).

22- مع اختيار موقع ملائم استناداً آلي المعلومات تحت السطحية المتوافرة، وبرنامج مراقبة لاكتشاف المشاكل، ومنهج تنظيمي، والاستخدام الملائم لطرق الاصلاح لوقف أو مكافحة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في حالة نشوئها، ستكون المخاطر المحلية، من حيث الصحة والسلامة والبيئة، التي ينطوي عليها التخزين الجيولوجي مماثلة لمخاطر الأنشطة الحالية من قبيل تخزين الغاز الطبيعي، والاستخراج المحسن للنفط، والتخلص من الغاز الحمضي في الأعماق تحت الأرض.

---

(20) تعني عبارة "من المرجح" وجود احتمال تتراوح نسبته من 66 إلى 90%.

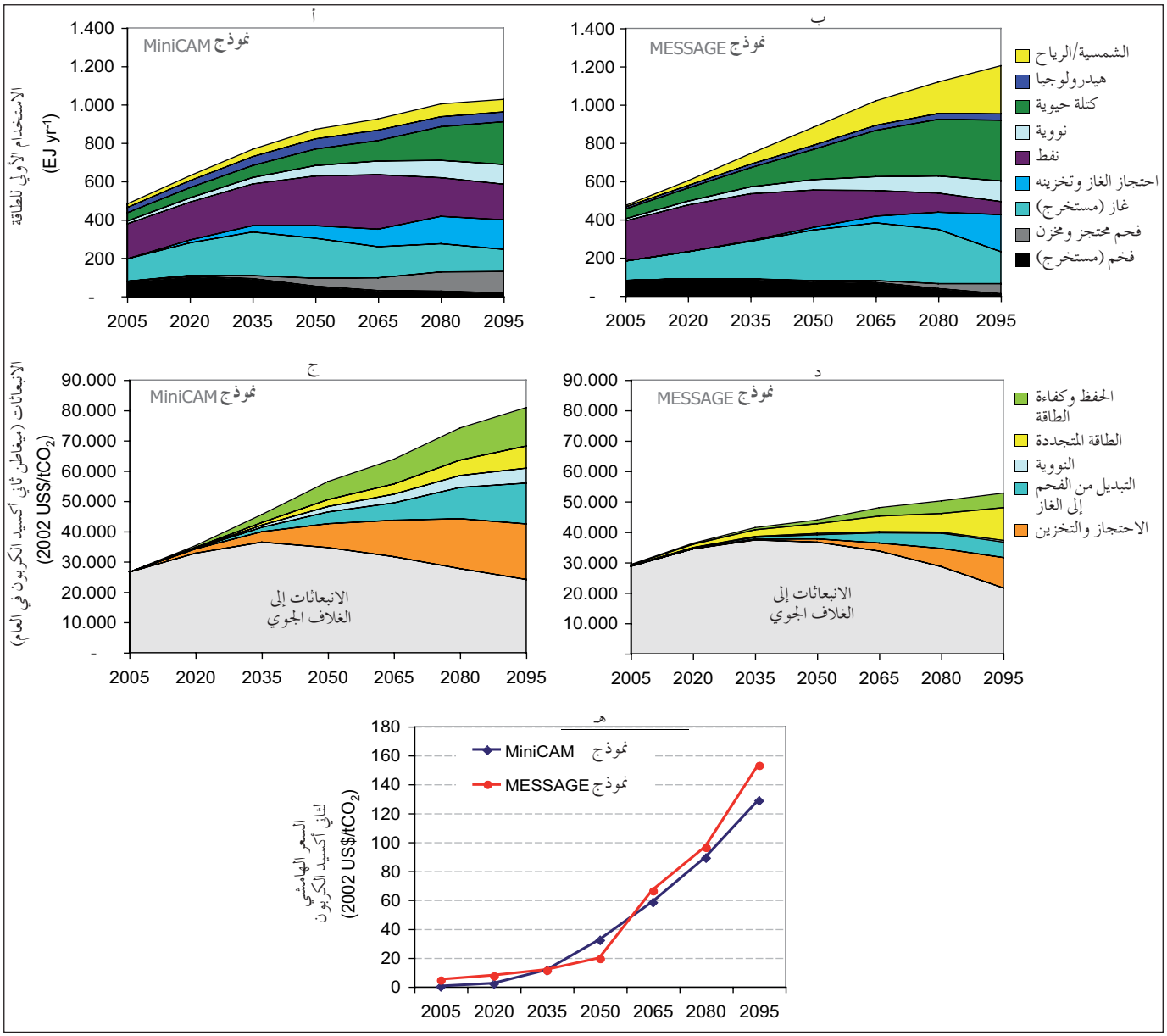
(21) "القدرة التقنية" كما هي معرّفة في تقرير التقييم الثالث هي مدى إمكانية خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بتطبيق تكنولوجيا أو ممارسة جرى بيانها عملياً بالفعل.

(22) تستند هذه العبارة إلى تقدير كتّاب المؤلفات المتوافرة باعتبارهم خبراء. وهي تعبر عن عدم اليقين بشأن تقديرات قدرة التخزين (القسم 5.3.7).

(23) يأخذ هذا النهج في الحسبان أن ثاني أكسيد الكربون المحقون في المحيطات سيبلغ بعد انقضاء بعض الوقت مرحلة التوازن مع الغلاف الجوي.

(24) القدرة الاقتصادية هي مدى تخفيضات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من خيار محدد التي يمكن أن تتحقق بطريقة مجدية من حيث التكلفة، في ضوء الظروف السائدة (أي القيمة السوقية لتخفيض ثاني أكسيد الكربون وتكاليف الخيارات الأخرى).

(25) نفترض لدى بحث المخاطر أن المخاطر هي نتاج احتمال وقوع حدث وعواقب الحدث في حالة وقوعه.



الشكل م – 7 – هذه الأرقام هي مثال يصور المساهمة العالمية المحتملة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في جزء من مجموعة تدابير للتخفيف. وهي تستند إلى نموذجين بديلين متكاملين للتقييم (MESSAGE وMiniCAM) بينما تعتمد نفس الافتراضات فيما يتعلق بالقوة المحركة الرئيسية للانبعاثات. وستتباين النتائج تبايناً كبيراً على النطاقات الإقليمية. ويستند هذا المثال إلى سيناريو واحد ولذا فهو لا يشمل النطاق الكامل لأوجه عدم اليقين. وتبين اللوحتان (أ) و(ب) استخدام الطاقة الأولي، بما في ذلك استخدام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. أما اللوحتان (ج) و(د) فهما تبينان باللون الرمادي الانبعاثات العالمية من ثاني أكسيد الكربون وتبينان بالألوان المساهمات المقابلة للتدابير الرئيسية للحد من الانبعاثات. وتبين اللوحة (هـ) السعر الحدي المحسوب لتخفيضات ثاني أكسيد الكربون (القسم 8.3.3، الاطار 8.3).

تسهم خزانات ثاني أكسيد الكربون الطبيعية في فهم سلوك ثاني أكسيد الكربون تحت الأرض. وسمات مواقع التخزين التي تنطوي على احتمال منخفض لحدوث تسرب تشمل وجود صخور السقف غير القابلة للنفاذ إلى حد كبير، والاستقرار الجيولوجي، وعدم وجود مسارات للتسرب، ووجود آليات فعالة للحبس. ويوجد نوعان مختلفان من سيناريوهات التسرب هما: (1) التسرب الفجائي، عن طريق فشل بئر الحقن أو التسرب من بئر مهجورة، و(2) التسرب التدريجي، عن طريق الأخطاء أو الشروخ أو الآبار غير المكتشفة. وتأثيرات ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الطبقة تحت السطحية الضحلة يمكن أن تشمل تأثيرات مهلكة بالنسبة للنباتات وللحيوانات التي تعيش تحت التربة، فضلاً عن تلوث المياه الجوفية. وقد يؤدي حدوث عمليات دفق مرتفعة اقتراناً مع استقرار أحوال الغلاف الجوي إلى تركيزات محلية مرتفعة من ثاني أكسيد الكربون في الهواء يمكن أن تلحق ضرراً بالحيوانات أو بالبشر. وقد يؤدي تصاعد الضغط الناجم عن حقن ثاني أكسيد الكربون إلى ظواهر اهتزازية صغيرة.

وعلى الرغم من أن تجربة التخزين الجيولوجي تجربة محدودة، يمكن أن تُستخدم التجربة الصناعية والمعارف العلمية الوثيقة الصلة كأساس لإدارة المخاطر إدارة ملائمة، بما في ذلك الاصلاح. ولكن لايزال من اللازم التدليل على فعالية الطرائق المتوافرة لإدارة المخاطر لكي تُستخدم في حالة

تخزين ثاني أكسيد الكربون. وإذا حدث تسرب في موقع للتخزين، يمكن أن ينطوي الاصلاح اللازم لوقف التسرب على تقنيات إصلاح معيارية للآبار أو اعتراض سبيل ثاني أكسيد الكربون واستخلاصه قبل أن يتسرب إلى مستودع مياه جوفية ضحل. وبالنظر إلى الأطر الزمنية الطويلة المرتبطة بالتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون، قد تلزم مراقبة للموقع لفترات طويلة للغاية (القسمان 5.6، و5.7، والجدولان 5.4، و5.7، والشكل 5.25).

23- إضافة ثاني أكسيد الكربون إلى المحيطات أو تكوين تجمعات من ثاني أكسيد الكربون السائل على قاع المحيطات بنطاقات صناعية سيؤدي إلى تغيير البيئة الكيميائية المحلية. وقد أظهرت التجارب أن استمرار وجود تركيزات عالية من ثاني أكسيد الكربون من شأنه أن يؤدي إلى نفوق الكائنات الحية الموجودة في المحيطات. وتأثيرات ثاني أكسيد الكربون على الكائنات الحية البحرية ستكون لها عواقب بالنسبة للنظم الايكولوجية. ولم تُدرس بعد التأثيرات المزمنة لحقن ثاني أكسيد الكربون حقناً مباشراً في المحيط على النظم الايكولوجية على امتداد مساحات كبيرة من المحيط ونطاقات زمنية طويلة.

لقد أسفرت عمليات المحاكاة بالنماذج، مع افتراض حدوث انبعاث من سبعة أماكن في محيط على عمق 3.000 متر، حيث يوفر التخزين في المحيط 10% من جهود التخفيف من أجل التثبيت على مستوى 550 جزءاً في المليون حسب الحجم من ثاني أكسيد الكربون، عن حدوث زيادات في الحموضة (نقصان الرقم الهيدروجيني pH 0.4>) على امتداد ما يقرب من 1% من حجم المحيط. ولأغراض المقارنة: في حالة التثبيت هذه بدون تخزين في المحيط، من الممكن توقع حدوث نقصان بنسبة 0.25> في الرقم الهيدروجيني pH بالقياس إلى المستويات قبل الصناعية في سطح المحيط بأكمله. وحدوث نقصان بنسبة تتراوح من 0.2 إلى 0.4 في الرقم الهيدروجيني pH أكبر كثيراً من التفاوتات قبل الصناعية في متوسط حموضة المحيط. وعلى هذه المستويات من التغير في درجة الرقم الهيدروجيني pH، وُجدت بعض التأثيرات في كائنات حية تعيش على مقربة من سطح المحيط، ولكن التأثيرات المزمنة لم تُدرس بعد. ومن اللازم فهم هذه التأثيرات فهماً أفضل لكي يتسنى إجراء تقييم شامل للمخاطر. ولا توجد آلية معروفة لانبعاث ثاني أكسيد الكربون المخزون انبعاثاً فجائياً أو كارثياً من المحيط إلى الغلاف الجوي. وترد مناقشة للانبعاث التدريجي في الفقرة 26 من هذا الملخص. وتحويل ثاني أكسيد الكربون الجزيئي إلى بيكربونات أو هدرات قبل أو أثناء انبعاث ثاني أكسيد الكربون من شأنه أن يؤدي إلى الحد من التأثيرات على الرقم الهيدروجيني pH وأن يحسن إبقاء ثاني أكسيد الكربون في المحيط، ولكن هذا أيضاً من شأنه أن يؤدي إلى زيادة التكاليف والآثار البيئية الأخرى (القسم 6.7).

24- الانعكاسات البيئية للكربنة المعدنية على نطاق كبير ستكون نتيجة للتعدين اللازم وللتصرف في المنتجات الناجمة التي لا يوجد لها استخدام عملي.

يتطلب التثبيت الصناعي لطن واحد من ثاني أكسيد الكربون ما يتراوح من 1.6 إلى 3.7 أطنان من صخور السيليكات. وتأثيرات الكربنة المعدنية مماثلة لتأثيرات المناجم السطحية الكبيرة. وهي تشمل تطهير الأرض، وانخفاض جودة الهواء الموضعي، وتأثر المياه والنباتات نتيجة للحفر، وتقليب التربة، وتسوية المعادن وغسلها من مخلفات التعدين، وهي أمور قد تؤدي جميعها بطريقة غير مباشرة إلى حدوث تدهور في الموئل. ومن اللازم التصرف في معظم منتجات الكربنة المعدنية، وهو ما يتطلب وجود مدافن ونقل إضافي (القسمان 7.2.4، و7.2.6).

هل يهدد التسرب المادي لثاني أكسيد الكربون المخزون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كخيار للتخفيف من آثار تغير المناخ؟

25- تشير رصدات من تناظرات مدبرة وطبيعية فضلاً عن النماذج إلى أن النسبة التي تستبقى في الخزانات الجيولوجية المختارة والمدارة بطريقة صحيحة من الأرجح[26] أن تتجاوز 99% على امتداد 100 سنة ومن المرجح[20] أن تتجاوز 99% على امتداد 1000 سنة.

في حالة مواقع التخزين الجيولوجي المختارة والمصممة والمدارة جيداً ستتوقف حركة الغالبية الساحقة من ثاني أكسيد الكربون وذلك بفعل آليات حبس شتى، وفي تلك الحالة يمكن الابقاء عليها ملايين السنين. ومن الممكن أن يصبح التخزين، بفضل هذه الآليات، مأموناً بدرجة أكبر على امتداد فترات زمنية أطول (الأقسام 1.6.3، و5.2.2، و5.7.3.4، والجدول 5.5).

26- سيكون انطلاق ثاني أكسيد الكربون من تخزينه في المحيط تدريجياً عبر مئات من السنين.

تشير بيانات كاشف المحيطات وتقديرات النماذج إلى أن النسبة التي يبقى عليها، في حالة التخزين في المحيطات، تبعاً لعمق الحقن والمكان، تتراوح من 65 إلى 100% بعد 100 سنة وتتراوح من 30 إلى 85% بعد 500 سنة (مع وجود نسبة مئوية أقل للحقن على عمق 1.000 متر، ونسبة مئوية أعلى على عمق 3.000 متر) (الأقسام 1.6.3، و6.3.3، و6.3.4، والجدول 6.2).

27- في حالة الكربنة المعدنية لن ينطلق ثاني أكسيد الكربون المخزون إلى الغلاف الجوي (القسمان 1.6.3، و7.2.7).

28- في حالة حدوث تسرب مستمر لثاني أكسيد الكربون فإنه يمكن، جزئياً على الأقل، أن يكون مقابلاً لمنافع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه للتخفيف من أثر تغير المناخ. وتقييمات انعكاسات التسرب بالنسبة للتخفيف من أثر تغير المناخ تتوقف على الإطار المختار لصنع القرار وعلى المعلومات المتوافرة عن النسب المبقى عليها للتخزين الجيولوجي أو في المحيطات على النحو المعروض في الفقرتين 25 و26.

تستند الدراسات التي أجريت لمعالجة مسألة كيفية التعامل مع التخزين غير الدائم إلى نُهُج مختلفة: قيمة تأخير الانبعاثات، والاقلال إلى أدنى حد من تكلفة سيناريو محدد للتخفيف، أو الانبعاثات التي يمكن السماح بها في المستقبل في سياق تثبيت مفترض لتركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي. وتسمح بعض هذه الدراسات بالتعويض عن التسرب الذي يحدث في المستقبل بواسطة تخفيضات إضافية في الانبعاثات؛ وتتوقف النتائج على الافتراضات المتعلقة بتكلفة التخفيضات في المستقبل، ومعدلات الخفض، وكمية ثاني أكسيد الكربون المخزونة،

(26) تشير عبارة "من الأرجح" إلى وجود احتمال تتراوح نسبته من 90 إلى 99%.

والمستوى المفترض لتثبيت التركيزات في الغلاف الجوي. وفي دراسات أخرى لا يُعتبر التعويض خياراً وذلك بسبب أوجه عدم اليقين السياسية والمؤسسية، ويركز التحليل على المعوقات الناجمة عن مستوى التثبيت المفترض والكمية المخزونة. وبينما تتباين نتائج محددة لمجموعة الدراسات حسب الطرق والافتراضات المستخدمة فيها، فإن جميع الدراسات تشير ضمناً إلى ضرورة أن يكون هناك حد أقصى لمقدار التسرب الذي يمكن أن يحدث وذلك إذا كان المراد أن يكون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مقبولاً كإجراء من إجراءات التخفيف (القسمان 1.6.4، و8.4).

ما هي القضايا القانونية والتنظيمية المتعلقة بتنفيذ عملية تخزين ثاني أكسيد الكربون؟

29- توجد بالفعل بعض اللوائح التنظيمية للعمليات التي تجري في الطبقة تحت السطحية قد تكون وثيقة الصلة بالتخزين الجيولوجي، أو قد تكون في بعض الحالات قابلة للتطبيق مباشرة على التخزين الجيولوجي، ولكن قلة من البلدان هي التي وضعت خصيصاً أطراً قانونية أو تنظيمية لتخزين ثاني أكسيد الكربون على المدى الطويل.

القوانين واللوائح التنظيمية الموجودة حاليا بشأن جملة أمور من بينها التعدين وعمليات النفط والغاز ومكافحة التلوث والتصرف في النفايات ومياه الشرب ومعالجة غازات الضغط العالي وحقوق الملكية فيما يتعلق بالطبقة تحت السطحية قد تكون وثيقة الصلة بالتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون. وقضايا المسؤولية القانونية على المدى الطويل المرتبطة بتسرب ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي والآثار البيئية المحلية لا تُحسم عموماً. وتتولى بعض الدول مسؤولية طويلة الأجل في حالات مماثلة لتخزين ثاني أكسيد الكربون، من قبيل عمليات التعدين تحت سطح الأرض (الأقسام 5.8.2، و5.8.3، و5.8.4).

30- لم يُتفق حتى الآن على أي تفسيرات رسمية بخصوص ما إذا كان حقن ثاني أكسيد الكربون في باطن أرض قاع البحار الجيولوجي أو في المحيط يتفق مع أحكام معينة في القانون الدولي، أو بشأن الظروف التي يكون فيها هذا الحقن متوافقاً مع تلك الأحكام.

توجد حالياً عدة معاهدات (أبرزها اتفاقية لندن[27] واتفاقية[28] "OSPAR") يمكن أن تنطبق على حقن ثاني أكسيد الكربون في باطن أرض قاع البحار الجيولوجي أو في المحيط. وقد صيغت هذه المعاهدات جميعها بدون إيلاء اعتبار محدد لتخزين ثاني أكسيد الكربون (القسمان 5.8.1، و6.8.1).

ما هي انعكاسات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالنسبة لقوائم حصر الانبعاثات واحتسابها؟

31- لا تشمل المبادئ التوجيهية[29] الحالية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ طرائق قاصرة تحديداً على تقدير مدى الانبعاثات المرتبطة باحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

من الممكن تطبيق التوجيه العام المقدم من الهيئة على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وتفعل ذلك حالياً بضعة من البلدان، اقتراناً مع طرائقها الوطنية لتقدير مدى الانبعاثات. والمبادئ التوجيهية الصادرة عن الهيئة لا توفر في حد ذاتها طرائق محددة لتقدير مدى الانبعاثات المرتبطة باحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ومن المتوقع توفير هذه الطرائق في المبادئ التوجيهية للقوائم الوطنية لحصر غازات الاحتباس الحراري التي ستصدر عن الهيئة في عام 2006. وقد تلزم طرائق محددة للاحتجاز والتخزين الصافيين، وللتسرب المادي لثاني أكسيد الكربون، وللانبعاثات الهاربة والانبعاثات السالبة المرتبطة بتطبيقات نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه باستخدام الكتلة الحيوية (القسمان 9.2.1، و 9.2.2).

32- مشاريع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه الحالية القليلة تنطوي جميعها على تخزين جيولوجي، ولذا فإن الخبرة محدودة فيما يتعلق بمراقبة معدلات التسرب المادي الفعلية والتحقق منها والابلاغ عنها وما يرتبط بذلك من أوجه عدم يقين.

ثمة تقنيات عديدة متوافرة أو قيد التطوير لمراقبة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من عملية احتجازه وتخزينه وللتحقق منها، ولكنها تتباين من حيث قابليتها للتطبيق، والخصائص المحددة للموقع، وحدود الكشف، وأوجه عدم اليقين (الأقسام 9.2.1، و9.2.2).

33- من الممكن احتجاز ثاني أكسيد الكربون في بلد وتخزينه في بلد آخر مع وجود التزامات مختلفة. والقضايا المرتبطة بالاحتساب فيما يتعلق بالتخزين العابر للحدود ليست قاصرة على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

قد يلزم تعديل القواعد والطرائق وفقاً لذلك. وفي هذه الحالة سيتعين تبرير التسرب المادي الذي يُحتمل حدوثه من موقع تخزيني في المستقبل (القسم 9.3).

ما هي الثغرات في المعرفة؟

34- توجد ثغرات في المعرفة المتوافرة حالياً بشأن بعض جوانب احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وزيادة المعرفة والخبرة من شأنها أن تؤدي إلى الحد من أوجه عدم اليقين بحيث تيسر بذلك صنع القرارات فيما يتعلق باستخدام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه للتخفيف من حدة تغير المناخ (القسم م ف – 10).*

---

(27) اتفاقية منع التلوث البحري الناجم عن إغراق النفايات ومواد أخرى (1972)، وبروتوكول لندن الملحق بها (1996)، الذي لم يبدأ نفاذه بعد.

(28) اتفاقية حماية البيئة البحرية لشمال شرق المحيط الأطلسي، التي اعتُمدت في باريس (1992). وكلمة OSPAR هي اختصار لكلمتي أوسلو – باريس.

(29) المبادئ التوجيهية المنقحة للقوائم الوطنية لحصر غازات الاحتباس الحراري الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، والتقريران اللذان أصدرتهما الهيئة عن الإرشاد إلى الممارسات الجيدة وإدارة عدم اليقين في القوائم الوطنية لحصر غازات الاحتباس الحراري، والارشاد المتعلق بالممارسات الجيدة في مجال استخدام الأراضي وتغيير استخدام الأراضي والحراجة.

* م ف = الملخص الفني.

التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

الملخص الفني

المؤلفون الرئيسيون المنسقون

Edward Rubin (United States), Leo Meyer (Netherlands), Heleen de Coninck (Netherlands)

المؤلفون الرئيسيون

Juan Carlos Abanades (Spain), Makoto Akai (Japan), Sally Benson (United States), Ken Caldeira (United States), Peter Cook (Australia), Ogunlade Davidson (Sierra Leone), Richard Doctor (United States), James Dooley (United States), Paul Freund (United Kingdom), John Gale (United Kingdom), Wolfgang Heidung (Germany), Howard Herzog (United States), David Keith (Canada), Marco Mazzotti (Italy and Switzerland), Bert Metz (Netherlands), Balgis Osman-Elasha (Sudan), Andrew Palmer (United Kingdom), Riitta Pipatti (Finland), Koen Smekens (Belgium), Mohammad Soltanieh (Iran), Kelly (Kailai) Thambimuthu (Australia and Canada), Bob van der Zwaan (Netherlands)

المحرر المستعرض

اسماعيل الغزولي (السودان)

1- مقدمة هذا التقرير وإطاره

إن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، وهو موضوع هذا التقرير الخاص، يعد أحد الخيارات المتاحة للحد من الانبعاثات الجوية لثاني أكسيد الكربون الناجمة عن الأنشطة البشرية. والغرض من هذا التقرير الخاص هو تقدير حالة المعارف الراهنة فيما يخص الأبعاد التقنية والعلمية والبيئية والاقتصادية والمجتمعية لعملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ووضع هذه العملية في سياق الخيارات الأخرى المتاحة ضمن مجموعة التدابير الممكنة للتخفيف من حدة تغير المناخ.

ويُتَّبع في هذا الملخص الفني نسَقْ التقرير الخاص. وهذه المقدمة تعرض الإطار العام للتقرير مع تقديم عرض عام موجز لنظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ثم يعرض القسم 2 المصادر الرئيسية لثاني أكسيد الكربون، وهي خطوة لازمة لتقدير إمكانية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على الصعيد العالمي. ويناقش القسم 3 الخيارات التكنولوجية المتاحة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون، في حين يركز القسم 4 على طرق نقل ثاني أكسيد الكربون. وتجري بعد ذلك معالجة كل خيار من الخيارات المتاحة لتخزين ثاني أكسيد الكربون. فالقسم 5 يركز على التخزين الجيولوجي، ويركز القسم 6 على التخزين والمحيطات، ويركز القسم 7 على الكربنة المعدنية والاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون. ويتناول القسم 8 التكلفة الشاملة والإمكانيات الاقتصادية لعملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، وبعد ذلك يتناول القسم 9 انعكاسات العملية بالنسبة لحصر مقادير انبعاثات غازات الاحتباس الحراري واحتسابها. ويختتم الملخص الفني بدراسة الثغرات في المعرفة، وبخاصة تلك التي لها أهمية حيوية بالنسبة للاعتبارات المتعلقة بالسياسات.

عرض عام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

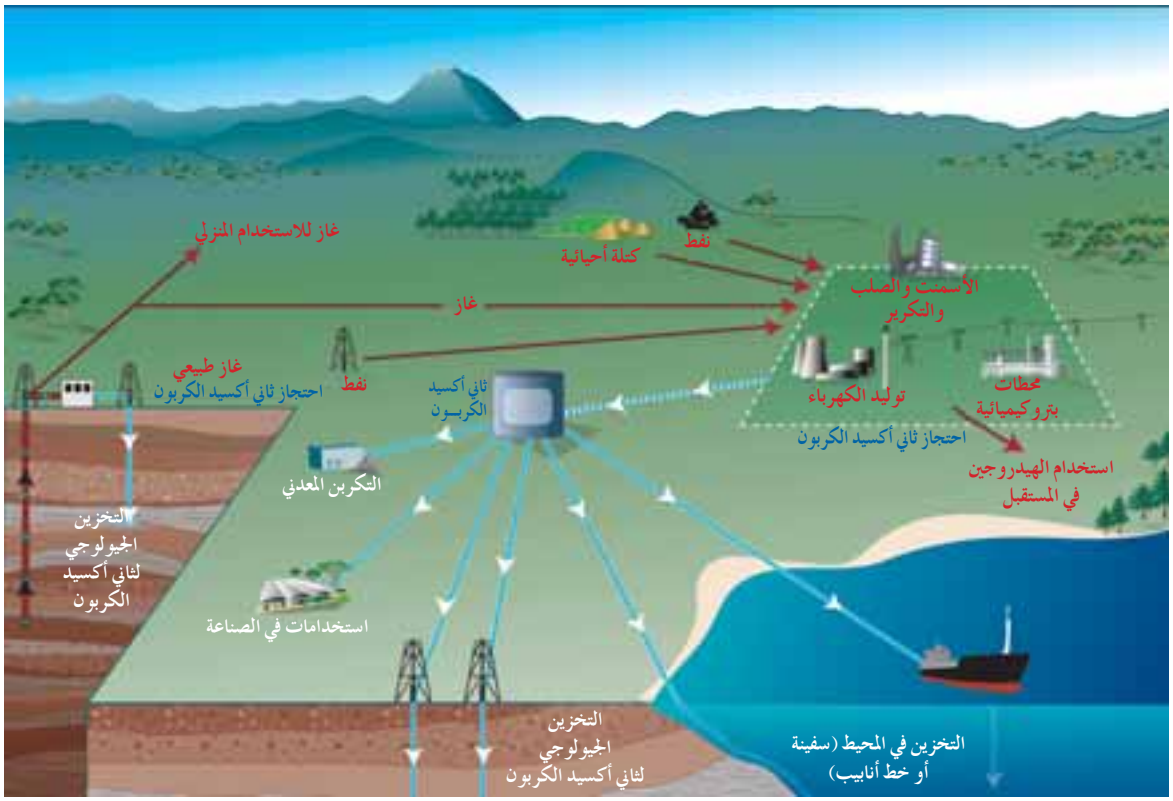
ينبعث ثاني أكسيد الكربون أساساً من احتراق الوقود الأحفوري، سواء في وحدات الاحتراق الكبيرة مثل تلك المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية أو الوحدات الأصغر الموزعة مثل محركات السيارات أو الأفران المستخدمة في المباني السكنية أو التجارية. وتصدر انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أيضاً عن بعض العمليات الصغيرة في مجالي الصناعة واستخراج الموارد، فضلاً عن حرق الغابات في أثناء عمليات تطهير الأرض بقصد إعدادها للزراعة. والأرجح أن نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه سيطبق على المصادر الكبيرة لثاني أكسيد الكربون، مثل محطات الطاقة أو العمليات الصناعية الكبيرة. ويمكن أن توفر بعض هذه المصادر وقوداً خالياً من الكربون، مثل الهيدروجين، لقطاعات النقل والصناعة والبناء، وبذلك تحد من الانبعاثات الصادرة عن هذه المصادر الموزعة.

وتنطوي نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على استخدام التكنولوجيا، أولاً لجمع وتركيز ثاني أكسيد الكربون المنتج في المصادر الصناعية وتلك المتصلة بالطاقة، ونقله إلى موقع مناسب للتخزين، ثم تخزينه بعيداً عن الغلاف الجوي لفترة طويلة من الزمن. وبذلك تتيح نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه استخدام الوقود الأحفوري مع تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ويمكن أن يسفر تطبيق نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على مصادر طاقة الكتلة الحيوية عن إزالة صافية لثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي (ويشار إلى ذلك في كثير من الأحيان بتعبير "الانبعاثات السالبة") عن طريق احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون الذي استوعبته الكتلة الحيوية من الغلاف الجوي، بشرط عدم جَمْع الكتلة الحيوية بمعدلات غير مستدامة.

ويبين الشكل م ف – 1 المكونات الثلاثة لعملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وهي: الاحتجاز، والنقل، والتخزين. وتوجد المكونات الثلاثة جميعها في العمليات الصناعية الحالية، رغم أن المقصود ليس تخزين ثاني أكسيد الكربون في معظم الأحوال. وتشمل مرحلة الاحتجاز فصل ثاني أكسيد الكربون عن المنتجات الغازية الأخرى. وفي حالة عمليات حرق الوقود، كتلك التي تجري في محطات الطاقة، يمكن استخدام عمليات الفصل لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد عملية الاحتراق أو تخليص الوقود من الكربون قبل الاحتراق. وقد تكون مرحلة النقل مطلوبة لتوصيل ثاني أكسيد الكربون المحتجز إلى موقع مناسب للتخزين يقع بعيداً عن مصدر انبعاث ثاني أكسيد الكربون. وتيسيراً للنقل والتخزين على السواء، يُضغط عادة غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز، حتى يصل إلى كثافة عالية، في المنشأة التي احتجز فيها. وتتضمن طرق التخزين الممكنة الحقن في التكوينات الجيولوجية الجوفية، أو الحقن في أعماق المحيطات، أو التثبيت الصناعي على هيئة كربونات لاعضوية. ويجوز أيضاً أن تستخدم بعض العمليات الصناعية وتخزن، في المنتجات التي تصنعها، كميات صغيرة من ثاني أكسيد الكربون المحتجز.

إن النضج التقني لعناصر محددة من نظام ما لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يتباين إلى حد بعيد. فبعض أنماط التكنولوجيا مستخدمة على نطاق واسع في الأسواق الناضجة، لاسيما في قطاع النفط والغاز، في حين أن أنماطاً أخرى مازالت في طوْر البحوث أو التطوير أو البيان العملي. ويقدم الجدول م ف – 1 عرضاً عاماً للحالة الراهنة لجميع عناصر نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. واعتباراً من منتصف عام 2005 أصبحت هناك ثلاثة مشروعات تجارية تربط بين احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في التكوينات الجيولوجية، هي: مشروع سلايبنر (Sleipner) لمعالجة الغاز الطبيعي في البحر في النرويج، ومشروع الاستخراج المحسن للنفط (EOR)[1] في ويبرن، في كندا (الذي يخزن ثاني أكسيد الكربون المحتجز في الولايات المتحدة)، ومشروع الغاز الطبيعي في عين صلاح في الجزائر. ويحتجز كل مشروع ويخزن ما يتراوح من 1 إلى 2 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة. إلا أنه من الجدير بالذكر أن نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه لم يطبق بعد في محطة كبيرة من محطات الطاقة (500 ميغاواط، مثلاً) التي تستخدم الوقود الأحفوري وأن النظام في مجموعه قد لا يكون على نفس القدر من النضج الذي بلغته عناصره.

[1] EOR: يرد شرح هذا الاختصار في النص أعلاه.



الشكل م ف – 1 – رسم بياني تخطيطي للنظم الممكنة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وهو يشير إلى المصادر التي قد تكون نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مناسبة لها، وإلى الخيارات المتاحة لنقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (إهداء من مركز البحوث التعاونية المعنية بثاني أكسيد الكربون).

سبب الاهتمام باحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

في عام 1992 أدى القلق الدولي بشأن تغير المناخ إلى عقد اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC). والهدف النهائي لتلك الاتفاقية هو "تثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي عند مستوى يحول دون حدوث تدخلات بشرية تشكل خطراً على النظام المناخي". ومن هذا المنظور، فإن سياق النظر في احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (وغير ذلك من الخيارات المتاحة للتخفيف من حدة التغير المناخي) هو سياق عالم مقيّد من حيث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وذلك اتساقاً مع الهدف الدولي المتمثل في تثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي. وتتوقع معظم السيناريوهات المتعلقة بالاستخدام العالمي للطاقة زيادة كبيرة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون طوال هذا القرن ما لم تتخذ إجراءات محددة لتخفيف حدة التغير المناخي. وتشير هذه السيناريوهات أيضاً إلى أن أنواع الوقود الأحفوري ستظل تمثل أغلب المعروض من مصادر الطاقة الأولية حتى منتصف القرن على الأقل (انظر القسم 8). وسيتوقف حجم التخفيض المطلوب في الانبعاثات لتثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على كل من مستوى الانبعاثات في المستقبل (خط الأساس) والهدف المنشود لتركيزات ثاني أكسيد الكربون على المدى الطويل: فكلما انخفض هدف التثبيت وارتفع خط الأساس للانبعاثات، زاد التخفيض المطلوب في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويذكر تقرير التقييم الثالث للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ أن الأمر سيستلزم منع انبعاث مئات بل آلاف الغيغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون خلال هذا القرن، تبعاً للسيناريو المأخوذ في الاعتبار، لتثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون عند مستوى يتراوح من 450 إلى 750 جزءاً في المليون حسب الحجم[2] (ppmv). ويرى التقرير أيضاً "أن معظم النتائج التي تسفر عنها النماذج تشير إلى أن الخيارات التكنولوجية المعروفة[3] يمكن أن تتيح نطاقاً عريضاً من مستويات تثبيت ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي"، لكن "ليست هناك تكنولوجيا واحدة تحقق كل التخفيضات اللازمة من الانبعاثات". بل سيلزم مزيج من تدابير التخفيف لتحقيق التثبيت. وهذه الخيارات التكنولوجية المعروفة متوافرة، وإن كان التقرير ينبه إلى أن "التنفيذ سيقتضي إجراء تغييرات اجتماعية – اقتصادية ومؤسسية".

---

(2) يرد شرح المختصر ppmv في النص أعلاه.

(3) تشير عبارة "الخيارات التكنولوجية المعروفة" إلى ضروب التكنولوجيا التي أصبحت الآن في مرحلة التشغيل أو مرحلة الاستخدام في المحطات التجريبية، على النحو المشار إليه في سيناريوهات التخفيف المبحوثة في تقرير التقييم الثالث للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. ولا يشمل المصطلح أي ضروب جديدة من التكنولوجيا تقتضي فتوحات تكنولوجية جذرية. ومن الممكن اعتبار أنه يمثل تقديراً متحفظاً نظراً لطول فترة السيناريو.

الجدول م ف – 1 – النضج الحالي لعناصر نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وتشير علامة X إلى أعلى مستوى من النضج بلغة كل عنصر. وهناك أيضاً ضروب من التكنولوجيا أقل نضجاً لمعظم العناصر.

عنصر نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	تكنولوجيا نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	طوْر البحوث[أ]	طوْر البيان العملي[ب]	تصلح اقتصادياً في ظل ظروف محددة[ج]	سوق ناضجة[د]
الاحتجاز	ما بعد الاحتراق			X	
	ما قبل الاحتراق			X	
	احتراق الوقود الأوكسجيني		X		
	الفصل الصناعي (معالجة الغاز الطبيعي، وإنتاج غاز النشادر)				X
النقل	خطوط الأنابيب				X
	السفن			X	
التخزين الجيولوجي	الاستخراج المحسن للنفط				X[هـ]
	حقول الغاز أو النفط			X	
	التكوينات الملحية العميقة			X	
	الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم (ECBM)[و]		X		
التخزين في المحيطات	الحقن المباشر (طريقة الانحلال)	X			
	الحقن المباشر (طريقة البحيرات)	X			
الكربنة المعدنية	معادن السيليكات الطبيعية	X			
	النفايات		X		
الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون					X

[أ] تعني عبارة "طوْر البحوث" أن العلم الأساسي مفهوم، ولكن التكنولوجيا مازالت حالياً في مرحلة تصميم المفاهيم أو التجريب على مستوى المختبر أو المنضدة، و لم يحدث بيان عملي لها في محطة تجريبية.

[ب] عبارة "طوْر البيان العملي" تعني أن التكنولوجيا قد أقيمت وتطبق على مستوى محطة تجريبية، إلا أنها مازالت في حاجة إلى مزيد من التطوير لكي تصبح جاهزة كأساس لتصميم وإنشاء نظام كامل.

[ج] تعني عبارة "تصلح اقتصادياً في ظل ظروف محددة" أن التكنولوجيا أصبحت مفهومة جيداً ومستخدمة في تطبيقات تجارية مختارة، ومثال ذلك وجود نظام ضريبي مؤات أو سوق خاصة، أو مستوى للمعالجة في حدود 0.1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة مع وجود أقل من خمس عمليات تكرار لهذه التكنولوجيا.

[د] تعني عبارة "السوق الناضجة" أن التكنولوجيا أصبحت تستخدم مع وجود عمليات تكرار عديدة لها على الصعيد العالمي.

[هـ] يعد حقن ثاني أكسيد الكربون للاستخراج المحسن للنفط تكنولوجياً ناضجة، لكنها عندما تُستخدم لتخزين ثاني أكسيد الكربون فإنها تكون فحسب "صالحة اقتصادياً في ظل ظروف محددة".

[و] تعني عبارة "الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم" استخدام ثاني أكسيد الكربون في تحسين استخراج غاز الميثان من طبقات حاملة للفحم غير قابلة للتعدين وذلك عن طريق الامتزاز التفاضلي لثاني أكسيد الكربون على الفحم. وليس من المرجح أن يجري تعدين الطبقات الحاملة للفحم غير القابلة للتعدين وذلك لأنها عميقة جداً أو سُمكها رفيع جداً. ولو حدث تعدينها فيما بعد، فسوف ينطلق منها ثاني أكسيد الكربون المخزون فيها.

وفي هذا الصدد، فإن توافر نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه ضمن مجموعة الخيارات المتاحة للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري يمكن أن يسهِّل تحقيق أهداف التثبيت. وتشمل الخيارات التكنولوجية الأخرى التي دُرست بمزيد من الاستفاضة في التقرير السابق للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ ما يلي: (1) تخفيض الطلب على الطاقة عن طريق زيادة كفاءة أجهزة تحويل الطاقة و/أو استخدامها؛ (2) تخليص إمدادات الطاقة من الكربون (إما بالتحول إلى أنواع من الوقود ذات كثافة كربونية أقل (التحول من الفحم إلى الغاز مثلاً)، و/أو زيادة استخدام مصادر الطاقة المتجددة و/أو الطاقة النووية (التي تنبعث من كل منها، في التحليل النهائي، كمية محدودة أو معدومة من ثاني أكسيد الكربون))؛ (3) عزل ثاني أكسيد الكربون عن طريق تعزيز المصارف الطبيعية من خلال التثبيت البيولوجي؛ (4) الحد من غازات الاحتباس الحراري غير ثاني أكسيد الكربون. ويستفاد من النتائج التي تسفر عنها النماذج، والمعروضة في جزء لاحق من هذا التقرير، أن استخدام نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يمكن، إذا اقترن بتدابير أخرى، أن يخفض كثيراً من تكلفة تحقيق التثبيت وأن يزيد من المرونة في تحقيق هذه التخفيضات. والاعتماد العالمي الشديد الآن على أنواع الوقود الأحفوري (زهاء 80% من الاستخدام العالمي للطاقة)، وإمكانية أن يؤدي احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه إلى تخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال القرن القادم، وتساوق نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه مع البنى الأساسية الحالية للطاقة، هي أمور تفسر الاهتمام بهذه التكنولوجيا.

القضايا الرئيسية التي يواجهها هذا التقييم

هناك عدد من القضايا يقتضي الأمر معالجتها في محاولة فهم الدور الذي يمكن أن يقوم به احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في التخفيف من حدة تغير المناخ. والمسائل التي تثار والتي تجري معالجتها في مختلف أقسام هذا الملخص الفني تشمل ما يلي:

- ما هي الحالة الراهنة لتكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟
- ما هي إمكانية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟
- ما هي تكاليف التنفيذ؟
- ما هو طول المدة التي ينبغي اختزان ثاني أكسيد الكربون خلالها حتى يمكن تحقيق تخفيف لا بأس به في حدة تغير المناخ؟
- ما هي مخاطر احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالنسبة للصحة والسلامة والبيئة؟
- ما الذي يمكن قوله عن التصور العام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟
- ما هي القضايا القانونية لتنفيذ نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟
- ما هي انعكاسات ذلك بالنسبة لحصر مقادير الانبعاثات واحتسابها؟
- ما هي إمكانات نشر ونقل تكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؟

ولدى تحليل نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كخيار للتخفيف من حدة تغير المناخ، من الأهمية بمكان أن تحدَّد وتقدَّر بطريقة شفافة جميع الانبعاثات الصادرة عن النظام، لاسيما انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ومن ثم فإنه ينبغي التشديد على أهمية النظر إلى احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه "من منظور "نُظم"، حيث إن اختيار حدود مناسبة للنظم يعد أمراً أساسياً للتحليل الصحيح. ونظراً للاحتياجات من الطاقة المقترنة باحتجاز ثاني أكسيد الكربون وببعض الخيارات المتاحة للتخزين والاستخدام، وإمكانية حدوث تسرب من مستودعات التخزين، فإن تقييم سلسلة النظام في مجموعها يعد أمراً حيوي الأهمية.

ويجب، سواء من زاوية تثبيت الغلاف الجوي أو من زاوية التنمية المستدامة على المدى الطويل، أن يمتد تخزين ثاني أكسيد الكربون على مراحل زمنية طويلة بالقدر الذي يسمح له بالإسهام إلى حد كبير في التخفيف من حدة تغير المناخ. وهذا التقرير يعبر عن مدة تخزين ثاني أكسيد الكربون من حيث "النسبة المبقى عليها" باعتبارها تلك النسبة من الكتلة التراكمية لثاني أكسيد الكربون المحقونة التي يُبقى عليها في مستودع للتخزين لفترة محددة من الزمن. وستعرض فيما بعد التقديرات الخاصة بهذه النسب لمختلف الفترات الزمنية وخيارات التخزين. وتثور تساؤلات ليس فحسب بخصوص مدة استمرار ثاني أكسيد الكربون مخزوناً، لكن أيضاً فيما يتعلق بالمقادير التي تُعتبر مقبولة[4] لتسربه المستمر والبطيء من مستودع التخزين. وترد في القسم 8 مناقشة لمختلف النهج التي يمكن اتباعها بالنسبة لهذه المسألة.

ويمكن أن يكون احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه خياراً متاحاً للبلدان التي لديها مصادر كبيرة لثاني أكسيد الكربون مناسبة للاحتجاز، ولديها إمكانية الوصول إلى مواقع التخزين، ولديها خبرة بعمليات النفط أو الغاز، وتحتاج إلى الوفاء بتطلعاتها الإنمائية في بيئة يكون الكربون فيها مقيداً. ويتضح من المؤلفات التي جرى تقييمها في التقرير الخاص الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ بعنوان "القضايا المنهجية والتكنولوجية ونقل التكنولوجيا" أن هناك الكثير من الحواجز المحتملة التي يمكن أن تكبح استخدام التكنولوجيا في البلدان النامية، حتى التكنولوجيات التي بلغت مرحلة النضج في البلدان الصناعية. وسيكون التصدي لهذه الحواجز وتهيئة الأوضاع التي من شأنها تيسير نشر التكنولوجيا إلى البلدان النامية قضية رئيسية من قضايا اعتماد نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على الصعيد العالمي.

2- مصادر ثاني أكسيد الكربون

يصف هذا القسم المصادر البشرية الرئيسية لثاني أكسيد الكربون في الوقت الراهن، وعلاقتها بمواقع التخزين الممكنة. وكما سلفت الإشارة، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الصادرة عن الأنشطة البشرية تأتي من عدد من المصادر المختلفة، وبصفة رئيسية من احتراق أنواع الوقود الأحفوري المستخدمة في توليد الطاقة، والنقل، والعمليات الصناعية، والمباني السكنية والتجارية. وينبعث ثاني أكسيد الكربون أيضاً خلال عمليات صناعية معينة مثل صناعة الأسمنت أو إنتاج الهيدروجين وفي أثناء احتراق الكتلة الحيوية. ويناقش هذا القسم أيضاً الانبعاثات في المستقبل.

مصادر ثاني أكسيد الكربون وخصائصه الحالية

توخياً لتقدير إمكانات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، كخيار متاح للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، دُرست العلاقة الجغرافية الحالية على الصعيد العالمي بين المصادر الكبيرة الثابتة لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون ومدى قربها من مواقع التخزين المحتملة. و لم يتناول هذا التحليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في القطاعين السكني والتجاري وقطاع النقل لأن مصادر هذه الانبعاثات تتسم بأنها صغيرة ومتنقلة في كثير من الأحيان، ومن ثم فهي غير مناسبة للاحتجاز والتخزين. وتشمل الدراسة في هذا القسم أيضاً تحليلاً للمصادر المحتملة لثاني أكسيد الكربون في المستقبل على أساس عدة سيناريوهات لاستخدامات الطاقة والانبعاثات العالمية المقبلة خلال القرن القادم.

ولقد بلغت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري في سنة 2000 نحو 23.5 غيغاطناً من ثاني أكسيد الكربون (6 غيغاأطنان من الكربون) على الصعيد العالمي. وكان ما يقرب من 60% من هذه الانبعاثات يعزى إلى مصادر الانبعاثات الثابتة الكبيرة (أقل من 0.1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون) (انظر الجدول م ف – 2). بيد أن هذه المصادر ليست جميعها قابلة للتطويع لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون. ورغم أن المصادر التي جرى تقييمها موزعة في كل أرجاء العالم، فإن قاعدة البيانات تكشف عن وجود أربع مجموعات متميزة من الانبعاثات: أمريكا الشمالية (الأجزاء الواقعة في الغرب الأوسط والشرق من الولايات المتحدة الأمريكية)، وأوروبا (الإقليم الشمالي الغربي)، وشرق آسيا (الساحل الشرقي للصين) وجنوب آسيا (شبه القارة الهندية). وخلافاً لذلك فإن مصادر الكتلة الحيوية الواسعة النطاق تقل كثيراً عن ذلك من حيث العدد والتوزع على الصعيد العالمي.

[4] يعرَّف التسرب، فيما يخص تخزين ثاني أكسيد الكربون، بأنه إفلات السائل المحقون من مستودع التخزين. وهذا هو المعنى الأعم المستخدم في هذا الملخص. أما إذا استخدم التعبير في سياق معاوضة تخفيضات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، فقد يعني التغير في الانبعاثات الصادرة عن الإنسان، بحسب المصدر، أو الإزالة، بواسطة المصارف، التي تحدث خارج حدود المشروع.

الجدول م ف – 2 – صورة عامة لمصادر ثاني أكسيد الكربون الثابتة والكبيرة في العالم التي تصدر انبعاثات تزيد على 0.1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة، معروضة بحسب العملية أو النشاط الصناعي.

العملية	عدد المصادر	الانبعاثات (ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة)
الوقود الأحفوري		
الطاقة (الفحم، والغاز، والنفط، وغير ذلك)	4.942	10.539
إنتاج الأسمنت	1.175	932
معامل التكرير	638	798
صناعة الحديد والصلب	269	646
صناعة البتروكيماويات	470	379
معالجة النفط والغاز	لا تتوافر بيانات	50
المصادر الأخرى	90	33
الكتلة الحيوية الإيثانول الحيوي والطاقة الحيوية	303	91
المجموع	**7.887**	**13.466**

ويبلغ معدل تركز ثاني أكسيد الكربون، في الوقت الحالي، أقل من 15% بالنسبة للأغلبية العظمى من مصادر الانبعاث الكبيرة (ويقل عن ذلك كثيراً في بعض الحالات). إلا أن معدل التركز يتجاوز 95% في حالة نسبة صغيرة (أقل من 2%) من المصادر الصناعية لثاني أكسيد الكربون المعتمدة على الوقود الأحفوري. وتدخل المصادر ذات التركيز المرتفع ضمن المرشحين المحتملين للتنفيذ المبكر لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه لأن الأمر لن يستلزم، في مرحلة الاحتجاز، سوى التجفيف والضغط (انظر القسم 3). ويتضح من تحليل هذه المصادر ذات درجة النقاء المرتفعة وتقع على مسافة في حدود 50 كم من تكوينات التخزين ولديها إمكانية إدرار إيرادات (عن طريق استخدام ثاني أكسيد الكربون في الإنتاج المحسن للهيدروكربون من خلال الاستخراج المحسن للنفط أو الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم) أن هذه المصادر ينبعث منها في الوقت الحالي 360 ميغاطناً من ثاني أكسيد الكربون في السنة. وتفرز بعض مصادر الكتلة الحيوية مثل إنتاج الإيثانول الحيوي أيضاً مصادر لثاني أكسيد الكربون ذي درجة التركيز العالية يمكن استخدامها أيضاً في تطبيقات مشابهة.

ويمكن أن يكون للمسافة الفاصلة بين موضع الانبعاث وموقع التخزين تأثير كبير على إمكانية قيام نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بدور كبير في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويصور الشكل م ف – 2أ المصادر الرئيسية لانبعاث ثاني أكسيد الكربون (وهي مبينة بنقط)، في حين يوضح الشكل م ف – 2ب الأحواض الرسوبية (وهي مبينة بظلال رمادية مختلفة). وبوجه عام، يوضح هذان الشكلان احتمال وجود علاقة ارتباط جيدة بين المصادر الرئيسية والأحواض الرسوبية المحتملة، مع وجود الكثير من المصادر إما فوق المناطق ذات إمكانات التخزين الجيولوجي مباشرة، أو في حدود مسافة معقولة أقل من 300 كم) منها. والأحواض الموضحة في الشكل م ف – 2ب لم تحدد أو تقيّم على أنها مستودعات تخزين مناسبة؛ ويلزم إجراء تحليل جيولوجي أكثر تفصيلاً على الصعيد الإقليمي للتأكد من مدى ملاءمة هذه المواقع التخزينية المحتملة.

الشكل م ف – 2 أ – التوزيع العالمي للمصادر الثابتة الكبيرة لثاني أكسيد الكربون (على أساس تجميع للمعلومات المتاحة للجمهور بشأن مصادر الانبعاثات العالمية، وتقرير غازات الاحتباس الحراري العالمية الصادر عن الوكالة الدولية للطاقة، 2002).

الشكل م ف – 2 ب – مناطق الأحواض الرسوبية التي يُحتمل العثور فيها مستقبلاً على تكوينات ملحية أو حقول نفط أو غاز أو طبقات حاملة للفحم المناسبة. و لم تدرج مواضع التخزين في الطبقات الحاملة للفحم إلا جزئياً. والمقصود بالاحتمالية هو وضع تقدير كيفي لاحتمال وجود موضع مناسب للتخزين في منطقة معينة على أساس المعلومات المتاحة. وينبغي النظر إلى هذا الرقم على أنه للاسترشاد فحسب، لأنه يقوم على أساس بيانات جزئية قد تتباين نوعيتها من إقليم لإقليم وقد تتغير على مر الزمن ومع ما يستجد من معلومات (إهداء من معهد علوم الأرض في أستراليا).

مصادر الانبعاثات في المستقبل

في التقرير الخاص الذي أصدرته الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ عن سيناريوهات الانبعاث، احتسبت إسقاطات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المستقبل على أساس ستة سيناريوهات بيانية تتراوح فيها الانبعاثات العالمية من ثاني أكسيد الكربون من 29 إلى 44 غيغاطناً من ثاني أكسيد الكربون (من 8 غيغاأطنان إلى 12 غيغاطناً من الكربون) في عام 2020، ومن 23 إلى 84 غيغاطناً من ثاني أكسيد الكربون (من 6 غيغاأطنان إلى 23 غيغاطناً من الكربون) في عام 2050. ومن المتوقع أن يسجل عدد مصادر انبعاث ثاني أكسيد الكربون من قطاعي الطاقة الكهربائية والصناعة زيادة كبيرة حتى عام 2050، وبصفة رئيسية في جنوب شرق آسيا. وخلافاً لذلك يمكن أن يسجل عدد هذه المصادر هبوطاً طفيفاً في أوروبا. وستتوقف نسبة المصادر التي يزيد أو يقل معدل ثاني أكسيد الكربون في الانبعاثات الصادرة عنها على حجم ومعدل إدخال محطات تقوم بتسييل أو تغويز الوقود الأحفوري لإنتاج الهيدروجين أو غيره من المنتجات السائلة والغازية. وكلما زاد عدد هذه المنشآت زاد عدد مصادر الانبعاثات ذات التركيزات المرتفعة من ثاني أكسيد الكربون التي تعد مناسبة تقنياً للاحتجاز.

وقُدِّر أن الإمكانات المتوقعة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالنطاقات السالفة الذكر للانبعاثات تتراوح من 2.6 إلى 4.9 غيغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2020 (من 0.7 إلى 1.3 غيغاطناً من الكربون) ومن 4.7 غيغاأطنان إلى 37.5 غيغاطناً من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2050 (من 1.3 إلى 10 غيغاأطنان من الكربون). وتناظر هذه الأرقام ما يتراوح من 9 إلى 12% ومن 21 إلى 45% من الانبعاثات العالمية لثاني أكسيد الكربون في عامي 2020 و2050 على التوالي. وتعبر نطاقات الانبعاث والاحتجاز عن الإبهام المتأصل الذي يكتنف التحليلات القائمة على السيناريوهات والنمذجة، والحدود التقنية لتطبيق نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وهذه السيناريوهات لا تأخذ في الاعتبار سوى احتجاز ثاني أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري وليس من مصادر الكتلة الحيوية. إلا أن الانبعاثات من المحطات الكبيرة لتحويل الكتلة الحيوية يمكن أن تكون أيضاً مناسبة تقنياً للاحتجاز.

ويعد التطوير المحتمل لمصادر الطاقة ذات المحتوى المنخفض من الكربون أمراً له صلة وثيقة بعدد وحجم المصادر الثابتة الكبيرة لانبعاث ثاني أكسيد الكربون بمعدلات تركيز مرتفعة مستقبلاً. ويستفاد من السيناريوهات أيضاً أن الإنتاج على مستوى كبير لمصادر الطاقة ذات المحتوى المنخفض من الكربون، مثل الكهرباء أو الهيدروجين قد يبدأ، بعد عدة عقود، في الحلول محل أنواع الوقود الأحفوري الذي تستخدمه حالياً المصادر الصغيرة الموزعة في المباني السكنية والتجارية وفي قطاع النقل (انظر القسم 8). ومصادر الطاقة المذكورة يمكن انتاجها من الوقود الأحفوري و/ أو الكتلة الحيوية في محطات كبيرة من شأنها أن تولّد مصادر نقاطية كبيرة لثاني أكسيد الكربون (كمحطات الطاقة أو محطات شبيهة بتلك التي تنتج الهيدروجين من الغاز الطبيعي). وهذه المصادر مناسبة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون. وهذه التطبيقات لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يمكن أن تحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتناثرة من عملية النقل ونظم امدادات الطاقة الموزعة. إلا أنه من الصعب، في الوقت الراهن، التنبؤ بالرقم أو الحجم أو التوزيع الجغرافي المرجح لمصادر ثاني أكسيد الكربون المقترنة بمثل هذه التطورات.

3- احتجاز ثاني أكسيد الكربون

يتناول هذا القسم تكنولوجيا احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وكما هو موضح في القسم الثاني، فإن محطات الطاقة وغيرها من العمليات الصناعية الكبيرة تأتي على رأس قائمة جهات انبعاث ثاني أكسيد الكربون المرشحة للاحتجاز، وهذا هو مجال التركيز الرئيسي لهذا القسم.

خيارات وتطبيقات تكنولوجيا الاحتجاز

إن الغرض من احتجاز ثاني أكسيد الكربون هو إفراز مجرى مركَّز من ثاني أكسيد الكربون بضغط مرتفع يمكن نقله بسهولة إلى موقع للتخزين. ورغم أنه يمكن، من حيث المبدأ، نقل كل مجرى الغاز الذي يحتوي على تركيزات منخفضة من ثاني أكسيد الكربون وحقنه في جوف الأرض، فإن تكاليف الطاقة وغيرها من التكاليف المقترنة بهذه العملية تجعل هذا النهج غير عملي. لذلك من الضروري إفراز مجرى لتدفق ثاني أكسيد الكربون شبه النقي من أجل نقله وتخزينه. ويجري الآن بالفعل تنفيذ تطبيقات تفصل ثاني أكسيد الكربون في منشآت صناعية كبيرة، بما في ذلك منشآت معالجة الغاز الطبيعي ومرافق إنتاج غاز النشادر. ويُزال عادة، في الوقت الراهن ثاني أكسيد الكربون لتنقية مجاري تدفق الغازات الصناعية الأخرى. و لم تُستخدم إزالة ثاني أكسيد الكربون لأغراض تخزينه إلا في حالات قليلة؛ فثاني أكسيد الكربون ينبعث إلى الغلاف الجوي في معظم الحالات. واستُخدمت عمليات الاحتجاز أيضاً للحصول، من مجاري تدفق غازات المداخن الناجمة عن احتراق الفحم أو الغاز الطبيعي، على كميات من ثاني أكسيد الكربون مفيدة تجارياً. إلا أنه لم يحدث حتى الآن أن طُبقت عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون على المحطات الكبيرة للطاقة (التي تنتج 500 ميغاواط مثلاً).

وهناك، تبعاً للعمليات أو تطبيقات محطات الطاقة المعنية، ثلاثة نهج رئيسية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الوقود الأحفوري الأولي (الفحم، أو الغاز الطبيعي، أو النفط)، أو الكتلة الحيوية، أو مزيج من هذه الأنواع من الوقود:

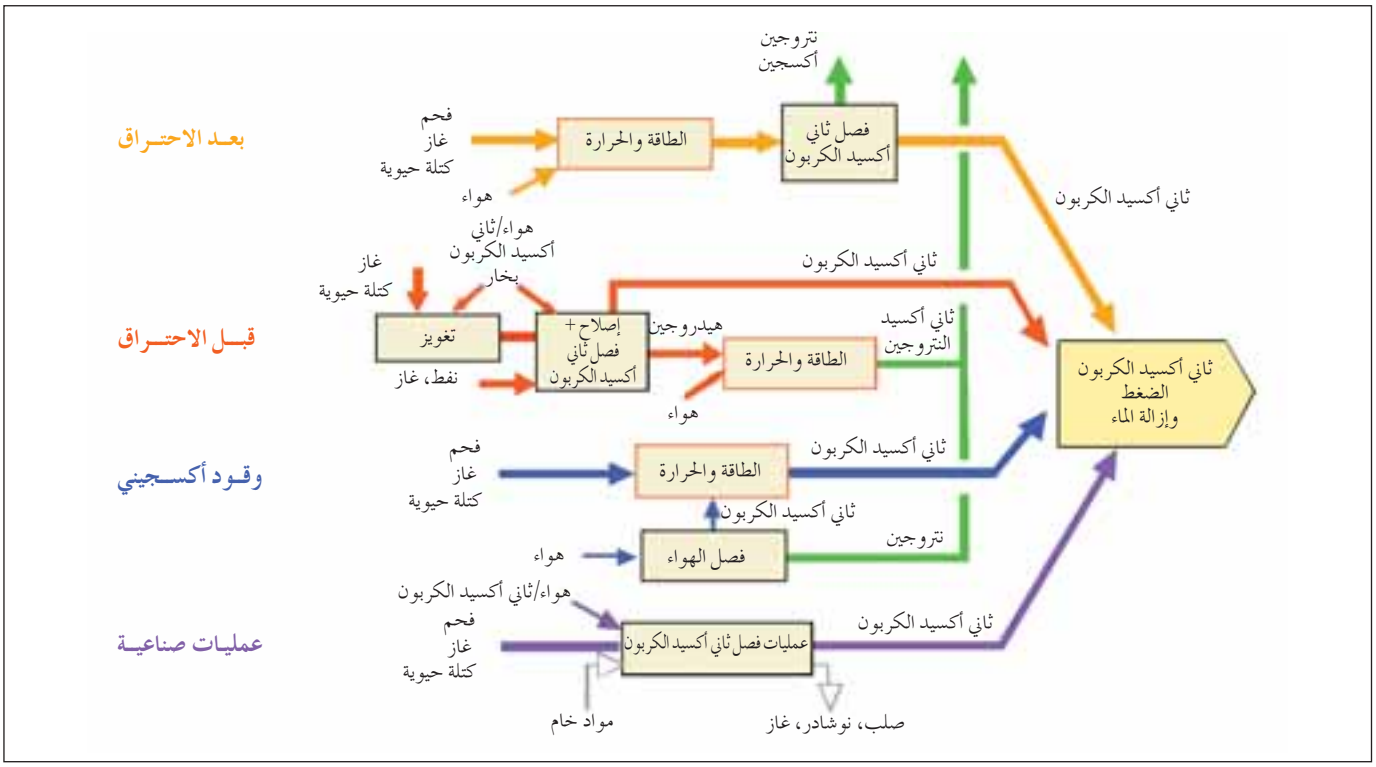
نظم ما بعد الاحتراق وهي تفصل ثاني أكسيد الكربون عن غازات المداخن الناجمة عن احتراق الوقود الأولي في الهواء. وتستخدم هذه النظم في العادة مذيباً سائلاً لتحتجز (من الهواء) النسبة الصغيرة من ثاني أكسيد الكربون (من 3 إلى 15% بحسب الحجم، عادة) الموجودة في مجرى غازات المداخن التي يعتبر النيتروجين مكونها الرئيسي. وفي حالة محطات الطاقة الحديثة التي تعتمد على الفحم المسحوق أو دورة مختلطة للغاز الطبيعي، فإن نظم ما بعد الاحتراق الحالية ستستخدم، عادة، مذيباً عضوياً مثل المونوإيثانولامين.

نظم ما قبل الاحتراق وهي تعالج الوقود الأولي في مفاعل بالبخار والهواء أو الأكسجين لإنتاج خليط يتألف بصفة رئيسية من أكسيد الكربون الأحادي والهيدروجين ('الغاز التركيبي'). وتُنتج كميات إضافية من الهيدروجين، مع ثاني أكسيد الكربون، عن طريق تفعيل أكسيد الكربون الأحادي بالبخار في مفاعل ثان ('مفاعل تحويل'). ويمكن بعدئذ فصل خليط الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون الناجم عن ذلك للحصول على مجرى من غاز ثاني أكسيد الكربون، ومجرى من الهيدروجين. وإذا تم تخزين ثاني أكسيد الكربون، يصبح الهيدروجين مصدراً للطاقة خالياً من الكربون يمكن إحراقه لتوليد الطاقة و/ أو الحرارة. ورغم أن الخطوات الأولى لتحويل الوقود أكثر تعقداً وتكلفة بالمقارنة بنظم ما بعد الاحتراق، فإن التركيزات العالية لثاني أكسيد الكربون التي ينتجها مفاعل التحويل (تتراوح عادة من 15 إلى 60% من الحجم الجاف) والضغوط العالية التي كثيراً ما تتعرض لها هذه التطبيقات تعد أكثر مؤاتاة لفصل ثاني أكسيد الكربون. وتُستخدم نظم ما قبل الاحتراق في محطات الطاقة التي تعتمد تكنولوجيا الدورة المختلطة للتغويز المتكامل.

نظم *احتراق الوقود الأكسجيني* وهي تستخدم الأكسجين بدلاً من الهواء في عملية احتراق الوقود الأولي بحيث ينتج عن ذلك غاز مداخن يتكون بصورة رئيسية من بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. وينتج عن هذا غاز مداخن يحتوي على تركيزات عالية من ثاني أكسيد الكربون (أكثر من 80% بحسب الحجم). ويزال بخار الماء بعد ذلك عن طريق تبريد الغاز وضغط مجرى الغاز. وتتطلب عملية احتراق الوقود الأكسجيني فصل الأكسجين عن الهواء في مرحلة الإنتاج، مع افتراض معظم التصميمات الحالية نسبة نقاء تتراوح من 95 إلى 99 في المائة. وقد تلزم أيضاً معالجة إضافية لغاز المداخن لإزالة ملوثات الهواء والغازات غير المكثفة (مثل النتروجين) من غاز المداخن قبل إرسال ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وتمر نظم احتراق الوقود الأكسجيني، بوصفها طريقة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون في الغلايات، بطوْر البيان العملي (انظر الجدول م ف – 1). كما تجري دراسة نظم الوقود الأكسجيني في نظم عنفات (تربينات) الغاز، إلا أن التصميمات النظرية لمثل هذه التطبيقات مازالت في طوْر البحوث.

ويعرض الشكل م ف – 3 رسماً تخطيطياً لعمليات ونظم الاحتجاز الرئيسية. وهي تتطلب كلها خطوة تنطوي على فصل ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين والأكسجين عن مجرى الغاز السائب (مثل غاز المداخن، أو الغاز التركيبي، أو الهواء، أو الغاز الطبيعي الخام). ويمكن تحقيق خطوات الفصل هذه عن طريق المذيبات الفيزيائية أو الكيميائية، أو الأغشية، أو مواد الامتصاص الصلبة، أو عن طريق الفصل بالتبريد. واختيار تكنولوجيا احتجاز معينة تحدده إلى مدى بعيد ظروف المعالجة التي ستطبق في ظلها. ويمكن للنظم الحالية اللاحقة والسابقة للاحتراق أن تحتجز من 85 إلى 95% من ثاني أكسيد الكربون المنتج. ويمكن زيادة كفاءة الاحتجاز، وإن كانت وسائل الفصل تصبح أكبر كثيراً وأشد استهلاكاً للطاقة وأكثر تكلفة. ويحتاج الاحتجاز والضغط إلى طاقة إضافية تتراوح من 10 إلى 40 في المائة، تبعاً لنوع النظام، مقارنة بالمحطات المعادلة غير المزودة بنظام للاحتجاز. ونظراً لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون المقترنة بذلك، فإن صافي كمية ثاني أكسيد الكربون المحتجز تتراوح من 80 إلى 90 في المائة. ونظم احتراق الوقود الأكسجيني قادرة، من حيث المبدأ، على احتجاز كل ثاني أكسيد الكربون المنتج تقريباً. إلا أن الحاجة إلى نظم إضافية لمعالجة الغاز من أجل إزالة الملوثات مثل أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين تخفض مستوى ثاني أكسيد الكربون المنتج إلى ما يقل قليلاً عن 90 في المائة.

كما ذُكر في القسم 1، فإن احتجاز ثاني أكسيد الكربون مستخدم بالفعل في تطبيقات صناعية عديدة (انظر الشكل م ف – 4). ونفس التكنولوجيا التي يمكن استخدامها في الاحتجاز السابق على الاحتراق تُستخدم في إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع (ويستخدم هذا الهيدروجين بصفة أساسية في صنع غاز النشادر والأسمدة وفي عمليات تكرير البترول). وفصل ثاني أكسيد الكربون عن الغاز الطبيعي الخام (الذي يحتوي عادة على كميات كبيرة من الغاز) يطبق أيضاً على نطاق واسع، باستخدام تكنولوجيا شبيهة بتلك المستخدمة في الاحتجاز اللاحق للاحتراق. ورغم أن نظم فصل الأكسجين على نطاق واسع متوافرة على المستوى التجاري أيضاً، فإن احتجاز ثاني أكسيد الكربون عن طريق عملية احتراق الوقود الأكسجيني مازالت حالياً في طوْر البيان العملي. إضافة إلى ذلك، فإن البحوث جارية لبلوغ مستويات أعلى من تكامل النظم، وزيادة الكفاءة، وتخفيض التكاليف لجميع أنواع نظم الاحتجاز.



الشكل م ف – 3 – عرض عام لعمليات ونظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون.

الشكل م ف – 4 – (أ) احتجاز ثاني أكسيد الكربون بنظام ما بعد الاحتراق في محطة في ماليزيا. وتستخدم هذه المحطة عملية الامتصاص لفصل 0.2 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة من مجرى غاز المداخن لمصنع لإنتاج حامض اليوريا يعمل بالغاز (إهداء من شركة ميتسو بيشي للصناعات الثقيلة). (ب) احتجاز ثاني أكسيد الكربون بنظام ما قبل الاحتراق في محطة لتغويز الفحم في داكوتا الشمالية، الولايات المتحدة الأمريكية. وتستخدم هذه المحطة طريقة المذيبات الفيزيائية لفصل 3.3 ميغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون في السنة من مجرى للغاز من أجل إنتاج غاز طبيعي تركيبي. ويُستخدم بعض ثاني أكسيد الكربون المحتجز في مشروع للاستخراج المحسن للنفط في كندا.

احتجاز ثاني أكسيد الكربون: المخاطر والطاقة والبيئة

لا يبدو أن مراقبة نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون أو مخاطرها أو آثارها القانونية تمثل تحديات جديدة أساساً، حيث إنها جميعاً عناصر من ممارسات مراقبة الصحة والسلامة والبيئة المتبعة اعتيادياً في الصناعة. إلا أن نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون تحتاج إلى مقادير كبيرة من الطاقة لتشغيلها. وهذا يحد من الكفاءة الصافية للمحطة، ومن ثم تحتاج محطات الطاقة إلى كمية إضافية من الوقود لتوليد كل كيلوواط ساعة من الكهرباء المنتجة. ويستفاد من استعراض للمؤلفات المتوافرة في هذا الصدد أن الزيادة في الوقود المستهلك لكل كيلوواط ساعة في المحطات التي تحتجز 90% من ثاني أكسيد الكربون باستخدام أفضل أنواع التكنولوجيا الراهنة تتراوح من 24 إلى 40% للمحطات الجديدة فوق الحرجة التي تُدار بالفحم المسحوق، ومن 11 إلى 22% للمحطات التي تعمل بنظام دورة الغاز الطبيعي المختلطة، ومن 14 إلى 25% للمحطات التي تستخدم الفحم وتعمل بنظام الدورة المختلطة للتغويز المتكامل، مقارنة بالمحطات المماثلة غير المزودة بنظم لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وتسفر الزيادة في الاحتياجات من الوقود عن زيادة في معظم الانبعاثات الأخرى لكل كيلوواط ساعة يتم توليده مقارنة بأحدث المحطات الجديدة التي ليس لديها نظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون، كما تؤدي، في حالة المحطات التي تستخدم الفحم إلى زيادة نسبية في مقدار النفايات الصلبة. إضافة إلى ذلك فإن المحطات التي تعمل بالفحم المسحوق تستهلك كميات إضافية من المواد الكيميائية، كغاز النشادر والحجر الجيري، حتى تكافح انبعاثات أكسيد النتروجين وثاني أكسيد الكبريت. وستؤدي تصميمات المحطات المتقدمة، التي تصل إلى مدى أبعد في تخفيض الاحتياجات من الطاقة لنظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، إلى الحد أيضاً من التأثيرات البيئية الشاملة للمحطات ومن تكاليفها. ومقارنة بالكثير من المحطات القديمة القائمة فإن المحطات الأكثر كفاءة الجديدة أو المعاد بناؤها قد تحقق بالفعل تخفيضات صافية في الانبعاثات البيئية الصادرة عنها.

تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون

تستند التكاليف المقدرة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون في المحطات الكبيرة للطاقة إلى دراسات التصميمات الهندسية للتكنولوجيا المستخدمة تجارياً حالياً (وإن يكن، في كثير من الأحيان بتطبيقات مختلفة و/أو على نطاق أصغر مما تفترضه المؤلفات)، وعلى دراسات تصميم المفاهيم التي مازالت الآن في مرحلة البحوث والتطوير. ويوجز الجدول م ف – 3 النتائج التي حققتها المحطات فوق الحرجة التي تعمل بالفحم المسحوق، ونظام دورة الغاز الطبيعي المختلطة والدورة المختلطة للتغويز المتكامل، على أساس التكنولوجيا الحالية وبالنسبة للمحطات المزودة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون والمحطات غير المزودة به. وتخفض نظم الاحتجاز، في حالة التصميمات الثلاثة، انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للكيلوواط ساعة بما يتراوح من 80 إلى 90% تقريباً، مع أخذ احتياجات الاحتجاز من حيث الطاقة في الحسبان. وجميع بيانات المحطات العاملة بالفحم المسحوق والدورة المختلطة للتغويز المتكامل الواردة في الجدول م ف – 3 تتعلق بأنواع الفحم القيري وحدها. وتشمل تكاليف الاحتجاز تكلفة ضغط ثاني أكسيد الكربون (إلى ما يتراوح عادة من 11 إلى 14 ميغابسكال) لكنها لا تشمل التكاليف الإضافية لنقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (انظر الأقسام 4 إلى 7).

وتعبر الفروق بين التكلفة الدنيا والتكلفة القصوى لكل من النظم الثلاثة عن فروق في الافتراضات التقنية والاقتصادية والتشغيلية المستخدمة في الدراسات المختلفة. وفي حين يمكن أن تعزى بعض الفروق في التكاليف إلى الفروق بين تصميمات نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون فإن المصادر الرئيسية للتباين هي الاختلافات في جوانب التصميم المفترضة للمحطة المقارنة التي تطبق عليها تكنولوجيا الاحتجاز (عوامل من قبيل حجم المحطة، وموقعها، وكفاءتها، ونوع الوقود المستخدم فيها، وتكلفة الوقود، وعامل القدرة، وتكلفة رأس المال). وحيث إنه ليست هناك مجموعة واحدة من الافتراضات تنطبق على جميع الحالات أو جميع أجزاء العالم، فقد أدرجت في الجدول حدود دنيا وحدود عليا للتكاليف.

وترى الدراسات المسرودة في الجدول م ف – 3 أن احتجاز ثاني أكسيد الكربون يزيد من تكلفة [5] إنتاج الكهرباء بما يتراوح من 35 إلى 70% (من 0.01 إلى 0.02 دولار أمريكي للكيلوواط ساعة) في حالة المحطة العاملة بنظام دورة الغاز الطبيعي المختلطة، ومن 40 إلى 85% (من 0.02 إلى 0.03 دولار أمريكي للكيلوواط ساعة) في حالة المحطة فوق الحرجة العاملة بالفحم المسحوق، ومن 20 إلى 55% (من 0.01 إلى 0.02 دولار أمريكي للكيلوواط ساعة) في حالة المحطة العاملة بنظام الدورة المختلطة للتغويز المتكامل. وبصفة عامة فإن تكاليف إنتاج الكهرباء للمحطات العاملة بالوقود الأحفوري والمزودة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون (باستثناء تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه) تتراوح من 0.04 إلى 0.09 دولار أمريكي للكيلوواط ساعة، مقارنة بما يتراوح من 0.03 إلى 0.06 دولار أمريكي للمحطات المماثلة غير المزودة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون. وانتهت معظم الدراسات التي أجريت حتى الآن إلى أن تكاليف إنتاج الكهرباء في المحطات العاملة بنظم دورة الغاز الطبيعي المختلطة تقل، عادة، عن تكاليف المحطات العاملة بالفحم المسحوق أو الدورة المختلطة للتغويز المتكامل (سواء كانت مزودة بنظام للاحتجاز أو لم تكن مزودة به) في حالة المحطات الأساسية الكبيرة التي تتوافر لديها عوامل قدرة عالية (75% أو أكثر)، ويتراوح سعر الغاز الطبيعي بالنسبة لها من 2.6 إلى 4.4 دولار أمريكي للغيغاجول على مدى عمر المحطة. إلا أنه في حالة ارتفاع أسعار الغاز و/ أو انخفاض عوامل القدرة، فإن تكاليف إنتاج الكهرباء من المحطات التي تعمل بنظام دورة الغاز الطبيعي المختلطة كثيراً ما تكون أعلى من تكاليف إنتاجها في المحطات المعتمدة على الفحم، سواء كانت مزودة أو غير مزودة بنظام للاحتجاز. وانتهت الدراسات التي أجريت مؤخراً أيضاً إلى أن تكلفة إنتاج الكهرباء في المحطات التي تعمل بنظام الدورة المختلطة للتغويز المتكامل تفوق قليلاً، في المتوسط، التكلفة في المحطات ذات الحجم المشابه المشغلة بالفحم المسحوق، في حالة عدم الاقتران بنظام للاحتجاز، وتقل عنها قليلاً في حالة الاقتران بنظام للاحتجاز. بيد أن الفرق في التكلفة بين المحطات التي تستخدم الفحم المسحوق وتلك التي تعمل بنظام الدورة المختلطة للتغويز المتكامل، سواء باستخدام نظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون أو بدون ذلك، قد يتباين بدرجة كبيرة تبعاً لنوع الفحم وغير ذلك من العوامل

[5] لا ينبغي الخلط بين تكلفة إنتاج الكهرباء وسعر الكهرباء للمستهلك.

الجدول م ف – 3 – ملخص تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون في حالة المحطات الجديدة لتوليد الطاقة على أساس التكنولوجيا الحالية*

الأداء ومقاييس التكاليف	محطة جديدة تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة (NGCC)		محطة جديدة تستخدم الفحم المسحوق (PC)		محطة جديدة تستخدم الدورة المختلطة للتخزين المتكامل (IGCC)	
	الحد الأدنى – الأقصى	القيمة البيانية (Rep. Value)	الحد الأدنى – الأقصى	القيمة البيانية (Rep. Value)	الحد الأدنى – الأقصى	القيمة البيانية (Rep. Value)
عامل الانبعاث بدون الاحتجاز (كغم ثاني أكسيد الكربون/ كيلوواط ساعة)	0.379 – 0.344	0.367	0.811 – 0.736	0.762	0.846 – 0.682	0.773
عامل الانبعاث مع الاحتجاز (كغم ثاني أكسيد الكربون/ كيلوواط ساعة)	0.066 – 0.040	0.052	0.145 – 0.092	0.112	0.152 – 0.065	0.108
النسبة المئوية لتخفيض الانبعاث للكيلوواط ساعة (%)	88 – 83	86	88 – 81	85	91 – 81	86
كفاءة المحطة مع الاحتجاز، على أساس القيمة الحرارية الدنيا (LHV) (%)	50 – 47	48	35 – 30	33	40 – 31	35
احتياجات الاحتجاز من الطاقة (% للزيادة في المدخلات/ ميغاواط ساعة (MWh))	22 – 11	16	40 – 24	31	25 – 14	19
الاحتياج الكلي من رأس المال بدون الاحتجاز (دولار أمريكي/ كيلوواط)	724 – 515	568	1486 – 1161	1286	1565 – 1169	1326
الاحتياج الكلي من رأس المال مع الاحتجاز (دولار أمريكي/ كيلوواط)	1261 – 909	998	2578 – 1894	2096	2270 – 1414	1825
النسبة المئوية للزيادة في التكلفة الرأسمالية مع الاحتجاز (%)	100 – 64	76	7463 – 44	63	66 – 19	37
تكلفة إنتاج الكهرباء بدون الاحتجاز (COE) (دولار أمريكي/ كيلوواط ساعة)	0.050 – 0.031	0.037	0.052 – 0.043	0.046	0.061 – 0.041	0.047
تكلفة إنتاج الكهرباء (COE) مع الاحتجاز وحده (دولار أمريكي/ كيلوواط ساعة)	0.072 – 0.043	0.054	0.086 – 0.062	0.073	0.079 – 0.054	0.062
الزيادة في تكلفة إنتاج الكهرباء (COE) مع الاحتجاز (دولار أمريكي/ كيلوواط ساعة)	0.024 – 0.012	0.017	0.034 – 0.018	0.027	0.022 – 0.009	0.016
النسبة المئوية للزيادة في تكلفة إنتاج الكهرباء (COE) مع الاحتجاز (%)	69 – 37	46	66 – 42	57	55 – 20	33
تكلفة الكمية المحتجزة من ثاني أكسيد الكربون الصافي (دولار أمريكي/ طن من ثاني أكسيد الكربون)	74 – 37	53	51 – 29	41	37 – 13	23
مستوى الثقة في تكلفة الاحتجاز (انظر الجدول 3.6)	معتدلة		معتدلة		معتدلة	

* نظراً لأن هذه التكاليف لا تشمل تكاليف (أو عائدات) لنقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون، فإنه لا ينبغي استخدام هذا الجدول لتقييم أو مقارنة مجموع تكاليف المحطة بالنسبة لمختلف النظم المزودة بعنصر للاحتجاز. وترد في القسم 8 التكلفة الكلية للمحطات المزودة بعنصر لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. المختصرات: واردة في الجدول، وRep. Value = القيمة البيانية محتسبة على أساس متوسط القيم الواردة في مختلف الدراسات؛ وانظر القسم 3.6.1 للاطلاع على حساب الاحتياجات من الطاقة للمحطات المزودة بعنصر احتجاز. الملاحظات: [أ] تستند الحدود العليا والدنيا والقيم البيانية إلى بيانات الجداول 3.7 و3.9 و3.10 الواردة في التقرير الخاص.

المحلية، مثل تكلفة رأس المال لكل نوع من أنواع المحطات. ونظراً لأنه لم يتم حتى الآن بناء نظم كاملة من المحطات التي تعمل بنظام دورة الغاز الطبيعي المختلطة أو الفحم المسحوق أو الدورة المختلطة للتغويز المتكامل مع تزويدها بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، فإنه لا يمكن تحديد التكلفة المطلقة أو النسبية لهذه النظم بقدر كبير من الثقة في الوقت الراهن.

وتكاليف تزويد المحطات القائمة بنظام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون لم تدرس بعد باستفاضة. وهناك عدد محدود من التقارير يشير إلى أن إضافة جهاز لتطهير الغازات بالأحماض الأمينية إلى محطة قائمة يؤدي إلى خسارة في الكفاءة وزيادة في التكاليف تفوق تلك المبينة في الجدول م ف – 3. وتشير دراسات محدودة أيضاً إلى أن خياراً أكثر اتساماً بجدوى التكاليف يتمثل في الجمع بين إضافة نظام للاحتجاز وإعادة بناء الغلاية والعنفَة (التربينة) لزيادة كفاءة المحطة وإنتاجها. وتشير الدراسات، بالنسبة لبعض المحطات القائمة، إلى أنه يمكن تحقيق فوائد مشابهة بالاستعاضة عن النظام المحرك لهذه المحطات بنظام يعتمد على الدورة المختلطة للتغويز المتكامل ويشمل عنصراً تكنولوجياً لاحتجاز تكنولوجياً لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون. وتتوقف جدوى وتكلفة جميع هذه الخيارات، إلى حد بعيد، على عوامل تتعلق بكل محطة على حدة، بما في ذلك حجم المحطة وعمرها وكفاءتها ومدى توافر حيّز إضافي.

وجميع التكاليف الواردة في هذا الجدول تتعلق بالاحتجاز وحده ولا تشمل تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه؛ وانظر الفصل الثامن

للاطلاع على مجموع تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. [ب] جميع بيانات الفحم المسحوق والدورة المختلطة للتغويز المتكامل تتعلق بأنواع الفحم القيري وحده بتكاليف تتراوح من 1.0 إلى 1.5 دولار أمريكي للغيغاجول (القيمة الحرارية)؛ وجميع المحطات التي تستخدم الفحم المسحوق وحدات فوق حرجة. [ج] تستند بيانات دورة الغاز الطبيعي المختلطة تستند إلى أسعار للغاز الطبيعي تتراوح من 2.8 إلى 4.4 دولارات أمريكية للغيغاجول (على أساس القيمة الحرارية الدنيا). [د] التكاليف مذكورة بسعر الدولار الأمريكي الثابت في عام 2002. [هـ] تتراوح أحجام محطات الطاقة من محطات تنتج من 400 إلى 800 ميغاواط تقريباً في حالة عدم الاحتجاز ومحطات تنتج من 300 إلى 700 ميغاواط تقريباً في حالة الاحتجاز. [و] تتراوح عوامل القدرة من 65 إلى 85% في حالة المحطات التي تستخدم الفحم ومن 50 إلى 95% في حالة المحطات التي تعمل بالغاز (ويبلغ متوسط النسبة لكل منهما 80%). [ز] تتراوح عوامل التكلفة من 11 إلى 16%. [ح] جميع التكاليف تشمل تكلفة ضغط ثاني أكسيد الكربون لكنها لا تشمل تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

ويبين الجدول م ف – 4 تكلفة احتجاز ثاني أكسيد الكربون بالنسبة لإنتاج الهيدروجين. وفي هذا السياق، فإن تكلفة احتجاز ثاني أكسيد الكربون ترجع، بصفة رئيسية، إلى تكلفة تجفيف ثاني أكسيد الكربون وضغطه، حيث إن فصل ثاني أكسيد الكربون يكون قد نُفذ بالفعل كجزء من عملية إنتاج الهيدروجين. وتضيف تكلفة احتجاز ثاني أكسيد الكربون ما يتراوح من 5% إلى 30% إلى تكلفة الهيدروجين المنتج.

ويمكن أيضاً تطبيق عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على النظم التي تستخدم أنواع الوقود أو مواد التلقيم المستمدة من الكتلة الحيوية، سواء بمفردها أو مع الوقود الأحفوري. وقد تناول عدد محدود من الدراسات تكاليف هذه النظم التي تجمع ما بين الاحتجاز والنقل والتخزين. وتفيد التقديرات بأن احتجاز 0.19 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة في محطة تبلغ قوتها 24 ميغاواطاً وتستخدم وقود الكتلة الحيوية بنظام الدورة المختلطة للتغويز المتكامل يتكلف 80 دولاراً أمريكياً للطن من ثاني أكسيد الكربون الصافي المحتجز (300 دولار أمريكي للطن من الكربون)، وهو ما يعني زيادة في تكاليف الكهرباء تبلغ نحو 0.08 دولار أمريكي للكيلوواط ساعة. وثمة دراسات قليلة نسبياً لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون من أجل عمليات صناعية أخرى تستخدم أنواع الوقود الأحفوري وهي تقتصر عادة على تكاليف الاحتجاز مع التعبير عنها فقط كتكلفة للطن من ثاني أكسيد الكربون المحتجز أو المتجنب. وبصفة عامة، فإن ثاني أكسيد الكربون المنتج في مختلف العمليات يتباين إلى حد بعيد من حيث الضغط والتركيز (انظر القسم 2). ومن ثم، فإن تكلفة الاحتجاز في العمليات المختلفة (مصانع الأسمنت والحديد، ومعامل التكرير)، تتفاوت إلى حد بعيد بحيث تتراوح من 25 إلى 115 دولاراً أمريكياً للطن من ثاني أكسيد الكربون الصافي المحتجز. ووحدة التكلفة للاحتجاز تكون، بصفة عامة، أدنى في حالة العمليات التي ينتج في إطارها مجرى نقي نسبياً من ثاني أكسيد الكربون (مثال ذلك، معالجة الغاز الطبيعي، وإنتاج الهيدروجين وغاز النشادر)، كما يتضح من محطات الهيدروجين المبينة في الجدول م ف – 4، حيث تتراوح التكاليف من 2 إلى 56 دولاراً أمريكياً للطن الواحد من ثاني أكسيد الكربون الصافي المحتجز.

ويمكن للطرق الجديدة أو المحسنة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون، إذا اقترنت بها تصميمات متطورة لنظم لتوليد الكهرباء وللعمليات الصناعية، أن تخفِّض تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون واحتياجاته من الطاقة، وفي حين أن تكاليف الجيل الأول من المحطات التجارية كثيراً ما تتجاوز التقديرات الأولية للتكاليف فإن تكاليف المحطات التالية تنخفض عادة نتيجة للتعلم بالممارسة وغير ذلك من العوامل. ورغم أن الابهام مازال يكتنف إلى حد كبير حجم وتوقيت التخفيضات المقبلة في التكاليف، فإن المؤلفات

الجدول م ف – 4 – ملخص تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون في حالة محطات الهيدروجين الجديدة على أساس التكنولوجيا الحالية

الأداء ومقاييس التكاليف	محطة هيدروجين جديدة			
	الحد			القيمة البيانية (Rep. Value)
	الأدنى		الأقصى	
عامل الانبعاث بدون الاحتجاز (كغم ثاني أكسيد الكربون/ غيغاجول)	78	–	174	137
عامل الانبعاث مع الاحتجاز (كغم ثاني أكسيد الكربون/ غيغاجول)	7	–	28	17
النسبة المئوية لتخفيض ثاني أكسيد الكربون الصافي لكل غيغاجول (%)	72	–	96	86
كفاءة المحطة مع الاحتجاز، على أساس القيمة الحرارية الدنيا (%)	52	–	68	60
احتياجات الاحتجاز من الطاقة (% لزيادة المدخلات/ غيغاجول)	4	–	22	8
تكلفة الهيدروجين بدون الاحتجاز (دولار أمريكي/ غيغاجول)	6.5	–	10.0	7.8
تكلفة الهيدروجين مع الاحتجاز (دولار أمريكي/ غيغاجول)	7.5	–	13.3	9.1
الزيادة في تكلفة الهيدروجين مع الاحتجاز (دولار أمريكي/ غيغاجول)	0.3	–	3.3	1.3
النسبة المئوية للزيادة في تكلفة الهيدروجين مع الاحتجاز (%)	5	–	33	15
تكلفة ثاني أكسيد الكربون الصافي المحتجز (دولار أمريكي للطن من ثاني أكسيد الكربون)	2	–	56	15
مستوى الثقة في تكلفة الاحتجاز	معتدلة إلى مرتفعة			

* المختصرات: انظر حواشي الجدول م ف – 3. الملاحظات: [أ] تستند الحدود العليا والدنيا إلى بيانات الجدول 3.1.1 الوارد في التقرير الخاص. وجميع التكاليف الواردة في هذا الجدول تتعلق بالاحتجاز وحده ولا تشمل تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. والتكاليف مذكورة بسعر الدولار الأمريكي الثابت في عام 2002. [ب] مواد التلقيم لمحطات الهيدروجين هي الغاز الطبيعي (4.7 إلى 5.3 دولارات/ غيغاجول) أو الفحم (0.9 إلى 1.3 دولار/غيغاجول)؛ وتنتج بعض المحطات التي تتضمنها مجموعة البيانات الكهرباء إضافة إلى الهيدروجين. [ج] تتراوح عوامل التكلفة الثابتة من 13 إلى 20 في المائة. [د] جميع التكاليف تشمل تكلفة ضغط ثاني أكسيد الكربون لكنها لا تشمل تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (انظر الفصل 8 للاطلاع على التكلفة الكاملة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه).

المتاحة توحي بأنه، لو استمرت جهود البحث والتطوير، فإن التحسينات التي ستدخل على التكنولوجيات التجارية يمكن أن تخفض تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون بما لا يقل عن 20 إلى 30% على مدى السنوات العشر المقبلة تقريباً، بينما يمكن للتكنولوجيا الجديدة الجاري تطويرها أن تحقق تخفيضات أكبر في التكلفة. وستتوقف التخفيضات المقبلة في التكلفة على نشر واعتماد التكنولوجيات التجارية في الأسواق وعلى مواصلة البحث والتطوير.

4- نقل ثاني أكسيد الكربون

يجب نقل ثاني أكسيد الكربون المحتجز من موضع احتجازه إلى موقع تخزين ما لم تكن منشآت الاحتجاز واقعة فوق موقع التخزين الجيولوجي مباشرة. ويستعرض هذا القسم الطرق الرئيسية لنقل ثاني أكسيد الكربون ويقيِّم الجوانب المتعلقة بالصحة والسلامة والبيئة والتكلفة.

طرق نقل ثاني أكسيد الكربون

تُعتبر حالياً خطوط الأنابيب تكنولوجيا سوقية ناضجة وهي أكثر الطرق شيوعاً لنقل ثاني أكسيد الكربون. ويُضغط عادة ثاني أكسيد الكربون الغازي بحيث يتجاوز الضغط الذي يبلغ 8 ميغابسكالات تجنباً لنظم التدفق على مرحلتين وعملاً على زيادة كثافة ثاني أكسيد الكربون، مما يجعل نقله أكثر سهولة وأقل تكلفة. ويمكن أيضاً نقل ثاني أكسيد الكربون سائلاً في السفن أو في الشاحنات الصهريجية التي تسير على الطرق أو على السكك الحديدية وتنقل ثاني أكسيد الكربون داخل صهاريج معزولة على درجة حرارة ومعدلات ضغط تقل كثيراً عن درجات الحرارة ومعدلات الضغط المحيطة.

وقد بدأ تشغيل أول خط أنابيب طويل المسافة في بداية السبعينات من القرن العشرين. وفي الولايات المتحدة تنقل سنوياً خطوط أنابيب تمتد أكثر من 2500 كم ما يربو على 40 ميغاطناً من ثاني أكسيد الكربون الناشئ عن مصادر طبيعية وبشرية إلى مواقع في تكساس حيث يُستخدم في الاستخراج المحسن للنفط. وتعمل هذه الخطوط بطريقة "المرحلة الكثيفة" (التي تتميز بالتدرج المتواصل من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة، دون حدوث مرحلة تغير محددة)، وبدرجة الحرارة والضغط المرتفع المحيطين. وفي معظم خطوط الأنابيب المذكورة يدفع تدفق ثاني أكسيد الكربون بواسطة أجهزة ضغط توجد في نهاية مرحلة الإنتاج، وإن كانت بعض هذه الخطوط مزودة بمحطات ضغط وسيطة (تقوية).

وقد يكون نقل ثاني أكسيد الكربون بالسفن أكثر جاذبية في بعض الحالات أو المواضع، وبخاصة عندما يلزم نقل ثاني أكسيد الكربون على مسافات طويلة أو فيما وراء البحار. وتُنقل غازات البترول المسيّلة (LPG وهي أساساً البروبين والبوتين) على نطاق تجاري واسع بواسطة الناقلات البحرية. ويمكن نقل ثاني أكسيد الكربون بالسفن بطريقة تكاد لا تختلف (بضغط يبلغ عادة 0.7 ميغابسكال)، لكن ذلك يحدث في الوقت الحالي على نطاق صغير نظراً لأن الطلب محدود. وتشبه خصائص ثاني أكسيد الكربون المسيّل خصائص غازات البترول المسيّلة، ويمكن الارتقاء بالتكنولوجيا إلى مستوى الناقلات الكبيرة لثاني أكسيد الكربون إذا وُجد طلب على مثل هذه النظم.

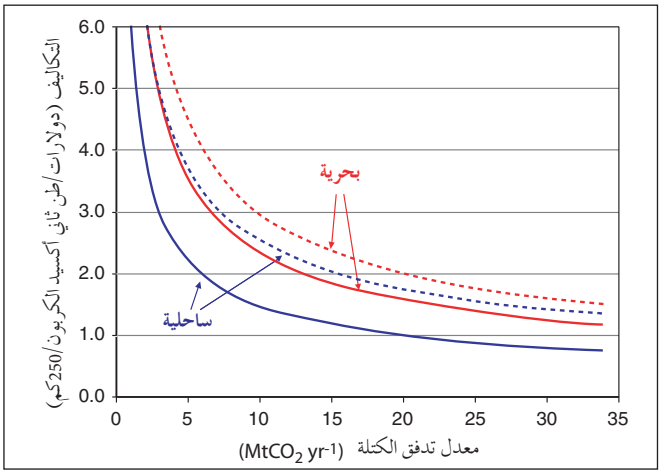
وتعتبر الشاحنة الصهريجية التي تسير على الطرق أو السكك الحديدية خيارات ممكنة تقنياً أيضاً. وهذه النظم تنقل ثاني أكسيد الكربون على درجة حرارة تبلغ 20 درجة مئوية تحت الصفر وبضغط يبلغ 2 ميغابسكال.

بيد أنها غير اقتصادية مقارنة بخطوط الأنابيب أو السفن، إلا على نطاق محدود جداً، ومن غير المرجح أن تصبح مناسبة لعمليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على نطاق واسع.

الجوانب المتعلقة بالبيئة والسلامة والمخاطر

كما أن هناك معايير مقبولة بالنسبة لخطوط أنابيب الغاز الطبيعي فإنه ينبغي، مع زيادة تطور البنية الأساسية لخطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون، أن تنشأ معايير دنيا بخصوص "نوعية خطوط أنابيب" ثاني أكسيد الكربون. فالمعايير الحالية، التي وضعت إلى حد بعيد في سياق الاستخراج المحسن للنفط، ليست بالضرورة مطابقة للمعايير المطلوبة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون. فانخفاض المحتوى النتروجيني مهم في حالة الاستخراج المحسن للنفط، لكنه لن يكون على نفس هذه الدرجة من الأهمية بالنسبة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون واحتجازه. ومع ذلك قد يلزم تعيين حد أقصى أكثر انخفاضاً فيما يخص المحتوى من سلفات الهيدروجين في حالة خط لأنابيب لنقل ثاني أكسيد الكربون يمر عبر مناطق مأهولة. كذلك فإن الأمر يقتضي، في حالة نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط أنابيب تمر بمناطق مأهولة، رسم خط سيره بصورة تفصيلية، وتزويده بأجهزة لحمايته من الضغط المفرط ولاكتشاف التسرب، وغير ذلك من عوامل التصميم. بيد أنه ليست هناك عقبات رئيسية منظورة بالنسبة لتصميم خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون.

يمكن لثاني أكسيد الكربون أن يتسرب إلى الغلاف الجوي خلال نقله، وإن كانت فواقد التسرب من خطوط الأنابيب ضئيلة جداً. وثاني أكسيد الكربون الجاف (الخالي من الرطوبة) لا يسبب تآكل الصلب المحتوي على الكربون – المنغنيز الذي يُستخدم عادة في خطوط الأنابيب، حتى لو كان ثاني أكسيد الكربون يحتوي على ملوثات مثل الأكسجين، وسلفات الهيدروجين، وأكسيدات الكبريت أو النتروجين. وخلافاً لذلك، فإن ثاني أكسيد الكربون الرطب يسبب التآكل إلى حد بعيد، بحيث ينبغي لخط أنابيب ثاني أكسيد الكربون أن يكون مصنوعاً، في هذه الحالة، من سبائك مقاومة للتآكل، أو أن يكون مبطناً بسبيكة أو بطبقة متواصلة من البوليمر. وتصنع بعض خطوط الأنابيب من سبائك مقاومة للتآكل رغم أن تكلفة



الشكل م ف – 5 – تكاليف النقل بخطوط الأنابيب البرية والبحرية بالدولار للطن من ثاني أكسيد الكربون ولمسافة 250 كم بالنسبة لمعدل تدفق كتلة ثاني أكسيد الكربون. ويبين الرسم البياني التقديرات العليا (الخطوط المنقوطة) والتقديرات الدنيا (الخطوط المستمرة).

الشكل م ف – 6 – التكاليف، مبينة بالدولار للطن من ثاني أكسيد الكربون المنقول مقابل المسافة، بالنسبة لخطوط الأنابيب البرية، وخطوط الأنابيب البحرية، والنقل بالسفن. وقد احتسبت تكاليف خطوط الأنابيب المبينة على أساس تدفق كتلة ثاني أكسيد الكربون بمعدل 6 ميغاأطنان في السنة. وتشمل تكلفة النقل بواسطة السفن مرافق التخزين الوسيطة، ورسوم الموانئ، وتكاليف الوقود، وأعمال الشحن والتفريغ. وتشمل التكاليف أيضاً التكاليف الإضافية التي يتطلبها التسييل مقارنة بالضغط.

مواد الصنع تزيد أضعافاً على الصلب المحتوي على الكربون – المنغنيز. ويتراوح التسرب الكلي إلى الغلاف الجوي، في حالة السفن، من 3 إلى 4% لكل 1000 كم، مع احتساب كل من البخر والعادم الصادر عن محركات السفنية. ويمكن تخفيض البخر عن طريق الاحتجاز والتسييل، كما أن من شأن إعادة الاحتجاز أن تخفض التسرب إلى ما يتراوح من 1 إلى 2% لكل 1000 كم.

ويمكن أن تقع حوادث أيضاً. وفي حالة خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون الحالية، ويوجد معظمها في مناطق منخفضة الكثافة السكانية، كان عدد الحوادث المبلغ عنها أقل من حادثة واحدة في السنة (0.0003 للكيلومتر في السنة) ولم تحدث إصابات أو وفيات. ويتسق هذا مع التجربة في مجال خطوط أنابيب غاز الهيدروكربون، ومن المحتمل ألا تكون حوادث خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون أشد قسوة منها في حالة خطوط أنابيب الغاز الطبيعي. وبالنسبة للنقل البحري، فإن ناقلات غاز الهيدروكربون تنطوي على خطورة، لكن الاعتراف بالأخطار أفضى إلى وضع معايير لتصميم الناقلات وبنائها وتشغيلها، ومن ثم فإن حوادثها نادرة.

تكلفة نقل ثاني أكسيد الكربون

قُدرت تكاليف نقل ثاني أكسيد الكربون بواسطة خطوط الأنابيب والناقلات البحرية على السواء. وفي الحالتين تتوقف التكاليف بشدة على المسافة والكمية المنقولة. وفي حالة خطوط الأنابيب تتوقف التكاليف على ما إذا كان الخط برياً أو بحرياً، وما إذا كانت المنطقة شديدة الازدحام، وما إذا كانت هناك جبال أو أنهار كبيرة أو أراض متجمدة تعترض مسار خط الأنابيب. فهذه العوامل جميعها يمكن أن تضاعف السعر بالنسبة لطول الوحدة، مع وجود زيادات أكبر حتى من هذا المعدل في المناطق المأهولة. وتحتسب أي تكاليف إضافية لإعادة الضغط (محطات تقوية الضخ)، التي قد تكون مطلوبة لخطوط الأنابيب الطويلة، باعتبارها جزءاً من تكاليف النقل. وهذه التكاليف ضئيلة نسبياً ولا تدرج في التقديرات المعروضة في هذا القسم.

يبين الشكل م ف – 5 تكلفة النقل بخطوط الأنابيب لمسافة اسمية تبلغ 250 كم. وتتراوح هذه التكلفة، عادة، من 1 إلى 8 دولار للطن من ثاني أكسيد الكربون (4 دولارات إلى 30 دولاراً للطن من الكربون). ويبين الشكل أيضاً كيف أن تكلفة خطوط الأنابيب تتوقف على معدل تدفق كتلة ثاني أكسيد الكربون. وتمثل تكلفة الصلب نسبة كبيرة من تكلفة خطوط الأنابيب، ومن ثم فإن تقلب هذه التكلفة (كتضاعفها مثلاً في الفترة من عام 2003 إلى عام 2005) يمكن أن يؤثر على الحسابات الاقتصادية الشاملة لخط الأنابيب.

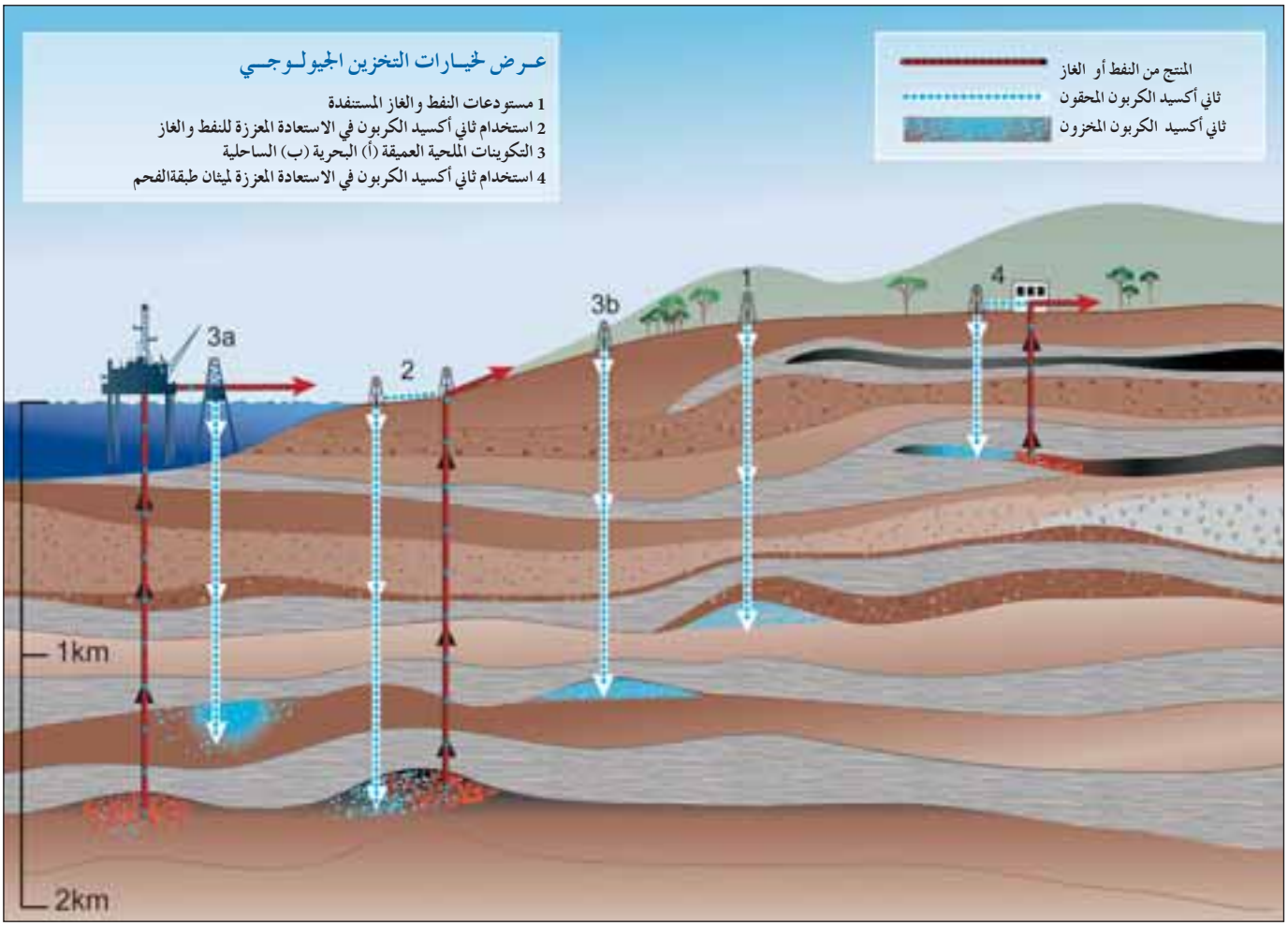
وفي حالة النقل البحري، يمثل حجم الناقلات وخصائص نظم التحميل والتفريغ بعضاً من العوامل الرئيسية التي تحدد التكلفة الشاملة للنقل. والتكاليف المقترنة بضغط ثاني أكسيد الكربون وتسييله محتسبة تكاليف الاحتجاز المعروضة من قبل. ويقارن الشكل م ف – 6 بين تكاليف النقل بخطوط الأنابيب وتكاليف النقل البحري، ويبيّن مسافة التعادل. والخيار البحري، عند توافره، يكون عادة أرخص من خطوط الأنابيب بالنسبة للمسافات التي تزيد على 1.000 كم تقريباً وللكميات التي تقل عن بضعة ملايين من أطنان ثاني أكسيد الكربون في السنة. وفي حالة التخزين البحري فإن أنسب نظام للنقل يتوقف على طريقة الحقن: من سفينة طافية ثابتة، أو من سفينة متحركة، أو من خط أنابيب من البر.

5– التخزين الجيولوجي

يتناول هذا القسم الأنواع الثلاثة من التكوينات الجيولوجية التي بُحثت باستفاضة فيما يتعلق بالتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون وهي: خزانات النفط والغاز، والتكوينات الملحية العميقة، والطبقات الحاملة للفحم غير القابلة للتعدين (الشكل م ف – 7). ويحدث التخزين الجيولوجي، في كل حالة، عن طريق حقن ثاني أكسيد الكربون في شكل مكثف في تكوين صخري تحت سطح الأرض. وتعتبر تكوينات الصخور المسامية، التي تحمل، أو حملت في السابق (كما في حالة خزانات النفط والغاز المستنفدة)، موائع، من قبيل الغاز الطبيعي أو النفط أو الماء الملحي، من المواقع التي يُحتمل أن تكون مرشحة لتخزين ثاني أكسيد الكربون. ويمكن أن توجد التكوينات المناسبة للتخزين في الأحواض الرسوبية البرية والبحرية على السواء (المنخفضات الطبيعية الكبيرة في القشرة الأرضية المملوءة بالرواسب). كما يمكن استخدام الطبقات الحاملة للفحم في تخزين ثاني أكسيد الكربون (انظر الشكل م ف – 7) حيث لا يرجح أن يحدث تعدين للفحم في وقت لاحق وبشرط أن تكون نفاذيتها كافية. ومازال خيار تخزين ثاني أكسيد الكربون في الطبقات الحاملة للفحم وتحسين إنتاج غاز الميثان في طوْر البيان العملي (انظر الجدول م ف – 1).

المشروعات الحالية لتخزين ثاني أكسيد الكربون

يجري التخزين الجيولوجي للبترول حالياً في ثلاثة مشروعات على نطاق صناعي (مشروعات في حدود 1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة أو أكثر) هي: مشروع سلايبنر (Sleipner) في بحر الشمال، ومشروع ويبرن Weyburn في كندا، ومشروع عين صلاح في الجزائر. وهي تحتجز وتخزن في التكوينات الجيولوجية، ما يتراوح سنوياً، من 3 إلى 4 ميغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون كانت، بغير هذه المشروعات، وتنطلق إلى الغلاف الجوي. ويسرد الجدول م ف – 5 مشروعات إضافية في هذا المجال.



الشكل م ف – 7 – طرق تخزين ثاني أكسيد الكربون في التكوينات الجيولوجية الجوفية العميقة. ويمكن الجمع ما بين طريقتين في استخراج الهيدروكربونات هما: الاستخراج المحسن للنفط (2) والاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم. انظر النص للاطلاع على شرح لهاتين الطريقتين (إهداء من مركز البحوث التعاونية لثاني أكسيد الكربون).

وإضافة إلى المشروعات الحالية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، يجري سنوياً حقن 30 ميغاطناً من ثاني أكسيد الكربون من أجل الاستخراج المحسن للنفط، ويحقن معظم هذه الكمية في تكساس، الولايات المتحدة الأمريكية، حيث بدأ اللجوء إلى الاستخراج المحسن في أوائل السبعينات. ويتم الحصول على معظم هذه المقادير من ثاني أكسيد الكربون من الخزانات الطبيعية لثاني أكسيد الكربون التي اكتشفت في الأقاليم الغربية من الولايات المتحدة، ويأتي بعضها من مصادر بشرية من قبيل معالجة الغاز الطبيعي. وينتج مع النفط الكثير من ثاني أكسيد الكربون المستخدم في الاستخراج المحسن للنفط، بحيث يفصل عنه ثم يعاد حقنه. وفي نهاية استخراج النفط يمكن احتجاز ثاني أكسيد الكربون بغرض التخفيف من حدة تغير المناخ، بدلاً من تصريفه في الغلاف الجوي. ومن المعتزم القيام بذلك في مشروع ويرن.

تكنولوجيا التخزين وآلياته

ينطوي حقن ثاني أكسيد الكربون في التكوينات الجيولوجية العميقة على الكثير من نفس التكنولوجيات التي استُحدثت في قطاع التنقيب عن النفط والغاز وإنتاجهما. والتطبيقات الحالية لتكنولوجيا حفر الآبار، وتكنولوجيا الحقن، والمحاكاة الحاسوبية لديناميات مستودعات التخزين، وطرق المراقبة يجري تطويرها إلى مدى أبعد بقصد استخدامها في تصميم وتطبيق عمليات التخزين الجيولوجي. كذلك توفر الممارسات الأخرى للحقن الجوفي خبرة تطبيقية في هذا المجال. وبصفة خاصة، أجريت في كندا والولايات المتحدة، منذ عام 1990 عمليات لتخزين الغاز الطبيعي، والحقن العميق للنفايات السائلة، والتخلص من الغاز الحمضي (خلائط من ثاني أكسيد الكربون وسلفات الهيدروجين) بكميات على مستوى الميغاطن أيضاً.

ومن المتوقع بصفة عامة أن يجري تخزين ثاني أكسيد الكربون في مستودعات الهيدروكربونات أو التكوينات الملحية العميقة على أعماق تزيد على 800 متر، حيث تؤدي عادة الضغوط ودرجات الحرارة المحيطة إلى أن يكون ثاني أكسيد الكربون في حالة سائلة أو فوق حرجة. وفي ظل هذه الأوضاع، تتراوح كثافة ثاني أكسيد الكربون من 50 إلى 80% من كثافة الماء. وهذه كثافة قريبة من كثافة بعض أنواع النفط الخام، مما يسفر عن قوى طفوية تميل إلى دفع ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى. ومن ثم فإن وجود صخرة مانعة للتسرب منعاً جيداً فوق مستودع التخزين المختار يعد أمراً مهماً لضمان بقاء ثاني أكسيد الكربون محتبساً في باطن الأرض. وعندما يحقن ثاني أكسيد الكربون في جوف الأرض فإنه يضغط على

الحيز المسامي ويملؤه عن طريق الازاحة الجزئية للموائع الموجودة فيه بالفعل ('الموائع الأصلية'). وفي مستودعات الغاز والنفط، يمكن أن تؤدي إزاحة الموائع الأصلية بفعل ثاني أكسيد الكربون المحقون إلى إتاحة معظم الحجم المسامي لتخزين ثاني أكسيد الكربون. وتقديرات التخزين المحتمل أدنى من ذلك في حالة التكوينات الملحية إذ تتراوح بين مستوى ضئيل يبلغ قلة قليلة من النقاط المئوية إلى أكثر من 30% من الحجم الكلي للصخرة.

وبعد حقن ثاني أكسيد الكربون في تكوين التخزين، فإن النسبة المحتجزة تتوقف على مزيج من آليات الحبس المادية والجيوكيميائية. ويتحقق الحبس المادى لمنع تسرب ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى عن طريق وضع طبقة من الصخور الطفلية والصلصالية فوق تكوين التخزين. وتعرف باسم 'صخرة السقف'. ويمكن توفير حبس مادي إضافي عن طريق القوى الشعرية التي تبقي على ثاني أكسيد الكربون في الحيز المتاح داخل التكوين. بيد أنه يحدث في كثير من الحالات أن يظل جانب أو أكثر من تكوين التخزين مفتوحاً، مما يسمح بالتسرب الجانبي لثاني أكسيد الكربون تحت مستوى صخرة السقف. وفي هذه الحالات من المهم الاستعانة بآليات إضافية لحبس ثاني أكسيد الكربون المحقون على المدى الطويل.

وتحدث الآلية المعروفة بالحبس الجيوكيميائي عندما يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الموائع الأصلية والصخرة المضيفة. ففي البداية يذوب ثاني أكسيد الكربون في الماء الموجود أصلاً في صخرة التخزين. وعندما يحدث ذلك (على مدى فترات زمنية تتراوح من مئات إلى آلاف السنين)، تزداد كثافة المياه المحملة بثاني أكسيد الكربون، ومن ثم ترسب في التكوين (بدلاً من الصعود نحو السطح). وبعد ذلك، تحدث تفاعلات كيميائية بين ثاني أكسيد الكربون المذاب والمعادن الصخرية الأيونية النوع، بحيث يتحول جزء من ثاني أكسيد الكربون المحقون إلى معادن كربونية صلبة بعد ملايين السنين.

وهناك نوع آخر من الاحتباس يحدث عندما يمر ثاني أكسيد الكربون بعملية الامتزاز التفاضلي على الفحم أو الأحجار الطفلية الغنية بالمواد العضوية ويحل محل الغازات التي كانت موجودة مثل غاز الميثان. وفي هذه الحالات يظل ثاني أكسيد الكربون محتبساً ما بقيت الضغوط ودرجات الحرارة ثابتة. ومن المعتاد أن تحدث هذه العمليات على أعماق أكثر ضحالة من مستودعات الهيدروكربونات والتكوينات الملحية التي يخزن فيها ثاني أكسيد الكربون.

التوزيع الجغرافي لمواقع التخزين وسعتها

على نحو ما سلف بيانه في القسم 2 (الشكل م ف – 2 ب) فإن الأقاليم التي تضم أحواضاً رسوبية يمكن أن تكون مناسبة لتخزين ثاني أكسيد الكربون توجد في كل أرجاء العالم، في البر والبحر على حد سواء. ويركز هذا التقرير على مستودعات النفط والزيت، والتكوينات الملحية العميقة والطبقات الحاملة للفحم غير القابلة للتعدين. وتمثل التكوينات أو الهياكل الجيولوجية الممكنة الأخرى (مثل البازالت، والطفل المحتوي على النفط أو الغاز، وكهوف الملح، والمناجم المهجورة) فرصاً خاصة قائمة بذاتها، أو أنها لم تدرس حتى الآن بالقدر الكافي لتقدير إمكاناتها.

ويعرض الجدول م ف – 6 بإيجاز تقديرات الإمكانات التقنية[6] لمختلف خيارات التخزين الجيولوجي. وتستند التقديرات ومستويات الثقة إلى المؤلفات المتوافرة، سواء التقديرات الإقليمية التي تتدرج من المستوى الأدنى إلى المستوى الأعلى، أو العالمية التي تتدرج من المستوى الأعلى إلى المستوى الأدنى. ولا تتضمن المؤلفات أي نهج احتمالي لتقييم التقديرات الخاصة بسعة مواقع التخزين، وهذا أمر مطلوب لوضع تقدير كمي ويمكن التعويل عليه لمستويات الإبهام التي تكتنف هذه المواقع. والتقديرات

الجدول م ف – 5 – مواقع يجري فيها تخزين ثاني أكسيد الكربون، أو جاري العمل في انشائها، أو من المزمع إنشاؤها، وتتراوح من المشروعات التجريبية الصغيرة إلى التطبيقات التجارية الكبيرة

اسم المشروع	البلد	بداية الحقن (السنة)	المتوسط التقريبي لمعدل الحقن اليومي (طن ثاني أكسيد الكربون/ يوم)	مجموع التخزين (المقرر) (طن ثاني أكسيد الكربون/ يوم)	نوع مستودع التخزين
ويبرن	كندا	2000	5.000–3.000	20.000.000	استخراج محسن للنفط
عين صلاح	الجزائر	2004	4.000–3.000	17.000.000	حقل غاز
سلايبنر	النرويج	1996	3.000	20.000.000	تكوين ملحي
ك 12 ب (K12B)		2004	100 (planned for 2006+ 1.000)	8.000.000	استخراج محسن للغاز
فريو	الولايات المتحدة الأمريكية	2004	177	1600	تكوين ملحي
فن بيغ فالي (Fenn Big Valley)	كندا	1998	50	200	استخراج محسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
حوض كنشوي (Qinshui)	الصين	2003	30	150	استخراج محسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
يوباري (Yubari)	اليابان	2004	10	200	استخراج محسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
ريكوبول	بولندا	2003	1	10	استخراج محسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
غورغون (مقرر)	أستراليا	2009–	10.000	غير معروف	تكوين ملحي
سنوفيت (مقرر)	النرويج	2006	2.000	غير معروف	تكوين ملحي

[6] الإمكانات التقنية هي المقدار الذي يمكن به تخفيض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري عن طريق تنفيذ تكنولوجيا أو ممارسة جرى بيانها العملي بالفعل.

الشاملة، لاسيما تلك المتعلقة بالحد الأعلى للإمكانات، تتباين بدرجة كبيرة وتنطوي على درجة عالية من الإبهام، مما يعبر عن تضارب المنهجيات المتبعة في المؤلفات وعن كون معرفتنا بالتكوينات الملحية محدودة تماماً في معظم أجزاء العالم. وتتوافر تقديرات أفضل بمستودعات النفط والغاز، تستند إلى إحلال أحجام من ثاني أكسيد الكربون محل أحجام من الهيدروكربونات. وتجدر الإشارة إلى أنه باستثناء الاستخراج المحسن للنفط، فإن هذه المستودعات لن تتاح لتخزين ثاني أكسيد الكربون إلى حين استنفاد الهيدروكربونات، وأن تغيرات الضغط والآثار الجيوميكانيكية الناجمة عن إنتاج الهيدروكربونات في المستودع قد تحد من السعة الفعلية.

إلا أن هناك طريقة أخرى للنظر إلى إمكانات التخزين وهي التساؤل عما إذا كان من المرجح أن تكون كافية لكميات ثاني أكسيد الكربون اللازم تجنبها باستخدام نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في ظل سيناريوهات مختلفة لتثبيت غازات الاحتباس الحراري وافتراضات مختلفة بشأن نشر الخيارات الأخرى للتخفيف من حدة تغير المناخ. وتتراوح الحدود المقدرة للإمكانات الاقتصادية[7] لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه خلال القرن القادم من 200 إلى 2000 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون في السنة تقريباً، وذلك وفقاً للمناقشة الواردة لهذا الموضوع في الفصل 8. وتشير الحدود الدنيا الواردة في الجدول م ف – 6 إلى أن من المؤكد[8] تقريباً أن سعة التخزين على الصعيد العالمي تبلغ 200 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون، ومن الأرجح[9] أن تبلغ ما لا يقل عن 2000 غيغاطن.

والتقنيات التي استحدثت لاستكشاف مستودعات النفط والغاز ومواقع تخزين الغاز الطبيعي ومواقع التخلص من النفايات السائلة تصلح لتحديد خصائص مواقع التخزين الجيولوجية لثاني أكسيد الكربون. وتشمل الأمثلة على ذلك التصوير السيزمولوجي، واختبارات الضخ لتقييم تكوينات التخزين وعوازل التسرب وسجلات سلامة الأسمنت. وتستخدم برامج الحاسوب التي تضع نماذج لحركة ثاني أكسيد الكربون تحت الأرض في دعم أنشطة تحديد خصائص الموقع واختياره. وكانت هذه البرامج قد وضعت أصلاً لاستخدامات مثل هندسة مستودعات النفط والغاز واستكشافات موارد المياه الجوفية. وعلى الرغم من أنها تحتاج إلى الكثير من العمليات الفيزيائية والكيميائية والجيوميكانيكية اللازمة للتنبؤ بأداء تخزين ثاني أكسيد الكربون (CO_2) على المديين القصير والطويل، فإن ثمة حاجة إلى المزيد من الخبرة لتوفير الثقة في فعاليتها من حيث التنبؤ بالأداء على المدى الطويل الأجل لدى تكييفها لتناسب تخزين ثاني أكسيد الكربون. وعلاوة على ذلك فإن توافر بيانات تحديد خصائص موقع جيدة يشكل عنصراً أساسياً في موثوقية النماذج.

تقييم المخاطر والآثار البيئية

إن المخاطر الناجمة عن التسرب من تخزين ثاني أكسيد الكربون في المستودعات الجيولوجية تندرج في فئتين عريضتين هما: المخاطر العالمية والمخاطر المحلية. وتشمل المخاطر العالمية انطلاق ثاني أكسيد الكربون مما قد يسهم بدرجة كبيرة في تغير المناخ إذا تسربت بعض أجزاء من تكوينات التخزين إلى الغلاف الجوي. وعلاوة على ذلك، إذا تسرب ثاني أكسيد الكربون من تكوينات التخزين، قد تنشأ أخطار محلية على الإنسان والنظم الإيكولوجية والمياه الجوفية. وهذه هي المخاطر المحلية.

وفيما يتعلق بالمخاطر العالمية واستناداً إلى الرصدات وتحليل مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون الحالية والنظم الطبيعية والنظم والنماذج الهندسية، من الأرجح[10] أن تتجاوز النسبة المتبقية في المستودعات التي اختيرت وأديرت بصورة ملائمة 99 في المائة خلال مائة عام، ومن المرجح أن تتجاوز 99 في المائة خلال 1000 عام. ومن المحتمل أن تبقى نسب مماثلة لفترات زمنية أطول مع الانخفاض المتوقع في مخاطر التسرب بمرور الوقت حيث إن آليات أخرى توفر احتجازاً إضافياً. ويتناول القسم 8 مسألة ما إذا كانت النسب المحتجزة سوف تكفي لجعل التخزين غير الدائم قيّما لأغراض التخفيف من حدة تغير المناخ.

وفيما يتعلق بالمخاطر المحلية، هناك نوعان من السيناريوهات التي قد يحدث فيها التسرب. في الحالة الأولى قد يؤدي فشل حقن الآبار أو يؤدي التسرب من الآبار المهجورة إلى حدوث انطلاق مفاجئ وسريع لثاني أكسيد الكربون. ومن المحتمل اكتشاف هذا النمط من الانطلاق بسرعة ووقفه باستخدام التقنيات المتاحة اليوم من أجل احتواء انفجارات الآبار. وتؤثر الأخطار المرتبطة بهذا النمط من الانطلاق بالدرجة الأولى في العاملين في المواقع القريبة من موقع الانطلاق وقت حدوثه أو أولئك الذين يستدعون للسيطرة على الانفجار. وتركيز ثاني أكسيد الكربون بنسبة تزيد على 7–10 في المائة في الهواء سوف يتسبب في وجود أخطار مباشرة على حياة البشر وصحتهم. وقد تستغرق عملية احتواء هذه الأنواع من الانطلاقات ما بين ساعات وأيام، ومن المحتمل أن تكون كمية ثاني أكسيد الكربون المنطلقة صغيرة للغاية بالمقارنة بمجموع الكمية المحقونة. وتدار

الجدول م ف – 6 – سعة التخزين لعدد من خيارات التخزين الجيولوجي. وتشمل سعة التخزين خيارات تخزين غير اقتصادية

نوع المستودع	التقديرات الدنيا لسعة التخزين (غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون)	التقديرات العليا لسعة التخزين (غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون)
حقول نفط وغاز	675[أ]	900[أ]
طبقات حاملة للفحم غير قابلة للتعدين (الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم)	3–15	200
تكوينات ملحية عميقة	1.000	غير مؤكدة لكن من الممكن أن تكون[10][أ]

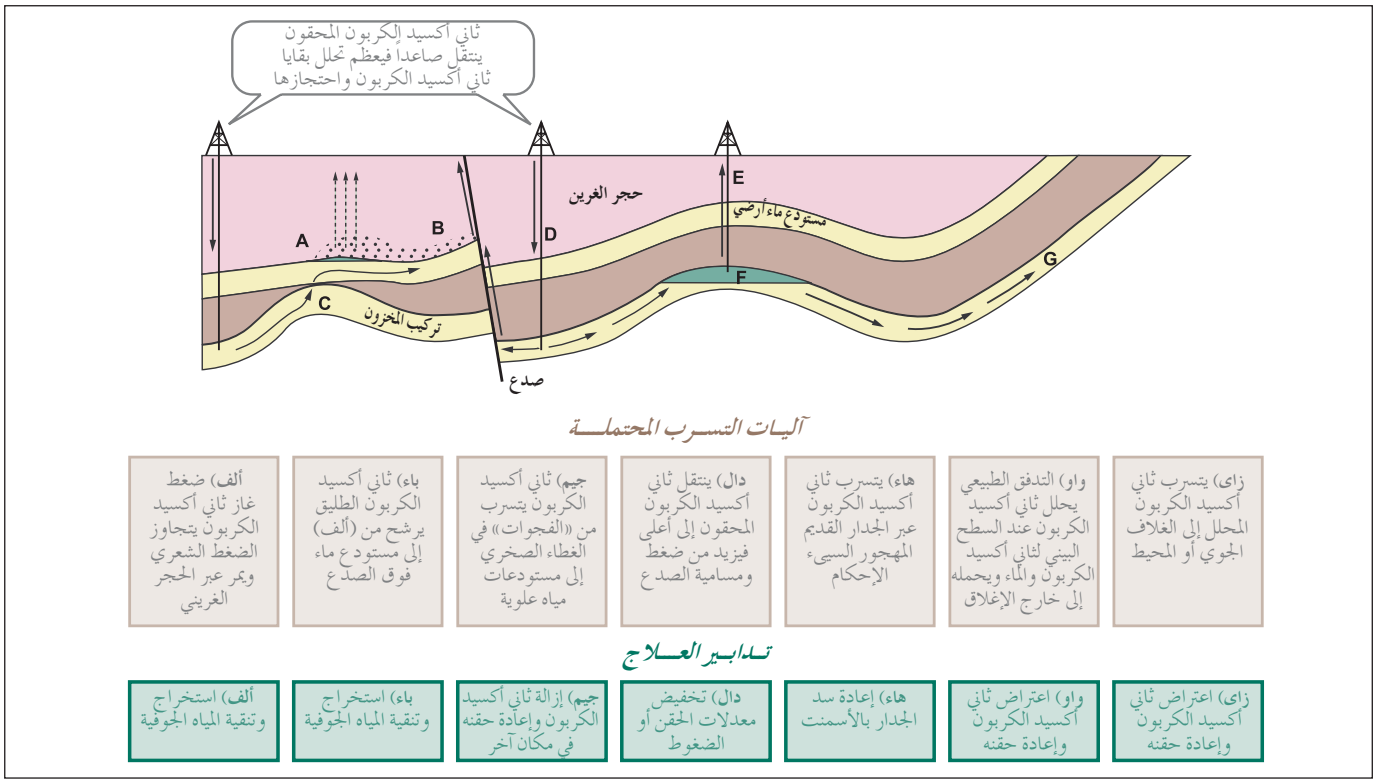
[أ] تزيد هذه الأرقام بنسبة 23% إذا أدرجت في هذا التقدير حقول النفط والغاز "غير المكتشفة".

[7] الإمكانات الاقتصادية هي مدى إمكانية تخفيض غازات الاحتباس الحراري وفقاً لخيار محدد يمكن تحقيقه على نحو يتسم بفعالية التكاليف في ظل الظروف السائدة (السعر الذي تتكلفه تخفيضات ثاني أكسيد الكربون وتكاليف الخيارات الأخرى).

[8] تعني عبارة "من المؤكد تقريباً" احتمالاً نسبته 99% أو أكثر.

[9] تعني عبارة "من المرجح" احتمالاً يتراوح من 66 إلى 90 في المائة.

[10] تعني عبارة "من الأرجح" احتمالاً يتراوح من 90 إلى 99 في المائة.



الشكل م ف – 8 – مسارات التسرب المحتملة وتقنيات الإصلاح بالنسبة لثاني أكسيد الكربون الذي يُحقن في تكوينات مالحة. وسوف تتوقف تقنية الإصلاح على مسارات التسرب المحتملة المحددة في مستودع (Courtesy CO2CRC).

هذه الأنماط من الأخطار بفعالية بصفة منتظمة في صناعة النفط والغاز باستخدام ضوابط هندسية وإدارية.

وفي السيناريو الثاني، يمكن أن يحدث التسرب من خلال أخطاء غير مكتشفة أو شروخ أو من خلال التسرب من الآبار حيث يحدث الانطلاق إلى السطح بصورة أكثر تدرجاً وانتشاراً. وفي هذه الحالة، تؤثر الأخطار أساساً في الطبقات الحاملة لمياه الشرب والنظم الإيكولوجية حيث يتجمع ثاني أكسيد الكربون في المنطقة الواقعة بين السطح وأعلى منسوب المياه. ويمكن أن تتأثر المياه الجوفية مباشرة بتسرب ثاني أكسيد الكربون إلى سطح الطبقة الحاملة للمياه، وبالمياه المالحة التي تدخل إلى الطبقة الحاملة للمياه التي يكون ثاني أكسيد الكربون قد حل محلها خلال عملية الحقن. كما قد يحدث تحميض للتربة وإزاحة للأكسجين من التربة في هذا السيناريو. وعلاوة على ذلك، إذا حدث التسرب إلى الغلاف الجوي في المناطق المنخفضة مع وجود قدر ضئيل من الرياح، أو في مصارف أو مبان تحتية تعلو هذه التسربات المنتشرة، سوف يتضرر الإنسان والحيوان إذا استمر التسرب دون أن يكتشفه أحد. وسوف يكون تضرر الإنسان من التسرب من مواقع التخزين البحرية أقل من تضرره من مواقع التخزين البرية. ويمكن تحديد مسارات التسرب بواسطة تقنيات مختلفة ومن خلال تحديد خصائص المستودع. ويبين الشكل م ف – 8 بعض مسارات التسرب المحتملة في التكوينات المالحة. وعندما تكون مسارات التسرب المحتملة معروفة، يمكن مواءمة استراتيجية الرصد والإصلاح لمواجهة التسرب المحتمل.

ويعتبر التصميم الدقيق لنظام التخزين وتحديد موقعه، إلى جانب الطرق الكفيلة بالكشف المبكر عن التسرب (وهو ما يفضل أن يحدث قبل وصول ثاني أكسيد الكربون إلى سطح الأرض)، وسائل فعالة للحد من الأخطار المرتبطة بالتسرب المنتشر. والواقع أن طرق الرصد المتاحة واعدة ولكن يلزم مزيد من الخبرة لتحديد مستويات للاكتشاف والاستبانة. وبعد اكتشاف التسربات، تتوافر بعض تقنيات الإصلاح لوقفها أو السيطرة عليها. واعتماداً على نوع التسرب، تشمل هذه التقنيات تقنيات معيارية لإصلاح الآبار، أو استخراج ثاني أكسيد الكربون باعتراض تسربه إلى طبقة مياه جوفية ضحلة (انظر الشكل م ف – 8). كذلك تتوافر تقنيات لإزالة ثاني أكسيد الكربون من التربة والمياه الجوفية إلا أنها قد تكون باهظة التكاليف. وستلزم خبرة لبيان الفعالية والتأكد من التكاليف الخاصة بهذه التقنيات لاستخدامها في تخزين ثاني أكسيد الكربون.

المراقبة والتحقق

المراقبة جزء هام جداً من استراتيجية إدارة المخاطر الشاملة في مشاريع التخزين الجيولوجي. ولم توضع حتى الآن إجراءات معيارية أو بروتوكولات ولكن من المتوقع أن تنشأ مع تحسن التكنولوجيا، تبعاً للمخاطر واللوائح المحلية. غير أن من المتوقع قياس بعض البارامترات مثل معدل الحقن وضغط بئر الحقن روتينياً. وقد تبينت فائدة المسوحات السيزمية المتكررة في تتبع حركة ثاني أكسيد الكربون تحت الأرض. وقد تكون التقنيات الأحدث مثل قياسات الجاذبية والكهربية مفيدة أيضاً. كذلك فإن أخذ عينات من المياه الجوفية والتربة في الطبقة الواقعة بين السطح ومنسوب المياه قد يكون مفيداً للكشف المباشر عن تسرب ثاني أكسيد الكربون. ومن الممكن وضع أجهزة استشعار لثاني أكسيد الكربون مزودة بأجهزة إنذار عن آبار الحقن لكفالة سلامة العاملين ولاكتشاف التسرب. ويمكن أيضاً استخدام التقنيات السطحية في كشف وتحديد الانطلاقات السطحية كمياً. وتؤدي بيانات

خط الأساس رفيعة الجودة إلى تحسين موثوقية واستبانة جميع القياسات وسوف تكون عنصراً أساسياً في كشف معدلات التسرب الصغيرة.

ونظراً لأن جميع تقنيات المراقبة هذه قد تم تكييفها من تطبيقات أخرى، فإن من الضروري تجربتها وتقييمها فيما يتعلق بالموثوقية والاستبانة والحساسية في سياق التخزين الجيولوجي. ولدى جميع المشاريع الصناعية القائمة والمشاريع التجريبية برامج لوضع واختبار هذه التقنيات وغيرها من تقنيات المراقبة. وقد يكون وجود طرق ضرورياً أو مستحسناً أيضاً لمراقبة كمية ثاني أكسيد الكربون المخزونة تحت الأرض في سياق متطلبات الإبلاغ عن الانبعاثات ورصدها في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (انظر القسم 9). ونظراً للطابع طويل الأجل لتخزين ثاني أكسيد الكربون، قد تكون المراقبة ضرورية لفترات طويلة للغاية.

القضايا القانونية

لم يضع في الوقت الحالي سوى عدد قليل من البلدان أطراً قانونية وتنظيمية بصورة محددة للتخزين البحري لثاني أكسيد الكربون. وتشمل التشريعات ذات الصلة تلك المتعلقة بالنفط، وتشريعات مياه الشرب، وقواعد التعدين. وفي كثير من الحالات، تتوافر قوانين تسري على بعض، إن لم يكن معظم، القضايا ذات الصلة بتخزين ثاني أكسيد الكربون. وعلى وجه التحديد، فإن قضايا المسؤولية طويلة الأجل مثل القضايا العالمية المرتبطة بتسرب ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي فضلاً عن دواعي القلق المحلية بشأن التأثيرات على البيئة لم تعالج بعد. وقد تقوم نظم المراقبة والتحقق ومخاطر التسرب بدور هام في تحديد المسؤولية والعكس بالعكس. كما أن هناك بعض الاعتبارات أيضاً مثل طول عمر المؤسسات، وعمليات المراقبة الجارية، وإمكانية نقل المعارف المؤسسية. فالمنظور الطويل الأجل يشكل عنصراً أساسياً في الإطار القانوني لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه حيث إن فترات التخزين تمتد عبر عدة أجيال، شأنها في ذلك شأن مشكلة تغير المناخ. وينبغي في بعض البلدان، وبخاصة الولايات المتحدة، النظر في حقوق الملكية الخاصة بجميع أولئك الذين أصابهم ضرر من الناحية القانونية حيث إن الحيز المسامي مملوك لأصحاب الممتلكات السطحية.

ووفقاً للمبادئ العامة للقانون الدولي العرفي، للدول أن تمارس سيادتها على أراضيها ومن ثم تستطيع أن تنخرط في أنشطة مثل تخزين ثاني أكسيد الكربون (الجيولوجي والبحري) في المناطق الواقعة ضمْن ولايتها. غير أنه إذا كان للتخزين تأثير عابر للحدود فإن الدول تتحمل مسؤولية ضمان ألا تتسبب الأنشطة التي تجري ضمن ولايتها أو تحت سيطرتها في أضرار للبيئة في دول أخرى أو في مناطق تتجاوز حدود ولايتها الوطنية.

ويوجد في الوقت الحاضر العديد من المعاهدات (وبخاصة اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار واتفاقيتي لندن[11] وOSPAR[12]) التي يمكن أن تنطبق على حقن ثاني أكسيد الكربون في البيئات البحرية (في المحيطات وفي باطن أرض قاع البحار الجيولوجي على حد سواء) وقد صيغت هذه المعاهدات جميعها دون إيلاء اهتمام خاص لتخزين ثاني أكسيد الكربون. ووجد تقييم أجراه فريق المحكمين واللغويين لاتفاقية OSPAR (المتعلقة بإقليم شمال شرق الأطلسي) مثلاً أنه، تبعاً لطريقة الحقن والغرض منه، قد يتوافق حقن ثاني أكسيد الكربون في باطن أرض قاع البحار وفي المحيطات مع المعاهدة في بعض الحالات، مثلاً عندما يُنقل ثاني أكسيد الكربون عن طريق خط أنابيب من البر، ويقوم الأطراف في اتفاقية لندن بإجراء تقييم مماثل في الوقت الحاضر. وعلاوة على ذلك، خلصت أبحاث المعلقين القانونيين إلى أن احتجاز ثاني أكسيد الكربون من عملية استخراج للنفط أو للغاز الطبيعي وتخزينه البحري في تكوينات جيولوجية (مثل عملية Sleipner) لا يعتبر "إغراقا" بمقتضى اتفاقية لندن ولذلك لن يكون محظوراً بمقتضى هذه الاتفاقية.

التصور العام

يستعصى إجراء تقييم للتصور العام لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه وذلك بسبب الطابع التقني و"البعيد" نسبياً لهذه المسألة في الوقت الحاضر. وتشير نتائج الدراسات القليلة للغاية التي أجريت حتى الآن للتصور العام لعملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه إلى أن الجمهور عامة ليس مطلعاً بالقدر الكافي على هذه العملية. فإذا قُدمت المعلومات بجانب تلك المتعلقة بالخيارات الأخرى للتخفيف من حدة تغير المناخ، فإن الدراسات القليلة التي أجريت حتى الآن تشير إلى أن هذه العملية تعتبر عموماً أقل استحساناً من الخيارات الأخرى مثل إدخال تحسينات على كفاءة الطاقة واستخدام مصادر الطاقة غير الأحفورية. ويتسم قبول عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، حيثما تحدث، بأنه "على مضض" وليس "بحماس". وفي بعض الحالات، يكون ذلك انعكاساً لتصور أن هذه العملية قد تكون مطلوبة بسبب الفشل في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بطرق أخرى. وثمة إشارات إلى أن النظرة إلى التخزين الجيولوجي يمكن أن تكون إيجابية إذا طبق بالترافق مع تدابير أكثر استحساناً. وعلى الرغم من أن التصور العام قد يتغير في المستقبل، فإن البحوث المحدودة التي أجريت حتى الآن تبين أن هناك شرطين على الأقل ينبغي استيفاؤهما قبل أن يعتبر الجمهور عملية احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون تكنولوجياً معقولة بجانب الخيارات الأخرى المعروفة بصورة أفضل هما: (1) ضرورة اعتبار تغير المناخ العالمي البشري المصدر مشكلة خطيرة نسبياً؛ (2) وجوب قبول الحاجة إلى إحداث تخفيضات كبيرة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للحد من خطر تغير المناخ العالمي.

تكلفة التخزين الجيولوجي

تُستخدم التكنولوجيات والمعدات المستعملة في التخزين الجيولوجي على نطاق واسع في صناعتي النفط والغاز، ولذا فإن تقديرات تكاليف هذا الخيار تنطوي على درجة عالية نسبياً من الثقة في قدرة التخزين على النطاق المنخفض من الإمكانات الفنية. غير أن هناك نطاقاً كبيراً وتقلبية في التكاليف نتيجة لعوامل تتعلق بالموقع مثل المناطق البرية مقابل المناطق البحرية، وعمق المستودع والخصائص الجيولوجية لتكوينات الخزان (مثل النفاذية وسُمك التكوينات).

وتتراوح عادة التقديرات التي تصوّر تكاليف التخزين في التكوينات الملحية وحقول النفط والغاز المستنفدة من 05 إلى 8 دولارات أمريكية للطن

(11) اتفاقية منع التلوث البحري الناجم عن إغراق النفايات ومواد أخرى (1972) وبروتوكول لندن التابع لها (1996) الذي لم يبدأ نفاذه بعد.

(12) اتفاقية حماية البيئة البحرية في شمال شرق الأطلسي، التي اعتمدت في باريس (1992) وكلمة OSPAR هي اختصار لكلمتي أوسلو – باريس.

من ثاني أكسيد الكربون المحقون. ويضاف إلى ذلك تكاليف الرصد التي تتراوح من 0.1 إلى 0.3 دولار للطن من ثاني أكسيد الكربون. وأقل تكاليف التخزين هي تلك الخاصة بالمستودعات عالية النفاذية في المناطق البرية الضحلة و/أو مواقع التخزين التي يمكن فيها إعادة استخدام الآبار والبنية الأساسية من حقول النفط والغاز القائمة.

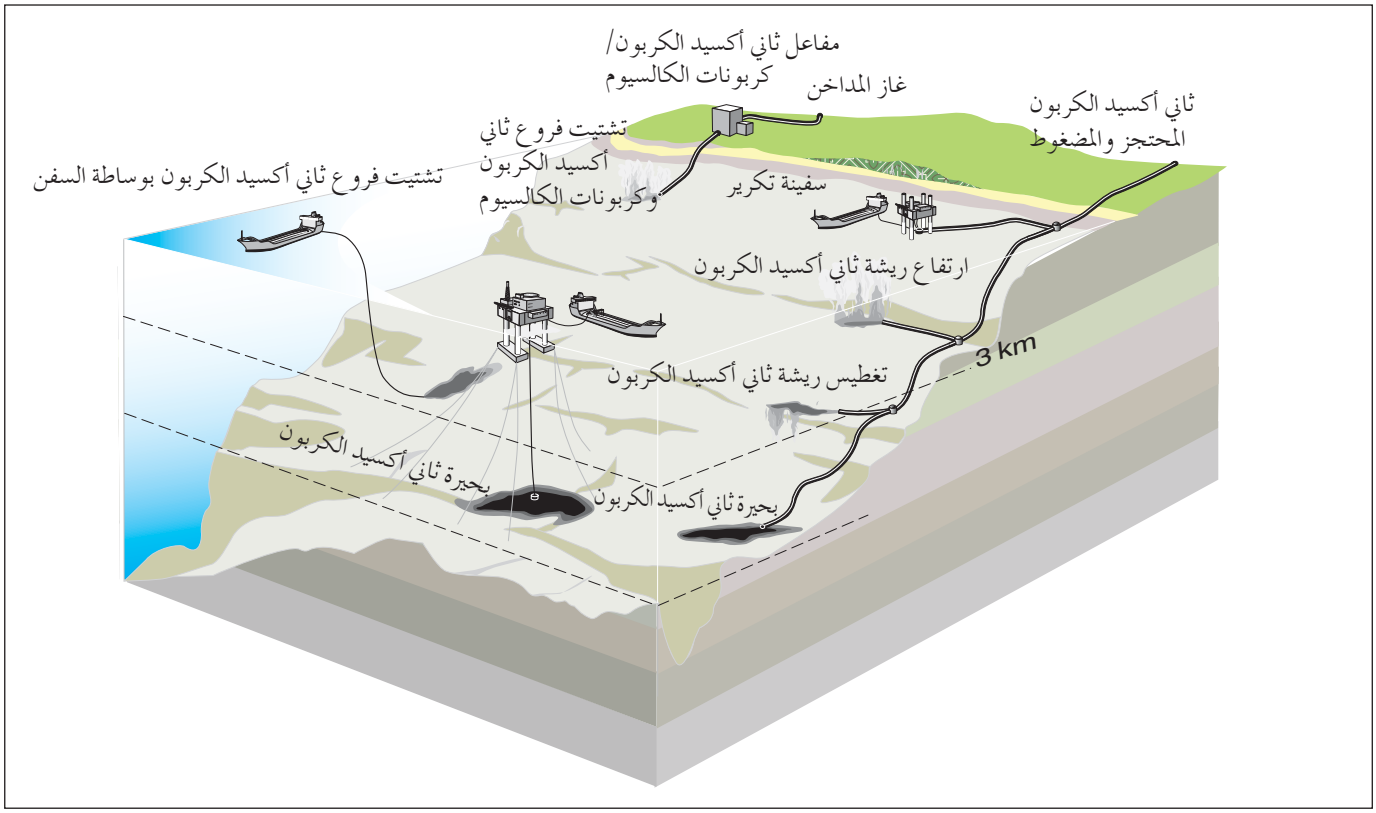
وعندما يقترن التخزين بالاستخراج المحسن للنفط (EOR) أو الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم (ECBM) أو الاستخراج المحسن للغاز (EGR)، يمكن أن تؤدي القيمة الاقتصادية لثاني أكسيد الكربون إلى خفض مجموع تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. واستناداً إلى البيانات وأسعار النفط قبل عام 2003، فإن الإنتاج المحسن للنفط برياً مع تخزين ثاني أكسيد الكربون يمكن أن يحقق منافع صافية تتراوح من 10 دولارات إلى 16 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون (من 37 إلى 59 دولاراً للطن من الكربون) (بما في ذلك تكاليف التخزين الجيولوجي). وبالنسبة للاستخراج المحسن للغاز والاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم اللذين مازالا قيد التطوير، لا توجد أية معلومات تكاليفية يُعتد بها استناداً إلى التجربة الفعلية. ولكن في جميع الحالات تعتمد المنافع الاقتصادية للإنتاج المحسن اعتماداً شديداً على أسعار النفط والغاز. وفي هذا الصدد، فإن أساس المؤلفات التي يعتمد عليها هذا التقرير لا تأخذ في الاعتبار ارتفاع الأسعار العالمية للنفط والغاز منذ عام 2003 ويفترض أن تكون أسعار النفط في حدود 15–20 دولاراً للبرميل الواحد. فإذا ما استمرت أسعار النفط في الارتفاع خلال فترة مشروع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، فإن القيمة الاقتصادية لثاني أكسيد الكربون ستزيد عما هو مذكور في هذا التقرير.

6- التخزين في المحيطات

يتمثل أحد الخيارات الممكنة لتخزين ثاني أكسيد الكربون في حقن ثاني أكسيد الكربون المحتجز حقناً مباشراً في أعماق المحيطات (على عمق يزيد على 1000 متر) حيث يُعزل معظمه من الغلاف الجوي لعدة قرون . ويمكن تحقيق ذلك بنقل ثاني أكسيد الكربون عن طريق خطوط الأنابيب أو سفن إلى موقع تخزين في المحيط، حيث يُحقن في عمود مياه المحيط أو في قاع البحر. وسوف يصبح ثاني أكسيد الكربون المنحل والمتناثر جزءاً من دورة الكربون العالمية. ويبين الشكل م ف – 9 بعضاً من الطرق الرئيسية التي يمكن استخدامها في هذا المجال. و لم يُستخدم التخزين في المحيطات أو تُجرى بيانات عملية له حتى الآن على مستوى تجريبي ومازال في طوْر البحوث. غير أنه كانت هناك تجارب حقلية صغيرة، ودراسات نظرية ومختبرية ونمذجية طوال 25 عاماً عن التخزين المتعمد لثاني أكسيد الكربون في المحيطات.

آليات وتكنولوجيا التخزين

تغطي المحيطات أكثر من 70 في المائة من سطح الأرض ويبلغ متوسط عمقها 3800 متر. ونظراً لأن ثاني أكسيد الكربون يذوب في الماء، فإن هناك تبادلاً طبيعياً لثاني أكسيد الكربون بين الغلاف الجوي والمياه عند سطح المحيط يحدث إلى أن يتم الوصول إلى مرحلة التوازن. فإذا زاد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، يستوعب المحيط كمية إضافية منه. وبهذه الطريقة استوعبت المحيطات نحو 500 غيغاطن من ثاني أكسيد الكربون (140 غيغاطناً من الكربون) من المجموع البالغ 1300 غيغاطن (350 غيغاطناً من الكربون) من الانبعاثات البشرية المصدر المطلقة في الغلاف الجوي خلال



الشكل م ف – 9 – طرق التخزين في المحيطات

المائتي عام الماضية. ونتيجة لزيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من الأنشطة البشرية بالنسبة إلى المستوى الذي كان سائداً قبل عصر الصناعة، تستوعب المحيطات الآن ثاني أكسيد الكربون بمعدل يبلغ حوالي 7 غيغاأطنان سنوياً (2 غيغاطن من الكربون سنوياً).

ويستقر معظم ثاني أكسيد الكربون هذا الآن في الطبقات العليا من المحيطات مما أدى إلى خفض الرقم الهيدروجيني (PH) بنسبة تبلغ حوالي 0.1 عند سطح المحيط نظراً للطابع الحمضي لثاني أكسيد الكربون في الماء. غير أنه لم يحدث حتى الآن أي تغيير تقريباً في الرقم الهيدروجيني PH في أعماق المحيطات. وتتنبأ النماذج بأن المحيطات سوف تستوعب خلال القرون العديدة القادمة معظم ثاني أكسيد الكربون المطلق في الغلاف الجوي بالنظر إلى أن ثاني أكسيد الكربون ينحل على سطح المحيطات ويختلط بعد ذلك بمياه الطبقات العميقة منها.

ولا توجد أية حدود مادية عملية لكمية ثاني أكسيد الكربون البشري المصدر التي يمكن تخزينها في المحيطات. غير أن الكمية المخزونة سوف تتوقف، على أساس آلاف السنين، على توازن المحيطات مع الغلاف الجوي. فتثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بين 350 جزءاً من المليون حسب الحجم و1000 جزء من المليون حسب الحجم سوف يعني استقرار ما بين 2000 غيغاطن و12.000 من ثاني أكسيد الكربون في نهاية المطاف في المحيطات إذا لم يكن هناك حقن متعمد لثاني أكسيد الكربون. ولذا فإن هذا النطاق يمثل الحدود القصوى لقدرة المحيطات على تخزين ثاني أكسيد الكربون من خلال الحقن النشط. ويمكن أن تتأثر القدرة أيضاً بالعوامل البيئية مثل التغيير الأقصى المسموح به في الرقم الهيدروجيني PH.

ويشير تحليل رصدات ونماذج المحيطات إلى أن ثاني أكسيد الكربون المحقون سوف يُعزل عن الغلاف الجوي لعدة مئات من السنين على الأقل، وأن النسبة المحتجزة تميل إلى الزيادة مع زيادة عمق الحقن (انظر الجدول م ف – 7). وتشمل الأفكار المطروحة لزيادة هذه النسبة المحتجزة تكوين هيدرات ثاني أكسيد الكربون الصلبة و/ أو بحيرات ثاني أكسيد الكربون السائل في قاع البحار وتحليل المعادن القلوية مثل الحجر الجيري لمعادلة ثاني أكسيد الكربون الحمضي. ويمكن أن يؤدي حل كربونات المعادن، إذا كان عملياً، إلى تمديد النطاق الزمني للتخزين إلى نحو 10.000 سنة مع التقليل إلى أدنى حد ممكن في نفس الوقت من الرقم الهيدروجيني PH في المحيطات، والضغط الجزئي من ثاني أكسيد الكربون. غير أنه سوف يلزم لهذا النهج توفير كميات كبيرة من الحجر الجيري والطاقة لمناولة المواد (نفس الحجم تقريباً المماثل للأطنان من كميات ثاني أكسيد الكربون المحقونة واللازمة لكربنة المعادن؛ (انظر القسم 7).

التأثيرات والمخاطر الإيكولوجية والبيئية

سوف يؤدي حقن بضعة غيغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون إلى إحداث تغيير كبير في كيمياء المحيطات في منطقة الحقن في حين أن حقن مئات الغيغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون يحدث تغييرات أكبر في منطقة الحقن ويحقق في نهاية الأمر تغييرات كبيرة على مستوى حجم المحيط بأكمله. والمحاكاة بواسطة النماذج التي تفترض حدوث انطلاق من سبعة مواقع على عمق 3000 متر وتخزين في المحيط يوفر 10 في المائة من جهد التخفيف توخياً للتثبيت على مستوى 550 جزءاً من المليون حسب الحجم تتوقع حدوث تغييرات في الحموضة (تغييرات في الرقم الهيدروجيني PH) تتجاوز 0.4 على ما يقرب من 1 في المائة من حجم المحيط، وبالمقارنة، في حالة التثبيت على مستوى 550 جزءاً من المليون حسب الحجم دون تخزين في المحيط، أشارت التقديرات إلى حدوث تغيير في الرقم الهيدروجيني PH بنسبة تتجاوز 0.25 عند سطح المحيط نتيجة للتوازن مع تركيزات ثاني أكسيد الكربون المرفوعة في الغلاف الجوي. وفي كلتا الحالتين، فإن تغيراً في الرقم الهيدروجيني PH يتراوح من 0.2 إلى 0.4 يزيد زيادة كبيرة عن التغييرات في حموضة المحيطات قبل عصر الصناعة. وبمرور القرون، سوف يؤدي اختلاط المحيطات إلى عزل ثاني أكسيد الكربون المحقون. ومع وصول المزيد من ثاني أكسيد الكربون إلى مياه سطح المحيط يحدث الانطلاق إلى الغلاف الجوي بالتدريج من مناطق شاسعة من المحيطات. ولا تتوافر أية آلية معروفة للتصدي لانطلاق ثاني أكسيد الكربون المحقون انطلاقاً مفاجئاً أو كارثياً من المحيطات إلى الغلاف الجوي.

وتبين التجارب أن إضافة ثاني أكسيد الكربون يمكن أن تضر بالكائنات البحرية. وقد دُرست معظم تأثيرات زيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون على نطاقات زمنية تصل إلى عدة أشهر في كائنات فرادى تعيش بالقرب من سطح المحيط. وتشمل الظواهر التي رُصدت انخفاض معدلات التكلس والتكاثر والنمو وإمدادات الجهاز الدّوار للفقاريات بالأكسجين، والحركة فضلاً عن زيادة معدلات النفوق بمرور الوقت. وفي بعض الكائنات تشاهَدْ هذه التأثيرات استجابة للإضافات الصغيرة من ثاني أكسيد الكربون. ويتوقع حدوث النفوق المباشر بالقرب من نقاط الحقن أو بحيرات ثاني أكسيد الكربون. ولم تجر دراسة بعد للتأثيرات المزمنة للحقن المباشر لثاني أكسيد الكربون في المحيطات على الكائنات أو النظم الإيكولوجية الموجودة في المحيطات على امتداد مساحات شاسعة منها ولنطاقات زمنية طويلة.

ولم تجر أية تجارب محكومة على النظم الإيكولوجية في أعماق المحيطات، ولذا لم يجر سوى تقييم أولي للتأثيرات المحتملة على النظم الإيكولوجية. ومن المتوقع أن تزيد الانعكاسات على النظم الإيكولوجية

الجدول م ف – 7 – نسبة ثاني أكسيد الكربون المحتجزة للتخزين في المحيطات حسب المحاكاة على أساس نماذج سبعة محيطات لمدة 100 عام من الحقن المستمر على ثلاثة مستويات من العمق ابتداء من عام 2000

السنة	مستوى عمق الحقن		
	800 م	1500 م	3000 م
2100	0.06±0.78	0.05±0.91	0.01±0.99
2200	0.06±0.50	0.07±074	0.06±0.94
2300	0.06±0.36	0.08±060	0.10±0.87
2400	0.07±0.28	0.09±0.49	0.12±0.79
2500	0.07±0.23	0.09±0.42	0.14±0.71

الجدول م ف – 8 – تكاليف التخزين في المحيطات على أعماق تزيد على 3000 متر

طريقة التخزين في المحيطات	التكاليف (بالدولار لكل طن من ثاني أكسيد الكربون المحقون الصافي)	
	100 كيلومتر أمام الساحل	**500 كيلومتر أمام الساحل**
خطوط الأنابيب الثابتة	6	31
السفن المتنقلة/ المنصات[أ]	14–12	16–13

[أ] تكاليف خيار السفينة المتنقلة خاصة بالحقن على أعماق تتراوح من 2000 إلى 2500 م.

مع زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون وانخفاض الرقم الهيدروجيني PH، إلا أن طبيعة هذه الانعكاسات غير مفهومة حالياً، و لم تحدد بعد معايير بيئية لتجنب التأثيرات السلبية. وليس من الواضح الآن أيضاً ما إذا كانت الأنواع والنظم الإيكولوجية سوف تتأقلم مع التغييرات الكيميائية المستمرة.

تكاليف التخزين البحري

على الرغم من عدم توافر خبرة في مجال التخزين في المحيطات، بُذلت بعض المحاولات لتقدير تكاليف مشاريع تخزين ثاني أكسيد الكربون التي تطلق هذه المادة في قاع البحار أو في أعماق المحيطات. و لم تدرج تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله إلى الساحل (عن طريق خطوط الأنابيب مثلاً) في تكاليف التخزين في المحيطات. ولكن أدرجت تكاليف خطوط الأنابيب البحرية أو السفن إلى جانب أية تكاليف إضافية للطاقة. ويلخص الجدول م ف – 8 تكاليف التخزين في المحيطات. وتبين هذه الأرقام أن خيار خطوط الأنابيب الثابتة سوف يكون الأقل تكلفة بالنسبة للمسافات القصيرة. أما بالنسبة للمسافات الأطول، فإن السفينة المتنقلة أو النقل بواسطة السفن إلى منصة مع الحقن بعد ذلك سوف تكون أكثر جاذبية.

الجوانب القانونية والتصور العام

إن المعاهدات العالمية والإقليمية بشأن قانون البحار والبيئة البحرية مثل اتفاقيتي OSPAR ولندن المشار إليهما سلفاً في القسم 5 بالنسبة لمواقع التخزين الجيولوجية تؤثر أيضاً على التخزين في المحيطات حيث إنها تخص "المجال البحري". وتميز كلتا الاتفاقيتين بين طريقة التخزين المستخدمة والغرض من التخزين لتحديد الوضع القانوني لتخزين ثاني أكسيد الكربون في المحيطات، ولكن لم يتخذ حتى الآن قرار بشأن الوضع القانوني للتخزين العمدي في المحيطات.

ويبين العدد الضئيل جداً من دراسات التصور العام التي بحثت تخزين ثاني أكسيد الكربون في المحيطات أن هناك وعياً عاماً ضئيلاً أو دراية ضئيلة للغاية بهذا الموضوع. غير أن الجمهور أعرب في الدراسات القليلة التي أجريت حتى الآن عن تحفظات إزاء التخزين في المحيطات أكبر من تحفظاته بشأن التخزين الجيولوجي. كما أشارت هذه الدراسات إلى أن تصور التخزين في المحيطات تغير لدى تقديم المزيد من المعلومات. ففي إحدى الدراسات أدى ذلك إلى زيادة قبول ذلك التخزين في حين أدى في دراسة أخرى إلى درجة أقل من القبول. وتشير المؤلفات أيضاً إلى أن "معارضة كبيرة" قد نشأت إزاء تجربة مقترحة لإطلاق ثاني أكسيد الكربون في المحيط الهادئ.

7- كربنة المعادن والاستخدامات الصناعية

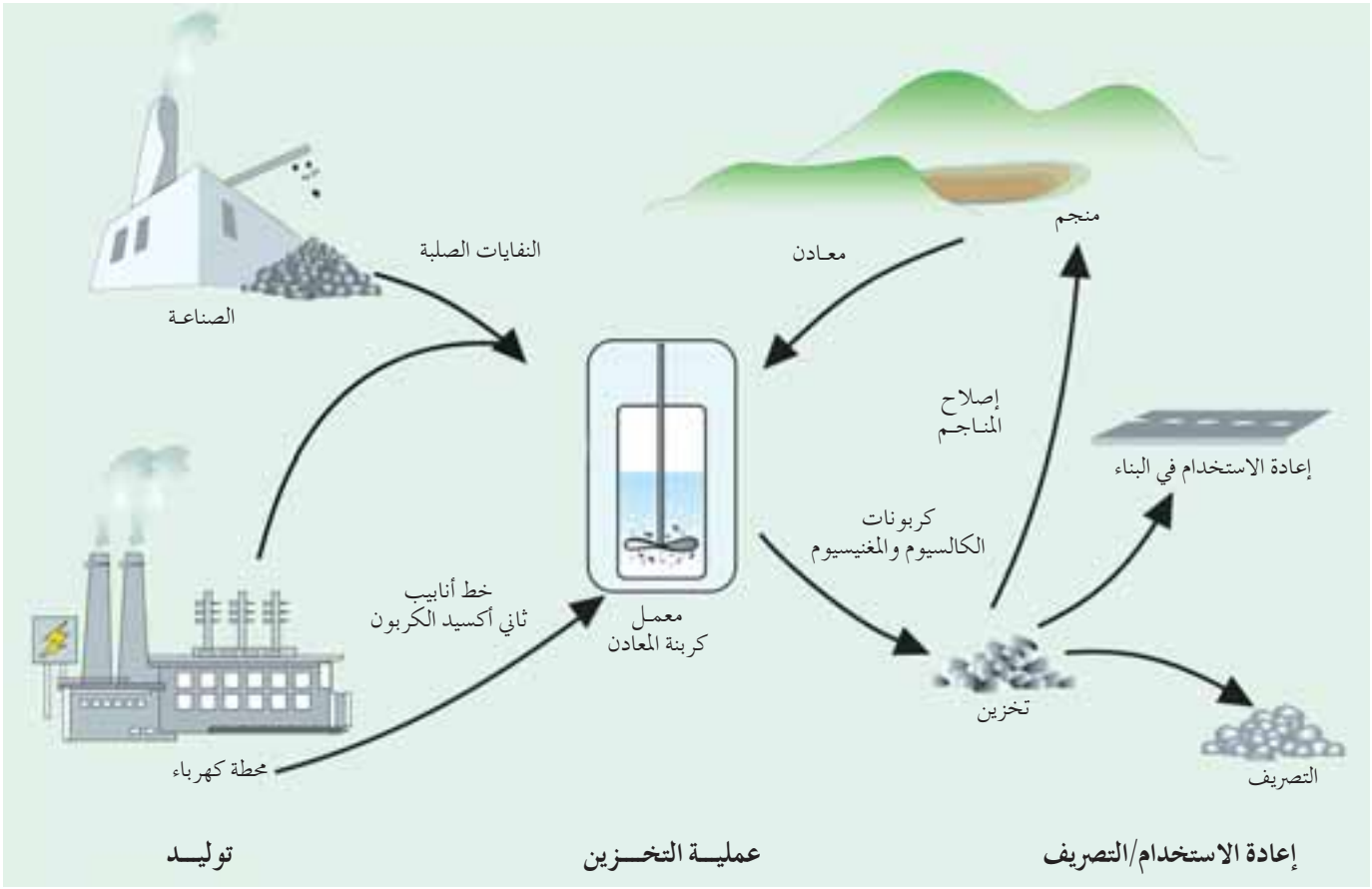
يتناول هذا القسم خيارين مختلفين بشأن تخزين ثاني أكسيد الكربون أولهما يتعلق بكربنة المعادن، التي تنطوي على تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى كربونات لاعضوية صلبة باستخدام تفاعلات كيميائية. والخيار الثاني هو الاستخدام الصناعي لثاني أكسيد لكربون سواء بصورة مباشرة أو غير مباشرة أو كمادة تلقيم لإنتاج مواد كيميائية شتى تحتوي على كربون.

كربنة المعادن: التكنولوجيا والآثار والتكاليف

تشير كربنة المعادن إلى تثبيت ثاني أكسيد الكربون باستخدام مادة قلوية أو أكسيدات ترابية قلوية من قبيل أكسيد المغنسيوم (MgO) وأكسيد الكالسيوم (CaO) التي توجد في صخور السيليكات التي تحدث طبيعياً مثل السيربنتاين والأوليفين. وتؤدي التفاعلات الكيميائية بين هذه المواد وثاني أكسيد الكربون إلى مركبات مثل كربونات المغنسيوم ($MgCO_3$) وكربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) (المعروفة باسم الحجر الجيري). وتتجاوز كمية أكسيدات المعادن في صخور السيليكات التي يمكن العثور عليها في قشرة الأرض الكميات اللازمة لتثبيت جميع كميات ثاني أكسيد الكربون التي ستنتج عن احتراق جميع احتياطيات الوقود الأحفوري المتوافرة. وتوجد هذه الأكسيدات أيضاً بكميات صغيرة في بعض النفايات الصناعية مثل خبث ورماد الصلب الذي لا يصدأ. وتنتج كربنة المعادن مادة السيليكا والكربونات التي تظل ثابتة لفترات طويلة، ويمكن لذلك التخلص منها في بعض الأماكن مثل مناجم السيليكا أو إعادة استخدامها في أغراض البناء (انظر الشكل م ف – 10) وإن كانت إعادة الاستخدام هذه قد تكون صغيرة بالمقارنة بالكميات المنتجة. وبعد الكربنة، لن ينطلق ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي. ولذا لن تكون هناك حاجة كبيرة إلى رصد مواقع التخلص وسوف تكون المخاطر المرتبطة بها منخفضة للغاية. ومن المتعذر تقدير إمكانات التخزين في هذه المرحلة المبكرة من التطور. وسوف تكون محدودة بنسبة احتياطيات السيليكات التي يمكن استغلالها من الناحية التقنية، وبالقضايا البيئية مثل حجم التخلص من النواتج، وبالمعوقات القانونية والمجتمعية في موقع التخزين.

وتحدث عملية كربنة المعادن بصورة طبيعية حيث تعرف باسم "التذرية". وفي الطبيعة تحدث هذه العملية ببطء شديد، ولذا يتعين الإسراع بها بدرجة كبيرة حتى تصبح طريقة تخزين سليمة لثاني أكسيد الكربون المحتجز من المصادر البشرية. ولذا تركز البحوث الخاصة بكربنة المعادن على إيجاد مسارات للعملية يمكن أن تحقق معدلات تفاعل سليمة للأغراض الصناعية، وزيادة كفاءة الطاقة المستخدمة في التفاعل. ومازالت تكنولوجيا كربنة المعادن باستخدام السيليكات الطبيعية في طور البحوث إلا أن بعض العمليات التي تستخدم النفايات الصناعية أصبحت الآن في طوْر البيان العملي.

وتتطلب العملية التجارية استخراج الخامات التي تحمل المعادن وصحنها وطحنها ثم نقلها إلى محطة المعالجة التي تتلقى مجرى ثاني أكسيد الكربون المركز من محطة الاحتجاز (انظر الشكل م ف – 10). وستكون الاحتياجات من الطاقة لأغراض عملية الكربنة ما بين 30 و50 في المائة من



الشكل م ف – 10 – تدفقات المواد وخطوات العملية المرتبطة بالكربنة المعدنية لصخور السيليكات أو المخلفات الصناعية (إهداء من شبكة التغير البيئي).

إنتاج محطة الاحتجاز. ونظراً للاحتياجات الإضافية من الطاقة لأغراض ثاني أكسيد الكربون المحتجز، سيحتاج نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) مع كربنة المعادن إلى ما يتراوح من 60 إلى 180 في المائة من مدخلات الطاقة بحسب الكيلوواط ساعة أكثر مما تحتاجه محطة كهرباء مقارنة لا يجرى فيها احتجاز أو كربنة معادن. وهذه الاحتياجات من الطاقة تؤدي إلى زيادة التكاليف بحسب الطن من ثاني أكسيد الكربون المتجنب زيادة كبيرة بالنسبة للنظام بوجه عام (انظر القسم 8). وأفضل حالة دُرست حتى الآن تتعلق بالكربنة المبتلة لأوليفين السيليكات الطبيعي. فالتكلفة التقديرية لهذه العملية تتراوح مما يقرب من 50 دولار إلى 100 دولار للطن من ثاني أكسيد الكربون المستخرج الصافي (علاوة على تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله ولكن مع مراعاة الاحتياجات الإضافية من الطاقة). وسوف تتطلب عملية كربنة المعادن ما بين 1.6 و3.7 أطنان من السيليكات لكل طن يستخلص من ثاني أكسيد الكربون، وتنتج 2.6 إلى 4.7 أطنان من المعادن التي سيجري التخلص منها لكل طن مخزون من ثاني أكسيد الكربون في شكل كربونات. ولذا ستكون عملية كبيرة، ذات تأثير بيئي مماثل لعمليات التعدين السطحي التي تجرى حالياً على نطاق كبير. ويحتوي السيربنتاين في كثير من الأحيان على كريسوتيل وهو شكل طبيعي من الأسبستوس. ولذا فإن وجوده يتطلب تدابير للمراقبة والتخفيف من النوع المتاح في صناعة التعدين. ومن الناحية الأخرى فإن منتجات كربنة المعادن خالية من الكريسوتيل حيث إن ذلك هو أكثر مكونات الصخور تفاعلاً ومن ثم أول مادة تتحول إلى كربونات.

ومازال هناك عدد من القضايا التي يلزم استيضاحها قبل تحديد أية تقديرات لإمكانات التخزين الخاصة بكربنة المعادن. وتتضمن القضايا عمليات تقييم للصلاحية التقنية والاحتياجات المقابلة من الطاقة على مستويات كبيرة، فضلاً عن نسبة احتياطيات السيليكات التي يمكن استغلالها تقنياً واقتصادياً من تخزين ثاني أكسيد الكربون. كما أن التأثيرات البيئية للتعدين والتخلص من النفايات وتخزين النواتج يمكن أن تحد من الإمكانات. ولا يمكن الآن تحديد مدى إمكانية استخدام كربنة المعادن حيث إنه يتوقف على الكمية غير المعروفة من احتياطيات السيليكات التي يمكن استخدامها تقنياً والقضايا البيئية من قبيل تلك المشار إليها أعلاه.

الاستخدامات الصناعية

تشمل الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون عمليات كيميائية وبيولوجية حيث يكون ثاني أكسيد الكربون عنصراً مفاعلاً، من قبيل العمليات التي تستخدم في إنتاج اليوريا والميثانول فضلاً عن مختلف التطبيقات التكنولوجية التي تستخدم ثاني أكسيد الكربون بصورة مباشرة، مثلاً في صناعة البستنة، والتبريد، وتعبئة الأغذية، واللحام، والمشروبات، وطفايات الحريق. ويستخدم ثاني أكسيد الكربون في الوقت الحالي بمعدل يقترب من 120 ميغاطناً سنوياً (30 ميغاطناً من الكربون) على نطاق العالم

باستثناء الاستخدام في الاستخراج المحسن للنفط (الذي جرت مناقشته في القسم 5). ويستخدم معظمه (ثلثا المجموع) في إنتاج اليوريا التي تستخدم في صناعة الأسمدة وغيرها من المنتجات. ويُستخرج بعض ثاني أكسيد الكربون من الآبار الطبيعية وينشأ البعض الآخر من المصادر الصناعية – وخاصة المصادر ذات التركيز العالي مثل غاز النشادر، والمحطات المنتجة للهيدروجين – التي تحتجز ثاني أكسيد الكربون كجزء من عملية الإنتاج.

ويمكن من حيث المبدأ أن تسهم الاستخدامات الصناعية في إبقاء ثاني أكسيد الكربون بعيداً عن الغلاف الجوي بتخزينه في "تجمع كيميائي للكربون" (أي مخزونات المنتجات المصنعة المحتوية على كربون). غير أن هذا الخيار، كإجراء للتخفيف من حدة تغير المناخ، لن يكون له معنى إلا إذا كانت كمية ثاني أكسيد الكربون المخزونة ومدة تخزينها كبيرة، وإذا كان هناك خفض صاف حقيقي في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ومدة العمر العادية لمعظم ثاني أكسيد الكربون المستخدم حالياً في العمليات الصناعية تنطوي على فترة تخزين لا تتجاوز أياماً إلى شهور. ويتحلل الكربون المخزون بعد ذلك إلى ثاني أكسيد الكربون ثم ينبعث مرة أخرى إلى الغلاف الجوي. وهذه النطاقات الزمنية القصيرة لا تسهم بصورة معقولة في التخفيف من حدة تغير المناخ. وعلاوة على ذلك، فإن رقم مجموع الاستخدامات الصناعية البالغ 120 ميغاطناً سنوياً من ثاني أكسيد الكربون يعتبر صغيراً بالمقارنة بالانبعاثات من المصادر البشرية الرئيسية (انظر الجدول م ف – 2). وفي حين أن بعض العمليات الصناعية تخزن نسبة ضئيلة من ثاني أكسيد الكربون (يبلغ مجموعها نحو 20 ميغاطناً سنوياً) لفترة تصل إلى عدة عقود، فإن الكمية الإجمالية للتخزين طويل الأجل (على مستوى القرون) في حدود ميغاطن واحد تقريباً الآن مع عدم وجود توقعات بحدوث زيادة كبيرة.

وثمة مسألة مهمة أخرى هي ما إذا كانت الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون يمكن أن تسفر عن خفض صاف بوجه عام لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بالإحلال محل عمليات ونواتج صناعية أخرى. ولا يمكن تقييم ذلك بصورة صحيحة الآن إلا بدراسة حدود نظام ملائم للموازنات بين الطاقة والمواد في عمليات استخدام ثاني أكسيد الكربون وبإجراء تحليل مفصل لدورة العمر للاستخدام المقترح لثاني أكسيد الكربون. والمؤلفات محدودة في هذا المجال إلا أنها تبين أن من المتعذر تقدير الأرقام الدقيقة وأن الاستخدامات الصناعية يمكن أن تؤدي في كثير من الحالات إلى زيادة الانبعاثات بوجه عام بدلاً من خفضها خفضاً صافياً. ونظراً لانخفاض النسبة التي يُبقى عليها من ثاني أكسيد الكربون، فإن الأحجام الصغيرة المستخدمة واحتمالات أن يؤدي الإحلال إلى زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، من الممكن استنتاج أن من المتوقع أن تكون مساهمة الاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون المحتجز في التخفيف من حدة تغير المناخ مساهمة صغيرة.

8- التكاليف والإمكانات الاقتصادية

إن صرامة المتطلبات المستقبلية للسيطرة على انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، والتكاليف المتوقعة لنظم احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون، سوف تحدد، إلى حد كبير، مدى استخدام تكنولوجيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالمقارنة بخيارات التخفيف من غازات الاحتباس الحراري الأخرى. ويوجز هذا القسم أولاً التكاليف الشاملة لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (CCS) بالنسبة للخيارات الرئيسية وتطبيقات العملية المشار إليها في الأقسام السابقة. وكلمة "التكاليف"، كما هي مستعملة في هذا الملخص وفي التقرير، لا تشير سوى إلى أسعار السوق ولكنها لا تتضمن التكاليف الخارجية مثل الأضرار التي تلحق بالبيئة والتكاليف المجتمعية الأوسع نطاقاً التي يمكن أن ترتبط باستخدام هذه العملية. ولم يُبذل سوى جهد ضئيل حتى الآن لتقييم هذه التكاليف الخارجية وتحديدها كمياً. ثم يجري فحص عملية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في سياق الخيارات البديلة لتحقيق انخفاضات في غازات الاحتباس الحراري في العالم.

تكلفة نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه

مازال، كما ذُكر سلفاً، لا يوجد سوى قدر ضئيل من الخبرة فيما يتعلق بالجمع ما بين احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه في نظام متكامل تماماً لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. وفي حين أن بعض عناصر هذا النظام تُستخدم بالفعل في الأسواق المتقدمة لبعض التطبيقات الصناعية، لم يستخدم هذا النظام حتى الآن في المحطات الكبيرة للطاقة (التطبيق بأكبر قدر من الإمكانات).

وتفيد المؤلفات بأن هناك نطاقاً عريضاً لتكاليف عناصر نظام احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (انظر الأقسام 3-7). ويرجع هذا النطاق بالدرجة الأولى إلى اختلاف العوامل ذات الصلة بالموقع ولاسيما خصائص التصميم والتشغيل والتمويل ذات الصلة بمحطات الطاقة أو المنشآت الصناعية التي يستخدم فيها هذا النظام، ونوع وتكاليف الوقود المستخدم، والمسافات المطلوبة والتضاريس والكميات التي تُنقل من ثاني أكسيد الكربون ونمط وخصائص تخزينه. وعلاوة على ذلك، ستظل الشكوك تحيط بأداء وتكلفة مكونات تكنولوجيا ذلك النظام والنظم المتكاملة. غير أن المؤلفات تعكس اعتقاداً واسع النطاق بأن تكلفة بناء وتشغيل نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون سوف تنخفض بمرور الوقت نتيجة للتعلم بالممارسة (من استخدام التكنولوجيا)، وعمليات البحوث والتطوير المستمرة. كما تشير القرائن التاريخية إلى أن تكاليف محطات الاحتجاز الأولى من نوعها قد تتجاوز التقديرات الحالية قبل أن تنخفض هذه التكاليف في وقت لاحق. وفي معظم نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، تمثل تكلفة الاحتجاز (بما في ذلك الضغط) أكبر عنصر من عناصر التكاليف. فتكاليف الكهرباء والوقود تتباين بدرجة كبيرة من بلد لآخر، وهذه العوامل تؤثر في السلامة الاقتصادية لخيارات النظام.

ويوجز الجدول م ف – 9 تكاليف احتجاز ونقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون التي وردت في الأقسام 3 إلى 7. كما يبيّن تكاليف الرصد. وفي الجدول م ف – 10 يجري تجميع تكاليف العناصر لإظهار مجموع تكاليف النظام (CCS) وتوليد الكهرباء من ثلاثة نظم للطاقة مع النقل بالأنابيب وخيارين للتخزين الجيولوجي.

وفي حالة المحطات المزودة بنظام للتخزين الجيولوجي دون تحقيق عائد من الاستخراج المحسن للنفط تتراوح تكاليف نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من 0.02–0.05 دولار للكيلوواط ساعة بالنسبة للمحطات التي تعمل بالفحم المسحوق و0.01–0.03 دولار بالكيلوواط

الجدول م ف – 9 – نطاقات تكاليف عام 2002 لعناصر نظام احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون المطبقة على نمط معين من محطات الطاقة أو المصادر الصناعية. ولا يمكن تجميع تكاليف العناصر كل على حدة لحساب تكاليف النظام بأكمله بدولارات الولايات المتحدة من ثاني أكسيد الكربون المتجمد. وجميع الأرقام تعبر عن المنشآت الكبيرة الجديدة بأسعار الغاز الطبيعي التي يفترض أنها تبلغ 2.8–4.4 دولارات للغيغاجول وأسعار الفحم التي يُفترض أنها تبلغ 1–1.5 دولار للغيغاجول.

عناصر نظام CCS	نطاق التكاليف	ملاحظات
الاحتجاز من محطات طاقة تعمل بالفحم أو الغاز	15–75 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون الصافي يُحتجز	التكاليف الصافية لثاني أكسيد الكربون المحتجز مقارنة بنفس المحطة دون احتجاز
الاحتجاز من إنتاج الهيدروجين وغاز النشادر أو معالجة الغاز	5 دولارات – 55 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون الصافي يُحتجز	ينطبق على المصادر عالية درجة النقاء التي تتطلب تجفيفاً أو ضغطاً بسيطين
احتجاز من المصادر الصناعية الأخرى	25–115 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون الصافي يُحتجز	يعبر النطاق عن استخدام عدد من التكنولوجيات والوقود المختلفة
النقل	1 دولار – 8 دولارات لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُنقل	لكل 250 كيلومتراً من خطوط الأنابيب أو الشحن بمعدلات تدفق كتلية تتراوح من 5 ميغاأطنان (على أعلى مستوى) إلى 40 (على أعلى مستوى) ميغاطناً من ثاني أكسيد الكربون سنوياً
التخزين الجيولوجي(أ)	0.5 دولار – 8 دولارات لكل طن من ثاني أكسيد الكربون الصافي يُحقن	مع استبعاد الإيرادات المحتملة من الاستخراج المحسن للنفط أو الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم
التخزين الجيولوجي: المراقبة والتحقق	0.1–0.3 دولار أمريكي لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يحقن	وهذا يشمل المراقبة قبل الحقن، وأثناءه، وبعده، ويتوقف على المتطلبات التنظيمية
التخزين في المحيطات	5 دولارات – 30 دولاراً لكل طن من صافي ثاني أكسيد الكربون يُحقن	بما في ذلك النقل البحري لمسافة تتراوح من 100 إلى 500 كيلومتر، مع استبعاد المراقبة والتحقق
كربنة المعادن	50 دولاراً – 100 دولار لكل طن من صافي ثاني أكسيد الكربون يتمعدن	نطاق أفضل حالة دُرست. وهو يشمل استخدام طاقة إضافية للكربنة

(أ) على المدى الطويل قد تكون هناك تكاليف إضافية للإصلاح والتبعات القانونية.

ساعة بالنسبة للمحطات التي تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة (وكلتاهما تستخدمان طريقة الاحتجاز بعد الاحتراق). وبالنسبة للمحطات التي تستخدم الدورة المختلطة للتغويز المتكامل (بطريقة الاحتجاز قبل الاحتراق)، تتراوح تكاليف النظام من 0.01 إلى 0.03 دولار للكيلوواط ساعة بالمقارنة بمحطات مماثلة ليس لديها نظام CCS. وبالنسبة لجميع نظم الكهرباء، يمكن خفض تكاليف نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بنحو 0.01–0.02 دولار للكيلوواط ساعة لدى استخدام الاستخراج المحسن للنفط مع تخزين ثاني أكسيد الكربون لأن عائدات الاستخراج المحسن للنفط تعوّض جزئياً تكاليف النظام. ويعتقد أن أكبر خفض في التكاليف يتأتى من المحطات المعتمدة على الفحم التي تحتجز أكبر قدر من ثاني أكسيد الكربون. وفي حالات قليلة، يمكن أن يصبح أقل مستوى لتكاليف النظام سالباً مما يبين أن العائد المفترض الناجم عن الاستخراج المحسن للنفط على امتداد عمر المحطة أكبر من أدنى تكاليف مذكورة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون في حالة هذا النظام. ويمكن أن يسري ذلك أيضاً على حالات قليلة من الاحتجاز منخفض التكلفة من العمليات الصناعية.

وعلاوة على عمليات تحويل الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري، يمكن احتجاز ثاني أكسيد الكربون أيضاً في محطات الطاقة التي تستخدم الكتلة الحيوية كوقود أو محطات الوقود الأحفوري التي تستخدم أنواعاً من الوقود للإشعال تشمل الكتلة الحيوية. وفي الوقت الحاضر نجد أن المحطات التي تستخدم الكتلة الحيوية إنتاجها صغير (أقل من مائة ميغاواط). ولذلك فإن تكاليف الإنتاج الناشئة المقترنة بنظام CCS أو بدونه تعتبر مرتفعة نسبياً بالمقارنة بالبدائل الأحفورية. ويمكن أن تصل تكاليف نظام CCS المتعلقة بالكتلة الحيوية إلى 110 دولارات للطن من ثاني أكسيد الكربون المتجنب. وسوف يؤدي تطبيق نظام CCS على المنشآت التي تستخدم الكتلة الحيوية في الإشعال أو تستخدمها مع أنواع أخرى من الوقود إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أو انعدامه[13] مما قد يؤدي إلى خفض تكاليف هذا الخيار اعتماداً على القيمة السوقية لانخفاضات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. كذلك من الممكن احتجاز ثاني أكسيد الكربون في المحطات الهيدروجينية التي تستخدم الكتلة الحيوية كوقود. وقد أفيد بأن التكاليف تكون في حدود 22–25 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون (80–92 دولاراً للطن من الكربون) المتجنب في محطة تنتج مليون نانومتر مكعب من الهيدروجين يومياً وتقابل ذلك زيادة في تكاليف المنتجات الهيدروجينية بنحو 2.7 دولار/ميغاجول. والمحطات الأكبر كثيراً التي تستخدم الكتلة الحيوية يمكن أن تستفيد من وفورات الحجم الكبير، مما يخفض تكاليف نظم CCS إلى مستويات مماثلة بصورة عامة للمحطات العاملة بالفحم. هذا ولم تتوافر حتى الآن خبرة كبيرة فيما يتعلق بالمحطات الكبيرة التي تستخدم الكتلة الحيوية ومن ثم فإن إمكاناتها لم تثبت بعد. ومن المتعذر تقدير تكاليفها وإمكاناتها.

ولم تجر دراسة لتكاليف نظام CCS بنفس العمق بخصوص التطبيقات غير المتعلقة بالطاقة. ونظراً لأن هذه المصادر تتباين كثيراً من حيث تركيزات ثاني أكسيد الكربون وضغط مجرى الغاز، فإن الدراسات المتوافرة عن

(13) إذا جُمعت مثلاً الكتلة الحيوية بمعدل غير مستدام (أي أسرع مما تتجدد سنوياً) فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الصافية من النشاط قد لا تكون سالبة.

متوسط التكاليف تظهر نطاقاً عريضاً للغاية. وقد تبين أن أقل التكاليف هي تلك المتعلقة بالعمليات التي تقوم بالفعل بفصل ثاني أكسيد الكربون كجزء من عملية الإنتاج الخاصة بها من قبيل إنتاج الهيدروجين (ذُكرت سابقاً في الجدول م ف – 4 تكاليف احتجاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج الهيدروجين). وهذه التكاليف الكاملة لنظام CCS بما في ذلك النقل والتخزين تؤدي إلى رفع تكاليف إنتاج الهيدروجين بما يتراوح من 0.4 إلى 4.4 دولارات/ غيغاجول في حالة التخزين الجيولوجي وبما يتراوح من 2.0 إلى 2.8 دولار/ غيغاجول في حالة الاستخراج المحسن للنفط استناداً إلى نفس افتراضات التكاليف الواردة في الجدول م ف – 10.

تكاليف ثاني أكسيد الكربون المتجنب

يبين الجدول م ف – 10 أيضاً نطاقات تكاليف "ثاني أكسيد الكربون المتجنب". وتؤدي الاحتياجات من الطاقة في نظام CCS إلى زيادة المدخلات من الوقود (وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بالتالي) بحسب الوحدة من إنتاج الطاقة الصافي. ونتيجة لذلك، فإن كمية ثاني أكسيد الكربون المنتجة بحسب الوحدة من الإنتاج (كيلوواط ساعة من الكهرباء) أكبر بالنسبة لمحطات الطاقة التي تعمل بنظام CCS منها بالنسبة للمحطات المقارنة على النحو الوارد في الشكل م ف – 11. ولتحديد الانخفاضات في ثاني أكسيد الكربون التي يمكن أن تعزى إلى نظام CCS، يحتاج المرء إلى مقارنة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بحسب الكيلوواط ساعة في المحطات التي تقوم باحتجاز هذه المادة بالنسبة للمحطات المقارنة التي لا يوجد لديها نظام احتجاز. ويشار إلى الفرق على أنه "انبعاثات متجنبة".

وقد يؤدي إدخال نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه CCS في محطات الطاقة إلى التأثير في القرار الخاص بنمط المحطة التي يجب أن تقام ونوع الوقود الذي يجب أن يُستخدم. ولذا فقد يكون من المفيد في بعض الحالات حساب التكلفة بحسب الطن من ثاني أكسيد الكربون المتجنب استناداً إلى محطة مقارنة تختلف عن المحطة التي تستخدم نظام CCS. ويبين الجدول م ف – 10 عوامل التكاليف والانبعاثات في ثلاث محطات مقارنة وما يقابلها من محطات تستخدم نظام CCS في حالة التخزين الجيولوجي. ويلخص الجدول م ف – 11 نطاق التكاليف المقدرة لتوليفات مختلفة من المحطات التي تستخدم نظام CCS والمحطات المقارنة الأقل تكلفة التي يمكن أن تكون محل اهتمام. فهو يبين مثلاً أنه حيثما يكون من المخطط في البداية إقامة محطة تستخدم الفحم المسحوق، فإن استخدام نظام CCS في هذه المحطة قد يؤدي إلى ارتفاع تكلفة تجنب

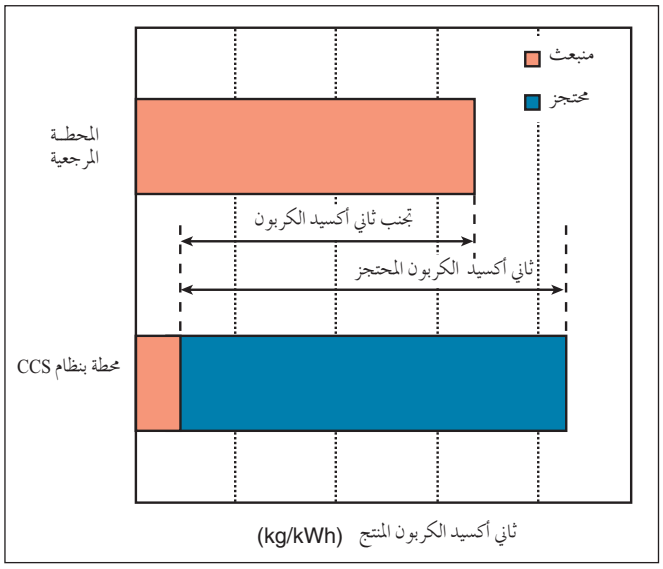
الجدول م ف – 10 – نطاق التكاليف الإجمالية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه جيولوجياً على أساس التكنولوجيا الحالية لمحطات الطاقة الجديدة التي تستخدم الفحم القيري أو الغاز الطبيعي.

أداء محطات الطاقة وبارامترات التكاليف[أ]	محطة الطاقة التي تستخدم الفحم المسحوق	محطة الطاقة المختلطة التي تستخدم دورة الغاز الطبيعي	محطة الطاقة التي تستخدم دورة مختلطة للتغويز المتكامل للفحم
محطة مقارنة ليس لديها نظام CCS			
تكاليف الكهرباء (بالدولارات للكيلوواط/ ساعة)	0.052–0.043	0.050–0.031	0.061–0.041
محطة طاقة لديها نظام احتجاز			
زيادة الاحتياجات من الوقود (%)	40–24	22–11	25–14
ثاني أكسيد الكربون المحتجز (كيلوغرام/ كيلوواط ساعة)	0.97–0.82	0.41–0.36	0.94–0.67
ثاني أكسيد الكربون المتجنب (كيلوغرام/ كيلوواط ساعة)	0.70–0.62	0.32–0.30	0.73–0.59
نسبة ثاني أكسيد الكربون المتجنبة	88–81	88–83	91–81
محطة طاقة لديها نظام احتجاز وتخزين جيولوجي[ب]			
تكاليف الكهرباء (بالدولارات للكيلوواط ساعة)	0.099–0.063	0.077–0.043	0.091–0.055
تكاليف نظام CCS (بالدولارات للكيلوواط ساعة)	0.047–0.019	0.029–0.012	0.032–0.010
نسبة الزيادة في تكاليف الكهرباء	91–43	85–37	78–21
تكاليف التخفيف (بالدولارات لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب)	71–30	91–38	53–14
بالدولارات لكل طن من الكربون يُتجنب	260–110	330–140	200–51
محطة طاقة لديها نظام للاحتجاز وللاستخراج المحسن للنفط[ج]			
تكاليف الكهرباء (بالدولارات لكل كيلوواط ساعة)	0.081–0.049	0.070–0.037	0.075–0.040
تكاليف نظام CCS (بالدولارات لكل كيلوواط ساعة)	0.029–0.005	0.022–0.006	0.019–(–0.005)
نسبة الزيادة في تكاليف الكهرباء	57–12	63–19	46–(10–)
تكاليف التخفيف (بالدولارات لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يُتجنب)	44–9	68–19	31–(7–)
(بالدولارات لكل طن من الكربون يُتجنب)	160–31	250–71	120–(25–)

[أ] جميع التغييرات بالنسبة إلى محطة مقارنة مماثلة ليس لديها نظام CCS. انظر الجدول م ف – 3 للاطلاع على تفاصيل الافتراضات التي تقوم عليها نطاقات التكاليف المذكورة.

[ب] تكاليف الاحتجاز تستند إلى النطاقات الواردة في الجدول م ف – 3، وتتراوح نطاقات النقل من 0 إلى 5 دولارات للطن من ثاني أكسيد الكربون، وتتراوح تكلفة التخزين البيولوجي من 6 إلى 8.3 دولارات للطن من ثاني أكسيد الكربون.

[ج] نفس تكاليف الاحتجاز والنقل المذكورة أعلاه، وتكاليف التخزين الصافية لاستخراج النفط تتراوح من 10 دولارات إلى 16 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون (استناداً إلى أسعار النفط قبل عام 2003 التي تراوحت من 15 إلى 20 دولاراً للبرميل).



الشكل م ف – 11 – احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه من محطات الطاقة. والزيادة في إنتاج ثاني أكسيد الكربون الناجمة عن حدوث نقص في الكفاءة بوجه عام في محطات الطاقة نتيجة للكميات الإضافية من الطاقة اللازمة للاحتجاز والنقل والتخزين وأي تسرب من النقل يؤديان إلى زيادة كمية "ثاني أكسيد الكربون المنتج بحسب الوحدة من الإنتاج" (العمود الأدنى) بالمقارنة بالمحطات المقارنة (العمود الأعلى) التي لا يوجد لديها نظام احتجاز.

ثاني أكسيد الكربون عما إذا كان قد تم اختيار محطة تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة ومزودة بنظام CCS بشرط أن يكون الغاز الطبيعي متوافراً. وثمة خيار آخر لتكلفة التجنب المنخفضة يتمثل في إقامة محطة تستخدم دورة مختلطة للتغويز المتكامل ولديها نظام احتجاز بدلاً من تزويد محطة تستخدم الفحم المسحوق بنظام للاحتجاز.

الإمكانات الاقتصادية لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) لأغراض التخفيف من حدة تغير المناخ

تستند عمليات تقييم الإمكانات الاقتصادية لنظام CCS إلى نماذج الطاقة والاقتصاد التي تدرس عملية نشر هذا النظام في المستقبل وتكاليفه في سياق السيناريوهات التي تحقق المسارات ذات الكفاءة الاقتصادية والأقل تكلفة في تثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.

وفي حين أن هناك الكثير من الشكوك التي تحيط بالنتائج الكمية المستمدة من هذه النماذج (انظر المناقشة الواردة أدناه)، فإن جميع النماذج تشير إلى أن من المستبعد استخدام نظم CCS على نطاق واسع في حالة عدم وجود سياسة واضحة تحد بدرجة كبيرة من انبعاثات غاز الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي. ويتنبأ الكثير من عمليات التقييم المتكاملة، مع فرض حدود على انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، استخدام نظم CCS على نطاق واسع خلال بضعة عقود من بداية أي نظام مهم للتخفيف من حدة تغير المناخ. وتشير النماذج الخاصة بالطاقة والاقتصاد إلى أن من المستبعد أن

الجدول م ف – 11 – نطاقات تكاليف التخفيف في مختلف توليفات المحطات المقارنة والمحطات التي لديها نظام CCS على أساس التكنولوجيا الحالية لمحطات الطاقة الجديدة. وكمية ثاني أكسيد الكربون المتجنبة هي الفرق بين الانبعاثات من المحطة المقارنة والانبعاثات من محطة الطاقة المزودة بنظام CCS. والممارسة الشائعة في الوقت الحاضر في الكثير من الأقاليم هي إما محطة تستخدم الفحم المسحوق أو محطة تعمل بدورة الغاز الطبيعي المختلطة[14]. وتستند المنافع المستمدة من الاستخراج المحسن للنفط إلى أسعار النفط البالغة 15–20 دولاراً للبرميل. ويفترض أن أسعار الغاز تتراوح من 2.8 إلى4.4 دولارات /للغيغاجول وأن أسعار الفحم تتراوح من 1 إلى 1.5 دولار للغيغاجول (استناداً إلى الجدول 8–3أ).

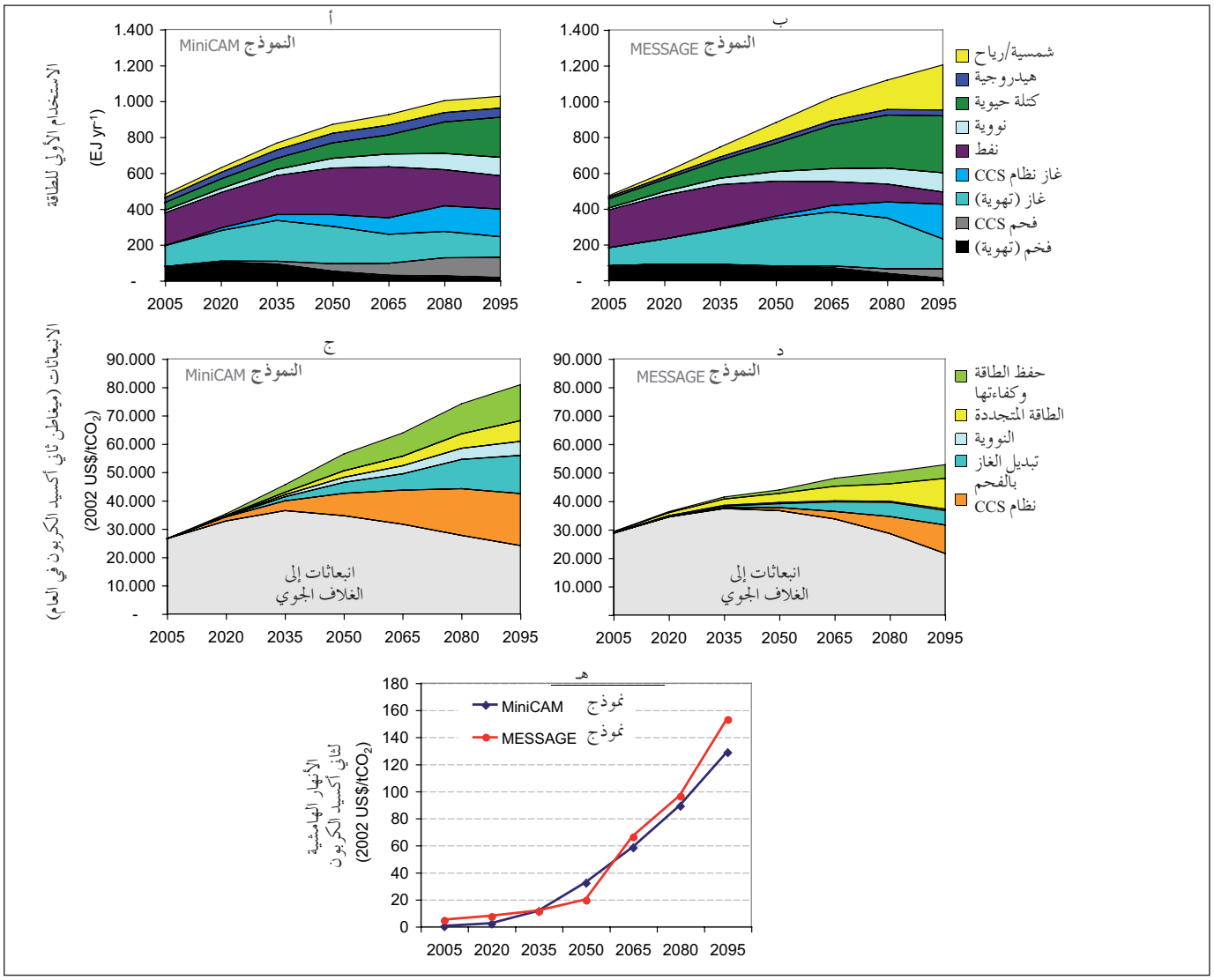
نوع محطة الطاقة المزودة بنظام CCS	المحطة المقارنة التي تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة دولار/طن من ثاني أكسيد الكربون المتجنب دولار/طن للكربون المتجنب	المحطة المقارنة التي تستخدم الفحم المسحوق دولار/طن من ثاني أكسيد الكربون المتجنب دولار/طن للكربون المتجنب
محطة الطاقة المزودة بنظام للاحتجاز والتخزين الجيولوجي		
محطة تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة	90–40 (330–140)	60–20 (220–80)
محطة تستخدم الفحم المسحوق	270–70 (980–260)	70–30 (260–110)
محطة تستخدم الدورة المختلطة للتغويز المتكامل	220–40 (790–150)	70–20 (260–80)
محطة الطاقة المزودة بنظام للاحتجاز والاستخراج المحسن للنفط		
محطة تستخدم دورة الغاز الطبيعي المختلطة	70–20 (250–70)	30–0 (120–0)
محطة تستخدم الفحم المسحوق	240–50 (890–180)	40–10 (160–30)
محطة تستخدم الدورة المختلطة للتغويز المتكامل	190–20 (710–80)	40–0 (160–0)

[14] المحطات التي تستخدم الدورة المختلطة للتغويز المتكامل ليست مدرجة كمحطة طاقة مقارنة سيجري بناؤها اليوم وذلك بالنظر إلى أن هذه التكنولوجيا ليست منتشرة على نطاق واسع حتى الآن في قطاع الكهرباء وتزيد التكلفة عادة بدرجة طفيفة عن المحطات العاملة بالفحم المسحوق.

تسهم نظم CCS إسهاماً كبيراً في التخفيف من حدة تغير المناخ ما لم تُنشر في قطاع الطاقة. ولكي يحدث ذلك، لابد من أن تتجاوز أسعار تخفيضات ثاني أكسيد الكربون 25–30 دولاراً/ للطن أو أن تُفرض حدود معادلة على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وتشير المؤلفات والخبرة الصناعية الحالية إلى أنه في حالة عدم وجود تدابير للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لن تكون هناك سوى فرص ضئيلة وخاصة لانتشار تكنولوجيات CCS. وهذه الفرص الأولى تشمل احتجاز ثاني أكسيد الكربون من مصدر عالي النقاء ومنخفض التكلفة ونقله عبر مسافات تقل عن 50 كيلومتراً، مقترناً بتخزين ثاني أكسيد الكربون في تطبيقات القيمة المضافة مثل الاستخراج المحسن للنفط. وتبلغ إمكانات هذه الخيارات الخاصة نحو 360 ميغاطناً من ثاني أكسيد الكربون سنوياً (انظر القسم 2).

وتشير النماذج كذلك إلى أن نظم CCS سوف تتنافس مع خيارات التخفيف واسعة النطاق الأخرى مثل تكنولوجيات الطاقة النووية والطاقة المتجددة. وتبين هذه الدراسات أن إدراج نظم CCS ضمن مجموعة تدابير التخفيف من حدة تغير المناخ يمكن أن تقلل من تكاليف تثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون بنحو 30 في المائة أو أكثر. ويتمثل أحد جوانب القدرة التنافسية لتكنولوجيات CCS من حيث التكاليف في أنها متوافقة مع معظم البنيات الأساسية الحالية الخاصة بالطاقة.

وفي معظم السيناريوهات تصبح عملية خفض الانبعاثات أكثر تقييداً بصورة مطردة بمرور الوقت. وتشير معظم التحليلات إلى أنه على الرغم من التغلغل الكبير الذي سوف يحدث لنظم CCS بحلول عام 2050، فإن معظم انتشار هذه النظم سوف يحدث في النصف الثاني من هذا القرن.



الشكل م ف – 12 – هذه الأرقام مثال توضيحي لمساهمة نظم CCS المحتملة في العالم كجزء من مجموعة تدابير التخفيف من حدة تغير المناخ. وهي تستند إلى نموذجي تقييم متكاملين بديلين (MESSAGE وMimiCAM) يطبقان نفس الافتراضات بالنسبة للعوامل الرئيسية المسببة للانبعاثات. وسوف تتباين النتائج تبايناً كبيراً على المستوى الإقليمي. ويستند هذا المثال إلى سيناريو واحد ومن ثم لا يبين النطاق الكامل للشكوك. وتبين اللوحتان "أ" و"ب" استخدام الطاقة الرئيسي في العالم بما في ذلك نشر نظم CCS. وتبين اللوحتان "ج" و"د" انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العالم باللون الرمادي والمساهمة المقابلة لتدابير خفض الانبعاثات الرئيسية بالألوان. وتبين اللوحة "هـ" الأسعار الحدية المحسوبة لانخفاضات ثاني أكسيد الكربون.

ومن المتوقع كالمعتاد أن تكون عمليات الانتشار الأولى لهذه النظم في الدول الصناعية مع انتشار استخدامها في نهاية الأمر على نطاق العالم. وعلى الرغم من أن النتائج الخاصة بمختلف السيناريوهات والنماذج تتباين (تبايناً كبيراً في كثير من الأحيان) من حيث مزيج ومقادير مختلف التدابير لتحقيق تقييد معين للانبعاثات (انظر الشكل م ف – 12)، فإن المؤلفات تتفق في أن نظم CCS يمكن أن تصبح عنصراً هاماً في المجموعة الواسعة النطاق لتكنولوجيات الطاقة ونُهُج خفض الانبعاثات.

والواقع أن الاستخدام الفعلي لنظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) قد يكون أقل مما تشير إليه تقديرات الإمكانات الاقتصادية المبينة في هذه النماذج الخاصة بالطاقة والاقتصاد. وكما أشير سلفاً، فإن النتائج تعتمد عادة على تحليل أمثل لأقل التكاليف لا يراعي بصورة كافية حواجز العالم الحقيقي التي تقف في طريق تطوير التكنولوجيا ونشرها، من قبيل التأثيرات البيئية وعدم وجود إطار قانوني أو تنظيمي واضح، ومخاطر الاستثمار المتصورة فيما يتعلق بمختلف التكنولوجيات، والشكوك التي تحيط بمدى السرعة الذي سيتم بها خفض تكاليف نظم CCS من خلال البحوث والتطوير والتعلم بالممارسة. وتستخدم النماذج عادة افتراضات مبسطة فيما يتعلق بتكاليف نظم CCS في مختلف التطبيقات والمعدلات التي ستنخفض بها هذه التكاليف في المستقبل.

وبالنسبة لسيناريوهات تثبيت ثاني أكسيد الكربون عند مستوى يتراوح من 450 إلى 750 جزءاً من المليون حسب الحجم، فإن التقديرات المنشورة للكمية المتراكمة من ثاني أكسيد الكربون التي يحتمل تخزينها عالمياً خلال هذا القرن (في التكوينات الجيولوجية أو في المحيطات) واسعة النطاق، بحيث تبدأ من مساهمات ضئيلة للغاية وتصل إلى آلاف الغيغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون. وهذا النطاق الواسع يرجع بدرجة كبيرة إلى الشكوك التي تحيط بالتغييرات الاقتصادية والديمغرافية وعلى وجه الخصوص التكنولوجية طويلة الأجل التي تعتبر من العناصر الرئيسية المسببة لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المستقبل. غير أن من المهم ملاحظة أن معظم نتائج سيناريوهات التثبيت عند مستوى 450–750 جزءاً من المليون حسب الحجم تنحو إلى التجمع في نطاق 220 غيغاطناً – 2200 ميغاطن (60 غيغاطناً – 600 غيغاطن من الكربون) بالنسبة للانتشار التراكمي لنظم CCS. ولكي تحقق نظم CCS هذه الإمكانية الاقتصادية، يتعين توفير عدة مئات أو آلاف من نظم CCS في مختلف أنحاء العالم خلال القرن القادم بحيث يحتجز كل منها نحو 1–5 ميغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. وكما أشير في القسم 5، قد تكون الإمكانات التقنية للتخزين الجيولوجي وحده كافية لتغطية أعلى مستويات نطاق الإمكانات الاقتصادية لنظم CCS.

نظرات على تسرب ثاني أكسيد الكربون من التخزين

تتوقف انعكاسات السياسات الخاصة بانخفاض التسرب من التخزين على الافتراضات المستخدمة في التحليل. وتستند الدراسات التي أجريت لمعالجة مسألة كيفية التعامل مع التخزين غير الدائم إلى نهج مختلفة هي: قيمة تأخير الانبعاثات، والإقلال إلى أدنى حد من تكلفة سيناريو محدد للتخفيف، أو الانبعاثات المسموح بها في المستقبل في سياق تثبيت مفترض لتركيزات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي. وتسمح بعض هذه الدراسات بتعويض الإطلاقات في المستقبل بتخفيضات إضافية في الانبعاثات، وتتوقف النتائج على الافتراضات المتعلقة بتكلفة الانخفاضات في المستقبل ومعدلات الخفض وكمية ثاني اكسيد الكربون المخزونة والمستوى المفترض لتثبيت التركيزات في الغلاف الجوي. وفي دراسات أخرى، لم يُعتبر التعويض خياراً بالنظر إلى الشكوك السياسية والمؤسسية ويركز التحليل على القيود التي يفرضها تدني مستوى التثبيت المفترض والكميات المخزونة.

وفي حين أن النتائج لهذه المجموعة من الدراسات تتباين حسب الطرق والافتراضات الموضوعة، فإن النتائج تشير إلى أن نسبة محتجزة في حدود 90–99 في المائة لمدة مائة عام أو 60–95 في المائة لمدة 500 عام يمكن مع ذلك أن تجعل هذا التخزين غير الدائم ذا قيمة للتخفيف من حدة تغير المناخ. وتشير جميع الدراسات إلى أن قبول نظم CCS كإجراء للتخفيف يتطلب وجود حد أعلى لكمية التسرب التي يمكن أن تحدث.

9- حصر الانبعاثات واحتسابها

يتمثل أحد الجوانب المهمة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في وضع وتطبيق طرق لتقدير الكميات التي تخفَّض بها انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (والانبعاثات المرتبطة به من غاز الميثان أو أكسيد النيتروجين) أو تجنَّب أو تُزال من الغلاف الجوي والإبلاغ عن ذلك. والعنصران المعنيان هما (1) التقدير الفعلي للانبعاثات لإجراء حصر لغازات الاحتباس الحراري على المستوى الوطني والإبلاغ عنها. (2) طريقة الاحتساب الخاصة بنظم CCS في إطار الاتفاقات الدولية للحد من الانبعاثات الصافية[15].

الإطار الحالي

كانت قوائم حصر انبعاثات غازات الاحتباس الحراري على المستوى الوطني، بمقتضى اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، تقدم إفادة عادة عن الانبعاثات في سنة معينة وكانت تُعد على أساس سنوي أو على أساس دوري آخر. وتتناول المبادئ التوجيهية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (1996) وتقارير التوجيه الخاص بالممارسات الجيدة (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ 2000–2003) النهج المفصلة لإعداد قوائم الحصر الوطنية التي تكون كاملة وشفافة وموثقة وتراعى فيها الشكوك ومتسقة على مر الزمن ويمكن مقارنتها فيما بين البلدان. ووثائق الاتفاقية الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ المستخدمة في الوقت الحاضر لا تتضمن بصورة محددة خيارات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. غير أن المبادئ التوجيهية الخاصة بهذه الهيئة التي تخضع في الوقت الحاضر لعمليات مراجعة سوف تقدم بعض التوجيه عند نشر المراجعات في عام 2006. ويمكن تطبيق الإطار الذي تم قبوله بالفعل على نظم CCS وإن كانت بعض القضايا قد تحتاج إلى مراجعة أو إسهاب.

(15) في هذا السياق تعني كلمة "تقدير" عملية حساب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتعني كلمة "الإبلاغ" عملية تقديم التقديرات إلى اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ. وتشير كلمة "الاحتساب" إلى قواعد مقارنة الانبعاثات وعمليات إزالتها، على النحو المبلغ عنه، بالالتزامات (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2003).

القضايا ذات الصلة بالاحتساب والإبلاغ

ليس من الواضح، نظراً لعدم وجود اتفاقات دولية سائدة، ما إذا كانت الأشكال المختلفة لاحتجاز وتكوين ثاني أكسيد الكربون وتخزينه سوف تعامل على أنها انخفاضات في الانبعاثات أو عمليات إزالة لها من الغلاف الجوي. وفي أي من الحالتين تُسفر نظم CCS عن تجمعات جديدة لثاني أكسيد الكربون وهي تجمعات قد تخضع للتسرب المادي في وقت ما في المستقبل. ولا توجد في الوقت الحاضر أية طرق متاحة في إطار اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ لمراقبة وقياس أو احتساب التسرب المادي من مواقع التخزين. غير أن التسرب من مواقع التخزين الجيولوجي المدارة جيداً من المرجح أن يكون ضئيلاً من حيث الحجم وبعيداً من حيث الوقت.

وقد ينظر في إنشاء فئة معينة لنظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) في إطار الإبلاغ عن الانبعاثات غير أن ذلك ليس ضرورياً تماماً نظراً لأن كميات ثاني أكسيد الكربون التي تُحتجز وتُخزن يمكن أن تنعكس في القطاع الذي أنتج فيه ثاني أكسيد الكربون. ويمكن أن تكون عملية تخزين ثاني أكسيد الكربون في موقع معين شاملة لثاني أكسيد الكربون المنبعث من فئات مصادر مختلفة كثيرة بل وحتى من مصادر في بلدان مختلفة كثيرة. ويمكن إلى حد كبير تقدير الانبعاثات الهاربة من عمليات احتجاز ونقل وحقن ثاني أكسيد الكربون في منطقة التخزين ضمن طرق الإبلاغ الحالية، ويمكن تقدير الانبعاثات المرتبطة بالطاقة المضافة اللازمة لتطبيق نظم CCS والإبلاغ عنها ضمن أطر قوائم الحصر الحالية. وقد يكون من المطلوب أيضاً إيلاء اعتبار محدد لنظم CCS التي تطبق على نظم الكتلة الحيوية حيث إن هذا التطبيق قد يسفر عن الإبلاغ عن انبعاثات سالبة لا يوجد لها في الوقت الحاضر نص في إطار الإبلاغ.

القضايا ذات الصلة بالاتفاقات الدولية

إن الالتزامات الكمية بالحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري واستخدام الاتجار في الانبعاثات والتنفيذ المشترك أو آلية التنمية النظيفة تتطلب وجود قواعد وطرق واضحة لاحتساب الانبعاثات والإزالات. ونظراً لأن طرق CCS تنطوي على إمكانات لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر حدود المحاسبة التقليدية (فمثلاً يحتجز ثاني أكسيد الكربون في بلد ويُخزن في بلد آخر أو قد يحتجز في سنة ويطلق جزئياً من التخزين في سنة لاحقة)، فإن القواعد والطرق الخاصة بالمحاسبة قد تختلف عن تلك المستخدمة في القوائم التقليدية لحصر الانبعاثات.

وحتى الآن ركزت غالبية المناقشات العلمية والفنية والسياسية المتعلقة بحساب ثاني أكسيد الكربون المخزون على عزل ثاني أكسيد الكربون من المحيط الحيوي للأرض. وقد يوفر تاريخ هذه المفاوضات بعض التوجيه بشأن وضع طرق محاسبة لنظم CCS. وإدراكاً للطابع المؤقت المحتمل لثاني أكسيد الكربون المخزون في المحيط الحيوي للأرض، قبلت اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ فكرة إمكانية خفض الانبعاثات الصافية من خلال مصارف بيولوجية إلا أنها فرضت قواعد مؤقتة لهذه المحاسبة. غير أن نظم CCS مختلفة اختلافاً ملحوظاً من نواح كثيرة عن عزل ثاني أكسيد الكربون في المحيط الحيوي للأرض (انظر الجدول م ف – 12) كما أن الأشكال المختلفة لنظم CCS تختلف اختلافاً ملحوظاً عن بعضها البعض. غير أن الهدف الرئيسي من المحاسبة هو ضمان أن تحقق أنشطة CCS تخفيضات حقيقية – قابلة للتحديد الكمي – في الانبعاثات الصافية. فالواقع أن طناً واحداً من ثاني أكسيد الكربون المخزون بصورة دائمة ينطوي على نفس الفائدة من حيث تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي كطن واحد من ثاني أكسيد الكربون الذي لم ينبعث، ولكن طناً واحداً من ثاني أكسيد الكربون الذي يخزن مؤقتاً ينطوي على فائدة أقل. ومن المقبول عموماً أن ينعكس هذا الفرق في أي نظام للمحاسبة المتعلقة بالتخفيضات في الانبعاثات الصافية من غازات الاحتباس الحراري.

كذلك تتضمن المبادئ التوجيهية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (1996) وتقارير التوجيه المعنية بالممارسات الجيدة IPCC (2000؛ 2003) مبادئ توجيهية بشأن مراقبة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وليس من المعروف ما إذا كانت المبادئ التوجيهية المنقحة للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ بالنسبة لنظم CCS يمكن استيفاؤها عن طريق استخدام تقنيات المراقبة ولاسيما للتكوينات الجيولوجية البحرية. وتتوافر عدة تقنيات لمراقبة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من التخزين الجيولوجي والتحقق منها إلا أنها تتباين من حيث القابلية للتطبيق وحدود الكشف والشكوك. ويمكن في الوقت الحاضر مراقبة التخزين الجيولوجي مراقبة كمية عند الحقن ومراقبة نوعية في المستودعات وبواسطة قياس التدفقات السطحية لثاني أكسيد الكربون. ويمكن إجراء عملية مراقبة التخزين البحري عن طريق كشف أعمدة ثاني أكسيد الكربون وليس عن طريق قياس الإطلاقات السطحية البحرية إلى الغلاف الجوي. ومازالت الخبرات المستمدة من مراقبة مشروعات CCS الحالية محدودة بحيث يتعذر استخدامها كأساس للتوصل إلى استنتاجات بشأن معدلات التسرب المادي وما يرتبط بذلك من شكوك.

ويستحدث بروتوكول كيوتو وحدات مختلفة لحساب انبعاثات غاز الاحتباس الحراري وانخفاضات الانبعاثات والانبعاثات المعزولة بموجب مختلف آليات الامتثال. وتصف "وحدات الكمية المعينة" (AAUs) الالتزامات المتعلقة بالانبعاثات واستخدامها في الاتجار بالانبعاثات، و"التخفيضات المعتمدة في الانبعاثات" (CERs) التي تستخدم بموجب التنفيذ المشترك. ولم تقدم المفاوضات الدولية حتى الآن الكثير من التوجيهات بشأن تقدير واحتساب التخفيضات في ثاني أكسيد الكربون ذات الصلة بالمشاريع من نظم CCS (CER أو ERU فقط) ولذا ليس من المؤكد كيف يمكن استيعاب هذه التخفيضات في إطار بروتوكول كيوتو. وقد يقدم بعض التوجيه بشأن المنهجيات الخاصة بقواعد المصارف البيولوجية. وعلاوة على ذلك فإن الاتفاقات الحالية لا تتعامل مع مشاريع احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) العابرة للحدود. ويعتبر ذلك مهماً بصورة خاصة لدى التعامل مع المشاريع العابرة للحدود التي تتضمن احتجاز ثاني أكسيد الكربون في بلد من بلدان المرفق "باء" الأطراف في بروتوكول كيوتو وتخزينه في بلد آخر ليس طرفاً في المرفق "باء" أو ليس ملتزماً بالبروتوكول.

وعلى الرغم من أن الطرق المتوافرة حالياً لوضع قوائم وطنية للانبعاثات إما يمكن أن تستوعب نظم CCS أو أن تُنقح لتستوعبها، فإن حساب ثاني أكسيد الكربون المخزون يثير تساؤلات بشأن القبول ونقل المسؤوليات عن الانبعاثات المخزونة. ويمكن معالجة هذه القضايا من خلال العمليات السياسية الوطنية والدولية.

الجدول م ف – 12 – الفروق في أشكال نظم CCS والمصارف البيولوجية التي قد تؤثر في طريقة الاحتساب

الخصائص	المحيط الحيوي للأرض	أعماق المحيطات	المستودعات الجيولوجية
ملكية ثاني أكسيد الكربون المعزول أو المخزون	يمكن مراقبة المخزونات بمرور الوقت. وستكون للمخزونات مواقع متميزة ويمكن ربطها بمالك يمكن تحديده.	يمكن قياس الكربون المحقون. وستكون المخزونات متنقلة وقد تستقر في المياه الدولية.	يمكن قياس الكربون المحقون. وقد تستقر المخزونات في مستودعات تعبر الحدود الوطنية أو حدود الممتلكات وتختلف عن الحدود السطحية.
قرارات الإدارة	سيخضع التخزين لقرارات مستمرة بشأن أولويات استخدام الأراضي.	لا توجد قرارات بشرية أخرى بشأن الصيانة بمجرد أن يحدث الحقن.	بعد حدوث الحقن تشمل القرارات البشرية بشأن استمرار التخزين مستويات دنيا من الصيانة ما لم يتداخل التخزين مع استخراج الموارد.
المراقبة	يمكن مراقبة التغييرات في المخزونات.	توضع نماذج التغيرات في المخزونات	يمكن كشف إطلاق ثاني أكسيد الكربون من خلال المراقبة المادية.
وقت الإبقاء المتوقع	عقود، تبعاً لقرارات الإدارة.	قرون تبعاً لعمق الحقن وموقعه.	تخزين دائم أساساً بشرط عدم حدوث اضطراب مادي في المستودع.
التسرب المادي	قد تحدث خسائر نتيجة لاضطرابات أو تغيّر في المناخ أو قرارات بشأن استخدام الأراضي.	ستحدث خسائر بالتأكيد كنتائج أخيرة للدوران البحري والتوازن والغلاف الجوي.	ليس من المحتمل حدوث خسائر إلا في حالة حدوث اضطراب في المستودع أو وجود مسارات تسرب لم تكتشف في بداية الأمر.
المسؤولية	يمكن تحديد مالك الأراضي الحكيم من خلال مخزونات الكربون المعزول.	قد تسهم أطراف متعددة في نفس المخزونات من ثاني أكسيد الكربون وقد تستقر هذه المادة في المياه الدولية.	قد تسهم عدة أطراف في نفس المخزونات من ثاني أكسيد الكربون التي قد توجد تحت أراضي عدة بلدان.

10 – ثغرات المعرفة

هذا الموجز المتعلق بثغرات المعرفة يغطي جوانب نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) التي ستكون لزيادة المعارف والخبرات والحد من الشكوك فيما يتعلق بها أهمية لتيسير صنع القرار بشأن نشر تلك النظم CCS على نطاق واسع.

تكنولوجيات الاحتجاز والتخزين

إن تكنولوجيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون مفهومة حالياً فهماً جيداً نسبياً استناداً إلى الخبرات المستمدة من القطاع الصناعي في طائفة من التطبيقات. كذلك لا توجد أية حواجز تقنية أو معرفية رئيسية تحول دون تطبيق عملية النقل بخطوط الأنابيب أو تطبيق التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون المحتجز. ولكن من اللازم تكامل الاحتجاز والنقل والتخزين في مشاريع تنفذ على نطاق كامل لاكتساب المعارف والخبرات اللازمة لزيادة نشر تكنولوجيات CCS على نطاق أوسع. كما تلزم عمليات بحث وتطوير لتحسين المعارف الخاصة بالمفاهيم الناشئة والتكنولوجيات المواتية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون التي تنطوي على إمكانات للحد بدرجة كبيرة من تكاليف الاحتجاز لأغراض المنشآت الجديدة والقائمة. وبصورة أكثر تحديداً هناك ثغرة في المعارف ذات الصلة بمحطات الطاقة الكبيرة التي تعمل بالفحم وتلك التي تعمل بالغاز الطبيعي والتي يوجد لديها نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون في حدود عدة مئات من الميغاواطات (أو عدة ميغاأطنان من ثاني أكسيد الكربون). ويتعين إجراء بيانات عملية بشأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون على هذا المستوى لتحديد الموثوقية والأداء البيئي لمختلف أنماط نظم الطاقة التي يوجد لديها نظم للاحتجاز، والحد من تكاليف نظم CCS وتحسين الثقة في تقديرات التكاليف. وعلاوة على ذلك، يتعين التنفيذ على نطاق واسع للحصول على تقديرات أفضل لتكاليف وأداء نظم CCS في العمليات الصناعية من قبيل صناعات الأسمنت والصلب، التي هي مصادر كبيرة لثاني أكسيد الكربون، ولكنها لا تملك سوى خبرة ضئيلة فيما يتعلق باحتجاز هذه المادة أو لا تملك هذه الخبرة على الإطلاق.

وفيما يتعلق بتكنولوجيا كربنة المعادن، ثمة سؤال رئيسي يتعلق بكيفية استغلال التفاعل الحراري في التصميمات العملية التي يمكن أن تقلل من التكاليف وصافي الاحتياجات من الطاقة. ويتعين توفير منشآت تجريبية على مستوى تجريبي لمعالجة هذه الثغرات.

وفيما يتعلق بالاستخدامات الصناعية لثاني أكسيد الكربون المحتجز، فإن إجراء مزيد من الدراسة بشأن الطاقة الصافية وموازنة ثاني أكسيد الكربون في العمليات الصناعية التي تستخدم ثاني أكسيد الكربون المحتجز يمكن أن يساعد في تحديد صورة أكثر اكتمالاً لإمكانات هذا الخيار.

العلاقة الجغرافية بين المصادر وفرص تخزين ثاني أكسيد الكربون

لاشك في أن تحسين صورة قرب مصادر ثاني أكسيد الكربون من مواقع التخزين الملائمة (جميع الأنواع) ووضع منحنيات لتكلفة الاحتجاز والنقل والتخزين الخاصة بثاني أكسيد الكربون سوف ييسران عملية صنع القرار بشأن نشر نظم CCS على نطاق واسع. وفي هذا السياق، يتعين إجراء عمليات تقييم إقليمية لتقييم درجة التوافق بين مصادر انبعاث ثاني أكسيد الكربون الكبيرة وخيارات التخزين الملائمة التي يمكن أن تخزن الأحجام المطلوبة.

طاقة التخزين الجيولوجي وفعاليته

ثمة حاجة إلى تحسين تقديرات طاقة التخزين على كل من المستوى العالمي والإقليمي والمحلي وتحسين فهم عمليات التخزين والتخفيف والتسرب

الطويلة الأجل. وسوف تتطلب معالجة المسألة الأخيرة توفير قدرة معززة لمراقبة سلوك ثاني أكسيد الكربون المخزون جيولوجياً وللتحقق منه. وسيكون من المهم تنفيذ مزيد من المشاريع التجريبية والخاصة بالبيانات العملية في مجال التخزين، وذلك في طائفة من الأحوال الجيولوجية والجغرافية والاقتصادية لتحسين فهمنا لهذه المسائل.

تأثير التخزين في المحيطات

إن الثغرات الرئيسية في المعرفة التي يتعين سدها لكي تتسنى معالجة المخاطر والإمكانات الخاصة بالتخزين في المحيطات تتعلق بالتأثيرات الإيكولوجية لثاني أكسيد الكربون في أعماق المحيطات. ويتعين إجراء دراسات بشأن استجابة النظم البيولوجية في أعماق البحار لثاني أكسيد الكربون المُضاف، من بينها دراسات تكون أطول مدة وأوسع نطاقاً من تلك التي أُجريت حتى الآن. وتقترن بذلك الحاجة إلى استحداث تقنيات وأجهزة استشعار لاستكشاف ومراقبة أعمدة ثاني أكسيد الكربون وانعكاساتها البيولوجية والجيوكيميائية.

القضايا القانونية والتنظيمية

مازالت المعارف الحالية عن المتطلبات القانونية والتنظيمية لتنفيذ نظم احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه (CCS) على نطاق واسع غير وافية. ولا يوجد إطار ملائم لتيسير تنفيذ التخزين الجيولوجي ومراعاة التبعات الطويلة الأجل المرتبطة به. ويتعين توضيح المعوقات القانونية المحتملة للتخزين في البيئة البحرية (المحيطات أو باطن أرض قاع البحار أو التخزين الجيولوجي). وتتعلق ثغرات المعرفة الرئيسية الأخرى بالمنهجيات الخاصة بقوائم حصر الانبعاثات واحتسابها.

المساهمة العالمية لنظم CCS في التخفيف من تغير المناخ

هناك العديد من القضايا الأخرى التي ستساعد عملية صنع القرار في المستقبل بشأن نظم CCS وذلك من خلال زيادة تحسين فهمنا لمساهمة نظم CCS المحتملة في تخفيف وتثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في العالم على المدى الطويل. ويشمل ذلك إمكانات نقل ونشر تكنولوجيات CCS، بما في ذلك فرص البلدان النامية في استغلال هذه النظم، وتطبيقها على مصادر ثاني أكسيد الكربون في الكتلة الحيوية، والتفاعل المحتمل بين الاستثمار في نظم CCS وخيارات التخفيف الأخرى. ويتطلب الأمر زيادة بحث مسألة طول مدة تخزين ثاني أكسيد الكربون اللازمة. وتتعلق هذه المسألة بمسارات التثبيت والجوانب المشتركة بين الأجيال.

المرفق الأول – مسرد المصطلحات والمختصرات

تشير التعاريف الواردة في هذا المسرد إلى استخدام المصطلحات في سياق ملخص التقرير الخاص عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه الموجه إلى واضعي السياسات.

Abatement
انخفاض في درجة أو كثافة الانبعاثات أو الملوثات الأخرى.

Absorption
امتصاص الجزيئات الكيميائي أو الفيزيائي في كتلة مادة صلبة أو سائلة، بحيث يشكل محلولاً أو مركباً.

Acid gas
أي مزيج من الغازات يتحول إلى حمض عندما ينحل في الماء (ويشير المصطلح عادة إلى $H_2S + CO_2$ من الغاز الحامض (راجعه).

Adsorption
امتزاز الجزيئات على سطح مادة صلبة أو سائلة.

Amine
مركب كيميائي عضوي يحتوي على نيتروجين واحد أو أكثر في $NH_2 - NH$ – أو مجموعات N.

Anthropogenic source
مصدر من صنع الإنسان على العكس من المصدر الطبيعي.

Aquifer
تكوين جيولوجي يحتوي على ماء وذو قدر كبير من النفاذية يتيح الانسياب، وهو محصور بمواد عازلة.

Basalt
نوع من الصخر الناري الأساسي يندلع عادة من بركان.

Baseline
وحدة بيانات يقاس التغيير في ضوئها.

Biomass
مادة مشتقة حديثاً من الغلاف الحيوي.

Biomass-based CCS
احتجاز الكربون وتخزينه اللذان تكون الكتلة الحيوية هي مادة التلقيم (راجعها) فيهما.

Bituminous coal
درجة وسيطة من الفحم ما بين الخث والانتراسيت، هي أقرب إلى الانتراسيت.

Blow-out
تشير إلى فشل كارثي لبئر عندما تتدفق سوائل البترول أو المياه منها بلا قيد إلى السطح.

Bottom-up model
نموذج يتضمن تفاصيل تكنولوجية وهندسية في التحليل.

Boundary
هو، في احتساب غازات الاحتباس الحراري، الفصل بين وحدات الاحتساب، سواء كانت وطنية أو تنظيمية أو تطبيقية أو عملية أو قطاعات.

Buoyancy
ميل سائل أو مادة صلبة إلى الارتفاع من خلال سائل ذي كثافة أعلى.

Cap rock
صخرة ذات نفاذية منخفضة بشدة تكون بمثابة سداد علوي يحول دون انسياب سوائل من خزان.

Capture efficiency
نسبة ثاني أكسيد الكربون التي تنفصل عن مجرى الغاز في مصدر.

Carbon credit
صك قابل للتحويل والنقل يتيح لمنظمة أن تستفيد مالياً من خفض في الانبعاثات.

Carbonate
معادن طبيعية مكونة من أنيونات مختلفة لاصقة بكاتيون ثالث أكسيد الكربون (منها على سبيل المثال الكالسيت والدولميت والسيدريت والحجر الجيري).

Carbonate neutralization
طريقة لتخزين الكربون في المحيطات تقوم على تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع كربونات معدنية من قبيل الحجر الجيري لإنتاج أنيونات بيكربونات وكاتيونات قابلة للذوبان.

CCS
احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه.

CDM
آلية تنمية نظيفة: آلية ينص عليها بروتوكول كيوتو لمساعدة البلدان غير المدرجة في المرفق الأول على المساهمة في أهداف البروتوكول ولمساعدة البلدان المدرجة في المرفق الأول على الوفاء بالتزاماتها.

CO_2 avoided
الفرق بين ثاني أكسيد الكربون المحتجز والمنقول و/أو المخزون، وكمية ثاني أكسيد الكربون التي تتولد عن نظام لا توجد لديه آلية احتجاز، مطروحاً منه الانبعاثات التي لا يحتجزها نظام لديه آلية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون.

Co-firing
استخدام أكثر من نوع واحد من أنواع الوقود في آن واحد في محطة لتوليد الطاقة أو في عملية صناعية

Cryogenic
يتعلق بدرجات الحرارة المنخفضة، التي تقل عادة عن −100° درجة مئوية.

Deep saline formation
تكوين صخري في الأعماق تحت سطح الأرض مؤلف من مواد ذات نفاذية ويحتوي على سوائل شديدة الملحية.

Deep sea
البحار على أعماق تزيد على 1000 متر.

Demonstration phase
طوْر تبلغه التكنولوجيا وفيه تكون قد أقيمت وطبقت على نطاق محطة تجريبية ولكن يلزم لها مزيد من التطوير لكي تصبح جاهزة لتصميم وبناء نظام على نطاق كامل.

Dense phase
غاز مضغوط بحيث يبلغ درجة كثافة تقرب من درجة كثافة السائل.

Depleted
فيما يتعلق بخزان: عندما ينخفض الإنتاج إنخفاضاً كبيراً.

ECBM
الاستخراج المحسن لغاز الميثان من الطبقات الحاملة للفحم؛ واستخدام ثاني أكسيد الكربون لتحسين استخراج غاز الميثان الموجود في الطبقات الحاملة للفحم التي لا يمكن تعدينها وذلك عن طريق الامتزاز التفاضلي لثاني أكسيد الكربون على الفحم.

Economic potential
كمية التخفيضات في غازات الاحتباس الحراري التي تتحقق، من خيار محدد، بطريقة مجدية بالنسبة للتكاليف في ظل الظروف السائدة (أي القيمة السوقية لتخفيضات ثاني أكسيد الكربون وتكاليف الخيارات الأخرى).

Economically feasible under specific conditions
كوْن التكنولوجيا مفهومة جيداً وتستخدم في تطبيقات تجارية، من قبيل نظام ضريبي مؤات أو سوق خاصة، بحيث تعالج 0.1 ميغاطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، مع وجود قلة (أقل من 5) من عمليات تكرار هذه التكنولوجيا.

EGR
الاستخراج المحسن للغاز: استخراج الغاز الذي يكون إضافياً بالنسبة للغاز الذي ينتج طبيعياً وذلك بواسطة حَقْن السوائل أو طرق أخرى.

Emission factor
مقياس طبيعي لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري من حيث نشاطها، ومن ذلك مثلاً الأطنان المنبعثة من تلك الغازات مقابل كل طن من الوقود المستهلك.

Emissions trading
نظام للاتجار يسمح ببيع أو شراء عدد محدد من الأطنان ينطلق من ملوث ما.

Enhanced gas recovery
انظر EGR.

Enhanced oil recovery
انظر EOR.

EOR
الاستخراج المحسن للنفط: استخراج النفط الذي يكون إضافياً بالنسبة للنفط الذي ينتج طبيعياً وذلك بواسطة حَقْن السوائل أو بواسطة طرق أخرى.

Fault
في الجيولوجيا هو سطح يتوقف عنده استمرار الطبقات، بل يحدث إنزياحها.

Feedstock
المادة التي تُستخدم في تلقيم عملية.

Fixation
توقُّف حركة ثاني أكسيد الكربون بتفاعله مع مواد أخرى من أجل إنتاج مركب ثابت.

Flue gas
الغازات التي تنتج عن احتراق وقود وتنبعث عادة إلى الغلاف الجوي.

Formatiom
جسم من الصخر ذو مدى كبير إلى حد ما وذو خواص متميزة تتيح لخبراء الجيولوجيا وضع خرائط له ووصفه وتسميته.

Formatiom water
الماء الذي يحدث طبيعياً داخل مسام تكوينات صخرية.

Fracture
أي شرخ في الصخر لم تحدث أي حركة كبيرة على امتداده.

Fuel cell
جهاز كيميائي كهربائي يتأكسد فيه وقود بطريقة محكومة لينتج تياراً كهربائياً وحرارة بطريقة مباشرة.

Fugitive emission
أي انطلاقات لغازات أو أبخرة من أنشطة بشرية من قبيل معالجة أو نقل الغاز أو البترول.

Gas turbine
آلة يحترق فيها وقود بهواء أو أكسجين مضغوط ويتحقق بها العمل الميكانيكي بواسطة تمدد المنتجات الساخنة.

Gasification
عملية يتحول بها وقود صلب يحتوي على كربون إلى وقود غازي يحتوي على كربون وهيدروجين بواسطة تفاعله مع الهواء أو الأكسجين والبخار.

Geochemical trapping
الإبقاء على ثاني أكسيد الكربون المحقون بواسطة التفاعلات الكيميائية الأرضية.

Hydrate
مركب أشبه بالجليد يتكون بواسطة تفاعل الماء وثاني أكسيد الكربون أو غاز الميثان أو غازات مماثلة.

IGCC
الدورة المختلطة للتغويز المتكامل: توليد الطاقة الذي يحدث فيه تغويز (راجعها) للهيدروكربونات أو للفحم ويُستخدم الغاز كوقود لتشغيل عنفَة (توربينة) تعمل بالغاز أو بالبخار.

Injection
عملية استخدام الضغط لإجبار سوائل على النزول في آبار.

Injection well
بئر تُحقن فيها سوائل بدلاً من أن تُنتج.

JI
التنفيذ المشترك: وهو يتيح، بموجب بروتوكول كيوتو، لطرف لديه هدف فيما يتعلق بانبعاث غازات الاحتباس الحراري أن يحصل على ائتمانات من الأطراف الأخرى المدرجة في المرفق الأول.

Kyoto Protocol
البروتوكول الملحق باتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، الذي اعتُمد في كيوتو في 11 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

Leakage
فيما يتعلق بالاتجار بالكربون هو التغير في الانبعاثات البشرية بواسطة المصادر أو عمليات الإزالة بواسطة المصارف التي تحدث خارج حدود المشروع.

Leakage
فيما يتعلق بتخزين الكربون هو إفلات سائل محقون من التخزين.

LHV
قيمة التسخين الأقل: الطاقة التي تنطلق من احتراق للوقود يستبعد حرارة الماء الكامنة.

Limestone
صخر رسوبي يتكون في معظمه من الكالسيت المعدني (كربونات الكالسيوم)، ويتشكل عادة من قشور الكائنات الميتة.

London Convention
الاتفاقية المتعلقة بمنع التلوث البحري الناجم عن إغراق النفايات ومواد أخرى، التي اعتُمدت في لندن ومكسيكو وموسكو وواشنطن في 29 كانون الأول/ ديسمبر 1972.

London Protocol
البروتوكول الملحق بالاتفاقية الذي اعتُمد في لندن في 2 تشرين الثاني/ نوفمبر 1996 ولكن لم يبدأ نفاذه حتى وقت كتابة هذا التقرير.

Low-carbon energy carrier
وقود تكون انبعاثات ثاني أكسيد الكربون منه منخفضة على نطاق دورته بأكملها، من قبيل الميثانول.

MEA
أحادي الإيثانولامين.

Membrane
طبقة أو كتلة من مادة تفصل انتقائياً مكونات خليط سوائل.

Migration
حركة السوائل في صخور مستودع.

Mitigation
عملية التخفيف من تأثير أي فشل.

Monitoring
عملية قياس كمية ثاني أكسيد الكربون المخزونة وموقعها.

MWh
ميغاواط ساعة.

National Greenhouse Gas Inventory
قائمة تحصر انبعاثات غازات الاحتباس الحراري البشرية بحسب مصادرها وعمليات الإزالة لها بواسطة المصارف تعدها الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ.

Natural analogue
حدوث طبيعي يعكس من حيث معظم العناصر الأساسية نشاطاً بشرياً مزمعاً أو فعلياً.

NGCC
دورة الغاز الطبيعي المختلطة: محطة طاقة تستخدم الغاز الطبيعي في الإشعال ومزودة بعنفات غازية وبخارية.

OSPAR
اتفاقية حماية البيئة البحرية لشمال شرق المحيط الأطلسي، التي اعتُمدت في باريس في 22 أيلول/ سبتمبر 1992.

Oxyfuel combustion
احتراق وقود مع أكسجين نقي أو خليط من الأكسجين والماء وثاني أكسيد الكربون.

Partial pressure
الضغط الذي يمارسه غاز ما في خليط من الغازات إذا لم تكن الغازات الأخرى موجودة.

PC
الفحم المسحوق: وهو يُستخدم عادة في الغلايات التي يُستخدم في تلقيمها الفحم المسحوق ناعماً.

Permeability
القدرة على دفق أو نقل السوائل من خلال مادة صلبة مسامية من قبيل الصخور.

Point source
مصدر للانبعاثات ينحصر في موقع صغير واحد.

Pore space
الحيز الفاصل بين حبيبات صخرة أو حبيبات رسوبية الذي يمكن أن يحتوي على سوائل.

Post-combustion capture
احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق.

Pre-combustion capture
احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد معالجة الوقود قبل الاحتراق.

Prospectivity
تقدير نوعي لاحتمال وجود موقع مناسب للتخزين في منطقة بعينها استناداً إلى المعلومات المتوافرة.

Reduction commitment
التزام من جانب طرف في بروتوكول كيوتو بالوفاء بالحد الكمي المسموح به له فيما يتعلق بالانبعاثات.

Remediation
عملية إصلاح أي مصدر فشل.

Renewables
مصادر الطاقة التي تتجدد ذاتياً من قبيل الطاقة الشمسية والطاقة المائية والرياح والكتلة الحيوية.

Representative Value
تستند القيمة البيانية إلى متوسط القيم في الدراسات المختلفة.

Reservoir
جسم صخري تحت السطح له مسامية ونفاذية تكفيان لتخزين السوائل ونقلها.

Retrofit
تعديل في المعدات الموجودة من أجل الارتقاء بالمستوى وإدخال تغييرات بعد التركيب.

Risk assessment
جزء من نظام لإدارة المخاطر.

Saline formation
صخور رسوبية مشبعة بمياه تكوينية تحتوي على تركيزات عالية من الأملاح المذابة.

Scenario
وصف معقول للمستقبل استناداً إلى مجموعة متسقة داخلياً من الافتراضات عن العلاقات الرئيسية والقوى المسببة.

Scrubber
جهاز للتماس بين الغازات والسوائل يستخدم لتنقية الغازات أو لاحتجاز عنصر غازي.

Seabed
الخط الفاصل بين الماء الحر والجزء العلوي من رسابة القاع.

Seal
صخرة بلا نفاذية تشكل حاجزاً فوق خزان وحوله بحيث تُحتجز السوائل في الخزان.

Sedimentary basin
هبوط طبيعي كبير في سطح الأرض مملوء بالرواسب.

Seismic technique
قياس خواص الصخور بواسطة سرعة الأمواج الصوتية التي تتولد اصطناعياً أو طبيعياً.

Sink
الامتصاص الطبيعي لثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، في التربة أو الغابات أو المحيطات عادة.

Source
أي عملية أو نشاط أو آلية ينطلق منها غاز من غازات الاحتباس الحراري، أو سليفة لهما، إلى الغلاف الجوي.

SRES
التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات؛ وهو يستخدم كأساس للتوقعات المناخية في تقرير التقييم الثالث (راجعه).

Stabilization
يتعلق بتثبيت تركيزات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي.

Stable geological formation
تكوين (راجعه) لم يقلقله مؤخراً تحرك تكتوني.

Storage
عملية يُقصد بها الإبقاء على ثاني أكسيد الكربون المحتجز حتى لا يصل إلى الغلاف الجوي.

Supercritical
عند درجة حرارة وضغط أعلى من درجة الحرارة والضغط الحرجين للمادة المعنية.

Sustainable
فيما يتعلق بالتنمية هي أن تكون مستدامة في المجالات الإيكولوجية والاجتماعية والاقتصادية.

TAR
تقرير التقييم الثالث للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ.

Technical Potential
مدى إمكانية الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بتطبيق تكنولوجيا أو ممارسة تكون قد بلغت طوْر البيان العملي.

Top-down model
نموذج يستند إلى تطبيق نظرية الاقتصاد الكلي وتقنيات الاقتصاد القياسي على البيانات التاريخية المتعلقة بالاستهلاك والأسعار وما إلى ذلك.

Trap
بنية جيولوجية تحتفظ مادياً بالسوائل الأخف من السوائل الخلفية، ومثال ذلك الكوب المقلوبة.

UNFCCC
اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، التي اعتُمدت في نيويورك في 9 أيار/ مايو 1992.

Unminable
ليس من المرجح إلى حد بالغ تعدينها في ظل الظروف الاقتصادية الحالية أو المتوقعة.

Upper ocean
الطبقة العلوية من المحيط التي تعلو عمقاً قدره 1000 متر.

Verification
إثبات نتائج مراقبة (راجعها)، حتى مستوى لم يتقرر بعد. وفي سياق آلية التنمية النظيفة (CDM) هو الاستعراض المستقل الذي يجريه كيان تطبيقي مسمى للتخفيضات الخاضعة للمراقبة في الانبعاثات البشرية المصدر.

Well
فتحة من صُنع الإنسان تُحفر في الأرض لإنتاج سوائل أو غازات أو لإتاحة حَقْن السوائل.

المرفق الثاني – قائمة التقارير الرئيسية للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)

تغير المناخ – التقييم العلمي
تقرير عام 1990 للفريق العامل المعني بالتقييم العلمي التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)

تغير المناخ – تقييم الآثار
تقرير 1990 للفريق العامل المعني بتقييم الآثار التابع لهيئة (IPCC)

تغير المناخ – استراتيجيات التصدي
تقرير 1990 للفريق العامل المعني باستراتيجيات التصدي التابع للهيئة (IPCC)

سيناريوهات الانبعاثات
تقرير أعده الفريق العامل المعني باستراتيجيات التصدي التابع للهيئة (IPCC), 1990

Assessment of the Vulnerability of Costal Areas to Sea Level Rise – A Common Methodology 1991

Climate Change 1992- The Supplementary Report to the lPCC Scientific Assessment
The 1992 report of the lPCC Scientific Assessment Working Group

Climate Change 1992 – The Supplementary Report to the lPCC lmpacts Assessment
The 1992 report of the lPCC lmpacts Assessment Working Group

Climate Change: The lPCC 1990 and 1992 Assessments
lPCC First Assessment Report Overview and Policymaker Summaries, and l992 lPCC Supplement

Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea
Costal Zone Mangement Subgroup of the lPCC Response Strategies Working Group, 1992

Report of the lPCC Country Study Workshop, 1992

Preliminary Guidelines for Assessing lmpacts of Climate Change, 1992

lPCC Guidelines for National Greenhouse Gas lnventories (3 volumes), 1994

Climate Change 1994 – Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the lPCC lS92 Emission Senarios

المبادئ التوجيهية الفنية للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ لتقييم آثار تغير المناخ وإجراءات التكيف معه، 1995

Climate Change 1995 – The Science of Climate Change - Contribution of Working Group l to the Second Assessment Report

Climate Change 1995 – Scientific – Technical Analyses of lmpacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group ll to the Second Assessment Report

Climate Change 1995 – The Economic and Social Dimensions of Climate Change – Contribution of Working Group lll to the Second Assessment Report

تغير المناخ 1995 – التقرير التجميعي للمعلومات العلمية والفنية المشمولة بتقرير التقييم الثاني للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ والمتصلة بتفسير المادة 2 من اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ

Revised 1996 lPCC Guidelines for National Greenhouse Gas lnventories (3 volumes), 1996

Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change – lPCC Technical Paper 1, 1996

An lntroduction to Simple Climate Models Used in the lPCC Second Assessment Report – lPCC Technical Paper 2, 1997

Stabilisation of AtmospHeric Greenhouse Gases: PHysical, Biological and Socio-Economic lmplications – lPCC Technical Paper 3, 1997

lmplications of Proposed Co2 Emissions Limitations – lPCC Technical Paper 4, 1997

The Regional lmpacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability

Aviation and the Global Atmoshpere

القضايا المنهجية والتكنولوجية في مجال نقل التكنولوجيا

سيناريوهات الانبعاثات

استخدام الأراضي وتغير استخدام الأراضي والحراجة

Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas lnventories
lPCC National Greenhouse Gas lnventories Programme, 2000

تغير المناخ والتنوع الأحيائي – الورقة الفنية الخامسة للهيئة
(IPCC), 2002

تغير المناخ 2001: الأساس العلمي – إسهام الفريق العامل الأول في تقرير التقييم الثالث

تغير المناخ 2001: التأثيرات والتكيف وسرعة التأثر – إسهام الفريق العامل الثاني في تقرير التقييم الثالث

تغير المناخ 2001: التخفيف – إسهام الفريق العامل الثالث في تقرير التقييم الثالث

تغير المناخ 2001: التقرير التجميعي

Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry
lPCC National Greenhouse Gas lnventories Programme, 2003

التقرير الخاص لفريق التقييم التكنولوجي الاقتصادي TEAP التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) والخاص بحماية طبقة الأوزون والنظام المناخي العالمي: القضايا المتعلقة بمركبات الهيدروكربون الفلورية والمواد الكربونية الفلورية المشبعة، 2005

يقدم

هذا التقرير الخاص الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) معلومات موجهة إلى واضعي السياسات والعلماء والمهندسين في مجال تغيّر المناخ والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويصف التقرير مصادر انبعاث ثاني أكسيد الكربون، واحتجازه، ونقله، وتخزينه. ويبحث أيضاً التكاليف، والإمكانات الاقتصادية، والقضايا المجتمعية المتعلقة بالتكنولوجيا، بما في ذلك التصور العام والجوانب التنظيمية. ومن بين خيارات التخزين التي يقيّمها التقرير التخزين الجيولوجي، والتخزين في المحيطات، والكربنة المعدنية. ويتناول التقرير، على الأخص، احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في سياق الخيارات الأخرى للتخفيف من حدة تغير المناخ، ومنها إحداث تحوّل في أنواع الوقود المستخدمة، وتحقيق الكفاءة في استخدام الطاقة، ومصادر الطاقة المتجددة والنووية.

ويبين هذا التقرير أن إمكانات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه كبيرة، وأن تكاليف التخفيف من حدة تغير المناخ يمكن أن تنخفض بالمقارنة بالاستراتيجيات التي يُنظر في إطارها في خيارات أخرى فقط للتخفيف من حدة تغير المناخ. وأهمية احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بالنسبة للتخفيف من حدة تغير المناخ تتوقف على عدد من العوامل، من بينها تقديم حوافز مالية من أجل نشر هذه التكنولوجيا، وما إذا كانت مخاطر التخزين يمكن أن تُدار إدارة ناجحة. ويتضمن المجلد ملخصاً لواضعي السياسات أقرته الحكومات الممثلة في الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، وملخصاً فنياً.

والتقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ بشأن احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه يقدم معلومات لا تقدر بثمن بالنسبة للباحثين في مجالات علوم البيئة والجيولوجيا والهندسة وقطاع النفط والغاز وواضعي السياسات لدى الحكومات والمنظمات البيئية والعلماء والمهندسين العاملين في قطاع الصناعة.

ولقد أنشئت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) شراكةً بين المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP). وتقدم الهيئة تقييمات دولية، ذات حجية، للمعلومات العلمية المتعلقة بتغير المناخ. وقد أصدرت الهيئة هذا التقرير بناء على دعوة من اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية المتعلقة بشأن تغير المناخ.

والجهة الناشرة للتقرير الخاص الكامل هي مطبعة جامعة كامبريدج (www.cambridge.org)، ومن الممكن الاطلاع على النسخة الرقمية منه عن طريق موقع أمانة الهيئة على شبكة الويب (www.ipcc.ch)، أو الحصول عليها على قرص مدمج (ذاكرة قراءة فقط) من أمانة الهيئة. ويحتوي هذا الكتيب على الملخص الموجه إلى واضعي السياسات وعلى الملخص الفني للتقرير.