

## الفصل 5

---

# النقل والحقن والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون

## المؤلفون

سام هولواي (المملكة المتحدة)، أنهار كاريمجي (الولايات المتحدة الأمريكية)،  
ماكوتو أكاي (اليابان)، ريتا بيباتي (فنلندا)، وكريستين ريبداال (النرويج)

## المحتويات

5-5	1-5 مقدمة.....
5-5	2-5 عرض مُجمل.....
7-5	3-5 احتجاز ثاني أكسيد الكربون.....
8-5	4-5 نقل ثاني أكسيد الكربون.....
8-5	1-4-5 نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب.....
10-5	2-4-5 نقل ثاني أكسيد الكربون في السفن.....
10-5	3-4-5 منشآت التخزين الوسيطة في مسارات نقل ثاني أكسيد الكربون.....
10-5	5-5 حقن ثاني أكسيد الكربون.....
11-5	6-5 التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون.....
11-5	1-6-5 وصف مسارات/مصادر الانبعاثات.....
13-5	7-5 الموضوعات المنهجية.....
14-5	1-7-5 اختيار الطريقة.....
16-5	2-7-5 اختيار معاملات الانبعاثات وبيانات الأنشطة.....
17-5	3-7-5 الاستيفاء.....
17-5	4-7-5 إعداد متسلسلات زمنية متسقة.....
18-5	8-5 تقييم أوجه عدم التيقن.....
18-5	9-5 ضمان/مراقبة جودة الحصر (QA/QC).....
20-5	10-5 التقارير والتوثيق.....
22-5	المرفق 1-5 وصف مختصر لتكنولوجيات الرصد المحتملة بالنسبة لمواقع التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون.....
31-5	المراجع.....

## المعادلات

16-5	المعادلة 1-5 إجمالي الانبعاثات السنوية.....
------	---

## الأشكال التوضيحية

6-5	الشكل 1-5 بيان تخطيطي لاحتجاز وتخزين الكربون مع الترقيم الخاص بمناقشة الأنظمة أعلاه.....
7-5	الشكل 2-5 أنظمة احتجاز ثاني أكسيد الكربون (بعد التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون).....
13-5	الشكل 3-5 إجراءات تقدير الانبعاثات الناتجة عن مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون.....
22-5	الشكل 1 شكل توضيحي لاحتمالات تسرب ثاني أكسيد الكربون من مستودع التخزين الجيولوجي خارج موقع التخزين.....

## الجداول

- الجدول 5-1 فئات المصدر الخاصة باحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون ..... 7-5
- الجدول 5-2 معاملات الانبعاثات الافتراضية للمستوى 1 بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب من موقع احتجاز ثاني أكسيد الكربون إلى موقع التخزين النهائي ..... 10-5
- الجدول 5-3 مسارات الانبعاثات المحتملة من مستودعات التخزين الجيولوجي ..... 12-5
- الجدول 5-4 جدول للعرض المفضل: عرض مجمل لاحتجاز ونقل وحقق ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون الخاص بالتخزين طويل الأجل ..... 19-5
- الجدول 5-1 التكنولوجيات المحتملة لرصد طبقات الأرض العميقة وإمكانية تطبيقها ..... 24-5
- الجدول 5-2 التكنولوجيات المحتملة لرصد طبقات الأرض الضحلة وإمكانية تطبيقها ..... 26-5
- الجدول 5-3 التكنولوجيات الخاصة بتحديد معدلات التدفق من الأرض أو المسطحات المائية إلى الغلاف الجوي وإمكانية تطبيقها ..... 27-5
- الجدول 5-4 تكنولوجيات رصد المستويات العالية لثاني أكسيد الكربون في الهواء والتربة (رصد التسرب) ..... 28-5
- الجدول 5-5 القياسات البديلة لرصد التسرب من مواقع التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون ..... 29-5
- الجدول 5-6 تكنولوجيات رصد مستويات ثاني أكسيد الكربون في مياه البحر وإمكانية تطبيقها ..... 30-5

## المربعات

- المربع 5-1 استنتاج معاملات الانبعاثات الافتراضية بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب ..... 9-5

## 5 النقل والحقن والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون

### 1-5 مقدمة

إن احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (CCS) هو أحد الخيارات في حافظة الإجراءات التي يمكن استخدامها لخفض انبعاثات غاز الاحتباس الحراري الناتجة عن الاستخدام المستمر للوقود الأحفوري.

كما أن عملية احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون في أبسط صورها تتألف من ثلاث خطوات رئيسية: احتجاز وضغط ثاني أكسيد الكربون (عادةً ما يتم ذلك في التجهيزات الصناعية الكبيرة<sup>1</sup>)، ونقله إلى مواقع التخزين وعزله عن الغلاف الجوي على المدى الطويل. أصدرت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (2005) تقريراً خاصاً بشأن احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (SRCCS) يمكن الحصول منه على معلومات إضافية فيما يتعلق باحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون. كما إنه قد تم إنتاج مادة هذه الخطوط التوجيهية بالتعاون مع مؤلفي التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون.

يمكن إجراء التخزين الجيولوجي في الخزانات الطبيعية بباطن الأرض مثل حقول النفط والغاز وطبقات الفحم والتكونات الملحية التي تحتوي على ماء، وذلك باستعمال الحواجز الجيولوجية لعزل ثاني أكسيد الكربون عن الغلاف الجوي. يوضح الفصل 5 من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون وصفاً لعمليات التخزين المضمنة. والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون قد يحدث إما في المواقع المخصصة لتخزين ثاني أكسيد الكربون، أو أثناء عمليات الاستعادة المعززة للزيت أو الاستعادة المعززة للغاز أو عمليات استعادة ميثان طبقة الفحم الحجري المقوى (EOR أو EGR أو ECBM على التوالي).

توفر هذه الخطوط التوجيهية دليل تقدير الانبعاثات من النقل والحقن والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون (CCGS) فقط. وهي لا توفر أي طرق لتقدير الانبعاثات بالنسبة لأي نوع آخر من خيارات التخزين، مثل التخزين في المياه المفتوحة أو تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى كربونات عضوية خاملة. وباستثناء الكربنة المعدنية لمواد نفايات معينة، فلا تزال جميع هذه التكنولوجيات في مرحلة البحث ولم تدخل مرحلة الإثبات أو المراحل المتقدمة من التطوير التقني للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (2005). حيث إنه قد يتم تقديم دليلًا لتجميع قوائم حصر الانبعاثات الناتجة عن هذه التكنولوجيات في المراجعات المستقبلية للخطوط التوجيهية في حالة وصولها إلى مراحل متقدمة من التطوير.

كما لا يتناول هذا الفصل الانبعاثات الناتجة عن الوقود الأحفوري المستخدم في احتجاز وضغط ونقل وحقن ثاني أكسيد الكربون، حيث يتم إدراج هذه الانبعاثات والإبلاغ عنها في الحصر الوطني باعتبارها استخداماً للطاقة في الفئات الملائمة للاستخدام الثابت أو المتحرك للطاقة. ويستثنى الوقود المستخدم في سفن النقل الدولي، عند الضرورة، عن طريق قواعد مستودعات الوقود بغض النظر عن نوع الحمولة، ومن غير المرغوب فيه أن تمتد بنود مستودعات الوقود لتشمل الانبعاثات الناتجة عن أي استخدام للطاقة في خطوط الأنابيب العاملة.

### 2-5 عرض مُجمل

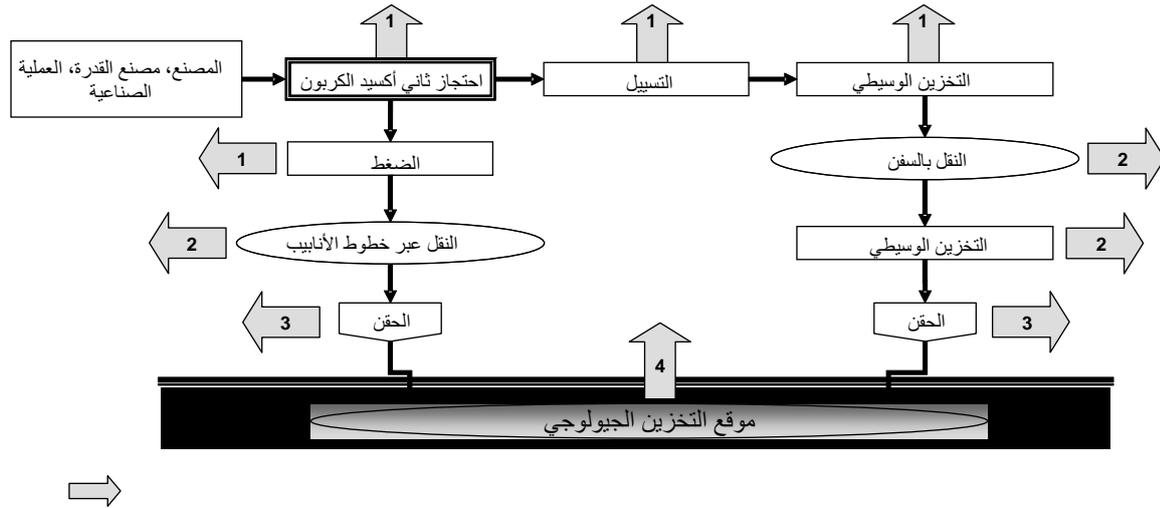
تقسم هذه الخطوط التوجيهية سلسلة الاحتجاز والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون إلى أربعة أنظمة فرعية (الشكل 1-5)

- 1- نظام الاحتجاز والضغط: يشمل الحد الفاصل لأنظمة الاحتجاز والضغط والتكثيف، عند الضرورة، من أجل النقل.
- 2- نظام النقل: تعتبر خطوط الأنابيب والسفن هي الوسائل الأكثر استخداماً في نقل ثاني أكسيد الكربون بكميات كبيرة. كما يعتبر حد أنظمة المراحل الأولية هو الإخراج الخاص بمصانع الضغط/التكثيف في نظام الاحتجاز والضغط. في حين أن حد أنظمة المراحل النهائية هو نهاية المراحل النهائية لخط أنابيب النقل أو منشآت تفريغ حمولات السفن. يجب ملاحظة إنه قد تكون هناك محطات للضغط على طول نظام خط الأنابيب، حيث سيتم إضافتها لأي عمليات ضغط في النظام I أو النظام 3.
- 3- نظام الحقن: يشمل نظام الحقن المنشآت السطحية في موقع الحقن، مثل منشآت التخزين ومضاعف التوزيع في الطرف النهائي لخط أنابيب النقل، وخطوط أنابيب التوزيع إلى الآبار، ومنشآت الضغط الإضافية، وأنظمة القياس والمراقبة، ورأس أو رعوس البئر وآبار الحقن. في حين أن حد أنظمة المراحل الأولية هو نهاية المراحل النهائية لخط أنابيب النقل أو منشآت تفريغ حمولات السفن؛ كما إن حد أنظمة المراحل النهائية هو مستودع التخزين الجيولوجي.
- 4- نظام التخزين: يشمل نظام التخزين مستودع التخزين الجيولوجي.

<sup>1</sup> هناك أمثلة لمصادر النقاط الكبرى لثاني أكسيد الكربون التي يمكن الاحتجاز بها تشمل توليد القدرة، وصناعة الحديد وال فولاذ، ومعالجة الغاز الطبيعي، وصناعة الأسمنت، وإنتاج الأمونيا، وإنتاج الهيدروجين ومصانع الإيثانول.

## بيان تخطيطي لاحتجاز وتخزين الكربون مع التقييم الخاص بمناقشة الأنظمة أعلاه.

الشكل 5-1



لا يشمل هذا الفصل التوجيهات الخاصة باحتجاز وضغط ثاني أكسيد الكربون. يمكن الحصول على عرض مختصر بالإضافة إلى معلومات حول كيفية الحصول على الخطوط التوجيهية لتقدير الانبعاثات بالنسبة لاحتجاز وضغط ثاني أكسيد الكربون في القسم 5-3. كما إن الخطوط التوجيهية لتجميع بيانات حصر الانبعاثات الناتجة عن أنظمة نقل وحقن وتخزين ثاني أكسيد الكربون الخاصة بسلسلة الاحتجاز والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون موضحة في الأقسام 4-5 و5-5 و6-5 من هذا الفصل على التوالي. كما إن الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن المنشآت السطحية في مواقع الاستعادة المعززة للزيت والاستعادة المعززة للغاز وميثان طبقة الفحم الحجري المقوى (مع أو بدون تخزين ثاني أكسيد الكربون) تصنف باعتبارها عمليات للزيت والغاز، ويوفر الفصل 4 من المجلد 2 التوجيهات الخاصة بتقدير هذه الانبعاثات. تصنف الانبعاثات الناتجة عن مستودعات التخزين الباطنية في مواقع الاستعادة المعززة للزيت والاستعادة المعززة للغاز وميثان طبقة الفحم الحجري المقوى باعتباره انبعاثات ناتجة عن مواقع التخزين الجيولوجي، كما يوضح القسم 5-7 من هذا الفصل التوجيهات الخاصة بتقدير هذه الانبعاثات.

يوضح الجدول 5-1 الفئات التي يتم من خلالها الإبلاغ عن الانبعاثات الناتجة من أنظمة نقل وحقن وتخزين ثاني أكسيد الكربون.

## 5-3 احتجاز ثاني أكسيد الكربون

تأتي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ بشكل رئيسي من احتراق الوقود الأحفوري (والكتلة الحيوية) في توليد القدرة والأبنية الصناعية وقطاعات النقل. كما ينبعث ثاني أكسيد الكربون أيضاً من مصادر أخرى غير الاحتراق في عمليات صناعية معينة، مثل تصنيع الأسمنت ومعالجة الغاز الطبيعي وإنتاج الهيدروجين.

يتولد عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون تيار مركز من ثاني أكسيد الكربون عند مستوى عال من الضغط يمكن نقله إلى أحد مواقع التخزين وتخزينه هناك. يشمل حد الأنظمة الخاص بالاحتجاز في هذه الخطوط التوجيهية الضغط وأي عمليات لإزالة الماء أو عمليات تكثيف ثاني أكسيد الكربون الأخرى التي تحدث قبل النقل.

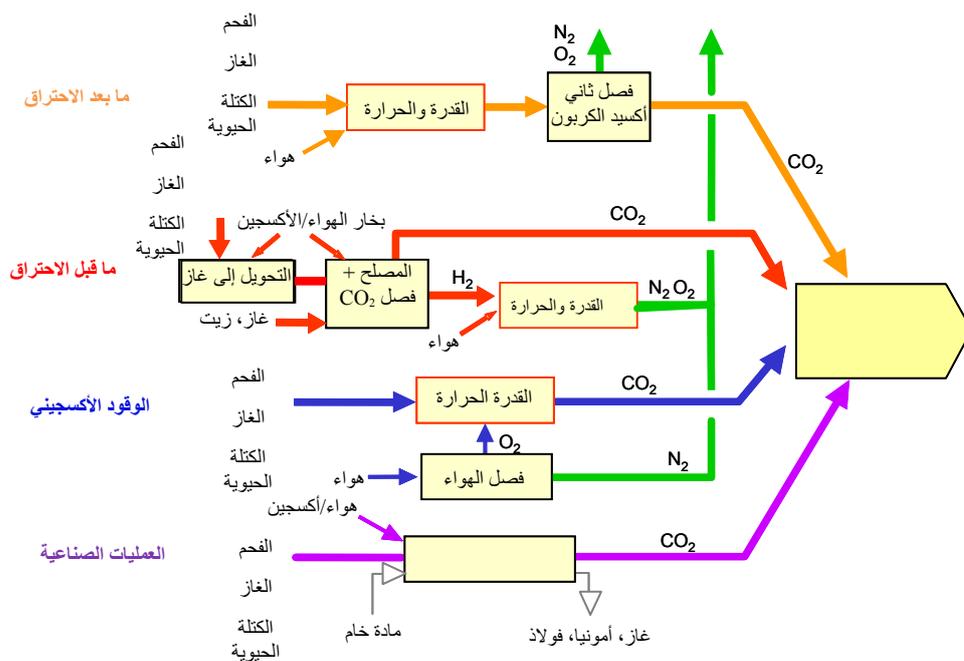
تعتبر مصانع القدرة الكهربائية والمنشآت الصناعية الكبرى الأخرى هي الجهات الرئيسية المرشحة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون على الرغم من إن تيارات ثاني أكسيد الكربون الخالصة والمنفصلة عن الغاز الطبيعي في صناعة معالجة الغاز هي التي قد تم احتجازها وتخزينها حتى الآن. لقد تم نشر التكنولوجيا المتاحة بشكل عام بحيث يتم احتجاز من 85 إلى 95 في المائة من ثاني أكسيد الكربون المعالج في أحد مصانع الاحتجاز، الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (2005). ويوضح الشكل 5-2 المأخوذ من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون عرضاً مجملًا للعمليات ذات الصلة. نوضح فيما يلي وصفاً مختصراً للأساليب الرئيسية. ويوجد المزيد من التفاصيل في هذا الصدد في الفصل 3 من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون.

- احتجاز ما بعد الاحتراق : يمكن فصل ثاني أكسيد الكربون المنبعث من غازات المداخل الخاصة بمصانع الاحتراق أو الناتج عن تيارات الغاز الطبيعي والذي يتم تغذيته في وحدة الضغط وإزالة الماء لتحويل تيار نظيف وجاف نسبياً من ثاني أكسيد الكربون إلى نظام النقل. وعادة ما تستخدم هذه الأنظمة محلولة سائل لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون.
- احتجاز ما قبل الاحتراق : يشمل تفاعل الوقود مع الأكسجين أو الهواء و/أو البخار لإنتاج "الغاز الصناعي" أو "غاز الوقود" الذي يتكون أساساً من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، حيث يتفاعل أول أكسيد الكربون مع البخار في مفاعل حفاز، يعرف بمحول الإزاحة، لإنتاج ثاني أكسيد الكربون والمزيد من الهيدروجين. بعد ذلك يتم فصل ثاني أكسيد الكربون عن خليط الغاز، وعادة ما يتم ذلك عن طريق الامتصاص الفيزيائي أو الكيميائي، مما يؤدي إلى وفود غني بالهيدروجين يمكن استخدامه في العديد من التطبيقات مثل المراجل والأفران والمحركات التوربينية العاملة بالغاز وخلايا الوقود. كما تستخدم هذه التكنولوجيا على نطاق واسع في إنتاج الهيدروجين المستخدم بشكل رئيسي في تصنيع الأمونيا والمخصبات وفي عمليات تكرير النفط. يوضح القسم 2-4-3 من الفصل 2 من هذا المجلد التوجيهات الخاصة بكيفية تقدير والإبلاغ عن الانبعاثات الناتجة عن هذه العملية.

- احتجاز الوقود الأوكسجيني : يستخدم الأوكسجين شبه النقي في احتراق الوقود الأوكسجيني بدلاً من الهواء، وهو ما ينتج عنه غاز وقود يتكون أساساً من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء. يمكن ضخ تيار غاز الوقود هذا في وحدة ضغط وإزالة الماء من ثاني أكسيد الكربون مباشرة. إلا إن هذه التكنولوجيا لا تزال في مرحلة الإثبات. يوضح القسم 2-3-4 من الفصل 2 من هذا المجلد التوجيهات الخاصة بكيفية تقدير والإبلاغ عن الانبعاثات الناتجة عن هذه العملية.

الجدول 1-5 فئات المصدر الخاصة باحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون				
1	ج			نقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون
1	ج	1		يشمل احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون احتجاز ثاني أكسيد الكربون ونقله إلى موقع التخزين وعزله على المدى الطويل عن الغلاف الجوي. تغطي الفئة 1 ج الانبعاثات المرتبطة بنقل وحرق وتخزين ثاني أكسيد الكربون. كما يجب الإبلاغ عن الانبعاثات (والاختزالات) ذات الصلة باحتجاز ثاني أكسيد الكربون في قطاع الهيئة الذي تحدث به عملية الاحتجاز (مثل الاحتراق الثابت أو الأنشطة الصناعية).
1	ج	1		الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن الأنظمة المستخدمة لنقل ما يتم احتجازه من ثاني أكسيد الكربون من المصدر إلى موقع الحرق. يمكن أن تشمل هذه الانبعاثات الفقد المتطاير نتيجة للتسرب من المعدات والإطلاق في الهواء والانبعاثات الناتجة عن تلف خط الأنابيب أو الانبعاثات غير المقصودة الأخرى (مثل التخزين المؤقت).
1	ج	1	أ	الانبعاثات المتطايرة من نظام خط الأنابيب المستخدم لنقل ثاني أكسيد الكربون إلى موقع الحرق.
1	ج	1	ب	الانبعاثات المتطايرة من السفن المستخدمة لنقل ثاني أكسيد الكربون إلى موقع الحرق.
1	ج	1	ج	الانبعاثات المتطايرة من الأنظمة الأخرى المستخدمة لنقل ثاني أكسيد الكربون إلى موقع الحرق والتخزين المؤقت.
1	ج	2		الانبعاثات المتطايرة من الأنشطة والمعدات المستخدمة في موقع الحرق وتلك التي تنتج عن الاحتواء النهائي بمجرد وضع ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين.
1	ج	2	أ	الانبعاثات المتطايرة من الأنشطة والمعدات المستخدمة في موقع الحرق.
1	ج	2	ب	الانبعاثات المتطايرة من الاحتواء النهائي بمجرد وضع ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين.
1	ج	3		أي انبعاثات أخرى من احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون لم يتم الإبلاغ عنها في أي مكان آخر.

الشكل 2-5 أنظمة احتجاز ثاني أكسيد الكربون (بعد التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون):



كما هو موضح من قبل في عدد من العمليات الصناعية، تؤدي التفاعلات الكيميائية إلى تكون ثاني أكسيد الكربون بكميات وتركيزات تسمح بالاحتجاز والفصل المباشر لثاني أكسيد الكربون عن غازات العادم الخاصة بها، مثل: إنتاج الأمونيا، وصناعة الأسمنت، وصناعة الإيثانول، وصناعة الهيدروجين، وصناعة الحديد والفولاذ، ومصانع معالجة الغاز الطبيعي.

يتوقف موقع الخطوط التوجيهية لتجميع قوائم حصر الانبعاثات الناتجة عن أنظمة احتجاز وضغط ثاني أكسيد الكربون على طبيعة مصدر ثاني أكسيد الكربون:

- أنظمة الاحتراق الثابت (غالبًا ما تتمثل في مصانع إنتاج القدرة الكهربائية والحرارة): القسم 2-3-4 في الفصل 2 من المجلد 2
- مصانع معالجة الغاز الطبيعي: القسم 2-4-1 من المجلد 2
- مصانع إنتاج الهيدروجين: القسم 2-4-1 من المجلد 2
- الاحتجاز من العمليات الصناعية الأخرى: القسم 1-2-2 في الفصل 1 من المجلد 3 (العمليات الصناعية واستعمال المنتجات)، وخاصة بالنسبة لما يلي:

(1) صناعة الأسمنت: القسم 2-2 من مجلد العمليات الصناعية واستعمال المنتجات

(2) صناعة الميثانول: القسم 3-9 من مجلد العمليات الصناعية واستعمال المنتجات

(3) إنتاج الأمونيا: القسم 2-3 من مجلد العمليات الصناعية واستعمال المنتجات

(4) صناعة الحديد والفولاذ: القسم 2-4 من مجلد العمليات الصناعية واستعمال المنتجات

يمكن أن تنشأ الانبعاثات السلبية من نظام الاحتجاز والضغط في حالة احتجاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن احتراق الكتلة الحيوية، حيث إن ذلك من الإجراءات السليمة ويجب الإبلاغ عن الانبعاثات السلبية من خلاله.

على الرغم من أن المسارات المحتملة للانبعاثات مشتركة بين جميع أنواع التخزين الجيولوجي، إلا إن بعض مسارات الانبعاثات في عمليات الاستعادة المعززة للهيدروكربون تختلف عن تلك الخاصة بالتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون دون الاستعادة المعززة للهيدروكربون. في عمليات الاستعادة المعززة للزيت يتم حقن ثاني أكسيد الكربون في خزان النفط، إلا إن نسبة من الكمية التي يتم حقنها عادةً ما تكون مصاحبة للزيت والغاز الهيدروكربوني والماء في أبار الإنتاج. كما يتم فصل خليط الغاز الهيدروكربوني وثاني أكسيد الكربون عن الزيت الخام ويمكن إعادة حقنه في خزان الزيت أو استخدامه باعتباره غاز وقود في الموقع أو نقله إلى مصنع لمعالجة الغاز للفصل إلى ثاني أكسيد كربون وغاز هيدروكربوني، وذلك وفقًا لمحتوى عنصر الهيدروكربون به. تميل عمليات الاستعادة المعززة للغاز وطبقة ميثان الفحم الحجري المقوى إلى تجنب إنتاج ثاني أكسيد الكربون بسبب التكلفة العالية لفصل ثاني أكسيد الكربون عن خليط الغاز الذي يتم إنتاجه. كما يمكن إعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون الذي يتم فصله عن غاز الهيدروكربون وإعادة حقنه في عملية الاستعادة المعززة للزيت أو إطلاقه في الهواء، وذلك وفقًا لتكلفة إعادة التدوير في مقابل حقن ثاني أكسيد الكربون المستورد. وأيضًا ينبعث الغاز المشبع بثاني أكسيد الكربون من صهاريج تخزين الزيت الخام في عملية الاستعادة المعززة للزيت. حيث يمكن إطلاق هذا البخار في الهواء أو توجّهه أو استخدامه باعتباره غاز وقود وفقًا لمحتويات عنصر الهيدروكربون به. هكذا فإن هناك احتمالات لوجود مصادر إضافية من الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن إطلاق ثاني أكسيد الكربون في الهواء وتوجّهه أو احتراق الغاز الهيدروكربوني المشبع بثاني أكسيد الكربون، وأيضًا من أي كمية ثاني أكسيد كربون محقونة يتم تصديرها مع الهيدروكربونات الصعديّة. يمكن تقدير والإبلاغ عن هذه الانبعاثات بالإضافة إلى الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن العمليات السطحية في مواقع الاستعادة المعززة للزيت والاستعادة المعززة للغاز وطبقة ميثان الفحم الحجري المقوى (من حقن ثاني أكسيد الكربون، و/أو إنتاج الغاز الهيدروكربوني المشبع بثاني أكسيد الكربون أو إعادة تدويره أو إطلاقه في الهواء أو توجّهه أو احتراقه)، بما في ذلك أي كمية محقونة من ثاني أكسيد الكربون يتم تصديرها مع الهيدروكربونات الصعديّة، وذلك باستخدام توجيهات طرق المستوى الأعلى الموضحة في الفصل 4 من المجلد 2.

## 5-4 نقل ثاني أكسيد الكربون

يمكن أن تنتج الانبعاثات المتطايرة من كسور خطوط الأنابيب، والسدادات والصمامات، ومحطات الضغط الوسيطة في خط الأنابيب، ومنشآت التخزين الوسيطة، وسفن نقل ثاني أكسيد الكربون المسال في درجة حرارة منخفضة، ومنشآت تحميل وتفريغ السفن. كما يتم الإبلاغ عن الانبعاثات الناتجة عن نقل ثاني أكسيد الكربون المحتجز في الفئة 1 ج (انظر الجدول 5-1). تعتبر خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون هي الوسائل الأكثر انتشارًا للنقل السائب لثاني أكسيد الكربون وهي من التكنولوجيات الناضجة في السوق التي يمكن استخدامها في العمليات الحالية. كما يتم النقل السائب لثاني أكسيد الكربون عن طريق السفن على الرغم من أن ذلك قد يحدث بشكل قليل نسبيًا، حيث يستخدم في النقل حاويات معزولة في درجة حرارة أقل من درجة حرارة البيئة المحيطة وعلى مستويات ضغط أقل بكثير من المستخدمة في النقل عبر خطوط الأنابيب. كما يمكن أيضًا استخدام الشاحنات وقاطرات السكة الحديدية في نقل الكميات الصغيرة من ثاني أكسيد الكربون، لكن لا تعتبر هذه الطريقة ذات أهمية بالنسبة لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون نتيجة للكميات الكبيرة جدًا التي يمكن احتجازها، لذلك لا توجد طرق متوفرة لحساب الانبعاثات الناتجة عن النقل باستخدام الشاحنات وعربات السكة الحديدية. لكن توجد معلومات إضافية حول نقل ثاني أكسيد الكربون في الفصل 4 من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC، 2005).

## 1-4-5 نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب

لتقدير الانبعاثات الناتجة عن نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب، يمكن استنتاج معاملات انبعاثات افتراضية من معاملات الانبعاثات الخاصة بنقل الغاز الطبيعي (النقل عبر خطوط الأنابيب) كما هي موضحة في القسم 4-2 من هذا المجلد. حيث إن معاملات انبعاثات المستوى 1 الخاصة بنقل الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب المقدمة في الجداول 4-2-4 و 4-2-5 هي على أساس إخراج الغاز الناتج بشكل رئيسي لأن طول خط الأنابيب لا يعتبر من الإحصائيات الوطنية المتوفرة بشكل عام. ومع ذلك، لا تعتمد الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن النقل عبر خطوط الأنابيب بشكل كبير على الإخراج، لكنها تعتمد على حجم أنظمة خطوط الأنابيب والمعدات المستخدمة فيها. وحيث إنه من المفترض أن تكون هناك علاقة بين حجم الأنظمة والغاز الطبيعي المستخدم، فمن المقبول أن يتم استخدام هذا المقرب باعتباره طريقة للمستوى 1 بالنسبة لنقل الغاز الطبيعي.

ما تقدم أعلاه قد يكون غير ملائم لنقل ثاني أكسيد الكربون في تطبيقات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون. كما إنه من الممارسة السليمة أن يتم التعامل مع كل من الاحتجاز والتخزين حسب كل مصنع أو منشأة، وبالتالي يمكن التعرف على طول نظام خط الأنابيب المستخدم في نقل ثاني أكسيد الكربون ويجب استخدامه لتقدير الانبعاثات الناتجة عن النقل.

### المربع 1-5

#### استنتاج معاملات الانبعاثات الافتراضية بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب

يمكن توضيح هبوط الضغط بالنسبة لأي عملية هندسية من خلال ما يلي:

$$\Delta P = \frac{f}{2} \rho * v^2 \frac{l}{D}$$

حيث:

- $v$  تساوي السرعة الخطية للغاز عبر ثقب التسرب وهي تتوقف على حجم التسرب مع تثبيت نفس مقياس ثقب التسرب؛
- $\rho$  تساوي كثافة الغاز؛
- $f$  تساوي رقم احتكاك غير محدد الأبعاد؛
- $l/D$  (الطول مقسوماً على القطر) هو تحديد للحجم الفيزيائي للنظام.

بالنسبة للتسربات،  $1 = f$  ولا تتوقف على طبيعة الغاز. هكذا يتم افتراض أن الضغط الداخلي لخط الأنابيب والأبعاد الفيزيائية هي نفسها بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون والميثان، كما أن سرعة التسرب ترتبط بعلاقة عكسية مع جذر كثافة الغاز ومن هنا فهي مرتبطة بعلاقة نسبية مع جذر الكتلة الجزيئية.

لذلك فإن  $\Delta P$  عندما تكون هي نفسها بالنسبة للميثان وثاني أكسيد الكربون

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

الكتلة الجزيئية لثاني أكسيد الكربون تساوي 44 وللميثان تساوي 16. لذلك فإن معدل انبعاث ثاني أكسيد الكربون على أساس

$$\text{الكتلة يساوي } 1.66 = \sqrt{\frac{44}{16}} \text{ مرة من معدل انبعاث الميثان.}$$

وبناءً عليه يمكن الحصول على معاملات الانبعاثات الافتراضية لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب من خلال ضرب معاملات الانبعاثات الافتراضية الملائمة<sup>a</sup> الموضحة في الجدول 4-2-8 بالنسبة للغاز الطبيعي (عادة ما يكون الميثان) في المعامل 1.66.

ملاحظات:

<sup>a</sup> لتحويل المعاملات الموضحة بالوحدة م<sup>3</sup> إلى وحدات كتلة، يمكن استخدام كتلة محددة بقيمة 0.7 كج/م<sup>3</sup> بالنسبة للميثان.

انظر الفصل 5 من: ر. ج. بيرري، د. جرين، دليل المهندسين الكيماويين في بيرري، النسخة السادسة، ماكجرو هيل بوك كومباني - نيويورك، 1984.

يوضح الجدول 4-2-8 في القسم 4-2 من هذا المجلد معاملات التسرب الدلالية بالنسبة لنقل الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب. وللحصول على معاملات انبعاثات افتراضية للمستوى 1 بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون عن طريق خطوط الأنابيب، يجب تحويل هذه القيم من وحدات المتر المكعب إلى وحدات كتلة وضربها في 1.66 (انظر المربع 1). حيث إن معاملات الانبعاثات الافتراضية الناتجة موضحة في الجدول 5-2.

الجدول 2-5					
معاملات الانبعاثات الافتراضية للمستوى 1 بالنسبة لنقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب من موقع احتجاز ثاني أكسيد الكربون إلى موقع التخزين النهائي					
وحدات القياس	عدم التيقن	القيمة			مصدر الانبعاثات
		عالية	متوسطة	منخفضة	
جيجا جرام لكل سنة وكل كيلومتر من خط أنابيب النقل	± معامل من 2	0.014	0.0014	0.00014	الانبعاثات المتطايرة الناتجة عن نقل ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب

على الرغم من إن انبعاثات التسرب الناتجة عن النقل عبر خطوط الأنابيب لا تعتمد على الإخراج، إلا إنه ليس بالضرورة أن تكون هناك علاقة ارتباط بين عدد فتحات التسرب وطول خط الأنابيب. حيث إن أفضل علاقات الارتباط ستكون بين عدد ونوع مكونات المعدات ونوع الخدمة. كما إنه غالبًا ما تتواجد المعدات في المنشآت المرتبطة بخط الأنابيب وليس في خط الأنابيب نفسه. في الواقع إذا لم يتم نقل ثاني أكسيد الكربون لمسافات طويلة جدًا ولم يكن من الضروري وجود محطات ضغط، فمن العملي أن ترتبط جميع الانبعاثات المتطايرة من نظام الاحتجاز والتخزين بمنشآت الاحتجاز والضغط الأولى في بداية خط الأنابيب ومنشآت الحقن في نهايته، ذلك بغض النظر عن الانبعاثات الناتجة عن خط الأنابيب نفسه. يمكن في مقرب المستوى 3 أن يتم الحصول على انبعاثات التسرب الناتجة عن خط أنابيب النقل من البيانات الخاصة بعدد ونوع المعدات ومعاملات الانبعاثات الخاصة بهذه المعدات.

### 2-4-5 نقل ثاني أكسيد الكربون في السفن

لا تتوفر في الوقت الحالي معاملات الانبعاثات الافتراضية بالنسبة للانبعاثات المتطايرة الناتجة عن نقل ثاني أكسيد الكربون بالسفن. كما يجب قياس كميات الغاز أثناء التحميل والتفريغ باستخدام عدادات قياس التدفق والفاقد المبلغ عنه باعتبارها انبعاثات متطايرة لثاني أكسيد الكربون بسبب النقل بالسفن في الفئة 1 ج1 ب.

### 3-4-5 منشآت التخزين الوسيطة في مسارات نقل ثاني أكسيد الكربون

عندما يوجد تفاوت مؤقت بين قدرات التزويد والنقل للتخزين، ففي هذه الحالة قد يلزم استخدام مخزن مرحلي لثاني أكسيد الكربون (فوق أو تحت الأرض) لتخزين ثاني أكسيد الكربون بشكل مؤقت. كما يجب قياس الانبعاثات المتطايرة ومعالمتها باعتبارها جزءًا من نظام النقل والإبلاغ عنها في الفئة 1 ج1 ح (أخرى) في حالة ما إذا كان هذا المخزن المرحلي عبارة عن صهريج. أما إذا كانت منشأة التخزين الوسيطة (أو المخزن المرحلي) هي عبارة عن مستودع تخزين جيولوجي، فيمكن معاملة الانبعاثات المتطايرة الناتجة عنه بنفس الطريقة المتبعة مع أي مستودع تخزين جيولوجي آخر (انظر القسم 5-6 من هذا الفصل) والإبلاغ عنها في الفئة 1 ج3.

### 5-5 حقن ثاني أكسيد الكربون

يشمل نظام الحقن المنشآت السطحية في موقع الحقن، مثل منشآت التخزين وأي مضاعف توزيع في الطرف النهائي من خط أنابيب النقل، وخطوط أنابيب التوزيع إلى الآبار، ومنشآت الضغط الإضافية، وأنظمة القياس والمراقبة، ورأس أو رعوس البئر وأبار الحقن. يمكن الحصول على معلومات إضافية حول تصميم آبار الحقن من التقرير الخاص لاحتجاز وتوزيع ثاني أكسيد الكربون في القسم 5-5 من الفصل 5.

كما إن العدادات المثبتة عند رأس البئر تقوم بقياس معدل التدفق ودرجة الحرارة وضغط السائل. توجد أيضًا في رأس البئر مواصفات للسلامة لمنع انفجار السوائل المحقونة. كما يمكن إنزال مواصفات الأمان، مثل صمام أمان الفتحة السفلى وصمام الفحص في شبكة الأنابيب، إلى مستوى أدنى من سطح الأرض لمنع التدفق الخلفي في حالة تعطل معدات السطح. يمكن أن يتأثر الصمام والسدادات الأخرى بثاني أكسيد الكربون عندما يكون أقل من المستوى الحرج، لذلك سيكون من الضروري اختيار مواد ملائمة. كما إن الفولاذ الكربوني والمواد الأسمنتية التقليدية قد تكون عرضة للتأثر بالأملاح عالية التركيز والسوائل المشبعة بثاني أكسيد الكربون (Scherer et al, 2005). وعلاوة على ذلك فإن سلامة آبار حقن ثاني أكسيد الكربون تتطلب الصيانة على فترات زمنية طويلة، لذلك فمن الضروري استخدام المواد والتنظيمات الملائمة في بناء البئر. كما إن المواد الأسمنتية المستخدمة في عمل بطانة بين البئر والتكونات الصخرية، حتى بعد هجرة البئر وسده، يجب أن تتميز بمقاومة ثاني أكسيد الكربون/الأملاح على المدى الطويل. حيث إنه قد تم إعداد مثل هذه المواد الأسمنتية لكنها في حاجة إلى المزيد من الاختبار. وحيث توجد إمكانية لأن تكون هذه الآبار بمثابة موصلات لتسرب ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي مرة أخرى، لذلك يجب رصدها باعتبارها جزءًا من خطة شاملة للرصد كما هو موضح في القسم 7-5 من هذا الفصل.

كما يمكن رصد كمية ثاني أكسيد الكربون التي يتم حقنها في الطبقة الجيولوجية من خلال البئر عن طريق استخدام معدات معينة عند رأس البئر تمامًا قبل دخول هذه الكمية إلى بئر الحقن. يوجد أسلوب نموذجي لذلك موضح عن طريق رايت أند ماجيك (1998). كما إن العدادات المثبتة عند رأس البئر تقوم بالقياس المستمر لضغط ودرجة حرارة ومعدل تدفق الغاز الذي يتم حقنه. عادةً ما يشير تركيب غاز ثاني أكسيد الكربون المستورد إلى وجود مستوى منخفض من التغيير ويتم تحليله بشكل منتظم باستخدام أجهزة الفصل اللوني

أما إذا لم يكن ضغط ثاني أكسيد الكربون الذي يصل إلى موقع التخزين على نفس مستوى الضغط المرتفع المطلوب للحقن، ففي هذه الحالة سيكون من الضروري إجراء عملية ضغط. كما يجب قياس أي انبعاثات ناتجة عن ضغط الغاز المخزن في موقع التخزين والإبلاغ عنها.

## 5-6 التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون

يشير الفصل 5 من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2005) إلى إمكانية التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون عند الشاطئ أو بعيدًا عن الشاطئ في المواقع التالية:

- **الطبقات الملحية العميقة.** هي صخور تخزين مسامية ونفاذة تحتوي على الماء الملحي في المناطق المسامية بها.
  - **حقول النفط المستنزفة جزئيًا أو كليًا -** سواء كانت جزءًا من عمليات الاستعادة المعززة للزيت (EOR) أو لم تكن كذلك.
  - **حقول الغاز الطبيعي المستنزفة جزئيًا أو كليًا -** سواء كان ذلك مصاحبًا لعمليات الاستعادة المعززة للغاز (EGR) أو لم يكن كذلك.
  - **طبقات الفحم -** سواء كان ذلك مصاحبًا لعمليات استعادة ميثان طبقة الفحم الحجري المقوى (ECBM) أو لم يكن مصاحبًا لها.
- بالإضافة إلى ما تقدم، فقد تكون هناك فرص متوافرة لتخزين المنتجات التي تنشأ عن مفاهيم أخرى، مثل التخزين في الكهوف الملحية وطبقات البازلت والطفل الغني بالمواد العضوية.
- يمكن الحصول على معلومات إضافية حول أنواع مواقع التخزين هذه وآليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون بها من الفصل 5 من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2005).

## 5-6-1 وصف مسارات/مصادر الانبعاثات

يوضح التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون في مقدمته إلى إن أكثر من 99% من ثاني أكسيد الكربون المختزن في مستودعات التخزين الجيولوجية يمكن أن يظل بها لما يزيد عن ألف سنة. لذلك فمن الضروري الأخذ بعين الاعتبار المسارات المحتملة للانبعاثات والتي تنشأ أو تنشط عن طريق عمليات بطيئة أو طويلة الأجل بالإضافة إلى تلك العمليات التي يمكن أن تستمر على المدى من القصير إلى المتوسط (من عقود إلى قرون).

وفي هذه الخطوط التوجيهية يتم تعريف مصطلح الهجرة على إنه حركة ثاني أكسيد الكربون داخل وخارج مستودع التخزين الجيولوجي بينما يظل ذلك تحت سطح الأرض أو قاع البحر، كما يتم تعريف مصطلح التسرب على إنه انتقال ثاني أكسيد الكربون من أسفل سطح الأرض أو قاع البحر إلى الغلاف الجوي أو إلى مياه المحيط.

كما إن المسارات الوحيدة للانبعاثات التي يلزم أخذها بعين الاعتبار عند إجراء الحساب هي تسرب ثاني أكسيد الكربون إلى سطح الأرض أو قاع البحر من مستودع التخزين الجيولوجي<sup>2</sup>. يوضح الجدول 5-3 مسارات انبعاثات محتملة من مستودع التخزين.

كما إن هناك إمكانية لوجود انبعاثات للميثان، بالإضافة إلى انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، من مستودعات التخزين الجيولوجي التي تحتوي على الهيدروكربونات. وعلى الرغم من عدم كفاية المعلومات المتوفرة بحيث يمكن استخدامها باعتبارها دليلاً لتقدير انبعاثات الميثان، فمن الممارسة السليمة أن يتم إجراء تقديرًا ملائمًا للانبعاثات الميثان المحتملة من مستودعات التخزين هذه وتضمين أي كمية من هذه الانبعاثات يمكن إسنادها في قائمة الحصر إلى عملية تخزين ثاني أكسيد الكربون إن لزم الأمر.

<sup>2</sup> يمكن أن تحدث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على هيئة غاز حر أو غاز مذاب في المياه الجوفية يصل إلى السطح، مثل ما يحدث في الينابيع.

الجدول 3-5 مسارات الانبعاثات المحتملة من مستودعات التخزين الجيولوجي		
نوع الانبعاثات	مسارات/مصادر الانبعاثات المحتملة	تعليقات إضافية
مسارات التسرب المباشر التي تسببها الآبار والتعدين	<ul style="list-style-type: none"> <li>الآبار العاملة أو المهجورة</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>من المتوقع أن تتضافر جميع الجهود لتحديد الآبار المهجورة في وحول موقع التخزين. كما يمكن أن تنطوي الآبار المشيدة والمغلقة و/أو المسدودة بشكل غير ملائم على أعلى مستوى محتمل للتسرب. كذلك فقد تم إعداد أساليب خاصة بإصلاح الآبار التي يوجد بها تسرب ويجب تطبيقها عند الضرورة.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ثوران البئر (الانبعاثات غير المراقبة من آبار الحقن)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>مصدر محتمل للتسرب عالي التدفق، عادةً ما يكون ذلك لفترة زمنية قصيرة. تخضع عمليات ثوران البئر للعلاج ويحتمل أن تكون نادرة حيث إن ممارسات الحفر المحددة تساعد على تقليل المخاطرة.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>التعدين المستقبلي لمستودع تخزين ثاني أكسيد الكربون</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>متعلق بمستودعات تخزين طبقة الفحم الحجري</li> </ul>
التسرب الطبيعي ومسارات الهجرة (التي يمكن أن تتسبب في الانبعاثات بمرور الوقت)	<ul style="list-style-type: none"> <li>من خلال النظام المسامي في صخور الغطاء ذات المستوى المنخفض من النفاذية في حالة تخطي ضغط المدخل الشعري أو إذا كان ثاني أكسيد الكربون مذائبًا</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم للموقع بالإضافة إلى ضغط الحقن المراقب إلى تقليل مخاطر التسرب.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>إذا كان صخر الغطاء غير موجود محليًا</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم للموقع إلى تقليل مخاطر التسرب.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>عبر نقطة الفائض في حالة ما إذا كان مستودع التخزين مغمورًا</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم، بما في التقييم الهيدروجيولوجي، إلى تقليل مخاطر التسرب.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>من خلال صخور الغطاء المنحلة كنتيجة لتفاعلات ثاني أكسيد الكربون مع الماء والصخور</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم للموقع إلى تقليل مخاطر التسرب. كما يمكن الاستفادة من التقييم التفصيلي لصخور الغطاء والمعاملات الجيوكيميائية ذات الصلة.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>بواسطة تحلل ثاني أكسيد الكربون إلى سائل مسامي والنقل اللاحق إلى خارج موقع التخزين عن طريق التدفق الطبيعي للسائل.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم، بما في التقييم الهيدروجيولوجي، إلى تحديد/تقليل مخاطر التسرب.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>عبر التصدعات و/أو الشقوق الطبيعية أو المضافة</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>مصدر محتمل للتسرب عالي التدفق. يمكن أن يؤدي الوصف والتحديد الملائم للموقع بالإضافة إلى ضغط الحقن المراقب إلى تقليل مخاطر التسرب.</li> </ul>
الانبعاثات المتطايرة الأخرى في موقع التخزين الجيولوجي	<ul style="list-style-type: none"> <li>يمكن أن تنتج الانبعاثات المتطايرة للميثان عن إزاحة الميثان عن طريق ثاني أكسيد الكربون في مواقع التخزين الجيولوجي. يحدث ذلك على وجه الخصوص بالنسبة لطبقة ميثان الفحم الحجري المقوى والاستعادة المعززة للزيت ومستودعات تخزين الزيت والغاز المستنزفة.</li> </ul>	تتطلب التقييم الملائم.

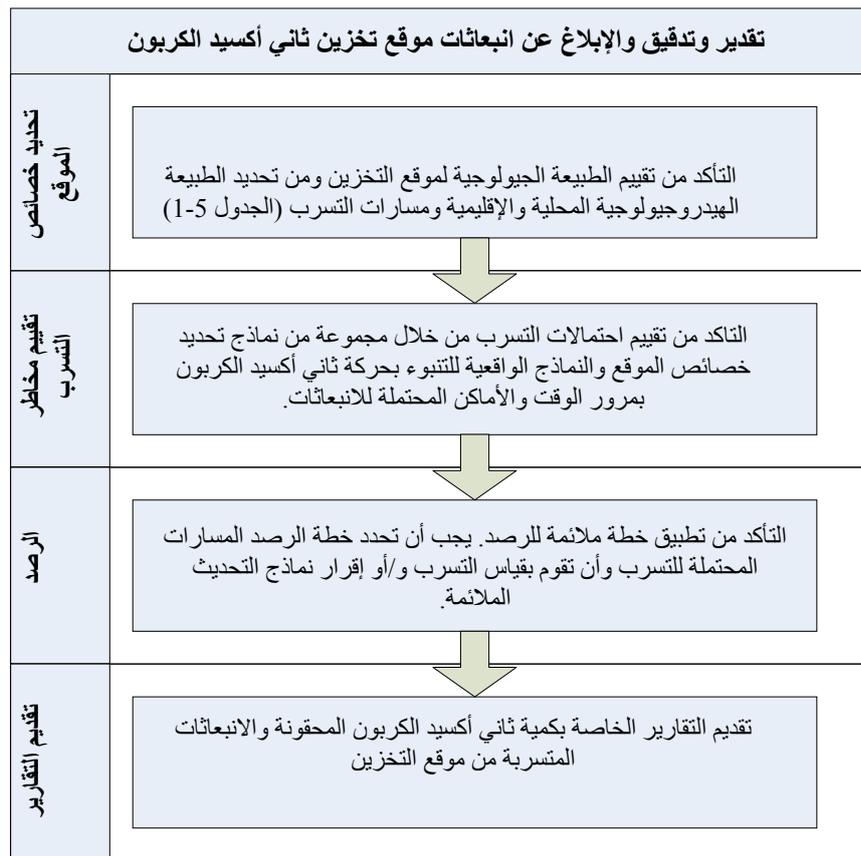
## 5-7 الموضوعات المنهجية

تتفاوت الظروف الجيولوجية إلى حد كبير ويتوفر في الوقت الحالي عدد قليل فقط من الدراسات المنشورة حول برامج الرصد المحددة لنوع وكَم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتطيرة بشرية المنشأ من عمليات التخزين الجيولوجي (2000 Arts et al)، ويلسون ومونيا (2005، كلوزمان 2003 ألف وباء وجيم). على الرغم من أن الملخص الخاص بصناع سياسة القرارات الخاصة باحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون يفترض احتمال قيام مواقع التخزين الجيولوجي المحددة على نحو ملائم باحتجاز ما يزيد عن 99 في المائة من ثاني أكسيد الكربون المخزن إلى ما يزيد عن 1000 سنة، وقد تحتجزه لملايين السنين، فحتى كتابة هذه الخطوط التوجيهية كان العدد الضئيل لمواقع التخزين الخاضعة للرصد يشير إلى عدم وجود الدليل التجريبي الكافي لإعداد معاملات الانبعاثات التي يمكن تطبيقها على التسرب من مستودعات التخزين الجيولوجي. وبناءً عليه فإن هذه التوجيهات لا تشمل منهجية المستوى 1 أو المستوى 2. ومع ذلك يمكن إعداد مثل هذه المنهجيات في المستقبل في حالة تشغيل المزيد من مواقع التخزين الخاضعة للرصد وتشغيل المواقع الحالية لمدة زمنية طويلة (2005 Yoshigahara et al). إلا إنه يمكن إعداد مقترَب من المستوى 3 خاص بالموقع. ولقد تم تطوير تكنولوجيات الرصد وتعديلها على مدار الثلاثين عامًا الماضية في صناعات رصد الزيت والغاز والمياه الجوفية وصناعات الرصد البيئي (انظر المرفق الأول أيضاً). يمكن أن تتأثر مدى ملائمة وفعالية هذه التكنولوجيات إلى حد كبير بالطبيعة الجيولوجية ومسارات الانبعاثات المحتملة في مواقع التخزين الفردية، لذلك سيكون من الضروري اختبار تقنيات الرصد بالنسبة لكل موقع على حدة. كما إن تقنيات الرصد في حالة تطور دائم وسيكون من الممارسة السليمة الاطلاع بشكل مستمر على التكنولوجيات الحالية.

يوضح الشكل 5-3 تلخيصاً لإجراءات المستوى 3 الخاصة بتقدير والإبلاغ انبعاثات مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون وستتم مناقشتها لاحقاً.

## إجراءات تقدير الانبعاثات الناتجة عن مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون

الشكل 5-3



للتعرف على مصير ثاني أكسيد الكربون الذي يتم حقنه في مستودعات التخزين الجيولوجية لفترات زمنية طويلة، ينبغي تقييم احتمالية انبعاثها مرة أخرى إلى الغلاف الجوي أو قاع البحر عبر مسارات التسرب المحددة في الجدول 5-3، علاوة على قياس أي انبعاثات متطيرة إن لزم الأمر:

- ينبغي اتباع سلوكاً ملائماً وشاملاً في تحديد خصائص الطبيعة الجيولوجية لموقع التخزين والطبقة المحيطة؛
- تحديد نموذجاً لحقق ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين بالإضافة إلى السلوك المستقبلي لنظام التخزين؛
- رصد نظام التخزين؛

(د) استخدام نتائج الرصد لإثبات و/أو تحديث نماذج نظام التخزين.

التحديد والوصف الملانم للموقع من شأنهما أن يساعدا على بناء الثقة بوجود مستوى أدنى من التسرب وتحسين قدرات ونتائج صياغة النماذج وقطعاً سيقبلان من مستوى الحاجة إلى الرصد. يمكن الحصول على معلومات إضافية حول وصف الموقع من التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون ومن برنامج البحث والتطوير الخاص بغاز الاحتباس الحراري للوكالة الدولية للطاقة (IEAGHG 2005).

كما تم تطوير تكنولوجيات الرصد وتعديلها على مدار الثلاثين عاماً الماضية في صناعات رصد الزيت والغاز والمياه الجوفية وصناعات الرصد البيئي. حيث إن أكثر التكنولوجيات المستخدمة على نطاق واسع موضحة في الجدول 5-1-5 في المرفق الأول من هذا الفصل. يمكن أن تتأثر ملائمة وفعالية هذه التكنولوجيات إلى حد كبير بالطبيعة الجيولوجية ومسارات الانبعاثات المحتملة في مواقع التخزين الفردية، لذلك سيكون من الضروري اختيار تكنولوجيات الرصد بالنسبة لكل موقع على حدة. كما إن تكنولوجيات الرصد في حالة تطور دائم وسيكون من الممارسة السليمة الاطلاع بشكل مستمر على التكنولوجيات الحالية.

ويتاح عدد من أدوات صياغة النماذج حالياً، حيث قد خضعت بعضها لعملية مقارنة داخلية للكود (Pruess et al، 2004). كما إن جميع النماذج تقترب من و/أو تسقط بعض العمليات وتقوم بعمل نماذج مبسطة. علاوة على ذلك فإن نتائجها تعتمد على نوعياتها الحقيقية، خاصة فيما يتعلق بنوعية البيانات المدخلة إليها. كما يمكن صياغة نماذج للعديد من المعاملات الفيزيوكيميائية المشتركة (تغيرات درجة الحرارة والضغط، خلط غاز الحقن بالسوائل الموجودة بشكل أولي في مستودع التخزين، نوع ومعدل آليات تثبيت ثاني أكسيد الكربون وتدفق السائل في البيئة الجيولوجية) بنجاح باستخدام أدوات صياغة النماذج العددية التي تعرف بنماذج محاكاة مستودع التخزين. حيث إن هذه النماذج مستخدمة على نطاق واسع في صناعة الزيت والغاز وقد ثبتت فعاليتها في التنبؤ بحركة الغازات والسوائل، بما في ذلك ثاني أكسيد الكربون، عبر الطبقات الجيولوجية.

كما يمكن استخدام محاكاة مستودع التخزين للتنبؤ بالمكان والتوقيت ومعدل التدفق المحتمل لأي انبعاثات، حيث يمكن التحقق منها باستخدام أساليب الرصد المباشر. من الممكن أن يكون هذا الأسلوب شديد النفع لتقدير مخاطر التسرب من موقع التخزين. ومع ذلك، لا يوجد نموذج واحد في الوقت الحالي يمكن استخدامه لإجراء الحسابات الخاصة بجميع العمليات المضمنة في القياسات والحلول المطلوبة. وبالتالي فقد يلزم في بعض الأحيان استخدام أساليب عديدة إضافية لصياغة النماذج لتحليل مظاهر الطبيعة الجيولوجية. كما يمكن استخدام نماذج النقل التفاعلية متعددة المراحل، وعادة ما تستخدم لتقييم نقل الملوثات، لصياغة نموذج خاص بنقل ثاني أكسيد الكربون داخل مستودع التخزين وتفاعل كل من ثاني أكسيد الكربون والمياه والصخور، وقد يلزم أخذ التأثيرات الجيوميكانيكية في عين الاعتبار باستخدام النماذج الجيوميكانيكية. حيث قد يلزم اقتران مثل هذه النماذج بنماذج محاكاة مستودع التخزين أو أن تكون مستقلة عنها.

كما يجب التحقق من صلاحية نماذج المحاكاة العددية باستخدام القياسات المباشرة من موقع التخزين، إن أمكن. حيث يجب استنتاج هذه القياسات من أحد برامج الرصد والمقارنة بين نتائج الرصد والتوقعات المستخدمة لتحسين النماذج الجيولوجية والعددية. كما يلزم الاستعانة بأراء الخبراء للوقوف على مدى تمثيلية النماذج الجيولوجية والعددية لموقع التخزين والطبقة المحيطة وما إذا كانت نماذج المحاكاة التالية تنبئ بشكل ملائم بأداء الموقع.

كذلك يجب أداء عملية الرصد وفقاً لخطة مناسبة كما هو موضح أدناه. كما يجب أن يأخذ ذلك بعين الاعتبار التوقعات المبنية على النماذج بشأن الأماكن المحتملة لحدوث التسرب بالإضافة إلى القياسات التي تم إجراؤها على كل المنطقة التي يحتمل أن تحتوي على ثاني أكسيد الكربون. وعادة ما يكون مديرو المواقع هم المسؤولون عن تركيب وتشغيل تكنولوجيات الرصد الخاصة بثاني أكسيد الكربون (انظر المرفق الأول). سيحتاج القائم بتجميع بيانات الحصر إلى التأكد من توفر القدر الكافي من المعلومات من كل موقع تخزين لتقدير الانبعاثات السنوية وفقاً للتوجيهات الموضحة في هذا الفصل. ولإجراء هذا التقييم، يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يضع ترتيباً رسمياً بالتعاون مع كل مشغل موقع، وهو ما من شأنه أن يسمح بإجراء عمليات الإبلاغ والمراجعة والتدقيق السنوي للبيانات الخاصة بالموقع.

## 5-7-1 اختيار الطريقة

كانت المواقع القليلة الحالية لتخزين ثاني أكسيد الكربون حتى وقت كتابة هذه الخطوط التوجيهية تمثل جزءاً من عمليات إنتاج النفط وتم إدارتها على هذا الأساس. فعلى سبيل المثال، من الضروري أن يكون هناك توافق بين عمليات تخزين الغاز الحمضي في غرب كندا والمتطلبات ذات الصلة بالتطبيقات لتشغيل مستودعات تخزين الزيت والغاز التقليدية (باتشو أند جانتز، 2005). كما إن التطوير المنظم لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون لا يزال في مراحله الأولى. كذلك لا توجد معايير وطنية أو دولية لأداء مواقع التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون وتقوم العديد من الدول في الوقت الراهن بإعداد القوانين ذات الصلة للتعامل مع مخاطر التسرب. إذ تعتبر الإشارة إلى تكنولوجيات الرصد هو أحد الأجزاء الهامة من عملية التطوير هذه (انظر المرفق الأول). وقد يمكن لهذه المعايير والمقتربات التنظيمية في حالة تطويرها وتطبيقها أن توفر المعلومات الخاصة بالانبعاثات مع مستوى مناسب من التيقن. لذلك فإنه في حالة وجود هيئة حاكمة معنية أو أكثر تقوم بتنظيم العمليات الحالية لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون باعتباره جزءاً من عملية الحصر السنوي، فبناء عليه يمكن للقائم بتجميع بيانات الحصر أن يحصل على المعلومات الخاصة بالانبعاثات من هذه الهيئات. لكن يجب عليه حينما يعتمد على هذه المعلومات أن يقدم الوثائق المدعمة التي توضح الطرق المستخدمة في تقدير أو قياس الانبعاثات ويفسر كيف أن هذه الطرق متوافقة مع ممارسات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. أما في حالة عدم وجود مثل هذه الوكالة، عندئذ يكون من الممارسة السليمة بالنسبة للقائم بتجميع بيانات الحصر أن يتبع المنهجية الموضحة أدناه. فهي تضع مسؤوليات تحديد مواصفات الموقع وصياغة النماذج وتقييم مخاطر التسرب ورصد الأنشطة على عاتق مدير مشروع التخزين و/أو إحدى الهيئات الحاكمة المعنية التي تقوم بتنظيم عملية احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون. بالإضافة إلى ذلك فمن الممكن أن يقوم مدير مشروع التخزين أو السلطة التنظيمية بإعداد تقديرات الانبعاثات التي سيتم الإبلاغ عنها للقائم بتجميع بيانات الحصر على المستوى

**1- تحديد وتوثيق كل عمليات التخزين الجيولوجي في البلد.** يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يحتفظ بسجل حديث لجميع عمليات التخزين الجيولوجي بما في ذلك كل المعلومات المطلوبة للمرجعية المقارنة من هذا القسم للعناصر الأخرى من سلسلة احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون لأغراض ضمان/مراقبة الجودة، حيث تكون بالنسبة لكل عملية على النحو التالي:

- مكان الموقع؛
- نوع العملية (سواء كانت مرتبطة بالاستعادة المعززة للزيت أو الاستعادة المعززة للغاز أو استعادة طبقة ميثان الفحم الحجري المقوى)؛
- سنة البدء في تخزين ثاني أكسيد الكربون؛
- المصدر أو المصادر، والكتلة السنوية لثاني أكسيد الكربون التي يتم حقنها بالنسبة لكل مصدر، والكمية التراكمية الافتراضية في المخزن؛
- ذلك بالإضافة إلى نقل ثاني أكسيد الكربون المرتبط بالعملية، والهياكل الأساسية للحقن وإعادة التدوير، والانبعثات ذات الصلة، إن كان ملائماً، (مثل منشآت الإنتاج والاحتجاز في الموقع، وتوصيلات خط الأنابيب، والتكنولوجيا المستخدمة في الحقن... وغيرها).

وعلى الرغم من إن القائم بتجميع بيانات الحصر يكون مسئولاً فقط عن الإبلاغ عن تأثير العمليات داخل البلد المعني، إلا إنه يجب عليه/عليها أن يقوم بتسجيل عمليات انتقال ثاني أكسيد الكربون عبر الحدود للتدقيق المقارن ولأغراض ضمان/مراقبة الجودة (انظر القسم 5-9).

**2- التحقق مما إذا كان قد تم إعداد تقرير ملائم حول الخصائص الجيولوجية للموقع بالنسبة لكل موقع تخزين.** يجب أن ينطوي تقرير خصائص الموقع على تحديد ووصف المسارات المحتملة للتسرب، مثل الصدوع والآبار الموجودة من ذي قبل، بالإضافة إلى قياس الخصائص الهيدرولوجية لنظام التخزين، خاصة فيما يتعلق بهجرة ثاني أكسيد الكربون. كما يجب أن يشمل تقرير خصائص الموقع القدر الكافي من البيانات لعرض مثل هذه الخصائص في أحد النماذج الجيولوجية بالنسبة للموقع والمنطقة المحيطة. ويجب أيضاً أن يشمل كل البيانات الضرورية لإعداد نموذج عددي متماثل للموقع والمنطقة المحيطة للإدخال في نموذج محاكاة عددي ملائم لمستودع التخزين.

**3- تحديد ما إذا كان المشغل قد قام بتقدير احتمال التسرب في موقع التخزين.** يجب على المشغل أن يقوم بتحديد التوقيت والمكان ومعدل التدفق المحتمل لأي انبعثات متطايرة من مستودع التخزين أو توضيح ما إذا كان من غير المتوقع أن يحدث تسرب. كما يجب إعداد نماذج محاكاة قصيرة الأجل لحقن ثاني أكسيد الكربون من أجل التنبؤ بأداء الموقع منذ بداية الحقن وحتى ما بعد الانتهاء منه (يمكن أن يستمر ذلك لعشرات السنين). يجب أيضاً أداء نماذج محاكاة طويلة الأجل للتنبؤ بمصير ثاني أكسيد الكربون على مدار قرون وحتى آلاف السنين. كذلك يجب إجراء تحليل استجابة لتقدير نطاق الانبعثات المحتملة. كما يجب استخدام النماذج في شكل برنامج رصد يساعد على التحقق مما إذا كان أداء الموقع على النحو المتوقع أم لا. يجب أيضاً تحديث كل من النموذج الجيولوجي ونموذج مستودع التخزين في المستقبل بأي بيانات جديدة وكذلك إجراء الحسابات الخاصة بأي منشآت أو تغيرات تشغيلية جديدة.

**4- تحديد ما إذا كانت هناك خطة رصد ملائمة بالنسبة لكل موقع من المواقع.** يجب أن تقدم خطة الرصد الخاصة بكل موقع وصفاً لأنشطة الرصد المتسقة مع تقييم التسرب ونتائج صياغة التقارير. حيث يمكن استخدام التكنولوجيات المقدمة في المرفق الأول لقياس عمليات التسرب إلى سطح الأرض أو إلى قاع البحر. كما يتضمن التقرير الخاص لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون معلومات مفصلة حول تكنولوجيات ومقتربات الرصد (انظر المرفق الأول). وباختصار يجب أن يشتمل برنامج الرصد على الترتيبات التالية:

(1) قياس التدفقات الخلفية لثاني أكسيد الكربون (والميثان إذا كان ذلك ملائماً) في كل من موقع التخزين وأي نقاط انبعثات محتملة خارج موقع التخزين. يمكن أن تحتوي مواقع التخزين الجيولوجي على تدفقات خلفية طبيعية متغيرة من موسم لآخر (جيولوجية و/أو صناعية) قبل إجراء الحقن. حيث لا يجب تضمين هذا التدفق الخلفي في تقدير الانبعثات السنوية. انظر المرفق الأول للاطلاع على مناقشة الطرق المحتملة. يوصى بإجراء تحليل تناظري لأي تدفقات خلفية من ثاني أكسيد الكربون، حيث يمكن أن يساعد ذلك في التمييز ما بين ثاني أكسيد الكربون الموجود في الطبيعة وثاني أكسيد الكربون الذي يتم حقنه.

(2) القياس المستمر لكتلة ثاني أكسيد الكربون المحقونة في كل بئر خلال فترة الحقن، انظر القسم 5-5 أعلاه.

(3) إجراء الرصد لتحديد أي انبعثات لثاني أكسيد الكربون من نظام الحقن.

(4) الرصد لتحديد أي تدفقات لثاني أكسيد الكربون (كذلك الميثان إذا كان ذلك ملائماً) عبر قاع البحر أو سطح البحر، بما في ذلك التدفقات التي تحدث من خلال الآبار ومصادر المياه مثل الينابيع، إن أمكن. يجب إجراء الفحص الدوري للموقع بالكامل، بالإضافة إلى أي مناطق إضافية يُثبت من الرصد وصياغة النماذج انتشار ثاني أكسيد الكربون تحتها، ذلك للكشف عن أي تسربات غير متوقعة.

(5) الرصد فيما بعد الحقن: يجب أن تكون الخطة مدعمة لعملية رصد الموقع فيما بعد مرحلة الحقن. حيث يجب أن تأخذ مرحلة ما بعد الحقن من عملية الرصد في عين الاعتبار نتائج صياغة النماذج التقييمية الخاصة بتوزيع ثاني أكسيد الكربون للتأكد من نشر معدات الرصد في المواقع والتوقيات الملائمة. كما إنه بمجرد اقتراب ثاني أكسيد الكربون من مرحلة التوزيع طويل الأجل له في مستودع التخزين وكان هناك اتفاق بين نماذج توزيع وقياسات ثاني أكسيد الكربون وفقاً لخطة الرصد، فقد يكون من الملائم أن يتم تقليل عمليات الرصد أو التوقف عن إجرائها. وقد يكون من الضروري أيضاً استئناف عملية الرصد في حالة تأثر موقع التخزين بالظواهر غير المتوقعة، مثل الظواهر السيزمية.

(6) دمج التحسينات المدخلة على أساليب/تكنولوجيات الرصد بمرور الوقت.

(7) التحقق الدوري من تقديرات الانبعاثات. تعتبر خاصية التطبيق الدوري هي إحدى وظائف تصميم وتنفيذ المشروع والتنبؤ المبكر بالمخاطر. حيث يوصى بإجراء عملية تحقق خلال فترة الحقن كل خمس سنوات على الأقل أو بعد حدوث تغييرات هامة في موقع العمليات.

كما ستكون هناك فائدة بالنسبة لكل من الرصد المستمر لضغط الحقن والرصد الدوري لتوزيع ثاني أكسيد الكربون تحت سطح الأرض. حيث إنه من الضروري القيام برصد ضغط الحقن لمراقبة عملية الحقن، لمنع تزايد ضغط السائل المسامي داخل مستودع التخزين على سبيل المثال. كما إن ذلك من شأنه أن يوفر معلومات قيمة حول خصائص مستودع التخزين وكذلك فيما يتعلق بالتحذير المبكر من التسرب. وهو ما يعتبر من الممارسات الشائعة بالفعل ويمكن استخدامه باعتباره مطلباً تنظيمياً بالنسبة لعمليات الحقن الحالية في باطن الأرض. وتكون هناك فائدة أيضاً للرصد الدوري لتوزيع ثاني أكسيد الكربون تحت سطح الأرض، إما بشكل مباشر أو من خلال الاستشعار عن بعد، حيث إن هذه العملية يمكنها أن توضح بالدليل أي عمليات لهجرة ثاني أكسيد الكربون خارج مستودع التخزين وكذلك التحذير المبكر من التسربات المحتملة إلى الغلاف الجوي أو إلى قاع البحر.

**5- تجميع وإثبات الانبعاثات السنوية من كل موقع:** يجب على مشغلي كل موقع تخزين أن يزودوا القائم بتجميع بيانات الحصر سنوياً بالتقديرات السنوية للانبعاثات، وهي التي سيتم نشرها بشكل علني. حيث إن الانبعاثات المسجلة من الموقع وكذلك أي عمليات تسرب يمكن أن تحدث داخل أو خارج الموقع في أي سنة من السنين ستكون هي نفسها الانبعاثات كما تم تقديرها من صياغة النماذج (يمكن أن تكون صفراً)، والتي تكون مضبوطة لتأخذ النتائج السنوية للرصد بعين الاعتبار. أما في حالة حدوث تسرب مفاجئ، مثل ما يحدث في ثوران البئر، فيجب أن يتم تقدير كمية ثاني أكسيد المنبعثة خلال هذه العملية في قوائم الحصر. ولتبسيط إجراء الحسابات الخاصة بالتخزين الجيولوجي بعيداً عن الشاطئ، يجب التعامل مع التسرب إلى قاع البحر على إنه انبعاثات منطلقة إلى الغلاف الجوي بالنسبة لأغراض تجميع بيانات الحصر. كما يجب أن تشمل البيانات المرجعية إجمالي كمية ثاني أكسيد الكربون التي يتم حقنها، بالإضافة إلى إجمالي الانبعاثات السنوية، وكذلك مصدر ثاني أكسيد الكربون الذي يتم حقنه، والإجمالي التراكمي لكمية ثاني أكسيد الكربون المختزن حتى الآن، والتكنولوجيات المستخدمة في تقدير الانبعاثات، وأي إجراءات تحقق يتخذها مشغلو الموقع وفقاً لخطة الرصد وكما هو موضح في النقاط 4(iii) و 4(iv) أعلاه. يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يطلب وثائق بيانات الرصد ويقوم بمراجعتها للتحقق من الانبعاثات، بما في ذلك تكرارية الرصد، وحدود الرصد الخاصة بالتكنولوجيا، ونسبة الانبعاثات الصادرة من مختلف المسارات المحددة في خطة رصد الانبعاثات وأي تغييرات ناتجة عن عملية التحقق. وفي حالة استخدام أحد النماذج لتقدير الانبعاثات في السنين التي لم يتم إجراء عمليات للرصد المباشر خلالها، يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يقوم بمقارنة النتائج ببيانات الرصد الأحدث. تساعد الخطوات 2 و 3 و 4 أعلاه على توضيح إمكانية حدوث حالات تسرب في المستقبل والتوقيت المحتمل لحدوثها وكذلك مدى الحاجة إلى إجراء الرصد المباشر.

ذلك علماً بأن إجمالي الانبعاثات السنوية للتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون سيساوي مجموع تقديرات الانبعاثات الخاصة بالموقع:

#### المعادلة 5-1

#### إجمالي الانبعاثات السنوية

$$\sum \text{انبعاثات موقع تخزين ثاني أكسيد الكربون} = \text{الانبعاثات الوطنية من التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون}$$

توجد توجيهات إضافية بشأن الإبلاغ عن الانبعاثات في حالة اشتراك أكثر من دولة في احتجاز و/أو تخزين و/أو انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في القسم 5-10: التقارير والتوثيق

### 5-7-2 اختيار معاملات الانبعاثات وبيانات الأنشطة

على الرغم من عدم توفر معاملات انبعاثات المستوى 1 أو المستوى 2 في الوقت الحالي بالنسبة لمواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون، إلا إنه يمكن إعدادها في المستقبل (انظر القسم 5-7). ومع ذلك، يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يقوم بتجميع بيانات الأنشطة من المشغل حول كمية ثاني أكسيد الكربون المخترنة السنوية والتراكمية، وهو ما يعد ضمن أجزاء عملية تقدير الانبعاثات في المستوى 3. حيث إنه يسهل رصد هذه البيانات عند رأس بئر الحقن أو في إحدى شبكات الأنابيب المجاورة.

كما إن عملية الرصد في المشاريع المبكرة يمكنها أن تساعد في الحصول على بيانات مفيدة يمكن استخدامها في إعداد منهجيات خاصة بالمستوى 1 أو المستوى 2 في المستقبل. وهناك أمثلة على تطبيق تكنولوجيات الرصد توضحها برامج الرصد في مشاريع الاستعادة المعززة للزيت في رانجلي بكلورادو، الولايات المتحدة الأمريكية (كلوزمان، 2003 أ وب ج) وإبيرن في ساسكاتشوان، كندا (ويلسون أند موني، 2005)، ومشروع سليبنر لتخزين ثاني أكسيد الكربون، وبحر الشمال (Arts et al., 2003؛ انظر أيضاً المرفق

بدأ مشروع رانجلي للاستعادة المعززة للزيت بحقن ثاني أكسيد الكربون في خزان زيت وحدة رمل وبيبر في حقل رانجلي في عام 1986؛ كما وصل حقن ثاني أكسيد الكربون في عام 2003 إلى 23 مليون طن تقريباً. وتم إجراء برنامج رصد (كلوزمان 2003 أ وب وج) بناءً على 41 مكائناً للقياس موزعة على موقع بمساحة 78 كم<sup>2</sup>. لكن لم يكن هناك قياسات خلفية لما قبل الحقن متوفرة (سيتم تحديدها في الموقع الجديد في الخطوة 4 (1) في خطة الرصد الموضحة أعلاه). كما تم اختبار 16 مكائناً للقياس في منطقة المراقبة خارج الحقل بدلاً من خط أساس ما قبل الحقن. تشير نتائج برنامج الرصد إلى وجود انبعاثات سنوية لثاني أكسيد الكربون عميقة المصدر بمعدل أقل من 3 800 طن/سنة من سطح أرض حقل النفط. يحتمل أن جزءاً من هذا التدفق على الأقل، إن لم يكن كله، ناتج عن أكسدة الميثان عميق المصدر الناشئ من خزان الزيت أو الطبقة الفوقية، لكن يمكن أن يكون جزء منه عبارة عن انبعاثات متطايرة لثاني أكسيد الكربون المحقون في خزان الزيت. إلا إن عدم توفر قياسات خط أساس ما قبل الحقن تحول دون التحديد النهائي لمصدرها.

جرى حقن ثاني أكسيد الكربون في حقل نفط وايبيرن (ساسكاتشوان، كندا) للاستعادة المعززة للزيت منذ سبتمبر/أيلول 2000. كما تم أخذ عينات من غاز التربة على ثلاث فترات من يوليو/تموز 2001 وأكتوبر/تشرين الأول 2003 بغرض تحديد التركيزات الخلفية وما إذا كانت هناك أي تسربات لثاني أكسيد الكربون أو الغازات المشعة المصاحبة. لكن لا يوجد أي دليل حتى الآن على تسرب ثاني أكسيد الكربون الذي تم حقنه. ومع ذلك فمن الضروري أن يكون هناك المزيد من الرصد لغازات التربة للتحقق من بقاء الوضع على ما هو عليه في المستقبل، ومن الضروري أيضاً أن يكون هناك عمل تفصيلي لفهم أسباب التغيير في محتويات غاز التربة والتحقق من وجود قنوات محتملة لتسرب الغاز (ويلسون أند مونيا 2005).

كان موقع تخزين ثاني أكسيد الكربون في سلبينر ببحر الشمال، بعيداً عن شاطئ النرويج (Chadwick et al., 2003)، يقوم بحقن حوالي 1 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون كل سنة في رمال أيسيرا التي تعتبر طبقة ملحية منذ عام 1996. كما كانت الكمية التراكمية لحقن ثاني أكسيد الكربون حتى عام 2004 أكبر من 7 ملايين طن. يتم رصد توزيع ثاني أكسيد الكربون تحت سطح الأرض عن طريق عمليات مسح سيزمية متكررة ثلاثية الأبعاد (يتوفر في الوقت الحالي مسح لما قبل الحقن وعمليات مسح متكررتان)، وبعند عن طريق مسح الجاذبية (تم الحصول على مسح واحد حتى وقتنا هذا). تشير عمليات المسح السيزمية ثلاثية الأبعاد إلى عدم وجود أدلة على حدوث تسرب (Arts et al., 2003).

توضح هذه الدراسات مجتمعة إلى إنه يمكن تطبيق منهجية المستوى 3 لدعم تقديرات الانبعاثات التي تساوي صفر فحسب ولكن أيضاً للكشف عن التسرب في حالة حدوثه حتى ولو كان بمستويات منخفضة.

كانت هناك تجربة واحدة واسعة النطاق لإنتاج ميثان طبقة الفحم الحجري المقوى باستخدام ثاني أكسيد الكربون باعتباره غاز حقن؛ مشروع ألبسون في حوض سان جوان، الولايات المتحدة الأمريكية (ريفيز، 2005). كما توفرت معلومات كافية مستنتجة من مشروع ألبسون للدلالة على إنه قد تم عزل ثاني أكسيد الكربون بشكل آمن في طبقات الفحم. كما إن بيانات الضغط والبيانات الخاصة بالتركيب المأخوذة من أربعة آبار حقن و15 بئر إنتاج قد أشارت إلى عدم وجود تسرب. تمت استعادة بعض من ثاني أكسيد الكربون من آبار الإنتاج بعد خمس سنوات تقريباً. إلا إن ذلك كان متوقعاً، لأغراض الحصر، وسيتم حسابه باعتباره انبعاثات (في حالة عدم فصله عن ميثان طبقة الفحم المنتج والمعاد تدويره). إلا إنه لم يتم إجراء عمليات رصد لسطح الأرض بالنسبة لتسرب ثاني أكسيد الكربون أو الميثان.

### 5-7-3 الاستيفاء

يجب أن يشمل الحصر جميع الانبعاثات (ثاني أكسيد الكربون وكذلك الميثان إذا كان ملائماً) الناتجة عن جميع مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون. وفي حالة ما إذا تم احتجاز ثاني أكسيد الكربون في دولة مختلفة عن دولة تخزينه، فيجب إجراء الترتيبات اللازمة بين الأشخاص المعنيين ممن يقومون بتجميع بيانات الحصر على المستوى الوطني للتأكد من عدم وجود ازدواجية في حساب التخزين.

كما يجب أن تحدد خطط وصف ورصد موقع المصادر المحتملة للانبعاثات خارج الموقع (مثل الهجرة الجانبية والمياه الجوفية... وغيرها). أو عوضاً عن ذلك يمكن نشر إستراتيجية تفاعلية للأماكن الموجودة خارج الموقع بناءً على المعلومات الواردة من داخل هذا الموقع. أما في حالة التنبؤ بالانبعاثات و/أو حدوثها خارج الدولة التي تقع بها عملية التخزين (حقن ثاني أكسيد الكربون)، فينبأ عليه يجب إجراء الترتيبات اللازمة بين الأشخاص المعنيين من القائمين بتجميع بيانات الحصر على المستوى الوطني لرصد وحساب هذه الانبعاثات. (انظر القسم 5-10 أدناه).

كما إن المنهجيات الخاصة بإنتاج الزيت والغاز تغطي تقديرات ثاني أكسيد الكربون المتحلل في الزيت والمنبعث إلى الغلاف الجوي نتيجة للمعالجة السطحية. حيث إنه يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يقوم في هذا الصدد بالتأكد من اتساق المعلومات الخاصة بهذه الانبعاثات والتي يتم تجميعها من مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون مع التقديرات المعطاة في فئات المصدر هذه.

### 5-7-4 إعدادات متسلسلة زمنية متسقة

من الضروري إعادة حساب الانبعاثات في حالة تحسين القدرات الكشفية الخاصة بمعدات الرصد بمرور الوقت، أو عند تحديد الانبعاثات التي لم تكن مسجلة في السابق، أو إذا كان تحديث النماذج يفترض حدوث انبعاثات غير محددة وإثبات أحد برامج الرصد الحديثة لذلك، وتوضح أهمية ذلك على وجه الخصوص إذا سلّمنا بمستوى الدقة المنخفض بشكل عام لمجموعات الرصد الحالية، حتى إن كانت تستخدم أحدث التكنولوجيات المتقدمة. ومن الضروري أيضاً تحديد التدفق الخلفي ومستوى التغييرية. وبالنسبة للمواقع

## 5-8 تقييم أوجه عدم التيقن

إنه من الممارسة السليمة أن يتم تضمين تقييم لأوجه عدم التيقن عند استخدام طرق المستوى 3. حيث سيعتمد عدم التيقن في تقديرات الانبعاثات على مدى دقة أساليب الرصد المستخدمة للتحقق من وقياس أي انبعاثات وآلية صياغة النماذج المستخدمة للتنبؤ بحالات التسرب من موقع التخزين. وقد يكون من غير الملائم تطبيق مفهوم النسبة المئوية لأوجه عدم التيقن بالنسبة لهذا القطاع وبالتالي يمكن إعطاء فترات ثقة و/أو منحنيات للاحتتمالية في هذا الصدد.

علاوة على ما سبق فإن عدم التيقن في القياسات الحقلية ذو أهمية كبرى ويتوقف على عينات كثافة وتكرار القياس ويمكن تحديده باستخدام طرق إحصائية معيارية.

كذلك يجب أن يتناول نموذج المحاكاة الفعال لمستودع التخزين موضوعات التغيير وعدم التيقن في الخصائص الفيزيائية، خاصة فيما يتعلق بخصائص صخور وسائل مستودع التخزين، حيث إن نماذج مستودع التخزين مصممة للتنبؤ بحركات السائل على مدار فترات زمنية ممتدة ولأن مستودعات التخزين الجيولوجية تتصف في الأساس بالتغيرية وتغاير الخواص. وبناءً عليه فإن عدم التيقن في التقديرات المستنتجة من صياغة النماذج سوف يعتمد على:

- استيفاء البيانات الأولية المستخدمة أثناء تقييم الموقع؛
- مدى التوافق بين النموذج الجيولوجي والمظاهر الهامة للطبيعة الجيولوجية للموقع والمنطقة المحيطة، خاصة فيما يتعلق بمعالجة مسارات الهجرة المحتملة؛

دقة البيانات الهامة المدعومة للنموذج:

- هو تقديم عددي حسب مصدات الشبكة
  - تقديم ملائم للعمليات في النماذج الفيزيوكيميائية العددية والتحليلية
- عادةً ما يتم إجراء تقديرات عدم التيقن عن طريق تغيير معاملات إدخال النموذج وتطبيق نماذج محاكاة متعددة لتحديد تأثير ذلك على نتائج النموذج قصير الأجل والتنبؤات طويلة الأجل. كما إن عدم التيقن في القياسات الحقلية سيتوقف على عينات كثافة وتكرار القياس ويمكن تحديده باستخدام طرق إحصائية معيارية. وفي حالة توفر كل من تقديرات وقياسات النماذج، فسيتم إجراء تقدير الانبعاثات بالشكل الأمثل عن طريق إثبات النموذج ثم تقدير الانبعاثات باستخدام النموذج المحدث. كما يمكن للتحقق المتعددة باستخدام نموذج ملائم للفترة الزمنية أن تتعامل مع عدم التيقن في هذه التقديرات. حيث إنه يمكن استخدام هذه البيانات لتتبع الشروط الأصلية للرصد (مثل إضافة أماكن أو تكنولوجيات جديدة، وزيادة أو تقليل التكرار) وحتماً ستشمل أساس اتخاذ القرارات المبلغة بإخراج المنشأة من الخدمة.

## 5-9 ضمان/مراقبة جودة الحصر (QA/QC)

**ضمان/مراقبة الجودة بالنسبة لنظام احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون بالكامل**

لا يجب الإبلاغ عن احتجاز ثاني أكسيد الكربون ما لم يكن مرتبطاً بالتخزين طويل الأجل.

كما يجب التحقق من أن الكتلة المحتجزة من ثاني أكسيد الكربون لا تزيد عن كتلة ثاني أكسيد الكربون المختزن زائد الانبعاثات المتطايرة المبلغ عنها في سنة الحصر (الجدول 4-5).

على الرغم من محدودية الخبرة فيما يتعلق باحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون إلى وقتنا هذا، إلا إنه من المتوقع أن يتزايد مستوى هذه الخبرة في غضون السنوات القليلة القادمة. وبناءً عليه فمن الممارسة السليمة أن تتم مقارنة طرق الرصد والسيناريوهات المتوقعة للتسرب فيما بين المواقع المتشابهة على مستوى العالم. حيث سيكون للتعاون الدولي دور حيوي في تطوير تكنولوجيات ومنهجيات الرصد.

الجدول 4-5		
جدول للعرض للمجمل: عرض مجمل لاحتجاز ونقل وحقق ثاني أكسيد الكربون وثنائي أكسيد الكربون الخاص بالتخزين طويل الأجل		
الفئة	الأنشطة	
	الوحدة	مصدر البيانات
إجمالي الكمية المحتجزة للتخزين (أ)	جيجا جرام	مجمعة من كافة الفئات ذات الصلة
إجمالي الكمية المستوردة للتخزين (ب)	جيجا جرام	البيانات المأخوذة من شركات خطوط الأنابيب أو الوكالات الإحصائية
إجمالي الكمية المصدرة للتخزين (ج)	جيجا جرام	البيانات المأخوذة من شركات خطوط الأنابيب أو الوكالات الإحصائية
إجمالي كمية ثاني أكسيد الكربون المحقونة في مواقع التخزين (د)	جيجا جرام	البيانات المأخوذة من مواقع التخزين والتي يوفرها المشغلين، كما هو موضح في الفصل 5
إجمالي كمية التسرب أثناء النقل (1هـ)	جيجا جرام	مجمعة من فئة الإبلاغ 1 ج 1 الخاصة بهيئة IPCC
إجمالي كمية التسرب أثناء الحقق (2هـ)	جيجا جرام	مجمعة من فئة الإبلاغ 1 ج 2 أ الخاصة بهيئة IPCC
إجمالي كمية التسرب من مواقع التخزين (3هـ)	جيجا جرام	مجمعة من فئة الإبلاغ 1 ج 2 ب الخاصة بهيئة IPCC
إجمالي الكمية المتسربة (4هـ)	جيجا جرام	1هـ + 2هـ + 3هـ
الاحتجاز + الواردات (و)	جيجا جرام	أ + ب
الحقق + التسرب + الصادرات (ز)	جيجا جرام	د + 4هـ + ج
التناقض	جيجا جرام	و - ز

<sup>1</sup> لا توجد معاملة معينة تفرق ما بين الكربون بشري المنشأ والكربون الأحفوري بمجرد حدوث الاحتجاز: حيث سيتم تقدير الكميات المنبعثة والمختزنة من كليهما والإبلاغ عنها.

حيث إنه عادةً ما يكون (الاحتجاز + الواردات) = (الحقق + الصادرات + التسرب)

إذا كان (الاحتجاز + الواردات) > (الحقق + الصادرات + التسرب)، فعندئذ يلزم التحقق مما يلي:

- عدم زيادة تقدير الصادرات

- عدم انخفاض تقدير الواردات

- أن البيانات الخاصة بحقق ثاني أكسيد الكربون لا تشمل عمليات الاستعادة المعززة للزيت غير المرتبطة بالتخزين

أما إذا كان (الاحتجاز + الواردات) < (الحقق + الصادرات + التسرب)، فعندئذ يلزم التحقق مما يلي:

- عدم انخفاض تقدير الصادرات

- عدم زيادة تقدير الواردات

إن احتجاز ثاني أكسيد الكربون المعين "للتخزين طويل الأجل" هو ملائم بالفعل بالنسبة للاستعمالات الأخرى قصيرة الأجل التي تتسبب في حدوث انبعاثات (مثل المنتجات، والاستعادة المعززة للزيت دون تخزين).

#### ضمان/مراقبة جودة الموقع

يمكن أن يتحقق ضمان/مراقبة الجودة في الموقع عن طريق الفحص المنتظم لمعدات الرصد والهياكل الأساسية بالموقع الذي يقوم به المشغل. كما إن معدات وبرامج الرصد ستخضع للتدقيق المستقل عن طريق القائم بتجميع بيانات الحصر و/أو الوكالة المنظمة.

كما يجب على المشغل أن يحتفظ بجميع البيانات، بما في ذلك تقارير الوصف والنماذج الجيولوجية ونماذج المحاكاة الخاصة بحقق ثاني أكسيد الكربون والنماذج التنبؤية للموقع وتقييمات المخاطر وخطط الحقق وتطبيقات الترخيص وإستراتيجيات ونتائج الرصد والتحقق، ثم إرسالها إلى القائم بتجميع بيانات الحصر من أجل ضمان/مراقبة الجودة.

كما يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر أن يقوم بمقارنة (قياس) معدلات التسرب الخاصة بمنشأة تخزين معينة في مقابل مواقع التخزين مواقع التخزين المتشابهة وتوضيح أسباب الفروق في الأداء.

يمكن أيضاً للهيئة التنظيمية أن تقدم إثباتاً لتقديرات الانبعاثات و/أو خطة الرصد الموضحة أعلاه، إذا كان ذلك ملائماً. أما في حالة عدم وجود مثل هذه الهيئة، فيجب على المشغل أن يقوم في البداية بتزويد القائم بتجميع بيانات الحصر بنتائج مراجعة النظراء التي يقوم بها طرف ثالث مؤهل لذلك للتأكد من ملائمة كل من النماذج الجيولوجية والعديدية ونموذج محاكاة مستودع التخزين ومن واقعية النماذج وملائمة خطة الرصد. كما يجب على مشغل الموقع في حالة توفر ذلك أن يقوم بمقارنة نتائج برنامج الرصد في مقابل النماذج التنبؤية وتصحيح النماذج وبرنامج الرصد و/أو إستراتيجية الحقل على النحو الملائم. حيث يجب عليه أيضاً أن يبلغ القائم بتجميع بيانات الحصر بأي تغييرات جديدة.

## 10-5 التقارير والتوثيق

### الخطوط التوجيهية للإبلاغ عن الانبعاثات التي يسببها التخزين الجيولوجي:

قبل البدء في عملية التخزين الجيولوجي، يجب على القائم بتجميع بيانات الحصر في البلد التي يتم إجراء التخزين بها أن يقوم بالحصول على وأرشفة العناصر التالية:

- التقرير الخاص بطرق ونتائج تحديد خصائص الموقع
- التقرير الخاص بطرق ونتائج صياغة النماذج
- وصفاً لبرنامج الرصد المقترح يشمل القياسات الخلفية الملائمة
- السنة التي بدأ أو سيبدأ فيها تخزين ثاني أكسيد الكربون
- مصادر ثاني أكسيد الكربون المقترحة والهياكل الأساسية المشتركة في السلسلة الكاملة للنقل والحقل والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون بين المصدر ومستودع التخزين

كما يجب أن يحصل نفس القائم بتجميع بيانات الحصر على تقارير سنوية من كل موقع بشأن:

- كتلة ثاني أكسيد الكربون التي يتم حقنها خلال سنة تقديم التقارير
- كتلة ثاني أكسيد الكربون التي يتم تخزينها خلال سنة تقديم التقارير
- الكتلة التراكمية لثاني أكسيد الكربون الذي يتم تخزينه في الموقع
- مصدر أو مصادر ثاني أكسيد الكربون والهياكل الأساسية المشتركة في السلسلة الكاملة للنقل والحقل والتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون بين المصدر ومستودع التخزين
- تقرير تفصيلي حول الأساس المنطقي والمنهجية وتكرار الرصد ونتائج برنامج الرصد - ذلك لتضمين مجموع أي انبعاثات لثاني أكسيد الكربون وأي غازات احتباس حراري أخرى منبعثة من موقع التخزين إلى الغلاف الجوي أو قاع البحر خلال سنة تقديم التقارير
- تقرير حول تصحيح صياغة النماذج والنماذج التقدمية للموقع التي اتضحت أهميتها في ضوء نتائج الرصد
- مجموع أي انبعاثات متطايرة من ثاني أكسيد الكربون وأي غازات احتباس حراري أخرى من موقع التخزين إلى الغلاف الجوي أو قاع البحر خلال سنة تقديم التقارير
- توصيفات برامج وطرق الرصد المستخدمة، بالإضافة إلى تكرار عملية الرصد ونتائجها
- نتائج التحقق من برنامج الرصد ونتائجه عن طريق طرف ثالث

قد تكون هناك متطلبات إضافية لتقديم التقارير على مستوى المشروع عندما يكون الموقع جزءاً من مشروع لتجارة الانبعاثات.

### التقارير الخاصة بالعمليات العابرة للحدود وعمليات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون

يمكن أن يتم احتجاز ثاني أكسيد الكربون في بلد، البلد ألف، بينما يتم تصديره للتخزين في بلد آخر، البلد باء؛ عندئذ يجب على البلد ألف أن تقوم بالإبلاغ عن كمية ثاني أكسيد الكربون المحتجزة وأي انبعاثات تسببها عمليات النقل و/أو التخزين المؤقت التي تقع في هذا البلد، بالإضافة إلى كمية ثاني أكسيد الكربون المصدرة إلى البلد باء؛ كما يجب أيضاً على البلد باء أن يقوم بالإبلاغ عن كمية ثاني أكسيد الكربون المستوردة وأي انبعاثات تسببها عمليات النقل والتخزين المؤقت (التي تحدث في البلد باء)، بالإضافة إلى الانبعاثات الناتجة المنطلقة من موقع الحقل والتخزين الجيولوجي.

أما في حالة حقل ثاني أكسيد الكربون في بلد واحد، البلد ألف، وانتقاله من موقع التخزين وتسربه في بلد مختلف - البلد باء - فعندئذ يصبح البلد ألف هو المسئول عن تقديم التقارير بشأن الانبعاثات المتسربة من موقع التخزين الجيولوجي. إلا إنه في حالة التنبؤ بمثل هذا التسرب بناءً على خصائص الموقع والنماذج الخاصة به، ففي هذه الحالة يجب على البلد ألف أن يتخذ الترتيبات اللازمة بالتعاون مع البلد باء للتأكد من تطبيق المعايير الملائمة بالنسبة للتخزين والرصد و/أو تقدير الانبعاثات على المدى الطويل (قد تكون لدى

كذلك إذا كان أكثر من بلد يقوم باستخدام موقع تخزين مشترك، ففي هذه الحالة يجب على البلد الذي تتم عملية التخزين الجيولوجي به هو المسئول عن تقديم التقارير الخاصة بالانبعاثات هذا الموقع. حتى في حالة حدوث هذه الانبعاثات خارج هذا البلد فسيظل هو المسئول عن تقديم التقارير الخاصة بهذه الانبعاثات. أما في حالة وجود مواقع للتخزين في أكثر من بلد واحد، فعندئذ يجب على الدول المعنية أن تقوم باتخاذ الترتيبات اللازمة التي بموجبها تقوم كل دولة بالإبلاغ عن جزء محدد من مجموع الانبعاثات.

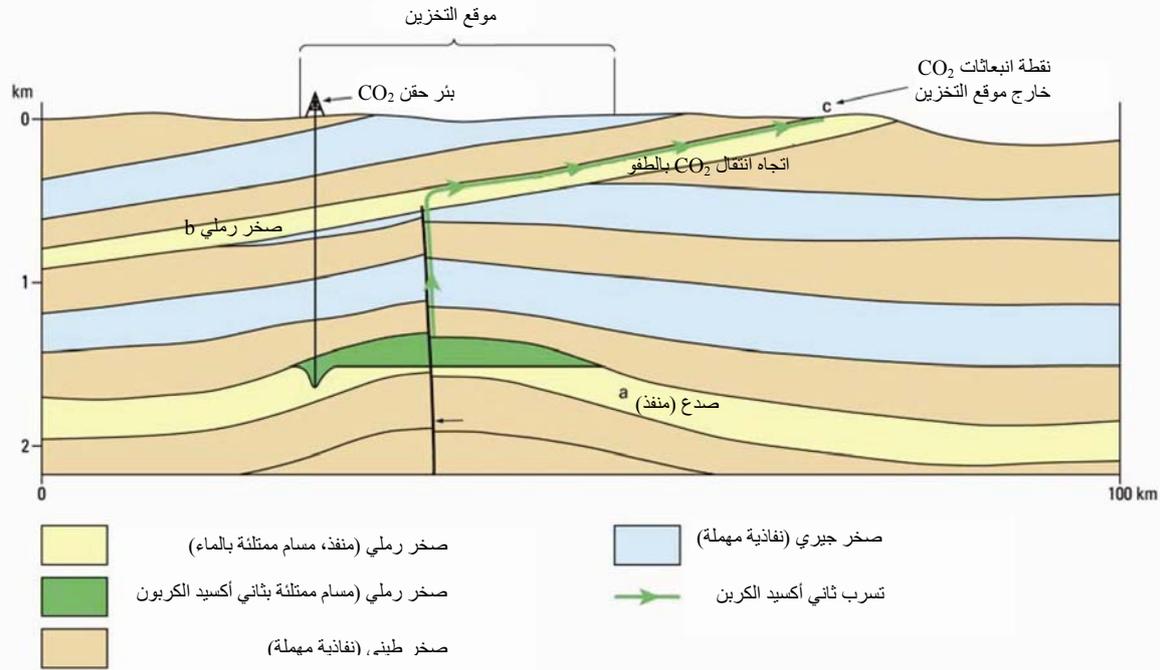
## المرفق 5-1 وصف مختصر لتكنولوجيات الرصد المحتملة بالنسبة لمواقع التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون

### مقدمة

يتطلب رصد التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون استخدام عدد من التقنيات التي يمكنها تحديد توزيع ومرحلة ومقدار ما يتم حقنه من ثاني أكسيد الكربون في أي مكان على طول المسار الممتد من نقطة الحقن في مستودع التخزين الجيولوجي إلى سطح الأرض أو قاع البحر. وهو ما يتطلب بشكل عام أن يتم تطبيق العديد من التقنيات المختلفة بشكل متزامن.

يجب تحديد الخصائص الجيولوجية لموقع التخزين والمنطقة المحيطة به من أجل التعرف على التضاريس والظواهر والعمليات التي يمكن أن تؤدي لتسرب ثاني أكسيد الكربون من مستودع التخزين، وأيضاً لصياغة نموذج خاص بطرق نقل ثاني أكسيد الكربون والمعدلات المحتملة لتدفقه في حالة تسرب ثاني أكسيد الكربون من مستودع التخزين، حيث إنه ليس بالضرورة أن يحدث ذلك في موقع الحقن (الشكل 1أ).

الشكل 1أ شكل توضيحي لاحتمالات تسرب ثاني أكسيد الكربون من مستودع التخزين الجيولوجي خارج موقع التخزين.



في حالة هجرة ثاني أكسيد الكربون من مستودع التخزين (أ) عبر أحد الصدوع غير المكتشفة في الصخور المسامية والنفاذة لمستودع التخزين (ب)، يمكن أن ينتقل بالطفو إلى سطح الأرض عند النقطة (ج). وقد يتسبب ذلك في وجود انبعاثات لثاني أكسيد الكربون على سطح الأرض على بعد عدة كيلومترات من الموقع نفسه وفي وقت غير محددة في المستقبل. كما أن تحديد الخصائص الجيولوجية لموقع التخزين والمنطقة المحيطة بالإضافة إلى النماذج العددية الخاصة بسيناريوهات التسرب المحتمل من شأنه أن يوفر المعلومات المطلوبة لاستخدام المعدات الملائمة للرصد السطحي والباطني للموقع خلال وبعد عملية الحقن.

توضح الجداول أ 5-1 و أ 5-6 تقنيات الرصد الأكثر شيوعاً وأدوات القياس التي يمكن استخدامها لرصد ثاني أكسيد الكربون في طبقات الأرض العميقة (في هذه الحالة المنطقة التي تقع على بعد من 200 إلى 500 متر تقريباً تحت سطح الأرض أو قاع البحر)، وطبقات الأرض الضحلة (200 متر تقريباً تحت سطح الأرض أو قاع البحر) والطبقات القريبة من السطح (المناطق التي تقع على بعد أقل من 10 أمتار أعلى أو أسفل سطح الأرض أو قاع البحر).

وهي التقنيات التي ستؤدي إلى نتائج أكثر دقة مع أخذ الظروف المختلفة في عين الاعتبار. عادةً ما تتمتع التقنيات الملائمة بالوضوح بالنسبة للمتخصصين، إلا أنه يمكن أيضاً تقييم تقنيات مختلفة للتعرف على الموائمة النسبية. لكن لا توجد حدود رصد محددة بشكل تام بالنسبة لمعظم التقنيات. كما إن قدراتها الفعلية على قياس توزيع ومرحلة ومقدار ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين في باطن الأرض ستكون محددة بالنسبة للموقع. حيث إنها ستحدد بدرجة كبيرة عن طريق الخصائص الجيولوجية للموقع والمنطقة المحيطة

وبالمثل فإن حدود الرصد الخاصة بتقنيات الرصد تتحدد بالمعاملات البيئية بالإضافة إلى حساسية أجهزة الرصد نفسها. وفي أنظمة الطبقات القريبة من السطح إلى الأرض، فإن معدلات التدفق والتركيزات تتحدد بامتصاص النباتات لثاني أكسيد الكربون خلال عملية التمثيل الضوئي، وتنفس الجذور، والتنفس الجرثومي في التربة، وانطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون البكر العميق وتبادل ثاني أكسيد الكربون ما بين التربة والغلاف الجوي (أولدينبيرج أند أنجر 2003). يجب التمييز ما بين أي عمليات لانطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون البكر من مستودعات تخزين ثاني أكسيد الكربون بشرية المنشأ وبين الخلفية الطبيعية المتغيرة (أولدينبيرج أند أنجر 2003، كلوزمان 2003 ألف وجيم). كما يمكن الاستفادة في هذه العملية من تحليل النسب النظائرية للكربون المستقر وإشعاعي المنشأ في ثاني أكسيد الكربون الذي يتم رصده.

حيث إن معظم التقنيات تتطلب المعايرة أو المقارنة بعمليات مسح خط الأساس التي تم إجراؤها قبل البدء في الحقن، كما هو الحال عند تحديد التدفقات الخلفية لثاني أكسيد الكربون. وقد تم تطبيق إستراتيجيات للرصد في طبقات الأرض العميقة في حقل نفط وايبرن وموقع سليبنر لتخزين ثاني أكسيد الكربون (ويلسون أند مونيا 2005، Arts et al. 2003). كما أثبت تفسير عمليات المسح السيزمية رباعية الأبعاد نجاحاً باهراً في كلتا الحالتين. كذلك فقد كانت المعلومات الجيوكيميائية التي تم الحصول عليها في حقل وايبرن من العديد من الآبار نافعة للغاية.

كما كان هناك اقتراح برصد السطح والطبقات القريبة منه في المناطق الشاطئية (أولدينبيرج أند أنجر 2003) وقد تم تطبيق ذلك (كلوزمان 2003 ألف وجيم؛ ويلسون أند مونيا 2005). كذلك تم استخدام عمليات مسح غاز التربة وقياسات تدفق الغاز السطحي. إلا إنه لم يتم حتى وقتنا هذا تطبيق عمليات لرصد طبقات الأرض الضحلة أو قاع البحر بشكل خاص بالنسبة لثاني أكسيد الكربون في المواقع البعيدة عن الشاطئ. ومع ذلك فقد تم رصد ارتشاح الغاز الطبيعي وما يسببه من تأثيرات على طبقات الأرض الضحلة وقاع البحر، حيث تعتبر هذه العملية نظيراً لارتشاح ثاني أكسيد الكربون (مثال، Schroot and Schüttenhelm 2003 ألف وباء).

الجدول 5-1 التكنولوجيات المحتملة لرصد طبقات الأرض العميقة وإمكانية تطبيقها					
التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
عمليات مسح الانعكاس السيزمية ثنائي وثلاثية ورباعية الأبعاد (بطيئة) ومتعددة العناصر	تصوير التركيب الجيولوجي للموقع والمنطقة المحيطة، وبنية وتوزيع وسك الطبقات الصخرية وصخور الغطاء في مستودع التخزين، وتوزيع ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين (مع استخدام مسح الحركة البطيئة). يمكنها التحقق (في حدود) من كمية ثاني أكسيد الكربون الموجود في مستودع التخزين. يمكن تثبيت مصفوفات سيزمية (لكن ليست ضرورية) بالنسبة للاكتساب البطيء (رباعي الأبعاد).	خاصة بالموقع. عادة ما يكون العمق الأمثل للهدف على أعماق ما بين 500 إلى 3000 م في موقع سليبندر الذي يقترب من المستوى الأمثل بالنسبة للتقنية، يحتوي رمل أفسيرا على 2800 طن ثاني أكسيد كربون، أما في وايبرن، فحد الرصد هو من 2500 إلى 7500 طن ثاني أكسيد كربون (White et al 2004). (2004). حيث يمكن أن يتم رصد كمية ثاني أكسيد الكربون المتبددة في الطبقات الفوقية هذه - كما يتم تصوير جيوب الغاز الطبيعي الضحلة باعتبارها نقاط ساطعة بالإضافة إلى إمكانية تصوير الميثان المتبدد في مداخل الغاز.	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ. يصبح التصوير أقل كفاءة عن التصوير من خلال الكارست وتحت الطبقات الملحية وتحت الغاز، حيث إن الصور تصبح أقل استبانة مع زيادة الأعماق	لا يمكنها تصوير ثاني أكسيد الكربون المتحلل (مستوى غير كاف من تباين المعاوقة بين السائل المسامي المنتشع بثاني أكسيد الكربون والسائل المسامي المحلي). لا يمكنها التصوير على نحو ملائم في حالة وجود مستوى ضئيل من تباين المعاوقة بين السائل والصخر المنتشع بثاني أكسيد الكربون. وهو سيكون الوضع السائد في الغالب (وانج، 1997).	متطورة جداً ومنتشرة وتتمتع بالانتشار التجاري التام في صناعة النفط والغاز
التقنية السيزمية العابرة للشقوق	تصور توزيع السرعة بين الآبار. كما توفر معلومات ثنائية الأبعاد حول الصخور وما تحويه من سوائل.	خاصة بالموقع. يمكن أن تكون الاستبانة أعلى من تلك الخاصة بعمليات مسح الانعكاس السيزمي السطحية، إلا إن مستوى التغطية محدود.	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ.	بالمثل كما هو موضح أعلاه، بالإضافة إلى كونها محدودة بالمنطقة الواقعة بين الآبار.	متطورة جداً ومنتشرة وتتمتع بالانتشار التجاري التام في صناعة النفط والغاز
مخطط جانبي سيزمي رأسي	تصور توزيع السرعة في البئر الواحد. كما تقوم بتخطيط توزيع ضغط السوائل حول البئر. كذلك فهي توفر إمكانية التحذير المبكر من حدوث تسرب حول البئر.	خاصة بالموقع.	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ.	كما هو موضح أعلاه بالإضافة إلى كونها محدودة بمنطقة الصغيرة حول البئر الواحد	متطورة جداً ومنتشرة وتتمتع بالانتشار التجاري التام في صناعة النفط والغاز

الجدول 5-1 (تابع)  
التكنولوجيات المحتملة لرصد طبقات الأرض العميقة وإمكانية تطبيقها

التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
الرصد الاهتزازي المجهرى	تقوم برصد الأشكال المثلية ومواقع الصدوع الدقيقة في صخور مستودع التخزين والطبقة المحيطة. كما توضح موقع واجهات السائل المحقون. بالإضافة إلى تقييم الخطر الاهتزازي المستحث.	خاصة بالموقع. وتتوقف على الضوضاء الخلفية، من بين العوامل الأخرى. كما أن وجود المزيد من المستقبلات في عدد أكبر من الآبار يساعد على توفير مستوى أكبر من الدقة في موقع الظواهر.	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ.	يجب نشرها في الآبار	متطورة جداً وتتمتع ببعض الانتشار التجاري
رصد الآبار	تتمتع بالعديد من الوظائف المحتملة بما في ذلك قياس تشعب ثاني أكسيد الكربون وضغط السائل ودرجة الحرارة؛ بالإضافة إلى قياس تدهور أو ضعف الطبقة الأسمنتية و/أو البطانة، وتسجيل قياسات البئر. رصد المقتنيات - يمكن أن توفر المقتنيات سريعة الحركة فرصة التدخل لمنع التسرب من خلال تعديل بارامترات التشغيل. بالإضافة إلى رصد التغيرات الجيوكيميائية في سوائل الطبقات، وكذلك أخذ العينات الفيزيائية من الصخور والسوائل. وأيضاً عدادات تسجيل الميد المثبتة في البئر لرصد الحركات الأرضية التي يسببها حقن ثاني أكسيد الكربون. كذلك رصد الطبقات المترابطة على مستودع التخزين للتعرف على علامات التسرب من مستودع التخزين.	يمكن تحليل العينات الجيوكيميائية من الحفر السفلى عن طريق مطيافات الكتلية البلازمية المقرونة بالبحث (تقدر استبانتهما الجزء لكل بليون). يمكن رصد مقتنيات البيروفلوروكربون بالأجزاء لكل 10 <sup>12</sup> . كما إن سجلات البئر توفر القياسات الدقيقة للعديد من البارامترات (المسامية والمقاومة والكثافة... وغيرها).	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ. تعتبر أكثر تكلفة للوصول إلى المناطق البعيدة عن الشاطئ.	يمكن إجراء وظائف معينة فقط قبل تبطين البئر. في حين أن الوظائف الأخرى تتطلب تنقيب فواصل معينة في البطانة. كما تمثل التكلفة أحد عوائق التطبيق، خاصة في المناطق البعيدة عن الشاطئ.	رصد الآبار المنتشرة، كما هو الحال في صناعة تخزين الغاز الطبيعي. كما أن بعض الأدوات متطورة جداً ويتم نشرها بشكل دوري في صناعات النفط والغاز الطبيعي، في حين أن البعض الآخر من هذه الأدوات جاري تطويره
رصد ضغط رأس البئر أثناء الحقن واختبار ضغط التكوين	يمكن إجراء الرصد المستمر لضغط الحقن عند رأس البئر باستخدام أجهزة القياس (رايت أند ماجيك 1998). كما يمكن رصد ضغط الحفر السفلى باستخدام المقاييس أيضاً. كذلك يتم تطبيق اختبارات ضغط الحقن واختبارات الإنتاج في البئر لتحديد مستوى النفاذية وإمكانية وجود حواجز في مستودع التخزين بالإضافة إلى قدرة الصخور الغطاء على الاحتفاظ بالسوائل.	هذه التكنولوجيا قد تم إثبات كفاءتها بالتجربة لهندسة مستودعات التخزين في حقول النفط والغاز الطبيعي وتقدير الاحتياطيات. يستخدم المطياف الكتلي البلازمي بالتقارن الحثي لرصد التغيرات الطيفية في التركيب العنصري الناتج عن حقن ثاني أكسيد الكربون.	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ. لكن تزداد تكلفتها في الاستخدامات البعيدة عن الشاطئ.	متطورة جداً ومنتشرة وتتمتع بالانتشار التجاري التام في صناعة النفط والغاز	
مسح الجاذبية	تحدد الكتلة والتوزيع التقريبي لثاني أكسيد الكربون المحقون من خلال التغير اللحظي للجاذبية الذي تسببه إزاحة ثاني أكسيد الكربون للسوائل المسامية الأصلية من مستودع التخزين. كما يمكنها رصد الهجرة الرأسية لثاني أكسيد الكربون من عمليات المسح المتكررة، خاصة فيما يتعلق بتضمين التغير المرهلي من سائل مرحلة تحت الحرج إلى غاز بسبب التغير في الكثافة. إلا إن حد الرصد يعتبر ضعيفاً وخاص بالموقع.	الحد الأدنى من الكميات القابلة للرصد مرتبة من مئات الألاف إلى ما دون ملايين الأطنان (Benson et al، 2004؛ Chadwick et al، 2003). لكن الكميات الفعلية القابلة للرصد تعتبر خاصة بالموقع. وكلما زادت نسبة تباين المسامية والكثافة بين السائل المسامي المحلي وثنائي أكسيد الكربون الذي يتم حقنه، كلما كان مستوى الاستبانة أفضل	على الشاطئ وبعيداً عن الشاطئ. لكن تقل التكلفة في حالة التطبيق على الشاطئ.	لا يمكنها تصوير ثاني أكسيد الكربون المتحلل (مستوى غير كاف من تباين الكثافة مع السائل المسامي المحلي).	متطورة جداً ومنتشرة وتتمتع بالانتشار التجاري التام في صناعة النفط والغاز. كما إنها مستخدمة على نطاق واسع في البحوث الجيوفيزيائية

الجدول 5-2 التكنولوجيات المحتملة لرصد طبقات الأرض الضحلة وإمكانية تطبيقها					
التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
مولد الشرر: مصدر سيزمي بتردد مركزي من 0.1 إلى 1.2 كيلوهرتز يتم سحبه بشكل عام في الأعماق الضحلة.	يقوم بتصوير (تغيرات) توزيع الغاز في طبقات الأرض الضحلة (عادة ما تتمثل في التغطية الصوتية والبقع الساطعة وتعزيز العاكس).	يتم تحديد تركيزات الغاز الحر التي تزيد عن 2% بشكل عام عن طريق التغطية الصوتية. الاستبيان الرأسي < 1م	بعيداً عن الشاطئ	مستوى أكبر من التغلغل لكن مستوى الاستبانة أقل مما هو عليه بالنسبة للطنان المسحوب على أعماق بعيدة. يمكن أن تكون هناك صعوبة في تحديد كميات الغاز في حالة زيادة التركيزات عن 5%	متطورة جداً وذات انتشار تجاري واسع النطاق في قاع البحر وصناعة المسح السيزمي للطبقات الضحلة، وكذلك في البحوث البحرية
طنان مسحوب في الأعماق: مصدر سيزمي يقوم بتوليد نبضات صوتية عريضة النطاق وذو تردد مركزي يقرب من 2.5 كيلوهرتز ويتم سحبه في الأعماق.	يقوم بتصوير (تغيرات) توزيع الغاز الضحل في الترسبات (عادةً ما تتمثل في تغطية صوتية وبقع ساطعة... وغيرها). يستخدم في تصوير الطبيعة المورفولوجية لقاع البحر، وأيضاً يقوم بتصوير تيارات الفقاعات في مياه البحر.	يتم تحديد تركيزات الغاز الحر التي تزيد عن 2% بشكل عام عن طريق التغطية الصوتية. كما أن مستوى استبانة الطبيعة المورفولوجية لقاع البحر عادة ما تكون أقل من 1 متر. يمكن أن يصل مستوى التغلغل إلى 200م تقريباً تحت قاع البحر، لكنه عادة ما يكون أقل من ذلك.	بعيداً عن الشاطئ	عادةً ما تكون تيارات الفقاعات أكثر قابلية للتغلغل عن فقائيع الميثان وبناءً عليه فمن الممكن أن تتغلغل في أعماق المياه الضحلة نسبياً (50م تقريباً). كما أن تيارات الفقائيع يمكن أن تكون متقطعة وأن قد لا تغطيها عملية المسح الواحدة. وكذلك فمن الضروري توجيه الطنان بشكل مناسب	متطورة جداً وذات انتشار تجاري واسع النطاق في قاع البحر وصناعة المسح السيزمي للطبقات الضحلة، وكذلك في البحوث البحرية
سونار المسح الجانبي	يستخدم في تصوير الطبيعة المورفولوجية لقاع البحر، وأيضاً يقوم بتصوير تيارات الفقاعات في مياه البحر. بالإضافة إلى تحديد خصائص صخور قاع البحر، مثل السمنتة بالكربونات	الطريقة المثالية لرصد فقاعات الغاز.	بعيداً عن الشاطئ	كما هو موضح أعلاه. بالإضافة إلى أن التوجيه الدقيق لمقدمة سونار المسح الجانبي ضروري للغاية.	متطورة جداً وذات انتشار تجاري واسع النطاق في صناعة المسح السيزمي لقاع البحر، وكذلك في البحوث البحرية
مسبار صوتي متعدد الطبقات (نظام باتيمتري لرقعة عريضة من الأعماق)	يستخدم في تصوير الطبيعة المورفولوجية لقاع البحر، كما يساعد المسح المتكرر على تحديد كم التغيرات المورفولوجية. وأيضاً يتم تحديد الخصائص الصخرية لقاع البحر عن طريق الأشعة المرتردة.	يمكنها تحديد التغيرات في مورفولوجية قاع البحر على أعماق ضئيلة بما يعادل 10سم.	بعيداً عن الشاطئ	كما هو موضح أعلاه. مستوى أكبر من التغطية في فترة زمنية قصيرة	منتشرة على نطاق واسع في البحوث البحرية
الطرق الكهربائية	يمكن استخدامها في رصد التغير في مستوى المقاومة الناتج عن إزاحة السائل المسامي المحلي عن طريق ثاني أكسيد الكربون، خاصة عندما يكون ثاني أكسيد الكربون في مرحلة تحت الحرج. يمكن استخدام EM والطرق الكهربائية في تخطيط انتشار ثاني أكسيد الكربون في أحد مستودعات التخزين، كما تتوفر إمكانية استخدام الطرق الكهربائية السطحية لتخطيط تغيرات تشبع ثاني أكسيد الكربون في مستودع التخزين.	مستوى منخفض نسبياً من التكلفة والاستبانة	لقد تم اعتماد قدرة الطرق الكهربائية على الشاطئ وفي المناطق البعيدة عنه، إلا أنها تحتاج إلى المزيد من التطوير حتى يتثنى تطبيقها في مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون	الاستبانة - تحتاج إلى المزيد من التطوير والمزيد من الإثبات	في مرحلة البحث

الجدول أ 5-3  
التكنولوجيات الخاصة بتحديد معدلات التدفق من الأرض أو المسطحات المائية إلى الغلاف الجوي وإمكانية تطبيقها

التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
تقنية التعاير الدوامي (مايلز ووديفيز وواينجارد 2005).	تستخدم لقياس تدفقات ثاني أكسيد الكربون في الهواء من أثر محدد رياضياً في عكس اتجاه الرياح من معدات الرصد. حيث يتم تركيب المعدات على منصة أو برج. كما أنه يتم دمج بيانات تحليل الغاز التي عادة ما تكون مأخوذة من كاشفات لثاني أكسيد كربون بالأشعة تحت الحمراء مقفلة أو مفتوحة المسار مع بيانات سرعة واتجاه الرياح لتحديد الأثر وحساب التدفق.	التدفق الحقيقي القابل للرصد في منطقة حيوية نشطة مع القياسات المستمرة = $10 \times 4.4$ كج م <sup>-2</sup> س <sup>-1</sup> = 13870 طن كم <sup>2</sup> /سنة (مايلز ووديفيز وواينجارد 2005)	يمكن استخدامها في الحقول الشاطئية فقط. كما أن هذه التكنولوجيا قد تم إثبات كفاءتها بالتجربة. ورخيصة نسبياً. وكذلك يمكنها مسح مناطق واسعة نسبياً لتحديد التدفقات ورصد التسربات. حيث أنه بمجرد رصد التسرب فمن الضروري توافر مسح تفصيلي للأثر (كاشف ثاني أكسيد الكربون المحمول بالأشعة تحت الحمراء أو غاز التربة) لتحديد هذا التسرب بشكل دقيق.	قد تكون هناك حاجة للعديد من أبراج الأجهزة لتغطية الموقع بالكامل. حيث أنه مع تركيب كاشف على برج بارتفاع 10م، ففي هذه الحالة يحتمل وجود أثر بمقدار $10^{-4}$ - $10^{-6}$ م <sup>2</sup> . كما قد يلزم تطوير هذه التقنية من أجل أتمتة القياس. وقد يقتصر التحديد الكمي للتدفقات على المناطق ذات الأرض المستوية فقط.	تم نشرها عن طريق جمعية البحوث
تقنية الغرف التراكمية، حيث تستخدم الأشعة تحت الحمراء الخلفية أو التحليل العملي لعينة من الغاز لقياس التدفق (كلوزمان 2003).	يتم وضع غرف تراكمية بأحجام معينة على الأرض وتوصيها بسطح الأرض بشكل غير محكم، عن طريق إحاطتها بالتربة أو بوضعها على أسطوانات حديدية مثبتة في الأرض. حيث إنه يتم أخذ عينات من غاز الغرف بشكل منتظم وتحليلها، باستخدام كاشفات الغاز المحمولة بالأشعة تحت الحمراء، ثم إعادة العينة إلى الغرفة مرة أخرى لرصد التراكم بمرور الوقت. كما تستخدم لرصد أي تدفقات تحدث من خلال التربة.	تتوفر لها المقترنة على سهولة رصد تدفقات بقيمة 0.04 ج ثاني أكسيد كربون م <sup>-2</sup> يوم <sup>-1</sup> = 14.6 طن/كم <sup>2</sup> /سنة (كلوزمان 2003 ألف). تتبلور الفكرة الرئيسية لهذه التقنية في رصد التسرب الحقيقي من باطن الأرض في مقابل المستويات الخلفية المتغيرة بشرية المنشأ (يمكن الاستفادة من المقننات في تحقيق ذلك). كما تزداد كفاءتها في فصل الشتاء نتيجة لتوقف التغيير الموسمي في الأنشطة الحيوية في فصل الشتاء.	أثبتت كفاءة هذه التكنولوجيا بالتجربة في رانجلي (كلوزمان 2003 ألف وباء وجيم). كما أنها تعتبر أداة فعالة في حالة استخدامها بالإضافة إلى تحليل الغازات الأخرى وتحليل الكربون النظائري المستقر وإشعاعي المنشأ. حيث إنها تساعد في تحديد مصدر ما يتم تجميعه من ثاني أكسيد الكربون. يمكن أيضاً الاستفادة من الغازات المقننات المضافة إلى الكمية المحقونة من ثاني أكسيد الكربون لتحقيق هذا الغرض - حيث إن رصد المقننات سريعة الحركة يمكن أن يوفر الفرصة للتدخل في منع التسرب عن طريق تعديل بارامترات التشغيل (مثل تجنب الإصلاح).	تسمح الثغرات الموجودة بين نقاط العينات بوجود إمكانية نظرية لتسربات لم تخضع للرصد. كما إن هناك إمكانية في حقول الغاز والنفط للأكسدة الميكروبية لثاني أكسيد الكربون إلى ميثان بدلاً من التسرب في صورة ثاني أكسيد كربون من المخزن.	تم نشرها عن طريق جمعية البحوث
تحليل غاز المياه الجوفية والمياه السطحية.	يستخدم في أخذ العينات من وقياس ومحتويات الغاز في المياه الجوفية والمياه السطحية مثل الينابيع. كما يمكن استخدام هذه التقنية فيما يلي: أ) التفريغ الجزئي للسائل واستخلاص الغازات المتحللة. ذلك بالإضافة إلى تحليل الغازات باستخدام الفصل اللوني للغاز والقياس الطيفي الكتلي... وغيره. ب) تحليل محتويات البيكربونات للحصول على عينة جديدة. وهو ما قد تم إجراؤه بالفعل في وايرن في الحقل وعند رأس البئر (2004 Shevalier et al.). حيث يكون هناك ارتباط بين ثاني أكسيد الكربون المتحلل ومحتويات البيكربونات، ومن ثم فمن الممكن أن يوجد ارتباط مباشر بين تحليل البيكربونات ومحتوى ثاني أكسيد الكربون المتحلل (على فرض توازن الظروف).	يحتمل أن تكون المستويات الخلفية في نطاق منخفض من الجزء لكل مليون. كما أن حد الرصد الخاص بالبيكربونات يكون في نطاق أقل من 2 جزء في المليون	تستخدم في المناطق الشاطئية. كما يجب استخدامها مجتمعة مع قياسات التدفق من الأرض إلى الغلاف الجوي، حيث إنها توفر مساراً بديلاً لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. كما تعتبر تقنيات القياس متطورة بالشكل الملائم وهي مباشرة نسبياً (مثل Evans et al., 2002)، لكن يجب الحرص على حساب الإزالة السريعة لغاز ثاني أكسيد الكربون من الماء (Gambardella et al., 2004).	يجب أن تأخذ تغيير تدفق المياه في عين الاعتبار.	منتشرة للاستخدام التجاري

الجدول 4-5 تكنولوجيات رصد المستويات العالية لثاني أكسيد الكربون في الهواء والتربة (رصد التسرب)					
التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
تحليل الغاز بليزر الأشعة تحت الحمراء ذو المسار الطويل المفتوح	تستخدم لقياس الامتصاص عن طريق ثاني أكسيد الكربون في الهواء الخاص بجزء محدد من طيف الأشعة تحت الحمراء على طول مسار أشعة الليزر، وبالتالي مستويات ثاني أكسيد الكربون في طبقات الهواء القريبة من سطح الأرض. يمكن استخدام القياسات لرسم خريطة بالأشعة المقطعية لكن مع وجود سجل تتبع ضئيل لتحويل ذلك إلى التدفق عبر طبقات الأرض.	تحتاج إلى التطوير لكن مع احتمال تقدير بقيمة $\pm 3\%$ من البيئة المحيطة (11 جزء في المليون) أو أفضل	تستخدم في المناطق الشاطئية. يمكن أن تنطوي على أفضل الاحتمالات القريبة لتغطية منطقة مساحتها عدة كيلومترات مربعة باستخدام جهاز واحد، وبالتالي تغطية الحقول بالكامل باستخدام عدد قليل من الأجهزة. تقدر التكلفة بما يعادل 1000 دولار أمريكية للوحدة، وبالتالي يمكن مسح الحقول بالكامل بتكلفة رخيصة نسبياً. حيث إنه بمجرد رصد التسرب فقد يتطلب ذلك إجراء مسح أكثر تفصيلاً (كاشف ثاني أكسيد الكربون المحمول بالأشعة تحت الحمراء أو غاز التربة) لتحديد هذا التسرب بشكل دقيق.	جاري العمل على تطوير هذه التكنولوجيا. كما أنها تقوم بقياس تركيز ثاني أكسيد الكربون في المسارات الطويلة، لذلك فمن الضروري توفير تفسيراً للتصوير بالأشعة المقطعية أو مسح أكثر تفصيلاً لتحديد التسربات بشكل دقيق. قد يكون من الصعب حساب التدفقات أو رصد التسربات منخفضة المستوى في مقابل الخلفية الطبيعية المتغيرة والمرتفعة نسبياً.	في مرحلة الإثبات والتطوير
تحليل غاز التربة	من الضروري تحديد التدفق الخلفي من سطح الأرض ومقدار ما به من تغيرية. كما تستخدم هذه التقنية لقياس مستويات ثاني أكسيد الكربون وتدفقاته في التربة باستخدام المجسات، حيث أنه عادة ما يتم زرعها في التربة على أعماق من 50 إلى 100 سم، لكن يمكن استخدامها أيضاً لأخذ عينات من الآبار. وعادة ما يتم أخذ العينات على شبكة. حيث أن الجزء الأدنى من المسبار أو الأنبوب الذي يتم إدخاله في البئر يكون متقوياً ويتم سحب غاز التربة من خلاله للتحليل الميداني في الموقع باستخدام كاشف ليزر محمول بالأشعة تحت الحمراء، أو يتم وضع الغاز في حاويات خاصة لتحليله في المعمل.	يمكن للكاشفات المحمولة العاملة بالأشعة تحت الحمراء المستخدمة في مسح غاز التربة أن تساعد على تفسير التغيرات في تركيز الغاز الذي يصل إلى $\pm 1-2$ جزء في المليون على الأقل. كما أن القيم الحتمية لثاني أكسيد الكربون في غاز التربة (0.2-4%) تكون أعلى في الهواء، لكن تكون تغيرات التدفق الخلفي أقل تحت سطح الأرض عنها في الجو، وبناء عليه فإنه من الأسهل أن يتم رصد التدفقات المنخفضة من طبقات الأرض الباطنية. كذلك يمكن استخدام هذه التقنية لقياس عدد كبير من الغازات - حيث يمكن استخدام الغازات والنظائر الأخرى كدلائل على مصدر نشأة ثاني أكسيد الكربون.	تستخدم في المناطق الشاطئية. كما أن هذه التكنولوجيا قد تم إثبات كفاءتها بالتجريب في حقول وإبرن ورنجلي وفي مناطق النشاط البركاني أو مناطق الحرارة الأرضية. ذلك بالإضافة إلى كونها ناعمة بالنسبة للقياسات التفصيلية، خاصة في المناطق المحيطة بنقاط تسرب التدفق المنخفض الذي تم رصده.	يمكن أن تستغرق كل عملية قياس عدة دقائق. كما أن مسح المناطق الواسعة بشكل دقيق يعتبر مكلفاً نسبياً ومستهلكاً للوقت. كذلك فإن هناك إمكانية في حقول الغاز والنقط للأكسدة الميكروبية لثاني أكسيد الكربون إلى ميثان بدلاً من التسرب في صورة ثاني أكسيد كربون من المخزن.	تم نشرها عن طريق جمعية البحوث
أجهزة تحليل الغاز بالأشعة تحت الحمراء الشخصية المحمولة يدوياً والأمنة	تستخدم في قياس مستويات ثاني أكسيد الكربون في	عادة ما يكون مستوى استبانة الأجهزة اليدوية الصغيرة الأمانة بما يعادل 100 جزء في المليون.	يمكن استخدامها في كل من الهياكل الأساسية الشاطئية والبعيدة عن الشاطئ مثل الأرصفة. كما أن هذه التكنولوجيا قد تم إثبات كفاءتها بالتجربة. وعادة ما تكون تكلفة الأجهزة اليدوية الصغيرة أقل من 1000 دولار أمريكي للوحدة الواحدة. كما يمكن الاستفادة منها أيضاً في التحديد الدقيق للتسربات عالية التركيز التي يتم رصدها بالطرق البحثية الأشمل.	ليست دقيقة بالدرجة الكافية لرصد تسرب ثاني أكسيد الكربون	منتشرة على نطاق واسع للاستخدام بشكل تجاري
تحليل الغاز بليزر الأشعة تحت الحمراء من الجو	يمكن استخدام كاشفات الغاز بليزر الأشعة تحت الحمراء ذات المسار المغلق أو المفتوح المثبتة في طائرات الهليكوبتر أو في الطائرات المجهزة لقياس ثاني أكسيد الكربون في الهواء كل ~10م.	حددت برانزلي أند كويبينيك (1995) النسبة $\pm 1$ جزء في المليون أعلى من حد رصد البيئة المحيطة بالنسبة للمعدات المستخدمة في التقنيات الجوية ذات المسار المغلق. لكن هناك معلومات قليلة متوفرة بشأن التقنية ذات المسار المفتوح، لذلك فمن الممكن أن تكون قيمتها بما يعادل $\pm 1\%$ أو أقل.	تستخدم في المناطق الشاطئية. كما أن هذه التكنولوجيا قد تم إثبات كفاءتها بالتجربة بالنسبة لرصد تسربات الميثان من خطوط الأنابيب وثنائي أكسيد الكربون من مصادر النقاط الكبيرة للغاية. كما يمكن تطبيقها لرصد تسربات ثاني أكسيد الكربون من خطوط الأنابيب والهياكل الأساسية أو لرصد التسربات المركزة من باطن الأرض.	يتم إجراء عمليات القياس على ارتفاع من مائة إلى مئات الأمتار فوق سطح الأرض، ويمكن أن تكون مستويات تركيز الغاز في الطبقات القريبة من سطح الأرض أعلى بكثير من الحد الأدنى القابل للرصد في هذه المستويات. حيث أن ثاني أكسيد الكربون أثقل من الهواء، لذلك فإنه يميل إلى التركيز في الطبقات القريبة من سطح الأرض ويعكس الميثان إن يكون من السهل رصده باستخدام الطرق الجوية.	منتشرة للاستخدام التجاري في تطبيقات خطوط الأنابيب الطبيعي وليس في تطبيقات رصد ثاني أكسيد الكربون

ملاحظات: تم تضمين معلومات جزئية من Schuler & Tang (2005) بإذن من مشروع احتجاز ثاني أكسيد الكربون.

الجدول 5-5 القياسات البديلة لرصد التسرب من مواقع التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون					
التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
التصوير فوق الطيفي بالأقمار الصناعية أو من الجو	تستخدم لرصد التغيرات الشاذة في سلامة النباتات التي يمكن أن يسببها تسرب ثاني أكسيد الكربون إلى سطح الأرض. كما يمكن استخدامها أيضاً لرصد التصدعات الطفيفة أو الخفية التي يمكن أن تكون مسارات لتسرب الغازات إلى سطح الأرض؛ وهي تستخدم أجزاء من الأشعة غير المرئية والأشعة تحت الحمراء.	التحليل المكاني للصور الملتقطة بالأقمار الصناعية ومن الجو هو 1-3م. كما إنها غير معايرة فيما يتعلق بجزء تدفق أو حجم ثاني أكسيد الكربون في الهواء أو في غاز التربة، لكن يمكنها أن تعطي مؤشرات للمناطق التي يجب أخذ عينات منها بالتفصيل.	تستخدم في المناطق الشاطئية	يلزم إجراء بحثٍ لتحديد مستويات ثاني أكسيد الكربون في التربة التي تتسبب في التغيرات القابلة للرصد في سلامة النباتات وتوزيعها. كما العديد من عمليات المسح المتكررة تتطلب إعداد استجابات (موسمية) للتغيرات المناخية. وهي غير نافعة للاستخدام في المناطق القاحلة.	في مرحلة البحث
القياس التداخلي بالأقمار الصناعية	تستخدم عمليات المسح الراداري المتكرر بالأقمار الصناعية لرصد التغيرات المحتملة في منسوب سطح الأرض التي يمكن أن يسببها حقن ثاني أكسيد الكربون، في حالة ارتفاع القشرة العليا من سطح الأرض	يمكن للرادار الداخلي ذي الفتحة التركيبية (InSAR) أن يقوم برصد التغيرات المليمترية في الارتفاع	تستخدم في المناطق الشاطئية	قد لا تحدث تغيرات في الارتفاعات أو إنها قد تحدث بشكل موسمي نتيجة لتكون أو ذوبان الجليد. كما قد تتداخل الظروف الجوية المحلية وظرف التضاريس.	لا تزال في مرحلة البحث ولم يتم نشرها بعد في تطبيقات تخزين ثاني أكسيد الكربون

الجدول أ 5-6 تكنولوجيات رصد مستويات ثاني أكسيد الكربون في مياه البحر وإمكانية تطبيقها					
التقنية	القدرات	حدود الرصد	التكاليف، إذا كان قابلاً للتطبيق	الحدود	الوضع الحالي للتكنولوجيا
تحليل غاز الرواسب	أخذ العينات وإجراء القياسات العملية على محتويات الغاز في رواسب قاع البحر.	غير أكيدة فيما يتعلق بكيفية ارتباط محتويات الغاز التي تم قياسها بمحتويات الغاز في الموقع.	تستخدم في المواقع البعيدة عن الشاطئ كما أنها مستهلكة للوقت عند الاستخدام على السفن.	يجب تصحيح بيانات الضغط ما لم تستخدم عينة مضغوطة. يمكن الاستعانة بمركبات التشغيل عن بعد أو الغواصين لتجميع العينات عند الضرورة. كما إنها مستهلكة للوقت عند الاستخدام على السفن.	تم نشرها عن طريق جمعية البحوث لتحليل غاز الميثان بعيداً عن الشاطئ
تحليل غاز مياه البحر	أخذ العينات وإجراء القياسات العملية على محتويات الغاز في مياه البحر. كما إن هناك بروتوكولات متبعة لتحليل عينات مياه البحر.	يمكن أن تكون حدود الرصد الخاصة بالمعدات التحليلية في نطاق منخفض للجزء من المليون أو أفضل. كما إن حد الرصد الخاص بالببكرونات يكون في نطاق أقل من 2 جزء في المليون. إلا إنه لم يثبت قدرتها على رصد التسربات في الحقل بالتجربة. وكذلك لم يثبت بالتجريب الحد الأدنى من التسرب الذي يمكن رصده بشكل عملي.	تستخدم في المواقع البعيدة عن الشاطئ كما إنها مستهلكة للوقت عند الاستخدام على السفن.	كما هو موضح أعلاه	تم نشرها بالقرب من المياه السطحية في جمعية البحوث، لكنها غير مستخدمة على نطاق واسع في المياه العميقة.

## المراجع

- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, R.A., Zweigel, P., van der Meer, L.G.H. and Zinszner, B. (2003). 'Monitoring of CO<sub>2</sub> injected at Sleipner using time-lapse seismic data.' Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale & Y. Kaya (eds.), 1-4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, v. 1, pp. 347-352.
- Bachu, S. and Gunter, W.D. (2005). 'Overview of acid-gas injection operations in Western Canada.' In: E.S. Rubin, D.W. Keith & C.F. Gilboy (Eds.), Greenhouse Gas Control Technologies, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 5-9 September 2004, Vancouver, Canada. Volume 1: Peer Reviewed Papers and Overviews, Elsevier, Oxford, pp.443-448.
- Benson, S.M., Gasperikova, E. and Hoversten, M. (2004). 'Overview of monitoring techniques and protocols for geologic storage projects.' IEA Greenhouse Gas R&D Programme Report, PH4/29. 99 pages.
- Brantley, S. L. and Koepenick, K. W. (1995). 'Measured carbon-dioxide emissions from Oldoinyo-Lengai and the skewed distribution of passive volcanic fluxes.' *Geology*, v. 23(10), pp. 933-936.
- Chadwick, R.A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G.A., Holloway, S. and Johannesen, P.N. (2003). 'Geological characterization of CO<sub>2</sub> storage sites: Lessons from Sleipner, northern North Sea.' Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale and Y. Kaya (eds.), 1-4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, v.I, 321-326.
- Evans, W. C., Sorey, M.L., Cook, A.C., Kennedy, B.M., Shuster, D.L., Colvard, E.M., White, L.D., and Huebner, M.A., (2002). 'Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: lessons learned from Mammoth Mountain, USA.' *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 114(3-4), pp. 291-312.
- Gambardella, B., Cardellini, C., Chiodini, G., Frondini, F., Marini, L., Ottonello, G., Vetusch Zuccolini, M., (2004). 'Fluxes of deep CO<sub>2</sub> in the volcanic areas of central-southern Italy'. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* v. 136 (1-2), pp. 31-52.
- IEA GHG, (2005). 'Permitting issues for CO<sub>2</sub> capture and storage: A review of regulatory requirements in Europe, USA and Australia.' IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Report IEA/CON/04/104, Cheltenham, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [Metz, B., Davidson, O., Meyer, L and. de Coninck, H.C (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, USA.
- Jones, D. G., Beaubien, S., Strutt, M. H., Baubron, J.-C., Cardellini, C., Quattrochi, F. and Penner, L. A. (2003). 'Additional soil gas monitoring at the Weyburn unit (2003).' Task 2.8 Report for PTRC. British Geological Survey Commissioned Report, CR/03/326.
- Klusman, R.W. (2003(a)). 'Rate measurements and detection of gas microseepage to the atmosphere from an enhanced oil recovery/sequestration operation, Rangely, Colorado, USA.' *Applied Geochemistry*, v. 18, pp. 1825-1838.
- Klusman, R.W. (2003(b)) 'Computer modelling of methanotrophic oxidation of hydrocarbons in the unsaturated zone from an enhanced oil recovery/sequestration project, Rangely, Colorado, USA.' *Applied Geochemistry*, v. 18, pp. 1839-1852.
- Klusman, R.W., (2003 (c)). 'A geochemical perspective and assessment of leakage potential for a mature carbon dioxide-enhanced oil recovery project and as a prototype for carbon dioxide sequestration; Rangely field, Colorado.' *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 87(9), pp. 1485-1507.
- Miles, N.L., Davis, K.J. and Wyngaard, J.C. (2005). 'Detecting leaks from belowground CO<sub>2</sub> reservoirs using eddy covariance, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations.' Results from the CO<sub>2</sub> Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification S.M. Benson (ed.), Elsevier Science, London, pp. 1031-1044.
- Oldenburg, C.M. and A.J. Unger, (2003). 'On leakage and seepage from geologic carbon sequestration sites: unsaturated zone attenuation. Vadose Zone'. *Journal*, 2, 287-296.
- Pruess, K., Garcia, J., Kavscek, T., Oldenburg, C., Rutqvist, J., Steefel, C., and Xu, T. (2004). 'Code intercomparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO<sub>2</sub>'. *Energy*, v. 29, pp. 1431-1444.
- Reeves, S.R., (2005). 'The Coal-Seq project: Key results from field, laboratory and modeling studies.' Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), September 5-9, 2004, Vancouver, Canada, v.II, 1399-1406.

- Scherer, G.W., Celia, M.A., Prevost, J-H., Bachu, S., Bruant, R., Duguid, A., Fuller, R., Gasda, S.E., Radonjic, M. and Vichit-Vadakan, W. (2005). 'Leakage of CO<sub>2</sub> through abandoned wells: role of corrosion of cement, carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations' Results from the CO<sub>2</sub> Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, Benson, S.M. (Ed.), Elsevier Science, London, pp. 827-850.
- Schroot, B.M. and Schüttenhelm, R.T.E (2003). 'Expressions of shallow gas in the Netherlands North Sea.' *Netherlands Journal of Geosciences*, v. 82(1), pp. 91-105.
- Schroot, B.M. and Schüttenhelm, R.T.E (2003). 'Shallow gas and gas seepage: expressions on seismic and other acoustic data from the Netherlands North Sea.' *Journal of Geochemical Exploration*, v. 4061, pp. 1-5.
- Shevalier, M., Durocher, K., Perez, R., Hutcheon, I., Mayer, B., Perkins, E., and Gunter, W. (2004). 'Geochemical monitoring of gas-water-rock interaction at the IEA Weyburn CO<sub>2</sub> Monitoring and Storage Project.' Saskatchewan, Canada. GHGT7 Proceedings. At: [http://www.ghgt7.ca/papers\\_posters.php?format=poster](http://www.ghgt7.ca/papers_posters.php?format=poster).
- Shuler, P. and Tang, Y (2005). 'Atmospheric CO<sub>2</sub> monitoring systems, carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations.' Results from the CO<sub>2</sub> Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, S.M. Benson (ed.), Elsevier Science, London, pp. 1015-1030.
- Strutt, M.H, Beaubien, S.E., Beabron, J.C., Brach, M., Cardellini, C., Granieri, R., Jones, D.G., Lombardi, S., Penner, L., Quattrocchi F. and Voltatomi, N. (2003). 'Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: preliminary results from the EnCana EOR project in Weyburn, Saskatchewan (Canada).' Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale and Y. Kaya (eds.), 1-4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, Amsterdam, v.I., 391-396.
- Wang, Z, (1997). 'Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring; the physical basis.' *The Leading Edge*, v. 16, pp. 1327-1329.
- White, D.J., Burrowes, G., Davis, T., Hajnal, Z., Hirsche, I., Hutcheon, K., Majer, E., Rostron, B and Whittaker, S. (2004). 'Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs.' The International Energy Agency Weyburn pilot project. *GSA Today*, 14, 4-10.
- Wilson, M., and Monea, M. (2005). IEA GHG Weyburn Monitoring and Storage Project, Summary Report, 2000-2004. Petroleum Technology Research Center, Regina SK, Canada. In: Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vol. III, September 5-9, Vancouver, Canada.
- Wright, G. and Majek, A. (1998). 'Chromatograph, RTU System monitors CO<sub>2</sub> injection'. *Oil and Gas Journal*, July 20, 1998.
- Yoshigahara, C, Itaoka, K. and Akai, M. (2005). 'Draft accounting rules for CO<sub>2</sub> capture and storage'. Proceedings of the GHGT-7 Conference.

## مراجع أخرى

- Barrie, J., Brown, K., Hatcher, P.R. & Schellhase, H.U. (2005). 'Carbon dioxide pipelines: A preliminary review of design and risks.' In: E.S. Rubin, D.W. Keith & C.F. Gilboy (Eds.), *Greenhouse Gas Control Technologies, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 5-9 September 2004, Vancouver, Canada. Volume 1: Peer Reviewed Papers and Overviews, Elsevier, Oxford, pp. 315-320.
- Haefeli, S., Bosi, M. and Philibert, C. (2004). 'Carbon dioxide capture and storage issues - accounting and baselines under the United Nations Framework Convention on Climate Change'. IEA Information Paper. IEA, Paris, 36 p.
- Holloway, S., Pearce, J.M., Ohsumi, T. and Hards, V.L. (2005). '*A review of natural CO<sub>2</sub> occurrences and their relevance to CO<sub>2</sub> storage.*' IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK.
- Oldenburg, Curtis M., Lewicki, Jennifer L., and Hepple, Robert P., (2003). 'Near-surface monitoring strategies for geologic carbon dioxide storage verification.' Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA LBNL-54089.
- Schremp, F.W. and Roberson, G.R. (1975). 'Effect of supercritical carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) on construction materials.' *Society of Petroleum Engineers Journal*, June 1975, 227-233.