



منظمة الاقطار العربية المصدرة للبترول  
أوابك

# النفط والتعاون العربي



المجلد الواحد والخمسون 2024 - العدد 188



البحث الفأزر «مناصفة» على جائزة أوابك للبحث العلمي لعام 2022

التقاط واستخدام وتخزين الكربون : آفاق إزالة  
الكربون في صناعة النفط والغاز

الدكتور مأمون حلبي ، الدكتور فيصل الحميدان

تقارير

الدورة الثانية لقمة ليبيا للطاقة والاقتصاد

عبد الفتاح دندي





# النفط

## والتعاون العربي

مجلة فصلية محكمة تصدر عن الأمانة العامة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

الاشتراك السنوي : 4 أعداد (ويشمل أجور البريد)

البلدان العربية

للأفراد : 8 د. ك أو 25 دولاراً أمريكياً

للمؤسسات : 12 د.ك أو 45 دولاراً أمريكياً

البلدان الأخرى

للأفراد : 30 دولاراً أمريكياً

للمؤسسات : 50 دولاراً أمريكياً

الاشتراكات باسم : منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترو

# النفط والتعاون العربي



## جمال عيسى اللوغاني

الأمين العام لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

## رئيس التحرير

## عبد الفتاح دندي

مدير الإدارة الاقتصادية والمشرف على إدارة الاعلام والمكتبة  
منظمة أوابك

## مدير التحرير

## م. عماد مكي

مدير إدارة الشؤون الفنية  
منظمة أوابك

## هيئة التحرير

## د. داوود باهزاد

مدير إدارة العلوم والتكنولوجيا  
معهد الكويت للأبحاث العلمية

## د. بلقاسم العباس

كبير المستشارين  
المعهد العربي للتخطيط

## قواعد النشر في المجلة

### تعريف بالمجلة واهدافها

النفط والتعاون العربي مجلة فصلية محكمة تعنى بشؤون النفط والغاز والطاقة حيث تستقطب نخبة من المتخصصين العرب والأجانب لنشر أبحاثهم وتعزيز التعاون العلمي في المجالات التي تغطيها المجلة، كما تقوم على تشجيع الباحثين على إنجاز بحوثهم المبتكرة والإسهام في نشر المعرفة والثقافة البترولية وتلك المتعلقة بالطاقة وتعميمها والعمل على متابعة التطورات العلمية في مجال الصناعة البترولية.

### الأبحاث

كافة الأبحاث التي تتعلق بالنفط والغاز والطاقة والتي تهدف إلى الحصول على إضافات جديدة في حقل الفكر الإقتصادي العربي.

### مراجعة الأبحاث والكتب

تقوم المجلة بنشر المقالات التي تقدم مراجعة تحليلية لكتب أو دراسات تم نشرها حول صناعة النفط والغاز والطاقة عموماً، بحيث تكون هذه المقالات مرجعاً للباحثين حول أحدث وأهم الإصدارات المتعلقة بالصناعة البترولية.

### التقارير

تتناول التقارير وقائع مؤتمرات أو ندوة حضرها الكاتب، شريطة أن تكون مواضيعها ذات صلة بالنفط والغاز والطاقة، كما يشترط استئذان الجهة التي أوفدته للمؤتمر أو المؤسسات المشرفة عليه لكي تسمح له بنشرها في مجلتنا. وأن لا تزيد عدد صفحات التقرير عن 10 صفحات مع كافة الأشكال والخرائط والجداول إن وجدت.

### شروط البحث

- نشر الأبحاث العلمية الأصيلة التي تلتزم بمنهجية البحث العلمي وخطواته المتعارف عليها دولياً ومكتوبة باللغة العربية.
- أن لا يتجاوز البحث العلمي المنشور على 40 صفحة، (متن البحث، الجداول والاشكال) بدون قائمة المراجع، ويرسل إلكترونياً كاملاً إلى المجلة على شكل word document.
- ترسل الأشكال، الخرائط والصور في ملف اضافي على شكل JPEG.
- استخدام خط Times New Roman في الكتابة وبحجم 12، وأن تكون المسافة بين الأسطر 1.5. وأن تكون تنسيق الهوامش الكلمات بطريقة Justified.
- أن يتم الإشارة الى مصادر المعلومات بطريقة علمية واضحة.

- عند اقتباس أي معلومات من أي مصدر (إذا كانت المعلومات رقميه أو رؤية معينة أو تحليل ما) يجب أن لا يتم الاقتباس الحرفي وإنما يتم أخذ أساس الفكرة وإعادة صياغتها بأسلوب الباحث نفسه، والإشارة إلى مصدر الإقتباس. أما في حالات الإقتباس الحرفي فتضع المادة المقتبسة بين علامتي الإقتباس ("...").
- يفضل أن تذكر المدن ومراكز الأبحاث والشركات والجامعات الاجنبية الواردة في سياق البحث باللغة الانجليزية ولا تكتب باللغة العربية.
- إرفاق نسخة من السيرة العلمية للباحث مع البحث المرسل.
- تعبر جميع الأفكار المنشورة في المجلة عن آراء كاتبها ولا تعبر بالضرورة عن وجهة نظر جهة الإصدار ويخضع ترتيب الأبحاث المنشورة وفقا للاعتبارات الفنية.
- البحوث المرفوضة يبلغ أصحابها من دون ابداء الأسباب.

ترسل المقالات والمراجعات باسم رئيس التحرير، مجلة النفط والتعاون العربي، أوابك،  
ص. ب: 20501 الصفاة- الرمز البريدي: 13066 دولة الكويت  
الهاتف: 00965- 24959000 أو 00965-24959779  
الفاكس: 00965 - 24959755  
البريد الالكتروني [oapec@oapecorg.org](mailto:oapec@oapecorg.org)  
موقع الأوابك على الانترنت [www.oapecorg.org](http://www.oapecorg.org)

## المحتويات

### البحث الفائق «مناصفة» علمه جائزة أوابك للبحث العلمي لعام 2022

#### التقاط واستخدام وتخزين الكربون : آفاق إزالة الكربون في صناعة النفط والغاز

7 ————— الدكتور مأمون حطبي ، الدكتور فيصل الحميدان

## التقارير

#### الدورة الثانية لقمة ليبيا للطاقة والاقتصاد

333 ————— عبد الفتاح دندي

## البحث الفائز «مناصفة» علمه جائزة أوابك للبحث العلمي لعام 2022

### التقاط واستخدام وتخزين الكربون : آفاق إزالة الكربون في صناعة النفط والغاز

*الدكتور مأمون حطبي\**

*الدكتور فيصل الحميدان\*\**

---

\* باحث علمي رئيسي، مستشار مستقل للطاقة، دبي ، دولة الإمارات العربية المتحدة  
\*\* باحث علمي، مركز أبحاث البترول، معهد الكويت للأبحاث العلمية ، دولة الكويت

## مقدمة

واجه سوق الطاقة العالمي باستمرار تحديات مختلفة على مدار الخمسين عاماً الماضية، وتُعزى هذه التحديات إلى العديد من العوامل التي تتغير بسرعة وتؤثر على العرض والطلب على الطاقة. ومن بين هذه العوامل تأثير الطاقة على البيئة والنمو المتسارع للطلب العالمي على الطاقة، والذي يحركه ارتفاع عدد السكان، ونمو الناتج المحلي الإجمالي، وتدفق المنتجات وتوسع التطبيقات الجديدة التي تتطلب طاقة. وتشمل العوامل الأخرى المخاوف بشأن إمدادات الطاقة وإمكانية الوصول إليها، والتقدم التكنولوجي الذي يتيح الاستغلال الفعال من حيث التكلفة لموارد الطاقة الأولية التقليدية أو الجديدة، مثل الإنتاج المعزز للنفط والغاز ونفط السجيل وموارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة النووية والطاقة الحرارية الجيولوجية. ونتيجة لذلك، يبدو أن استمرارية تحولات الطاقة أمر لا مفر منه وآخرها التوجه القوي نحو اقتصاد الهيدروجين، والذي تحركه المخاوف المتزايدة بشأن انبعاثات الوقود الأحفوري، وإمكانية تخزين الطاقة الفائضة المولدة من الموارد المتجددة كبديل لتوليد الطاقة بالوقود الأحفوري.

لكي تتمكن الدول والشركات المنتجة للنفط والغاز من المرور بسلاسة عبر التحول الحالي في مجال الطاقة لا بد لها من معالجة المخاوف الرئيسية السائدة المتعلقة بطلب السوق. في هذا العمل البحثي، تتم مناقشة تحديات الوقود الأحفوري خلال تحول الطاقة الحالي بناءً على المشاكل المرتبطة بانبعاثات الوقود الأحفوري والاحتباس الحراري والخيارات المتاحة للعالم بشكل عام والدول العربية بشكل خاص لمكافحة ظاهرة الاحتباس الحراري. يلي ذلك عرض آخر للتطورات المتعلقة بانبعاثات الغازات الدفيئة، مع التركيز بشكل خاص على انبعاثات CO<sub>2</sub> وتأثيرها على ظاهرة الاحتباس الحراري، وحاجة صناعة النفط والغاز لمعالجة هذه الظاهرة. ثم يدرس البحث استجابة مختلف الدول لتحدي الاحتباس الحراري ويقدم لمحة عامة عن الخطط والسياسات المتعلقة بالنقاط وتخزين الكربون التي أُعدت وسُنّت لمواجهة هذا التحدي. وتتم بعد ذلك مراجعة ومناقشة تقنيات النقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه عبر سلسلة القيمة الكاملة بما في ذلك إزالة الكربون من الوقود الأحفوري، وبعدها يُقيم مستوى نضج التقنيات المختلفة المتعلقة بالنقاط CO<sub>2</sub> من المصادر الصناعية والغلاف الجوي، ونقل ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه النهائي. كما تناول البحث خيارات الانبعاثات السلبية، وتحديدًا خيارات تخزين CO<sub>2</sub> من خلال تسريع العمليات الطبيعية، مثل ذوبان CO<sub>2</sub> في المحيطات، وتكرين المعادن، وإزالة الكربون الأرضي، وأعطى البحث لمحة عامة عن الوضع الاقتصادي الحالي لمختلف خيارات النقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. وأخيراً، تناول البحث التقدم المتعلق باستخدام الكتلة الحيوية والنفائيات البلاستيكية كحلول مقترحة لمشكلة انبعاث CO<sub>2</sub>.

كانت انبعاثات CO<sub>2</sub> والجوانب المختلفة لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه موضوعاً لعدد متزايد من المنشورات على مدى السنوات العشر الماضية. ومع ذلك، فإن هذا البحث هو أحدث الجهود المتعلقة بهذا الموضوع فهو يوفر للقراء الوضع الحالي للسياسات واللوائح الداعمة لالتقاط وتخزين الكربون والتقنيات ذات الصلة عبر سلسلة القيمة بأكملها، والجوانب الاقتصادية للانتشار، والفجوات التكنولوجية الحالية لانتشارها على نطاق صناعي واسع. وأجري البحث مع الأخذ في الاعتبار أن الوثيقة ستنتشر باللغة العربية، وبالتالي أعدت لتلبية احتياجات مختلف أصحاب المصلحة وعامة الناس في جميع أنحاء الدول العربية بهدف ان تكون المجتمعات العربية على اطلاع ودراية بالقضايا المتعلقة بالاحتباس الحراري، وارتباطه بانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ووسائل معالجة الانبعاثات من خلال التقاط وتخزين الكربون. ويعتبر هذا البحث استكمال لسلسلة من الجهود والتقارير والأوراق العلمية التي نشرتها منظمة الدول العربية المصدرة للبترول (أوبك) وغيرها من المؤسسات العربية على مدى السنوات الخمس الماضية حول قضايا النفط والغاز وثيقة الصلة والمدرجة في الفصل الأول. وتتبع ضرورة تنبيه المجتمعات العربية بشأن هذه القضية من أن العديد من الدول العربية تتمتع بموارد نفطية وغازية كبيرة لا بد من بذل الجهود لضمان بقائها من ضمن سلاسل إمدادات الطاقة الأولية في العالم، حيث تلعب عائدات هذه الموارد دوراً هاماً في تمويل التنمية الاجتماعية والاقتصادية في جميع دول المنطقة إضافةً إلى العديد من الدول النامية التي تقوم الدول النفطية بمساعدتها من خلال صناديق التنمية المختلفة. ويسلط البحث الضوء أيضاً على إمكانية الاستفادة من تسريع بعض العمليات الطبيعية، مثل إزالة الكربون الأرضي وإعادة تدوير النفايات لتخفيض تأثير الانبعاثات المرتفعة للفرد في الدول العربية. وقد بذلت بالفعل جهود في هذه الاتجاهات من خلال "برامج التخضير" ومشاريع التخلص من النفايات التي هي إما في مرحلة التنفيذ أو مازالت قيد الدراسة.

يشير هذا البحث بوضوح إلى أن هناك مجموعة واسعة من تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه قيد التطوير عبر سلسلة القيمة الكاملة، والتي تغطي جوانب الالتقاط والنقل والتخزين والاستخدام. وقد وصلت بعض هذه التقنيات بالفعل إلى مستوى جاهزية تكنولوجية يتراوح ما بين 7 إلى 9، مع وجود العديد من المشاريع التجارية قيد التشغيل أو في مرحلة الإنشاء. ومع ذلك، فإن القدرات المتراكمة لهذه المشاريع في جميع أنحاء العالم لا تزال منخفضة، وتتطلب وتيرة متسارعة للأسراع في التنفيذ. وقد بدأت بالفعل بعض الجهود الجماعية لتسريع التنفيذ من خلال مختلف المجموعات والجمعيات المتخصصة. ومن المهم الإشارة إلى أن أهداف الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري وانبعاثات CO<sub>2</sub> هي أهداف طويلة المدى وتمتد حتى عام 2050. ولذلك، هناك وقت للتخطيط والتنفيذ لضمان نجاح التقاط واستخدام الكربون وتخزينه. وفيما يلي التوصيات العامة المستمدة من هذا البحث:

1. يتطلب التخطيط طويل المدى من قبل جميع أصحاب المصلحة لضمان تخصيص الموارد المناسبة لمواجهة التحديات ذات الصلة.
2. تشمل الجهات المعنية الموصى بإشرافها مؤسسات النفط والغاز والصناعات الكثيفة الاستهلاك للطاقة والمؤسسات البحثية والجامعات وسلطات حماية البيئة والمؤسسات التعليمية.
3. إن العلوم والتكنولوجيات المتعلقة بالاحتباس الحراري معقدة ومتنوعة. ومن ثم، يجب على جميع دول المنطقة العمل على تطوير فرق من الخبراء المتخصصين في مختلف القضايا الفنية والتنظيمية ذات الصلة لدعم صناع القرار.
4. يجب على شركات النفط والغاز والمؤسسات البحثية والهيئات العامة لحماية البيئة في المنطقة وضع برامج لمعالجة المشاكل التقنية والمشاركة في نقل المعرفة وتوليد البيانات وتطوير حلول مجدية اقتصادياً ومناسبة للعالم ودول المنطقة.
5. يجب على الصناعات ذات الاستهلاك الكثيف للطاقة في المنطقة أن تضع برامجاً وأهدافاً للحد من انبعاثاتها.
6. على الرغم من أن بعض الدول العربية، مثل المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة، منخرطة بالفعل في الجهود المتعلقة بعمليات التقاط  $CO_2$  وتخزينه، إلا أن المشاركة الأوسع من جانب جميع الدول العربية أمرٌ ضروري. وسيكون إنشاء منتدى إقليمي مماثل لبعض المنتديات الدولية المعنية بالموضوع مفيداً لتبادل المعرفة وبدء الجهود الجماعية.
7. يجب أن تتضمن مناهج التعليم العام والتعليم العالي برامج توعوية بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري والتقاط وتخزين الكربون لضمان إعداد الأجيال القادمة بشكل جيد للقيام بأدوار فاعلة في مواجهة هذه التحديات.
8. من المهم دعم تكنولوجيات الانبعاثات السلبية ذات الصلة لتعزيز إزالة الكربون ورصد أدائها ونشر نتائجها لتمكين الدول من تخفيض انبعاثاتها وبالتحديد متوسط الانبعاثات للفرد.

## ملخص تنفيذي

يعد الاحتباس الحراري هو المحرك الرئيسي لتحول الطاقة الحالي. ولكي يحقق التحول هدفه المتمثل في الحد من ارتفاع درجة حرارة الأرض الى أقل من 2°م، ويفضل أن يكون 1.5°م، من الآن إلى عام 2050، يجب تكثيف الجهود الرامية إلى الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، وخاصةً ثاني أكسيد الكربون. ولتحقيق هذا الهدف، فقد أصبح من المدرك الآن أن الجهود يجب أن توجه نحو القضاء على انبعاثات CO<sub>2</sub> أو خفضها بشكل كبير. ويتضح من خلال مراجعة الأدبيات المتعلقة بهذا الموضوع ان هناك مسارين لتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، المسار الأول هو تسريع تطوير وانتشار موارد الطاقة المتجددة، والذي يتضمن تسريع تطوير الهيدروجين الأخضر، بينما يتمثل المسار الثاني في تسريع الجهود الرامية إلى إزالة الكربون من نظام طاقة الوقود الأحفوري الحالي من خلال تقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS). وكلا المسارين منطقيان ولديهما المقومات الكافية للنجاح في خفض انبعاثات الغازات الدفيئة. ويُركز هذا البحث على المسار الثاني، وهو CCUS، حيث انه يتمتع بثروة من المعرفة المتراكمة من خلال بعض تطبيقاته وانتشارها على مدى العقود الماضية. وقد نُشر مؤخراً عدداً كبيراً من المقالات البحثية وأوراق المراجعة والكتب والتقارير الفنية المتعلقة بتكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، ويأتي هذا البحث استكمالاً لهذه الجهود الحثيثة حيث يركز البحث تحديداً على مراجعة الوضع الحالي لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، وانتشارها التجاري، والفجوات التكنولوجية المتعلقة بها.

يعطي الفصل الأول من هذا البحث نبذة مختصرة عن عدد من المواضيع ذات الصلة مثل دور الطاقة في التنمية البشرية، والوقود الأحفوري المتاح، وموارد الطاقة المتجددة والنووية، والدور المستقبلي المحتمل للوقود الأحفوري. و يهدف هذا الفصل الى تزويد القارئ بالمعلومات الأساسية الضرورية لتحديد المسارات المستقبلية لتلبية الطلب العالمي على الطاقة.

ويُركز الفصل الثاني على التحديات الحالية التي تواجه الوقود الأحفوري والتي تتمثل بشكل أساسي في انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن الصناعة في جانبي العرض والطلب، حيث تناول التقرير باختصار ظاهرة الاحتباس الحراري وجهود اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ والهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ للتوصل إلى اتفاق عالمي بشأن النهج الذي يتوجب اتباعه في معالجة ظاهرة الاحتباس الحراري. كما يتناول هذا الفصل مصادر وحجم انبعاثات الغازات الدفيئة التي تنتج من جانبي العرض والطلب.

ويتناول الفصل الثالث السياسات والسيناريوهات التي تهدف إلى التحكم في انبعاثات الغازات الدفيئة وخفضها حسب مناطق العالم ودول مختارة. وقد تمت مقارنة هذه السياسات بالاتجاهات السائدة في وضع السياسات المتعلقة بالهيدروجين، حيث أنه من المتوقع أن يلعب الهيدروجين الأزرق الذي يتم استخلائه من الوقود الأحفوري دوراً هاماً في نمو اقتصاد الهيدروجين، حيث يرتبط إنتاج هذا النوع من الهيدروجين بشكل وثيق مع تكنولوجيا التقاط الكربون وتخزينه.

ويتضمن الفصل الرابع مراجعة لإزالة الكربون من الصناعات ذات الاستهلاك الكثيف للطاقة، والتي تعتمد حالياً بشكل كبير على الوقود الأحفوري، وبالتالي فهي من بين المساهمين الرئيسيين في انبعاثات الغازات الدفيئة. ويتضمن الفصل أيضاً ملخصاً عن البروتوكولات التي طُورت لتحديد مستويات الانبعاثات من مختلف المساهمين، حيث ركز البحث على صناعات النفط والغاز، وصناعة الحديد والصلب، وصناعة الأسمت، باعتبارها من المساهمين الرئيسيين في الانبعاثات وقد تم وصف الجهود التي تبذلها هذه الصناعات بإيجاز.

الفصل الخامس هو فصل تمهيدي لأنشطة CCUS، وقد بدأ هذا الفصل بتعريف الاختصارات المختلفة المستخدمة، تليها نظرة عامة على CCUS وتطورها التاريخي. ويلى ذلك تناول الدور المحتمل للتقاط واستخدام وتخزين الكربون في تحول الطاقة وتقييم الجهود المبذولة حالياً في تطوير التقنيات ذات الصلة بناءً على مسح إحصائي للأدبيات المفتوحة حول هذا الموضوع.

ويركز الفصل السادس على التقاط الكربون، وهي الخطوة الأولى والأكثر أهمية في سلسلة قيمة التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، حيث يرتبط بها جزء كبير من التكلفة. ويقدم هذا الفصل مراجعة شاملة للفئات الثمانية لتقنيات التقاط الكربون والتي يمكن تلخيصها بالامتصاص، الامتزاز، الأغشية، التبريد، التحلق الكيميائي، تحلق الكالسيوم، توليد الطاقة الكهربائية بواسطة دورة علام، والالتقاط المباشر من الهواء. وينصب التركيز في الغالب على مراحل تطور هذه التقنيات ومستوى جاهزيتها التكنولوجية كما يقدم الفصل استعراضاً موجزاً لحالة تسويق تكنولوجيات الالتقاط ويقارن مزايا وعيوب الفئات المختلفة.

ويتناول الفصل السابع موضوع استخدام CO<sub>2</sub> والذي يُعد المحور الرئيسي لمفهوم اقتصاد الكربون الدائري. ويتناول الفصل في البداية مجالات الاستخدام الحالية لثاني أكسيد الكربون، ثم تقنيات الاستخدام المادي المباشر، والتي تشمل الاستخلاص المعزز للنفط (EOR - CO<sub>2</sub>)، والاستخدام غير المباشر عن طريق استغلاله في تصنيع بعض المواد الكيميائية. وتحت كل فئة من هذه الفئات العريضة عُرضت عدة خيارات. ويختتم الفصل بتقييم حالة التكنولوجيات والصعوبات الحالية والمنظور المستقبلي.

ويخصص الفصل الثامن للخيارات المختلفة لعزل ثاني أكسيد الكربون، وينصب التركيز على التخزين في التكوينات الجيولوجية، حيث إنه خيار التخزين الأكثر تفضيلاً حالياً. ويتناول الفصل أيضاً خيارات العزل من خلال تقنيات الانبعاثات السلبية، وهي التخزين في المحيطات والتمعدن أو تقويم المعادن وإزالة الكربون الأرضي، ويعرض أخيراً التوقعات المستقبلية للتخزين.

يقدم الفصل التاسع مراجعة لمختلف طرق نقل ثاني أكسيد الكربون، حيث سيلعب الموضوع دوراً مهماً في سلسلة قيمة التقاط  $CO_2$  وتخزينه في المستقبل. ويستعرض الفصل خيارات النقل المختلفة، بما في ذلك خطوط الأنابيب والسفن والنقل بواسطة الصهاريج باستخدام شبكات الطرق والسكك الحديدية، كما يتناول بإيجاز الحاجة إلى إنشاء محاور لدعم الارتباط بين التقاط الغاز واستخدامه أو تخزينه النهائي. وتعتبر التقنيات المتعلقة بكل هذه الأساليب ناضجة ومتطورة، ولكن هناك حاجة إلى معالجة بعض السياسات المتعلقة بقضية النقل.

يقدم الفصل العاشر مراجعة موجزة لتسويق تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  وتخزينه، كما يستعرض الفصل بإيجاز الجهود المبذولة فيما يتعلق بالتقييم الاقتصادي لعمليات التقاط  $CO_2$  وتخزينه، مع التركيز على التكاليف الحالية لمناهج التقاط  $CO_2$  وتخزينه. ويهدف هذا الفصل إلى توفير المعلومات للقراء حول القضايا الرئيسية التي ينبغي التركيز عليها في البحث والتطوير في المستقبل، كما ويسلط هذا الفصل الضوء على الحاجة إلى تسهيل تجارة الكربون.

ويتناول الفصل 11 بإيجاز التقدم المحرز في التكنولوجيات المتعلقة بإنتاج الوقود من الكتلة الحيوية والنفايات، مما يدل على أن عدداً من التكنولوجيات ناضجة بالفعل ويجري نشرها. ويركز الفصل أيضاً على التطبيقات المحتملة لهذه التقنيات في المناطق القاحلة.

وخلص البحث إلى أنه من منظور التكنولوجيا، فإن التقاط وتخزين الكربون في وضع جيد وجاهز للانتشار على نطاق أوسع، والجهود التي تبذل في جميع أنحاء العالم لمواصلة تطوير التقنيات ذات الصلة ستمكن من إدخال خيارات جديدة عبر سلسلة القيمة بأكملها. كما حدد البحث عدداً من التوصيات على المستويين العالمي والإقليمي. ومن أهم التوصيات الحاجة إلى تعاون أكثر شمولاً بين مختلف أصحاب المصلحة لتسريع جهود التنمية وضمان انتشار التقاط وتخزين الكربون على نطاق أوسع بما يتماشى مع الأهداف المحددة لعام 2050 لانبعاثات غازات الدفيئة.

## المحتويات

ب	مقدمة	1
هـ	ملخص تنفيذي	2
ح	المحتويات	3
م	قائمة الأشكال	7
ص	قائمة الجداول	11
ش	قائمة المختصرات والمصطلحات	11
1	الفصل 1 – نظرة عامة على الطاقة العالمية والموارد المتاحة	14
2	1.1. الطاقة والتنمية	20
3	2.1. موارد الوقود الأحفوري	22
7	3.1. موارد الطاقة المتجددة	29
11	4.1. موارد الطاقة النووية	35
11	5.1. الدور المستقبلي المحتمل للوقود الأحفوري	43
14	الفصل 2 – تحديات الوقود الأحفوري: انبعاث الكربون والاحتباس الحراري	45
20	1.2. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة: جانب العرض	46
22	2.2. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة: جانب الطلب	48
29	الفصل 3 – سياسات وسيناريوهات التقاط وتخزين الكربون (CCS)	50
35	الفصل 4 – إزالة الكربون من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة	51
43	1.4. إزالة الكربون من صناعات النفط والغاز	52
45	2.4. إزالة الكربون من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة	54
46	1.2.4. إلتقاط الكربون في صناعة الحديد والصلب	55
48	2.2.4. إزالة الكربون في صناعة الأسمنت	
50	الفصل 5 – مقدمة لالتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه	
51	1.5. تعريفات	
52	2.5. نظرة عامة على حالة تقنيات CCUS	
54	3.5. دور وقيمة التقاط واستخدام وتخزين الكربون	
55	4.5. التقييم الإحصائي لمواضيع CCUS في النشر العلمي	

- الفصل 6 – التقاط الكربون من الصناعات ومن الغلاف الجوي.....59
- 1.6. مواد وتقنيات الامتصاص لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.....66
- 1.1.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتصاص.....66
- 2.1.6. مذبيات لعمليات امتصاص ثاني أكسيد الكربون.....69
- 3.1.6. عمليات امتصاص CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق الجاهزة للتطبيق ( Post Combustion )  
 (Capture (PCC)).....77
- 4.1.6. جهود التسويق والتطوير لتقنيات الامتصاص الخاصة بالتقاط وتخزين الكربون.....88
- 2.6. مواد وتقنيات الامتزاز لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.....97
- 1.2.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتزاز.....97
- 2.2.6. الممتزازات لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.....101
- 3.2.6. عمليات امتزاز CO<sub>2</sub> الناضجة.....111
- 4.2.6. التوقعات المستقبلية لتقنيات الامتزاز.....119
- 3.6. مواد وتقنيات الأغشية لالتقاط CO<sub>2</sub>.....120
- 1.3.6. تصنيف الأغشية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.....122
- 2.3.6. تطبيقات الأغشية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.....124
- 3.3.6. تقنيات أغشية التقاط CO<sub>2</sub> الناضجة.....128
- 4.3.6. مستقبل التقاط CO<sub>2</sub> الغشائي.....132
- 4.6. التقاط CO<sub>2</sub> بالتبريد (Cryogenic).....136
- 1.4.6. نظرة عامة على تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> بالتبريد.....136
- 2.4.6. تقنيات التبريد لالتقاط الكربون.....139
- 3.4.6. عمليات التبريد التجارية لالتقاط CO<sub>2</sub> والتحديات والاحتياجات البحثية.....146
- 5.6. التحلق الكيميائي لالتقاط CO<sub>2</sub>.....147
- 1.5.6. نظرة عامة على التحلق الكيميائي مع ناقلات الأكسجين.....149
- 2.5.6. التحلق الكيميائي لإنتاج الطاقة الكهربائية.....156
- 3.5.6. اقتصاديات ومستقبل التحلق الكيميائي.....157
- 4.5.6. تكنولوجيا تحلق الكربونات.....157
- 6.6. عزل CO<sub>2</sub> بواسطة تقنية دورة علام (Allam).....160
- 7.6. التقاط الكربون الجوي المباشر (DACC).....162

- 164.....1.7.6 تقنيات DACC باستخدام مواد ماصة قاعدية قوية
- 165.....2.7.6 DACC باستخدام المواد المازة الصلبة
- 166.....3.7.6 تقييم جدوى DACC
- 167.....4.7.6 الانتشار التجاري لـ DACC
- 171.....5.7.6 تحديات تطوير DACC
- 173.....8.6 خلاصة الوضع الحالي لتكنولوجيا التقاط ثاني أكسيد الكربون
- 179.....الفصل 7 - استخدام ثاني أكسيد الكربون
- 180.....1.7 مقدمة حول استخدام ثاني أكسيد الكربون
- 183.....2.7 الاستخدام المباشر لـ CO<sub>2</sub> (الاستخدام المادي)
- 184.....1.2.7 استخدام CO<sub>2</sub> في تعزيز استخلاص الهيدروكربونات
- 193.....2.2.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج الوقود الحيوي من الطحالب الدقيقة
- 197.....3.2.7 استخدام CO<sub>2</sub> في تحلية مياه البحر
- 198.....4.2.7 الاستخدام المباشر لـ CO<sub>2</sub> في الصناعات الأخرى
- 199.....3.7 الاستخدام غير المباشر لـ CO<sub>2</sub> (الاستخدام الكيميائي)
- 202.....1.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج الميثانول
- 203.....2.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج الميثان
- 204.....3.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج ثنائي ميثيل الأثير (DME)
- 205.....4.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج كربونات ثنائي الميثيل (DMC)
- 206.....5.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج غاز التخليق
- 208.....6.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج اليوريا
- 208.....7.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج المواد البوليمرية
- 209.....8.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في التمدن أو إنتاج مواد معدنية (Minerals)
- 210.....4.7 تقييم استخدام ثاني أكسيد الكربون
- 211.....5.7 التحديات في استخدام CO<sub>2</sub> والآفاق المستقبلية
- 214.....الفصل 8 - عزل ثاني أكسيد الكربون
- 215.....1.8 نظرة عامة حول عزل الكربون
- 217.....2.8 التخزين في التكوينات الجيولوجية
- 219.....1.2.8 السعة التخزينية في التكوينات الجيولوجية

- 225.....2.2.8. تحديات تكنولوجيا تخزين التكوينات الجيولوجية.
- 226.....3.2.8. الانتشار التجاري لتخزين ثاني أكسيد الكربون.
- 3.8. تقنيات الانبعاثات السلبية: التخزين في المحيطات والتمعدن (الترسيب المعدني) والغطاء النباتي.....228.
- 228.....1.3.8. التخزين في البحار/المحيطات.
- 230.....2.3.8. تمعدن الكربون (المصيدة المعدنية) (Mineral trapping).
- 233.....3.3.8. إزالة الكربون الأرضي وعزله.
- 239.....4.8. التوقعات المستقبلية لتخزين ثاني أكسيد الكربون.
- 240.....الفصل 9 - نقل ثاني أكسيد الكربون.
- 241.....1.9. نظرة عامة حول نقل ثاني أكسيد الكربون.
- 241.....2.9. نقل CO<sub>2</sub> عبر خطوط الأنابيب.
- 242.....1.2.9. محتوى CO<sub>2</sub> من المركبات في التيار المعد للنقل.
- 243.....2.2.9. التجفيف والضغط.
- 244.....3.2.9. متطلبات التصميم لخطوط أنابيب النقل.
- 245.....3.9. نقل CO<sub>2</sub> عن طريق السفن.
- 246.....4.9. نقل CO<sub>2</sub> عن طريق الشاحنات والسكك الحديدية المزودة بصهاريج.
- 5.9. المحاور (Hubs) والتجمعات العنقودية (Clusters) المرتبطة بنقل ثاني أكسيد الكربون.....247.
- 249.....6.9. التوقعات المستقبلية لنقل ثاني أكسيد الكربون.
- 251.....الفصل 10 - اقتصاديات CCUS.
- 252.....1.10. أسواق التقاط ثاني أكسيد الكربون.
- 263.....2.10. اقتصاديات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه.
- 272.....3.10. مستجدات تطورات اقتصاديات CCUS.
- 281.....4.10. أسواق الكربون.
- 284.....الفصل 11 - الوقود من الكتلة الحيوية والنفايات.
- 285.....1.11. مقدمة حول الكتلة الحيوية واستخدام النفايات.
- 287.....2.11. الوقود والمواد الكيميائية من الكتلة الحيوية.
- 292.....1.2.11. الطحالب كمادة خام للوقود الحيوي.

292	..... إنتاج الكتلة الحيوية للطحالب وطرق معالجتها وتحويلها إلى منتجات نهائية
294	..... 3.11. تقنيات إعادة تدوير النفايات البلاستيكية
296	..... الفصل 12 - الاستنتاجات والتوصيات
304	..... المراجع
304	..... المراجع العربية
304	..... المراجع الإنجليزية

## قائمة الأشكال

- الشكل 1.01. احتياطات النفط العالمية ..... 4
- الشكل 2.1. التوزيع العالمي لرواسب الفحم الحجري الرئيسية ..... 4
- الشكل 3.1. احتياطات الغاز العالمية 2020 ..... 5
- الشكل 4.1. خريطة العالم لموارد الطاقة الكهروضوئية ..... 7
- الشكل 5.1. خريطة موارد الإشعاع الأفقي للطاقة الحرارية الشمسية ..... 8
- الشكل 6.1. خريطة موارد الرياح العالمية ..... 8
- الشكل 7.1. الحصة التقديرية لمصادر الطاقة المتجددة من إجمالي استهلاك الطاقة ..... 9
- الشكل 1.2. مؤشر الاحتباس الحراري ومصادره الرئيسية ..... 16
- الشكل 2.2. مساهمة الغازات الدفيئة المختلفة في ظاهرة الاحتباس الحراري ..... 16
- الشكل 3.2. استهلاك الطاقة الأولية حسب الوقود للعام 2019 ..... 19
- الشكل 4.2. اتجاهات الاستهلاك العالمي للطاقة 1995-2020 ..... 19
- الشكل 5.2. صافي انبعاثات الغازات الدفيئة بشرية المنشأ على مستوى العالم 1990-2019 ..... 21
- الشكل 6.2. الاتجاه البعيد المدى لمصادر انبعاثات CO<sub>2</sub> ذات المنشأ البشري وعلاقتها بإمدادات الطاقة الأولية ..... 21
- الشكل 7.2. الاتجاهات التاريخية لانبعاثات الغازات الدفيئة من القطاعات المختلفة ..... 24
- الشكل 8.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة ضمن أنظمة الطاقة العالمية ..... 24
- الشكل 9.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع الصناعة العالمي ..... 25
- الشكل 10.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع المباني العالمي ..... 25
- الشكل 11.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع النقل العالمي ..... 25
- الشكل 12.2. انبعاثات الغازات الدفيئة حسب القطاع في عام 2016 ..... 26
- الشكل 1.3. التوزيع النسبي لسياسات واستراتيجيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المعمول بها بين مختلف الدول في العالم ..... 31
- الشكل 2.3. التوزيع النسبي لسياسات واستراتيجيات الهيدروجين المعمول بها بين مختلف الدول في العالم ..... 31

- الشكل 3.3. توزيع السياسات المتعلقة بالتقاط وتخزين الكربون والهيدروجين  
بين المناطق المختلفة من العالم..... 32
- الشكل 4.3. الاتجاهات التاريخية للسياسات الصادرة في جميع أنحاء العالم بشأن  
التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والهيدروجين ..... 33
- الشكل 2.4. خطوات تقدير والإبلاغ عن الانبعاثات المحتملة من احتياطات الوقود الأحفوري ... 41
- الشكل 3.4. انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمصنع صلب نموذجي ..... 47
- الشكل 4.4. الانبعاثات المباشرة لـ CO<sub>2</sub> من صناعة الأسمنت CEM I ..... 49
- الشكل 5.4. عملية فرن الأكسي - وقود (Oxy-fuel) منخفض الانبعاثات لإنتاج الأسمنت ..... 49
- الشكل 1.5. الاتجاهات التاريخية للمنشورات العلمية المفتوحة حول التقاط الكربون  
واستخدامه وتخزينه ..... 56
- الشكل 2.5. النسب المئوية لمساهمات مختلف الدول والمناطق في النشر العلمي ..... 57
- الشكل 1.6. الأنظمة المتاحة لاحتجاز غاز CO<sub>2</sub> ..... 62
- الشكل 2.6. نقاط القوة والضعف في تقنيات فصل CO<sub>2</sub> ..... 63
- الشكل 3.6. نظرة عامة على تقنيات وعمليات احتجاز الكربون المحتملة ..... 65
- الشكل 4.6. رسم تخطيطي لعملية احتجاز CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق باستخدام الأمينات ..... 67
- الشكل 5.6. مخطط انسيابي نموذجي لعملية Econamine FG Plus لاحتجاز CO<sub>2</sub> ..... 80
- الشكل 6.6. مخطط تدفق عملية KM CDR™ ..... 82
- الشكل 7.6. مخطط تدفق عملية Linde-BASF احتجاز ما بعد الاحتراق ..... 84
- الشكل 8.6. مخطط تدفق عملية CDRMax ..... 85
- الشكل 9.6. إزالة CO<sub>2</sub> السائل من الهواء من الغسل الأميني لغاز المداخن ..... 86
- الشكل 10.6. مخطط تدفق عملية DECAB ..... 87
- الشكل 11.6. مخطط التدفق النموذجي لعملية التقاط CO<sub>2</sub> Cansolv ..... 88
- الشكل 12.6. مخطط تدفق عملية ICT المتكاملة لالتقاط CO<sub>2</sub> ..... 96
- الشكل 13.6. مسارات إنتاج الهيدروجين مع التركيز على طرق إنتاج الهيدروجين الأزرق ..... 96
- الشكل 14.6. الخصائص الرئيسية لآليات الامتزاز الفيزيائي والامتصاص الكيميائي  
والكربنة السائبة ..... 98
- الشكل 15.6. معايير المواد المازة المثالية لالتقاط CO<sub>2</sub> ..... 102
- الشكل 16.6. فئات ومجموعات المميزات لالتقاط CO<sub>2</sub> ..... 102

- الشكل 17.6. رسم تخطيطي لعملية امتصاص CO<sub>2</sub> ..... 112
- الشكل 18.6. تصميم مفهوم عملية SARC ..... 115
- الشكل 19.6. مخطط تشغيل دورة تأرجح الضغط (PSA) ..... 116
- الشكل 20.6. آليات فصل الغاز بواسطة الأغشية ..... 122
- الشكل 21.6. تصميمات شائعة للأغشية ..... 125
- الشكل 22.6. تكوينات مختلفة لدوائر غشائية ذات مرحلتين - مُثري تسلسلي مع  
تكوين إعادة التدوير ..... 129
- الشكل 23.6. تصميم عملية شركة MTR لالتقاط CO<sub>2</sub> من غاز مداخن الغلايات  
التي تعمل بالفحم الحجري ..... 131
- الشكل 24.6. رسم تخطيطي لفصل CO<sub>2</sub> عن طريق عملية احتجاز الكربون المبرد ..... 137
- الشكل 25.6. مخطط عملية التقطير في منطقة التجميد الخاضعة للتحكم ..... 141
- الشكل 26.6. مخطط تدفق عملية CCC-CFG ..... 141
- الشكل 27.6. مخطط تدفق عملية CCC-ECL ..... 143
- الشكل 28.6. مخطط تدفق تقنية CryoCell ..... 143
- الشكل 29.6. مخطط التدفق لعملية التقاط CO<sub>2</sub> المبرد باستخدام Stirling Cooler  
مع استرداد الحرارة ..... 144
- الشكل 30.6. مخطط التدفق لنظام احتجاز CO<sub>2</sub> المضاد للتسامي ..... 145
- الشكل 31.6. مخطط تدفق عملية التقاط CO<sub>2</sub> المبرد بواسطة فرشاة معبأة ..... 146
- الشكل 32.6. تصنيف أنظمة التحلق الكيميائي ..... 149
- الشكل 33.6. تمثيل تخطيطي لعملية الاحتراق بواسطة الحلقات الكيميائية ..... 150
- الشكل 34.6. نظام غاز التخليق (SynGas) CLC ..... 152
- الشكل 35.6. نظام CLC للتغويز في الموقع ..... 153
- الشكل 36.6. الحلقات الكيميائية مع نظام فك الارتباط بالأكسجين ..... 154
- الشكل 37.6. نظام إعادة تشكيل الحلقات الكيميائية (CLR) ..... 155
- الشكل 38.6. مخطط عملية دورة تحلق الكالسيوم (CaL) ..... 158
- الشكل 39.6. احتجاز CO<sub>2</sub> من غاز المداخن عن طريق عملية تحلق الكالسيوم (CaL) ..... 159
- الشكل 40.6. مخطط تدفق العملية لمحطة توليد الكهرباء بدورة علام المدمجة مع  
وحدة فصل الهواء ..... 161

- الشكل 41.6. التقاط غاز CO<sub>2</sub> من الهواء باستخدام وحدات الاحتجاز المباشر من الهواء (DAC) باستخدام مواد سائلة أوصلبة، وتخزينه، وإعادة استخدامه..... 164
- الشكل 42.6. احتجاز CO<sub>2</sub> المباشر في الهواء باستخدام محاليل أو مواد شديدة القلوية..... 165
- الشكل 43.6. التقاط CO<sub>2</sub> المباشر من الهواء باستخدام الممتزات الصلبة..... 166
- الشكل 44.6. تقنيات DAC..... 172
- الشكل 45.6. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لتقنيات احتجاز CO<sub>2</sub>..... 174
- الشكل 46.6. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لتقنيات فصل CO<sub>2</sub> حسب القطاع الاقتصادي..... 175
- الشكل 1.7. مسارات استغلال ثاني أكسيد الكربون..... 181
- الشكل 2.7. فرص احتجاز واستغلال الكربون ضمن أنظمة الطاقة/المياه/الغذاء..... 184
- الشكل 3.7. رسم تخطيطي توضيحي للاستخلاص المعزز للنفط المعتمد على CO<sub>2</sub>..... 185
- الشكل 4.7. الطاقة العالمية على الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> مقارنةً بأهداف التخفيف من CO<sub>2</sub>..... 191
- الشكل 5.7. تحويل الكتلة الحيوية من الطحالب إلى وقود حيوي..... 195
- الشكل 6.7. تحلية مياه البحر باستخدام CO<sub>2</sub> المحتجز..... 198
- الشكل 7.7. مخطط الاستخدام غير المباشر لـ CO<sub>2</sub>..... 201
- الشكل 8.7. طرق تحويل الميثانول..... 203
- الشكل 9.7. مخطط تخليق أثير ثنائي الميثيل (DME)..... 205
- الشكل 10.7. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لأهم طرق استغلال CO<sub>2</sub> باستثناء الاستخلاص المعزز للنفط والغاز..... 213
- الشكل 1.8. دورة الكربون في الطبيعة..... 215
- الشكل 2.8. خيارات تخزين CO<sub>2</sub> ومتطلبات تطوير مشروع..... 216
- الشكل 3.8. آليات احتجاز CO<sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية..... 218
- الشكل 4.8. خريطة للمسح الجيولوجي لتخزين CO<sub>2</sub> يغطي بلدان وأحواض وتكوينات مختارة.. 221
- الشكل 5.8. مطابقة مصادر ومصارف CO<sub>2</sub>..... 223
- الشكل 6.8. مخطط للأنشطة المرتبطة بتقييم وتطوير التخزين الجيولوجي لـ CO<sub>2</sub>..... 224
- الشكل 7.8. تمثيل تخطيطي لعمليات تخزين CO<sub>2</sub> في المحيطات..... 229
- الشكل 8.8. طرق تخزين CO<sub>2</sub> في المحيطات..... 230

- الشكل 9.8. العمليات الأرضية لتدوير الكربون ..... 234
- الشكل 1.9. تقييم مزايا وعيوب تقنيات نقل CO<sub>2</sub> ..... 242
- الشكل 2.9. خريطة خطوط أنابيب CO<sub>2</sub> في الولايات المتحدة ..... 245
- الشكل 3.9. تجميع وتوزيع مجموعات ومحاور CO<sub>2</sub> ..... 248
- الشكل 4.9. مراكز التجميع الناشئة لاحتجاز واستغلال وتخزين CO<sub>2</sub> بدعم من شركات OGCI ..... 249
- الشكل 10.1. خطوط أنابيب المرافق التجارية منذ عام 2010 حسب قدرة الاحتجاز ..... 253
- الشكل 2.10. تكاليف احتجاز CO<sub>2</sub> وتخزينه التي تم تجنبها بالدولار الأمريكي لعام 2010. .... 264
- الشكل 3.10. تكاليف تجنب الانبعاثات لبعض تقنيات احتجاز CO<sub>2</sub> ..... 265
- الشكل 4.10. تكلفة الطاقة في الظروف القياسية ( LCOE ) لكل مصنع مقابل انبعاثات الغازات الدفيئة المحسوبة لدورة الحياة باستخدام متوسط سعر الوقود لعام 2016 ..... 271
- الشكل 5.10. متوسط تكاليف التقنيات في الصناعات المختلفة ..... 273
- الشكل 6.10. التكلفة المتساوية لاحتجاز CO<sub>2</sub> حسب القطاع ..... 274
- الشكل 1.11. أهداف التنمية المستدامة المرجح تأثرها بالوقود الحيوي والنفائيات ..... 286
- الشكل 2.11. خريطة العالم المتعلقة بالجفاف ..... 286
- الشكل 3.11. نظرة عامة على المواد الأولية وعمليات الإنتاج لمختلف أنواع الوقود الحيوي ..... 291
- الشكل 4.11. مراحل إنتاج المنتجات النهائية للطحالب ..... 293
- الشكل 1.12. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لبعض تقنيات احتجاز واستغلال وتخزين الكربون (CCUS) ..... 298
- الشكل 2.12. الوضع الحالي لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه من منظور الجاهزية التكنولوجية .. 299
- الشكل 3.12. مخطط GANT المبسط لتنفيذ مشروع CCS المعقد ..... 302

## قائمة الجداول

- الجدول 1.1. الاحتياجات المؤكدة والإنتاج من النفط الخام والغاز الطبيعي في المنطقة العربية.. 6
- الجدول 2.1. محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في المنطقة العربية حتى يناير 2023 ..... 10
- الجدول 1.2. انبعاثات غازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة حسب طلب القطاعات والقطاعات الفرعية لعام 2019..... 23
- الجدول 2.2. تعريف بمصادر CO<sub>2</sub> الثابتة العالمية الكبيرة..... 27
- الجدول 1.4. مكونات غازات الانبعاث لمصادر انبعاثات مختارة..... 32
- الجدول 2.4. عوامل الانبعاثات الافتراضية من المستوى 1 لفريق IPCC على أساس الكتلة والطاقة، وحيثما أمكن، على أساس الحجم..... 41
- الجدول 1.6. قائمة عمليات الامتصاص لتنقية الغاز الطبيعي..... 67
- الجدول 2.6. ملخص مواد الامتصاص ثنائية الطور المطورة لالتقاط CO<sub>2</sub>..... 73
- الجدول 3.6. عمليات امتصاص CO<sub>2</sub>..... 78
- الجدول 4.6. وحدات التقاط CO<sub>2</sub> الرئيسية التي أنشأت قبل عام 1999 باستخدام عملية الإيكونامين بمعدلات التقاط تتجاوز 1000 طن سنوياً..... 89
- الجدول 5.6. ملخص تقييم تقنيات الالتقاط بعد الاحتراق بناءً على الامتصاص الكيميائي المدمج في محطات الطاقة الكهربائية..... 91
- الجدول 6.6. مشاريع الالتقاط بعد الاحتراق التجارية والمستندة على عمليات الامتصاص الكيميائي..... 93
- الجدول 7.6. مشاريع تطوير عمليات التقاط CO<sub>2</sub> المعتمدة على مواد مازة من قبل مختبرات NETL..... 99
- الجدول 8.6. مقارنة أنواع المواد المازة لالتقاط CO<sub>2</sub>..... 110
- الجدول 9.6. عمليات امتزاز الـ CO<sub>2</sub>..... 113
- الجدول 10.6. ملخص الأغشية وتطبيقاتها في التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه..... 124
- الجدول 11.6. عمليات الفصل بالأغشية والمرخصين لها..... 130
- الجدول 12.6. ملخص عمليات تكنولوجيا الأغشية المطبقة في التقاط CO<sub>2</sub>..... 134
- الجدول 13.6. ملخص لمزايا وتحديات تقنيات التبريد..... 148
- الجدول 14.6. الخصائص الرئيسية لحاملات الأكسجين..... 152
- الجدول 15.6. محطات DACQ قيد التشغيل أو قيد الإنشاء أو في مراحل التطوير المتقدمة..... 168

- الجدول 16.6. مزايا وعيوب تقنيات فصل CO<sub>2</sub> ..... 176
- الجدول 1.7. الطلب العالمي المقدر في السوق لعام 2026 على CO<sub>2</sub> لإنتاج  
المنتجات الكيميائية المختلفة..... 182
- الجدول 2.7. المشاريع الرئيسية الحالية المتعلقة بـ CO<sub>2</sub> والتقاط وتخزين الكربون  
بهدف الاستخراج المعزز للنفط..... 190
- الجدول 3.7. إمكانية تخزين CO<sub>2</sub> المقدر من خلال الاستخلاص المعزز للنفط  
باستخدام CO<sub>2</sub> في أحواض النفط العالمية..... 192
- الجدول 4.7. نطاق الظروف المتوجب الالتزام بها لزراعة الطحالب..... 195
- الجدول 5.7. مقارنة بين مكونات الانبعاثات الغازية من الديزل البترولي ووقود  
الديزل الحيوي من الطحالب الدقيقة..... 197
- الجدول 6.7. مقارنة خصائص الوقود المعاد تدويره من CO<sub>2</sub> مع خصائص  
الهيدروجين والوقود التقليدي ..... 201
- الجدول 7.7. سوق بعض المواد الكيميائية المشتقة من CO<sub>2</sub> ومستوى تطوير  
التقنيات المتعلقة بإنتاجها..... 210
- الجدول 1.8. ملخص موارد تخزين CO<sub>2</sub> في مارس 2022 يغطي 30 دولة..... 221
- الجدول 2.8. قائمة مشاريع التخزين المخصصة لـ CO<sub>2</sub>..... 227
- الجدول 3.8. مقارنة المعادن المختلفة لالتقاط CO<sub>2</sub>..... 232
- الجدول 4.8. مزايا وعيوب تقنية كربنة المعادن في الموقع..... 234
- الجدول 5.8. الإجراءات الزراعية التقليدية لزيادة تخزين الكربون العضوي  
وتعزيز إزالة CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي..... 236
- الجدول 6.8. تأثير اعتماد ممارسات الحفظ للأراضي الزراعية السنوية على  
معدلات عزل الكربون في التربة..... 237
- الجدول 1.9. التركيزات الموصى بها لمكونات تيار غاز الـ CO<sub>2</sub> لأغراض  
النقل بواسطة خطوط الأنابيب..... 243
- الجدول 1.10. مرافق التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التجارية حسب العدد وإجمالي سعة التقاط CO<sub>2</sub> ... 253
- الجدول 2.10. قائمة مرافق التقاط CO<sub>2</sub> العاملة في عام 2022..... 255
- الجدول 3.10. قائمة مرافق التقاط CO<sub>2</sub> قيد الإنشاء في عام 2022..... 260
- الجدول 4.10. خصائص منشآت جديدة الأولى من نوعها لمحطات الكهرباء الحرارية

- 267 ذات حمل أساسي ومزودة بتقنية التقاط الكربون .....
- الجدول 5.10. تكلفة الطاقة وتكلفة CO<sub>2</sub> الذي تم تجنبه من الدراسات التقنية والاقتصادية ..... 269
- الجدول 6.10. المقارنات التقنية والاقتصادية بين التقاط CO<sub>2</sub> المعتمد على الأمانات  
والفصل الغشائي..... 269
- الجدول 7.10. تقديرات مفصلة لتكلفة احتجاز CO<sub>2</sub> وتخزينه ..... 275
- الجدول 8.10. تكاليف الاستخدام مقارنة بتكاليف المنتج، ومراجعة النطاق..... 280
- الجدول 9.10. مقارنة أطر سياسات تعويض الانبعاثات بموجب بروتوكول كيوتو واتفاق باريس 283
- الجدول 1.11. عمليات وقود حيوي مختارة والشركات المطورة لها ومستويات  
جاهزية التكنولوجيا..... 290

## قائمة المختصرات والمصطلحات

وحدة انتمان الكربون الأسترالية	Australian Carbon Credit Unit	ACCU
تحويل الأراضي الزراعية السنوية إلى نباتات معمرة	Annual Cropland to Perennial Vegetation	ACPV
شركة بترول أبوظبي الوطنية	Abu Dhabi National Oil Company	ADNOC
الزراعة والتشجير والاستخدامات الأخرى للأراضي	Agriculture, Forestry and Other Land Use	AFOLU
إزالة الغاز الحمضي	Acid Gas Removal	AGR
وحدة فصل الهواء	Air Separation Unit	ASU
التشجير / إعادة التشجير	Afforestation/Reforestation	AR
مستوى منضدي لوحدية فصل الهواء	Bench scale Air Separation Unit	ASU
مجموعة بوسطن الاستشارية	Boston Consulting Group	BCG
الطاقة الحيوية مع التقاط الكربون وتخزينه	Bioenergy With Carbon Capture and Storage	BECCS
إعادة التشكيل المزدوج	Bireforming	BiR
شركة النفط البريطانية	British Petroleum	BP
الكتلة الحيوية للسوائل	Biomass To Liquids	BTL
الأنهيدراز الكربوني	Carbonic Anhydrase (Enzyme)	CA
تحلق الكالسيوم	Calcium Looping	CaL
عملية الأمونيا المبردة	Chilled Ammonia Process	CAP
النفقات الرأسمالية	Capital Expenditure	CAPEX
العملية التقليدية للامتصاص بالأمين	Conventional Amine Absorption Process	CAAP
التقاط الكربون المبرد	Cryogenic Carbon Capture	CCC
اقتصاد الكربون الدائري	Circular Carbon Economy	CCE
الاحتراق الحلقي الكيميائي للفحم الحجري	Coal-based chemical looping combustion	CCLC
التقاط الكربون والكربنة المعدنية	Carbon Capture and Mineral Carbonation	CCMC
الاحتراق التحلطي الكيميائي	Chemical Combustion Cycle	CCoC
التقاط الكربون وتخزينه	Carbon Capture and Storage	CCS
التقاط الكربون وتخزينه / الاستخلاص المعزز للنفط	Carbon Capture Storage Association	CCSA
التقاط الكربون وتخزينه بالاستخلاص المعزز للنفط	Carbon Capture and Storage with Enhanced Oil Recovery	CCSEOR
تقنيات الفحم الحجري النظيف	Clean Coal Technologies	CCT
التقاط الكربون واستخدامه	Carbon Capture and Utilization	CCU
التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه	Carbon Capture, Utilization, and Storage	CCUS

آلية التنمية النظيفة	Clean Development Mechanism	CDM
إزالة ثاني أكسيد الكربون	Carbon Dioxide Removal	CDR
الأسمنت نوع I	Cement Type I	CEM I
حزمة الطاقة النظيفة	Clean Energy Package	CEP
معهد أبحاث تكنولوجيا الطاقة النظيفة	Clean Energy Technologies Research Institute	CETRI
عقد CFD للفرق	Contract For Difference	CfD
تعلق كيميائي مع فك اقتران الأكسجين	Chemical Looping with Oxygen Uncoupling	CLOU
الاحتراق الحلقي الكيميائي	Chemical Looping Combustion	CLC
إعادة التشكيل باستخدام التعلق الكيميائي	Chemical Looping Reforming	CLR
تمعدن الكربون	Carbon Mineralization	CM
الفصل الغشائي لعمليات الفحم الحجري	Coal-based membrane separations	CMEM
مفاعل الغشاء الحفاز	Catalytic Membrane Reactor	CMR
مؤسسة بحثية أسترالية في مجال CCUS	A CCUS Research Organization, Australia	CO2CRC
مؤتمر الأطراف	Conference of the Parties	COP
احتراق أكسي-وقود للفحم الحجري	Coal-based oxyfuel combustion	COXY
إمكانية استخدام CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> Utilization Potential	CUP
مجلس أبحاث استخدام الكربون	Carbon Utilization Research Council	CURC
التقاط الهواء المباشر	Direct Air Capture	DAC
التقاط الهواء المباشر مع تخزين الكربون	Direct Air Capture with Carbon Storage	DACCS
التقاط الهواء المباشر وتخزينه	Direct Air Capture and Storage	DACS
مادة مزدوجة الوظيفة	Dual Function Material	DFM
خلايا وقود الميثانول المباشرة	Direct Methanol Fuel Cell	DMFC
مختصر لأسم عملية امتصاص	Abbreviation for an Absorption Process	DMX-1
شركة استشارية نرويجية	A consulting company in multiple fields; originally "Det Norske Veritas"	DNV
وزارة الطاقة الأمريكية	US Department of Energy	DOE
المفوضية الأوروبية	European Commission	EC
الميثان المعزز لطبقة الفحم الحجري	Enhanced Coal Bed Methane	ECBM
معهد التغير المناخي (بريطانيا)	Environmental Change Institute (UK)	ECI
عوامل الانبعاث	Emission Factors	EFs
الاستخلاص المعزز للغاز	Enhanced Gas Recovery	EGR

نظام الطاقة الحرارية الجيولوجية المعزز	Enhanced Geothermal System	EGS
البيئة والصحة والسلامة	Environment Health and Safety	EHS
إدارة معلومات الطاقة الأمريكية	Energy Information Administration (USA)	EIA
الاستخلاص المعزز للنفط	Enhanced Oil Recovery	EOR
وفورات الحجم	Economies of Scale	EOS
وكالة حماية البيئة الأمريكية	US Environmental Protection Agency	EPA
الأعمال الهندسية، استحواذ المعدات، والإنشاءات	Engineer, Procure, Construct	EPC
معهد أبحاث الطاقة الكهربائية الأمريكي	Electric Power Research Institute, USA	EPRI
معايير أداء الانبعاثات	Emission Performance Standards	EPSs
امتصاص التارجح الكهربائي	Electro Swing Adsorption	ESA
الحوكمة البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات	Environmental, Social and Corporate Governance	ESG
شركة الإمارات للفلوذا	Emirates Steel Industries	ESI
نظام تخزين الطاقة	Energy Storage System	ESS
نظام تداول الانبعاثات	Emissions Trading System	ETS
الاتحاد الأوروبي	European Union	EU
التصميم الهندسي الأولي	Front-End Engineering Design	FEED
الوقود الأحفوري والصناعة	Fossil Fuel and Industry	FFI
غاز الاحتراق أو غاز المداخن	Flue-Gas	FG
معهد CCS العالمي	Global CCS Institute	GCCSI
الناتج المحلي الإجمالي	Gross Domestic Product	GDP
صندوق المناخ الأخضر	The Green Climate Fund	GFC
غازات دفيئة	Greenhouse Gas	GHG
المتوسط العالمي لدرجة حرارة السطح	Global Mean Surface Temperature	GMST
هيدروكربونات مفلورة	Hydrofluorocarbon	HFC
الصحة والسلامة والبيئة	Health, Safety, and Environment	HSE
زيت نباتي معالج بالهيدروجين	Hydrotreated Vegetable Oil	HVO
وكالة الطاقة النووية الدولية	International Atomic Energy Agency	IAEA
نماذج التقييم المتكاملة	Integrated Assessment Models	IAM
الالتقاط المتكامل لـ CO <sub>2</sub> وتحويله	Integrated CO <sub>2</sub> Capture and Conversion	ICCC
وكالة الطاقة الدولية	International Energy Agency	IEA

برنامج التعاون التكنولوجي لوكالة الطاقة الدولية للبحث والتطوير في مجال الغازات الدفيئة	IEA Technology Collaboration Programme on Greenhouse Gas R&D	IEAGHG
سيناريو التنمية المستدامة لوكالة الطاقة الدولية	IEA's Sustainable Development Scenario	IEA-SDS
التغويز في الموقع	In-situ Gasification	iG
الدورة المركبة للتغويز المتكاملة	Integrated Gasification Combined Cycle	IGCC
التغويز المتكاملة بخلية وقود (أكسيد صلب)	Integrated gasification (solid oxide) fuel cell	IGFC
مجموعة المستثمرين المؤسساتية للتغير المناخي	Institutional Investors Group on Climate Change	IIGCC
المنظمة البحرية الدولية	International Maritime Organisation	IMO
الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ	Intergovernmental Panel on Climate Change	IPCC
وكالة الطاقة المتجددة الدولية	International Renewable Energy Agency	IRENA
مصلحة الضرائب وخدمة الإيرادات الداخلية الأمريكية	Treasury and Internal Revenue Service	IRS
مركز الفحص الدولي لالتقاط CO <sub>2</sub> ، كندا، أعيد تسميته إلى CETRI	International Test Center for CO <sub>2</sub> Capture (Canada), renamed CETRI	ITC
معهد أبحاث التكنولوجيا الصناعية، تايوان	Industrial Technology Research Institute (Taiwan)	ITRI
آلية الاعتماد المشتركة	Joint Crediting Mechanism	JCM
الشركة اليابانية الوطنية للنفط والغاز والمعادن	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation	JOGMEC
عملية استعادة CO <sub>2</sub> لشركة ميتسوبيشي كانساي	Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery Process	KM-CDR
مستوى مخبري	Lab scale	
تقييم دورة حياة	Life Cycle Assessment	LCA
التكلفة المستوية للالتقاط	Levelized Cost of Capture	LCC
معياري الوقود منخفض الكربون	Low Carbon Fuel Standard	LCFS
التكلفة المستوية للطاقة	Levelized Cost of Energy	LCOE
التقاط الهواء المباشر بالمواد السائلة	Liquid DAC	L-DAC
هيدروكسيدات مزدوجة الطبقات	Layered Double Hydroxides	LDH
إستراتيجيات تطوير غازات الدفيئة المنخفضة طويلة المدى	Long Term Low Greenhouse Gas Development Strategies	LEDS
مختصر لعملية إنتاج أسمنت مستحدثة	Abbreviation of a cement production process/Low	Leilac

	emission intensity lime and cement	
التقاط الهواء المباشر بالمواد السائلة	Liquid DAC	L-DAC
منخفض قيمة التسخين	Low Heating Value	LHV
الغاز الطبيعي المسال	Liquefied Natural Gas	LNG
استخدام الأراضي وتغيير استخدام الأراضي والغابات	Land Use, Land Use Change and Forestry	LULUCF
خلايا وقود الكربونات المنصهرة	Molten Carbonate Fuel Cells	MCFCs
التقاط الهواء المباشر بالأغشية	Membrane-Based DAC	m-DAC
مراقبة وقياس وتحقق	Monitoring, Measurement and Verification	MMV
الأطر المعدنية العضوية	Metal-Organic Frameworks	MOF
الاحتراق الحلقي الكيميائي القائم على الغاز الطبيعي	Natural gas-based chemical looping combustion	NCLC
المساهمة المحددة وطنياً	Nationally Determined Contribution	NDC
تكنولوجيا الانبعاثات السلبية	Negative Emissions Technology	NET
مختبر تكنولوجيا الطاقة الوطني الأمريكي	National Energy Technology Laboratory (USA)	NETL
الدورة المركبة للغاز الطبيعي	Natural Gas Combined Cycle	NGCC
احتراق أكسي-وقود للغاز الطبيعي	Natural gas-based oxyfuel combustion	NOXY
مجلس البترول الوطني الأمريكي	National Petroleum Council (USA)	NPC
سيناريو صافي الانبعاثات الصفرية لعام 2050	Net Zero Emissions by 2050 Scenario	Net Zero Scenario
الغاز الطبيعي	Natural Gas	NG
الدورة المركبة للغاز الطبيعي	Natural Gas Combined Cycle	NGCC
صافي القيمة الحالية	Net present value	NPV
المختبر الوطني للطاقة المتجددة الأمريكي	National Renewable Energy Laboratory (USA)	NREL
صافي انبعاثات صفري	Net zero emissions	NZE
الكربون العضوي	Organic Carbon	OC
ناقلات الأكسجين	Oxygen Carriers	OxCO <sub>2</sub>
منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية	Organization for Economic Cooperation and Development	OECD
مبادرة النفط والغاز للمناخ	Oil and Gas Climate Initiative	OGCI
النفط الأصلي الموجود	Original Oil in Place	OOIP
نفقات تشغيلية	Operating Expenses	OPEX
سعة نقل الأكسجين	Oxygen Transport Capacity	OTC
أكسي-وقود	Fuel combustion with oxygen	Oxy-Fuel

كربون ما بعد الاحتراق	Post Combustion Carbon	PCC
كربونات البولي سيكلوهكسين	Polycyclohexane Carbonate	PCHC
كربون متعدد الفلورين	Perfluorocarbon	PFC
تكثيف العملية	Process Intensification	PI
الأكسدة الجزئية للميثان	Partial Oxidation of Methane	POM
كربونات البولي بروبيلين	Polypropylene Carbonate	PPC
امتزاز تأرجح الضغط	Pressure Swing Adsorption	PSA
تلوث متحكم به	Pollution Under Control	PUC
الطاقة الكهروضوئية	Photovoltaic	PV
تشريع أمريكي يتعلق بدعم مشاريع التقاط وتخزين CO <sub>2</sub>	US legislation addressing carbon oxide sequestration	45Q
البحث والتطوير	Research and Development	R&D
البحث والتطوير والنشر	Research, Development and Deployment	RD&D
شبكة الطاقة المتجددة الدولية	Global Renewable Energy Network	REN21
مصادر الطاقة المتجددة	Renewable Energy Sources	RES
تحليل الخيارات الحقيقية	Real Options Analysis	ROT
سائل أيوني بدرجة حرارة الغرفة	Room Temperature Ionic Liquid	RTIL
الفحم الحجري المسحوق فوق الحرج	Supercritical pulverized coal	SCPC
التقاط الهواء المباشر بالمواد الصلبة	Solid DAC	S-DAC
آلية التنمية المستدامة	Sustainable Development Mechanism	SDM
سيناريو التنمية المستدامة	Sustainable Development Scenario	SDS
تحول الماء والغاز المعزز بالمواد الماصة	Sorbent-Enhanced Water-Gas Shift	SEWGS
إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان	Steam Methane Reforming	SMR
القرض المرتبط بالاستدامة	Sustainability Linked Loan	SLL
إصلاح غاز الميثان بالبخار	Steam Methane Reforming	SMR
الشركات المملوكة للدولة	State Owned Enterprise	SOE
خلايا وقود الأكسيد الصلب	Solid Oxide Fuel Cell	SOFC
المواد العضوية في التربة	Soil Organic Matter	SOM
جمعية مهندسي البترول	Society of Petroleum Engineers	SPE
نظام إدارة موارد التخزين	Storage Resources Management System	SRMS
مركز التكنولوجيا مونغستاد (النرويج) - مركز بحثي	Technology Center Mongstad (Norway)	TCM
إجمالي إمدادات الطاقة	Total Energy Supply	TES
فرن الصهر لإعادة تدوير الغاز العلوي (في صناعة الصلب)	Top-Gas Recycling Blast Furnace	TGR-BF

المنظمة الهولندية للأبحاث التطبيقية	Dutch Organization for Applied Research (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)	TNO
امتزاز تأرجح الضغط ودرجة الحرارة	Temperature Pressure Swing Adsorption	TPSA
مستوى الجاهزية التكنولوجية	Technology Readiness Level	TRL
إعادة التشكيل الثلاثي للميثان	Trireforming of methane	TRM
امتزاز تأرجح درجة الحرارة	Temperature Swing Adsorption	TSA
اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ	United Nations Framework Convention on Climate Change	UNFCCC
الإمارات العربية المتحدة	United Arab Emirates	UAE
أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة	UN's Sustainable Development Goals	UN SDGs
سوق الكربون الطوعي	Voluntary Carbon Market	VCM
الامتزاز بالتركيز الفراغي	Vacuum Concentration Swing Adsorption	VCSA
تخفيض انبعاثات مؤكد أو طوعي	Verified or Voluntary Emission Reduction	VER
امتزاز بتأرجح الضغط - الفراغ	Vacuum Pressure Swing Adsorption	VPSA
امتزاز بالتأرجح الفراغي	Vacuum Swing Adsorption	VSA
حقن الماء الغاز المتناوب	Water Alternating Gas	WAG
مجلس الأعمال العالمي للتنمية المستدامة	World Business Council for Sustainable Development	WBCSD
حقن ستارة الماء	Water Curtain Injection	WCI
المنتدى الاقتصادي العالمي	World Economic Forum	WEF
إزاحة الماء-الغاز	Water-Gas Shift	WGS
معهد الموارد العالمي	World Resources Institute	WRI
تحويل النفايات إلى طاقة	Waste to Energy	WTE
منصة الانبعاثات الصفرية	Zero Emissions Platform	ZEP
المحتوى الحراري القياسي للتفاعل	Standard Enthalpy of Reaction	$\Delta H$
مادة ماصة	Absorbent	
امتصاص	Absorption	
مادة الامتزاز	Adsorbent	
امتزاز	Adsorption	
المج	Desorption	
تحميص	Calcine	
التقاط	Capture	
الكربنة	Carbonation	

مادة حفازة	Catalyst	
المزاوجة الكيميائية	Chemical Looping	
تجمعات عنقودية	Cluster	
إزالة الماء	Dehydration	
مستوى شبه تجاري	Demonstration Scale	
اللقيم	Feed	
الحرق في الموقع	Flaring	
ومضي	Flash	
فصل ومضي	Flashing	
الاصطياد الهيدروديناميكي أو الهيكلية	Hydrodynamic/Structural Trapping	
مركز تجميع/محور	Hub	
مسامات وسطية الحجم	Mesopores	
الكربنة المعدنية	Mineral carbonation	
التمعدن	Mineralization	
الاصطياد بالتمعدن/المصيدة المعدنية	Mineral Trapping	
المناخل الجزيئية	Molecular Sieves	
مورفولوجي	Morphology	
بارامترات	Parameters	
مستوى تجريبي نمطي	Pilot scale	
إعادة تنشيط	Regeneration	
الاصطياد المتخلف	Residual Trapping	
رفع سعة التطبيق أو العملية	Scaling up	
تلييد	Sintering	
سول-جل	Sol-gel	
الذوبان أو الاصطياد بالتمعدن	Solubility or Dissolution/ Mineral Trapping	
ثبات	Stability	
إعادة التشكيل بالبخار	Steam reforming	
برج التجريد	Stripper	
التجريد	Stripping	
غاز التخليق	Synthesis gas	
ثنائي الأيونات	Zwitterion	

## المواد الكيماوية

أكسيد الألومنيوم (III)	Aluminum oxide (III)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
البروبانول ثاني الميثيل ثاني الأمين	2-Amino-2methylpropanol	AMP
الكربون	Carbon	C
ولاستونيت	Wollastonite	CaSiO <sub>3</sub>
أول أكسيد الكربون	Carbon monooxide	CO
ثاني أكسيد الكربون	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>
	Diethanolamine	DEA
أمين ثاني إيثيل الإيثانول	N, N-Diethylethanol-amine	DEEA
مالونات ثاني إيثيل إيزوكسي الميثيلين	Diethylethoxymethylene-malonate	DEEM
أمين ثنائي -بروبانول	Di-2-propanolamine	DIPA
أمين ثنائي الميثيل الهيكسيل الحلقي	N, N-Dimethylcyclohexylamine	DMCA
أمين ثنائي البروبيل	Dipropylamine	DPA
أمين ثاني ثنائي البيوتيل	Disecbutylamine	DSBA
الإيثيلين ثنائي الأمين	Ethylene Diamine	EDA
أكسيد الإيثيلين	Ethylene Oxide	EO
هيدروجين	Hydrogen	H <sub>2</sub>
ماء	Water	H <sub>2</sub> O
كبريتيد الهيدروجين	Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S
كربونات البوتاسيوم	Potassium carbonate	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
أمين 3-ميثيل أمين البروبيل	3-(Methylamino)propyl-amine	MAPA
حمض الأسيتيك أحادي الكلورين	Monochloroacetic acid	MCA
أمين ميثيل ثنائي الإيثانول	N-methyl diethanolamine	MDEA
أمين أحادي الإيثانول	Monoethanolamine	MEA
فورستريت	Forsterite	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
السربنتينيت	Serpentine	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
التلك	Talc	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
أكاسيد النيتروجين	Nitrogen oxides	NO <sub>x</sub>
الأكسجين	Oxygen	O <sub>2</sub>
بولي هيدروكسي ألكانوات	Polyhydroxyalkanoates	PHA
أكاسيد الكبريت	Sulfur oxides	SO <sub>x</sub>
ثاني أكسيد التيتانيوم	Titanium dioxide	TiO <sub>2</sub>

## وحدات القياس

برميل	Barrel	bbl
إكساجول	Exajoule	EJ
جيجاجول	Gigajoule	GJ
جيجاتون	Gigatonne	Gt
جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون	Gigatonnes of Carbon Dioxide	GtCO <sub>2</sub>
جيجاوات	Gigawatt	GW
كيلو جرام	Kilogramme	Kg
كيلوجول	Kilojoule	kJ
كيلومتر مربع	Square Kilometre	km <sup>2</sup>
كيلوات كهرباء	Kilowatt Electric	kWe
مليون وحدة حرارية بريطانية	Million British Thermal Units	MBtu
ميجاباسكال	Megapascal	Mpa
ميجاتون	Megatonne	Mt
مليون طن متري	Million metric tonnes	Mt
مليون طن متري من ثاني أكسيد الكربون	Million Metric Tonnes of Carbon Dioxide	MtCO <sub>2</sub>
مليون طن متري سنوياً	Million Metric Tonnes Per Annum	Mtpa
ميجاوات كهرباء	Megawatt Electric	Mwe
ميجاوات ساعة	Megawatt Hour	MWh
ميجاوات حرارية	Megawatt Thermal	MWth
جزء في المليون	Part Per Million	ppm ، PPM
طن	Tonne	(t) T
طن ثاني أكسيد الكربون	Tonne of Carbon Dioxide	tCO <sub>2</sub>
طن ماء	Tonne of Water	tH <sub>2</sub> O
تيراجول	One trillion Joules	TJ
تيراواط ساعة	Terrawatt Hour	TWH

## الفصل 1 – نظرة عامة على الطاقة العالمية والموارد المتاحة

- 1.1. الطاقة والتنمية
- 1.2. موارد الوقود الأحفوري
- 1.3. موارد الطاقة المتجددة
- 1.4. موارد الطاقة النووية
- 1.4. الدور المستقبلي المحتمل للوقود الأحفوري

## 1.1. الطاقة والتنمية

تعتبر الطاقة أحد العوامل الأساسية التي ساهمت بشكل كبير في تطور المجتمعات البشرية، ولقد مر تاريخ الطاقة بعدد من المراحل والتي سلط الضوء على أهميتها في العديد من المنشورات (Niele, 1943; White, 2005). وقد ذكر نيل، الذي كان باحثاً في شركة Shell Global Solutions، في بداية مقدمة كتابه " الطاقة محرك التطور":

" أنه كان كفاحاً لفهم الصراع بين طلب المجتمع المتزايد على الطاقة الاقتصادية والسعي لتحقيق التنمية المستدامة. والسبب الجذري لهذا الصراع هو التناقض المتزايد المتمثل في أن استخدام الوقود الأحفوري يسهم في تنشيط النمو الاقتصادي بينما يؤدي في الوقت نفسه إلى التلوث المحلي وتغير المناخ العالمي؛ وبالتالي فهو يخلق ويؤثر في الرخاء في نفس الوقت، وإن كان توازن اليوم يبدو جيداً بينما يكون توازن الغد موضع شك".

وفي تأكيد على أهمية الطاقة أيضاً، اعتماد الجمعية العامة للأمم المتحدة في عام 2015 خطة التنمية المستدامة لعام 2030 وأهداف التنمية المستدامة (United Nations 2023) والتي تضمنت موضوع الطاقة. إذ دعا الهدف 7 من أهداف التنمية المستدامة على وجه التحديد إلى "ضمان حصول الجميع على طاقة حديثة وموثوقة ومستدامة وبأسعار معقولة". وينبع التركيز على الطاقة باعتبارها أحد أهداف التنمية المستدامة لفتح فرص اقتصادية ووظائف جديدة، وتحسين جودة التعليم والصحة، والوصول إلى مجتمعات أكثر استدامةً وإنصافاً وشمولاً. ولتحقيق هذا الهدف، لا مفر من اللجوء إلى جميع موارد الطاقة الأولية المتاحة لمختلف المجتمعات في جميع أنحاء العالم. ويجب أن تكون هذه الموارد متاحة اقتصادياً وأن يكون لها تأثيراً ضئيلاً أو معدوماً على البيئة. وتشمل سلسلة موارد الطاقة الأولية المتوفرة للمجتمعات البشرية ما يلي:

- موارد الوقود الأحفوري بما في ذلك الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي والصخر الزيتي
- موارد الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحيوية والطاقة الجيولوجية وطاقة الأمواج وطاقة الموارد المائية
- موارد الطاقة النووية

سنقدم في الأقسام التالية، مراجعة موجزة لموارد الطاقة الأولية الرئيسية التي يمكن الوصول إليها للاستخدام الحالي والاحتياجات المستقبلية. وفي رأينا، يعد تطوير جميع الموارد المذكورة أعلاه أمراً ضرورياً لتحقيق إمكانية التوصل إلى محو فقر الطاقة عالمياً على المدى الطويل في ضوء النمو السكاني

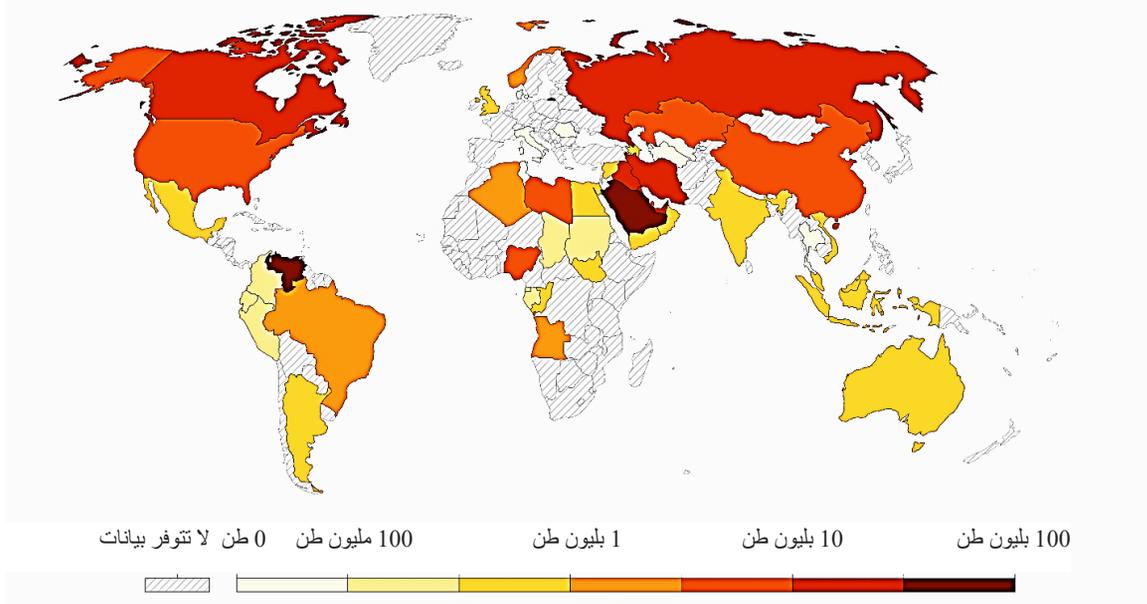
وزيادة الحاجة البشرية للطاقة والمخاوف البيئية وفقاً لهدف التنمية المستدامة رقم 7 للأمم المتحدة. ويركز هذا التقرير على التقاط وتخزين الكربون، مع الأخذ في الاعتبار الدور الحالي للوقود الأحفوري في إمدادات الطاقة العالمية، وإمكانية استمرار هذا الدور لعدة عقود قادمة. وقد عبر المدير التنفيذي لوكالة الطاقة الدولية في تقديم تقرير (IEA, 2020) عن أهمية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه بشكل أفضل بقوله:

"في الطريق نحو تحقيق الأهداف الدولية، تُعد تقنية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المجموعة الوحيدة من التقنيات التي تساهم في تخفيض الانبعاثات في القطاعات الرئيسية بشكل مباشر وإزالة CO<sub>2</sub> لموازنة الانبعاثات التي لا يمكن تجنبها. وهذا جزء مهم من الوصول إلى الأهداف الصفرية الصافية".

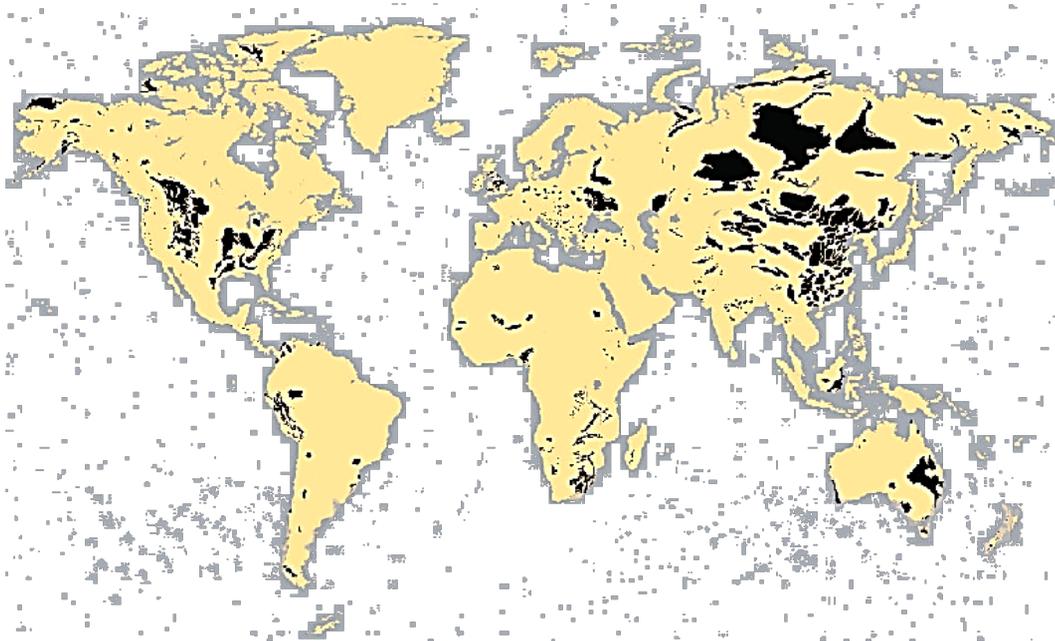
## 2.1. موارد الوقود الأحفوري

تتوزع موارد الوقود الأحفوري المتاحة على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم كما هو مبين في الأشكال 1.1-3.1. وبالنسبة للنفط (الشكل 1.1)، فإن الاحتياطيات المؤكدة التي تقدر بنحو 1732 مليار برميل، موزعة على 49 دولة، بالإضافة إلى العديد من الدول الأخرى التي تمتلك احتياطيات ثانوية. وبالمعدل الحالي لإنتاج النفط العالمي السنوي البالغ حوالي 94 مليون برميل/يوم، يقدر العمر المتوقع للنفط بحوالي 50 عاماً (BP, 2021). ومع ذلك، فإن العمر قد يمتد إلى سنوات إضافية إذا أُخذ في الاعتبار الاكتشافات الجديدة وكذلك تطور وانتشار تقنيات الاستخلاص المعزز للنفط. أما بالنسبة للفحم الحجري (الشكل 2.1)، فيبلغ إجمالي الاحتياطيات العالمية أكثر من 1074 مليار طن موزعة على أكثر من 34 دولة بالإضافة إلى العديد من الدول الأخرى ذات الاحتياطيات البسيطة. وبالمعدل الحالي لإنتاج الفحم الحجري، فإن العمر المتوقع لهذا المورد يمكن أن يزيد عن 139 عاماً (BP, 2021). وبالنسبة للغاز الطبيعي (الشكل 3.1)، تبلغ إجمالي الاحتياطيات المقدرة في عام 2021 حوالي 188 تريليون متر مكعب موزعة على 34 دولة بالإضافة إلى العديد من الدول الأخرى ذات الاحتياطيات البسيطة. ويقدر العمر المتوقع للغاز الطبيعي بحوالي 48 عاماً (BP, 2021). ومع ذلك، قد يمتد العمر أيضاً إلى فترات أطول مع الأخذ في الاعتبار الاتجاهات التاريخية للاكتشافات الجديدة وتقنيات الاستخلاص والإنتاج المحسنة.

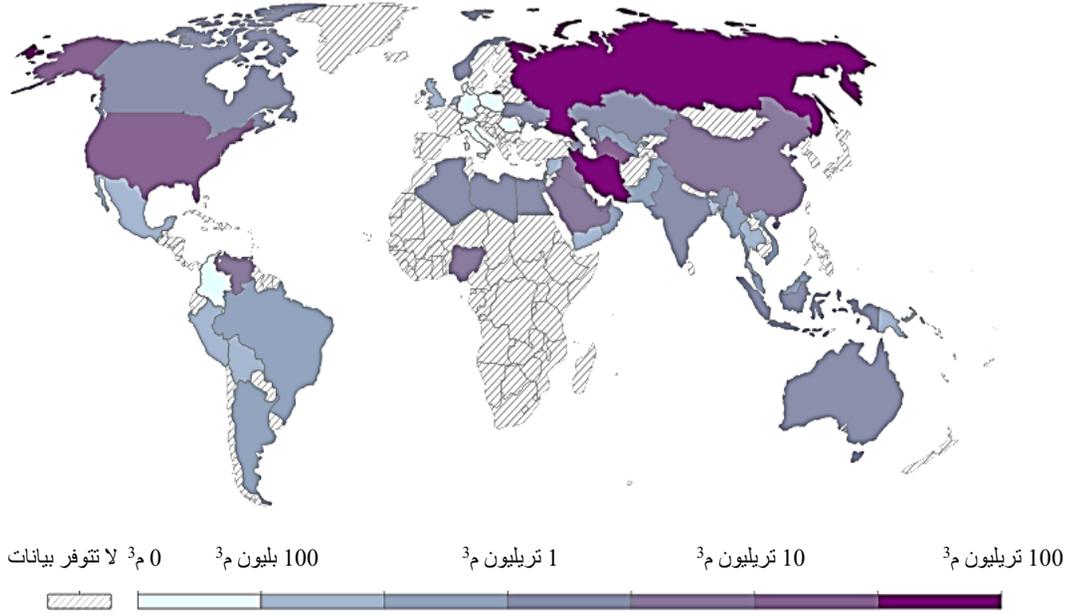
بالإضافة إلى الموارد المذكورة أعلاه، هناك موارد هائلة من الطاقة الأحفورية المتاحة في شكل النفط والغاز الصخريين، وتقدر الموارد القابلة للاستخراج بحوالي 345 مليار برميل من النفط و7,299 تريليون قدم مكعب من الغاز الصخري موزعة على 41 دولة حول العالم (EIA, 2013).



الشكل 1.01. احتياطيات النفط العالمية (Data, 2023).



الشكل 2.1. التوزيع العالمي لرواسب الفحم الحجري الرئيسية (Pierie, 2022).



الشكل 3.1. احتياطات الغاز العالمية 2020 (data, 2022).

وتتجلى أهمية النفط والغاز للمنطقة العربية بوضوح في التطور الذي شهدته جميع دول المنطقة، والتي غذتها عائدات النفط والغاز. ومن ثم، فإن التطورات في مجال الطاقة لها أهمية كبيرة لمستقبل المنطقة حيث أن تأثيرها لا يقتصر على قطاع الطاقة فحسب، بل يتعداه ليشمل نطاق واسع من خطط التنمية في جميع دول المنطقة وكذلك الدول الأخرى النامية في جميع أنحاء العالم. وتجدر الإشارة هنا إلى أن معظم الدول العربية لا تزال تتمتع بثروة من موارد النفط والغاز يمكن لبعضها أن تمتد إلى ما بعد القرن الحالي (الجدول 1.1). كما أن من الممكن مضاعفة الاحتياطات المذكورة في الجدول إذا وُظفت وعمم إنتشار تقنيات الاستخلاص المعزز للنفط (EOR)، وأخذ النفط غير التقليدي في الاعتبار والمتمثل في الزيوت الثقيلة والنفط الصخري، وكذلك إضافة الاكتشافات الجديدة المحتملة. وعلى الرغم من إمكانيات زيادة الاحتياطات المذكورة أعلاه إلا أن استغلالها قد تحده عوامل اقتصادية أو عوامل بيئية أو تشريعات تحد من استخدامه. ومن الممكن أيضاً تطبيق تصور مماثل حول مستقبل احتياطي الغاز الطبيعي. واستناداً إلى مستويات الإنتاج الحالية والاحتياطات المؤكدة والمحتملة، يمكن أن يمتد عمر النفط والغاز في بعض الدول العربية إلى أكثر من 50 عاماً.

وينعكس دور النفط والغاز في المنطقة بشكل واضح من خلال جهود ومخرجات منظمة الدول العربية المصدرة للبترول (أوابك)، التي تراقب التحديات الرئيسية التي تواجه صناعة النفط والغاز بشكل مستمر، كما تسهم في دعم الجهود البحثية التي تتناول هذه التحديات ونشرها في مجلة المنظمة "النفط والتعاون العربي" أو من خلال تقارير فنية وإحصائية واقتصادية متوفرة تحت عنوان "المنشورات"

على موقع المنظمة الإلكتروني (<https://oapecorg.org/Home>). وينعكس الاهتمام بشأن التحول الحالي في مجال الطاقة في عدد من المنشورات الصادرة عن المنظمة على مدى السنوات الخمس الماضية، وقد لخص بعضها بإيجاز في هذا التقرير.

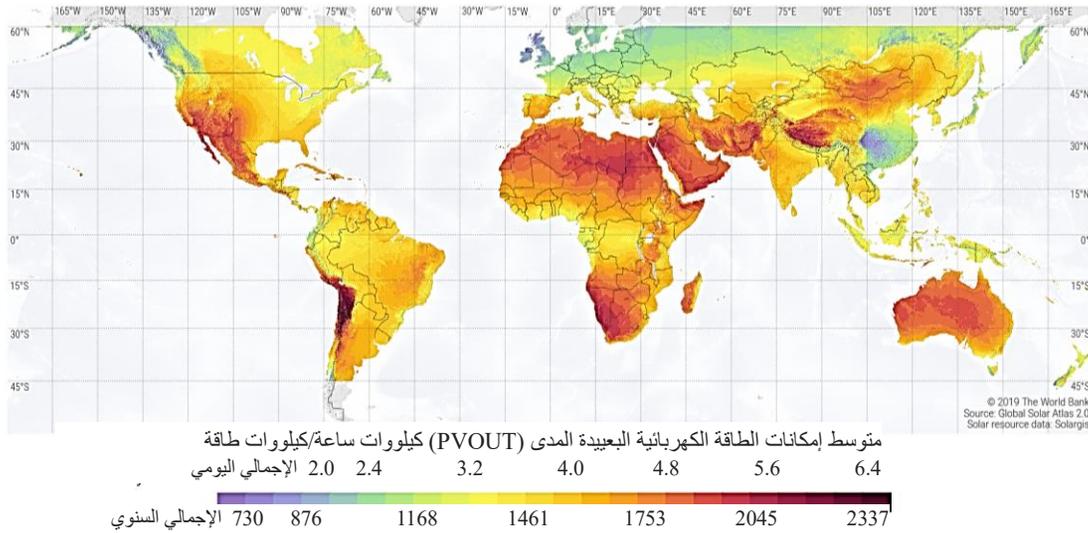
### الجدول 1.1. الاحتياطيات المؤكدة والإنتاج من النفط الخام والغاز الطبيعي في المنطقة العربية (المصدر: أوابك، 2021)

الدولة	الاحتياطيات المؤكدة (مليار برميل) / % من الاحتياطي العالمي	النفط الخام وإنتاج الغاز الطبيعي المسال (1000 برميل/يوم)	الاحتياطيات المؤكدة من الغاز الطبيعي (مليار متر مكعب) / % من الاحتياطي العالمي	الغاز المسوق سنوياً (مليار متر مكعب)*	الطبيعي سنوياً (متر مكعب)*
المملكة العربية السعودية	19.58/261.60	10,822.2	4.10/8,438	119.0	
العراق	11.11/148.40	4,093.9	1.86/3,820	14.7	
الإمارات العربية المتحدة	8.01/107.00	3,640.5	3.76/7,730	55.1	
الكويت	7.60/101.50	2,774.4	0.87/1,784	12.9	
ليبيا	3.62/48.36	404.6	0.73/1,505	13.0	
قطر	1.89/25.24	1,849.4	11.59/2,3831	184.9	
الجزائر	0.91/12.20	1,258.2	2.19/4,504	84.8	
عمان	0.36/4.79	954.00	0.33/674	36.1	
مصر	0.23/3.11	681.9	1.07/2,209	60.6	
اليمن	0.20/2.67	105.42	0.13/266	0	
سوريا	0.19/2.50	43.6	0.14/285	3.0	
السودان	0.11/1.50	85.63	0.11/25	0.1	
تونس	0.03/0.43	38.3	0.03/64	0.9	
البحرين	0.01/0.09	212.1	0.03/68	17.3	
دول عربية أخرى	0.7/8.98	1150.1	0.5/1047	36.5	
المجموع	53.8/719.41	26,969.2	26.9/55,243	602.6	
مجموع العالم	1,336.00		205,580	3,858.9	

\* باستثناء غاز إعادة الحقن، والغاز غير المستغل الذي يحرق، والغاز المتسرب أو الهارب

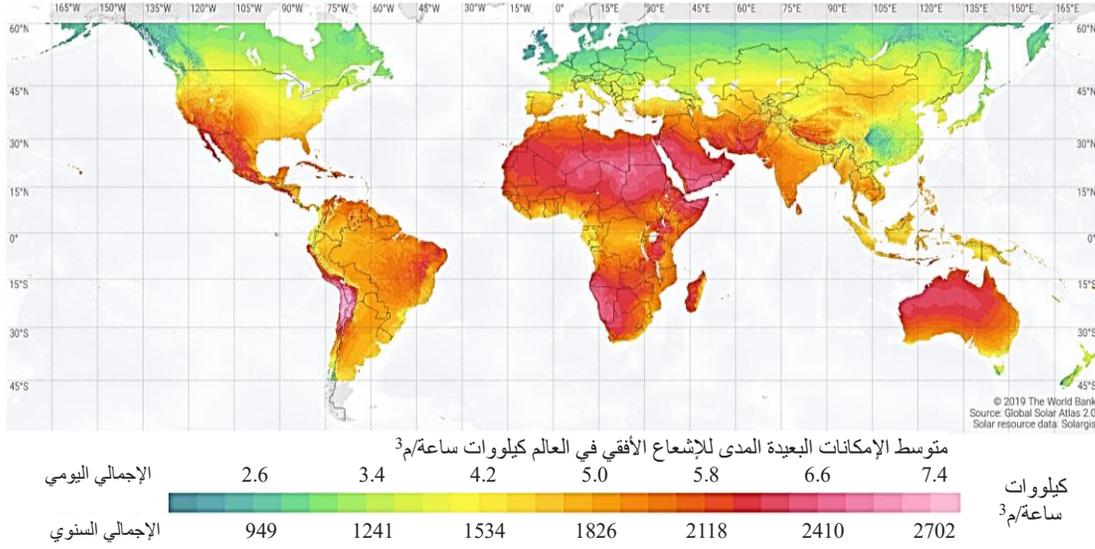
### 3.1. موارد الطاقة المتجددة

تتميز موارد الطاقة المتجددة في العالم بأنها واسعة النطاق وواسعة الانتشار في جميع الدول تقريباً، وتشمل موارد الطاقة المتجددة كلاً من الطاقة الكهرومائية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحيوية والطاقة الحرارية الجيولوجية. وفي مراجعتنا لهذا الموضوع سيتم التركيز بشكل خاص على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، حيث أنهما منتشرتان جغرافياً على نطاق واسع حول العالم. وتوضح الأشكال 4.1-6.1 انتشار إمكانات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والإشعاع الأفقي لإمكانات الطاقة الحرارية الشمسية وموارد الرياح. ويتضح من الخرائط الثلاث أن إمكانات الطاقة الشمسية بشقيها الكهروضوئي والحراري الشمسي تتركز في جميع أنحاء المنطقة العربية، بالإضافة إلى مناطق أخرى في أنحاء مختلفة من العالم. وتشمل موارد الرياح المناطق الساحلية حول العالم، بالإضافة إلى موارد داخلية كبيرة، من بينها الموارد المتوفرة في العديد من دول المنطقة العربية. وعلى الرغم من توافر هذه الموارد، إلا أن استغلالها يتطلب معالجة بعض التحديات.

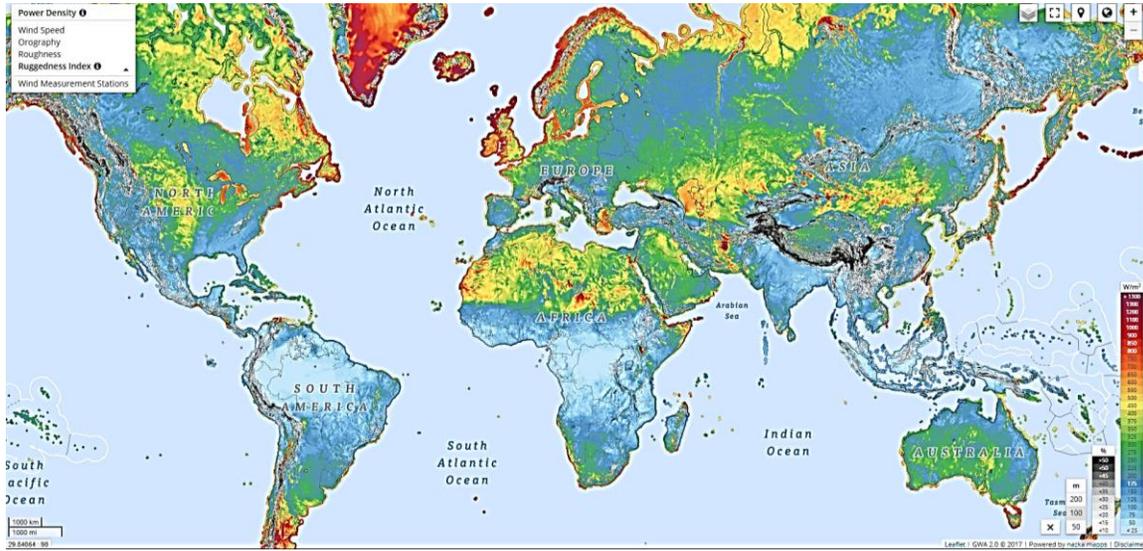


### الشكل 4.1. خريطة العالم لموارد الطاقة الكهروضوئية (SOLARGIS, 2023).

ووفقاً للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA, 2022) والوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2022d)، فقد تجاوز إجمالي سعة الطاقة المتجددة العالمية 3000 جيجاوات في عام 2021، منها حوالي 849 جيجاوات من الطاقة الشمسية و825 جيجاوات من طاقة الرياح. ويتسارع نمو الطاقات المتجددة حيث وصل معدل نمو الطاقة الشمسية في عام 2021 إلى 19% وطاقة الرياح إلى 13%. ويوجه معظم النمو الحالي للطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى توليد الكهرباء، والتي بلغت حصتها حوالي 30% في عام 2021 (EA, 2021a).



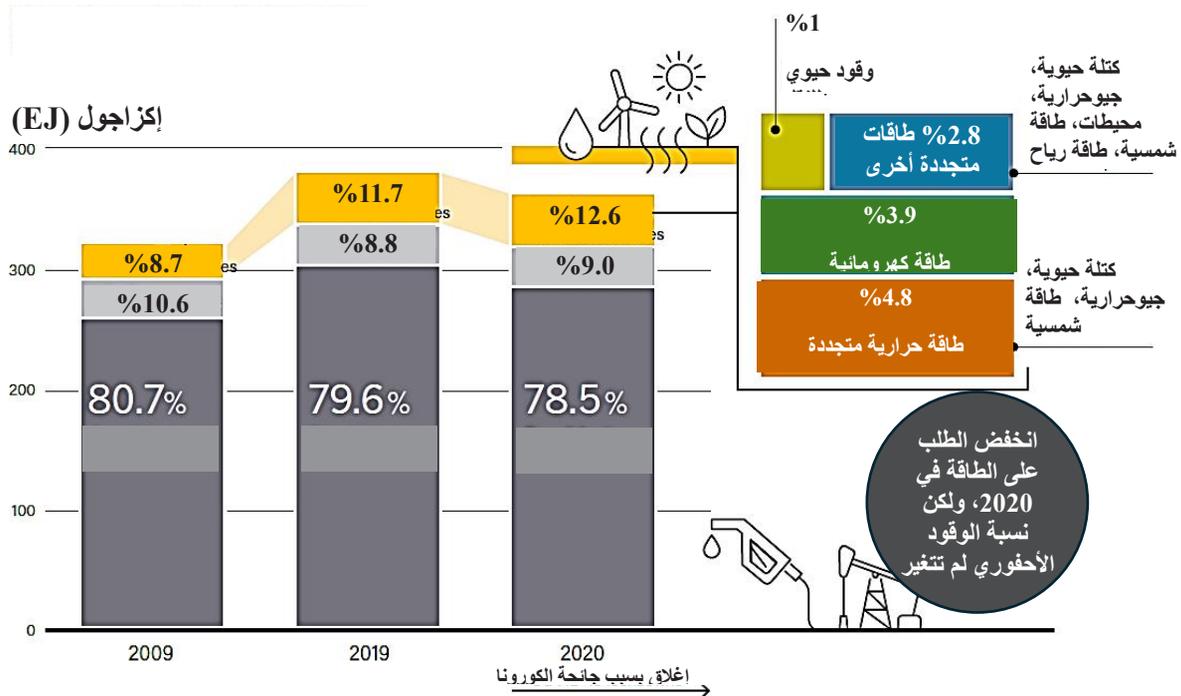
الشكل 5.1. خريطة موارد الإشعاع الأفقي للطاقة الحرارية الشمسية (SOLARGIS, 2023).



الشكل 6.1. خريطة موارد الرياح العالمية (ESA, 2018).

وعلى الرغم من هذا النمو، فإن النسبة المئوية لمساهمة جميع مصادر الطاقة المتجددة في إجمالي الطلب العالمي على الطاقة لا تزال محدودة (الشكل 7.1) وفقاً لشبكة REN21 (2023). ويعود النمو المعتدل لحصة مصادر الطاقة المتجددة لعدة أسباب أهمها (1) ارتفاع الطلب العالمي المستمر على الطاقة، (2) استهلاك الوقود الأحفوري المرتفع ومستوى الاستثمارات في استغلال أنواع الوقود الأحفوري الجديدة، و (3) تراجع بعض الاستخدامات التقليدية للكتلة الحيوية وتحويلها إلى الوقود

الأحفوري. ومن المتوقع أن يستمر نمو مصادر الطاقة المتجددة، لكنها ستستمر في مواجهة المشكلات التي حددتها REN21، وربما تنشأ تحديات أخرى. وقد تشمل هذه التحديات الاستفادة من مخرجات الطاقة المتجددة في أشكال الطاقة التي تناسب التطبيقات المختلفة، والقيود المفروضة على الموارد المعدنية اللازمة لاستغلال الطاقة المتجددة وتخزين الكهرباء، والقضايا البيئية المحتملة التي قد تنشأ، وغيرها. ولهذا السبب، تم تقديم الهيدروجين باعتباره ناقلاً للطاقة واكتسب أهمية على مدار العقد الماضي لأنه يوفر فرصة لتوسيع نطاق استخدام الطاقة المتجددة وتطبيقاتها (AlHumaidan et al., 2023). ونختتم هذا القسم بالإشارة إلى أن إدخال الطاقة المتجددة لتلبية الطلب العالمي على الطاقة في المستقبل حتمية، إلا أن تحقيق بعض الأهداف المحددة لها في الوقت المحدد قد يواجه بعض الصعوبات.



الشكل 7.1. الحصة التقديرية لمصادر الطاقة المتجددة من إجمالي استهلاك الطاقة للأعوام 2009

و2019 و2020 (مصادر طاقة متجددة حديثة: ■؛ موارد طاقة أخرى: ■؛ وقود أحفوري: ■).

(المصدر: REN21, 2023).

ومن المهم الإشارة إلى أن معظم الدول العربية بدأت جهودها لاستغلال موارد الطاقة المتجددة المتوفرة لديها، ويقدم الجدول 2.1 قائمة بسعة محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح العاملة أو قيد التطوير في مختلف الدول العربية وتتجاوز السعة الإجمالية للمحطات العاملة 13.4 جيجاوات، وتتجاوز السعة الإجمالية المحتملة 128 جيجاوات (Global Energy Monitor, 2023).

الجدول 2.1. محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في المنطقة العربية حتى يناير 2023 (المصدر:

(Global Energy Monitor, 2023

الدولة	محطات عاملة	محطات - مرحلة الإنشاء	محطات - ما قبل الإنشاء	محطات معلن عنها	مجموع المحطات المحتملة*
<b>محطات شمسية</b>					
الجزائر	454	11	1,000	4,136	5,147
البحرين	0	0	100	0	100
مصر	2,048	1,140	6,534	9,420	17,094
العراق	0	0	5,735	2,650	8,385
الأردن	1,048	0	0	600	600
الكويت	70	0	6,500	1,420	7,920
لبنان	0	0	165	0	165
ليبيا	0	100	750	120	970
موريتانيا	65	34	0	0	34
المغرب	740	834	12,637	67	13,538
عمان	730	938	16,211	1,200	18,349
فلسطين	0	35	35	0	70
قطر	815	0	875	0	875
العربية السعودية	426	3,900	3,151	2,000	9,051
الصومال	10	0	0	0	0
سوريا	10	190	0	338	528
تونس	30	500	4,890	0	5,390
الإمارات العربية المتحدة	2,899	3,739	0	1,500	5,239
<b>مجموع الطاقة الشمسية</b>	<b>9,345</b>	<b>11,421</b>	<b>58,583</b>	<b>23,451</b>	<b>93,455</b>
<b>محطات طاقة الرياح</b>					
الجزائر	10	0	5,010	0	5,010
مصر	1,641	1,850	11,730	6,103	19,683
الأردن	621	0	0	0	0
الكويت	10	0	100	0	100
لبنان	0	0	220	0	220
المغرب	1,165	813	3,770	5,000	9,583
عمان	50	0	200	310	510
العربية السعودية	400	0	0	500	500
السودان	0	125	200	0	325
تونس	233	30	30	0	60
<b>مجموع طاقة الرياح</b>	<b>4,130</b>	<b>2,818</b>	<b>21,260</b>	<b>11,913</b>	<b>35,991</b>

\*مجموع المحطات المحتملة = مجموع محطات- مرحلة الإنشاء، ومحطات مرحلة ما قبل الإنشاء،

والمحطات المعلن عنها

#### 4.1. موارد الطاقة النووية

تعد الطاقة النووية أيضاً من بين مصادر الطاقة الأولية الرئيسية المتاحة حيث تستغل الموارد النووية حالياً في توليد الطاقة من خلال انشطار نظائر اليورانيوم المختارة لإنتاج الطاقة، وتستخدم الحرارة الناتجة عن الانشطار في توليد البخار الذي يستخدم في توليد الكهرباء. ووفقاً للمنتدى الاقتصادي العالمي (WEF, 2022)، فقد أنتجت الطاقة النووية ما يقرب من 2500 تيراواط/ساعة، أي حوالي 10% من الكهرباء في العالم و4.3% من مزيج الطاقة العالمي. ووفقاً للوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA, 2021)، فقد بلغت سعة التوليد حوالي 393 جيجاوات في عام 2020، ومن المتوقع أن ترتفع إلى ما يقرب من 790 جيجاوات بحلول عام 2050. ويشارك فعلياً أكثر من 30 دولة في توليد الطاقة النووية، ولكن 91% من الطاقة النووية المولدة التي تستخدم حالياً تُنسب إلى 15 دولة، منها الولايات المتحدة الأمريكية والصين وفرنسا، التي تنصدر هذه الدول بحوالي 57% من إجمالي الطاقة المولدة. ويتمشى النمو المتوقع في توليد الطاقة النووية مع أهداف التحول الحالي للطاقة فيما يتعلق بالاحتباس الحراري، حيث أن التكنولوجيا تصنف على أنها عديمة الانبعاثات. ومع ذلك، فإن بعض الدول مثل ألمانيا تراجعت عن اعتماد هذه التكنولوجيا.

وقد اختارت عدد من الدول العربية تنويع إمداداتها من الطاقة وإدراج توليد الطاقة النووية في خططها التنموية. وقامت دولة الإمارات العربية المتحدة بالفعل بتشغيل أول محطة لتوليد الطاقة النووية بسعة 4.2 جيجاوات، ولديها محطة أخرى قيد الإنشاء بسعة 1.4 جيجاوات. وتقوم مصر حالياً ببناء محطة نووية بسعة 1.2 جيجاوات، بينما تقوم دول عربية أخرى بوضع خطط لتطوير هذا المجال لتلبية الطلب المستقبلي على الطاقة وللحد أيضاً من انبعاثات الغازات الدفيئة.

#### 5.1. الدور المستقبلي المحتمل للوقود الأحفوري

على مدى العقود الثلاثة الماضية، تزايد الاهتمام العالمي بظاهرة الاحتباس الحراري وإسنادها إلى انبعاثات الغازات الدفيئة، فضلاً عن القلق إزاء الاستدامة طويلة الأجل لإمدادات الطاقة الحالية، وحاجة العالم إلى التحول نحو الموارد المتجددة لتلبية متطلباته من الطاقة. ويشكل هذا التحول تحدياً كبيراً لأنه يتطلب الحد من اعتماد العالم على الوقود الأحفوري، مع مراعاة الدور الحالي للوقود الأحفوري في مختلف جوانب سبل العيش البشرية الحديثة، كما يحتاج العالم إلى تحقيق الهدف 7 من أهداف التنمية المستدامة التي حددتها الأمم المتحدة. ومن ثمة، هناك حاجة إلى انتقال وتحول منظم في مجال الطاقة للحد من تأثير التحديات التي تعمل من خلالها صناعة الوقود الأحفوري العالمية على حل التأثير السلبي للوقود الأحفوري فيما يتعلق بالاحتباس الحراري. لقد كان المسار لمثل هذا التحول جارياً على مدار العقدين الماضيين، وهو ينطوي على اقتران تكنولوجيا الطاقة الحالية مع التقاط الكربون واستخدامه

وتخزينه (CCUS). كما تطور على مدى العقود القليلة الماضية مفهوم اقتصاد الكربون الدائري، وأصبحت عدة مناهج لالتقاط وتخزين الكربون قيد النظر، وبُذلت جهود بحثية مكثفة لإيصال تقنيات التقاط الكربون وتخزينه إلى مرحلة النضج، ووصل عدد من هذه التقنيات إلى مستوى نضج عالٍ وأصبحت جاهزة للتسويق. وقد بحثت إمكانية دمج تقنية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه الناضجة مع العمليات الصناعية كثيفة الاستهلاك للطاقة، وتناولت الموضوع مراجعة حديثة (Lin et al., 2022) و تقرير حديث صادر عن الجهات المعنية باتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCC, 2022).

وينعكس الاهتمام بعمليات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه على مدى العقدين الماضيين في عدد المؤسسات التي تركز جهودها لهذا الموضوع، وهي تشمل جمعيات مثل مبادرة النفط والغاز للمناخ (Oil and Gas Climate Initiative)، التي تضم 12 عضواً من أكبر شركات النفط والغاز في العالم بما في ذلك شركة أرامكو (GCCSI, 2023a)، والمعهد العالمي لالتقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه (Global CCS Institute) والذي يضم حوالي 140 عضواً (GCCSI, 2022b)، ومنصة الانبعاثات الصفيرية (Zero Emissions Platform (ZEP))، وهي مجموعة استشارية تابعة للاتحاد الأوروبي تضم 25 عضواً من شركات النفط الكبرى والمؤسسات البحثية (ZEP, 2022)، وقيمة CO<sub>2</sub> أوروبا (Value Europe) وتضم أكثر من 70 عضواً (Europe., 2022)، ورابطة التقاط وتخزين الكربون (Carbon Capture Storage Association) التي تضم أكثر من 80 عضواً (CCSA, 2022) ومجلس CCUS (CCUS Council) الذي يضم حوالي 30 عضواً (CCSA, 2022)، ومجلس أبحاث استخدام الكربون (Carbon Utilization Research Council) ويضم أكثر من 40 شركة عضواً (CURC, 2022)، هذا بالإضافة إلى العديد من الوحدات الحكومية المتخصصة في معظم الدول والمؤسسات والشركات التي ساهمت في هذا الموضوع (( BCG, 2022; CCE, 2020; DNV, 2022; IEA, 2021a; IEA, 2019; IEAGHG, 2022a; IEAGHG, 2022b; IEAGHG, 2023; KAPSARC, 2022; Lyons et al., 2021; Machado, 2019; Mackenzie, 2022; McKinsey and Co., 2022; NETL, 2022; NPC, 2022; Zitelman et al., 2018)). وتقوم هذه المؤسسات والشركات بمتابعة التطورات التقنية والتنظيمية في هذا المجال، وتقوم بشكل دوري بإصدار تقارير حول الموضوع تتضمن تحديثات عن التقدم التكنولوجي المحرز والفجوات التي تتطلب المزيد من التطوير.

وفي المنطقة العربية تمت مناقشة موضوع تحول الطاقة الحالي في عدد محدود من المنشورات. فعلى سبيل المثال، لوحظ في دراسة حديثة أن أهم العوامل التي قد تؤثر على دور النفط في سوق الطاقة قد تأتي من التحولات في الطاقة العالمية بسبب السياسات المتعلقة باتفاقية تغير المناخ، والتطورات التقنية السريعة لمصادر الطاقة البديلة والمخاوف المتعلقة بأمن العرض. وسيتمتع مستقبل صناعة النفط على مدى قدرتها على التكيف وتغيير أنماط الاستثمار وتبني أنسب التقنيات المقبولة بيئياً، وذلك تمهيداً لنظام الطاقة الذي بدأ يتشكل تدريجياً. ولهذا ينبغي للدول المنتجة للنفط أن تركز على تحويل أصولها من النفط والغاز من خلال استخراج تلك الموارد وتحويل إيراداتها إلى أصول جديدة مستدامة تنوع الاقتصاد والإيرادات وتنوع مصادر استهلاكها للطاقة (ماجد عبدالله المنيف، 2019). وفي دراسة حديثة أخرى، جرى تقييم موارد الطاقة، وخاصة مصادر الطاقة المتجددة، أخذاً في الاعتبار سيناريوهات وكالة الطاقة الدولية وسيناريوهات التنمية المستدامة للفترة 2017-2040. وكان الهدف من التقييم هو تحديد التداعيات المحتملة للسيناريوهات المتعلقة بالطلب العالمي على الوقود الأحفوري وعلى سوق النفط مع التركيز على الدول الأعضاء في منظمة الأوبك. وتم إجراء التقييم بناءً على الطلب العالمي المتوقع على الطاقة، ومصادر الطاقة المتجددة المحتملة، ونمو قطاع توليد الطاقة الكهربائية (أوبك، 2019).

كما سلط الضوء على أهمية الهيدروجين في تحول الطاقة الحالي في تقرير حديث. واستعرض التقرير تطبيقات الهيدروجين وتأثير السياسات الحكومية لدعم تنمية اقتصاد الهيدروجين. وتضمن التقرير مسحاً لمسارات إنتاج الهيدروجين، والعمليات الحالية لإنتاج الهيدروجين، وأحدث التطورات التكنولوجية. كما تناول البحث الاستخدامات المحتملة للهيدروجين، والسياسات والاستراتيجيات المعتمدة لتعزيز استخدامه، وتحليل عوامل النجاح الرئيسية لتنمية اقتصاد الهيدروجين في الدول العربية، وأخيراً دراسة سوقية للمشاريع والخطط المعلنة (وائل حامد عبد المعطي، 2021).

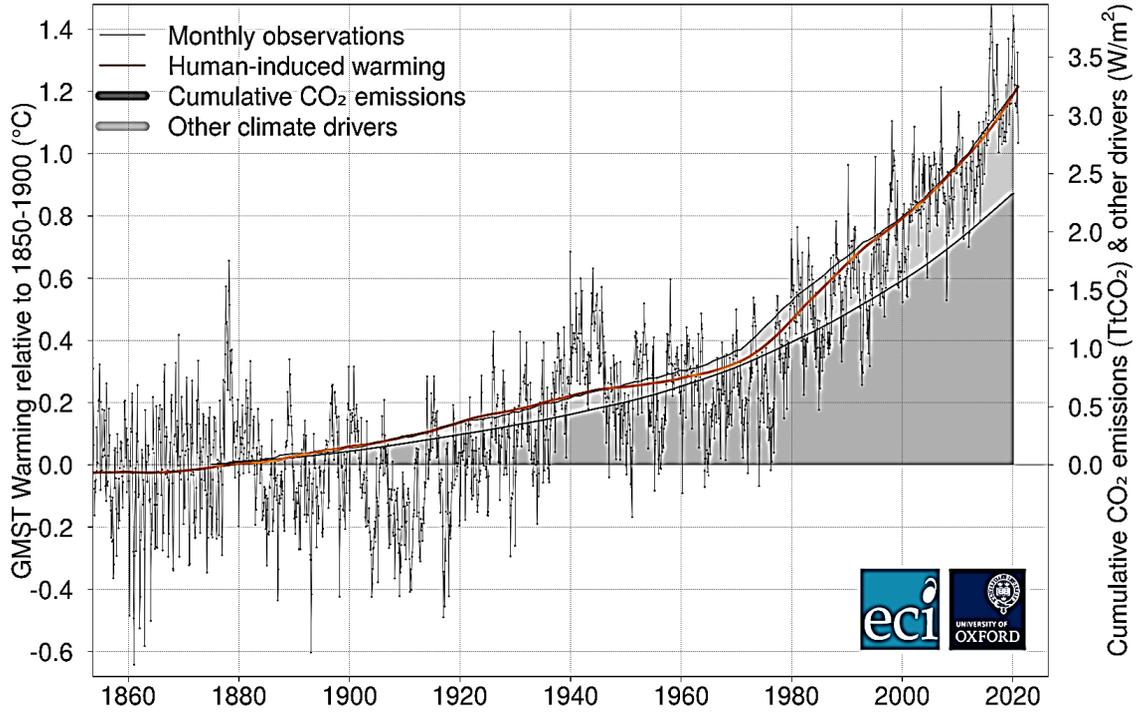
## الفصل 2 – تحديات الوقود الأحفوري: انبعاث الكربون والاحتباس الحراري

- 2.1. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة من جانب العرض
- 2.2. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة من جانب الطلب

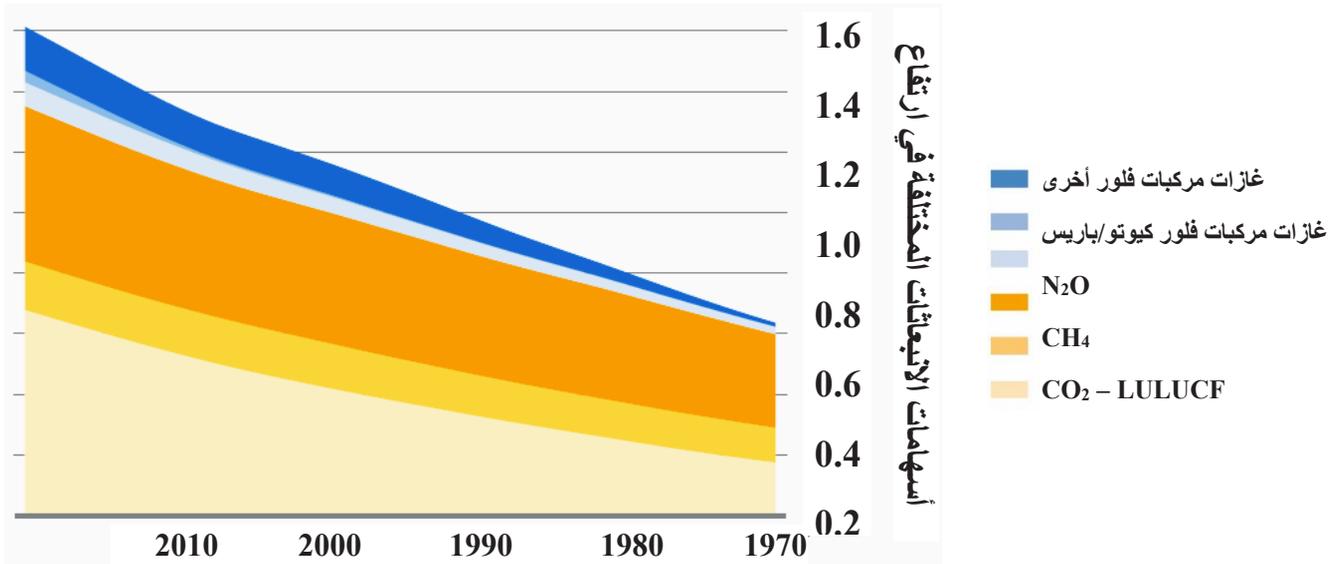
يتوقف استمرار استخدام موارد الطاقة الأحفورية كإمدادات أولية للطاقة على القدرة على مواجهة التحديات الناجمة بشكل رئيسي من المخاوف المتعلقة بتأثير الغازات الدفيئة على تغير المناخ، وعلى وجه التحديد تأثير  $CO_2$  والميثان ( $CH_4$ ) على ظاهرة الاحتباس الحراري. وقد أجريت العديد من الدراسات على مدى الثلاثين عاماً الماضية بشأن هذه المسألة. فعلى سبيل المثال، وجد معهد التغيير البيئي (ECI) التابع لجامعة أكسفورد أن ظاهرة الاحتباس الحراري تحكمها المعادلة التالية:  $\Delta T = \kappa \cdot (E + \Delta F / \alpha)$ ، حيث  $\Delta T$  هو الاحترار خلال فترة زمنية، و  $E$  هو إجمالي انبعاثات  $CO_2$  التراكمي خلال تلك الفترة الزمنية، و  $\Delta F$  هو تأثير أي تغيير في توازن الطاقة العالمي بسبب التأثيرات البشرية الأخرى على المناخ، و  $\kappa$  هي "الاستجابة المناخية العابرة للانبعاثات" (حوالي  $0.4^\circ C$  لكل تريليون طن من ثاني أكسيد الكربون)، و  $\alpha$  هي "السعة المطلقة للاحتباس الحراري العالمي" لـ  $CO_2$  (حوالي  $1.0$  واط/م<sup>2</sup> لكل تريليون طن من  $CO_2$ ). ويلخص الشكل 2.1 نتائج ECI التي اظهرت اتجاهات متطابقة تقريباً بين متوسط درجة الحرارة الشهرية وانبعاثات  $CO_2$  التراكمية، مما يؤدي إلى استنتاج مفاده أن  $CO_2$  هو المساهم الرئيسي في ظاهرة الاحتباس الحراري (ECI, 2022).

وأشار التقييم الذي أجرته الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022) إلى أن ظاهرة الاحتباس الحراري هي نتيجة للانبعاثات التراكمية للعديد من الغازات المرتبطة بالطواهر البشرية والطبيعية. ويقدم الشكل 2.2 ملخصاً لإسهامات الانبعاثات المختلفة في ظاهرة الاحتباس الحراري، حيث تشير النتائج بوضوح إلى أن  $CO_2$  والميثان هما المساهمان الرئيسيان في ارتفاع درجة الحرارة بنحو  $0.75^\circ C$  خلال الفترة 1970-2019.

واستناداً إلى الدراسات المتعلقة بالاحتباس الحراري، أبرمت اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ في عام 1994 (UNFCC, 2022)، وتبعتها بروتوكول كيوتو الذي اعتمد في عام 1997 (بروتوكول كيوتو، 2022) ودخل حيز التنفيذ في عام 2005. وفي وقت لاحق من عام 2015، اعتمد اتفاق باريس بشأن تغير المناخ وهو اتفاق ملزم قانوناً دخل حيز التنفيذ في عام 2016 (Paris-Agreement, 2022). وحدد اتفاق باريس هدفاً للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري وهو أقل من  $2^\circ C$  ويفضل أن يكون  $1.5^\circ C$ ، مقارنةً بمستويات درجات الحرارة قبل الثورة الصناعية، وحث الاتفاق كافة الدول على تحديد أهداف للحد من الوصول إلى الذروة العالمية لانبعاثات الغازات الدفيئة في أقرب وقت ممكن لتحقيق هدف الحد من الاحتباس الحراري والوصول إلى عالم محايد مناخياً بحلول منتصف القرن. وللحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، واستناداً إلى العديد من الدراسات، يجب على العالم خفض انبعاثات الغازات الدفيئة، وخاصةً انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، إلى مستوى يمكن بموجبه تجنب المزيد من ارتفاع درجات الحرارة العالمية.



الشكل 1.2. مؤشر الاحتباس الحراري ومصادره الرئيسية (المصدر: ECI, 2022).



الشكل 2.2. مساهمة الغازات الدفيئة المختلفة في ظاهرة الاحتباس الحراري خلال الفترة من 1970 إلى 2018 (N<sub>2</sub>O: أكسيد النيتروز؛ CH<sub>4</sub>: الميثان؛ CO<sub>2</sub>-LULUCF: CO<sub>2</sub> ناتج عن استخدام الأراضي والغابات؛ CO<sub>2</sub>-FFI: انبعاثات CO<sub>2</sub> من احتراق الوقود الأحفوري والأنشطة الصناعية) (المصدر: IPCC, 2022).

وقدرت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ الكميات المتبقية من CO<sub>2</sub> التي لا يزال من الممكن تحمل انبعاثها قبل الوصول إلى 1.5 و 2°م، والتي يشار إليها بميزانية الكربون العالمية، بـ 400 و 1,150 جيجا طن من CO<sub>2</sub>، على التوالي مع احتمال بنسبة 67% (IPCC, 2021). ووفقاً لبعض الباحثين النشطين في هذا المجال (Liu et al., 2022)، أدت انبعاثات عام 2021 إلى خفض تقديرات ميزانية الكربون العالمية إلى 332 و 1082 جيجا طن من CO<sub>2</sub> عند 1.5°م و 2°م، على التوالي، وهي ميزانيات باحتمالية 67%. وبمعدل الانبعاثات الحالي، فإن عدد السنوات المتبقية لـ 1.5°م و 2°م هو 9.5 و 31 سنة، على التوالي.

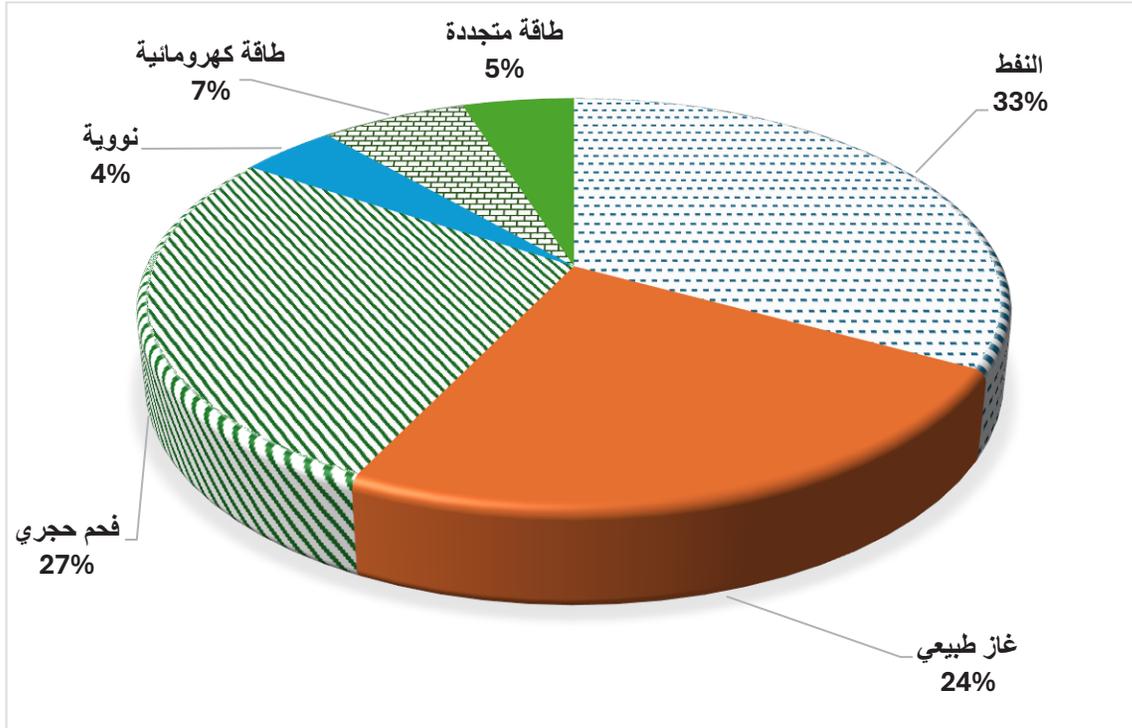
وتجدر الإشارة إلى أنه منذ وضع اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC)، عُقدت مؤتمرات سنوية (COP) لمتابعة تنفيذ الاتفاقيات التي تم التوصل إليها، وكان آخر هذه المؤتمرات (COP27) قد عقد في مدينة شرم الشيخ بمصر في نوفمبر 2022، وجرى خلاله استعراض مختلف المسائل المتعلقة بخطة التنفيذ. كما أنشأت مؤخراً قاعدة بيانات تتعلق بجدول أعمال مؤتمرات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ وفحصها مما يكشف أنه على الرغم من نمو بنود جداول الأعمال، إلا أن قضايا الشفافية والحد من الانبعاثات كانت هي المهيمنة تقليدياً (Allan and Bhandary, 2022)

لقد غدت المخاوف العالمية بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري الاهتمام بتحول الطاقة على مدى العقود الثلاثة الماضية. وكان التركيز في بداية التحول بشكل أساسي على تطوير تكنولوجيا الطاقة المتجددة وتعزيز دور الكهرباء في تطبيقات الطاقة المختلفة مما أدى إلى تسارع نمو حصة الطاقة المتجددة في إجمالي إمدادات الطاقة العالمية. وعلى الرغم من ذلك ظلت النسبة المئوية لإجمالي الطاقة المتجددة، التي تشمل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الجيولوجية والوقود الحيوي في مزيج إمدادات الطاقة العالمي في عام 2019، عند حوالي 5% كما يظهر في الشكل 3.2 (BP, 2021). وقد تم اختيار بيانات 2019 لأنها أكثر تمثيلاً من بيانات 2020 أو 2021 بسبب تأثير جائحة الكوفيد 19 على سوق الطاقة في السنتين الماضيتين. ومن المثير للاهتمام أيضاً ملاحظة أنه خلال السنوات الخمس والعشرين الماضية ظلت حصة الوقود الأحفوري من إجمالي مزيج الطاقة الأولية مرتفعة بشكل كبير عند حوالي 84% (الشكل 4.2)، كما ارتفع الاستهلاك العالمي الفعلي لموارد الطاقة الأحفورية الأولية خلال الفترة 1995 – 2021 من حوالي 315 إلى 490 إكساجول، وهو ما يمثل نسبة تزيد عن 55% (BP, 2021). ومن التغييرات الهامة الأخرى التي حدثت بين عامي 2019 و 2021 هو انخفاض استهلاك النفط بنحو 2% وارتفاع الطاقة المتجددة بنسبة 2%. على الرغم من هذه التغييرات، ووفقاً

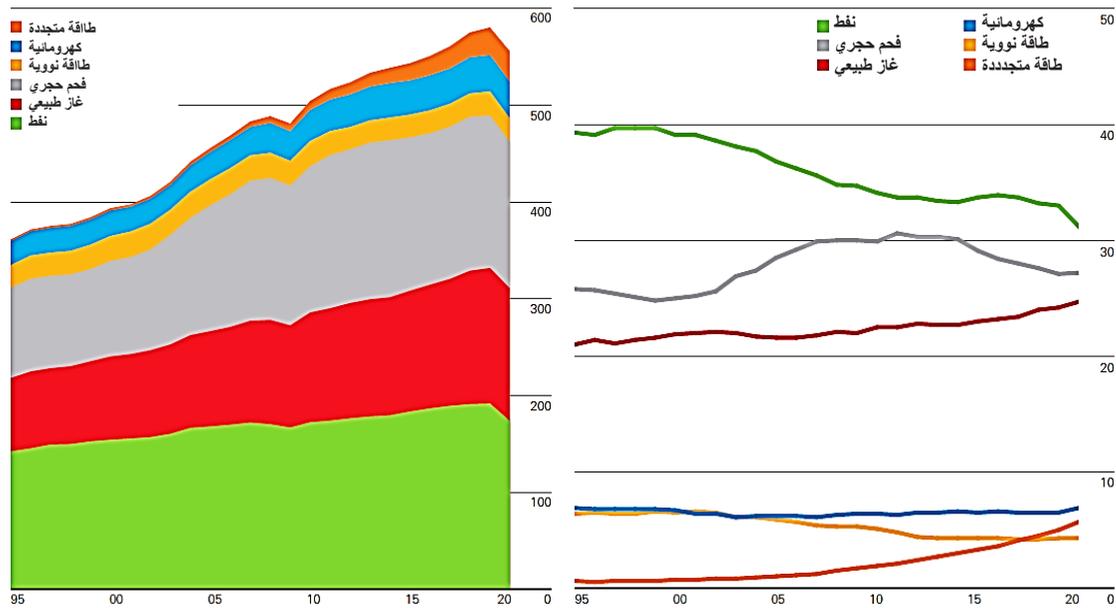
لبعض الباحثين، استمرت انبعاثات CO<sub>2</sub> في النمو، وهو ما يعزى إلى عدم وجود سياسات كافية، وبالتالي هناك حاجة إلى المزيد من الاهتمام بشكل مباشر لخفض استخدام الوقود الأحفوري إن امكن أو إزالة انبعاثاته من خلال التقاط وتخزين الكربون (Peters et al., 2020).

وبالنسبة للمنطقة العربية، قامت منظمة الأوابك مؤخراً بدراسة قُيِّمت فيها التطورات في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ بعد ابرام اتفاقية باريس. وتركزت الجهود البحثية على التحالفات بين مختلف الدول، والمجموعات والكتل الاقتصادية الناشئة، وتأثير المساهمة المحددة وطنياً (NDC) على صناعة النفط، وسياسات الطاقة في الدول المستهلكة الرئيسية، والتغيرات في مزيج الطاقة العالمي. وخلصت الدراسة إلى أن الدول العربية لديها فرصة لتفعيل عدد من المبادرات لتحقيق التنمية المستدامة (محمدالصياد، 2019).

ومن المهم أن نلاحظ أن نمو انبعاثات الغازات الدفيئة من أنظمة الطاقة يتبع إلى حد كبير ارتفاع نصيب الفرد من الناتج المحلي الإجمالي على مستوى العالم، حيث أن النمو الاقتصادي والطلب على الطاقة والكهرباء يرتبطان ارتباطاً وثيقاً ببعضهما البعض، خاصةً في المناطق النامية. فعلى سبيل المثال، تراوح متوسط النمو السنوي للطلب على الطاقة في آسيا بين 3.8% و4.3% في الفترة 2010-2019، إلا أن الانبعاثات الناجمة عن هذا النمو تددت جزئياً من خلال خفض كثافة استهلاك الطاقة في جميع مناطق العالم تقريباً من خلال برامج الحفاظ على الطاقة (IPCC, 2022; Lamb et al., 2022). ومن ثمة، وعلى مدى العقود الثلاثة المقبلة، فإن معالجة فقر الطاقة في العديد من الدول والنمو الاقتصادي المتوقع في الشرق الأوسط وأفريقيا وأمريكا الجنوبية سيؤدي على الأرجح إلى زيادة إضافية في الطلب على الطاقة، وقد يترتب على ذلك ارتفاع في نسبة الانبعاثات. ومن المهم أيضاً الإشارة إلى أن تقدير انبعاثات الغازات الدفيئة يستند بشكل رئيسي على نماذج وقواعد بيانات طورته مجموعات بحثية مختلفة ويجري تحسينها باستمرار مع جمع المزيد من البيانات وتحسين مستويات الثقة (IPCC, 2022). ونتيجةً لذلك، فإن البيانات الواردة في التقارير المختلفة قد تختلف بعض الشيء ولكن الاتجاهات متشابهة بشكل عام.



الشكل 3.2. استهلاك الطاقة الأولية حسب الوقود للعام 2019 (المصدر: BP, 2021).

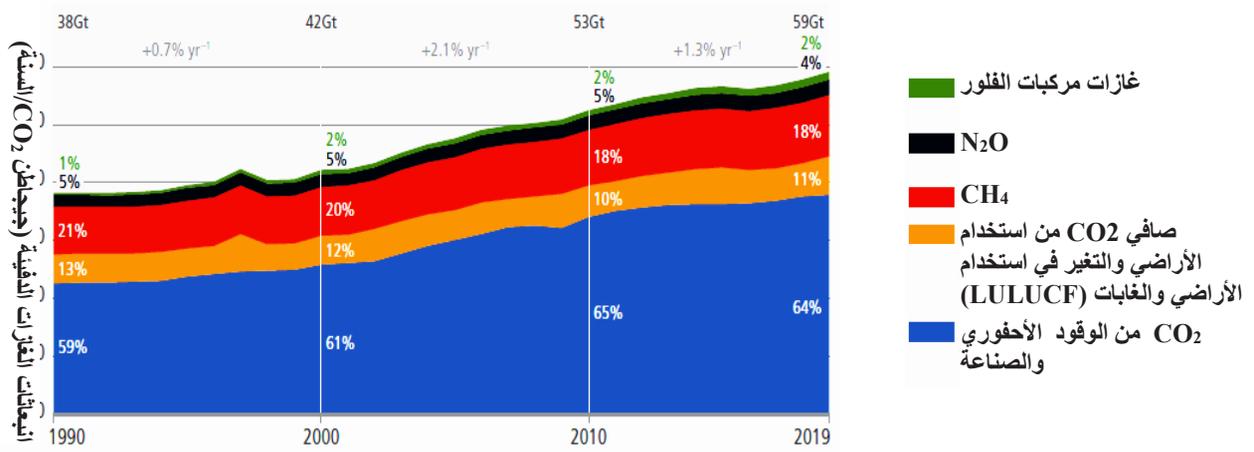


الشكل 4.2. اتجاهات الاستهلاك العالمي للطاقة 1995-2020. (أ) استهلاك الطاقة العالمي بالإكساجول. (ب) النسب المئوية لحصص الطاقة الأولية في العالم (المصدر: BP, 2021).

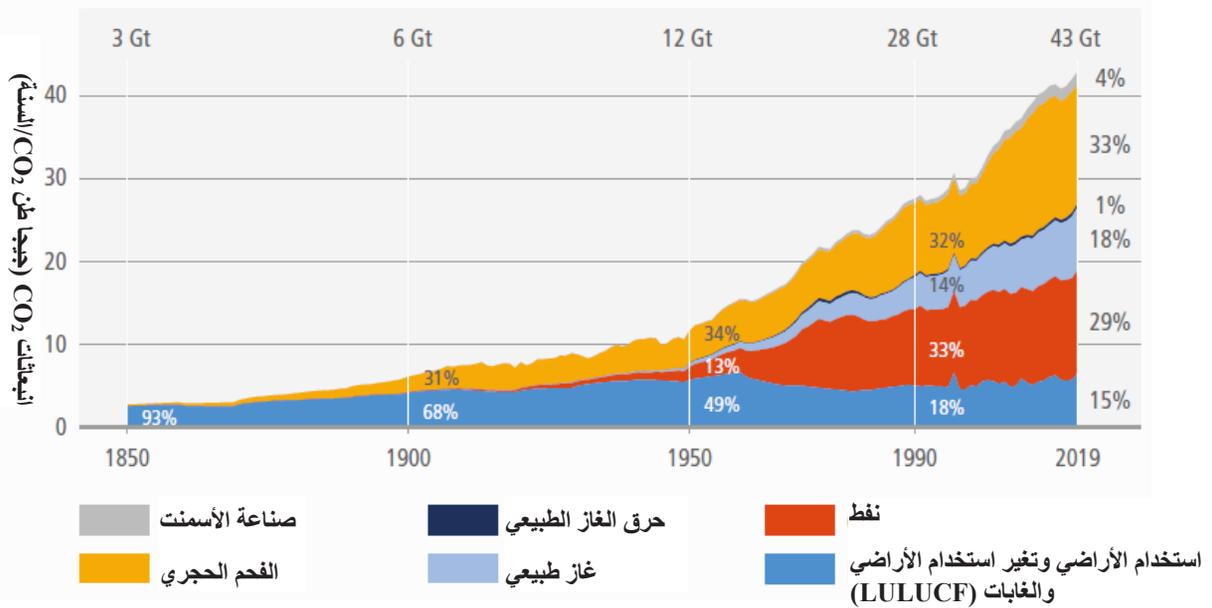
## 1.2. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة: جانب العرض

ومع مراعاة الارتباط المذكور أعلاه بين ظاهرة الاحتباس الحراري وانبعاثات غازات الدفيئة، من المهم إلقاء نظرة عامة على المصادر الرئيسية لانبعاثات الغازات الدفيئة، وخاصةً انبعاثات CO<sub>2</sub> والميثان، حيث أن هذا البحث يركز على الغازات الدفيئة الناتجة عن الوقود الأحفوري. وقد قامت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ بمراجعة اتجاهات انبعاثات الغازات الدفيئة بشكل شامل مؤخراً على مدار الثلاثين عاماً الماضية كما هو موضح في الشكل 5.2 (IPCC, 2022)، كما تناول الموضوع أيضاً العديد من المنظمات والمجموعات البحثية المعنية بالطاقة وانبعاثاتها. ووفقاً للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022)، وصلت انبعاثات الغازات الدفيئة إلى 59 ± 6.6 جيجا طن من مكافئ CO<sub>2</sub> في عام 2019، وتبلغ إجمالي انبعاثات CO<sub>2</sub> منها حوالي 44.6 جيجا طن وانبعاثات الميثان حوالي 11 جيجا طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون. وتتوزع انبعاثات CO<sub>2</sub> بين فئتين رئيسيتين: انبعاثات الوقود الأحفوري والصناعة (FFI) بحوالي 38 ± 3.0 جيجا طن وانبعاثات استخدام الأراضي وتغيير استخدام الأراضي والحراجة عند 6.6 ± 4.6 جيجا طن، كما نُشرت تقديرات قريبة من هذه من قبل منظمات أخرى. فعلى سبيل المثال، أفاد برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP, 2022) أن إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة تقدر بنحو 54.5 جيجا طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون، منها 37.9 (±3) جيجا طن تُعزى إلى ثاني أكسيد الكربون، في حين أن الـ 15 المتبقية (±3.6 جيجا طن) تُعزى إلى الميثان وأكسيد النيتروز (N<sub>2</sub>O) وغازات مركبات الفلورين (F-gases). كما قدّرت الوكالة الدولية للطاقة لانبعاثات CO<sub>2</sub> لعام 2021 بـ 36.6 جيجا طن (IEA, 2022d)، والتي ربما تقتصر على انبعاثات الوقود الأحفوري والصناعة (FFI)، وبالتالي فهي قريبة جداً من أرقام الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. كما نُشرت أرقام مماثلة لانبعاثات CO<sub>2</sub> بواسطة عدد من المجموعات البحثية (Ellabban et al., 2014؛ Anwar et al., 2020)، ومؤخراً فريق مشروع الكربون العالمي (Friedlingstein et al., 2022)، الذي غطى الانبعاثات المقدرة لعام 2021.

وبالتأكيد على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون حتى عام 1850، يتضح أن مصدر الانبعاثات الرئيسي آنذاك يعود إلى استخدام الأراضي وتغيير استخدام الأراضي والحراجة وظل هذا المصدر ثابتاً تقريباً عند حوالي 3.6 ± 5.1 جيجا طن من CO<sub>2</sub>. ومن ناحية أخرى، فقد تزايدت انبعاثات CO<sub>2</sub> السنوية من الوقود الأحفوري والصناعة (FFI) بشكل مضطرب منذ عام 1850، وتسارع النمو منذ الستينيات (الشكل 6.2) (IPCC, 2022). وقد بلغت الانبعاثات في العقد الأخير (2010-2019) حوالي 410 ± 30 جيجا طن من CO<sub>2</sub>، أي ما يقرب من 17% من إجمالي الانبعاثات التراكمية منذ عام 1850، وتعادل هذه الكمية تقريباً ميزانية الكربون المتبقية البالغة 400 ± 220 جيجا طن من CO<sub>2</sub> للحد من



الشكل 5.2. صافي انبعاثات الغازات الدفيئة بشرية المنشأ على مستوى العالم 1990-2019 (Gt): (جيجاطن). (المصدر: IPCC, 2022).



الشكل 6.2. الاتجاه البعيد المدى لمصادر انبعاثات CO2 ذات المنشأ البشري وعلاقتها بإمدادات الطاقة الأولية (Gt: جيجاطن) (المصدر: IPCC, 2022).

الاحتباس الحراري إلى 1.5°C ونسبة جيدة من 1150 ± 220 جيجاطن من CO2 والتي تقدر بأنها الميزانية للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى أقل من 2°C. وتأتي هذه الانبعاثات من مصادر مختلفة، ولكن المساهم الرئيسي هو الوقود الأحفوري، حيث انه المصدر الرئيسي للطاقة في العالم (Vooradi et al., 2018). وكما هو مبين في الشكل 6.2، فإن المصادر الرئيسية لانبعاثات CO2 بالترتيب التنازلي هي الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي. ومن المهم الإشارة إلى أن مساهمة

مصادر الطاقة المتجددة، وهي الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والوقود الحيوي، في الانبعاثات والتغيرات في استخدام الأراضي لم تُضمن بشكل صريح في الشكل 6.2. ومع ذلك، فإن هذه المساهمة قدرت بأنها محدودة للغاية وفق دراسة حديثة بينت أن انبعاثات دورة حياة توليد كهرباء الرياح والطاقة الشمسية تتراوح بين 2.5-10% من انبعاثات توليد الكهرباء باستخدام الغاز الطبيعي (NREL, 2021). وتمت مؤخراً دراسة انبعاثات الهواء الناتجة عن صناعة تكرير النفط العربية، وتبين أنها تنتج في الغالب من احتراق الوقود في سخانات العمليات. كما لوحظ أنه وُضعت خطط وطنية لخفض الانبعاثات، وفُرضت الأنظمة البيئية في معظم الدول العربية. وقد اتخذت معظم المصافي في الدول العربية تدابير لتخفيض الانبعاثات من خلال إدخال أنظمة إدارة البيئة وتحديث أنظمة التحكم وتحسين أداء سخانات العمليات وتحسين كفاءة الطاقة بشكل عام (عماد مكي، 2018).

## 2.2. مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة: جانب الطلب

وفيما يتعلق بجانب الطلب على الطاقة، يتضمن الجدول 1.2 بيانات حول انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة حسب طلب القطاعات الرئيسية والفرعية لعام 2019 إضافة إلى إعطاء نظرة عامة على الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة الموزعة بين قطاعات الطلب المختلفة والقطاعات الفرعية. ويبين الشكل 7.2 الاتجاهات التاريخية لانبعاثات الغازات الدفيئة في الثلاثين عاماً الماضية، بينما يشير الشكل 8.2 إلى أن الدافع الرئيسي لزيادة الانبعاثات هو الزيادة في نصيب الفرد من الناتج المحلي الإجمالي والذي يرتبط مباشرةً باستهلاك الطاقة. وتباطأت الزيادة خلال الفترة 2010-2019 بسبب انخفاض استخدام الطاقة لكل وحدة من الناتج المحلي الإجمالي في جميع مناطق العالم تقريباً، حيث يرجع الانخفاض في كثافة الطاقة بشكل أساسي إلى الابتكار التكنولوجي والتنظيم وزيادة الكفاءة الاقتصادية (IPCC, 2022). ولفهم اتجاهات الانبعاثات بشكل أكبر، من المهم دراسة الانبعاثات الصادرة عن مختلف قطاعات الطلب والقطاعات الفرعية عن كثب.

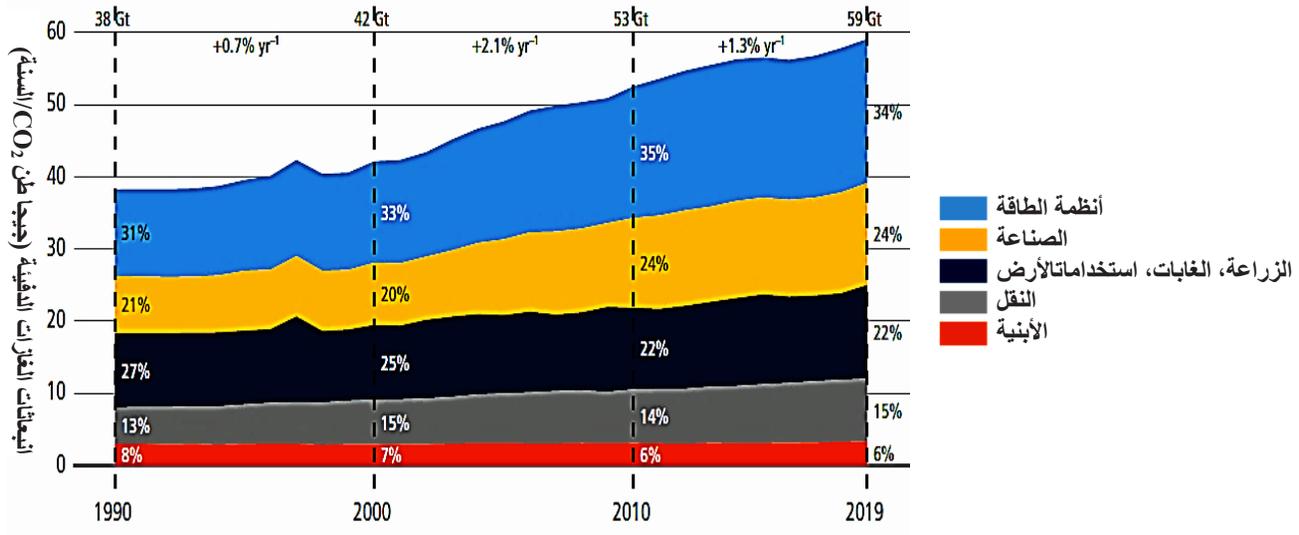
توضح الأشكال 9.2 – 11.2 الاتجاهات التاريخية لأنظمة الطاقة والصناعة وقطاعي المباني والنقل، على التوالي، بالإضافة إلى العناصر الرئيسية للانبعاثات لكل قطاع، ويمكن من خلال هذه الأرقام تحديد مساهمات القطاعات الفرعية الرئيسية، وأُخصت هذه المساهمات بدقة من قبل مجموعة المستثمرين المؤسسية للتغير المناخي (IIGCC, 2022) في الشكل 12.2 لعام 2016. ويتضح من الأشكال 8.2-12.2 أن المصادر الرئيسية للانبعاثات التي تزيد عن 1 جيجاطن من مكافئ CO<sub>2</sub> سنوياً هي النقل البري وتدفئة المباني السكنية والتجارية، ومصانع الحديد والصلب، وصناعة

الأسمت، والصناعات الكيماوية والبتروكيماوية، والانبعاثات الهاربة من صناعة الطاقة، واحتراق الوقود غير المخصص.

الجدول 1.2. انبعاثات غازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة حسب طلب القطاعات والقطاعات الفرعية لعام 2019 (IPCC, 2022).

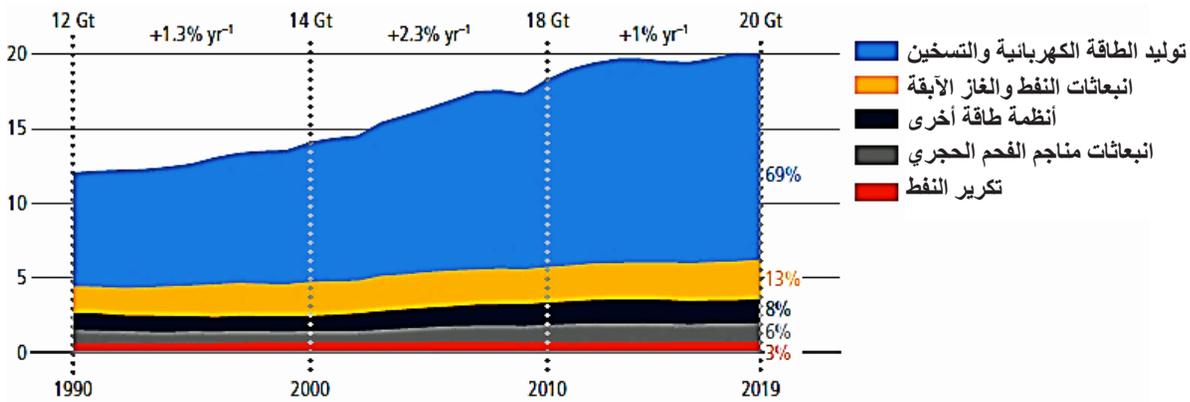
الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة	الانبعاثات المباشرة (%)	مصدر الانبعاثات
الإجمالي 16%؛ موزعة على القطاعات الفرعية: انبعاثات غير الـ CO <sub>2</sub> (جميع المباني) 0.1%؛ المباني غير السكنية 5.9%؛ المباني السكنية 11%	6	المباني
الإجمالي 15%؛ موزعة على القطاعات الفرعية: الشحن الداخلي 0.3%؛ السكك الحديدية 0.4%؛ الطيران المحلي 0.7%؛ أخرى (النقل) 0.9%؛ الطيران الدولي 1.1%؛ الشحن الدولي 1.3%؛ المركبات 10%	15	النقل
الإجمالي: 22%؛ موزعة على القطاعات الفرعية: 22% (حرق الكتلة الحيوية (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ) 0.1%؛ استخدام الأسمدة الاصطناعية (N <sub>2</sub> O) 0.75%؛ إدارة السماد العضوي (N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> ) 0.7%؛ زراعة الأرز (CH <sub>4</sub> ) 1.7%؛ إدارة التربة والمراعي (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O) 2.5% - التخمر المعوي (CH <sub>4</sub> ) 5%؛ CO <sub>2</sub> ناتج عن استخدام الأراضي والتغيير في استخدامها والغابات 11%	22	الزراعة والغابات واستخدامات الأراضي الأخرى (AFOLU)
الإجمالي: 34%؛ موزعة على القطاعات الفرعية: الأسمت (عملية الإنتاج فقط) 2.6%؛ النفايات 3.9%؛ كيماويات 6.3%؛ المعادن 7.8%؛ صناعات أخرى 13%	24	الصناعة
الإجمالي: 12%؛ موزعة على القطاعات الفرعية: تكرير البترول 1.1%؛ انبعاثات الهاربة من تعدين الفحم الحجري 2.2%؛ انبعاثات النفط والغاز الهاربة 4.4%؛ أخرى (أنظمة الطاقة) 4.7%	10	الطاقة الأخرى
0	23	الكهرباء والتسخين **

\*\* توزيع الكهرباء والتسخين على القطاعات: أنظمة الطاقة ~2%؛ الصناعة 10%؛ النقل ~1%؛ والمباني 10%

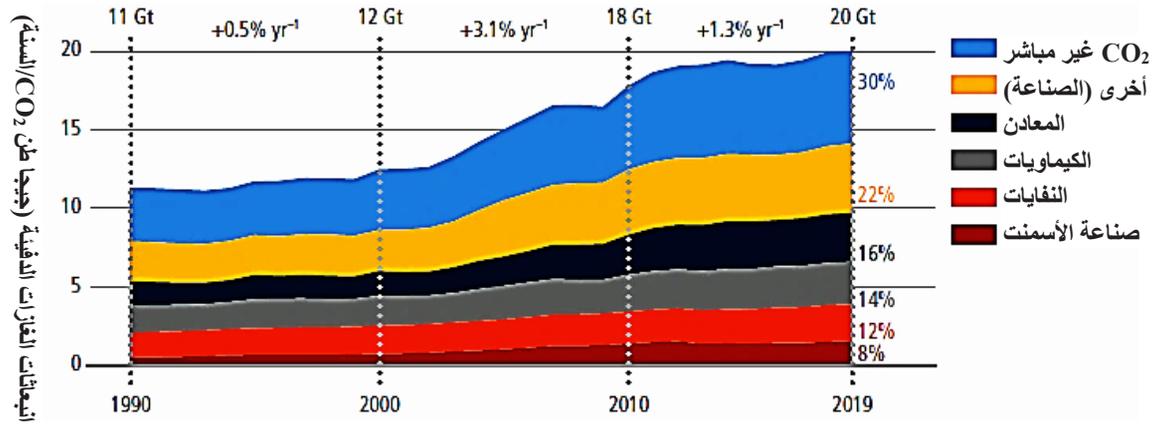


بجائزة أوليك  
البحث الفائق

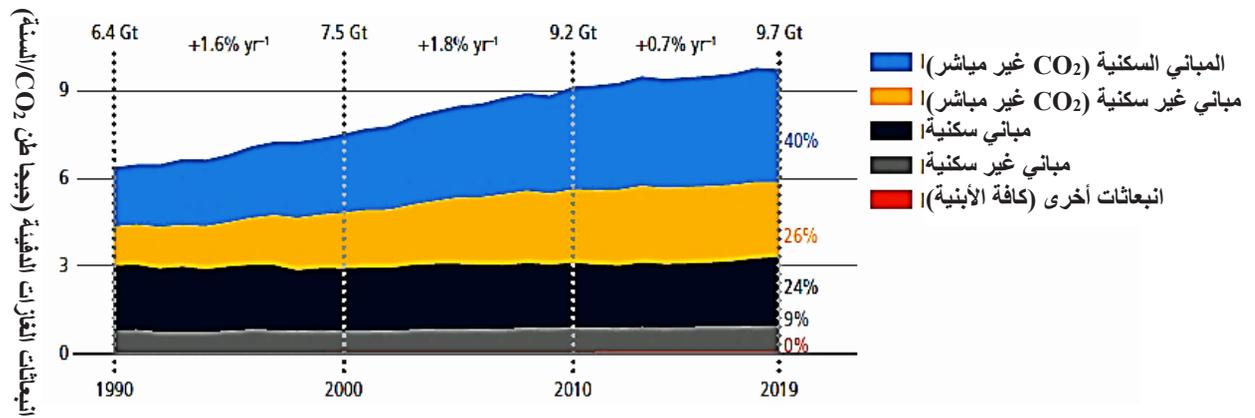
الشكل 7.2. الاتجاهات التاريخية لانبعاثات الغازات الدفينة من القطاعات المختلفة (أنظمة الطاقة تشمل الكهرباء والحرارة والطاقة الأخرى تقدر بـ 33-34%؛ Gt: جياطن) (المصدر: IPCC, 2022).



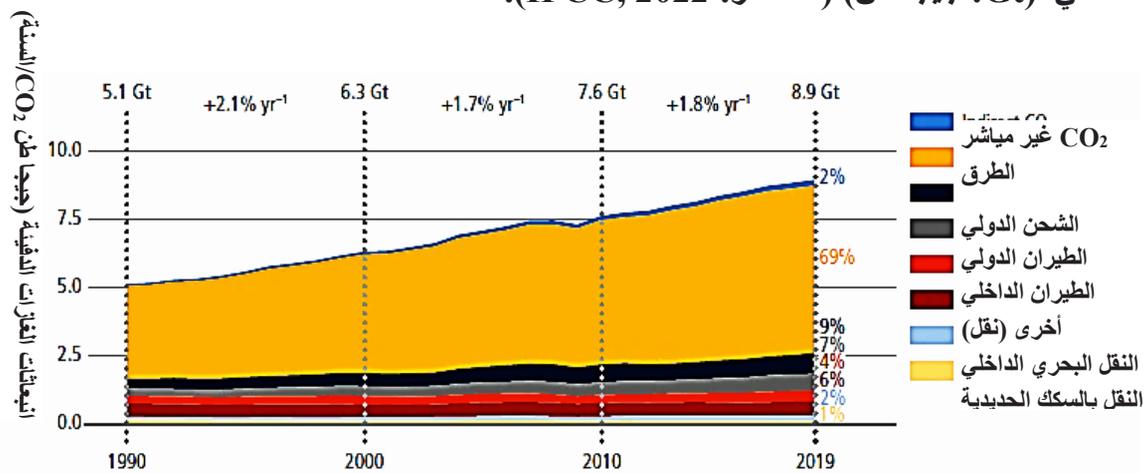
الشكل 8.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفينة ضمن أنظمة الطاقة العالمية (Gt: جياطن) (المصدر: IPCC, 2022).



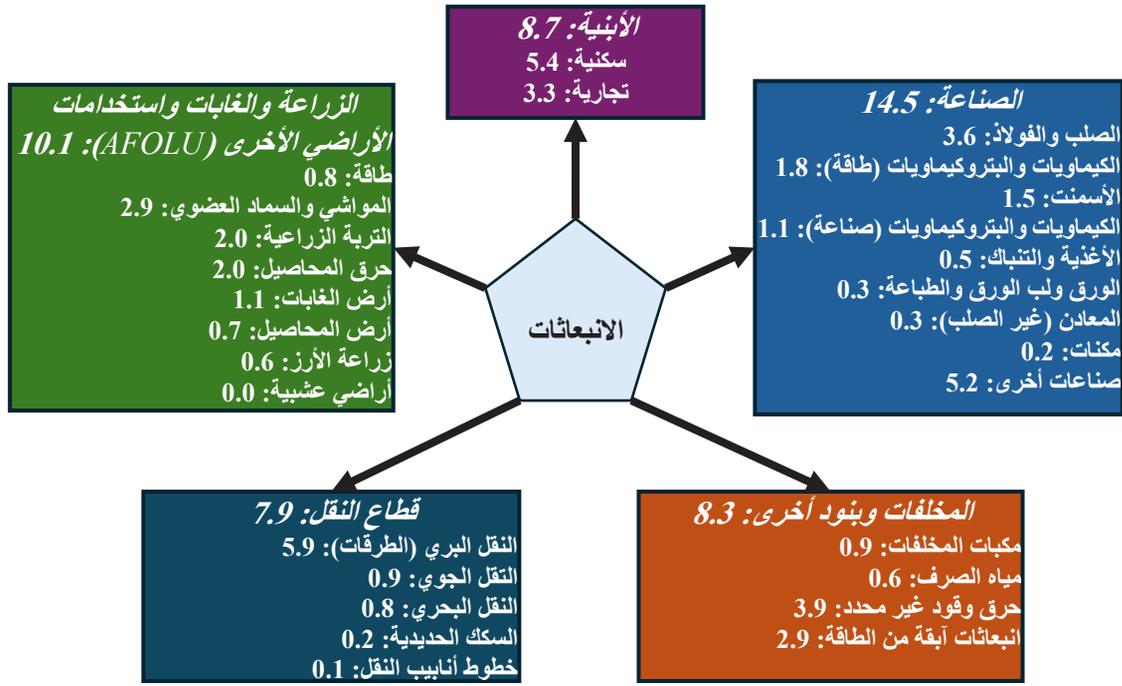
الشكل 9.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع الصناعة العالمي (Gt: جيجا طن) (المصدر: IPCC, 2022).



الشكل 10.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع المباني العالمي (Gt: جيجا طن) (المصدر: IPCC, 2022).



الشكل 11.2. اتجاهات ومحركات انبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة في قطاع النقل العالمي (Gt: جيجا طن) (المصدر: IPCC, 2022).



الشكل 12.2. انبعاثات الغازات الدفيئة حسب القطاع في عام 2016 (الأرقام لكميات الانبعاثات بالجيجابطن) (المصدر: IPCC, 2022).

ويتضمن الجدول 2.2 بيانات مختصرة عن مصادر الانبعاثات الثابتة الرئيسية. ومن الواضح أن توليد الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري، ومصافي التكرير، وإنتاج الإيثيلين، وصناعة الأسمنت، وصناعات الحديد/الصلب هي المصادر الرئيسية للانبعاثات الثابتة. ومن الواضح أن هناك اختلافات في بعض البيانات المقدمة من الدراسات المختلفة، وذلك بسبب النماذج المستخدمة في تقدير الانبعاثات. ومع ذلك، وبغض النظر عن هذه الاختلافات، فإن الغرض الرئيسي من هذه المراجعة هو تحديد قطاعات الانبعاثات الرئيسية التي يتعين عليها اتخاذ تدابير للحد من انبعاثاتها.

إن الاستعراض الموجز أعلاه لظاهرة الاحتباس الحراري وارتباطها بانبعاثات الغازات الدفيئة، وخاصةً انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، يوجب على سوق الطاقة العالمية المرور بمرحلة انتقالية نحو موارد الطاقة منخفضة الانبعاثات. و تناول هذا الموضوع بشكل جيد تقرير حديث يتعلق بإزالة الكربون من نظام الطاقة الأمريكي (National Academies of Sciences & Medicine, 2021). و حدد التقرير مسارين محتملين لتحقيق هذا الهدف. المسار الأول هو تسريع تطوير مصادر إمدادات الطاقة المتجددة والبدلية التي لا تطلق أي انبعاثات أو تكون منخفضة للغاية. وتشمل هذه المصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الجيولوجية والطاقة الكهرومائية والوقود الحيوي والطاقة

النوية. أما المسار الثاني فيسمح لنظام إمدادات الطاقة الحالي بالتطور مع تنوع موارد الطاقة الأولية المتاحة مع التركيز على التقاط الكربون وتخزينه كوسيلة للقضاء على انبعاثات الغازات الدفيئة.

الجدول 2.2. تعريف بمصادر CO<sub>2</sub> الثابتة العالمية الكبيرة (< 0.1 مليون طن CO<sub>2</sub> سنوياً)  
(Ghiat and Al-Ansari, 2021)

متوسط الانبعاثات لكل مصدر (مليون طن من CO <sub>2</sub> /المصدر)	% من إجمالي انبعاثات CO <sub>2</sub>	تركيز CO <sub>2</sub> في غاز المداخن (% من حيث الحجم)	مصادر CO <sub>2</sub>
الطاقة الكهربائية المولدة من الوقود الأحفوري			
3.94	59.69	12-15	غلايات فحم حجري
1.01	5.62	7-10	غلايات غاز طبيعي
0.77	5.68	3	توربينات الغاز الطبيعي
صناعة بتروكيماوية			
0.58	0.84	100	إنتاج الأمونيا
1.08	1.93	12	إنتاج الإيثيلين
—	0.37	—	معالجة الغاز الطبيعي
0.79	6.97	20	إنتاج الأسمت
صناعة الحديد والصلب			
3.5	4.71	15	مصانع الصلب المتكاملة
0.17	0.12	—	عمليات أخرى
1.25	5.97	3-13	مصافي البترول

ومن الواضح أن المسار الأول المذكور أعلاه سيتطلب تغييرات جذرية في جانب الطلب على الطاقة، حيث من المتوقع أن تكون الكهرباء والهيدروجين العاملان الرئيسيان في نقل الطاقة. ويواجه هذا المسار تحديات عديدة، في مقدمتها قدرة الصناعات المرتبطة بتوليد الطاقة المتجددة على تلبية إجمالي الطلب العالمي على الطاقة، مع الأخذ في الاعتبار أن إمدادات الطاقة المتجددة لم تتمكن من الاستحواذ إلا على 5% فقط من إمدادات الطاقة العالمية خلال العقود الثلاثة الماضية. وتشمل التحديات الأخرى القدرة المحدودة على توسيع نطاق الطاقة الكهرومائية، والمنافسة بين إنتاج الوقود الحيوي وإنتاج الغذاء، والمعارضة التي تواجهها الطاقة النووية في العديد من الدول. أما بالنسبة للمسار الثاني، ووفقاً

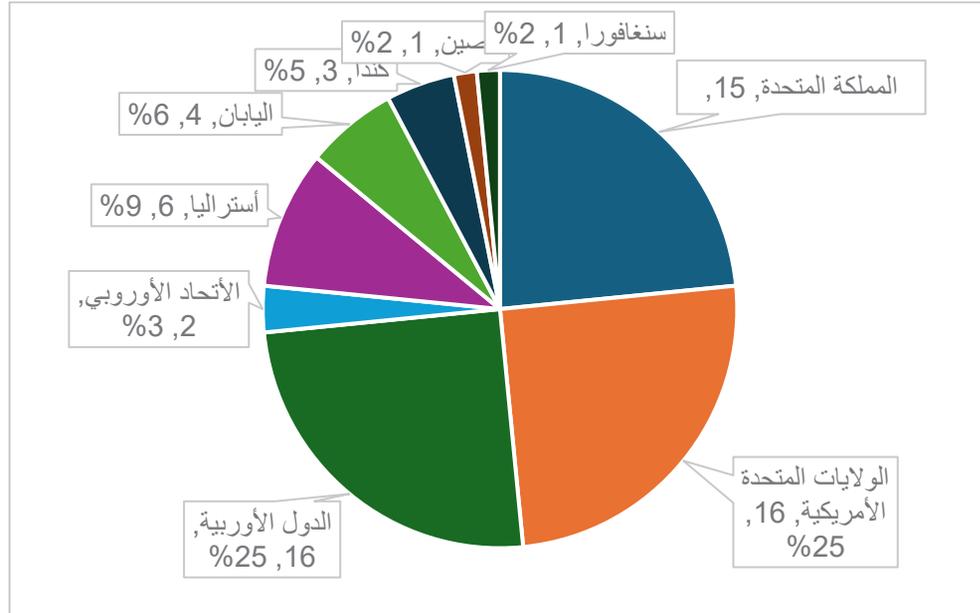
للعديد من الدراسات ( Boot-Handford et al., 2014; Bui et al., 2018; MacDowell et al., 2010; National Academies of Sciences & Medicine, 2021)، فإن التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه ضروري لتحقيق أهداف تغير المناخ، من خلال إزالة الكربون من القطاع الصناعي وتوفير طاقة حرارية وطاقة كهربائية خالية من الكربون أو منخفضة الكربون. وبالامكان أيضاً دعم الإزالة الصافية للـ CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي، وقد طورت بالفعل العديد من تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه بشكل جيد؛ ومع ذلك، فإنها تتطلب انتشاراً على نطاق يمكنها من تلبية أهداف الحد من الانبعاثات المحددة لعام 2050. ولمواجهة هذا التحدي، يجب على الصناعة تحديد التحديات البحثية الرئيسية التي ينبغي معالجتها للتغلب على العقبات القائمة، ويتعين على صناعة الطاقة أيضاً أن تعمل على وضع الخطط وبذل الجهود للتغلب على المعوقات السياسية والتجارية وتسريع انتشار تكنولوجيا التقاط وتخزين الكربون على نطاق واسع.

### الفصل 3 – سياسات وسيناريوهات التقاط وتخزين الكربون (CCS)

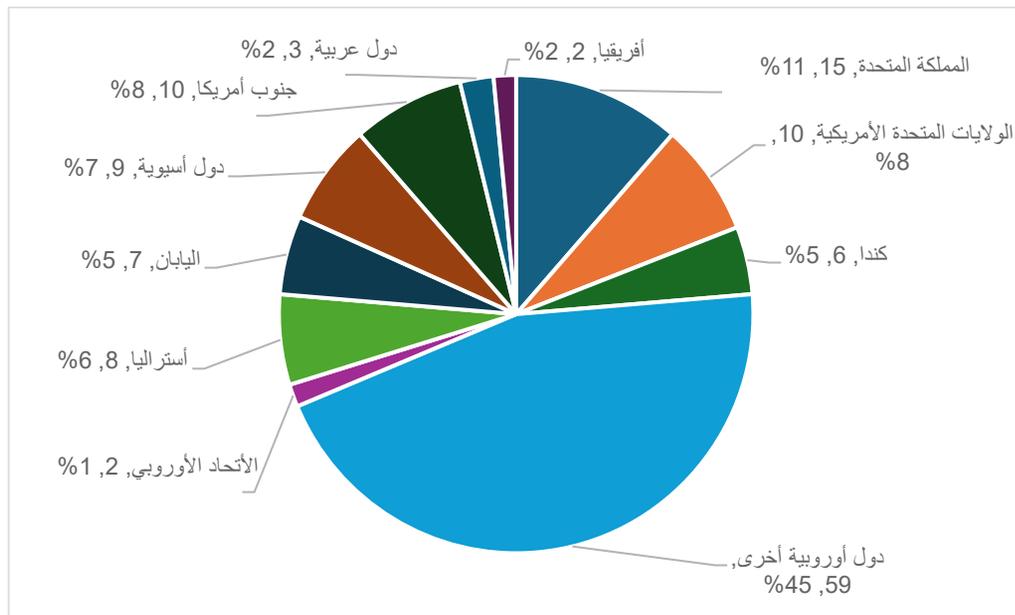
تتضمن قاعدة بيانات السياسات التي رصدتها الوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2023b) 135 سياسة معمول بها أو مخطط لها أو معلن عنها في إطار الموضوع العام لالتقاط واستخدام الكربون وتخزينه. وعندما تصنف هذه السياسات وفق الأغراض المستهدفة وبالتحديد تركيزها على تقنيات "التقاط" أو "نقل" أو "تخزين" ثاني أكسيد الكربون أو الالتقاط المباشر لـ CO<sub>2</sub> في الهواء (DAC)، أو العمليات والتقنيات الجيولوجية المعمول بها، فإن إجمالي السياسات ينحصر بـ 64 سياسة واستراتيجية. ويبين الشكل 1.3 توزيع هذه السياسات بين مختلف الدول. ومن المثير للاهتمام أن هذه الدول الفاعلة تستأثر بنسبة مئوية كبيرة من استهلاك الطاقة وأن الولايات المتحدة والمملكة المتحدة هما الدولتان الرائدتان في اتخاذ المبادرات وتبني السياسات اللازمة لإدارة انبعاثات CO<sub>2</sub> بشكل أفضل. كما تجدر الإشارة إلى أن الصين قد سنت سياسة واحدة فقط كما ورد في قاعدة بيانات الوكالة الدولية للطاقة.

ونظراً لأهمية الهيدروجين والدور المتوقع أن يلعبه في تحول الطاقة الحالي (Energy Transition)، وبالأخص الهيدروجين الأزرق المنتج من الوقود الأحفوري مع التقاط وتخزين الـ CO<sub>2</sub>، مما سيؤدي إلى زيادة في معدل انبعاثات الـ CO<sub>2</sub>، بشكل مركز من المصادر الصناعية ويخفف من الانبعاثات المشتتة في الغلاف الجوي والناجمة عن استخدامات الوقود الأحفوري المتفرقة كوقود موصلات أو لتلبية احتياجات تسخين المباني السكنية أو التجارية. وبالتالي تمت مراجعة السياسات المتعلقة بالهيدروجين، ولوحظ أن هذه السياسات كما تشير قاعدة بيانات الوكالة الدولية للطاقة تصل إلى إجمالي 258 سياسة معمول بها أو مخطط لها أو معلن عنها. وعندما صنفت هذه السياسات حسب أغراضها أو التكنولوجيا وبالتحديد بتكنولوجيات التحليل الكهربائي لإنتاج لهيدروجين، وتكنولوجيات نقله، وتوليد الكهرباء باستخدامه، وتكنولوجيات توليد الحرارة والطاقة المشتركة، تم الحصول على إجمالي 134 سياسة واستراتيجية. ويبين الشكل 2.3 توزيع هذه السياسات بين مختلف الدول والمناطق. ومن الواضح أن المملكة المتحدة تحافظ على التوازن ما بين سياسات التقاط وتخزين CO<sub>2</sub> وسياسات الهيدروجين، في حين سنت الولايات المتحدة المزيد من سياسات التقاط وتخزين الكربون مقارنةً بسياسات الهيدروجين.

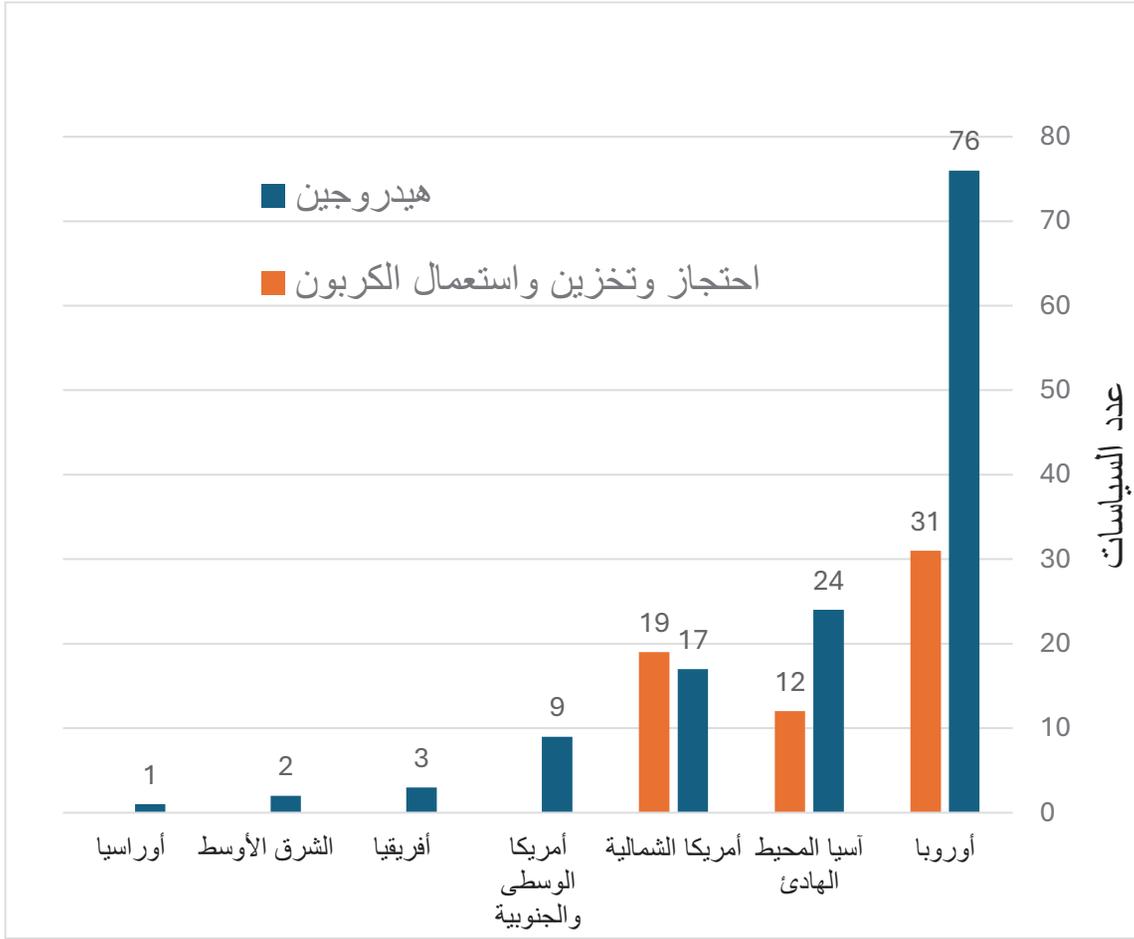
ويقدم الشكل 3.3 نظرة حول ملامح السياسات في مناطق العالم المختلفة فيما يتعلق بالتقاط وتخزين الكربون والهيدروجين. ومن الجدير بالذكر أن الدول الأوروبية والاتحاد الأوروبي قد سنوا 76 سياسة فيما يتعلق بالهيدروجين، منها 15 سياسة سنتها المملكة المتحدة. وبالمقارنة، أصدرت الدول الأوروبية والاتحاد الأوروبي ما مجموعه 33 سياسة تتعلق بالتقاط وتخزين الكربون، منها 15 سياسة سنتها المملكة المتحدة. علاوةً على ذلك، فإن عدد الدول الأوروبية التي لديها سياسات تتعلق بالهيدروجين قد يصل إلى 20 دولة، في حين أن الدول التي لديها سياسات تتعلق بالـ CCUS لا يتجاوز 9 دول.



الشكل 1.3. التوزيع النسبي لسياسات واستراتيجيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المعمول بها بين مختلف الدول في العالم. وتشمل الدول الأوروبية التي أقرت سياسات بهذا الخصوص: النرويج، والدنمارك، والسويد، وفنلندا، وألمانيا، وبلجيكا، وهولندا، وإستونيا (أسم الدولة، عدد السياسات، والنسبة المئوية من إجمالي السياسات في العالم). (IEA, 2023b)



الشكل 2.3. التوزيع النسبي لسياسات واستراتيجيات الهيدروجين المعمول بها بين مختلف الدول في العالم. ويبلغ عدد الدول الأوروبية التي أقرت سياسات حول هذا الموضوع 19 دولة (أسم الدولة، عدد السياسات، والنسبة المئوية من إجمالي السياسات في العالم). (IEA, 2023b)

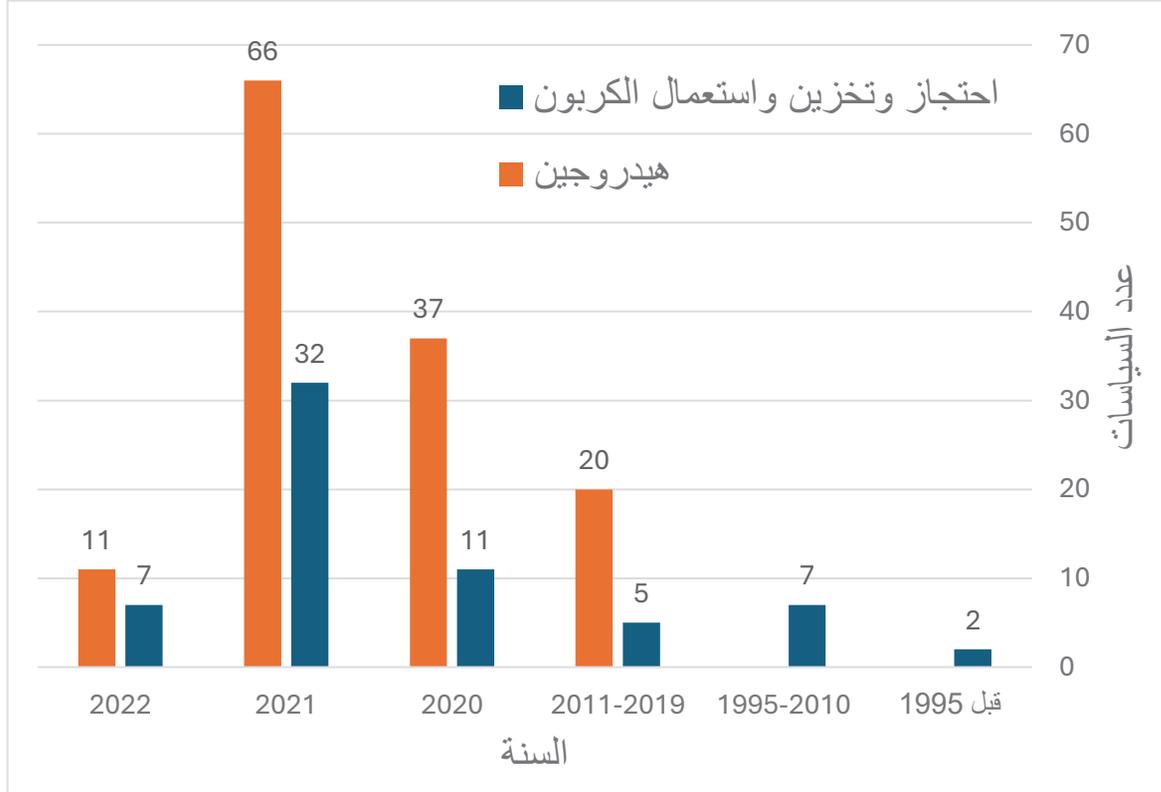


الشكل 3.3. توزيع السياسات المتعلقة بالتقاط وتخزين الكربون والهيدروجين بين المناطق المختلفة من العالم (IEA, 2023b)

ويوضح الشكل 4.3 الاتجاهات التاريخية لإصدار السياسات والاستراتيجيات في جميع أنحاء العالم في مجال التقاط واستخدام الكربون وتخزينه ومجال الهيدروجين. ومن المثير للاهتمام ملاحظة أن غالبية السياسات صدرت بعد عام 2019، حيث بلغ عدد السياسات الصادرة بشأن التقاط وتخزين الكربون والهيدروجين في عام 2022 و7 و11 سياسة فقط، على التوالي، ولكن من المرجح أن تزيد هذه الأرقام عند تحديث قاعدة البيانات خلال عام 2023.

وللوصول إلى فهم أفضل لاتجاهات السياسات في جميع أنحاء العالم، فُحصت توجهات السياسات الصادرة في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة عن كثب، لأنها تمثل الاتجاهات العالمية العامة. فبالنسبة للولايات المتحدة، تضمنت السياسات التي أقرت 3 سياسات تعبر عن تشريعات إدارية تقدم التوجيه للوكالات الحكومية فيما يتعلق بقضايا التقاط  $CO_2$  وتخزينه، وسياسة واحدة تحدد أهدافاً لإزالة الكربون بشكل مباشر موجهة نحو الابتكار البحثي والتصنيع ودعم الانتشار، أما السياسات الـ 12 المتبقية فتركز

على أشكال مختلفة من الحوافز المالية بما في ذلك المدفوعات والتمويل والمنح والإعفاءات الضريبية. وتستهدف هذه السياسات من حيث التكنولوجيات تخزين ثاني أكسيد الكربون، ونقله، والتقاطه، والتقاطه مباشرة من الهواء، واستخدامه من خلال الاستخلاص المعزز للنفط.



### الشكل 4.3. الاتجاهات التاريخية للسياسات الصادرة في جميع أنحاء العالم بشأن التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والهيدروجين (IEA, 2023b).

أما بالنسبة للمملكة المتحدة، فهناك 6 سياسات هي عبارة عن خطط استراتيجية وتشريعات إدارية تحدد عدد من الأهداف، وسياسة واحدة تدعم الجهود التعاونية مع الاتحاد الأوروبي في مجال البحث والتطوير والابتكار في مجال التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، أما السياسات الثماني المتبقية فتتعلق بتوفير حوافز مالية على شكل منح ومدفوعات، وإعفاءات ضريبية، وتمويل. وتتمثل أهداف السياسات من حيث التكنولوجيات المستهدفة التقاط ثاني أكسيد الكربون ونقله وتخزينه وكذلك التقاطه المباشر من الهواء. ويبدو أن البطء والتردد في إقرار سياسات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه أثر سلبياً على وتيرة تنفيذ مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه (Bataille et al., 2015). وتناول هذا البحث تقييم تقديرات جدوى وتكلفة

التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المرتبطة بتوليد الكهرباء وبعض التطبيقات الصناعية في ألبرتا/كندا التي تتمتع بإمكانات عالية لالتقاط وتخزين الكربون وأثر السياسات وحالة التردد وعدم اليقين السائدة في حينها حول هذا الموضوع. وخلص البحث إلى أن محدودية التطبيق الواسع لتكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه لا يعود فقط إلى الأمور المرتبطة بالتكنولوجيا وحدها، وإنما أيضاً إلى انعدام الترابط بين الأهداف الحكومية ومستوى صرامة السياسات الحالية والمتوقعة. ومن ثم فإن الاستثمار في التقاط وتخزين الكربون، أو غير ذلك من الإجراءات المكلفة التي تستهدف تخفيض الانبعاثات إلى المستوى المطلوب، لن يحدث ما لم تعمل الحكومات على خلق بيئة من السياسات أكثر صرامة واستدامة من البيئة الحالية. وبالتالي ستبقى آفاق التوسع في تطبيق التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في مرحلة من عدم اليقين. ومع الأخذ في الاعتبار سياسات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المعتمدة، فمن الواضح أن هناك حاجة قوية لمراجعة السياسات الحالية وتقديم دعم متضافر لتطوير سياسات أكثر دعماً. وينبغي أن تستند السياسات الجديدة إلى مراجعة متعمقة للجاهزية التكنولوجية لمختلف تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، والمساهمة المحتملة لكل تكنولوجيا في الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، والتحديات الحالية التي تمثل عوائق أمام انتشار تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه على نطاق واسع. كما يتوجب وضع سياسات وتشريعات تتعلق بإنتاج الهيدروجين الأزرق وبالتحديد ارتباطه مع بعض تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه لدعم التوسع المحتمل لهذا المسار ضمن تحول الطاقة الحالي.

## الفصل 4 – إزالة الكربون من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة

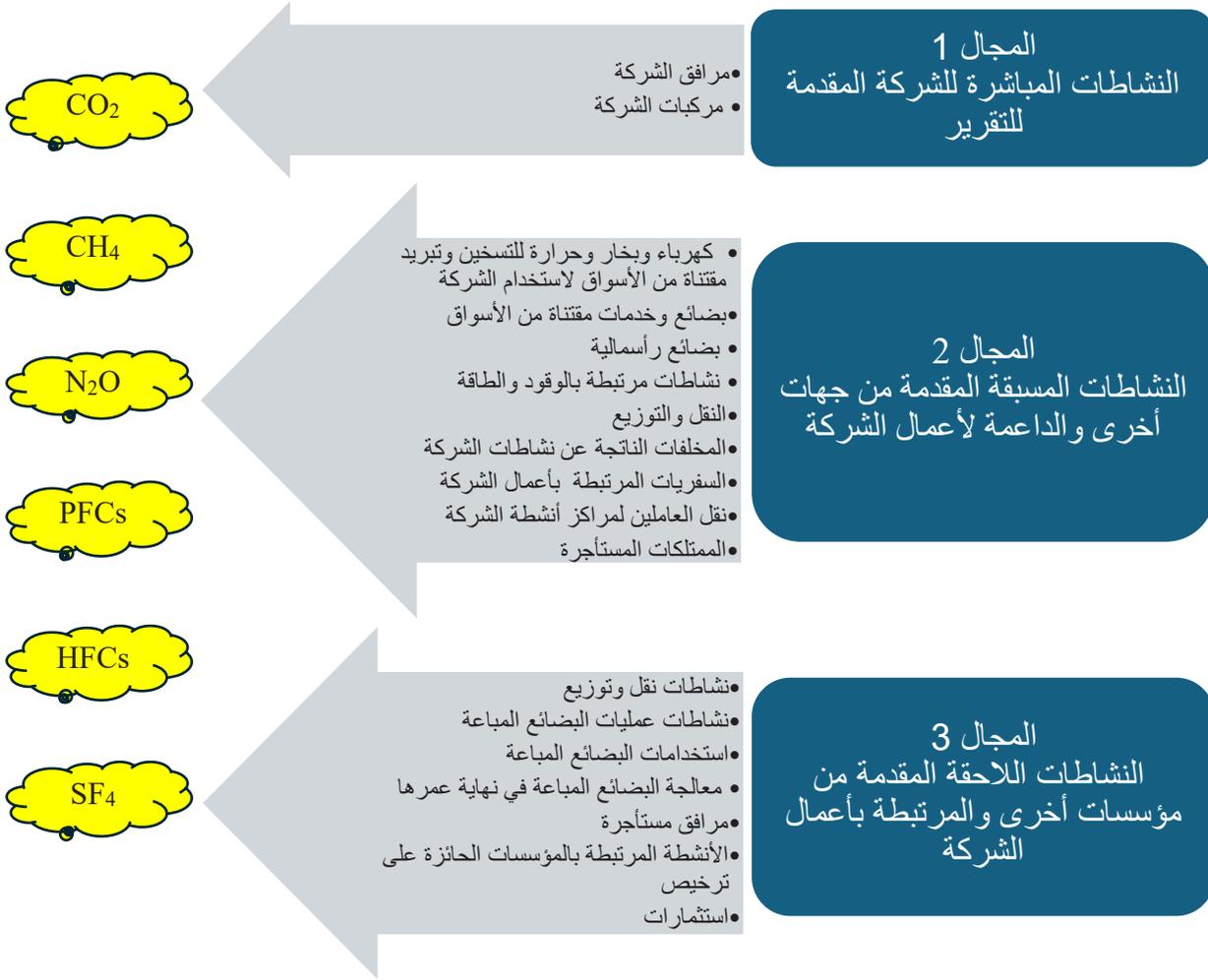
- 4.1. إزالة الكربون من صناعات النفط والغاز
- 4.2. إزالة الكربون من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة
  - 4.2.1. إزالة الكربون من صناعة الحديد والصلب
  - 4.2.2. إزالة الكربون من صناعة الأسمنت

يشير مصطلح "إزالة الكربون من الوقود الأحفوري" هنا إلى الجهود المبذولة لتخفيض انبعاثات الكربون عبر سلسلة قيمة الوقود الأحفوري، وتشمل هذه الجهود نشاطات شركات النفط والغاز والفحم الحجري بالإضافة إلى الموردين والعملاء المختلفين لهذه الشركات المرتبطة بانبعاثات الـ CO<sub>2</sub>. ومن المنطقي أن تتبع خيارات إزالة الكربون من الوقود الأحفوري من المصادر الرئيسية للانبعاثات المنسوبة إليها (الجدول 1.4). ويتم حالياً تتبع الانبعاثات من خلال بروتوكولات قياسية. ويوفر بروتوكول الغازات الدفيئة، الذي طور بشكل مشترك من قبل معهد الموارد العالمية (World Resources Institute (WRI) ([/https://www.wri.org](https://www.wri.org)) ومجلس الأعمال العالمي للتنمية المستدامة (World Business Council for Sustainable Development) ([/https://www.wbcsd.org](https://www.wbcsd.org))، نظرة عامة حول الانبعاثات المختلفة المرتبطة بالأنشطة البشرية كما هو موضح في الشكل 1.4، والمنهجية التي ينبغي استخدامها لتتبع الانبعاثات واستهداف خفضها. استناداً إلى الشكل 1.4، وتشمل الغازات الدفيئة كلاً من CO<sub>2</sub>، والميثان (CH<sub>4</sub>)، وأكسيد النيتروز (N<sub>2</sub>O)، ومركبات الهيدروفلوروكربون (HFCs)، والمركبات الكربونية الفلورية المشبعة (PFCs)، وسداسي فلوريد الكبريت (SF<sub>6</sub>). وتنقسم الانبعاثات إلى ثلاث فئات للشركات والمؤسسات وفقاً لبروتوكول الغازات الدفيئة (WRI, 2004) وهذه الفئات هي:

– **انبعاثات النطاق 1.** وهي الانبعاثات "المباشرة" الصادرة عن الأصول المملوكة أو المشغلة من قبل الشركة أو الجهة المعنية. ويمكن أن تكون نتيجة احتراق الوقود في الغلايات والأفران وتشغيل الآلات لتصنيع المنتجات وقيادة المركبات وتدفئة المباني وتشغيل أجهزة الكمبيوتر. وتتمتع الشركة أو الجهة المعنية بالسيطرة المباشرة على هذه الانبعاثات، حيث أنها تتولد من مصادر تمتلكها أو تستخدمها الشركة، وعادةً ما تكون المصادر مرافق للشركة (المصانع والمكاتب)، والتي تشمل معدات توليد الكهرباء والتدفئة والمبردات والمرافق الزراعية وأساطيل النقل والانبعاثات الهاربة.

الجدول 1.4. مكونات غازات الانبعاث لمصادر انبعاثات مختارة (Zeng et al., 2022)

الهواء	Syngas		الأغذية الزراعية / النفايات الصناعية e	النفايات الزراعية للغاز الحيوي	النفايات المنزلية	أفران الأسمنت	NGCC	دخان		حرق الفحم الحجري	المكونات (جم/جم)
	كهرباء تامبا IGCC	تغويز الفحم الحجري في نهر وياش						IGCC	حرق النفايات		
20.946				<0.5	0-1	7	14	12	14-7	6	O <sub>2</sub>
78.084	3.3			0-1	0-5	59	76	66	الغازات المتبقية	76	N <sub>2</sub>
0.041	14.4	17.1-14.9	26	33-19	38-34	%33-14	3	7	12-6	11	CO <sub>2</sub>
0.934	0.3		6	6	6	13	6	14	18-10	6	H <sub>2</sub> O
	0.9					1	1	1	1	1	AR
	0.1	2.2-1	68	75-60	60-50						CH <sub>4</sub>
	38.3	34.4-32.3									H <sub>2</sub>
	42.7	46.7-42.2									CO <sub>2</sub>
						1200-5		-10	-200	-300	SO <sub>2</sub> (جزء في المليون)
								200	1500	5000	
						-100	300-10	-10	-200	-500	NOx (جزء في المليون)
						1500	100	100	500	800	
	200	107-17	400	-3000 10,000	900-100						H <sub>2</sub> S (جزء في المليون)
	10	162-9									(COS) (جزء في المليون)



الشكل 1.4. تفاصيل محتوى تقرير انبعاثات الغازات الدفيئة عبر سلسلة القيمة موزعة على المجالات الثلاثة لأنشطة الشركات المباشرة وغير المباشرة (المصدر: Bhatia, 2011).

- **انبعاثات النطاق 2.** وهي انبعاثات "غير مباشرة" تنشأ عن الطاقة التي يُستحوذ عليها من الغير، مثل شراء الكهرباء والبخار والحرارة والمياه المبردة. فعلى الرغم من أن انبعاثات النطاق 2 تحدث فعلياً في المنشأة التي تتولد فيها، إلا أنها تحتسب في مخزون الغازات الدفيئة الخاص بالشركة أو الجهة المستفيدة نتيجةً لاستخدامها لهذه الطاقة لدعم أنشطتها. وتجدر الإشارة إلى أن تركيب الألواح الشمسية أو الحصول على مصادر الطاقة المتجددة بدلاً من استخدام الكهرباء المولدة باستخدام الوقود الأحفوري من شأنه أن يقلل من انبعاثات النطاق 2 للشركة المستفيدة.
- **انبعاثات النطاق 3.** هذه الانبعاثات هي نتيجة لأنشطة من الأصول التي لا تملكها أو تسيطر عليها الشركة أو الجهة المعدة للتقرير، ولكنها تؤثر بشكل غير مباشر في سلسلة القيمة الخاصة بالشركة أو الجهة. وهي تشمل جميع المصادر التي لا تقع ضمن النطاق 1 و 2 للشركة أو الجهة وبالتالي

هي انبعاثات غير مباشرة تنتج عن كل نشاط آخر (من قبل الموردين، والموزعين، ومستخدمي المنتجات، وما إلى ذلك) تتعامل معه الشركة لتصنيع ونقل وبيع والاستفادة من منتجاتها. وعلى سبيل المثال، تغطي الانبعاثات في هذا النطاق الانبعاثات التي ينتجها العملاء الذين يستخدمون منتجات الشركة أو تلك التي ينتجها الموردون الذين يصنعون منتجات تستخدمها الشركة. ويتضمن قياس هذه الانبعاثات تتبع الأنشطة عبر نموذج الأعمال بأكمله - أو سلسلة القيمة - من الموردين إلى المستخدمين النهائيين (Barrow, 2013; Bhatia, 2011). فهي غالباً ما تمثل 70-90% من البصمة الكربونية للشركة. وتنقسم انبعاثات النطاق 3 إلى أنشطة أولية أو نهائية، وتتضمن 15 فئة، على الرغم من أن كل فئة ليست ذات صلة بجميع الجهات ذات الصلة:

1. تشمل الأنشطة الأولية السلع والخدمات المشتراة والسلع الرأسمالية والأصول المؤجرة والأنشطة المتعلقة بتوفير الوقود والطاقة وأنشطة التوزيع والنقل والسفر التجاري وتوليد النفايات أثناء التشغيل.

2. تشمل الأنشطة النهائية النقل والتوزيع النهائي للمستخدم النهائي ومعالجة المنتجات المباعة واستخدام المنتجات المباعة ومعالجة المنتجات عند الانتهاء من استخدامها (في نهاية عمرها) والأصول المؤجرة النهائية والامتيازات والاستثمارات.

ووفقاً للبروتوكول، تحتاج الشركات إلى خفض الانبعاثات عبر النطاقات الثلاثة لتحقيق الأهداف المتفق عليها دولياً بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري. والخطوة الأولى في تحديد الانبعاثات هي تعيين حدود الشركة للنطاقات الثلاثة. وعند وضع الحدود التنظيمية، تختار الشركة أسلوباً لتوحيد انبعاثات الغازات الدفيئة ثم تطبق هذا النهج باستمرار لتحديد الكيانات والأصول المدرجة في النطاق 1 والنطاق 2. وللمساعدة في تتبع الانبعاثات، طُورت إرشادات وأدوات تفصيلية لكل فئة (US-EPA, 2023). ومن الواضح أنه يمكن بسهولة قياس انبعاثات النطاق 1 و2 والتحكم فيهما وتقليصهما من خلال اتخاذ بعض الإجراءات مثل استخدام الطاقة المتجددة أو المركبات الكهربائية. وعادةً ما تكون انبعاثات النطاق 3 هي الأصعب في القياس والتقليص، لأنها تغطي الانبعاثات التي ينتجها العملاء الذين يستخدمون منتجات الشركة، وتخضع لسيطرة الموردين أو العملاء، لذا فهي تتأثر بالقرارات المتخذة خارج الشركة. وقد أصدرت وكالة حماية البيئة الأمريكية (US-EPA, 2018) تقريراً عن "الاتجاهات الناشئة في التعامل مع انبعاثات سلسلة التوريد" والذي يوفر بعض الإرشادات للشركات حول كيفية التعامل مع مورديها. واختارت بعض الشركات التأثير على مورديها أو بائعيها بناءً على ممارساتها. بينما ركزت شركات أخرى بشكل أكبر على ما يحدث عندما يستخدم العملاء منتجاتها.

وبمجرد تتبع وقياس انبعاثات شركة ما، تحتاج الشركة بعد ذلك إلى تحديد أهداف للتحكم في الانبعاثات. وتوصي وكالة حماية البيئة الأمريكية (US-EPA, 2023)، بأن تسعى الشركة للالتزام بالأهداف المعلن عنها باستعمال أفضل الممارسات على النحو التالي:

- يجب أن تتضمن الأهداف سنة الأساس وهي السنة التي تبدأ الشركة فيها نشاطات تُتبع تخفيضات الغازات الدفيئة، وسنة الهدف، وهي السنة التي سيتحقق فيها الهدف وذلك في غضون 5 إلى 10 سنوات من سنة الأساس.
- يجب أن تكون الأهداف مقدامة وقوية وتتطلب المعايير تخفيضات في الانبعاثات بنسبة تقارب 2.5% سنوياً للأهداف التي تغطي انبعاثات النطاق 1 و2 وخفض الانبعاثات بنسبة 1.23% سنوياً للأهداف التي تغطي النطاق 1 و2 و3 من الانبعاثات.
- يتوجب أن تكون الأهداف تخفيض مطلق لانبعاثات الغازات الدفيئة، ويجب تحقيق هذا التخفيض خلال فترة زمنية محددة.
- ينبغي أن تشمل الأهداف الانبعاثات المتولدة في جميع الدول التي تنشط فيها الشركة، وليس فقط في موقع واحد أو عدة مواقع.
- ينبغي أن تتناول الأهداف جميع نطاقات الانبعاثات الثلاثة، وينبغي أن تشمل الأهداف جميع انبعاثات النطاقين 1 و2 وأن تشمل على الأقل جزء من انبعاثات النطاق 3.
- يجب أن تتضمن الأهداف المعلنة جميع المعلومات المذكورة أعلاه.

ونشر معهد WRI أيضاً توصيات بشأن منهجية تستهدف تقدير انبعاثات الغازات الدفيئة المحتملة من احتياطات الوقود الأحفوري والإبلاغ عنها وذلك باستخدام عوامل الانبعاثات التي اقترحتها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) ضمن المبادئ التوجيهية الصادرة عن الهيئة (IPCC, 2016; Russell, 2023) والمدرجة في الجدول 2.4. ولم تأخذ المبادئ التوجيهية للـ IPCC الانبعاثات الناجمة عن الاحتراق النهائي فحسب، بل أخذت أيضاً في الاعتبار الانبعاثات المرتبطة بعمليات إنتاج الوقود ومعالجته، إضافة إلى الكربون الذي يمكن تخزينه في منتجات طويلة العمر أو تحت الأرض من خلال التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. ويوضح الشكل 2.4 خطوات تقدير الانبعاثات المحتملة من احتياطات الوقود الأحفوري والإبلاغ عنها التي أوصى معهد WRI باتخاذها لتقدير الانبعاثات من جانب شركات الوقود الأحفوري.

الجدول 2.4. عوامل الانبعاثات الافتراضية من المستوى 1 لفريق IPCC على أساس الكتلة والطاقة، وحيثما أمكن، على أساس الحجم (Russell, 2016).

أساس الحجم			أساس الكتلة	أساس الطاقة (طن)	نوع الوقود الأحفوري <sup>1</sup>
طن CO <sub>2</sub> / برميل نفط مكافئ <sup>4</sup>	طن CO <sub>2</sub> / مليون قدم مكعب <sup>3</sup>	طن CO <sub>2</sub> / برميل <sup>2</sup>	(طن CO <sub>2</sub> / طن الوقود)	TJ / CO <sub>2</sub> ((LHV))	
النفط والغاز الطبيعي					
		0.4	(3.4-3.0) 3.1	(75.5-71.0) 73.3	النفط الخام
			(3.3-2.6) 2.8	(70.4-58.3) 64.2	سوائل الغاز الطبيعي
0.3	-51.6) 53.4 (58.2		(2.9-2.6) 2.7	(58.3-54.3) 56.1	الغاز الطبيعي
		-0.3) 0.4 (0.5	(3.6-2.6) 2.8	(79.2-67.8) 73.3	النفط الصخري
			2.6-1.2	101-94.6	الفحم الحجري

ملاحظات: المستوى 1 هو النهج الأساسي الذي أوصت به IPCC لتقييم الانبعاثات؛ LHV قيمة حرارة التسخين الأدنى؛ (1) الوقود كما حدده IPCC؛ (2) قيم الكثافة المفترضة وهي: 0.8 كجم/لتر للنفط الخام و 1 كجم/لتر للزيت الصخري (GHG Protocol 2015)؛ (3) قيمة الكثافة المفترضة وتبلغ 0.7 كجم/م<sup>3</sup> (GHG Protocol 2015)؛ (4) تم افتراض القيمة 5798.62 قدماً مكعباً من الغاز الطبيعي لكل برميل مكافئ للنفط (BOE).



الشكل 2.4. خطوات تقدير والإبلاغ عن الانبعاثات المحتملة من احتياطات الوقود الأحفوري (Russell, 2016)

- ينصح معهد WRI بضرورة أخذ "التوصيات" التالية بعين الاعتبار:
1. يجب على الشركات الإبلاغ عن إجمالي الانبعاثات المحتملة من جميع الاحتياطات المؤكدة الموجودة.
  2. عندما تعلن الشركات عن أرقام الاحتياطات المحتملة، يجب عليها أيضاً الإبلاغ بشكل منفصل عن إجمالي الانبعاثات المحتملة من جميع الاحتياطات المحتملة الموجودة.
  3. ينبغي الإبلاغ عن الانبعاثات بشكل منفصل حسب الغاز (CO<sub>2</sub> والميثان) ودمجها بحساب قيمة CO<sub>2</sub> مكافئ، على أساس مليون طن متري.
  4. يجب على الشركات الكشف عما إذا كانت تقديرات الانبعاثات المحتملة عدلت لتأخذ في الاعتبار تخزين الكربون في المنتجات غير المتعلقة بالطاقة طويلة الأمد و/أو مشاريع الاستخلاص المعزز للنفط بثاني أكسيد الكربون.
  5. يجب على الشركات الإفصاح عما إذا استبعدت أي عمليات انبعاثات من التقديرات (وبالتحديد الاحتراق الناتج عن الكميات التي تم بيعها، أو الاحتراق الناتج عن الوقود المؤجر، أو الكميات التي لم تباع بسبب الحرق في الموقع (flaring) والفقدان عبر تسربها (leakage)).
  6. يجب على الشركات الإفصاح عن الافتراضات الأساسية، مثل تلك المتعلقة بالاستخدامات أو بفقدان الكميات التي لم تباع أو كميات تخزين الكربون. ويجب عليها أيضاً الإبلاغ عن مصدر عوامل الانبعاث.
  7. إذا تم الإبلاغ عن الانبعاثات ضمن تقرير جرد الغازات الدفيئة الشامل للشركة، فيجب الإبلاغ عن الانبعاثات "المحتملة" كبند منفصل خارج النطاقات الثلاث.
  8. يجوز لشركات النفط والغاز أيضاً تصنيف الانبعاثات المحتملة حسب حالة كل احتياطي (متطور أو غير متطور) وحسب نوع المورد (تقليدي أو غير تقليدي).
  9. يجوز للشركات أيضاً تفصيل تقديرات الانبعاثات المحتملة حسب كل نشاط من الأنشطة المحددة في المبادئ التوجيهية المقترحة.
  10. يجوز للشركات الإبلاغ عن مقاييس كفاءة الغازات الدفيئة للسماح بتتبع تقدم الشركة بمرور الوقت أو إجراء مقارنات بين الشركات. ويمكن أن تشمل هذه المقاييس انبعاثات الغازات الدفيئة المحتملة لكل وحدة من كميات المبيعات (على سبيل المثال، طن مكافئ ثاني أكسيد الكربون/طن فحم حجري أو طن مكافئ ثاني أكسيد الكربون/برميل النفط) (Russell, 2016).

#### 1.4. إزالة الكربون من صناعات النفط والغاز

كما هو مبين في الشكل 7.2، يُعزى ما يقرب من 34% من الانبعاثات إلى أنظمة الطاقة، والتي تتضمن انبعاثات صناعة النفط والغاز والفحم الحجري، بما في ذلك البتروكيماويات، المسؤولة عن ما يقرب من 6% من إجمالي انبعاثات CO<sub>2</sub> العالمية ونسبة جيدة من انبعاثات الميثان عبر قيمتها التسلسلية الشاملة (Bui et al., 2018; IIGCC, 2022). وتعتبر منتجات صناعة النفط والغاز مسؤولة بشكل غير مباشر عن ما يقرب من 50% من الانبعاثات العالمية. وتتمتع هذه الصناعة بخبرة قوية في التكوينات الجيولوجية، وهندسة المكامن، والتقنيات البحرية، وأنظمة الضغط العالي، وهندسة وإدارة وتشغيل المنشآت الصناعية المعقدة، مثل مراكز التجميع والمصافي ومصانع إنتاج البتروكيماويات. كما أن لدى الصناعة خبرة جيدة في تكنولوجيا فصل الغاز وقد أطلقت بالفعل العديد من مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. ومن ثمة، فإن صناعة النفط والغاز مهيئة ومستعدة جيداً لإنشاء ونشر مرافق واسعة النطاق لالتقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه (Bui et al., 2018). وعلاوةً على ذلك، تتمتع الصناعة بإمكانية متميزة لاستخدام الـ CO<sub>2</sub> عبر الاستفادة منه في الاستخلاص المعزز للنفط (EOR) لاستخراج المزيد من النفط من المكامن الناضجة. وقد أسست الصناعة بالفعل في عام 2014 مبادرة النفط والغاز (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI)) (<https://www.ogci.com/>)، والتي تضم 12 عضواً من شركات النفط والغاز الرائدة، بما في ذلك شركات أرامكو (ARAMCO)، وبي بي (BP)، وإكسون موبيل (ExxonMobil)، وشيفرون (Chevron)، وشل (Shell)، وتوتال للطاقات (TotalEnergies)، وإيني (ENI)، وسي إن بي سي (China National Petroleum Corporation)، وإكوينور (Equinor)، وأوكسي (Occidental Petroleum)، وبتروبراس (Petrobras)، وريبسول (Repsol). وهدف المبادرة هو قيادة الجهود التي تستهدف استجابة صناعة النفط والغاز لقضايا تغير المناخ وتسريع تحول الطاقة، والاستفادة من الاستثمارات التي تهدف إلى توسيع نطاق النشاطات المخصصة لإزالة الكربون من القطاعات ذات الكثافة المرتفعة في انبعاث الغازات الدفيئة وتحقيق تأثير كمي في هذا السياق.

ونظراً لتعقيد مصافي النفط وغيرها من مرافق معالجة الوقود الأحفوري، فمن المتوقع أن تكون إزالة الكربون منها أمراً صعباً للغاية. وعادةً ما يكون لكل مصفاة أو مجمع صناعي العديد من مصادر نقاط الانبعاث، وتشمل المرافق والغلايات والسخانات والأفران ووحدات التكسير. وتتنوع هذه المصادر النقطية من حيث التصميم والتشغيل والأداء، مما يؤثر على معدلات التدفق ومكونات الانبعاثات. ولدى الصناعة خياران لإزالة الكربون، إما تجميع غازات المداخن من وحدات مختلفة والتقاط CO<sub>2</sub> مركزياً

أو إزالة الكربون من تيارات غاز المداخن المختلفة بشكل مستقل وتجميع تيارات ثاني أكسيد الكربون. ورغم هذه المصاعب، لدى الصناعة عدد من المزايا التي يمكن الاستفادة منها في تنفيذ عملية إزالة الكربون. وتشمل هذه المزايا ما يلي:

- الكميات الكبيرة من انبعاثات CO<sub>2</sub> ومواقع المصافي القريبة من السواحل وداخل المراكز الصناعية التي من المحتمل أن تكون مجهزة بالبنية التحتية لالتقاط وتخزين الكربون، مما يؤدي عادةً إلى خفض التكاليف من خلال وفورات الحجم.
- السهولة النسبية لإزالة الكربون من بعض التيارات مثل تلك الناتجة عن وحدات التكسير الحفزي أو وحدات إنتاج الهيدروجين، وتنوع تقنيات الالتقاط المتاحة بما في ذلك تقنيات ما بعد الاحتراق، وأكسي-الوقود (Oxy-fuel)، والتحلل الكيميائي، والتي يمكن استغلالها في تصميم مجمع لالتقاط CO<sub>2</sub> بما يناسب مصادر الانبعاثات.
- الخبرة العميقة التي تتمتع بها الصناعة في تصميم أنظمة معالجة الموائع المعقدة التي تمكن الصناعة من إنتاج تشكيلات مثالية ومرنة تسمح باستخدام مواد أولية ذات مواصفات متنوعة، وإنتاج منتجات مختلفة لتلبية طلب السوق، مثل الكهرباء والهيدروجين الأزرق.
- العلاقات الوثيقة القائمة بين منتجي الوقود الأحفوري الذين لديهم خبرة قوية في التكوينات الجيولوجية، حيث يمكن تخزين ثاني أكسيد الكربون، وصناعات المعالجة النهائية التي تعد المصدر الرئيسي لانبعاثات الغازات الدفيئة المباشرة وغير المباشرة، وصناعة توليد الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري التي تعد المصدر الرئيسي لانبعاثات CO<sub>2</sub> المباشرة، والصناعات البتر وكيمائية التي يمكنها الاستفادة من ثاني أكسيد الكربون. وتسمح هذه العلاقات الوثيقة للصناعة بتحسين تكامل مرافق التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه عبر سلسلة القيمة، وبالتالي تخفيض التكاليف.

ومن المهم الإشارة إلى الملاحظات الختامية لمعهد الموارد العالمية (WRI) في المنهجية الموصى بها لتقدير انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن صناعات الوقود الأحفوري، حيث سلطت هذه الملاحظات الضوء على حاجة الصناعة إلى ترك أجزاء من احتياطياتها في الأرض إذا لم تتوفر خيارات التقاط وتخزين الكربون واسعة النطاق قابلة للتطبيق نظراً لأن استخدام هذه الاحتياطيات يتجاوز ميزانية الكربون المرتبط بـ 2°C الذي حددته اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ واتفاق باريس. وفي ضوء التطورات المذكورة أعلاه فيما يتعلق بانبعاثات صناعة النفط والغاز، بدأت صناعة النفط العربية جهوداً متنوعة للحد من انبعاثاتها. والأهداف الرئيسية هي تحسين كفاءة الطاقة في الصناعة وخفض الانبعاثات. وقد تناول هذا الموضوع عدد قليل من المنشورات بما في ذلك دراسات قدمت في

مؤتمرات (Lababidi, 2015؛ الشطي، 2014). كما تم تناول الموضوع مؤخراً في دراسة شاملة (عماد مكي، 2020) تضمنت (1) استخدام الطاقة من قبل الصناعة، (2) الفرص الرئيسية لتحسين كفاءة الطاقة، (3) الوضع الحالي لكفاءة الطاقة في مصافي النفط في الدول العربية، (4) العوائق والدوافع لتحسين كفاءة الطاقة، (5) إمكانية تحسين كفاءة الطاقة في المصافي العربية، و (6) أداء المصافي العربية في استهلاك الطاقة مقارنةً بالمصافي في أنحاء مختلفة من العالم. وحددت الدراسة عدداً من فرص التحسين الموجودة، مثل التكامل الحراري، وتحسين أداء العمليات، وغيرها الكثير. ولوحظ أيضاً أن سياسة الطاقة المدعومة بمعايير إدارة الطاقة ستخلق أساساً للتحسين وتوفر التوجيه لإدارة الطاقة داخل الصناعة. كما تضمن البحث مراجعة لعدد من دراسات الحالة من المصافي العربية ومن حول العالم. وخلصت الدراسة إلى أن إدخال التقنيات الحديثة لتحسين كفاءة الطاقة في مصافي البترول العربية يمكن أن يؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة 30% تقريباً.

#### 2.4. إزالة الكربون من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة

يساهم القطاع الصناعي بشكل مباشر بحوالي 24% من إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة (الشكل 7.2) (IPCC, 2022). وبالتالي، فإن إزالة الكربون من هذا القطاع أمر مهم للغاية لخفض انبعاثات CO<sub>2</sub> إلى المستوى المستهدف الذي حددته الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. وكما يتبين من الشكل 12.2، فإن صناعات الحديد/الصلب والأسمت تستهلك الكثير من الطاقة وهي من بين أعلى مصادر انبعاث ثاني أكسيد الكربون. وتختلف العمليات الصناعية المستخدمة في هذه الصناعات اختلافاً كبيراً مما يؤثر على مكونات غازات الانبعاثات وحجم تدفقاتها. ويتمثل التحدي الرئيسي للقطاع في الحفاظ على قدرته التنافسية عند اتخاذ تدابير للحد من انبعاثات CO<sub>2</sub> التي ستؤدي حتماً إلى ارتفاع التكاليف (Bui et al., 2018).

وبالنسبة للصناعة في المنطقة العربية، فقد استعرضت دراسة حديثة دور القطاع الصناعي في اقتصاديات دول المنطقة، وحصته في الاستهلاك النهائي للطاقة، والقيمة المضافة للقطاع وحصته في الناتج المحلي الإجمالي للدول الأعضاء في منظمة الأوبك. وغطى البحث الصناعات الرئيسية التي يتكون منها هذا القطاع. وتمت مقارنة استهلاك الطاقة في هذه الصناعات الرئيسية مع استهلاك الطاقة للقطاعات الاقتصادية الأخرى ومحطات توليد الكهرباء ومحطات تسييل الغاز ومصافي التكرير، وعرضت الدراسة بيانات عن مؤشر كثافة الطاقة للقطاع الصناعي (مظفر البرازي، 2020). وبناءً على هذا البحث والأنظمة البيئية الصارمة التي وضعتها معظم الدول العربية، سيعمل القطاع الصناعي على تحسين أداء الطاقة، وبالتالي تخفيض انبعاثات الغازات الدفيئة.

وتتضمن الأقسام الفرعية التالية، ملخص لحالة صناعات الحديد/الصلب والأسمنت العالمية فيما يتعلق بتدابير التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه.

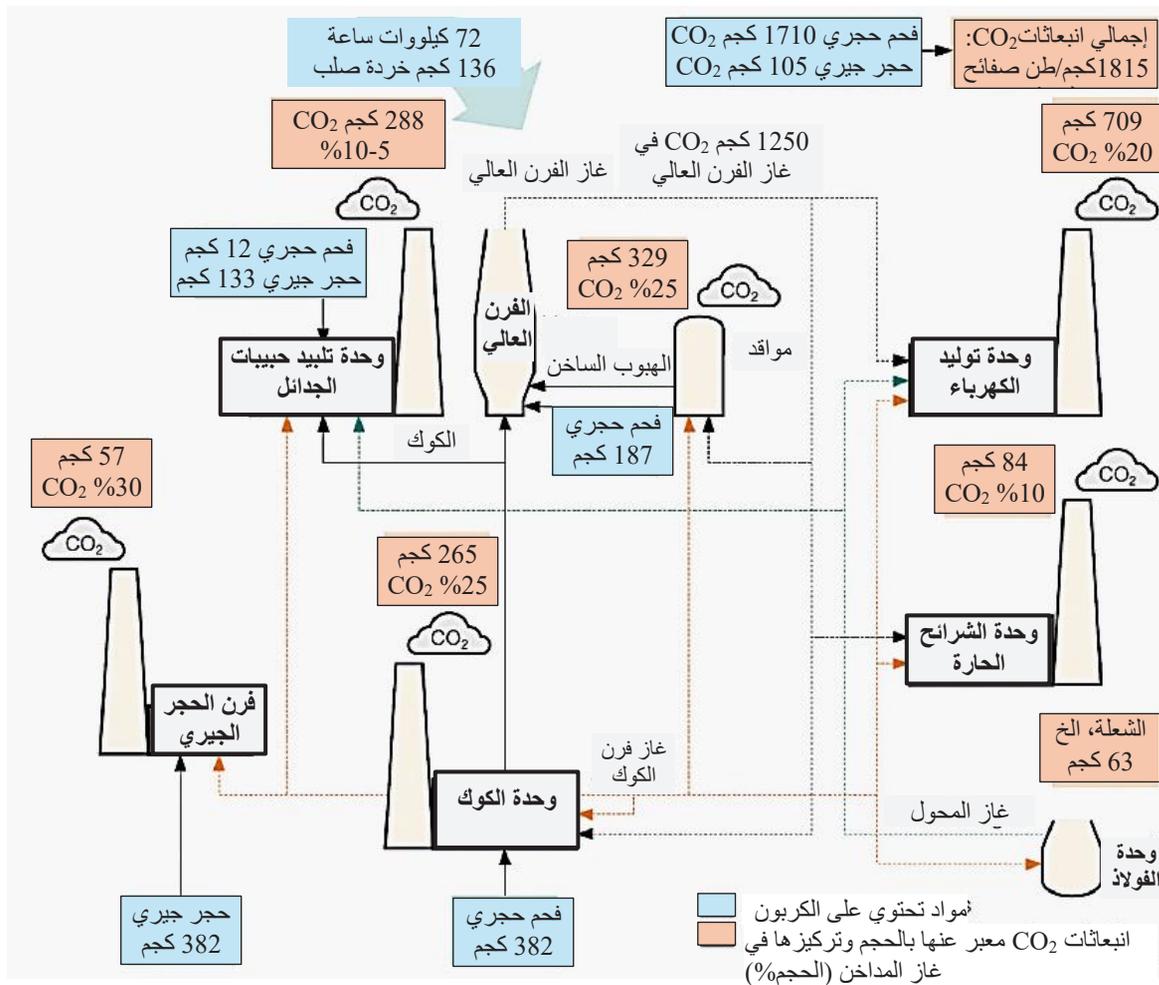
#### 1.2.4. إلتقاط الكربون في صناعة الحديد والصلب

تعد هذه الصناعة أحد المصادر الرئيسية لانبعاثات CO<sub>2</sub> بسبب كثافة استهلاكها للطاقة، واعتمادها الحالي على الفحم الحجري، وارتفاع الطلب على الصلب في السوق العالمية. ويجدر في البداية التنويه إلى أن هناك طريقتان رئيسيان لتصنيع الصلب:

- مصانع الصلب المتكاملة، حيث يستخدم فحم الكوك لاختزال خامات الحديد وإنتاج "الحديد الخام"، وهو المادة الخام لإنتاج الصلب. وتعتبر هذه المصانع المصدر الرئيسي للانبعاثات في هذه الصناعة، حيث يبلغ متوسط انبعاث CO<sub>2</sub> حوالي 1.8 طن من CO<sub>2</sub> لكل طن من الفولاذ الخام. وتتولد انبعاثات CO<sub>2</sub> في أجزاء مختلفة داخل المصنع كما هو موضح في الشكل 3.4. ونقاط الانبعاث الرئيسية هي الفرن العالي، ومحطة توليد الكهرباء، والمواقد، ووحدة تصنيع الحبيبات الملبدة، ووحدة إنتاج فحم الكوك.
- المصانع الصغيرة التي تقوم بمعالجة الخردة المعدنية وحديد الزهر والحديد المختزل المباشر. ويستخدم فيها فرن القوس الكهربائي، وهو المصدر الرئيسي للـ CO<sub>2</sub> في هذه العملية.

والخيار الأول لخفض الانبعاثات في صناعة الحديد/الصلب هو تحسين كفاءتها في استخدام الطاقة. وتشمل التدابير التي يمكن اتخاذها، والتي يجري العمل على تطبيقها، تصميم عمليات تتسم بكفاءة استخدام الطاقة، والتي تستهدف في المقام الأول الحد من فقدان الحرارة وإدخال تقنيات استعادة الحرارة المهذرة. كما يمكن أيضاً تحقيق تخفيضات كبيرة من خلال استخدام وقود منخفض الكربون أو استخدام مصادر الطاقة المتجددة، وزيادة معدل إعادة تدوير المخلفات الفولاذية. ولرفع معدل خفض الانبعاثات، يجب على الصناعة تطبيق تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. ويمكن التقاط CO<sub>2</sub> باستخدام تقنيات الالتقاط بعد الاحتراق من غازات المداخن الصادرة عن وحدات المعالجة الرئيسية في مصانع الصلب المتكاملة. وتجدر الملاحظة إلى أن إدخال تقنيات الالتقاط هذه لن يكون له أي تأثير على عملية صناعة الحديد والصلب. وبدلاً من ذلك، يمكن دمج عمليات صناعة الحديد/الصلب وعمليات التقاط CO<sub>2</sub> باستخدام تقنيات الاحتراق الأكسي-وقود لإنتاج غاز مداخن تركيز ثاني أكسيد الكربون فيه مرتفع مما يحسن كفاءة التقاطه.

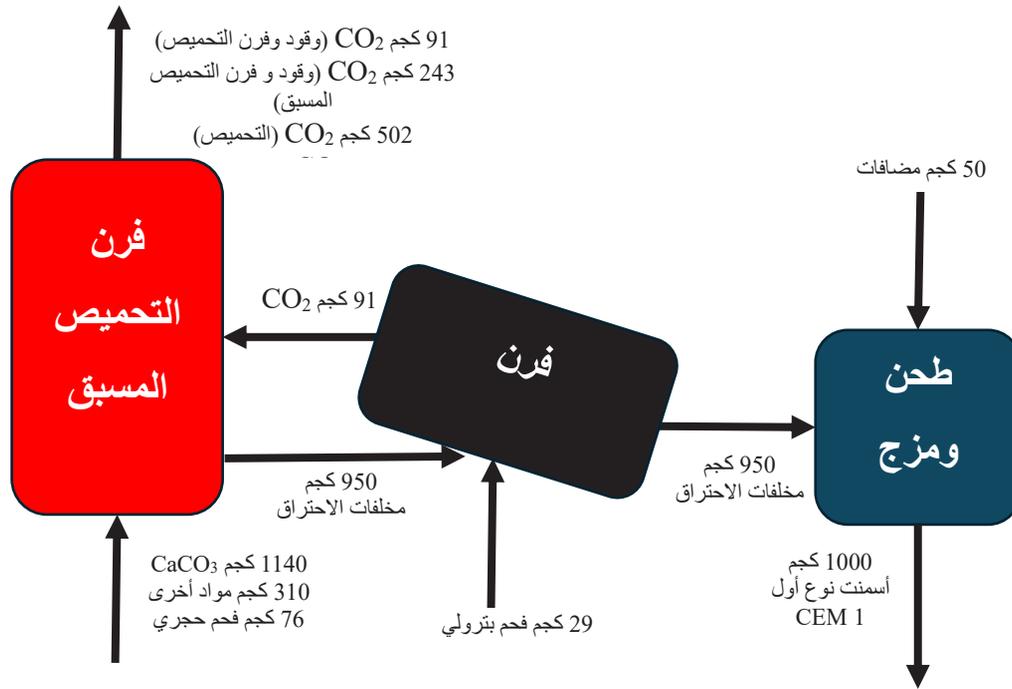
ويبدو أن عدداً قليلاً جداً من مصانع الحديد والصلب تستخدم تقنيات التقاط ثاني أكسيد الكربون، بينما غالبيتها يطلق حالياً الـ CO<sub>2</sub> في الهواء (Carpenter, 2012; Kuramochi et al., 2011; Meijer et al., 2011; Posco, 2017; Van der Stel et al., 2013). وفي عام 2016، بدأت أبوظبي أول تطبيق واسع النطاق لالتقاط الكربون في قطاع الحديد والصلب في شركة الإمارات لصناعات الصلب (ESI) كمرحلة أولى من مشروع التقاط وتخزين الكربون. وتستخدم عملية امتصاص تعتمد على الأمينات لالتقاط حوالي 0.8 مليون طن من CO<sub>2</sub> سنوياً لاستعمالها في الاستخلاص المعزز للنفط (GCCSI, 2023a). ويبدو أن المصنع هو المصنع الوحيد في العالم حتى هذا التاريخ.



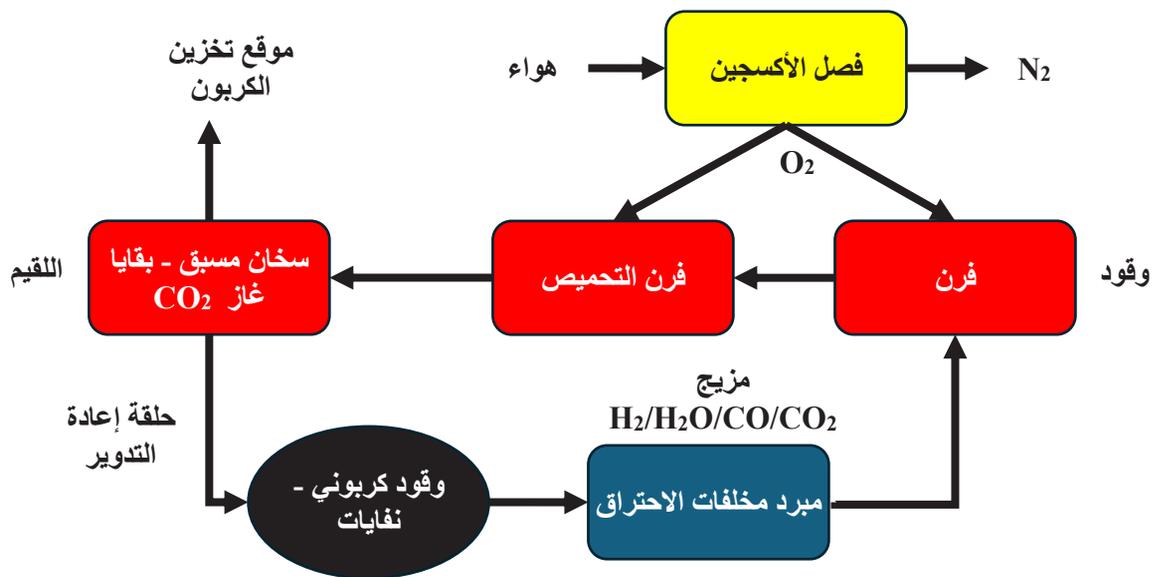
الشكل 3.4. انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمصنع صلب نموذجي (المصدر: Bui et al., 2018).

#### 2.2.4. إزالة الكربون في صناعة الأسمنت.

تعد صناعة الأسمنت من بين الصناعات التي تنتج أعلى انبعاثات CO<sub>2</sub> سواء من حيث إجمالي الانبعاثات أو الانبعاثات لكل طن من الأسمنت المنتج. وساهمت الصناعة بما يقرب من 1.6% من انبعاثات الغازات الدفيئة العالمية لعام 2016 وفقاً لتقرير IIGCC (IIGCC, 2022)، وحوالي 7% من انبعاثات CO<sub>2</sub> (Ghiat & Al-Ansari, 2021)). ويتسبب كل طن من الأسمنت في انبعاث ما معدله 0.84 طن من الـ CO<sub>2</sub> (Hills et al., 2016). ويوضح الشكل 4.4 مصادر انبعاث CO<sub>2</sub> في مصنع نموذجي لإنتاج أسمنت من نوع CEM 1. ويعد تكليس CaCO<sub>3</sub> (الحجر الجيري) لإنتاج CaO هو المصدر الرئيسي لانبعاثات CO<sub>2</sub> (حوالي 60% من الإجمالي) في عملية إنتاج الأسمنت. أما الانبعاثات المتبقية فهي من الوقود المستخدم للتسخين وتفاعلات الكنكر، والتي يمكن التقاط CO<sub>2</sub> منها من خلال مدخنة مدمجة. وللحد من انبعاثات صناعة الأسمنت، يعد استخدام التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه أمراً لا مفر منه لأن معظم الـ CO<sub>2</sub> المنتج ذاتي وجزء من كيميائ الإنتاج (Bui et al., 2018). وبالإمكان استخدام العديد من تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> في مصانع الأسمنت. وتعتبر أنظمة الالتقاط المباشر وأكسي-وقود هي الأكثر تفضيلاً بسبب مكاسب الكفاءة المحتملة (Bui et al., 2018). وقد أُجري تقييم أولي للفرن الذي يعمل بتقنية أكسي-وقود بدون انبعاثات في عام 2006 (Zeman & Lackner, 2006; Zeman & Lackner, 2008) (الشكل 5.4). وفي وقت لاحق ومنذ عام 2007، قامت جمعية أبحاث الأسمنت الأوروبية بتطوير تقنية أكسي-وقود، وتبين أن هذا التعديل في إنتاج الأسمنت التقليدي لا يؤثر على جودة الأسمنت. وأدى تطبيق تحلق الكالسيوم أيضاً إلى نتائج مماثلة. وفي الآونة الأخيرة، دعمت المفوضية الأوروبية (European-Commission, 2023) تطوير عملية "ليلك" (Leilac) ((low emission intensity lime and cement)) (وهي عملية لمعالجة الجير وإنتاج أسمنت كثافة انبعاثاته منخفضة، حيث يسخن كربونات الكالسيوم بشكل غير مباشر باستخدام أنابيب فولاذية خاصة (Lelilac, 2023)).



الشكل 4.4. الانبعاثات المباشرة لـ CO<sub>2</sub> من صناعة الأسمنت CEM I (95% كلنكر) (المصدر: Hills et al., 2016).



الشكل 5.4. عملية فرن الأكسي - وقود (Oxy-fuel) منخفض الانبعاثات لإنتاج الأسمنت (المصدر: Zeman & Lackner, 2008).

## الفصل 5 – مقدمة لالتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

- 5.1. تعريفات
- 5.2. نظرة عامة على حالة تقنيات CCUS
- 5.3. دور وقيمة CCUS
- 5.4. التقييم الإحصائي لـ CCUS في الأدبيات المفتوحة وبراءات الاختراع

قدمت الفصول السابقة معلومات أساسية عن انبعاثات الغازات الدفيئة وارتباطها بالوقود الأحفوري، وكذلك الجهود العالمية للحد من تأثيرها على البيئة العالمية أو إزالتها كلياً. وخلص التقرير إلى أن صناعات الوقود الأحفوري يجب أن تدمج التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS) في عملياتها، وكذلك في استخدامات منتجات هذه الصناعات لضمان التحكم في ظاهرة الاحتباس الحراري في حدود 2°C وفقاً للأهداف التي حددتها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ وفي مؤتمر الأطراف الحادي والعشرين (COP21). وتتمتع تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه بالقدرة على خفض الانبعاثات العالمية المستقبلية من الطاقة بنسبة 20%. وفي هذا الفصل، سيتم تقديم نظرة عامة على حالة التقاط الكربون وتخزينه كمعلومات أساسية للفصول اللاحقة التي سنتناول بمزيد من التفصيل مختلف تقنيات التقاط الكربون ونقله واستخدامه وتخزينه.

### 1.5. تعريفات

هناك العديد من المصطلحات والاختصارات شائعة الاستخدام حالياً في مجال الـ CCUS. ولذلك، فإن التعريفات الواضحة لهذه المصطلحات مهمة في مراجعة الموضوع. وفيما يلي تعريفات للمصطلحات الأكثر شيوعاً:

**إزالة CO<sub>2</sub> (CDR).** يشير هذا المصطلح إلى الأنشطة التي يقوم بها الإنسان والتي تهدف إلى الإزالة المادية لـ CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي ومن ثم تخزينه بشكل دائم باستخدام العمليات الطبيعية أو التكنولوجية. وتنقسم تقنيات CDR إلى فئتين، التدخلات المرتبطة بالطبيعة مثل تحسين إدارة الغابات، والتقنيات المُصممة لإزالة CO<sub>2</sub> مثل DACCS و BECCS. ويستثنى من ذلك العمليات التي تحدث بشكل طبيعي حالياً وتعمل بالفعل كمصارف لثاني أكسيد الكربون. وتصنف العملية كعملية إزالة CO<sub>2</sub> إذا كانت الكمية الإجمالية لـ CO<sub>2</sub> المنزوعة من الغلاف الجوي والمخزنة بشكل دائم تتجاوز كمية CO<sub>2</sub> المنبعثة في الغلاف الجوي، وتشمل الأنشطة العائدة لهذه الفئة العمليات الأرضية مثل التشجير، والعمليات الحيوكيميائية مثل الكربنة، والعمليات الكيميائية مثل استخدام مركبات الأطر العضوية المعدنية (MOF) لامتصاص ثاني أكسيد الكربون. ويستخدم مصطلح CDR أحياناً بالتبادل مع مصطلح تقنيات الانبعاثات السلبية.

**التقاط الكربون وعزله/تخزينه (CCS).** يشير هذا المصطلح إلى العمليات التي تؤدي إلى التقاط CO<sub>2</sub> من مخلفات العمليات الصناعية. وعادةً ما تنتج هذه المخلفات من محطات توليد الطاقة الكهربائية والمنشآت الصناعية، حيث يلتقط CO<sub>2</sub> من مداخن المصانع ثم تخزينه لتجنب إطلاقه في الغلاف الجوي. ويعد التقاط الكربون فئة فرعية من التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، ويركز على التقاط وعزل CO<sub>2</sub>

عند المصدر فقط، وبالتالي تجنب الانبعاثات، ولا يُقلل من الـ CO<sub>2</sub> في الغلاف الجوي. ولذلك، فهي استراتيجية تخفيف، وليست استراتيجية إزالة الكربون.

**التقاط واستخدام وتخزين الكربون (CCUS).** يشمل هذا المصطلح جميع الأساليب والتقنيات المشار إليها أعلاه في إطار CDR و CCS لالتقاط CO<sub>2</sub> من مصادر ثابتة أو من الغلاف الجوي وتخزينه في تكوينات جيولوجية عميقة تحت الأرض أو عبر طرق أخرى مثل التمعدين. ويتضمن أيضاً التقنيات التي تهدف إلى استخدام CO<sub>2</sub> كمادة أولية لإنتاج مجموعة واسعة من المنتجات المفيدة والمجدية تجارياً. **اقتصاد الكربون الدائري (CCE).** بحسب أرامكو (ARAMCO, 2023)، يعكس هذا المصطلح منهجية للتعامل مع انبعاثات CO<sub>2</sub>، وبالتحديد هو "إطار لإدارة الانبعاثات والحد منها من خلال نظام حلقة مغلقة يتضمن أربعة "R": التخليص (Reduce)، وإعادة الاستخدام (Reuse)، وإعادة التدوير (Recycle)، والإزالة (Remove)"، أي اعتماد التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه لتخفيض انبعاثات CO<sub>2</sub> أو القضاء عليها. وقد تم تفصيل مفاهيم CCE بشكل كامل في سلسلة من التقارير نشرت مؤخراً (CCE, 2020).

**الطاقة الحيوية مع التقاط الكربون وتخزينه (BECCS).** ويشير المصطلح إلى استخدام المنتجات الزراعية لإنتاج الوقود ودمج العملية مع التقاط وتخزين الكربون من مصدر محدد. ويمكن أن تؤدي تقنيات BECCS إما إلى إزالة CO<sub>2</sub> أو إنتاج طاقة محايدة للكربون، بناءً على النتيجة الصافية لانبعاثات دورة الحياة المرتبطة بها، أي إذا كان الكربون المحتجز في الكتلة الحيوية أقل من الانبعاثات الناتجة عن الإنتاج والنقل.

**التقاط وتخزين الكربون المباشر في الهواء (DACCS) أو التقاط الهواء المباشر وتخزينه (DACS).** ويشير المصطلح إلى أنشطة بشرية تستخدم لإزالة وتخزين CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي مباشرةً من خلال عمليات هندسية كيميائية على المستوى الصناعي يُلتقط ويُجمع من خلالها الـ CO<sub>2</sub> من الهواء المحيط بالمنشأة قبل تخزينه بشكل دائم في التكوينات الجيولوجية تحت الأرض أو أي شكل آخر من أشكال تخزين ثاني أكسيد الكربون.

## 2.5. نظرة عامة على حالة تقنيات CCUS

لقد تطورت التقنيات المتعلقة بالـ CCUS على مدار المائة عام الماضية تقريباً لأغراضٍ مختلفة في مراحل مختلفة. ففي العقود الأولى من القرن الماضي، استهدفت صناعة الوقود الأحفوري تطوير تقنيات الفصل لتنقية الغاز الطبيعي نظراً لأن تيارات الغاز تحتوي على غازات حمضية غير مرغوب فيها، ومن بينها ثاني أكسيد الكربون. وكانت تقنيات فصل CO<sub>2</sub> مدفوعة أيضاً بإنتاج الهيدروجين،

الذي كان ولا يزال مادة خام مهمة لصناعة البتروكيماويات وتكرير النفط. وينتج الهيدروجين تقليدياً من الموارد الهيدروكربونية منخفضة القيمة مثل الغاز الطبيعي المصاحب أو نواتج التقطير البترولية الفائضة أو الزيوت المتبقية أو الفحم الحجري. وينتج عن عمليات التصنيع عادةً منتجات ثانوية مثل  $CO_2$  وأكاسيد الشوائب الأخرى المتواجدة في المواد الأولية. وتعتبر إزالة هذه المنتجات الثانوية من الهيدروجين أمراً إلزامياً لتصنيع المنتجات النهائية اللاحقة في صناعتي البتروكيماويات وتكرير النفط. ومن ثمة، طورت الصناعة العديد من التقنيات لفصل ثاني أكسيد الكربون. وكان وما يزال معظم  $CO_2$  المحتجز يُطلق في الغلاف الجوي، نظراً لأن كمياته من هذه المصادر منخفضة نسبياً ولا توجد بنية تحتية تسمح باستخدامه أو تخزينه من الناحية الاقتصادية. ولكن المفاهيم الكامنة والخبرات التي طورت وراء تقنيات التقاط  $CO_2$  هذه أصبحت العمود الفقري للتكنولوجيات التي يجري تطويرها حالياً لالتقاط  $CO_2$  من مصادر الانبعاثات المختلفة لتلبية متطلبات التقاط  $CO_2$  وتخزينه لغرض الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة. وهناك العديد من التجهيزات المخبرية والنمطية والمصانع التجريبية والمنشآت التجارية قيد التشغيل بالفعل وتُنشر نتائج أداءها بين الفينة والأخرى. ويمكن العثور على مراجعة شاملة للتقنيات المتاحة واتجاهات البحث والتطوير في عدد من التقارير والأوراق العلمية الحديثة (Bui et al., 2018; Dziejarski et al., 2023; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c). كما ذكرنا أعلاه، يُطلق معظم الـ  $CO_2$  الناتج عن المنشآت الصناعية المختلفة في الهواء لأن الكميات عادةً ما تكون صغيرة جداً ولأن استخدام  $CO_2$  كان محدوداً. ومع تزايد الاهتمام بـ  $CO_2$  باعتباره من الموانع التي يمكن استخدامها للاستخلاص المعزز للنفط (EOR- $CO_2$ ) على مدى العقود القليلة الماضية، طُورت تقنيات نقل  $CO_2$  وأصبحت راسخة حالياً، وتشمل التكنولوجيات الناضجة المتاحة للنقل خطوط الأنابيب والسفن. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل الصناعة على تطوير مراكز (Hubs) لجمع الـ  $CO_2$  من مصادر مختلفة لتلبية المتطلبات الاقتصادية للاستخدام النهائي أو للتخزين وخفض التكلفة. وإلى جانب الاستخلاص المعزز للنفط بثاني أكسيد الكربون، نشطت الصناعة في تطوير خيارات مختلفة لتخزين  $CO_2$  واكتسبت قدر كبير من الخبرة والمعرفة. وتشمل التقنيات المستهدفة والتي تمر بمراحل مختلفة من التطوير تقنية التخزين في التكوينات المالحة (saline formations) وحقول النفط والغاز المستنفذة وتقنية التخزين في المحيطات وكذلك التخزين بالتمعدن أي تحويل الغاز الملتقط إلى رواسب كربونات معدنية (mineral storage). وبالإضافة إلى التخزين، بذلت جهود حثيثة لتطوير مفهوم اقتصاد الكربون الدائري (CCE) على مدى سنوات لينضج مؤخراً (CCE, 2020). وبناءً على ذلك، نشطت الصناعة في توسيع نطاق استخدام  $CO_2$  كمادة خام لتحقيق التنمية المستدامة. ويستخدم  $CO_2$  بالفعل كمادة أولية في العديد من الصناعات مثل إنتاج بعض المواد الكيميائية (الميثانول

واليوربا وغيرها) وصناعة الأغذية والمشروبات (المشروبات الغازية)، ويضاف إلى ذلك عدد من الاستخدامات الجديدة التي وصلت إلى مراحل مختلفة من التطوير كالكربنة المعدنية ( mineral carbonation) وزراعة المحاصيل والطحالب (Bui et al., 2018). واستمرت محاولات تحسين تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه وتخزينه من الجانبين الفني والاقتصادي على مدار العقدين الماضيين. فبالإضافة إلى الأبحاث التي تجري في مختلف الجامعات والشركات، أنشئت مراكز بحثية متخصصة لمواجهة التحديات المختلفة المتعلقة بالتقاط CO<sub>2</sub> بشكل عام وتقنيات الامتصاص بشكل خاص، ومن بين هذه المراكز مركز الاختبار الدولي لالتقاط CO<sub>2</sub> (ITC) في جامعة ريجينا في كندا، والذي أعيدت تسميته ليصبح معهد أبحاث تقنيات الطاقة النظيفة ( CETRI, 2023)، ومركز التكنولوجيا مونجستاد في النرويج (TCM, 2023)، والمختبر الوطني الأمريكي لتكنولوجيا الطاقة (NETL, 2023).

### 3.5. دور قيمة التقاط واستخدام وتخزين الكربون

جذب موضوع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه انتباه القائمين على تطوير نماذج التقييم المتكاملة ( Integrated Assessment Models (IAMs)) للحد من آثار الانبعاثات وذلك بسبب مزاياه العديدة، إذ أنه من الممكن تحقيق التكامل بين تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه مع أنظمة الطاقة الحالية دون إدخال تعديلات كبيرة على الأنظمة نفسها. وعلاوة على ذلك، يمكن تطبيق التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه لإزالة الكربون من الصناعات كثيفة الانبعاثات مثل صناعة الحديد والصلب. وأخيراً، يمكن دمج التقاط وتخزين الكربون مع الطاقة الحيوية منخفضة الكربون أو المحايدة للكربون مما يؤدي إلى ما يشار إليه باسم BECCS، والذي له انبعاثات سلبية ويؤدي إلى توليد الطاقة.

وعلى الرغم من أنه من المتوقع أن يلعب التقاط وتخزين الكربون دوراً مهماً في إزالة الكربون، إلا أن انتشاره لا يزال منخفضاً للغاية مقارنةً بتوقعات نماذج التقييم المتكاملة (IAMs) وخرائط الطرق التي طورتها الوكالة الدولية للطاقة حول موضوع الحد من الانبعاثات. ولا يعتبر التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه مجالاً ذا أولوية في معظم المساهمات المعتمدة والمحددة وطنياً ( Intended Nationally Determined Contributions (INDCs))، والتي تعهدت بها الدول وفقاً لاتفاق باريس. وفي تقرير أعدته الوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2016)، أجري تقييم للتقدم المحرز في مجال التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه على مدى السنوات العشرين الماضية حيث خلصت النتائج إلى أن معدل التقدم الحالي لا يرقى إلى ما هو مطلوب لتحقيق الأهداف المناخية. وبشكل عام، لا يزال انتشار تقنيات CCS محدوداً جداً. فعلى سبيل المثال، من المتوقع أن يقتصر التقاط وتخزين الكربون في مجال توليد الطاقة الكهربائية

على 3% فقط من الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية والصين واليابان والاتحاد الأوروبي حتى عام 2030. وإضافةً إلى ذلك، لا تزال المعارضة ضد التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه بين عموم الأفراد المهتمين بموضوع الاحتباس الحراري مرتفعة بسبب المخاوف بشأن موثوقية وسلامة النهج والتقنيات. وعلاوةً على ذلك، فإن نماذج التقييم المتكاملة (IAMS) المستخدمة حالياً ليست موحدة فيما يتعلق بعدد من القضايا، مما يعيق الصناعة وأصحاب المصلحة الآخرين، كالمستثمرين وواضعي السياسات، من تركيز جهودهم على تطوير مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. وبالتالي، فإن هناك حاجة للعمل على تطوير نماذج التقييم المتكاملة (IAMS) للتوصل إلى فهم أفضل للعوامل الرئيسية التي تؤثر على CCUS (Bui et al., 2018).

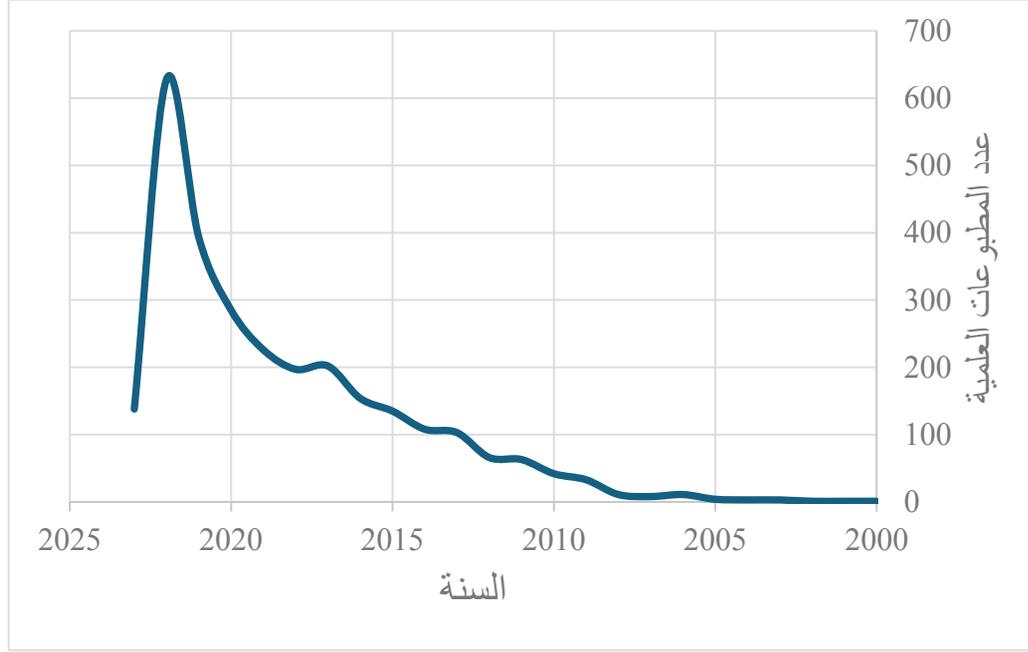
#### 4.5. التقييم الإحصائي لمواضيع CCUS في النشر العلمي

ازداد الاهتمام بموضوع تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه منذ عام 2000، وينعكس هذا بوضوح في أعداد الأوراق العلمية المنشورة. ولمتابعة ذلك بالنسبة إلى الأوراق العلمية، استخدم برنامج البحث Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>) لتقييم الاتجاهات الإحصائية للمنشورات العلمية للفترة من 1980 إلى مارس 2023. وتركز البحث على "التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه" كمصطلح رئيسي. وبلغ إجمالي عدد المنشورات التي عثر عليها 2827 منشوراً، منها 11 منشور للفترة 1980 – 2000. وبدأ العدد في الارتفاع منذ عام 2000 ليصل إلى 628 منشوراً في عام 2022. ويبين الشكل 1.5 الاتجاهات التاريخية لعدد المنشورات العلمية.

وكانت المجالات الرائدة في نشر الأوراق العلمية المتعلقة بموضوع CCUS تشمل العناوين التالية: Energy Procedia, International Journal of Greenhouse Gas Control, Applied Energy, Journal of Cleaner Production, Energies and Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. ، ومن المثير للاهتمام أيضاً ملاحظة أنه منذ عام 2004، بدأ نشاط ملحوظ يتعلق بإصدار العديد من المجالات المتخصصة في مواضيع أبحاث CCS أو CCUS. وتشمل هذه المجالات والسنة الأولى لبدء إصدارها (بين قوسين) العناوين التالية:

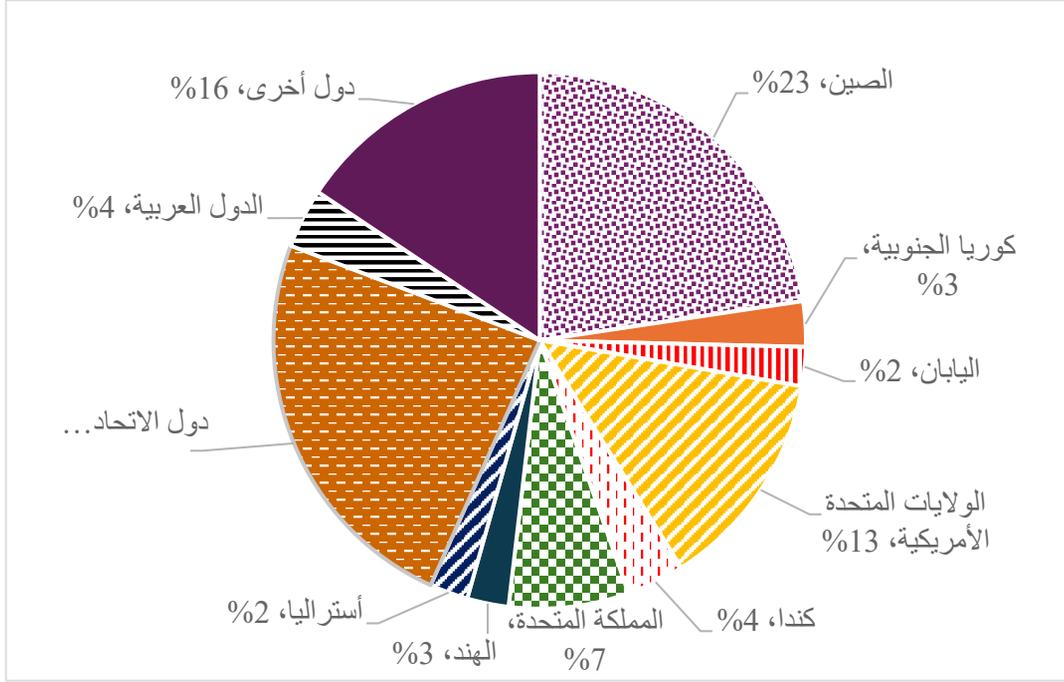
Journal of Cleaner Production (2004), International Journal of Greenhouse Gas Control (2007), Carbon Capture Journal (2007), Energies (2008), Energy Procedia (2009), Greenhouse Gases Science and Technology (2011), Journal of CO<sub>2</sub> Utilization (2013), Frontiers in Energy Research/Carbon Capture,

Utilization and Storage (2015), and Carbon Capture Science & Technology (2021).



الشكل 1.5. الاتجاهات التاريخية للمنشورات العلمية المفتوحة حول التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS).

ويبين الشكل 2.5 مساهمات مختلف الدول والمجموعات الإقليمية في النشر العلمي، حيث يتبين مشاركة ما يزيد عن 87 دولة في الجهود البحثية التي أدت إلى نشر هذه الأبحاث. وتقود هذه الجهود دول الاتحاد الأوروبي والصين والولايات المتحدة. وبالنسبة لدول الاتحاد الأوروبي، قادت ألمانيا وإيطاليا والنرويج وإسبانيا وهولندا والسويد الجهود بإصدار أكثر من 50 ورقة علمية لكل منها، أما بالنسبة للدول العربية، فقد قادت قطر والإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية الجهود بإصدار أكثر من 30 ورقة لكل منها. وتوزعت الأوراق بشكل رئيسي بين المقالات البحثية (1782 مقالة)، وأوراق المؤتمرات (505 ورقة)، وأوراق المراجعة (review articles) (342 ورقة)، وفصول الكتب (24 فصلاً) بنسب بلغت حوالي 63%، و17.9%، و12.1%، و4.4%، على التوالي. أما النسبة المتبقية البالغة 2.6% فكانت عبارة عن كتب وأشكال أخرى من المطبوعات. وكانت مجالات المواضيع الرئيسية لهذه المنشورات من النواحي العلمية تتعلق بالطاقة وعلوم البيئة والهندسة والكيمياء.



الشكل 2.5. النسب المئوية لمساهمات مختلف الدول والمناطق في النشر العلمي. تشمل دول الاتحاد الأوروبي 25 دولة، باستثناء المملكة المتحدة. وتضم الدول العربية ما مجموعه 12 دولة.

وتشمل جهات التمويل الرئيسية التي دعمت الجهود البحثية لبرامج أبحاث CCUS والتي أدت إلى هذا العدد من الأوراق العلمية كلاً من: المؤسسة الوطنية للعلوم الطبيعية في الصين (National Natural Science Foundation of China)، ومؤسسات التمويل الصينية الأخرى، ووزارة الطاقة الأمريكية (U.S. Department of Energy)، والمؤسسة الوطنية للعلوم الأمريكية (U.S. National Science Foundation)، والمختبر الوطني لتكنولوجيا الطاقة الأمريكي (U.S. National Energy Technology Laboratory)، ومجلس أبحاث العلوم الهندسية والفيزيائية البريطانية (Engineering and Physical Sciences Research Council)، والمفوضية الأوروبية (European Commission and the Horizon 2020 Framework Programme)، ومؤسسة البحوث الوطنية الكورية (the National Research Foundation of Korea)، ومجلس البحوث النرويجي (Norges Forskningsråd). وشارك في إجراء الجهود البحثية ما يزيد عن 160 جامعة ومعهد بحثي، وكانت المؤسسات الصينية هي الرائدة في العدد، تليها المؤسسات الأمريكية، ومؤسسات المملكة المتحدة، ومؤسسات الدول الأوروبية الأخرى. أما في الدول العربية، فالمؤسسات الرائدة من حيث عدد المنشورات المتعلقة بـ CCUS فكانت جامعة الملك فهد للبترول والمعادن ومركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية

(King Abdallah Petroleum Studies and Research Center)، وشركة أرامكو في المملكة العربية السعودية، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا وجامعة حمد بن خليفة في الإمارات العربية المتحدة، وجامعة قطر، ومؤسسة قطر. وسنراجع في الفصول التالية بالتفصيل حالة التقنيات المرتبطة بسلسلة قيمة النقاط  $CO_2$  وتخزينه الكاملة والتقدم الذي أُحرز لتحقيق أهداف الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

## الفصل 6 – التقاط الكربون من الصناعات ومن الغلاف الجوي

### 1.6 مواد وتقنيات الامتصاص لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

- 1.1.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتصاص
- 2.1.6. مذيبات لعمليات امتصاص ثاني أكسيد الكربون
- 3.1.6. عمليات امتصاص  $CO_2$  بعد الاحتراق الناضجة (PCC).
- 4.1.6. جهود التسويق والتطوير لتقنيات الامتصاص الخاصة بالتقاط وتخزين الكربون

### 2.6 مواد وتقنيات الامتزاز لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

- 1.2.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتزاز
- 2.2.6. الممتزازات المستخدمة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.
- 3.2.6. عمليات امتزاز  $CO_2$  الناضجة
- 4.2.6. التوقعات المستقبلية لتقنيات الامتزاز

### 3.6 مواد وتقنيات الأغشية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

- 1.3.6. تصنيف أغشية التقاط ثاني أكسيد الكربون
- 2.3.6. تطبيقات أغشية التقاط ثاني أكسيد الكربون
- 3.3.6. تقنيات أغشية التقاط  $CO_2$  الناضجة
- 4.3.6. مستقبل تقنيات التقاط  $CO_2$  الغشائية

### 4.6 التقاط $CO_2$ بالتبريد (cryogenic)

- 1.4.6. نظرة عامة على تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  بالتبريد
- 2.4.6. تقنيات التبريد لالتقاط الكربون
- 3.4.6. عمليات التبريد التجارية لالتقاط  $CO_2$  والتحديات والاحتياجات البحثية

### 5.6 التحلق الكيميائي لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

- 1.5.6. نظرة عامة على التحلق الكيميائي مع ناقلات الأكسجين
- 2.5.6. التحلق الكيميائي لإنتاج الطاقة
- 3.5.6. الاقتصاد ومستقبل التحلق الكيميائي
- 4.5.6. تكنولوجيا تحلق الكربونات

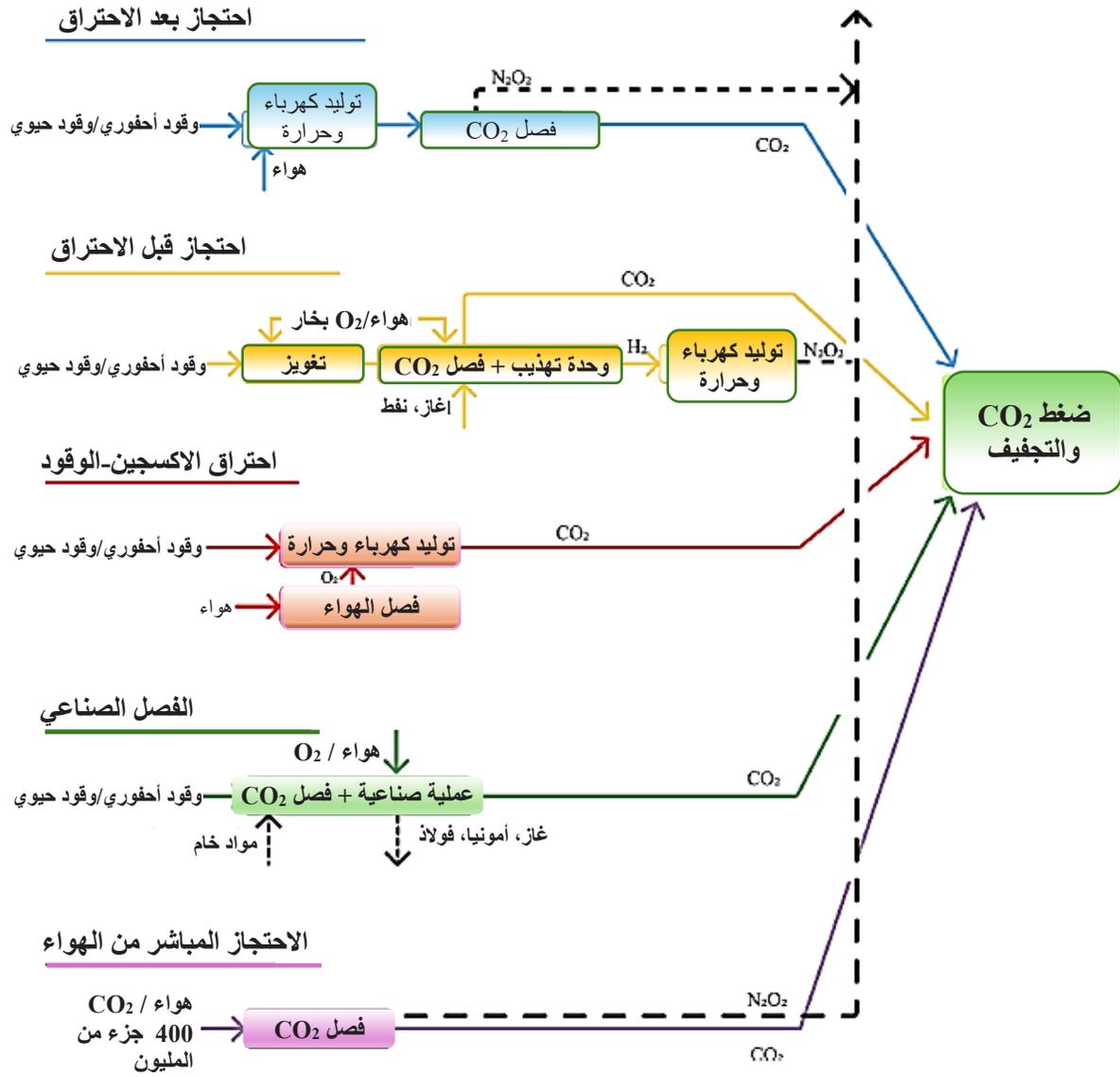
### 6.6 عزل $CO_2$ بواسطة دورة علام

## 7.6. التقاط CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي (DACC)

- 1.7.6. تقنيات DACC تستخدم مواد ماصة ذات قاعدة قوية
- 2.7.6. تقنيات DACC باستخدام المواد الماصة الصلبة
- 3.7.6. تقييم جدوى DACC
- 4.7.6. الانتشار التجاري لـ DACC
- 5.7.6. تحديات التطوير المتعلقة بتقنيات DACC
- 8.6. حالة تكنولوجيا التقاط ثاني أكسيد الكربون

هناك مساران رئيسيان للصناعة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون وفقاً لمصادر انبعاثات الكربون التي تمت الإشارة إليها في الفصل الثاني. ويُطبق المسار الأول على غازات المداخن (flue gases) الصادرة عن المنشآت الصناعية الكبرى، والتي تشمل توليد الطاقة الكهربائية، وإنتاج النفط والغاز والفحم الحجري، وتكرير البترول، والصناعات البتروكيمياوية، وبعض الصناعات ذات الكثافة العالية للطاقة مثل صناعات الأسمنت والصلب. وتُلتقط انبعاثات هذا المسار باستخدام عدد من المفاهيم التي طُورت وطُبقت في الأصل لتنقية الغاز الطبيعي وتيارات المنتجات الجانبية الصناعية وغازات المداخن، والتي تحتوي عادةً على غازات حمضية بما في ذلك  $CO_2$  بنسب منخفضة نسبياً. وقد طُورت بعض هذه المفاهيم منذ ما يقرب من 100 عام وطُبقت على نطاق واسع في صناعات التكرير والبتروكيمياويات، ويُركز هذا الفصل على التقنيات المتعلقة بهذا المسار. أما المسار الرئيسي الثاني لخفض  $CO_2$  فهو التقاط  $CO_2$  من الغلاف الجوي، والذي سيُستعرض في نهاية الفصل، علماً بأن التقنيات المرتبطة بهذا المسار تُصنف حالياً على أنها قيد التطوير وقد يكون بعضها وصل بالفعل إلى مرحلة شبه صناعية. وتمت مراجعة الموضوع بالرجوع إلى العديد من المنشورات الحديثة (Bui et al., 2018; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c). ويوضح الشكل 1.6 الأساليب الرئيسية المختلفة التي تهتم الصناعة بها حالياً لالتقاط  $CO_2$  الناتج عن توليد الطاقة الكهربائية والتطبيقات الصناعية المختلفة لمصادر الطاقة الأحفورية أو الكتلة الحيوية. وتشمل المنهجيات التي تسعى الصناعة لتطبيقها ما يلي:

**1. نهج الالتقاط بعد الاحتراق.** ويتضمن هذا النهج التقاط  $CO_2$  من غاز المداخن بعد الاحتراق الكامل للوقود. ويعمل هذا النهج بشكل جيد حالياً في العمليات الصناعية التي تحتوي على مصادر انبعاثات منخفضة نسبياً من حيث محتواها من الـ  $CO_2$  (مثل غازات المداخن بمحتوى  $CO_2 > 20\%$ ) بعد احتراق الوقود، حيث يمكن تحقيق معدل التقاط مرتفع لثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن القيد الرئيسي للتكنولوجيات الحالية هو انخفاض كفاءتها في التقاط  $CO_2$  عندما يحتوي التيار على نسبة عالية من  $CO_2$  تحت ضغط منخفض. وعلاوةً على ذلك، فإن النفقات الرأسمالية والتشغيلية لمعظم هذه التقنيات مرتفعة بسبب متطلبات الطاقة اللازمة لإعادة تنشيط المواد الماصة. ويعتمد النهجين الرئيسيين للالتقاط بعد الاحتراق على المذيبات والمواد الماصة أو المازة الصلبة، وهي تختلف من حيث معدل سرعة التفاعل وسعة التقاط ثاني أكسيد الكربون ودرجة حرارة الامتصاص/إعادة التنشيط والتكلفة الرأسمالية والتآكل وانتقال الكتلة والحرارة وثبات الأداء.



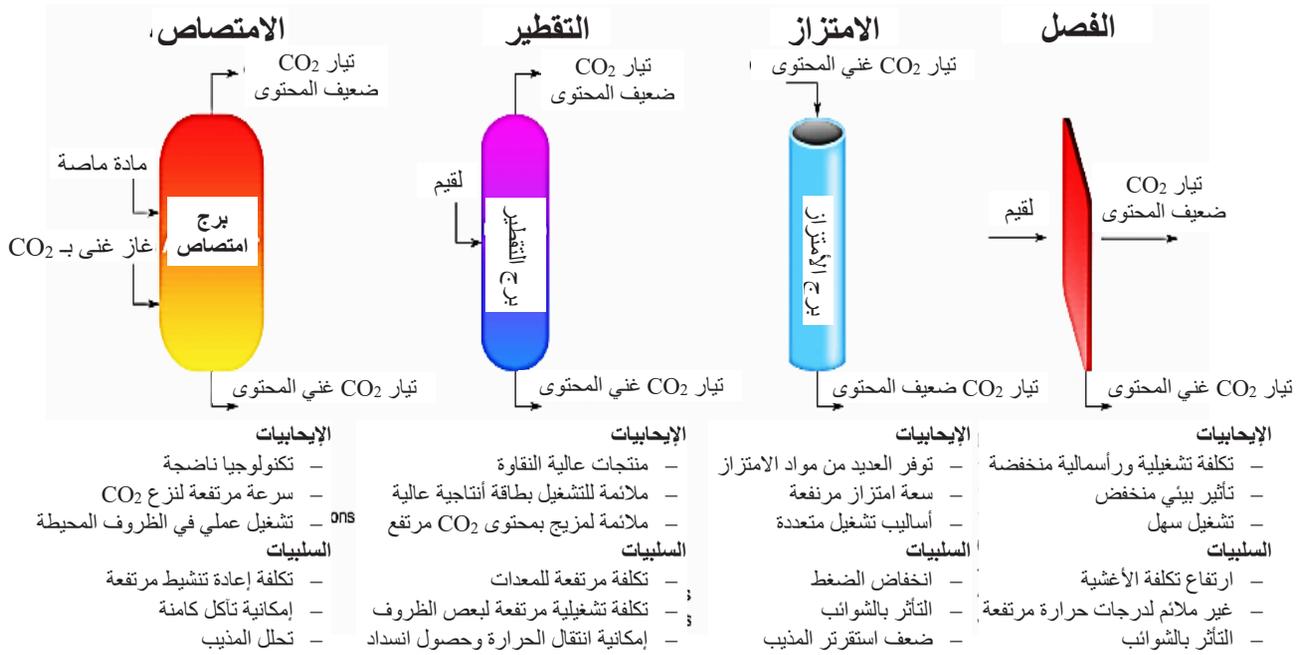
الشكل 1.6. الأنظمة المتاحة لاحتجاز غاز CO<sub>2</sub> (المصدر: Dziejarski et al., 2023; Markewitz et al., 2012; Metz et al., 2005; Seoane et al., 2015)

2. نهج الالتقاط قبل الاحتراق. في هذا النهج يتم إدخال الوقود إلى الفرن عن طريق تحويل مصدر الطاقة الأساسي أولاً، كالفحم، إلى غاز احتراق نظيف وإزالة CO<sub>2</sub> الناتج عن العملية. ويمكن تطبيق تقنيات الالتقاط قبل الاحتراق على إنتاج الهيدروجين لزيادة كفاءة العملية في تحويل الوقود الأحفوري إلى غاز تخليق (synthesis gas) عبر تفاعلات إعادة التشكيل البخاري (steam reforming) وتفاعل إزالة الماء-الغاز (water-gas shift)، وتوليد خليط من الهيدروجين والـ CO<sub>2</sub> عند ضغط مرتفع قبل الاحتراق. وينتج غاز التخليق باستخدام تقنيات مختلفة، مثل تغويز الوقود الأحفوري، وإعادة التشكيل البخاري للميثان، والتي تحول من خلالها CO إلى CO<sub>2</sub> باستعمال الماء والأكسدة الجزئية

للميثان. ويعد نهج الالتقاط قبل الاحتراق طريقاً أكثر قابلية للتطبيق للتكامل مع مصادر الانبعاثات الغنية بغاز  $CO_2$  والتي تفصل عن الهيدروجين. وعلى الرغم من استخدامها على نطاق واسع، إلا أن قيودها الرئيسية تتمثل في استهلاكها العالي للطاقة ومتطلباتها لأنظمة دعم واسعة النطاق.

3. نهج أكسي-وقود/ العمليات الصناعية. وينطوي هذا النهج على حرق الوقود الأحفوري في جو غني بالأكسجين، مما يؤدي إلى إنتاج غازات مداخل غنية بالـ  $CO_2$  وأكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين وغيرها من الشوائب. ويمكن فصل الـ  $CO_2$  عن بخار الماء بحالة نقية عن طريق التكثيف. ومع ذلك، فإن متطلبات الطاقة لوحدة فصل الهواء مرتفعة جداً.

مع الأخذ في الاعتبار أن انبعاثات  $CO_2$  هي غالباً ما تكون على شكل مزيج من الغازات المختلفة تشمل الـ  $O_2$  و  $N_2$  و  $SO_x$  و  $NO_x$ ، فإن التقاط  $CO_2$  بشكل نقي نسبياً يمثل تحدياً تقليدياً لفصل الغاز والذي تناولته صناعات الطاقة والبتروكيماويات والكيماويات على مدى العقود الماضية، ويُخص الشكل 2.6 التقنيات المرشحة التي يمكنها معالجة فصل  $CO_2$  عن مخاليط الانبعاثات ونقاط القوة والضعف لكلٍ منها.

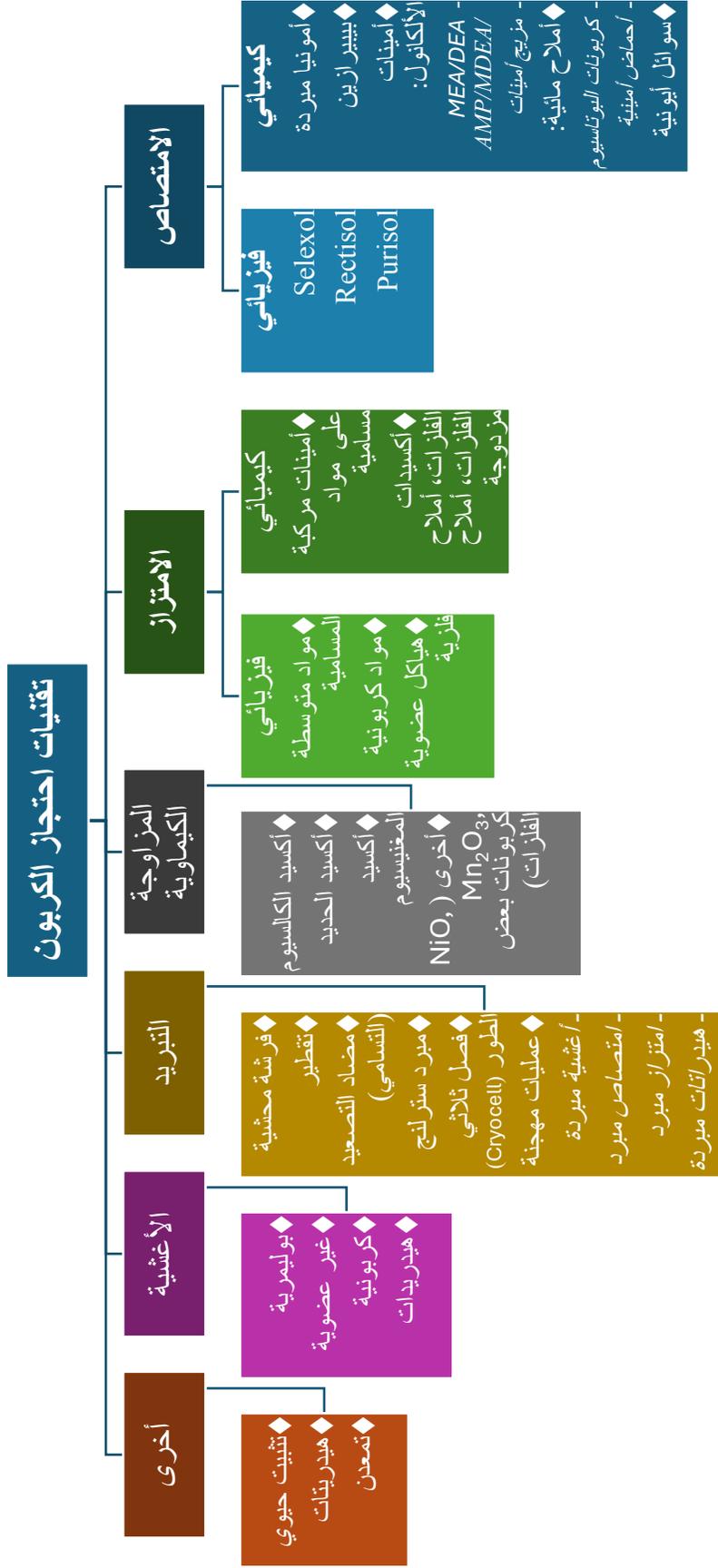


الشكل 2.6. نقاط القوة والضعف في تقنيات فصل  $CO_2$  (غالباً ما يشار إلى التقطير على أنه مبرد)

(المصدر: Demir et al., 2022).

يوضح الشكل 3.6 مجموعة واسعة من الخيارات العلمية والتكنولوجية لتقنيات الفصل التقليدية المذكورة في الشكل 2.6، بالإضافة إلى عدد من التقنيات الأخرى الخاصة بانبعثات الـ CO<sub>2</sub>. وستناقش كل فئة من التقنيات بالتفصيل في أقسام هذا الفصل مع تسليط الضوء على تطبيقاتها المحتملة لالتقاط الكربون بعد الاحتراق باستخدام نهج أكسي-وقود المذكور أعلاه. وتستخدم بالفعل بعض هذه التقنيات على نطاق واسع في الصناعة، في حين أن بعضها الآخر ما زال في مراحل مختلفة من التطوير. ويعتمد اختيار العملية على محتوى CO<sub>2</sub> في اللقيم، سواءً كان منخفضاً (غاز المداخن) أو مرتفعاً (غاز التخليق)، ومستوى جاهزية التكنولوجيا، ومخرجات دراسات الجدوى الاقتصادية (Leung et al., 2014; Rajasekaran et al., 2021; Vinoba et al., 2017; Vinoba et al., 2014). وتمت مراجعة مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه وامتثالها للأهداف المناخية مؤخراً من قبل بعض الباحثين (Chen et al., 2022b). ويبدو أن معظم التقنيات الحالية تقريباً لا تلبى الأهداف المناخية، وبالأخص من الناحية الاقتصادية. وفي الأونة الأخيرة، اقترح باحثون آخرون (de Kleijne et al., 2022) إمكانية تحقيق أهداف اتفاقية باريس (للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 1.5 °م) من خلال التقاط الكربون واستخدامه بشكل فعال باستخدام تكنولوجيات بمستوى جاهزية تكنولوجية تساوي 6 أو أعلى في غضون عقد من الزمن إذا ما بُذلت جهود تطويرية كافية.

ومستويات جاهزية التكنولوجيا (TRL) الحالية لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه هي كما يلي: 6 للتحلق الكيميائي والأغشية لمرحلة ما بعد الاحتراق؛ و 7 للامتزاز الفيزيائي، والحرق بتقنية أكسي-وقود، والتغويز المتكامل (IGCC)، وتقنيات التقاط الهواء المباشر (DAC)، وتقنيات الأغشية للاحتراق المسبق؛ و 9 لتقنيات الامتصاص والالتقاط المبرد. وتحاول العديد من المجموعات البحثية تحسين تقنيات التقاط الكربون على المستوى الصناعي عبر الحصول على دعم من التشريع الأمريكي Q45 والذي يتضمن إعفاءات ضريبية لالتقاط الكربون (Turan et al., 2021)، والتي يمكن أن تكون جاهزة خلال الـ 10-20 عاماً القادمة (Garcia et al., 2022; Hong, 2022). ومن ثمة، فإن أنظمة CCS/CCUS الهجينة من المتوقع أن تتقدم في أدائها الفني وعلى المستوى الصناعي، لا سيما من حيث كفاءة الطاقة والتكلفة. وأخيراً، تُعد تكلفة التقاط الكربون عاملاً رئيسياً يؤثر في اعتماد تكنولوجيا التقاط الكربون وتخزينه في صناعة النفط والغاز، وتبلغ التكلفة الحالية حوالي 60-110 دولاراً أمريكياً/طن ثاني أكسيد الكربون، ومن المتوقع أن تنخفض إلى حوالي 30-50 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> بحلول عام 2030 (Lin et al., 2022).



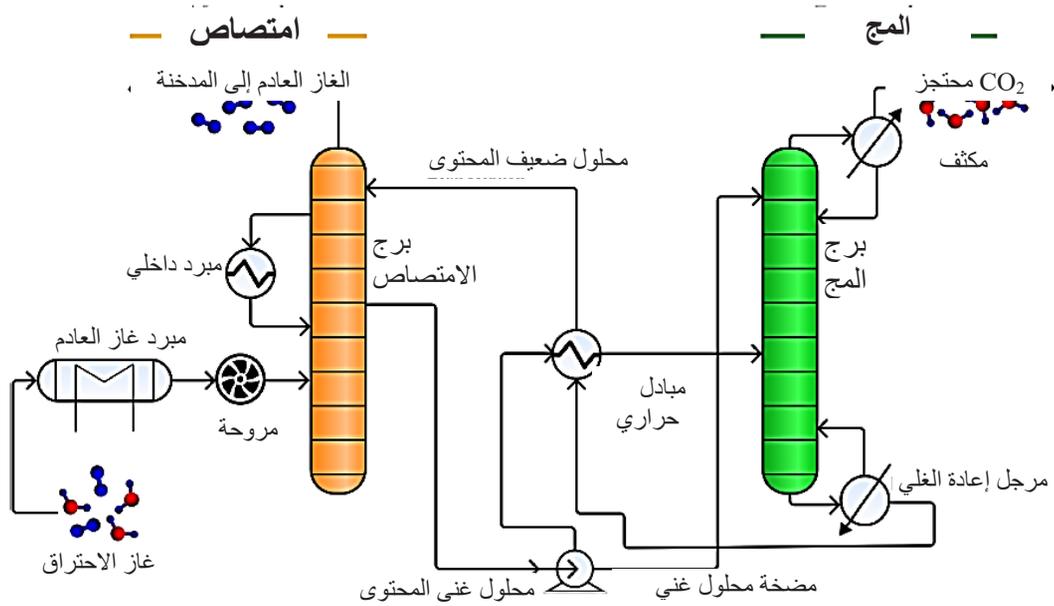
الشكل 3.6. نظرة عامة على تقنيات وعمليات احتجاز الكربون المحتملة (المصدر: 2023, AlHumaidan et al.).

## 1.6. مواد وتقنيات الامتصاص لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

### 1.1.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتصاص

تعتمد عمليات الامتصاص على مذيبات يمكنها امتصاص  $CO_2$  كيميائياً من المصدر، وقد تمت مراجعة الموضوع على نطاق واسع في العديد من الأوراق العلمية (Feron, 2016). وتعد هذه العمليات من بين أقدم التقنيات التي طُبقت في إنتاج الغاز الطبيعي وغاز التخليق منذ ثلاثينيات القرن العشرين. وبالتالي، هناك العديد من العمليات التجارية التي طُورت. وتستخدم العمليات عادةً المذيبات الأمينية، التي تتمتع بقبالية عالية لذوبان ثاني أكسيد الكربون فيها، وتتميز بالكفاءة العالية في امتصاص  $CO_2$  في التطبيقات الصناعية. ويظهر في الشكل 4.6 مخطط تدفق مبسط لعملية امتصاص بالأمينات التقليدية (CAAP). وتُطبق العملية في معالجة الغاز الطبيعي، أو غاز التخليق، أو غاز المداخن لالتقاط  $CO_2$  باستخدام محلول أمين مائي كمذيب تحت الضغط عند درجات حرارة منخفضة نسبياً للامتصاص وعند درجات حرارة معتدلة للمج. واستُخدمت مواد ماصة تقليدية قائمة على مركبات الألكانول أمين على مدار الخمسين عاماً الماضية لفصل مزيج الغاز الطبيعي/ $CO_2$  وغاز التخليق/ $CO_2$ ، تحت ضغوط امتصاص عالية. ويُعتبر محلول مونو إيثانول أمين (MEA) (بتركيز يصل إلى 30% بالوزن) مذيباً قياسياً لهذه العملية بشكل عام، ويمكن أن تُحقق هذه العملية التقاط يصل إلى أكثر من 90% من الـ  $CO_2$  (Jha et al., 2021).

ونظراً للطلب المرتفع نسبياً في الصناعة على فصل  $CO_2$ ، طُورت العديد من العمليات من قبل مانحي تراخيص العمليات (process licensors) المختلفين. ويتضمن الجدول 1.6 قائمة غير شاملة للعمليات المتاحة لتكنولوجيات الامتصاص، وهناك حالياً عدة آلاف من وحدات معالجة الغاز الطبيعي وغاز التخليق والتي تعمل منذ عقود عديدة معتمدةً على هذه العمليات. ومن ثمة، اكتسبت الصناعة خبرة واسعة النطاق وعملت باستمرار على تحسين أداء التكنولوجيا. واستناداً إلى الخبرة المكتسبة، اختارت صناعة النفط والغاز تقنيات الامتصاص كأول التقنيات المرشحة لأغراض التقاط  $CO_2$  لتلبية احتياجات التخفيف من انبعاثات الغازات الدفيئة، وربما يرجع ذلك إلى المستوى العالي من الجاهزية التكنولوجية، وانخفاض تكلفة الطاقة، والتكلفة المواتية مقارنةً بتقنيات التقاط الكربون الأخرى.



الشكل 4.6. رسم تخطيطي لعملية احتجاز CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق باستخدام الأمينات (Dziejarski et al., 2023).

الجدول 1.6. قائمة عمليات الامتصاص لتنقية الغاز الطبيعي (NETL, 2015a).

الانتشار العالمي	الميزات الرئيسية	اسم العملية/المركز
واحدة من أكثر العمليات انتشاراً	اللقيم: أحادي الإيثانول أمين (MEA) و2،2 إزوكسي الإيثانول أمين (DGA). تُستخدم في محطات الطاقة التي تعمل بالدورة المركبة للغاز الطبيعي	عملية Econamine FG/Fluor Enterprises, Inc
ما يقرب من 65 وحدة	تستخدم الميثانول كمذيب لغسل الغاز؛ تعمل في درجات حرارة أقل من 0 °م؛ معدل التقاط CO <sub>2</sub> ~99%	عملية الريكتيزول (Rectisol)/ مجموعة Linde
أكثر من 140 وحدة	عملية قائمة على الأمينات باستخدام ثنائي إيثانول أمين (DEA) وميثيل ثنائي الإيثانول أمين (MDEA) ومزيج من MDEA مع مواد أخرى؛ الهدف الرئيسي لتنقية الغاز الطبيعي	عملية AdvAmine Portfolio/ Prosernat IFP Group Technologies
30 وحدة	برج امتصاص يحتوي على محاليل كربونات البوتاسيوم ومضافات LRS10؛ يوجه المحلول الغني من خلال نظام إعادة التنشيط، ويخرج الغاز الناتج من الجزء العلوي لبرج الامتصاص	عملية LRS 10 CO <sub>2</sub> Removal/ GL Noble Denton
أكثر من 300 وحدة	تزال المكونات الحمضية (CO <sub>2</sub> وH <sub>2</sub> S) الموجودة في اللقيم الغازي عن طريق الامتصاص الكيميائي	عملية BASF /TMOASE
7 وحدات	إزالة الغازات الحمضية من الغاز الطبيعي وغاز المداخن وغاز التخليق باستخدام N-ميثيل-بيروليدون؛ تُستخدم لمعالجة الغاز الخام الناتج عن الأكسدة الجزئية للمخلفات الثقيلة	Purisol/ Lurgi GmbH, Air Liquide Global E&C Solutions
أكثر من 100 وحدة	إزالة الغاز الحمضي باستخدام مذيب عضوي على درجات حرارة منخفضة. يُستخدم الميثانول بشكل عام	عملية Rectisol/ Lurgi GmbH, Air Liquide Global E&C Solutions, Lurgi Technologies
أكثر من 700 وحدة	تُلتقط الغازات الحمضية من اللقيم في برج الامتصاص باستخدام محلول كربونات البوتاسيوم مع إضافات بنفيلد (Benfield)	عملية UOP Benfield process/ UOP LLC, Honeywell Co.

أكثر من 110 وحدة	يستخدم مذيب السيليكسول الخاص بشركة داو للكيماويات والمصنوع من ثنائي ميثيل إيثر البولي إيثيلين جلايكول، وهو خامل كيميائياً وغير عرضة للتحلل	عملية UOP SELEXOL process/UOP LLC, Honeywell Co.
------------------	--	--

وعلى الرغم من أن عمليات CAAP تتمتع بحركية سريعة، إلا أنها تعاني من متطلبات طاقة عالية. وتعود الحاجة إلى الطاقة إلى الحجم الضخم للمادة الماصة المطلوب ضخها بين برج الامتصاص والتجريد أثناء دورة الامتصاص وإعادة التنشيط. بالإضافة إلى ذلك، تتبخر كميات كبيرة من الماء من محاليل المادة الماصة أثناء عملية إعادة التنشيط وتتدفق للأعلى لتعمل كناقل للحرارة وكغاز تجريد. وتصل متطلبات الطاقة لإعادة التنشيط نحو 4.2 جيجاوات/طن CO<sub>2</sub> (Zhuang et al., 2017). ونتيجةً لذلك، يمكن أن تفقد محطة توليد الطاقة الكهربائية أكثر من ثلث قدرتها الإنتاجية عند دمجها مع منشأة CAAP (Oko et al., 2017).

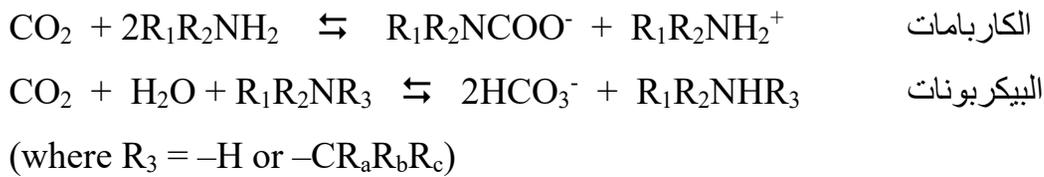
بالإضافة إلى ما سبق ذكره، فإن محاليل MEA المحملة بـ CO<sub>2</sub> هي أيضاً مسببة للتآكل بشدة، وتتحلل بسرعة، وتتطلب معدل دفع مرتفع للمذيبات، مما يُحتم استخدام معدات كبيرة الحجم مصنوعة من سبائك مقاومة للتآكل واستهلاك عالي للطاقة. وقد بُذلت جهود حثيثة لتطوير مذيبات جديدة تشتمل على مذيبات أمينية مختلطة، مثل مزيج MEA وميثيل ثنائي الإيثانول أمين (MDEA)، وثنائي الإيثانول أمين (DEA)، و2-أمين-2-ميثيل-1-بروبانول (AMP) وبيبرازين (PZ) من بين مواد أخرى، كالمذيبات القائمة على الأمونيا، ومذيبات الأحماض الأمينية، والمذيبات ثنائية الطور والمذيبات الأيونية السائلة. وأظهرت المذيبات الجديدة أداءً أفضل من حيث استهلاك طاقة لإعادة التنشيط بنسبة 50% تقريباً وكذلك لديها قدرة تحميل دوري أعلى مقارنةً بـ MEA. وتُستخدم في عمليات الامتصاص التجارية الحالية التركيبات الجديدة من المذيبات. وتُظهر المذيبات المحسنة أن تكلفة الكهرباء المستوية (LCOE) لمحطة توليد الطاقة الكهربائية المدمجة مع عملية الامتصاص لن تؤدي إلا إلى تخفيض السعة الإنتاجية بنسبة أقل من 20% مقارنةً بوحدة المذيبات التقليدية المعتمدة على MEA. إلا أن المذيبات التي أظهرت إمكانات جيدة لا تزال عند مستوى جاهزية تقنية تقدر بحوالي 4. إن العوامل الرئيسية التي تؤثر على أداء تكنولوجيا الامتصاص هي طبيعة مركب الأمين المستخدم وظروف التشغيل. ولذلك، أُجريت بحوث واسعة النطاق لمعالجة هذه المعايير. علاوةً على ذلك، ونظراً لأن نسبة CO<sub>2</sub> في الغاز الطبيعي منخفضة نسبياً مقارنةً بغازات المدخن المنبعثة من محطات الطاقة أو الصناعات الأخرى، فقد بُذلت جهود مكثفة لتحسين هيكلية العملية. وفي الأقسام التالية، سنستعرض تفاصيل التحسينات الرئيسية والجهود التي بُذلت لتسويقها.

### 2.1.6. مذيبات لعمليات امتصاص ثاني أكسيد الكربون

يعتمد أداء CAAP بشكل كبير على المذيب الأميني المستخدم في العملية. ومن ثم، فإن المذيبات الأمينية هي من بين المواضيع التي تم تناولها من قبل العديد من المجموعات البحثية في جميع أنحاء العالم، حيث أجريت أبحاث مكثفة حولها وتهدف في المقام الأول إلى تطوير مركبات أمين محسنة. وقد نُشرت العديد من أوراق المراجعة حول هذا الموضوع (Bui et al., 2018; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c; Oko et al., 2017; Zhuang & Clements, 2017). وفي جميع الأعمال البحثية تقريباً حتى الآن، تُعد محاليل MEA التي تحتوي على 30٪ بالوزن على الأقل من MEA المذيب القياسي لعملية الامتصاص الكيميائي، كون هذا المذيب مناسب لتطبيقات الضغط الجزئي المنخفض لثاني أكسيد الكربون. ويبدو أن اختيار هذه الحلول ينبع من التركيز على انبعاثات غازات المداخن الناتجة عن توليد الطاقة الكهربائية، نظراً لأنها فعالة مع متطلبات الطاقة لمعدات إعادة الغليان والتجريد والمقدرة بحوالي 3.6 جيجا جول/طن CO<sub>2</sub> محتجز. واستهدفت جهود التطوير عدداً من نقاط الضعف في التكنولوجيا مثل تخفيض متطلبات طاقة إعادة الغليان، والتطهير، والسمية، وتكوّن مواد صلبة، والثبات بوجود الأكسجين ودرجات الحرارة المرتفعة، ومعدلات نقل الكتلة، وقابلية التحلل البيولوجي والأسعار.

واستهدفت الجهود البحثية أنواعاً عديدة من الأمينات، التي يمكن تصنيفها على النحو التالي:

أ. **ممتصات أمينية مفردة.** تُعتبر حتى الآن الممتصات الأمينية الأولية أو الثنائية المستخدمة بشكل منفردة هي الممتصات الأكثر استخداماً على نطاق واسع لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وتتفاعل هذه الأمينات مع CO<sub>2</sub> لإنتاج الكربامات أو منتجات البيكربونات عبر التفاعلات الحمضية القاعدية من خلال وسيط ثنائي الأيونات (zwitterion) (Xu et al., 1996). ويتكون الوسيط نتيجة الترابط الأولي بين مجموعة الأمين وثاني أكسيد الكربون، يليه ترابط هيدروجيني مع مجموعة أمين أخرى. وتُظهر التفاعلات الإجمالية من خلال التفاعلات التالية:



وتشير التفاعلات السابقة إلى أنه يتطلب توفير مولين من MEA أو DEA لإنتاج مول واحد من الكربامات أو البيكربونات، ونتيجةً لذلك تكون سعة التحميل القصوى لهذه الأمينات هي 0.5 مول من

CO<sub>2</sub> لكل مول أمين. ويتأثر المنتج ومعدل سرعة تكوؤنه بالخصائص الكيمائية للمركب الأميني والتي تعتمد على بنيته الجزيئية. وأدت الأبحاث إلى تحديد مجموعة من الأمينات الكحولية لامتصاص ثاني أكسيد الكربون، لكل منها مسار تفاعل امتصاص مختلف (Lee et al., 2021). كما استُخدمت وُقِّمت أيضاً بعض الأمينات الخطية مثل الإيثيلين ثنائي الأمين المائي (EDA) على نطاق واسع، ووجد أنها تعمل بشكل أفضل من MEA. وأجريت دراسات على الـ MEA بتركيزات تزيد عن 30% بالوزن بوجود مضافات للتحكم في ثباته وتسببه للتآكل وذلك بهدف تحسين أداءه. وأثبتت هذه التعديلات فعاليتها وخُفض الطلب على طاقة إعادة الغليان إلى أقل من 3.3 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub>. كما دُرست أيضاً الأمينات الحلقية غير المتجانسة، مثل البييرازين (PZ) والبييريدين، على نطاق واسع. واستُخدم PZ كمادة مضافة مع ميثيل ثنائي الإيثانول أمين (MDEA) من قبل شركة BASF في العملية التي قامت بتطويرها. ويتفاعل PZ بسرعة مع CO<sub>2</sub> وله قدرة كبيرة على امتصاص CO<sub>2</sub> لأنه ثنائي الأمين. وقد خُفضت متطلبات الطاقة لإعادة الغليان بنسبة 15% تقريباً بناءً على اختبار على نطاق تجريبي. وينبع الاهتمام بالأمينات الحلقية من ثباتها المتأصل بسبب بنيتها الحلقية، مما يؤدي أيضاً إلى قدرات امتصاص كبيرة للـ CO<sub>2</sub> تعزى إلى بنيتها الجزيئية المعيقة هيكلياً (Bui et al., 2018).

كما وُجد أن MDEA و AMP يمتلكان قدرات تحميل CO<sub>2</sub> أعلى من MEA و DEA؛ وطاقة إعادة تنشيط منخفضة. وينتج عن تفاعل MDEA مع ثاني أكسيد الكربون البيكربونات فقط، ولا تتشكل الكربامات لأن MDEA يحتوي على رابطة N-H للتفاعل المباشر. ومن ناحية أخرى، يُشكل AMP أنواعاً من الكربامات غير ثابتة من خلال مجموعة NH<sub>2</sub> المترابطة مع كربون ثلاثي. ويتحول الكربامات غير الثابت إلى بيكربونات عبر مسار التفاعل المائي. وباختصار، تحدث آليات تفاعل الامتصاص لتفاعلات أمين-CO<sub>2</sub> في خطوتين بالنسبة للـ MEA و DEA، وفي خطوة واحدة بالنسبة للـ MDEA و AMP. وعلاوةً على ذلك، تزيد معدلات امتصاص الـ CO<sub>2</sub> وساعات التقاط الـ CO<sub>2</sub> بالترتيب التالي: MEA < DEA < MDEA < AMP و MDEA < AMP < DEA < MEA (Vaidya & Kenig, 2007; Vinoba et al., 2013).

على الرغم من الجهود المكثفة التي بُذلت لإدخال مركبات جديدة كمواصصة، إلا أنه لا تزال هناك حاجة إلى مزيد من الجهود البحثية لمواصلة تقييم وتطوير بعض المجموعات الواعدة من المواد الماصة، مثل البروتينات والإنزيمات والمواد الماصة المغلفة (Zhuang & Bui et al., 2018; Clements, 2017).

ب. خلطات الأمينات. تتبع فكرة استخدام الخلطات من إمكانية الحصول على تأثير تحسين تآزري عند خلط مادتين أو أكثر من المواد الماصة ذات الأداء الجيد نسبياً في التقاط ثاني أكسيد الكربون. ولذلك،

وُصفت العديد من خلطات الأمينات واختُبرت على نطاق تجريبي نمطي. ولا بد عند اختيار الخلطات من مراعاة أن تكون خصائص المكونات مُكاملة لبعضها البعض. وتختلف التركيبات من حيث المكونات المستخدمة ونسبتها في المزيج. وتعتبر خلطات PZ وAMP هي الأكثر شهرةً وتتميز بخصائص جيدة للغاية. ويشبه AMP مركب MEA، ولكن بنية AMP الجزيئية جامدة ومعيقة هيكلياً. ونتيجةً لذلك، فهي تتمتع بسعة امتصاص أعلى من MEA، ولكنها تعاني من معدلات سرعة أقل لنقل كتلة CO<sub>2</sub> إذا كان محتوى اللقيم من ثاني أكسيد الكربون منخفض. وبما أن العائق الفراغي للـ AMP يقلل من ثبات الكربامات، فبالنتيجة يزيد من تكوين البيكربونات، ومن المحتمل أن يؤثر حجم جزيء AMP على معدل التفاعل بين CO<sub>2</sub> والمجموعة الأمينية. ووجد أن إضافة الـ PZ يؤدي إلى زيادة معدلات سرعة نقل الكتلة وسعة الامتصاص. وباستعمال هذا المزيج، يمكن أن تنخفض متطلبات الطاقة إلى حوالي 3.0 جيجاجول/طن ثاني أكسيد الكربون. وأشار تقييم لنسبة PZ/AMP إلى أن النسب العالية تؤدي إلى نقل جماعي أسرع وأن النسب الأصغر تؤدي إلى انخفاض متطلبات طاقة إعادة الغليان. ويجب أن يقتصر تركيز الأمينات الإجمالي للمزيج على ~40% بالوزن كما يتوجب اقتصار نسبة PZ على 10% بالوزن لتجنب حصول ترسبات. وأخيراً، يتمتع كل من PZ وAMP بمعدلات منخفضة من الإنحلال التأكسدي والحراري مقارنةً بـ MEA.

بالنسبة لـ MDEA المائي، استُخدم PZ كمادة مضافة لزيادة سرعة نقل كتلة CO<sub>2</sub>. ومن ثمة، فُيم مزيج من MEA/MDEA وتم الحصول على سعة امتصاص CO<sub>2</sub> أقل من MDEA ولكنها كانت أفضل عند الضغوط الجزئية السائدة للـ CO<sub>2</sub> العائد لغاز المداخن مقارنةً بـ MEA أو MDEA منفردين. كما أن معدلات سرعة نقل كتلة CO<sub>2</sub> للمزيج مماثلة لتلك الخاصة بمحلول MEA المائي وحده ولا تواجه مشكلة الترسبات الصلبة التي لوحظت عند استخدام مزيج PZ/AMP. ومع ذلك، هناك عيب رئيسي وهو ارتفاع معدلات التحلل التأكسدي للخليط مقارنةً بـ MEA أو MDEA منفردين. ولوحظ أيضاً أن متطلبات طاقة إعادة الغليان للمزيج أقل بحوالي 6-12% مقارنةً بـ MEA استناداً إلى اختبار على نطاق تجريبي نمطي باستخدام غاز مداخل مُصنَّع، ولكن لم يتم تأكيد هذه النتيجة باستخدام غاز مداخل حقيقي لمحطة توليد طاقة كهربائية. وأخيراً، من المهم ملاحظة أن مجموعة الخلطات الجديدة اختُبرت وقيمت بشكل فردي على نطاق مخبري، لكن النتائج على نطاق وحدات تجريبية نمطية قد لا تنضج حتى ثلاثينيات القرن الحالي (Bui et al., 2018).

**ج. مواد ماصة متعددة الأطوار.** يُعد الفصل باستخدام التغيرات الطورية ظاهرة معروفة في الصناعة الكيميائية، وبالإمكان تحسين أداء عمليات الفصل من خلال تحويل التوازن بشكل مستمر نحو المزيد من المنتجات. واستهدف بعض الباحثين هذا المفهوم لتطوير مواد ماصة سائلة-سائلة وسائلة-صلبة

متعددة الأطوار. وفي هذا السياق، هناك ثلاثة أنواع من الأنظمة قيد النظر: (1) أنظمة درجة حرارة المحاليل الحرجة المنخفضة، حيث يتم التحكم بدرجة الحرارة للدفع نحو فصل الطور بين سائلين و(2) أنظمة ذوبان متبادلة تحتوي على مركبين على الأقل من الأمينات، حيث تُكون منتجات أمين أحدهما ذا قابلية ذوبان محدودة مع CO<sub>2</sub> و(3) أنظمة الاستخلاص بحيث يخلط أمين أو مزيج من الأمينات مع مذيب عضوي وماء. وبغض النظر عن نوع النظام، يجب أن يكون للمواد الماصة ثنائية الطور السائلة-السائلة سلوك فصل طوري مرتبط بمحتوى المنظومة من ثاني أكسيد الكربون. وتحتوي الأنظمة بشكل عام على طور سائل، وعادةً ما يكون عبارة عن محلول أمين مذاب في كحول ينفصل إلى أطوار سائلة غير قابلة للامتزاج بعد امتصاص CO<sub>2</sub> أو زيادة درجة الحرارة. وتنقسم الأطوار إلى: طور غني بالـ CO<sub>2</sub> وطور خالي من الـ CO<sub>2</sub>. وأثناء إعادة التنشيط، يُرسل الطور الغني بالـ CO<sub>2</sub> فقط إلى وحدة التجريد/إعادة التنشيط، بينما يُخلط الطور الخالي من CO<sub>2</sub> مع التيار المعاد تنشيطه وإرساله مرة أخرى إلى برج الامتصاص لامتصاص المزيد من CO<sub>2</sub>. وتتمتع هذه الأنظمة ثنائية الطور بمتطلبات طاقة أقل مقارنةً بالأنظمة أحادية الطور بسبب الحاجة إلى كميات أقل من السائل الذي يتم تغذيته إلى وحدة التجريد وانخفاض درجة حرارة المجر، وهي سمة من سمات المذيبات ثنائية الطور.

والجهات النشطة في تطوير المواد الماصة ثنائية الطور السائلة هي شركة H3، و IFP وEnergies Nouvelles، والمعهد الكوري لأبحاث الطاقة، والجامعة النرويجية للتكنولوجيا، وجامعة تسينغهاوا، وجامعة دورتموند. ويُلخص الجدول 2.6 النتائج التي توصلت إليها هذه الجهات، ومن المتوقع أن تصل التكنولوجيا إلى مستوى جاهزية 6 أو أعلى في ثلاثينيات القرن الحالي أو قبل ذلك إذا ما كُثف العمل على تسريع الجهود المبذولة.

ومن ناحية أخرى، تتفاعل بعض المواد الماصة السائلة مع CO<sub>2</sub> وتُشكل رواسب صلبة مثل الكاربامات، أو البيكربونات، أو الكربونات. ويؤدي إزالة هذه المنتجات الصلبة من طور المحلول إلى توجيه توازن التفاعل نحو إنتاج المزيد من المنتجات، مما يؤدي إلى زيادة سعة امتصاص CO<sub>2</sub> ورفع كفاءة الطاقة في المنظومة كما ورد في مراجعة نُشرت مؤخراً حول هذا الموضوع (Lin et al., 2022). ويُعتبر استخدام الأمونيا المائية (NH<sub>3</sub>) التقنية الأكثر تقدماً في عمليات الامتصاص الصلبة والسائلة متعددة الأطوار، حيث تتفاعل الـ NH<sub>3</sub> مع CO<sub>2</sub> لتكوين أيونات الأمونيوم والبيكربونات في المحاليل المائية. ويتمتع استخدام الأمونيا ببعض المزايا أهمها: (أ) الانخفاض الحاد لمعدلات التحلل الحراري أو الأكسدة، و(ب) وفرة الأمونيا وتكلفتها المنخفضة، و(ج) الانخفاض الحاد في تسببه بالتآكل، و(د) سعة امتصاص CO<sub>2</sub> عالية، و(هـ) انخفاض طاقة إعادة الغليان لأغراض التجريد (~3 جيجاجول/طن ثاني أكسيد الكربون). ومن أهم عيوب التقنية هو تقلباتها العالية، الأمر الذي يتطلب

تطوير أساليب التحكم بها. وتجري أيضاً دراسة عمليات  $NH_3$  مبردة حيث يجري الامتصاص عند درجة حرارة 0-10°م. وعند درجات الحرارة المنخفضة هذه، تزداد قابلية ذوبان  $NH_3$  و  $CO_2$  في الماء، وتنخفض معدلات سرعة نقل الكتلة، ولكن تتشكل كربامات الأمونيوم/بيكربونات الصلبة. ومع ذلك، فإن التشغيل في درجات الحرارة المنخفضة هذه يؤثر على الاستثمارات الرأسمالية وتكاليف التشغيل (Bui et al., 2018; Lin et al., 2022; Zhuang & Clements, 2017).

## الجدول 2.6. ملخص مواد الامتصاص ثنائية الطور المطورة لالتقاط $CO_2$ (Zhuang & Clements, 2017)

الشركة المطورة	مواد الامتصاص ثنائية الطور*	درجة حرارة فصل الطور	درجة حرارة إعادة التنشيط	عمق إعادة التنشيط
شركة H3	امتصاص غير مائي، كحول أميني/كحول،	40°م	حتى 125°م	90%
المعهد الكوري لأبحاث الطاقة	غير مائي، MEA في -1- هيبنتانول، أيزوكتانول، -1- أوكتانول	درجة حرارة الامتصاص	غير متاح	غير متاح
جامعة دورتموند	عدد من الأنظمة تشمل MCA/DSBA; DPA/DMCA; DMCA/MCA/AMP	60-70°م	حتى 75°م	90%+
IFP Energies Nouvelles	DMX-1؛ أمين B . أمين D	90°م	< 90°م	90%+
جامعة تسينغهاوا Tsinghua University	DEEA/BDA	40°م	90°م	90%
الجامعة النرويجية Norwegian T Uni. of S&	DEEM/MAPA	80°م	< 80°م	~ 90%

\* MEA: أحادي الإيثانول أمين؛ MCA: حمض الأسيتيك أحادي الكلورين؛ DSBA: ثاني ثنائي البيوتيل أمين؛ DPA: ثاني البروبيل أمين؛ DMCA: أمين ثنائي الميثيل الهيكسيل الحلقي؛ AMP: البروبانول ثاني الميثيل ثاني الأمين؛ DMX-1: مختصر لأسم عملية امتصاص؛ DEEA: أمين ثاني إيثيل الإيثانول؛ BDA: بيوتيل ثنائي الأمين؛ DEEM: مالونات ثاني إيثيل إيزوكسي الميثيلين؛ MAPA: أمين 3-ميثيل-أمين البروبيل.

وكبديل للأمونيا، تمت دراسة محاليل كربونات البوتاسيوم المائية ( $K_2CO_3$ )، والتي تتميز بانخفاض معدل التقلب والتآكل والسمية والتكلفة ومقاومة أعلى للتحلل التأكسدي مقارنةً بالأمينات. وتشمل المزايا الأخرى إمكانية الاستخدام في درجات حرارة عالية وحرارة امتصاص منخفضة مما يقلل من متطلبات الطاقة لإعادة التنشيط. ومع ذلك، فإن معدل التفاعل منخفض، وهو ما لوحظ في اختبارات المصانع التجريبية النمطية حيث تم تحقيق نسبة امتصاص لا تتجاوز 20-25٪ من الـ  $CO_2$  المتواجد في غاز المداخن. ولتحسين نسبة امتصاص ثاني أكسيد الكربون، يلزم إضافة مادة حفازة أو مادة معززة. وفي هذا الصدد، قام مركز البحوث التعاونية لتقنيات غازات الدفيئة ( $CO_2$  CRC) بتطوير تقنية  $K_2CO_3$  المحسنة، والتي يشار إليها باسم UNOMK3، والتي تستهدف التقاط  $CO_2$  بعد الاحتراق وقبل الاحتراق، والتي تبلغ متطلباتها من الطاقة حوالي 2-2.5 جيجاجول/طن ثاني أكسيد الكربون. وتعمل شركة UNO Technology Pty Ltd حالياً على توسيع نطاق هذه العملية وتسويقها تجارياً (Bui et al., 2018; Quan et al., 2017; Zhuang & Clements, 2017).

وتستهدف اتجاهات تطوير الامتصاص ثنائي الطور حالياً ما يلي (Oko et al., 2017; Zhuang & Clements, 2017):

- القيام بدراسات شاملة لامتصاص  $CO_2$  ودراسة حركية أنظمة الامتصاص ثنائية الطور السائلة، وإجراء المزيد من الدراسات فيما يتعلق بفحص وتصميم وتصنيع أمينات جديدة ذات خصائص محسنة.
- تحسين إدارة الطاقة على وجه التحديد فيما يتعلق باستخدام تيارات غاز إعادة المسترجع لنقل الحرارة وعمليات التجريد، بالإضافة إلى تخفيض حجم وحدة إعادة التنشيط عن طريق رفع الضغط، وبالتالي تخفيض التكلفة الرأسمالية ومعدلات استهلاك الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، العمل على تحسين درجة حرارة فصل الطور لتكون قريبة من درجة حرارة الامتصاص لتخفيض استهلاك الطاقة أثناء إعادة التنشيط.
- تطوير تصاميم جديدة لمعدات منشآت المذيبات الناشئة، والتي عادةً ما تكون لزجة ويصعب التعامل معها بكفاءة في المعدات التقليدية. وقد عولجت هذه المشكلة في مشروع موله الاتحاد الأوروبي وقام به إئتلاف مكون من 12 شريكاً لتطوير مفاعلات دوارة متخصصة للمذيبات ثنائية الطور، إلا أن هناك حاجة لمزيد من الأبحاث.
- تتطلب المواد الماصة المستخدمة في تقنيات تغير الطور السائل والصلب مزيداً من العمل لتطوير تصاميم عملية تُعالج مشكلات متعددة كنقل المواد الصلبة/الرواسب، وتبادل الحرارة، وإعادة

التنشيط. كما بالإمكان تكييف بعض العمليات المستخدمة مثل عمليات DECAB و DECAB Plus وتطويرها لثلاث أنظمة تغيير الطور السائل والصلب أخرى.

– لا تزال هناك حاجة لدراسات محدودة حول حجم المنشأة التجريبية/النموذجية، والنمذجة، والتقييم الاقتصادي، ودراسات الجدوى للحصول على الأداء العام، ومتطلبات الطاقة، وحجم أبراج الامتصاص/وإعادة التنشيط، وتكلفة محطات التقاط CO<sub>2</sub> الماصة ثنائية الطور. وتحتاج الدراسات إلى التركيز على محطات توليد الطاقة الكهربائية وغيرها من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة.

**د. المذيبات الفيزيائية.** يعتمد استخدام المذيبات الفيزيائية لالتقاط CO<sub>2</sub> على السهولة النسبية لفصل الغازات الحمضية من خلال عملية امتصاص فيزيائية للغاز والسائل، وتعمل عند درجات حرارة أعلى مع انخفاض الطلب على الطاقة مقارنةً باستخدام الألكانول أمينات (Cormos, 2011). وبعض المذيبات الفيزيائية المعروفة، مثل ريكتيسول (ميثانول)، وسيليكسول (خليط من ثنائي ميثيل إيثر وبولي إيثيلين جلايكول)، وبوريسول (N-ميثيل-2-بيروليدون)، تتمتع بكفاءة عالية في فصل غاز CO<sub>2</sub> (Dave et al., 2016; Gatti et al., 2014) من محطات توليد الطاقة الكهربائية ذات الدورة المركبة للتغوية المتكاملة قبل الاحتراق (IGCC)، والتي تُحول الوقود الأحفوري الصلب أو السائل إلى غاز التخليق. ويُنتج غاز التخليق النظيف الذي يحتوي على الهيدروجين الخالي من CO<sub>2</sub> عن طريق تحويل CO إلى CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> (CO + H<sub>2</sub>) وفصل CO<sub>2</sub> عن طريق تقنية التقاط الكربون. وتُسهل المذيبات الفيزيائية إزالة الغاز الحمضي (Acid gas removal (AGR) في محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعتمد على تقنية التغوية (IGCC)، كما أنها تُعزز كفاءة إنتاج الهيدروجين. ويتضمن فصل CO<sub>2</sub> بواسطة مذيب فيزيائي خطوتين في فصل الغازات المختلطة: الامتصاص عند درجة حرارة منخفضة وضغط مرتفع ثم مج الغازات الحمضية عند درجة حرارة عالية و/أو ضغط منخفض، ويُعاد تنشيط المذيبات الفيزيائية عن طريق فصل CO<sub>2</sub> وكبريتيد الهيدروجين بواسطة الضغط الومضي وعملية حرارية.

من بين المذيبات التي تكتسب اهتماماً متزايداً السوائل الأيونية (ILs)، وهي سوائل عند درجة حرارة أقل من 100°م وتتكون من أيونات. وتتميز بضغط بخار منخفض جداً، بالإضافة إلى العديد من الخصائص الأخرى المثيرة للاهتمام. ويُمكن أيضاً تصميمها حسب الطلب لضبط خصائصها، كاللزوجة والكثافة والقطبية والثبات الحراري وخواصها الحمضية/القاعدية. وتسمح الخصائص بإعادة تنشيط المذيبات ضمن نطاق واسع من درجات الحرارة والضغط، وبالتالي يمكن تحسين عملية الالتقاط واقتراح استخدام السوائل الأيونية كمذيبات في التقاط الكربون لأنها تعالج بعض عيوب عمليات التقاط الأمينات التقليدية، مثل التآكل وتكلفة إعادة التنشيط (Aghaie et al., 2018). وتتطلب مذيبات

السوائل الأيونية طاقة منخفضة لتحقيق نسبة عالية من التقاط ثاني أكسيد الكربون، ولها ألفة عالية تجاه  $CO_2$  في الظروف الجوية الاعتيادية، كما أن للـ  $CO_2$  قابلية عالية للذوبان فيها، وبالإمكان تعديل خصائصها عن طريق تغيير بنيتها الجزيئية باستخدام مجموعات أنيونية وكاتيونية. وذوبان الهيدروجين في السوائل الأيونية متدني جداً مقارنةً بذوبان  $CO_2$  وثاني أكسيد الكبريت، وهي ميزة أساسية عند استخدامها في تقنيات التقاط  $CO_2$  في تقنية التحلق الكيميائي لإنتاج الهيدروجين. وترتبط خواصها الأيونية وكفاءتها في التقاط  $CO_2$  بمحتوياتها من الكاتيون المفلور وسلاسل الألكيل الطويلة ووجود أنيونات محددة لها نفس الكاتيونات (Baltus et al., 2005; Cadena et al., 2004). وبسبب هذه الخصائص، تُستخدم هذه السوائل للتقاط  $CO_2$  في العمليات شبه التجارية القائمة على المذيبات لإنتاج الهيدروجين والتي تعتمد على وحدات احتراق التغويز المتقدمة الخاصة بـ IGCC (الالتقاط المسبق للاحتراق). في حين أن إنتاج الهيدروجين من عمليات إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان وعمليات الدورة المركبة للغاز الطبيعي (NGCC) لا يزال يعتمد على مسار الامتصاص الكيميائي بعد تفاعل الإزاحة باستخدام أمينات الألكانول (التقاط ما بعد الاحتراق) (Baufume et al., 2011).

ولا يمكن للسوائل الأيونية حالياً المنافسة بما فيه الكفاية بالمقارنة مع كفاءة التقاط  $CO_2$  لأنظمة أمينات الألكانول المائية، ولكن النتائج التي تم الحصول عليها حتى الآن واعدة. ومن ثمة، فإن الجهود البحثية مستمرة لمعالجة وتطوير الأفكار المختلفة. ومن بين هذه الأفكار تطوير سوائل مُعدلة تتضمن مجموعات وظيفية (Cui et al., 2016)، وخاصة مجموعة الكاتيون. واكتشفت فئات من مجموعات وظيفية مختلفة تساعد على زيادة تقارب السوائل الأيونية وثاني أكسيد الكربون، بما في ذلك سوائل أيونية معدلة بالأمينات والسوائل الأيونية المعدلة لنقل البروتونات. وقد تمت مراجعة هذا الموضوع بالتفصيل مؤخراً (Bui et al., 2018) يتضمن تقييماً للتقدم الذي أحرز، مما يدل على أن السوائل الأيونية مذيبات واعدة، لكنها لا تزال قيد التقييم على نطاق المختبر، وسوف تتطلب سنوات عديدة قبل أن تنضج التقنيات ذات الصلة. وهناك حاجة إلى مزيد من البحث للتغلب على التحديات المتبقية.

هـ. أنظمة امتصاص أخرى مقترحة. بالإضافة إلى ما سبق، يسعى الباحثون أيضاً إلى اتباع طرق امتصاص جديدة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وقد بُذلت جهود لتطوير أنظمة امتصاص  $CO_2$  محفزة إنزيمياً باستخدام إنزيم خاص يُسهل تبادل الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون، وهو الأنهيدراز الكربوني (Carbonic Anhydrase (CA)). وقد أظهرت محاولات دمج هذا النوع من الإنزيم كمادة حفازة لأنظمة امتصاص الكربون نتائج مشجعة، ربما من خلال تعزيز سرعة التفاعل وصولاً إلى تحقيق توازن سريع بين  $CO_2$  و  $HCO_3^-$  المذاب في المحاليل المائية. كما بُذلت جهود أخرى لاستخدام المواد الماصة المُغلّفة كمواد لالتقاط الكربون تتكون من مادة ماصة سائلة ممتصة لـ  $CO_2$  محصورة داخل

أغلفة بوليمرية صلبة منفذة لثاني أكسيد الكربون. ويجري تطوير هذه التقنية من قبل فريق تدعمه وزارة الطاقة الأمريكية، ويضم باحثين من جامعة إلينوي أربانا شامبين، وبابكوك وويلكوكس، ومختبر لورانس ليفرمور الوطني. وقام الفريق بتغليف MEA، والبيبيرازين (PZ)، ومجموعة متنوعة من محاليل الكربونات الأخرى، والتي تبدو مثالية لهذا التطبيق. كما حضرت أيضاً كبسولات الكربونات باستخدام غلاف بوليمر سيليكوني. والنتائج الأولية لكلا النهجين الجديدين مشجعة، ومع ذلك، تظل هناك حاجة إلى مزيد من البحث المكثف.

### 3.1.6. عمليات امتصاص CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق الجاهزة للتطبيق ( Post Combustion ) (PCC Capture).

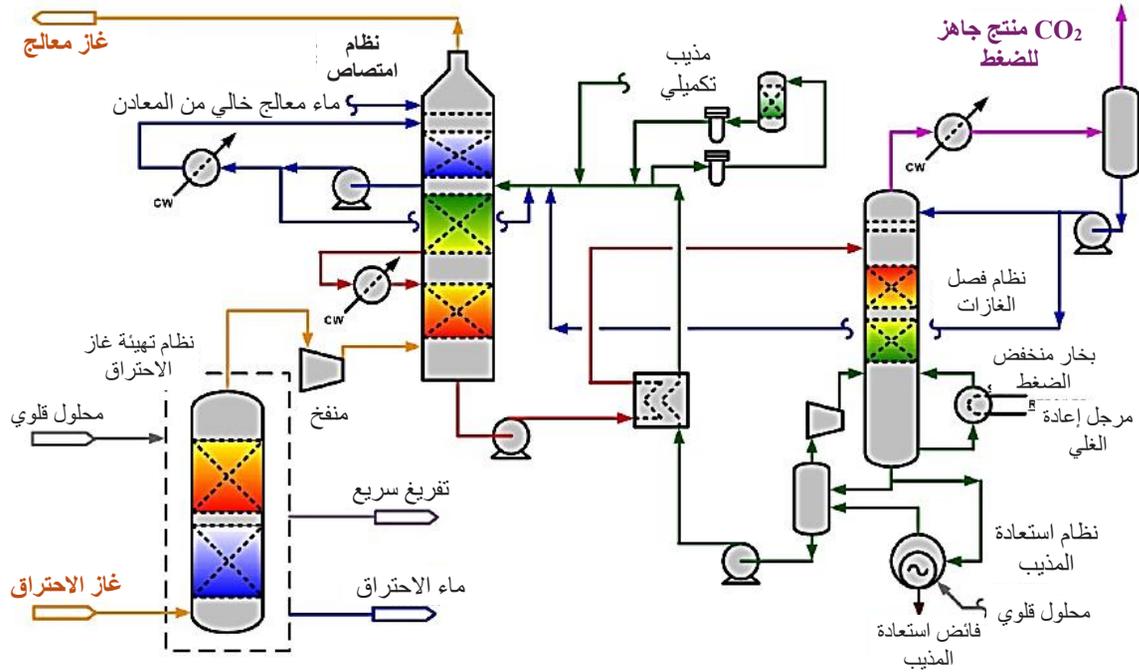
تمت مراجعة عمليات الامتصاص بعد الاحتراق بالتفصيل من قبل مختبر تكنولوجيا الطاقة الوطني الأمريكي (NETL) من خلال مجموعة من الدراسات (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c)، مما وفر خلفية جيدة عن الموضوع والتطورات التي أُحرزت حتى عام 2015. ويُقدم الجدول 3.6 قائمة بالعمليات المستخدمة حالياً على المستوى الصناعي أو العمليات التي وصلت إلى مراحل متقدمة لأغراض التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. وتستخدم أقدم عمليات الامتصاص بعد الاحتراق التجارية، كعملية Kerr-McGee/ABB Lummus Crest وعملية Fluor Daniel's وEconamine FG، محاليل MEA بنسبة 20% و30% بالوزن كمذيبات على التوالي (Oko et al., 2017).

أ. **عملية إيكونامين Econamine FG.** يوضح الشكل 5.6 مخطط تدفق العملية لهذه التقنية، وهي تقنية تعتمد على الأمينات الخاصة بشركة Fluor. ونُشر ملخص لتطور العملية من قبل الباحثين في الشركة (Rao et al., 2004). ويتبين أنها من بين العمليات الأولى والأكثر تطبيقاً على نطاق واسع وتتمتع بخبرة تشغيلية واسعة النطاق في التقاط ثاني أكسيد الكربون من غازات المداخن عادةً ذات المحتوى المرتفع من الأكسجين. وهي مناسبة بشكل خاص لتطبيقات الضغط الجزئي المنخفض لثاني أكسيد الكربون. ويُبرد تيار غاز المداخن، والذي يحتوي عادةً على مستويات منخفضة من ثاني أكسيد الكبريت (SO<sub>2</sub>) (أقل من 10 جزء في المليون) وأكاسيد النيتروجين (NOx) (أقل من 20 جزء في المليون)، ثم يُرسل إلى مضخة ضاغطة للتغلب على فقدان الضغط ويتم إدخاله إلى أسفل برج الامتصاص حيث يتدفق إلى الأعلى ويتفاعل CO<sub>2</sub> كيميائياً مع محلول مائي يحتوي على أحادي إيثانول أمين (MEA) أو أمين ثنائي الجليكول (DGA) بنسبة 30% لالتقاط معظم ثاني أكسيد الكربون. ويحتوي المذيب أيضاً على مثبطات

الجدول 3.6. عمليات امتصاص CO<sub>2</sub> (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c) (Jha et al., 2021; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c)

اسم العملية/المرخص	الميزات الرئيسية
عملية Fluor Econamine FG/ Enterprises, Inc	عملية تعتمد على MEA و DGA. القيم: غاز المداخن من مصادر مختلفة. استهلاك عالي للطاقة يتراوح بين 3.6 و 4 جيجا جول/طن متري من ثاني أكسيد الكربون. حوالي 20 وحدة قيد التشغيل. وكان هناك ما مجموعه 25 وحدة مخصصة لالتقاط وتخزين الكربون قيد التشغيل حتى عام 1999
عملية استخلاص ثاني أكسيد الكربون/ Kerr McGee – ABB - Lummus Crest	القيم من المصانع التي تستخدم الفحم الحجري والكوك البرتولي كوقود والغلايات التي تعمل بالغاز الطبيعي. وهناك ثلاثة وحدات عاملة لهذه التقنية: وحدة بسعة 800 طن/يوم أنشأت عام 1978 في الولايات المتحدة، ووحدة بسعة 200 و 300 طن/يوم أنشأت عام 1991 في الولايات المتحدة وبتسونانا
عملية -KM CDR المتقدمة/ MHIENG/KEPCO	القيم من غاز إعادة التشكيل بالبخار أو غاز المداخن. تستخدم عملية KM CDR مذبب KS-1 (MEA) بشكل أساسي) وتستخدم عملية CDR المتقدمة مذبب KS-21 الخاص. قامت شركة MHI بتسويق 13 منشأة لالتقاط الـ CO <sub>2</sub> وفق عملية KM-CDR لأغراض إنتاج الأسمدة والميثانول والنفط. وسوفت مؤخراً عملية CDR المتقدمة لأحد المصانع في المملكة المتحدة
تقنية OASE Blue BASF و Linde Technology/	تشبه هذه العملية عمليات امتصاص المذيبات الأخرى، ولكنها تستخدم مذيباً خاصاً طورته شركة BASF. والمذيب عبارة عن خليط من الأمينات والمواد المضافة المنشطة. وتتطلب العملية طاقة أقل مقارنةً بالعملية التقليدية. ومرت العملية بمرحلة التصنيع التجريبي النمطي
عملية Carbon CDRMax/ Clean Solution Ltd	يمكن استخدام هذه العملية مع تيارات CO <sub>2</sub> التي تحتوي على ما يصل إلى 25% من ثاني أكسيد الكربون. ويستخدم فيها مذيبين تجاريين خاصين، يتكونان من الأمينات والأملاح المعوقة. وتوصف من قبل المرخصين بأن أدائها أفضل بكثير من العمليات التقليدية. وهناك مصنع واحد قيد التشغيل بالفعل منذ عام 2016.
إزالة CO <sub>2</sub> بالفصل الأميني لغاز المداخن Removal from Flue Gas Amine Wash/ Air Liquide	تعتمد العملية على مذيب أميني، وتدعمها الخبرة الطويلة لشركة Air Liquid في مجال فصل الغازات الحمضية. ووفق الشركة المرخصة تتميز العملية بأنها موفرة للطاقة، وقد ازدادت سعة التصميم لتصل إلى 4000 طن يومياً
استرداد CO <sub>2</sub>	تستخدم هذه العملية تقنية الامتصاص/التجريد العائدة لشركة Lummus وينتج عنها CO <sub>2</sub> سائل بمواصفات مناسبة للصناعات الغذائية. وهناك 4 وحدات أنشأت في مصانع تنتج غازات مداخن من غلايات تعمل بالفحم الحجري

CO <sub>2</sub> Recovery/Randall Gas Technologies	
عملية امتصاص تؤدي إلى خفض الطاقة بنسبة 40%. وتم تشغيل وحدتين في اليابان في عامي 2014 و2018 بسعة 120 و143 طناً يومياً، تُنتجان CO <sub>2</sub> بدرجة نقاء تزيد عن 99.9%. ( <a href="https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/energy_solutions/escap/escap">https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/energy_solutions/escap/escap</a> )	عملية ESCAP/ Engineering
طورت هذه العملية في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين وتعتمد على مواد ماصة متعددة المراحل تستخدم الأحماض الأمينية التي تترسب عندما ترتبط بثاني أكسيد الكربون. ولا يبدو أنها سُوقَت	عملية Decab



الشكل 5.6. مخطط انسيابي نموذجي لعملية Econamine FG Plus لاحتجاز CO<sub>2</sub> (Radgen et al., 2014).

لتخفيض التآكل. ويُعالج الغاز بعد ذلك عن طريق غسله بالماء وتنقيته في الجزء العلوي من برج الامتصاص. ثم يُقسَّم المحلول الغني بـ CO<sub>2</sub> إلى تيارين، يتم تسخينهما وإعادة تنشيطهما، باستخدام إعادة التنشيط الومضي في أسطوانة ومضية، حيث يرسل الغاز العلوي الناتج إلى الجزء العلوي من وحدة التجريد، ثم يُبرد الغاز بعد ذلك وتوجه المكثفات مرةً أخرى إلى البرج لتوليد منتج ثاني أكسيد الكربون. ويُضغط بعد ذلك تيار غاز الـ CO<sub>2</sub> لأغراض التخزين الدائم أو يُسَيَّل لإنتاج منتج قابل للبيع. ويُسخن محلول MEA ويُبرد ويُصفى قبل إعادته إلى برج الامتصاص. وتُستخدم معدة لاستعادة الأمين من الأملاح والتخلص من منتجات التحلل الفرعية.

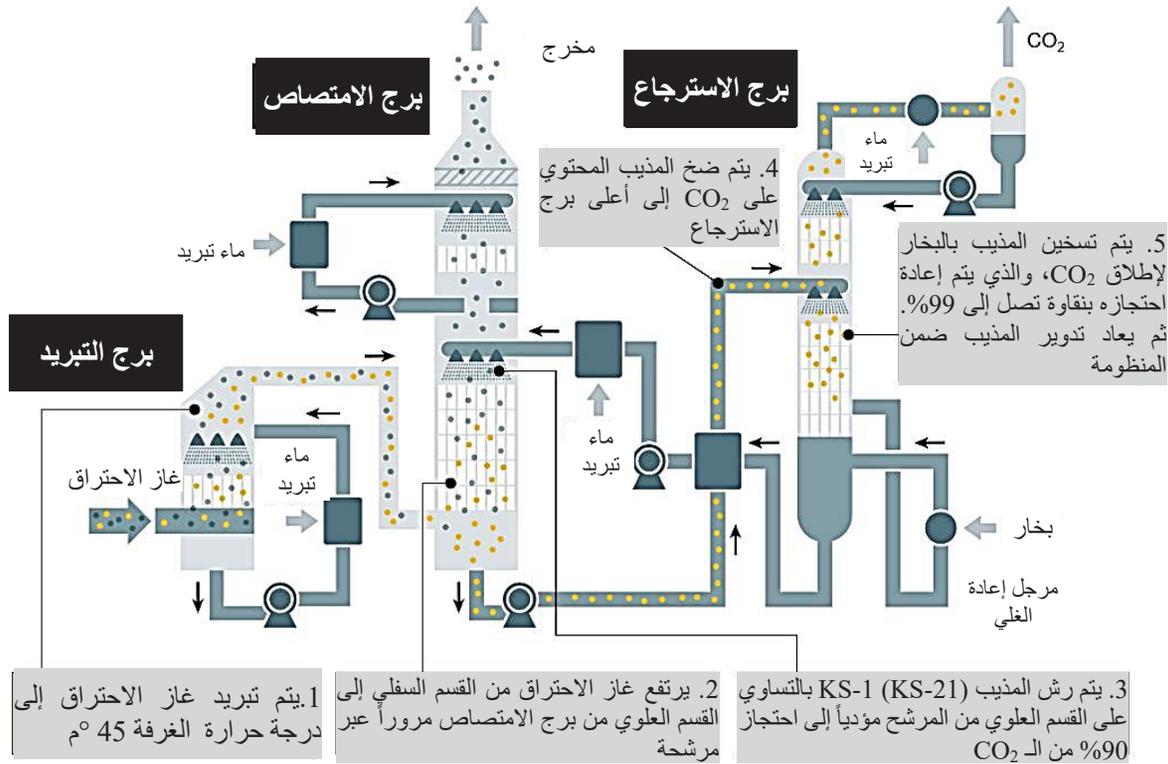
تُصنع معظم معدات وحدة إيكونامين عادةً باستخدام الفولاذ الكربوني مما يقلل من التكلفة الرأسمالية. وقد يحتوي غاز اللقيم الذي يُعالج بواسطة الوحدة على حوالي 25 مول٪ من CO<sub>2</sub> تحت ضغط يقارب ضغط الغلاف الجوي. وطُورت نسخة محسنة من العملية Econamine FG Plus، يُستخدم فيها ثنائي الجليكول أمين (Engineering, Oil and Gas Process, 2018). والعييب الرئيسي لهذه العملية هو استهلاكها المرتفع للطاقة، والذي يقدر بحوالي 4 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub> ويؤدي إلى ارتفاع تكاليف التشغيل، كما أن التكلفة الرأسمالية مرتفعة بسبب الأحجام الكبيرة جداً لأبراج الامتصاص والمج، والتي تُعد ضرورية لتمكين التقاط نسبة عالية من ثاني أكسيد

الكربون. وبالإضافة إلى ما سبق، فإن ارتفاع مستوى التسبب بالتآكل العائدة للمذيب يفرض اختيار سبائك عالية الجودة لكل من البرجين. كما يترتب على العملية تحلل المذيب نظراً لوجود الأكسجين في غاز المداخن. وبلغ إجمالي عدد الوحدات قيد التشغيل حوالي 25 وحدة مخصصة لالتقاط وتخزين الكربون حتى عام 1999 (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

**ب. استخلاص ثاني أكسيد الكربون/ كير ماكجي - Kerr McGee – ABB - Lummus Crest**

تُعد هذه التكنولوجيا أول عملية طُوّرت لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وقدم راو وآخرون نبذة تاريخية عن تطورها وخصائصها الرئيسية (Rao et al., 2004). وقد طُوّرت التقنية في البداية من قبل Kerr McGee، وفي عام 1991، أبرمت اتفاقية مع Lummus كمرخص مشارك. وتعمل التقنية باستخدام أنظمة التوليد المشترك للطاقة والغلايات التي يمكن أن تستخدم مجموعة متنوعة من الوقود. ويتراوح تركيز محلول الأمين المائي (MEA) بين 15-20%، دون أي إضافات. ويحتوي غاز المداخن في هذه العملية على كمية محدودة من أكاسيد الكبريت، بالإضافة إلى كمية من الأكسجين. وقد بدء تشغيل أول محطة معتمدة على تقنية Kerr-McGee/ABB Lummus Crest في ترونا (كاليفورنيا) في عام 1978 لاستعادة CO<sub>2</sub> من غاز المداخن، بسعة إنتاجية تبلغ 800 طن من CO<sub>2</sub> في اليوم. وبدء تشغيل وحدتين أخريتين بسعة 200 و300 طن يومياً في عام 1991 في أوكلاهوما بالولايات المتحدة الأمريكية وفي بوتسوانا. ومن المزايا الأكثر أهمية للتقنية انخفاض نسبة فقدان الأمينات، وانخفاض الحرارة اللازمة لإعادة التنشيط، وانخفاض تحلل الأمين بسبب المواد المضافة والمثبطات المستخدمة في هذه المنشآت. ويتشابه مخطط التدفق لهذه العملية إلى حد كبير مع مخطط تدفق عملية الإيكونامين (الشكل 5.6).

**ج. عمليات التقاط CO<sub>2</sub> KM-CDR و KM-CDR Advanced المتقدمة.** بذلت شركة Mitsubishi Heavy Industries Engineering (MHIENG) جهوداً مكثفة لتطوير هذه التقنية لالتقاط CO<sub>2</sub>. ويتضمن الشكل 6.6 مخطط التدفق للعملية والتي يستخدم فيها المذيب KS-TM1، وهو على ما يبدو مزيج من MEA وبعض المواد المضافة. وتتميز العملية باستهلاكها المنخفض للطاقة وكذلك انخفاض مستوى فقدان المذيبات وانخفاض مستوى التآكل.



الشكل 6.6. مخطط تدفق عملية KM CDR™ (المصدر: MHI, 2023)

ويمكن لهذه العملية التقاط أكثر من 90% من CO<sub>2</sub> من تيار غاز المداخن وإنتاج CO<sub>2</sub> بنقاء أكبر من 99.9%. وتبلغ متطلبات الطاقة لعملية شركة MHIENG والتي تُوفر على شكل بخار ما بين 0.98- 1.48 طن بخار/طن ثاني أكسيد الكربون، وهي أقل من متطلبات الطاقة لعمليات MEA التقليدية. وقامت شركة MHIENG بالفعل بتسويق 13 وحدة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون، ويستخدم الـ CO<sub>2</sub> لإنتاج الأسمدة والميثانول وللإستخلاص المعزز للنفط. وتم تسليم أكبر وحدة لالتقاط CO<sub>2</sub> في العالم بسعة 4,776 طناً مترياً يومياً إلى محطة لتوليد الطاقة الكهربائية تعمل بالفحم الحجري بالقرب من هيوستن، تكساس تابعة لشركة Petra Nova Parish Holdings LLC وذلك في عام 2016 (Jha et al., 2021; MHI, 2023). وقامت شركة MHIENG أيضاً بتحسين تقنية التقاط CO<sub>2</sub> الخاصة بها من خلال تطبيق نظام مذيب جديد (KS-21) وتقوم بالترويج له باعتباره عملية KM-CDR متقدمة. وأدخلت ثلاثة من التحسينات الرئيسية على العملية هي:

– **نظام التحكم في تعديل الحمل.** يساعد هذا النظام في الحفاظ على التشغيل السلس، أي الحفاظ على معدل استهلاك البخار، ونسبة استرداد CO<sub>2</sub> المطلوبة، وكمية الالتقاط مع تغيرات مكونات غاز المداخن.

– **نظام محسن يقلل من فقدان المذيبات.** يعمل النظام على خفض انبعاثات الأمينات بنسبة تزيد عن 90% مقارنة بالتقنيات التقليدية.

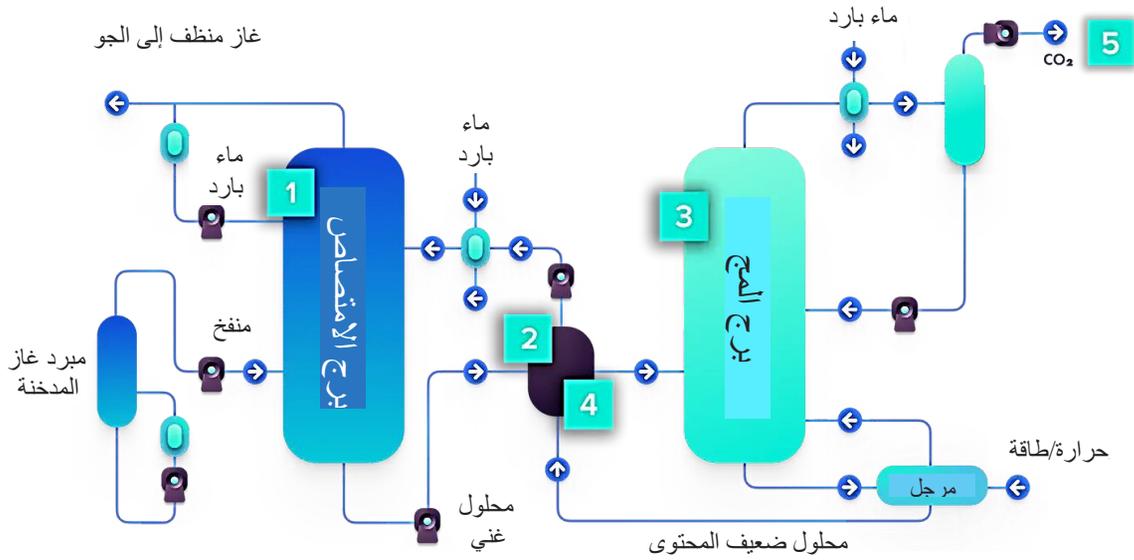
– **تحسين كفاءة استخدام الطاقة.** تمكنت الشركة المرخصة من تحقيق التحسين من خلال تخفيض استهلاك البخار بنسبة 5% تقريباً.

ومن العيوب المحتملة لهذه التكنولوجيا هو حساسيتها العالية لأكاسيد الكبريت وخاصة شوائب ثالث أكسيد الكبريت (SO<sub>3</sub>). ومن ثمة، تستوجب التقنية إزالة الكبريت من غاز المداخن وصولاً إلى أدنى تركيز ممكن، مما يؤدي إلى زيادة النفقات الرأسمالية مقارنةً بتكنولوجيا الـ CAAP (Jha et al., 2021).

د. **تكنولوجيا أواس الزرقاء OASE Blue Technology/Linde-BASF.** قامت شركة Linde ومجموعة BASF بتطوير تقنية الالتقاط بعد الاحتراق بشكل مشترك باستخدام مذيبات جديدة خاصة بشركة BASF. ويوضح الشكل 7.6 مخطط تدفق العملية. ومن المحتمل أن يكون المذيب المستخدم في العملية عبارة عن خليط من الأمينات والمنشطات الأولية/الثانوية/الثلاثية/المعوقة (حلقات غير متجانسة، أمينات الألكانول الأولية أو الثانوية، أمينات ثنائي الألكيل أو البولي أمينات). وتوفر تقنية Linde-BASF ما يقرب من 20% من مدخلات الطاقة مقارنةً بعملية التقاط CO<sub>2</sub> التقليدية باستخدام MEA، كما تتمتع بثبات جيد للأكسجين، مما يقلل من استهلاك المذيبات. ومُؤَل التعاون بين الشركتين من قبل وزارة الطاقة الأمريكية/NETL، مما أدى إلى تصميم وبناء وحدة تجريبية نمطية في المركز الوطني لالتقاط الكربون (NCCC) باستخدام غاز مداخن من محطة توليد طاقة كهربائية تعمل بالفحم الحجري، وبدء تشغيلها في يناير 2015. وتبلغ السعة التصميمية للعملية 1-1.5 ميجاوات وتتطلب طاقة إعادة تنشيط تصل إلى 2.8~ جيجاجول/طن ثاني أكسيد الكربون، وهي أقل من عملية الأمين التقليدية، تحت ضغط وحدة إعادة التنشيط التي تبلغ نحو 3.4 بار (ضغط جوي). وتلتقط الوحدة التجريبية ما يصل إلى 30 طناً من الـ CO<sub>2</sub> يومياً بمعدل التقاط يزيد عن 90% مع نقاء CO<sub>2</sub> أعلى من 99.9%. وتُخطط الشركتان لإجراء مزيد من التطوير للعملية (Jha et al., 2021; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).



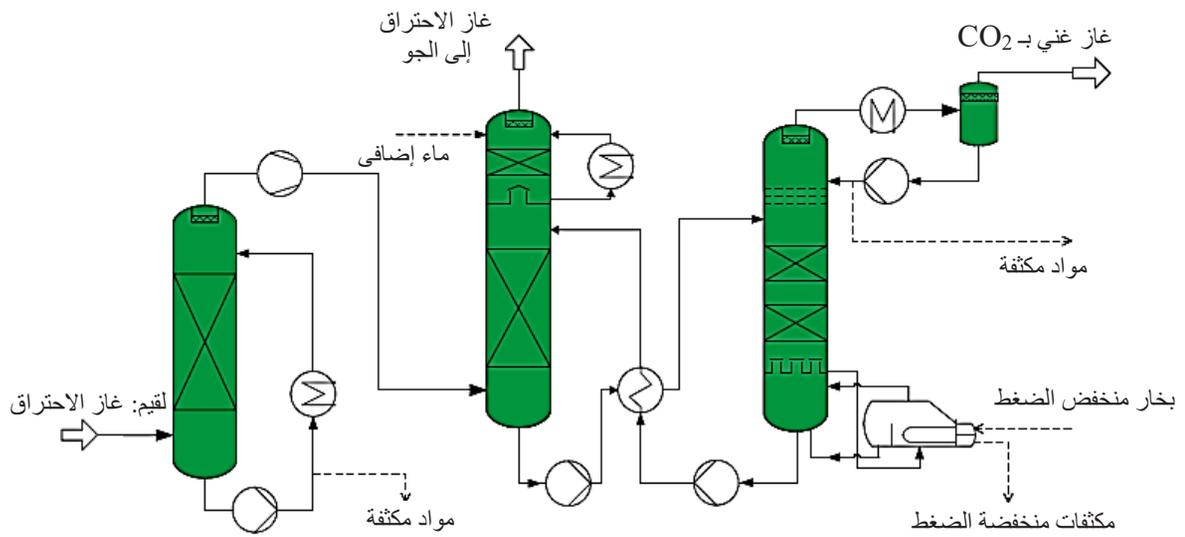
مرات تقريباً. وتبلغ تكلفة CO<sub>2</sub> المحتجز حوالي 30 دولاراً للطن. وبدء تشغيل أول مصنع في عام 2016 بسعة 60 ألف طن سنوياً لالتقاط CO<sub>2</sub> وتحويله إلى رماد الصودا. ويتمتع المذيب بسعة تحميل أعلى لـ CO<sub>2</sub> مقارنةً بالمذيبات المستخدمة تجارياً، مثل MDEA وثنائي ميثيل إيثر البولي إيثيلين جلايكول (DEPG). ويمكن للمذيب أن يتعامل مع CO<sub>2</sub> بنسبة 80 مرة أكثر من المذيبات الأمينية الأخرى. وتتراوح درجة حرارة الامتصاص ما بين 50-70 °م بينما تبلغ درجة حرارة التجريد ما بين 80-120 °م. ووفقاً للشركة التي تملك حقوق ترخيص التقنية، CCSL، فإن النفقات التشغيلية والنفقات الرأسمالية أقل بنسبة 40% و 30%، على التوالي، مقارنةً بتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> التقليدية (Jha et al., 2021; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c)



الشكل 8.6. مخطط تدفق عملية CDRMax. (1) برج الامتصاص؛ (2) التسخين؛ (3) برج التجريد؛ (4) إعادة التدوير؛ (5) التخزين (المصدر: CCSL, 2023).

و. عملية Air Liquide - إزالة CO<sub>2</sub> بالغسل الأميني لغاز المداخن. يُبين الشكل 9.6 مخطط التدفق لهذه العملية، والتي تهدف إلى التخلص من غاز المداخن الذي يحتوي على 3% إلى 25% من ثاني أكسيد الكربون. وتصل سعة الوحدة إلى نحو 1,500,000 متر مكعب في الساعة من اللقيم ويُفصل من خلالها حوالي 4,000 طن من CO<sub>2</sub> في اليوم لكل وحدة. ويُزال الـ CO<sub>2</sub> الموجود في غاز المداخن بشكل أساسي عن طريق الامتصاص باستخدام مذيب يحتوي على أمينات خاصة من الجيل الثاني، بعد القيام بمعالجة اللقيم لإزالة المكونات النزرة (الملوثات) كالجسيمات وأكسيد الكبريت في وحدة معالجة مسبقة. ويُعاد تنشيط المذيب الغني بالـ CO<sub>2</sub> الخارج من برج الامتصاص

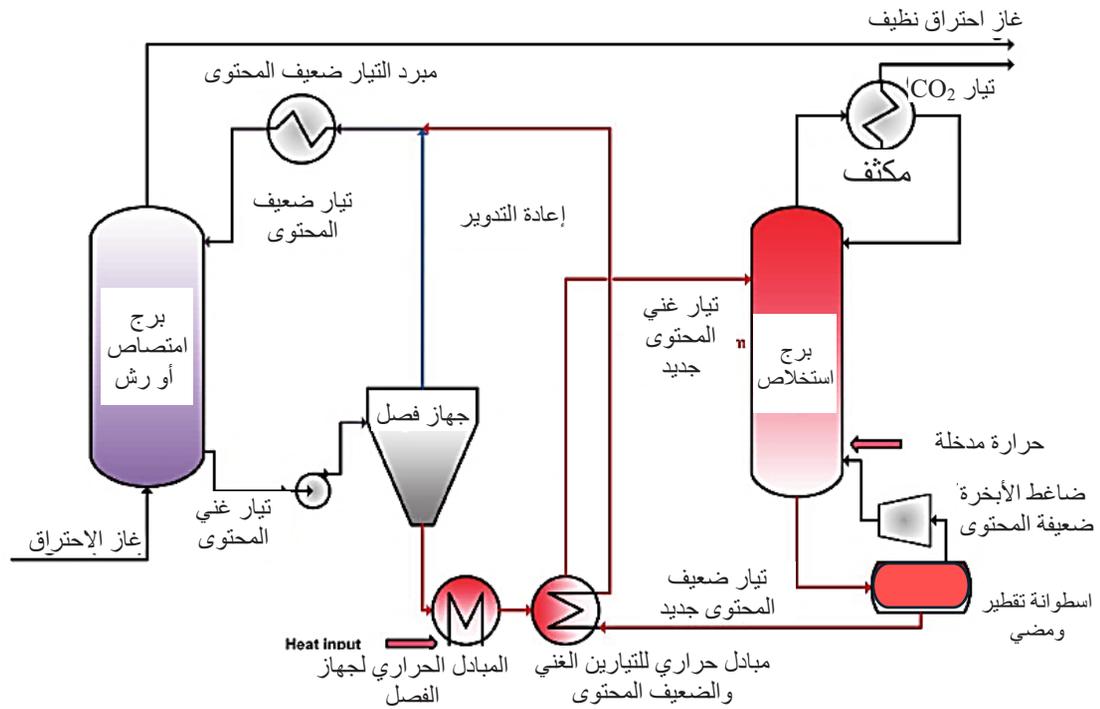
عن طريق المعالجة الوميضية والتجريد. وتتميز هذه العملية بارتفاع كفاءتها في استخدام الطاقة وارتفاع ثبات المذيبات وانخفاض تكاليف الصيانة. وتُصمم عادةً المنشأة وفقاً للمتطلبات المحددة للعملية وسعيًا نحو تحسين النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية ويمكنها الوصول إلى معدلات التقاط  $CO_2$  تصل إلى 95% بغض النظر عن محتوى  $CO_2$  الموجود في اللقيم. ونظراً لأن العملية تحتوي على امتصاص مشترك منخفض جداً، فمن الممكن الوصول إلى  $CO_2$  منتج بنقاوة تزيد عن 99.9%. وتعتمد اقتصاديات المنتج بشكل كبير على مواصفات اللقيم وبعض المتطلبات الأخرى (Air-Liquide, 2021).



الشكل 9.6. إزالة  $CO_2$  السائل من الهواء من الغسل الأميني لغاز المداخن (المصدر: Air-Liquids, 2021).

ز. عملية DECAB. تعتمد هذه العملية على مواد ماصة متعددة الأطوار وطُورت من قبل مؤسسة TNO البحثية بهولندا. وتم الإشارة إليها في عرض تقديمي عام 2006 (Brouwer et al., 2006) ونُشرت تفاصيل العملية في أوراق بحثية أُعدت من قبل المطورين (Fernandez and Goetheer, 2011; Fernandez et al., 2013). وتقوم هذه العملية، الموضحة في مخطط تدفق العملية في الشكل 10.6، بإزالة  $CO_2$  من غاز المداخن عبر ترسيب مذيبات من الأحماض الأمينية، والتي تشكل إلكتروليتات ثنائية الأيون (zwitterion) في محلول مائي. ونظراً لشحنتها المزدوجة، فإن لثنائيات الأيون قابلية ذوبان محدودة في الماء وتُفصل عن طريق الترسيب. ويمكن بعد ذلك جمع المواد الصلبة المترسبة، وإخضاعها للتحلل، وفصلها إلى المذيب و  $CO_2$ . وتُفد

تطوير العملية باستخدام غاز مداخن إحدى المصافي المحتوي على 8% حجم من CO<sub>2</sub> وأدى إلى تحقيق التقاط بنسبة 90%. ويمكن تخفيض مقدار الحرارة المطلوبة للعملية إلى 2.8 جيجاجول/طن ثاني أكسيد الكربون، باستخدام تدابير الحفاظ على الطاقة، ولا يزال تطوير العملية في مرحلة الوحدات التجريبية النمطية.

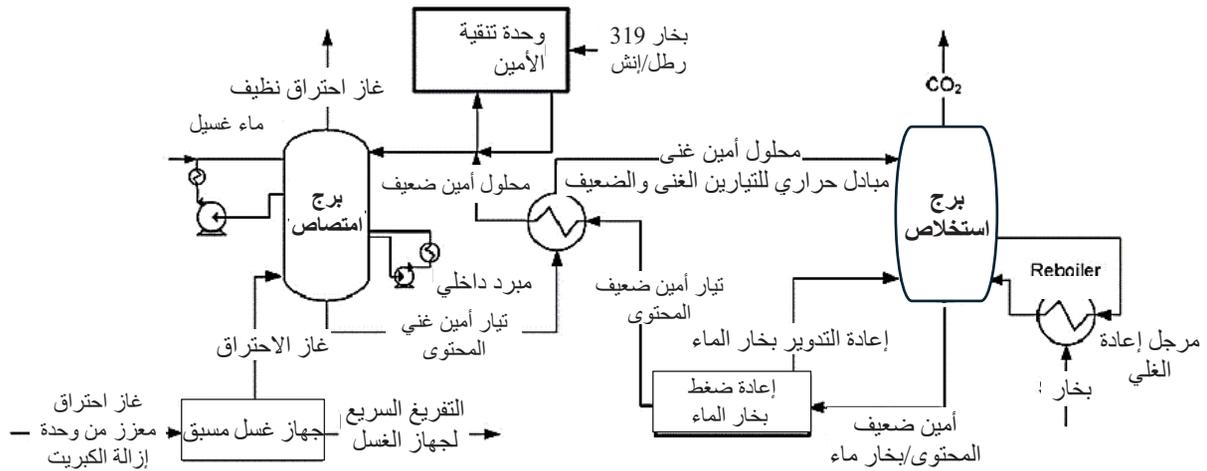


الشكل 10.6. مخطط تدفق عملية DECAB (المصدر: Fernandez & Goetheer, 2011).

ح. عملية CanSolv. طُورت هذه العملية من قبل شركة Cansolv Technology Inc. ثم استحوذت عليها شركة Shell وأصبحت إحدى العمليات التي تُرخصها شركة Shell Global Solutions. والخطوات الرئيسية للعملية هي (أ) إشباع الغاز اللقيم أولاً في جهاز غسيل مسبق دوراني بالماء، ثم (ب) توجيه الغاز للتلامس مع محلول الأمين محتواه من الأمين منخفض (هزيل) باستخدام تيار نقل كتلة معاكس في برج امتصاص محشو، حيث يتم امتصاص CO<sub>2</sub> وإطلاق الغاز المعالج المتبقي إلى الغلاف الجوي، ثم (ج) يُزال الأمين المحمل جزئياً بـ CO<sub>2</sub> من البرج، ويُبرد، ويُعاد إدخاله عبر طبقة حشوة تساعد على نقل الكتلة، ويُضخ الأمين الغني بالـ CO<sub>2</sub> من برج الامتصاص عبر مبادل حراري يحتوي على أمين ثم إلى برج إعادة التنشيط حيث يقوم بخار ماء مشبع منخفض الضغط بإعادة تنشيط محلول الأمين الهزيل ويُسترد الـ CO<sub>2</sub> كمنتج مشبع بالماء، وأخيراً (د) يضخ الأمين الهزيل من غلاية التجريد إلى برج الامتصاص لإعادة استخدامه في التقاط

CO<sub>2</sub> ويوجه الـ CO<sub>2</sub> إلى أنظمة إدارة المنتج حيث يُعد للنقل عبر خطوط الأنابيب (الشكل 11.6). وتجدر الإشارة إلى أن منشأة CanSolve كانت من بين أول مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق وتخزينه من مصادر تعمل بالفحم الحجري على نطاق تجاري في العالم في عام 2014 وذلك في محطة كهرباء Boundary Dam في كندا. وتتميز هذه العملية بمرونة عالية وتلتقط CO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> لمجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية، وقد قُيِّمت لتطبيقات مختلفة على مجموعة واسعة من وحدات التشغيل في جميع أنحاء العالم. وتتضمن العملية الفوائد التالية التي تزيد من كفاءة تشغيلها:

- سرعة تفاعل متفوقة و طاقة إعادة تنشيط أقل بالمقارنة مع الأمينات التقليدية
  - قدرة أعلى على تحميل CO<sub>2</sub> مع سهولة إعادة تنشيط المواد الماصة
  - تحسين مقاومة التحلل التأكسدي والحراري
  - مواد امتصاص وتطوير تكنولوجي متقدم
  - إزالة الـ CO<sub>2</sub> بكميات كبيرة من تيارات غاز المداخن تصل إلى حوالي 90% (Abu-2016)
- (Zahra et al.,



الشكل 11.6. مخطط التدفق النموذجي لعملية التقاط CO<sub>2</sub> Cansolv (المصدر: Hoffmann et al., 2017).

#### 4.1.6. جهود التسويق والتطوير لتقنيات الامتصاص الخاصة بالتقاط وتخزين الكربون

تكنولوجيات الامتصاص هي التكنولوجيات الوحيدة، من بين تكنولوجيات التقاط الكربون الأخرى التي سُوقَت تجارياً على نطاق واسع نسبياً. وربما يعود ذلك إلى حقيقة أن العديد من هذه التقنيات انتشرت

صناعياً على نطاق واسع بواسطة صناعة النفط والغاز منذ العقود الأولى من القرن الماضي كما هو ملخص في الجدول 4.6. وأثناء هذا الانتشار المبكر، استهدف فصل CO<sub>2</sub> مجموعة متنوعة من التطبيقات، مثل معالجة الغاز الطبيعي وإنتاج الهيدروجين. ومهدت قاعدة الخبرة والمعرفة التي تكونت في صناعة النفط والغاز الطريق لتطوير التقنيات ذات الصلة وتطوير تقنيات جديدة. وتتطلب جهود التسويق التجاري للعمليات الجديدة التي تستهدف التقاط CO<sub>2</sub> لأغراض عزله اجتياز المراحل التالية: المرحلة المخبرية، ومرحلة الوحدات التجريبية النمطية، ومرحلة العرض شبه التجاري التوضيحي، ومرحلة تقييمات النطاق التجاري. وجرى تأمين الدعم لهذه المراحل المختلفة لتطوير تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه الجديدة من خلال الجهود المتضافرة لأصحاب المصلحة الرئيسيين.

الجدول 4.6. وحدات التقاط CO<sub>2</sub> الرئيسية التي أنشأت قبل عام 1999 باستخدام عملية الإيكونامين بمعدلات التقاط تتجاوز 1000 طن سنوياً (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

المالك	الموقع	الوقود	معدل التقاط (طن سنوياً)	استخدام CO <sub>2</sub>
Carbon Dioxide Technology	Lubbock, TX, USA	غاز طبيعي	365,000	استرجاع النفط المعزز
Northeast Energy Associates	Bellingham, MA, USA	غاز طبيعي	117,000	الصناعات الغذائية
Luzhou Natural Gas	Sechuan, China	غاز طبيعي	58,000	لقيم لمصنع يوريا
Sumitomo Chem/Nippon Oxygen	Chiba, Japan	زيت وقود ثقيل	58,000	الصناعات الغذائية
Indo Gulf Fertilizer	Uttar Pradesh, India	غاز طبيعي	55,000	لقيم لمصنع يوريا
Prosint	R.o de Janeiro, Brazil	غاز طبيعي	33,000	الصناعات الغذائية
N-Ren Southwest	Carlsbad, NM, USA	غاز طبيعي	33,000	استرجاع النفط المعزز
Messer Greisheim do Brazil	Sao Paulo, Brazil	غاز طبيعي	29,000	الصناعات الغذائية
Liquid Air Australia	Altona, Australia	غاز طبيعي	22,000	الصناعات الغذائية

الصناعات الغذائية	22,000	غاز طبيعي	Botany, Australia	Liquid Air Australia
الصناعات الغذائية	18,000	غير محدد	Sao Paulo, Brazil	Messer Greisheim do Brazil
الصناعات الغذائية	16,000	غير محدد	San Fernando, Philippines	San Miguel Corp.
الصناعات الغذائية	13,000	غير محدد	Sudrigiu, Romania	European Drinks
الصناعات الغذائية	9,000	غير محدد	Barranquilla, Colombia	Cervezaria Bavaria
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	Quito, Ecuador	Industrial de Gaseoses
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	Manila, Philippines	Pepsi Cola
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	Quezon City, Philippines	Pepsi Cola
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	San Fernando, Philippines	Cosmos Bottling
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	Cairo, Egypt	Coca Cola
الصناعات الغذائية	2,200	غير محدد	Santo Domingo, Dominican Republic	Azucar Liquida
وحدة نمطية	1,800	فحم حجري	Yokosuka, Japan	Tokyo Electric Power
وحدة نمطية	1,100	فحم حجري	Saskatchewan, Canada	Boundary Dam Power Plant

وقد لعب إنشاء مركز اختبار CO<sub>2</sub> الأوروبي في مونجستاد (TCM) في النرويج، وهو مركز متخصص لاختبار تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المختلفة، وخاصةً الأمونيا المبردة وعمليات PCC القائمة على الأمينات، دوراً مهماً. وقد اختبر المركز بنجاح العديد من تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه القائمة على الامتصاص، وهي عملية الأمونيا المبردة من شركة ألتوم (CAPTM)، وتقنية الكربون النظيف من شركة Aker، وتقنية CanSolv<sup>TM</sup> من شركة Shell، وتقنية PostCap<sup>TM</sup> من شركة Siemens وغيرها. ويُقاس نجاح التقنية باستخدام بروتوكول قياس مرجعي مستقل طور من قبل معهد أبحاث الطاقة الكهربائية الأمريكي (EPRI) (Booras, 2011).

وتشمل الأبحاث التي أُجريت من خلال دراسات باستخدام منشآت تجريبية ما يلي: (1) تحديد سمات المذيبات المختلفة؛ (2) منهجية نقل التكنولوجيا من المستويات المخبرية إلى المستويات التجارية؛ (3) قابلية تحلل المذيبات؛ (4) دراسات التآكل؛ (5) دراسة منهجية التشغيل و(6) كفاءة استخدام الطاقة في العمليات (Oko et al., 2017). ويقدم الجدول 5.6 والجدول 6.6 قوائم بالمحطات التجريبية الناجحة المدمجة في محطات طاقة عاملة، والعمليات التجارية التي طُورت، على التوالي (Oko et al., 2017).

الجدول 5.6. ملخص تقييم تقنيات الالتقاط بعد الاحتراق بناءً على الامتصاص الكيميائي المدمج في محطات الطاقة الكهربائية (Oko et al., 2017)

السنة	السعة	التكلفة	المجموعة المالكة	الموقع	المشروع
2008– 2009	15,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	8.6 مليون دولار أمريكي	Alstom Power/Electric Power Research Institute/ We Energies	Wisconsin, USA	Pleasant Prairie
2009– 2010	15,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	15 مليون دولار أمريكي	E.ON Thermal Power/ Alstom Power	Malmo, Sweden	E.ON Karlshamn
2009– 2011	100,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	668 مليون دولار أمريكي	American Electric Power (AEP)/Alstom Power/ RWE/ NETL/Battelle Memorial Institute	West Virginia, USA	AEP Mountaineer
2010– 2012	8000 طن CO <sub>2</sub> /السنة	20 مليون يورو	Enel and Eni	Brindisi, Italy	Brindisi
2011– 2012	500 طن CO <sub>2</sub> اليوم	غير معروف	Southern Energy/ Mitsubishi Heavy Industries/Southern Company/U.S. DOE's Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership and EPRI	Alabama, USA	Plant Barry

2008- إلى الوقت الحاضر	3000 طن CO <sub>2</sub> /السنة	غير معروف	Huaneng Power Group/CSIRO	Beijing, China	Gaobeidian
2010- إلى الوقت الحاضر	120,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	24 مليون دولار أمريكي	Huaneng Power Group	Shanghai China	Shidongkou
2010- 2014	100,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	غير معروف	Shenhua Group	Inner Mongolia, China	Shenhua
2010- 2012	40,000 طن CO <sub>2</sub> سنوياً	غير معروف	Sinopec Group	Shangdong, China	Sinopec
2010- 2013	مرحلة 1: 2 طن CO <sub>2</sub> /اليوم؛ مرحلة 2: 200 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	42 مليون دولار أمريكي	Korea Electric Power Company (KEPCO)	Boryeong, S. Korea	Boryeong
2012- 2014	70 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	غير معروف	Fluor/E.ON Kraftwerke	Bremen, Germany	Wilhelms- haven
2012- 2013	100 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	21 مليون جنيه إسترليني	SSE/Doosan Babcock/Vattenfall	Ferrybridge, UK	CCS Pilot100+
2008- 2010	20 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	غير معروف	First Energy/ Powerspan/ Ohio Coal Development Office	Burger	ECO <sub>2</sub>
2013- 2014	50 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	غير معروف	RWE power/ CanSolv Technologies Inc.	Wales	Aberthaw
2015	15 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	12.13 مليون دولار أمريكي	Husky Energy Inc./CO <sub>2</sub> Solutions	Saskatche- wan	Pikes Peak
2013- 2014	25 طن CO <sub>2</sub> /اليوم	22 مليون يورو	EDF/Veolia/Alstom Power/Dow Chemical	Le Havre, France	EDF

## الجدول 6.6. مشاريع الالتقاط بعد الاحتراق التجارية والمستندة على عمليات الامتصاص الكيميائي

(Oko et al., 2017)

المشروع التجاري	الوحدة التجريبية	المذيب/مادة الامتصاص	الشركة المطورة	أسم العملية/التكنولوجيا
Boundary Dam Canada قيد التشغيل; Bow City Canada (التخطيط)	TCM Norway Aberthaw PCC Wales	مركبات أمينية	Shell	CanSolv
Longannet UK (ملغى) Porto Tolle Italy (ملغى)	TCM Norway	مركبات أمينية	Aker Clean Carbon	Advanced Capture Process
ROAD Netherlands (تخطيط); Masdar Abu Dhabi (تخطيط)	TCM Norway Big Bend PCC Florida	ملح حمض أميني	Siemens	PostCapTM
Trailblazer, Texas (ملغى)	TCM Norway; Wilhelmshaven PCC Germany	مركبات أمينية	FLOUR	Econamine FG PlusSM
Elektownia Belchatow, Poland (تخطيط); GETICA Romania (مجمد)	EDF PCC Le Havre, France; Charleston PCC, West Virginia	DOW مركب UCARSOLT M FGC 3000	Alstom Power/ Dow Chemical	Advanced Amine Process
AEP Mountaineer CCS Phase II, West Virginia (ملغى); Project Pioneer Alberta (ملغى)	TCM Norway; Pleasant Prairie PCC, Milwaukee; Karlshamn PCC Sweden; Mountaineer CCS Phase I, West Virginia	أمونيا مبردة	Alstom Power	CAP
Petro-Nova CCS, Texas (قيد العمل)	Plant Barry, Alabama; Plant Yates, Georgia	مركب KS-1 مركب أميني معوق	MHI/KEPC O	KM- CDRTM
	Burger PCC, Ohio	مركبات أمينية	Powerspan	ECO <sub>2</sub> TM

Antelope Valley CCS, North Dakota	International Test Centre, Canada	مركبات أمينية	HTC Purenergy/ Doosan Babcock	HTC
	Pikes Peak South PCC, Saskatchewan, Canada	مذيب محتوي على أنزيم	Solutions Ltd	CO <sub>2</sub> Solution
	ENEL's Brindisi Pilot PCC, Italy	مذيب ثنائي الطور	IFPEN/ PROSERNA	DMXTM
		مركب OptiCa p	Babcock and Wilcox	RSATTM

ويُعد أسلوب الامتصاص/التجريد المعتمد في محطات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه لأغراض تجارية هو الأكثر انتشاراً في الصناعات. ومن بين هذه المصانع مصنع سليبنر CCS (Sleipner CCS plant) بالنرويج، ومصنع صلاح CCS (Salah CCS plant) بالجزائر، ومصنع سنوهفيت CCS (Snøhvit CCS plant) بالنرويج، ومؤخراً مصنع جورجون CCS (Gorgon CCS plant) بأستراليا ومصنع كويست CCS (Quest CCS plant) بكندا. وبالنسبة لمحطات توليد الطاقة الكهربائية، يعد مصنع Boundary Dam CCS في كندا ومحطة Petra Nova المشاريع العاملة الوحيدة لالتقاط وتخزين الكربون، وكلا المحطتين يعتمد على عملية الامتصاص الكيميائي.

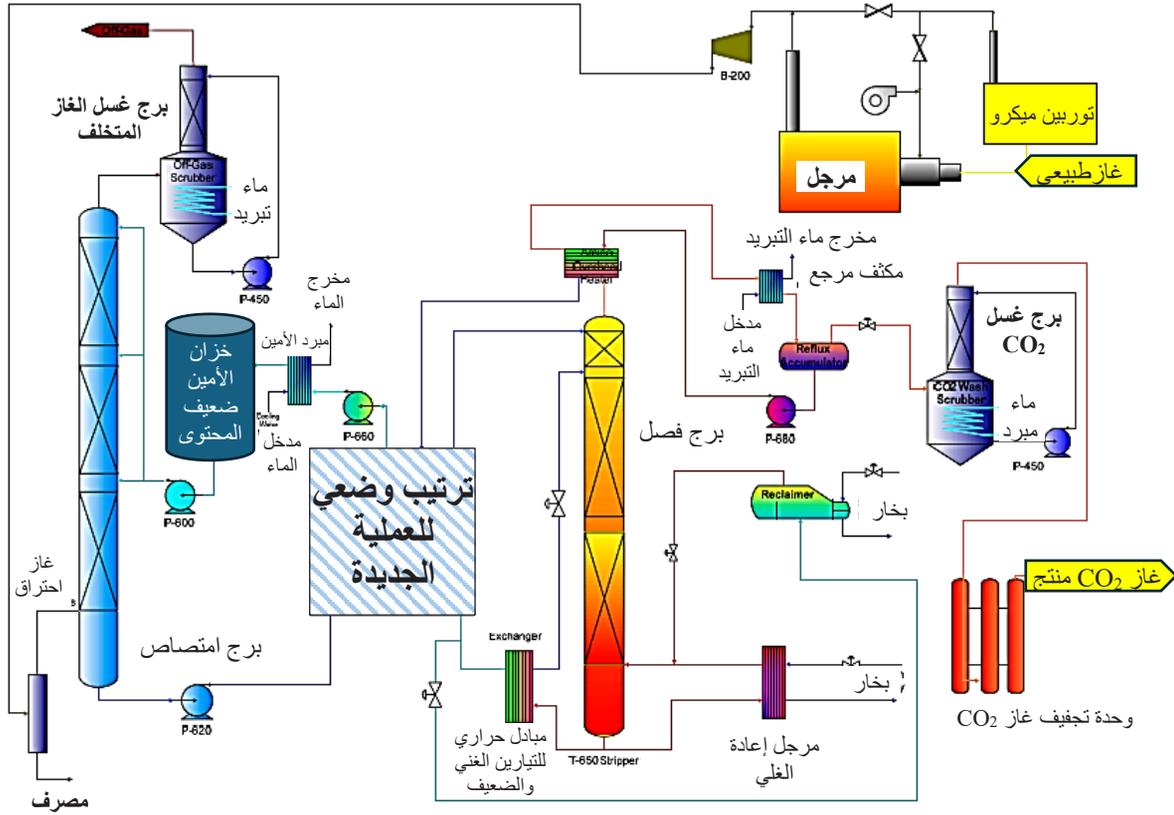
ولتقنيات الامتصاص المعتمدة على المذيبات بعض العيوب الرئيسية، بما في ذلك:

- تتطلب العمليات طاقة ونفقات رأسمالية عالية، وذلك بسبب الأحجام الكبيرة للمعدات للتعامل مع الكميات الضخمة من المذيبات والبخار المطلوبة والحاجة إلى تنظيف وإزالة مخلفات المذيبات من أبراج الاسترداد (Recovery columns).
- التآكل الذي تتسبب به المذيبات الأمينية، وتحلل هذه المذيبات بوجود شوائب غاز المداخن (خاصة أكسيد الكبريت والأكسجين)، كما أن بعضها يُنتج منتجات ثانوية سامة عند التسخين
- ضرورة التخلص الآمن بيئياً من المذيبات منتهية الصلاحية

ومع الأخذ في الاعتبار القيود المذكورة أعلاه في هذا القسم، بدأت الجهود منذ أكثر من عقد من الزمن لتحسين تقنيات امتصاص المواد الكيميائية لتخفيض تكاليف التشغيل والتكاليف الرأسمالية الإجمالية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وكان التركيز في المقام الأول على التكامل الحراري لأنظمة التقاط CO<sub>2</sub> مع محطات توليد الطاقة الكهربائية وتحسين تركيبات المذيبات. وتتمتع هذه التحسينات بالقدرة على

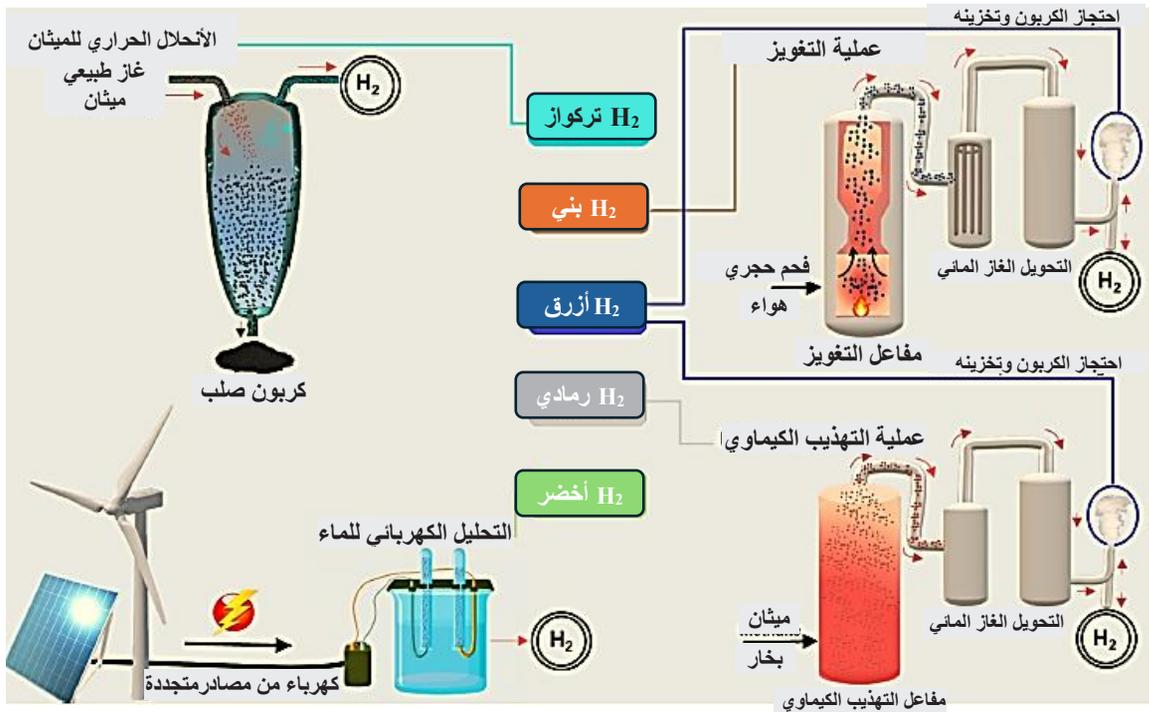
تخفيض التكلفة وكثافة الطاقة لالتقاط CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق بنسبة تقدر بـ 30% مقارنةً بمسار الأمينات التقليدي. وتمت متابعة الجهود المبذولة لتحسين التكنولوجيا من قبل مجموعات مختلفة. فعلى سبيل المثال، عمل مركز الاختبار الدولي لالتقاط الكربون في جامعة ريجينا في كندا على برنامج يُعالج مسألة استرداد CO<sub>2</sub> من المصادر الصناعية بأقل تكاليف رأسمالية وتشغيلية ممكنة. ومن بين التحديات التي عولجت تخفيض متطلبات الطاقة في معدات إعادة الغلي (reboilers). وخُفضت كمية الحرارة المطلوبة من 5.1 إلى 1.2 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub> باستخدام عملية منشطة بمادة حفازة، وتغيير المذيب من MEA إلى مذيبات أخرى، واستخدام هيكلية متقدمة للعملية (الشكل 12.6) (Idem et al., 2011). بالإضافة إلى ذلك، ومن خلال تكثيف العملية، تُبذل محاولات لتخفيض حجم برج الامتصاص ومعدات التجريد باستخدام معدات بديلة، مثل الأسرّة المعبأة الدوارة (rotating packed beds)، التي تؤدي إلى انخفاض كبير في أحجام الأسرّة المعبأة (Oko et al., 2017). وتشمل التصميمات الجديدة الأخرى استخدام تقنيات القرص الدوار (spinning disc) والميكروويف لإعادة تنشيط المذيبات، وإضافة معدات أخرى (على سبيل المثال، المبادلات الحرارية، والضواغط، والأسطوانات الوضعية وما إلى ذلك) إلى العملية التقليدية، وإضافة مبرد داخلي لبرج الامتصاص، إلا أن هذه التعديلات تتسبب في زيادة التكاليف الرأسمالية (IEAGHG, 2015).

ويفتح موضوع إدخال الهيدروجين ضمن نشاطات تحول الطاقة الحالي فرصاً وتحديات جديدة لتقنيات امتصاص التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. فإنتاج الهيدروجين الرمادي التجاري (commercial grey hydrogen) الحالي يتسبب بكمية كبيرة من انبعاثات الكربون. ولن يكون من الممكن تحقيق مستقبل الهيدروجين المستدام إلا إذا "صمم" إنتاج الهيدروجين لالتقاط مثل هذه الانبعاثات لإنتاج الهيدروجين الأزرق. ومن المتوقع أن تلعب عمليات إعادة التشكيل البخاري لغاز الميثان (SMR) وتغويز الفحم الحجري ومخلفات النفط دوراً هاماً في إنتاج الهيدروجين بحلول عام 2050، بشرط أن يُلتقط الـ CO<sub>2</sub> المنتج بكفاءة وبشكل مشترك كما هو موضح في الشكل 13.6 (AlHumaidan et al., 2023). ونظراً لمتطلبات الوحدة الإضافية المطلوبة لفصل ثاني أكسيد الكربون، ستتأثر كفاءة وتكاليف عمليات إنتاج الهيدروجين، وبالتالي، يتوجب تأويل تشغيل العمليات. وتشمل التحديات الرئيسية الحالية لإنتاج الهيدروجين من خلال عملية إعادة التشكيل البخاري (SMR) أو التغويز ما يلي: (1) تطوير مواد حفازة فعالة ومستقرة ورخيصة لتحسين كفاءة التحويل، و(2) تحسين متطلبات الطاقة المرتبطة بالعملية، و(3) تطوير وتنفيذ أنظمة فعالة لاسترجاع الحرارة والطاقة، و(4) تحسين هيكلية عمليات الإنتاج من خلال الحسابات التقنية الاقتصادية وحسابات الطاقة (Masoudi Soltani et al., 2021).



بجائزة اوليك  
البحث الفائق

الشكل 12.6. مخطط تدفق عملية ICT المتكاملة لالتقاط CO<sub>2</sub> (المصدر: Idem et al., 2011).



الشكل 13.6. مسارات إنتاج الهيدروجين مع التركيز على طرق إنتاج الهيدروجين الأزرق (المصدر: Osman et al., 2022).

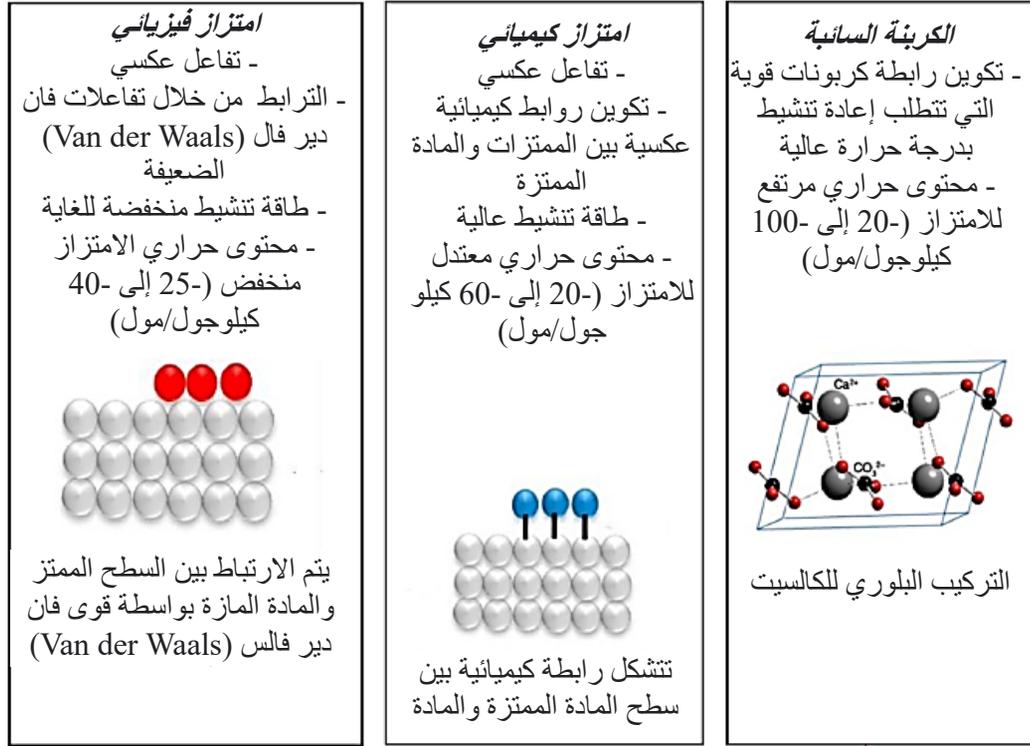
## 2.6. مواد وتقنيات الامتزاز لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

الامتزاز هو ظاهرة يُحتفظ فيها بالمادة الكيميائية إما في شكل نقي أو مذابة في محلول في الطور السائل أو الغازي من خلال تفاعلات ضعيفة مع سطح مادة صلبة يُشار إليها باسم المادة المازة. وينبع الاهتمام باستخدام الامتزاز لالتقاط  $CO_2$  من المعرفة والخبرة التي تتمتع بها الصناعة الكيميائية والصناعات الأخرى ذات الصلة في هذا المجال. وتعود الجهود المبذولة للاستفادة من التقنيات المتاحة إلى أوائل تسعينيات القرن الماضي عندما تم اقتراحها كبديل لعمليات الامتصاص لالتقاط الكربون. ومنذ ذلك الحين، بُذلت جهود متزايدة ومستمرة لتطوير تكنولوجيا الامتزاز لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وسنحاول في هذا القسم تقديم ملخص للتقدم الذي أُحرز في هذا المجال على مدار العقود الثلاثة الماضية، مع التركيز على التقنيات التي تقدمت إلى مستويات عالية من الجاهزية التكنولوجية. وقد نُشرت العديد من المراجعات حول هذا الموضوع على مدى العقد الماضي، مما يعكس الاهتمام القوي بهذا المجال. ويمكن للقارئ الرجوع إلى الأوراق التالية لمزيد من التفاصيل (Buckingham et al., 2022; Bui et al., 2018; Chao et al., 2021; Dziejarski et al., 2023; Gao et al., 2022; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

### 1.2.6. نظرة عامة على تكنولوجيا الامتزاز

فيما يتعلق بـالتقاط ثاني أكسيد الكربون، يمكن تقسيم ظاهرة الامتزاز إلى ثلاث فئات وفق طبيعة التفاعلات بين  $CO_2$  والمادة المازة، كما هو موضح في الشكل 14.6، وتتلخص في ما يلي:

- **الامتزاز الفيزيائي (Physisorption).** يحدث هذا الامتزاز عندما يتفاعل  $CO_2$  بشكل ضعيف مع سطح المادة المازة من خلال قوى فان دير فالس (Van der Waals) في عملية طاردة للحرارة وقابلة للعكس. وبما أن التفاعل ضعيف، فإن البنية الجزيئية تظل دون تغيير إلى حد كبير، وتكون طاقة الامتزاز منخفضة. وتُفصل الجزيئات المختلفة، مثل  $CO_2$  أو  $N_2$  أو  $O_2$ ، عن طريق الاستبعاد بالحجم. وبالتالي، فإن المادة المازة ذات حجم مسامي أكبر من القطر الحركي لجزيء ما (مثل  $CO_2$ ) في الخليط، ولكنه أصغر من أقطار الجزيئات الأخرى (مثل  $N_2$  أو  $O_2$ )، مما يُمكنها من أن تتفاعل بشكل انتقائي مع الجزيء الأول وفصله عن الجزيئات الأخرى في الخليط.
- **الامتزاز الكيميائي (Chemisorption).** يحدث هذا الامتزاز عندما ترتبط طبقة واحدة من الأيونات أو الجزيئات أو الذرات بسطح ماص عن طريق روابط كيميائية. وبالتالي تنطوي العملية على تكوين وإزالة الروابط الكيميائية وعليه تكون طاقة التنشيط أكبر من الامتزاز الفيزيائي مما يجعل العملية انتقائية، وتُعتبر مهمة لضمان استخدام مستوى عالٍ من سعة الممتزات على الألتقاط.



درجة حرارة إعادة تنشيط متزايدة

الشكل 14.6. الخصائص الرئيسية لآليات الامتزاز الفيزيائي والامتصاص الكيميائي والكربنة السائبة (Bulk Carbonation) (المصدر: Buckingham et al., 2022)

– الكربنة (Carbonation). يُستخدم في هذه الفئة  $CO_2$  كمادة متفاعلة مع مادة كيميائية مازة مثل أكسيد الكالسيوم (CaO) لإنتاج مادة كيميائية تعمل على تثبيت  $CO_2$  كمركبات مثل  $(CaCO_3)$ . ويكون تفاعل الكربنة سريعاً في البداية ويتم التحكم فيه عن طريق الحركية الكيميائية. ومع استمرار التفاعل، تتشكل طبقة من  $CaCO_3$  على سطح جسيمات CaO مما يؤدي إلى إبطاء سرعة التفاعل بسبب محدودية الانتشار، حيث أن طبقة الـ  $CaCO_3$  تمنع الاستخدام الكامل للـ CaO (Buckingham et al., 2022).

وقد طُورت وقُيِّمت مجموعة واسعة من المواد المازة المتعلقة بالفئات الثلاث المذكورة أعلاه على مدار العقود الثلاثة الماضية، بما في ذلك عدد من المواد المازة التقليدية التي استُخدمت لعدة عقود. ويقدم الجدول 7.6 قائمة بالجهود التطويرية المختلفة لتكنولوجيا الامتزاز التي يقوم بدعمها مختبر تكنولوجيا الطاقة الوطني الأمريكي (NETL) والتي طور من خلالها مجموعة واسعة من العمليات (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

الجدول 7.6. مشاريع تطوير عمليات التقاط CO<sub>2</sub> المعتمدة على مواد مازة من قبل مختبرات NETL.

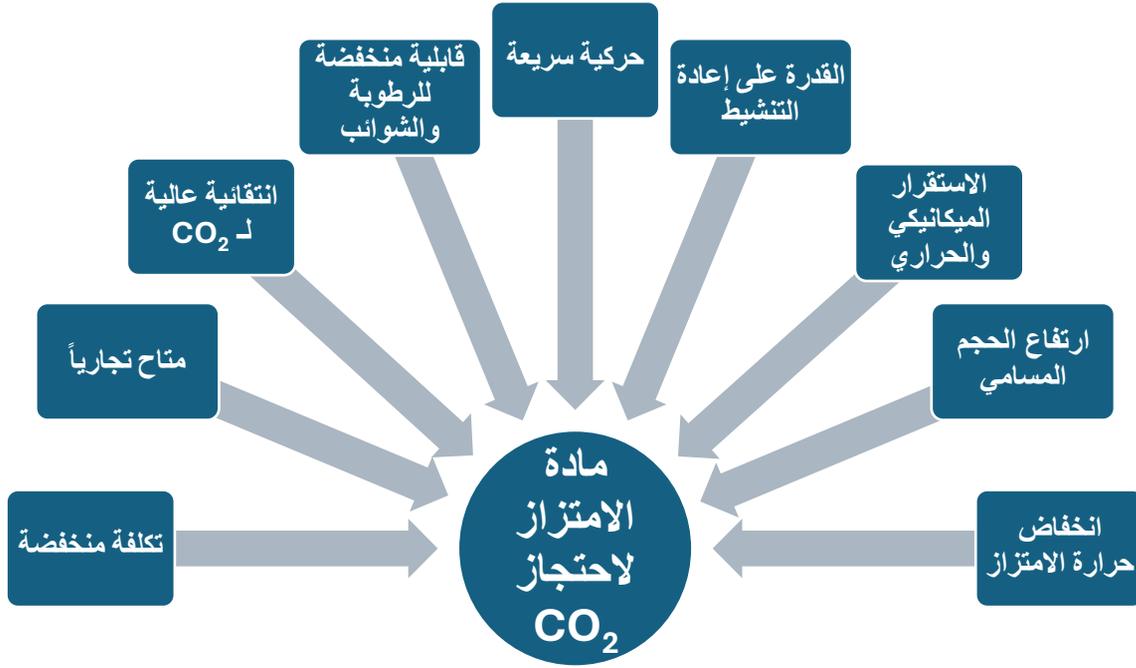
التنفيذ	نوع المواد المازة	درجة الحرارة	الجهة المنفذة	مشاريع المواد المازة
كربون متوسط المسام (مستخدم في أغشية في عملية فصل ثنائية المراحل)	مواد كربونية مازة	منخفضة	TDA Research Inc.	عملية امتزاز قائمة على مواد مازة مدمجة بأغشية لالتقاط الكربون
كربونات فلز قلوي مع مادة مضافة لزيادة السعة ومعدل التفاعل، وخفض طاقة التنشيط	مواد مازة قائمة على كربونات فلز قلوي	منخفضة	Envergen LLC; U. of N. Dakota; Ind. Com. of N. Dakota; Barr Eng.; Solex Thermal Science Inc.; ALLETE Inc.; SaskPower	مادة مازة وعملية عالية السعة لالتقاط CO <sub>2</sub> ؛ تقييم التقاط CO <sub>2</sub> من محطات حرق الفحم الحجري الحالية عن طريق الامتزاز الهجين باستخدام المواد المازة الصلبة (TMCACHYS)
مواد مازة قائمة على أطر عضوية معدنية مسامية جديدة (MOFs) وعملية امتزاز مرتبطة بها تعتمد تقنية تأرجح الضغط الفراغي (VPSA)	مواد مازة تعتمد على MOF	منخفضة	UOP, LLC	إزالة CO <sub>2</sub> من غاز المداخن باستخدام أطر عضوية معدنية (MOFs) دقيقة المسام؛ فصل CO <sub>2</sub> باستخدام أطر عضوية معدنية ذات مسامية دقيقة جديدة
خرزات كربون ATMI BrightBlack® دقيقة (قطر 0.2 مم) تتساقط في برج امتزاز/تجريد منفرد	مواد مازة كربونية	منخفضة	SRI International, ATMI, Inc. Linde, LLC Electric Power Research Institute	تقييم تجريبي لعملية متقدمة تعتمد على مواد مازة لل- CO <sub>2</sub> لالتقاط الكربون بعد الاحتراق؛ تطوير مواد ماصة كربونية جديدة لالتقاط CO <sub>2</sub>
تعتمد على ADAsort™ : وهي مركبات أمينية ماصة CO <sub>2</sub> تركز على راتينج البوليسترين	مواد مازة أمينية صلبة	منخفضة	ADA-ES, Inc. Electric Power Research Institute	تحسين تكاليف عملية التقاط CO <sub>2</sub> باستخدام مواد مازة صلبة من خلال التكامل الحراري؛ تقييم مواد مازة صلبة كتقنية

تحديثية لانتقاط CO <sub>2</sub> (باستخدام وحدة نمطية)	Southern Company Stantec Consulting, Ltd.			مقدمة، التركيز على تخفيض حجم البرج	مقدمة، التركيز على تخفيض حجم البرج	مقدمة، التركيز على تخفيض حجم البرج	تطوير واختبار عملية امتزاز سريعة متأرجحة الضغط (PSA) لانتقاط CO <sub>2</sub> باستخدام وحدة شبه نمطية
مادة مازة منخفضة التكلفة وعالية السعة وقابلة لإعادة التنشيط لانتقاط CO <sub>2</sub> من محطات الطاقة الكهربائية الحالية التي تعمل بالفحم الحجري	TDA Research, Inc.	منخفضة	منخفضة	منخفضة	منخفضة	منخفضة	مادة مازة منخفضة التكلفة وعالية السعة وقابلة لإعادة التنشيط لانتقاط CO <sub>2</sub> من محطات الطاقة الكهربائية الحالية التي تعمل بالفحم الحجري
امتزاز سريع حراري باستخدام ألياف مجوفة مركبة من البوليمر/الألياف المدعومة	Georgia Tech Research Corporation	منخفضة	منخفضة	منخفضة	منخفضة	منخفضة	امتزاز سريع حراري باستخدام ألياف مجوفة مركبة من البوليمر/الألياف المدعومة
اختبار نمطي لنظام عالي الفعالية لانتقاط الكربون قبل الاحتراق يعتمد على مواد مازة؛ مادة مازة منخفضة التكلفة وعالية السعة وقابلة لإعادة التنشيط لانتقاط CO <sub>2</sub> قبل الاحتراق	TDA Research	مواد مازة متوسطة 250-240) (م°)	مواد مازة تتبع على الكربون	مواد مازة تتبع على الكربون	مواد مازة تتبع على الكربون	مواد مازة تتبع على الكربون	اختبار نمطي لنظام عالي الفعالية لانتقاط الكربون قبل الاحتراق يعتمد على مواد مازة؛ مادة مازة منخفضة التكلفة وعالية السعة وقابلة لإعادة التنشيط لانتقاط CO <sub>2</sub> قبل الاحتراق
تقييم تكنولوجيا المواد المازة الجافة لانتقاط CO <sub>2</sub> قبل الاحتراق	URS Group	مرتفعة	مواد مازة CaO	مواد مازة CaO	مواد مازة CaO	مواد مازة CaO	تقييم تكنولوجيا المواد المازة الجافة لانتقاط CO <sub>2</sub> قبل الاحتراق

وتم التركيز في الجهود البحثية على مجموعة واسعة من المتغيرات بما في ذلك: (1) تطوير أشكال جديدة من المواد الممتازة، مثل الألياف المجوفة والمتراسة، و(2) متغيرات التشغيل لإعادة التنشيط، وتقنيات الامتزاز الهجينة، التي تقترن فيها تقنيات الامتزاز بتقنيات أخرى، و(3) وضع تصاميم هندسية جديدة للمعدات، كالأسيرّة الشعاعية والمميعة والمتحركة. وتوسعت جهود التطوير الخاصة بالتطبيقات لتشمل معالجة غاز المداخل بعد الاحتراق وقبله وتطبيقات لمعالجة والتقاط CO<sub>2</sub> من الهواء. يُنظر إلى الامتزاز على أنها تكنولوجيا جذابة حيث يُمكن دمجها بسهولة مع أي مصدر لانبعاث CO<sub>2</sub> بتكلفة مقبولة. وتتميز التقنيات بأنها مرنة من حيث ظروف التشغيل ويمكن استخدامها لتطبيقات ما قبل وبعد الاحتراق. علاوةً على ذلك، تعتبر التكاليف المرتبطة بها معقولة، ومن المحتمل أن تكون آثارها البيئية ضئيلة. لقد اجتاز عدد من التقنيات بالفعل المستوى التجريبي النمطي، مما مكن من تطوير المعرفة والخبرة المطلوبة لمواصلة تطوير التقنيات إلى مستويات النضج الأعلى (Bui et al., 2018).

### 2.2.6. المميزات لالتقاط ثاني أكسيد الكربون.

المميزات أو المواد المازة هي مواد تتفاعل بشكل عكسي مع مواد كيميائية مختارة في خليط تحت ظروف تشغيل معتدلة نسبياً. فهي خاملة نسبياً وليس من المتوقع أن تتفاعل مع الجزيئات الممتازة أو تحفزها. وتتميز بمجموعة من المواصفات كما هو موضح في الشكل 15.6، والتي تحدد بشكل أساسي الأداء المطلوب للمادة الممتازة على المستوى الصناعي. وتُصنف المواد المازة على نطاق واسع إلى ثلاث فئات رئيسية بناءً على مستويات درجات حرارة التشغيل الخاصة بها كما هو موضح في الشكل 16.6. وصنفت أيضاً في الأعمال البحثية المختلفة، حسب طبيعة بنيتها (غير متبلورة أو بلورية)، وأحجام مسامها (مسامية دقيقة (microporous)، ومسامية وسطية (mesoporous)، وما إلى ذلك)، وطبيعة أسطحها (قطبية، غير قطبية، أو متوسطة)، أو تركيبها الكيميائي. وتعتبر البنية المسامية للمواد المازة الخاصة الأكثر أهمية التي يجب مراعاتها في البداية. وكانت المواد المازة وأدائها موضوعاً للعديد من المراجعات في الأدبيات الحديثة (AlHumaidan et al., 2023; Buckingham et al., 2022; Bui et al., 2018; Chao et al., 2021; Gao et al., 2022; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c; Zeng et al., 2022).



بجائزة أوريك  
البحث الفائق

الشكل 15.6. معايير المواد المازة المثالية لالتقاط CO<sub>2</sub> (Gao et al., 2022).



الشكل 16.6. فئات ومجموعات المميزات لالتقاط CO<sub>2</sub>.

وهناك أيضاً قائمة واسعة من الأوراق البحثية التي تعكس جهود العديد من فرق البحث، والتي تهدف إلى تطوير مميزات محسنة ذات قدرة أعلى على امتزاز الـ CO<sub>2</sub>، وانتقائية أفضل، وتحمّل أفضل

للسوائب، كما تستهدف تقييم أداء هذه المواد في ظل مجموعة واسعة من ظروف التشغيل وأنواع اللقيم. وفيما يلي مراجعة مقتضبة لأهم التطورات بشأن المميزات :

أ. **المميزات الصلبة القائمة على الأمينات.** تتميز هذه الفئة من المواد المازة بإمكانية استخدامها عند ضغط منخفض لاستعادة الغاز، ومتطلبات طاقة منخفضة لإعادة التنشيط مقارنةً بامتصاص الأمينات، وكذلك تكلفة رأسمالية منخفضة. وتُحضر عموماً عن طريق ترسيب المواد الماصة النشطة، مثل الأمينات، على مواد داعمة صلبة مثل السيليكا متوسطة المسام، والكربون، وبعض البوليمرات والراتنجات. وتُفضل هذه المواد الداعمة نظراً لمساحات سطحها العالية وحجم مساماتها الكبير وسعة مساماتها وتآلفها الجيد مع جزيئات الأمين وقوتها الميكانيكية وثباتها الحراري المائي. وتتفاعل المواد المازة ذات القاعدة الأمينية مع  $CO_2$  بشكل مشابه لتفاعلات الأمينات في المحاليل المائية، لتشكل وسيط ثنائي الأيونات (zwitterion) وكرامات. وقد نشط مختبر تكنولوجيا الطاقة الوطني الأمريكي (NETL) في دعم تطوير هذه الفئة من المواد المازة مع التركيز على تحسين سعة امتزاز ثاني أكسيد الكربون. ومن بين المجالات التي تم التركيز عليها هي (1) تحسين أساليب دعم الأمينات على المواد المسامية، و(2) اختيار الأمينات المناسبة التي يمكنها التقاط  $CO_2$  بشكل فعال ويمكن إعادة تنشيطها بسهولة، و(3) تعزيز انتشار ثاني أكسيد الكربون. ويقوم المختبر بدعم العديد من المشاريع التي تنفذها المؤسسات البحثية والجامعات المتخصصة، وتغطي هذه المشاريع مجموعة واسعة من الأمينات والمواد الداعمة (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

ب. **المواد الكربونية.** تغطي هذه الفئة العديد من المواد التي تتكون في معظمها من ذرات الكربون، وتشمل الكربون المنشط، والمناخل الجزيئية الكربونية، والكربون المشتق من الفحم، ومواد الكربون المصنعة بطرق حرارية منخفضة التكلفة، مثل الفحم النباتي والفحم المشتق من مواد حيوية، والكربون المشتق من البوليمرات، والكربون المشتق من الأطر المعدنية العضوية، والهلام الهوائي، والمواد الكربونية النانوية، مثل الجرافين والأنابيب النانوية. وتهيمن المواد الكربونية المشتقة من الكتلة الحيوية على المواد المازة الحالية القائمة على الكربون، وعادةً ما تتمتع بقدرة عالية على امتزاز الـ  $CO_2$  نظراً لخصائصها الفيزيائية الكيميائية، مثل مساحة السطح العالية وحجم المسام وتوزيع أحجام المسامات. يُضاف إلى ذلك أن تقنيات إنتاجها الصناعي راسخة، وغالبيتها منخفضة التكلفة عادةً. وتتنوع طرق الإنتاج وتتضمن عادةً ثلاث خطوات: (1) الكربنة، كالانحلال الحراري والمعالجة الحرارية المائية، التي تولد المادة الخام الأساسية للكربون، و(2) التنشيط، كالمعالجة الفيزيائية والكيميائية، التي تضبط الخصائص الرئيسية، و(3)

التعديلات السطحية كإضافة المنشطات (activating materials). وآلية الامتزاز لهذه المواد في الغالب هي الامتزاز الفيزيائي، حيث تكون المسامية هي الخاصية المهيمنة، نظراً لأن الأداء يتناسب عادةً مع حجم المسام، وبالأخص المسام الدقيقة. بالإضافة إلى ذلك، وجود ذرات غير متجانسة، مثل المجموعات التي تحتوي على الأكسجين (O)، والتي تعمل على تعديل تفاعلات الامتزاز الكيميائي وتؤثر على آليات الامتزاز. ومن حيث الأداء فهي لا تتأثر بالرطوبة، كما أن أدائها أقل من أداء الزيوليت.

وكانت المواد المازة المتضمنة لمجموعات وظيفية هدفاً لعدد من مجموعات البحث والتطوير لأنها تعمل على تعزيز امتزاز الـ CO<sub>2</sub> ومستوى الانتقائية. والطريق الأكثر شيوعاً لتحضير مثل هذه المواد هو التنشيط بالمركبات المحتوية على النتروجين (N). ومع ذلك، إذا تم تشريب هذه المركبات فعلياً على الدعامه، فإنها غالباً ما تتسرب أثناء التطبيق. ولا يزال تطوير هذه المجموعة من المواد المازة في مراحل مبكرة ويتطلب بذل المزيد من الجهود البحثية. ويعود الاهتمام بهذه الفئة من المميزات إلى بعض النتائج الإيجابية التي تم الحصول عليها مثل النجاح في فصل غاز الهيدروجين أو CO<sub>2</sub> عن غاز التخليق لإنتاج غاز تخليق غني بالهيدروجين (Cox and Mokaya, 2017).

وقد قام بعض الباحثين بتقديم تفاصيل حول تأثير ظروف تحضير المواد الكربونية وإجراءات تنشيطها على خصائصها وأدائها (Gao et al., 2022). ويغطي هذا البحث أيضاً التحديات القائمة والحلول الممكنة وكذلك مجموعة من التوصيات التي ركزت على بذل المزيد من الجهود لتقدير وتقييم التكلفة والآثار البيئية، إضافةً إلى تطوير المواد الكربونية القائمة على الكتلة الحيوية ذات خصائص ميكانيكية محسنة باستخدام مواد حشو كأكاسيد المعادن، والحاجة إلى تطوير واستخدام تقنيات تسخين متقدمة وتأثير ذلك على خصائص المواد الكربونية وأدائها (AlHumaidan et al., 2023; Bui et al., 2018; Chou et al., 2013; Gao et al., 2022). وتحتاج بعض البدائل الناشئة (مثل الكربون المشتق من الأطر المعدنية العضوية) إلى المزيد من التحسين.

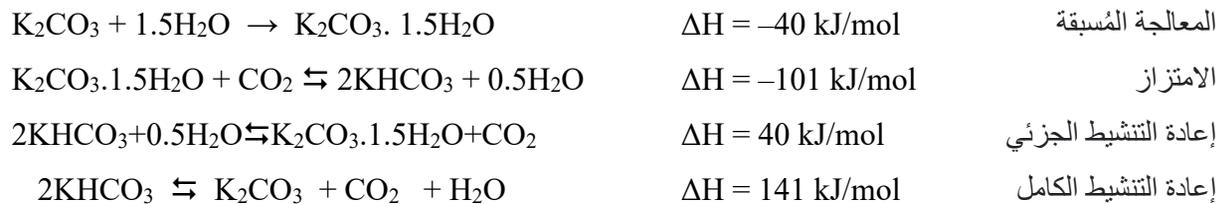
ج. **المميزات القائمة على الزيوليت (zeolites).** تحتوي المواد الممتازة المتوفرة في الطبيعة مثل الزيوليتات الدقيقة المسامية والألومينوسيليكات المسامية البلورية على هيكل مكونة من SiO<sub>4</sub> و AIO<sub>4</sub> رباعيات السطوح متشابكة ومندمجة معاً بواسطة ذرات الأكسجين المشتركة التي لها أحجام مسام تتراوح بين 4-15 Å ومساحات سطحية تتراوح بين 200-500 م<sup>2</sup>جم<sup>-1</sup>. وقد تمت دراسة الزيوليتات التجارية X13 و NaX و CaX (Ca<sup>2+</sup>) و MgX (Mg<sup>2+</sup>) على نطاق

واسع كمادة مازة لـ  $CO_2$  و  $CO$  و  $CH_4$ ، ووجد أن ترتيب خصائصها الامتزائية (affinity) نحو الغازات المختلفة هي على النحو التالي:  $CO_2 > CO > CH_4 > H_2$ . وتعتبر الزيوليتات مواد مازة جيدة لـ  $CO_2$  عند درجات حرارة تقارب  $30^\circ C$ ، ويُعزى ذلك إلى الحجم المسامي المرتفع، وصغر حجم المسامات، ونسبة  $Si/Al$ ، وتكوين وموقع الكاتيونات خارج الإطار، مثل توفر مواقع كاتيونات مزدوجة مما يسمح لـ  $CO_2$  بالتفاعل في وقت واحد مع كاتيونين، أو وجود كاتيونات كبيرة وموجبة التكافؤ ومتعددة التكافؤ تُفضل الامتزاز. وسعة بعض الزيوليتات لـ  $CO_2$  مرتفعة بشكل عام عند درجات حرارة منخفضة نسبياً. والآلية الرئيسية لامتزاز الـ  $CO_2$  هي التفاعل مع المجال الكهربائي لكاتيونات الزيوليت بسبب العزم الرباعي-القطب الكبير لثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن قدرة الزيوليت على التقاط  $CO_2$  تتضاءل بسرعة عند درجات الحرارة المرتفعة وتكاد تكون معدومة عند درجة حرارة  $200^\circ C$ . وبالإضافة إلى ذلك، تنخفض قدرتها بشكل كبير بوجود الماء، وذلك بسبب انجذابها المرتفع للماء، كما أن درجة حرارة إعادة تنشيطها تزيد عن  $300^\circ C$  مما يؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة. وبالتالي، فإن القيد الرئيسي للزيوليت في امتزاز الـ  $CO_2$  من غاز المداخن ينشأ عن وجود الرطوبة في الغاز. وقُيِّمت العديد من الزيوليتات وتم تحديد أفضل المواد لفصل الـ  $CO_2$  (AlHumaidan et al., 2023; Brea et al., 2019; ) (Bui et al., 2018).

د. المميزات ذات الإطار العضوي المعدني. الأطر العضوية المعدنية (MOFs) عبارة عن مواد شبكية بلورية تُحضر من مجموعات من أيونات أو مجموعات معدنية وروابط عضوية. وتكون الروابط عادةً عبارة عن مركبات كربوكسيلية وإيميدازولات، وتتنوع الأيونات المعدنية لتغطي معظم الجدول الدوري تقريباً. وبالإمكان تعديل هيكل وخصائص الأطر العضوية المعدنية كإجراء تعديلات عن طريق اختيار الأيونات المعدنية والروابط العضوية وأشكال الشبكة البلورية، مما يفتح فرصاً لتعديل وتفعيل أداءها لتتناسب التطبيقات المختلفة. وقد مكّن هذا الباحثين من تقديم مجموعات وظيفية متنوعة، وتحسين تنقية وعزل المنتجات المعدلة، وتوليد عدد كبير من الأطر العضوية المعدنية المتطابقة طوبولوجياً، ولكنها متنوعة وظيفياً، وإدخال وحدات وظيفية متعددة في إطار واحد، بما في ذلك توفير مواقع للتحفيز الكيماوي. وأدت المرونة الواسعة في إنتاج الأطر العضوية المعدنية إلى ظهور آلاف المنتجات التي تتمتع بمجموعة واسعة من الخصائص من حيث الشكل الهندسي وحجم المسام والوظائف. كما أنها تتمتع بسلوك فريد يُسمى تأثيرات التنفس وفتح البوابة، والذي يُلاحظ فقط عند الضغوط العالية. ومكّن النطاق الواسع من الأطر العضوية المعدنية وخصائصها المتنوعة من إدخالها في العديد من العمليات والتطبيقات الكيميائية. وتحتوي العديد

من الأطر العضوية المعدنية المتوفرة حالياً على مساحات سطحية كبيرة وكمية كبيرة من المسام المتوسطة، مما يجعلها مرشحة جيدة للاستخدام كمادة مازة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. ويُمكن استخدامها كمادة مازة كيميائية أو كمواد مالئة في تصنيع الأغشية (Altintas et al., 2019; Daglar & Keskin, 2019). وتُستخدم كمادة مازة كيميائية من خلال التفاعلات بين جزيئات CO<sub>2</sub> والمواقع المعدنية في الأطر المعدنية العضوية، أو التفاعلات بين جزيئات CO<sub>2</sub> والمجموعات الوظيفية لروابط الأطر العضوية المعدنية. وأظهرت جهود التطوير المتعلقة باستخدام الأطر العضوية المعدنية لأغراض محددة نجاحاً كبيراً في النطاق المخبري، وذلك في فصل الهيدروجين من غاز التخليق (خليط H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) بانتقائية عالية (Chen et al., 2005; Lin et al., 2006; Lu et al., 2013; Qiao et al., 2016) وكذلك في التوصل إلى تحقيق حد أقصى لامتزاز الـ CO<sub>2</sub> (Asgari et al., 2021; Chung et al., 2016). وأخيراً، تجدر الإشارة إلى أن الأطر العضوية المعدنية فعالة من حيث التكلفة عند إعادة تنشيط المواد المازة الصلبة عن طريق تأرجح درجة حرارة ((Temperature Swing Adsorption (TSA) أو تأرجح الضغط ((Pressure Swing Adsorption (PSA)، والذي يتكامل مع المفاعل المعبأ بالمواد المازة. ومن ثم، أصبحت الأطر العضوية المعدنية واعدة بشكل متزايد باعتبارها مواد مازة متفوقة محتملة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وعلى الرغم من ذلك، لوحظ أن للأطر العضوية المعدنية بعض العيوب في بعض التطبيقات، منها (1) ضعف أدائها عند درجات الحرارة المرتفعة كما هو الحال مع غازات مداخل محطات توليد الطاقة الكهربائية بسبب تفاعلها مع رطوبة الماء، و(2) ضعف متانتها بسبب عدم ثباتها في وجود الماء وأكاسيد النيتروجين وأكسيد الكبريت، و(3) الصعوبات التي تمت مواجهتها عند رفع سعة التطبيقات (scaling up) (Bui et al., 2018; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

هـ . مواد مازة تعتمد على كربونات الفلزات القلوية. تشتمل هذه المجموعة من المميزات على كربونات مختلفة مثل Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> أو K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. والتي استُخدمت لالتقاط CO<sub>2</sub> من غاز المداخل. ويمكن لكربونات الفلزات القلوية كمادة مازة أن تلتقط CO<sub>2</sub> لتكوين بيكربونات فلز قلوي في وجود الماء عند درجات حرارة تتراوح بين 50-100°م. ويتم إعادة التنشيط عند درجة حرارة 120-200°م ويؤدي ذلك إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون/الماء. فعلى سبيل المثال، استُخدم K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> لالتقاط CO<sub>2</sub> من غازات المداخل بعد الاحتراق بين 40 إلى 80°م لإنتاج KHCO<sub>3</sub>، والذي تم بعد ذلك إعادة تنشيطه. وتلخص المعادلات التالية التفاعلات التي تحدث (Jha et al., 2021):



ويتناقص التحول إلى كربونات مع زيادة درجة حرارة التفاعل والضغط، ويزداد معدل سرعة التفاعل مع زيادة درجة الحرارة وتركيز الماء وانخفاض الضغط. والحد الأقصى لدرجة حرارة الكربنة محدود بالديناميكا الحرارية للتفاعل. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الكربونات تتفاعل بشكل قوي ولا رجعة فيه مع ملوثات غاز المداخن مثل حمض الهيدروكلوريك وثاني أكسيد الكبريت، لذلك يجب التخلص من هذه الملوثات. ويعاد تنشيط الكربونات،  $K_2CO_3$  من  $KHCO_3$  من خلال التكليل عند درجات حرارة أعلى من  $120^\circ\text{C}$  (Bui et al., 2018; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

و. مواد سيراميك ذات قاعدة فلزية قلوية. السيراميك القلوي عبارة عن أكاسيد معدنية ثنائية تتكون من عنصر قلوي واحد على الأقل. وهي تشمل  $Li_5AlO_4$ ، و  $Li_2CuO_2$ ، و  $Li_2ZrO_3$ ، و  $Li_4SiO_4$ ، وتعتبر مواد مازة تعمل تحت درجة حرارة عالية، حيث يمكن إعادة تنشيط كربوناتها عند درجات حرارة مرتفعة، مما يجعلها مرشحة جيدة لعمليات التقاط ما بعد الاحتراق. كما أنها تتمتع بقدرات ممتازة على امتزاز الـ  $CO_2$  بالإضافة إلى تغييرات صغيرة في الحجم أثناء دورات امتزاز/مخ ثاني أكسيد الكربون. ونظراً لقوتها، فهي لا تحتاج إلى داعم حراري، ولذلك تكون سهلة التركيب. وتتنوع طرق التوليف المستخدمة لإنتاجها. فعلى سبيل المثال، تُنتج الزركونات عن طريق الترسيب المشترك والسول-جل (sol-gel) مما يسمح بالتحكم في مورفولوجية المنتج النهائي. وبالنسبة للسيليكات، يمكن تحقيق بنية مسامية وسطية (mesopores) باستخدام طريقة سول-جل. وتعد المورفولوجية، وهي في الأساس مساحة السطح وأحجام جزيئات المنتج، أمراً بالغ الأهمية لتوفير مواد مازة تلتقط  $CO_2$  إلى أقصى إمكاناتها (Bui et al., 2018; NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

ز. الممترات القائمة على أكاسيد الفلزات القلوية الأرضية. تقوم أكاسيد الفلزات القلوية الأرضية، مثل  $CaO$ ، بتثبيت  $CO_2$  عن طريق إنتاج كربونات غير قابلة للذوبان من خلال تفاعل الكربنة، كما هو موضح في المعادلة التالية:



ويحدث تفاعل الكربنة عند 600-700°م، أما تفاعل إعادة التنشيط، الذي يطلق ثاني أكسيد الكربون، فيحدث عند درجات حرارة تتراوح بين 850-950°م. وكما هو موضح في المعادلة أعلاه، فإن تفاعل الكربنة طارد للحرارة بدرجة كبيرة، مما يجعل محاولة استعادة الطاقة لإعادة استخدامها نهج فعال من حيث التكلفة. وعلاوةً على ذلك، فإن مرونة هذا النهج فيما يتعلق بالتشغيل عند درجة حرارة مرتفعة توفر فرصاً جيدة لاستخدامه في التقاط CO<sub>2</sub> من مجموعة واسعة من المصادر، وخاصةً التقاط الكربون قبل الاحتراق عالي الحرارة من عمليات التغويز.

يُعد إنتاج المواد المازة على نطاق واسع، على سبيل المثال أكسيد الكالسيوم، عملية راسخة. وتنتشر المواد الخام على نطاق واسع على الأرض على شكل خامات معدنية، مثل الدولوميت والحجر الجيري، التي تسخن إلى درجات حرارة أعلى من 900°م. ويُعتبر CaO مادة مازة ممتازة لثاني أكسيد الكربون، نظراً لأنه يتمتع بميل عالٍ للتفاعل وسعة عالية لثاني أكسيد الكربون، كما أنه مادة متينة ويمكن الوصول إليه بتكلفة منخفضة جداً. ومع ذلك، فإن للـ CaO بعض العيوب عند استخدامه كمادة مازة لثاني أكسيد الكربون، إذ يعاني بعد إعادة التنشيط من التلييد والفسل الميكانيكي نظراً لأن إعادة التنشيط عبارة عن تفاعل ماص للحرارة يتطلب درجات حرارة أكبر من 800°م لتحلل CaCO<sub>3</sub>. ويؤدي التلييد إلى خفض مساحة السطح المتاحة وخفض حجم المسام. والأمر الثاني هو أن معدل الكربنة ينخفض مع مرور الوقت بسبب تكوين طبقة من الـ CaCO<sub>3</sub> على سطح جسيمات الـ CaO، مما يبطئ انتشار ثاني أكسيد الكربون. والمسألة الثالثة هي الحفاظ على التوازن بين درجات الحرارة المرتفعة المطلوبة للتفاعل وثبات وسعة المواد المازة على المدى الطويل. وتطرح المشكلات المذكورة أعلاه تحديات في استخدام المواد المازة المعتمدة على CaO، وذلك بشكل أساسي بسبب فقدان قابلية الانعكاس بسبب تلييد جسيمات المادة المازة في دورات إعادة التنشيط المتكررة. بالإضافة إلى ذلك، ولكن بدرجة أقل، يُعد كل من الاستنزاف وتفاعل الكالسيوم مع أنواع من أكاسيد الكبريت أيضاً من العوامل التي تؤدي إلى تحلل المادة المازة. وعلى الرغم من هذه التحديات، هناك حلول محتملة لمواجهةها، وتُنبذ جهود بحثية من أجل تطوير حلول قابلة للتطبيق وفعالة من حيث التكلفة.

ح. مواد مازة مركبة أخرى. تتضمن هذه المجموعة العديد من المواد الأخرى التي هي قيد التطوير والتقييم. وأهم المواد المرشحة للسيليكا المتوسطة المسامية (mesoporous). وتحتوي هذه المادة على مساحة سطح كبيرة، ومن الممكن إنتاجها بمجموعة واسعة من البنى المسامية. وسعة الامتزاز منخفضة نسبياً، ولكن يمكن تعديلها لتحسينها. ويسهم التعديل الكيميائي لمجموعات OH السطحية للسيليكا في تحسين سعتها على امتزاز الـ CO<sub>2</sub> وانتقائيتها. وتشمل المميزات المرشحة الأخرى

الطين الأنيوني أو الهيدروكسيدات، والتي يشار إليها علمياً باسم هيدروكسيدات مزدوجة الطبقات (LDHs). وتمتلك LDH بشكل عام مساحة سطحية كبيرة، ومواقع قلووية أو قاعدية وفيرة، ومستقرة عند درجات حرارة عالية، مما يجعلها مرشحة جيدة كمادة مازة لـ  $CO_2$  لتعزيز تفاعل إزاحة الماء-الغاز وعمليات إعادة التشكيل البخاري للكتلة الحيوية. كما يمكن أيضاً استخدام LDHs في درجات الحرارة والضغط المرتفعة مما يجعلها مرشحة جيدة لـ  $CO_2$  عالي الضغط. وهناك مادة مازة محتملة أخرى قيد النظر لتفاعل إزاحة الماء-الغاز وهي  $MgO$ ، التي تمتلك بعض النشاط التحفيزي للتفاعل، بينما تقوم في نفس الوقت بامتزاز ثاني أكسيد الكربون. ويمكن إعادة تنشيطها باستخدام تقنية تأرجح درجة الحرارة و/أو تأرجح الضغط. ويمتلك  $MgO$  كمادة مازة القدرة على تحقيق النقاط أكثر من 95% من الـ  $CO_2$  والوصول إلى نسبة تحويل 40% في تفاعل إزاحة الماء-الغاز (WGS). وتتراوح درجة حرارة التشغيل بين 350-450°م، وهي تساوي تقريباً درجة حرارة المرحلة الأولى من مفاعل إزاحة الماء والغاز. وعلى هذا النحو، يعتبر  $MgO$  مرشحاً جيداً لاستبدال عملية إزاحة الماء-الغاز التقليدية التي تتم على مرحلتين بمرحلة واحدة، من خلال دفع التوازن بشكل مستمر نحو تحويل الـ  $CO_2$  عن طريق إزالة  $CO_2$  الناتج. وأخيراً، هناك اتجاه جديد في تطوير المواد المازة آخذاً في الظهور ويقوم على الجمع بين المميزات من الفئات المختلفة (أ-ح) المذكورة أعلاه. ويحاول الباحثون إنتاج مواد مركبة من خلال الجمع بين مواد مازة مختلفة. والهدف هو توليد تأثيرات تآزرية تعالج واحدة أو أكثر من نقاط الضعف في مادة مازة منفردة. وقد تم بالفعل تحضير عدد قليل من المركبات من أنابيب الكربون النانوية أو المواد القائمة على الجرافين مع الأطر العضوية المعدنية. ومن المرجح أن يزدهر هذا الاتجاه خلال السنوات القادمة ومن المتوقع أن يؤدي إلى مواد مازة مركبة أكثر فعالية (Bui et al., 2018).

ويقدم الجدول 8.6 ملخصاً لأداء المواد المازة المثالية، وحالة أداء 5 فئات من المواد المازة التي هي قيد النظر حالياً لانتقاط ثاني أكسيد الكربون. ويتضمن الجدول مجموع النقاط لترتيب التقدم المحرز في فئات مختلفة من المميزات التي تُبذل جهود لتطويرها نحو النضج. وتُسجل النقاط بالمقارنة مع أداء مادة مازة مثالية على النحو التالي: درجة +1 إذا كانت تتوافق مع أداء المادة المثالية، +0.5 إذا كانت متوسطة أو متغيرة، و0 إذا كانت أدنى أو مختلفة عن أداء المادة المثالية. ومجموع النقاط هو مجموع الدرجات. واستناداً إلى مجموع الدرجات، من الواضح أن جميع المميزات لا تزال لديها تحديات كبيرة تحتاج إلى معالجة لرفع الأداء إلى مستوى مقبول. وفئات المميزات الثلاثة التي طورت بشكل جيد بالفعل هي المميزات الوظيفية الآمينية، والمميزات المعتمدة على الكربون، والمميزات المعتمدة على  $CaO$ .

الجدول 8.6. مقارنة أنواع المواد المازة لانتقاط CO<sub>2</sub> (مصدر البيانات: NETL, 2015b; NETL, 2015c).

درجة	التكلفة	التيارات (الكيميائي والميكانيكي)	امتزاز CO <sub>2</sub> الضغط المنخفض	الانتقائية *(CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> )	نقل الكتلة وتوصيل الحرارة	سعة الامتزاز	طاقة إعادة التشيط	آلية الامتزاز	النوع
+7	منخفض (1+)	مرتفع (1+)	مرتفع (1+)	مرتفع (1+)	مرتفع (1+)	مرتفعة (1+)	منخفضة (1+)		ممتازات مثالية
+4	متوسط (0.5+)	متوسط (0.5+)	مرتفع (1+)	متغير (0.5+)	متغير (0.5+)	مرتفعة (1+)	مرتفعة (0)	كيميائي	الممتازات الأمينية الوظيفية
2.5	متوسط (0.5+)	منخفض (0)	مرتفع (1+)	منخفض (0)	منخفض (0)	منخفضة (0)	منخفضة (1+)	فيزيائي	الزيوليت
+4	منخفض (1+)	متوسط (0.5+)	منخفض (0)	منخفض (0)	متوسط (0.5+)	مرتفعة (1+)	منخفضة (1+)	فيزيائي	ممتازات قائمة على الكربون
2.5	High (0)	متوسط (0.5+)	منخفض (0)	منخفض (0)	منخفض (0)	مرتفعة (1+)	منخفضة (1+)	فيزيائي	إطارات معدنية عضوية MOFs
+4	منخفض (1+)	منخفض (0)	N/A (0.5)	مرتفع (1+)	منخفض (0)	مرتفعة (1+)	متوسطة (0.5+)	كيميائي	ممتازات قائمة على CaO

\* أيضاً الحد الأدنى من امتصاص O<sub>2</sub> وبخار الماء؛ † التركيز الرئيسي للتطوير؛ ‡ المجموعات الوظيفية تحسن الانتقائية. † أفضل من الزيوليت.

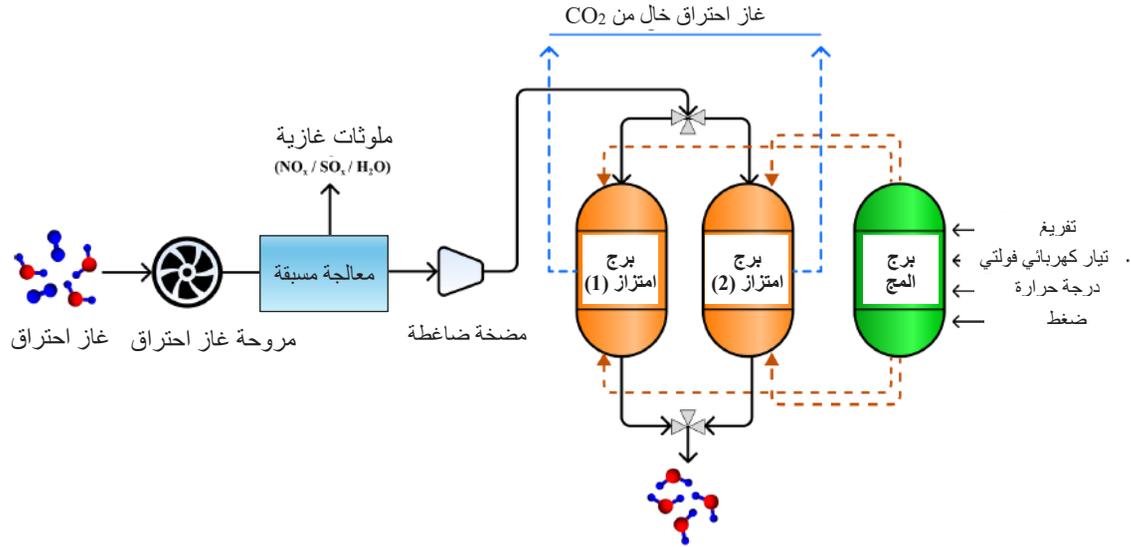
وكملاحظة أخيرة، من المهم الإشارة إلى أن الممتزات تُستخدم صناعياً على شكل خرزات أو حبيبات مبنوكة بحجم 0.5 إلى 2 ملم. تعتبر هذه الأشكال مناسبة للأسرة الثابتة، ولكنها ضعيفة التوصيل للحرارة وأدائها متدني إلى حد ما إذ أنها يمكن أن تسبب انخفاضاً كبيراً في الضغط عند سرعات الدفع المرتفعة. ومن ثمة، يجري العمل على تطوير أشكال جديدة، مثل كتل الألياف المجوفة (hollow fibres) وmonoliths)، وتشكيلات أقراص العسل (honeycomb)، والهيكل المصفحة (laminated structures)، لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. كما استُخدمت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لإنتاج كتل متراصة تحتوي على مادة مازة زيوليتية ذات امتزاز مماثل لتلك العائدة للمواد المازة المستخدمة على شكل مسحوق. ومن المتوقع تحقيق المزيد من التقدم والتطور خلال السنوات القليلة المقبلة (Akhtar et al., 2014; Bui et al., 2018).

### 3.2.6. عمليات امتزاز CO<sub>2</sub> الناضجة

تُستخدم تقنية امتزاز الطور الغازي على نطاق واسع للتنقية أو لفصل كميات كبيرة من الهواء والغاز الطبيعي والمواد الكيميائية والبتروكيماويات. وللمواد المازة ذات المسام الصغيرة، والمشكلة ككريات أو خرز أو أشكال حبيبية أخرى معبأة في أسيرة ثابتة، قابلية تفاعل قوية مع واحد أو أكثر من مكونات الخليط. ويتم بعد ذلك امتزاز المُكون الذي تحتفظ به المادة المازة، والمشار إليه أحياناً باسم المُمتز، ومن ثمة تُحرر المادة المازة لدورة ثانية. وأثناء المحج، يتم إضعاف الروابط بين المُمتزات والمادة المازة من خلال زيادة درجة الحرارة، أو تخفيض الضغط، أو إضافة مكون آخر يتنافس مع المادة المُمتزة، أو مزيج من هذه الأساليب.

وقد ارتفع عدد عمليات الفصل بالامتزاز في الطور الغازي من حيث العدد والتنوع منذ السبعينيات من القرن الماضي، بسبب الاكتشافات المستمرة لمواد مازة مسامية جديدة ذات مساحة سطحية عالية، مثل المناخل الجزيئية، والمواد الكربونية المختلفة، وفئات أخرى من المواد المازة الملخصة في القسم 2.2.6. وتضمنت العمليات التقليدية المبكرة تقنية الامتزاز بتأرجح درجة الحرارة (Temperature Swing Adsorption (TSA))، والامتزاز بتأرجح الضغط (Pressure Swing Adsorption (PSA))، وحلقات تأرجح التطهير (purge swing)، والطرق التي لا تتضمن الاسترجاع أو إعادة التوليد. ويوضح الشكل 17.6 مخطط التدفق النموذجي لوحدة PSA. ودوافع تطوير هذه العمليات كان البحث عن تحسينات لفصل وإزالة الشوائب غير المرغوب فيها، وخاصةً ثاني أكسيد الكربون، وكبريتيد الهيدروجين، وCOS، وثاني أكسيد الكبريت، من تيارات العمليات الكيميائية والبتروكيميائية،

مثل تلك المستخدمة لإنتاج الأمونيا والهيدروجين. وفي بعض تيارات العملية هذه تعتبر الشوائب في الواقع منتجات ثانوية وتوجد أحياناً بكميات وفيرة وينظر إليها كمنتجات ثانوية يتوجب فصلها واستغلالها تجارياً. وفي حالات أخرى، تقتصر عملية الفصل على إزالة مستويات الملوثات المنخفضة فقط. وعلى مدى العدين أو الثلاثة الماضية، زاد الاهتمام بالتقاط الـ  $CO_2$  بشكل ملحوظ وأصبح القوة الدافعة الرئيسية للابتكار في هذا المجال.



الشكل 17.6. رسم تخطيطي لعملية امتصاص  $CO_2$  (المصدر: Dziejarski et al., 2023).

لقد استخدمت تقنيات الفصل بامتزاز الغاز في العديد من الصناعات، وتشمل التطبيقات الرئيسية إنتاج الأكسجين الطبي، وإنتاج الأكسجين والنيتروجين الصناعي، وتنقية الهيدروجين لمصافي النفط، وإنتاج الأمونيا، وتجفيف الإيثانول، وتجفيف الهواء، وإزالة الملوثات، مثل ترقية غاز مكبات النفايات إلى ميثان عالي النقاء من الدرجة الملائمة لاستخدامه كوقود لمحطات توليد الطاقة الكهربائية، وفصل  $CO_2$  عن الغاز الحيوي، والتقاط الكربون. وتستخدم مصافي البترول أيضاً تقنية PSA لإزالة كبريتيد الهيدروجين من الهيدروجين وإعادة تدوير تيارات وحدات المعالجة والتكسير الهيدروجيني. ومن الاستخدامات الأخرى إنتاج هواء محتواه من الأكسجين منخفض لأنظمة الوقاية من الحرائق واستخدامه في إنتاج البروبيلين.

بالنسبة لفصل ثاني أكسيد الكربون، تم تسويق عدد قليل من عمليات الامتزاز على مدى العقود القليلة الماضية. وتهدف هذه العمليات في الغالب إلى تنقية تيارات الغاز في صناعات تكرير النفط والصناعات البترولية، مثل إنتاج الهيدروجين. ويبين الجدول 9.6 قائمة بهذه العمليات التقليدية. وتعد الخبرة

الواسعة التي اكتسبتها هذه الصناعات من التطبيقات التقليدية لهذه العمليات القوة الدافعة الرئيسية لتوسيع نطاق تطبيق هذه التقنيات لتشمل التقاط  $CO_2$  لأغراض استخدامه وتخزينه على مدار العقدين أو الثلاثة عقود الماضية. وتناولت جهود التطوير المتغيرات الرئيسية في امتزاز ثاني أكسيد الكربون وتشمل: (أ) الضغط الجزئي لـ  $CO_2$  ودرجة الحرارة، و(ب) المواصفات الرئيسية للمواد الممتازة وبشكل رئيسي حجم المسام، ومساحة السطح، وسعة الامتزاز، و(ج) حركية التفاعل لكل من الامتزاز والمج، و(د) ثبات الممتازات على المدى الطويل. وعلى الرغم من هذه الجهود، لا يوجد سوى محطة امتزاز تجارية واحدة تعتمد على الامتزاز الفراغي قيد التشغيل في مصفاة بورت آرثر بولاية تكساس التابعة لشركة فاليرو إنيرجي، بالولايات المتحدة الأمريكية، حيث يُنقل  $CO_2$  ويُقل لتطبيقات الاستخلاص المعزز للنفط. ويبدو أن تكنولوجيا الامتزاز حتى الآن ليست فعالة من حيث التكلفة وتُعاني من عدد من التحديات بما في ذلك: (1) ارتفاع تكلفة المواد المازة، و(2) سعة الامتزاز المنخفضة، و(3) القدرة المحدودة للعمل عند درجات الحرارة المرتفعة للغازات المداخن/غاز العادم، و(4) ارتفاع معدلات استنزاف الممتازات، و(5) ارتفاع متطلبات الطاقة لإعادة تنشيط المواد المازة.

#### الجدول 9.6. عمليات امتزاز الـ $CO_2$ (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

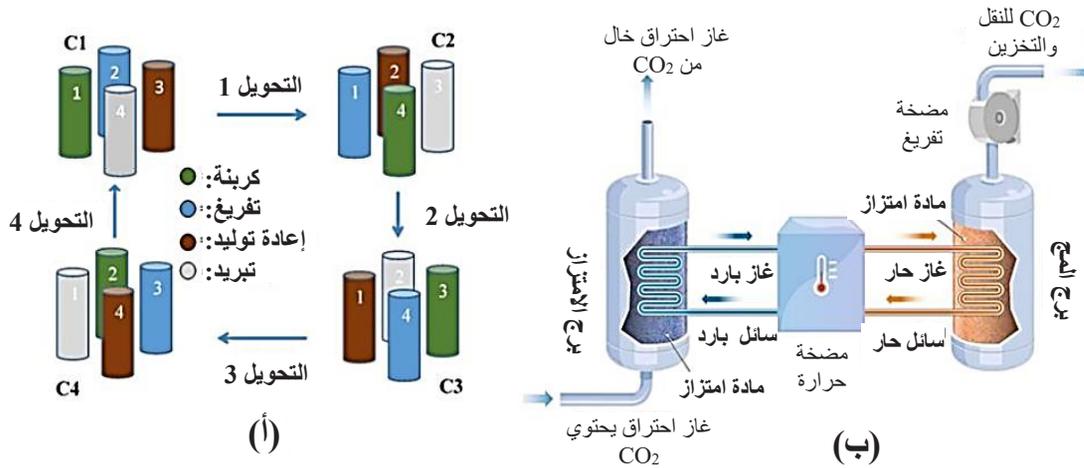
اسم العملية/المرخص	الميزات الرئيسية	الانتشار العالمي
إزالة $CO_2$ (البوابة الجزيئية) / شركة Guild Associates Inc.	بإمكانها معالجة لقيم مشبع بالماء ومستويات $CO_2$ تتراوح بين 3%-40%؛ تستخدم سلسلة من الأوعية الممتازة لإزالة الماء و الـ $CO_2$	40 وحدة تحت التشغيل
تكنولوجيا متعددة الأوعية Multibed Technology / Axens	تستخدم تآزر نوع خاص من الألومينا والمناخل الجزيئية؛ مواد مازة معبأة كطبقة ثابتة يتم تركيبها كفرشات في نفس الأوعية أو في أوعية منفصلة لتحقيق المرونة	أكثر من 60 منشأة
عملية الامتزاز بواسطة تأرجح الضغط (PSA) Oil-pitch derived activated carbon / Nippon Steel Co.	اللقيم غاز إعادة حرق الغازات من المحول؛ مادة الامتزاز كربون مُنشط مشتق من النفط - مخلفات ثقيلة	

وحدات الامتزاز ذات السعة المرتفعة محدودة للغاية مقارنةً بوحدة الامتصاص التقليدية. وأحد أسباب هذه الفجوة هو العدد الهائل من المواد الممتازة المحتملة، والتي يصل عددها إلى عدة ملايين، كما هو الحال مع الأطر العضوية المعدنية. وبالتالي يجب فحص هذه الأعداد الكبيرة من الممتازات

وتقييمها لمعالجة جميع معايير الأداء لدعم تحولها إلى مستويات جاهزية تكنولوجية أعلى، وهو أمر مكلف ويستغرق وقتاً طويلاً. ولتسريع تطوير التكنولوجيا، تُستخدم تقنيات التقييم عالية الإنتاجية ومنهجيات التحسين متعددة الأهداف بشكل متزايد. ويتضمن النهج تقييم البيانات التجريبية باستخدام المحاكاة الجزيئية والنمذجة على نطاق العملية. كما تواجه المميزات أيضاً عدداً من التحديات على مستوى العملية. فعلى سبيل المثال، تتطلب الشوائب الموجودة في غاز المداخل عادةً خطوة ما قبل المعالجة أو استخدام فرشاة مازة متعددة الطبقات لحماية المواد المازة. وتشمل التحديات الأخرى التخفيض إلى أدنى حد تأثير الحرارة الناتجة عن ارتفاع حرارة الامتزاز لبعض المواد الممتازة وتطوير وسائل لإعادة تدوير الطاقة. وتضاف هذه التحديات إلى التحديات المعتادة الأخرى مثل تحسين حجم الجسيمات في المادة المازة لضمان وجود حركية جيدة للانتشار داخل الجسيمات والحد من انخفاض الضغط. وبغض النظر عن المادة الممتازة، هناك ثلاث فئات من العمليات المستخدمة ويجري تطويرها بشكل أكبر لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وفيما يلي توصيف موجز لهذه العمليات.

أ. **عملية الامتزاز المتأرجحة بدرجة الحرارة (TSA).** تتمتع معظم المواد المازة المستخدمة لالتقاط CO<sub>2</sub> بسعات عالية عند درجات حرارة حوالي 40°م. وعادةً ما يعاد تنشيط المادة المازة المحملة بالأكسجين عن طريق زيادة درجة حرارتها إلى ~100°م أو أعلى. وتُبرد بعد ذلك المادة المازة المُعاد توليدها إلى درجة حرارة التشغيل المطلوبة وإعادة استخدامها لالتقاط CO<sub>2</sub>. ويُعد استخدام منظومة السريرين هو النهج الأكثر فعالية، وعادةً ما يستخدم أحد الأسرة لامتزاز CO<sub>2</sub> من اللقيم (غاز المداخل)، بينما يتم إعادة تنشيط السرير الآخر عن طريق المعالجة باستخدام البخار. وتُعتبر TSA تقنية ناضجة وبدء تسويقها تجارياً في الستينيات من القرن الماضي. وقد انتشرت بشكل أساسي لإزالة الكميات الضئيلة من CO<sub>2</sub> والماء من الهواء في وحدات إنتاج الـ O<sub>2</sub> والـ N<sub>2</sub> ولتجفيف الغاز الطبيعي قبل تسيلته. وتشمل الاستخدامات الأخرى إزالة CO<sub>2</sub> من الهواء. ويمكن تشغيل العملية على تيارات لقيم منخفضة الضغط، وتكلفة تشغيلها منخفضة، ومع ذلك، فإن العملية تعاني من تدني سعة الامتزاز مع التدوير المتكرر، إضافةً إلى أن زمن الدورة طويل نسبياً. ولا يزال تطبيق TSA لإزالة CO<sub>2</sub> بكميات كبيرة في مرحله الأولى. واحتوت التقارير المنشورة حول العملية بعض المعلومات حول الأداء وسلطات الضوء على العقبات التي تعترض تطبيقها. وقد بذلت جهود بحثية مكثفة لمعالجة مختلف العقبات والتحديات، وبالتحديد نحو تخفيض متطلبات طاقة إعادة التنشيط وعلى إدخال تعديلات لتحقيق نقاء CO<sub>2</sub> بنسبة 99% تقريباً واسترداد 95% تقريباً (Joss et al., 2017). كما وُجهت جهود بحثية أخرى نحو تطوير تصاميم للمنشآت تعتمد على مفاعلات الطبقة المميعة (fluidized bed reactor)، والتي تتيح التبادل الحراري السريع

ولكنها تُخفض متوسط كمية الـ  $CO_2$  المُحمَلة. والتوجه حالياً هو العمل على استخدام مفاعل الطبقة المميعة في مجموعات، والتي يشار إليها باسم عملية مفاعل الامتزاز المتأرجح (Switch Adsorption Reactor Cluster (SARC)) (الشكل 18.6)، التي يتم فيها تدوير مفاعلات SARC بين الامتزاز والإخلاء وإعادة التنشيط (بالتسخين) والتبريد. وعادةً ما تُسترد حرارة الامتزاز ويعاد تدويرها إلى الأُسرة لإعادة التنشيط (Dhoke, 2021).

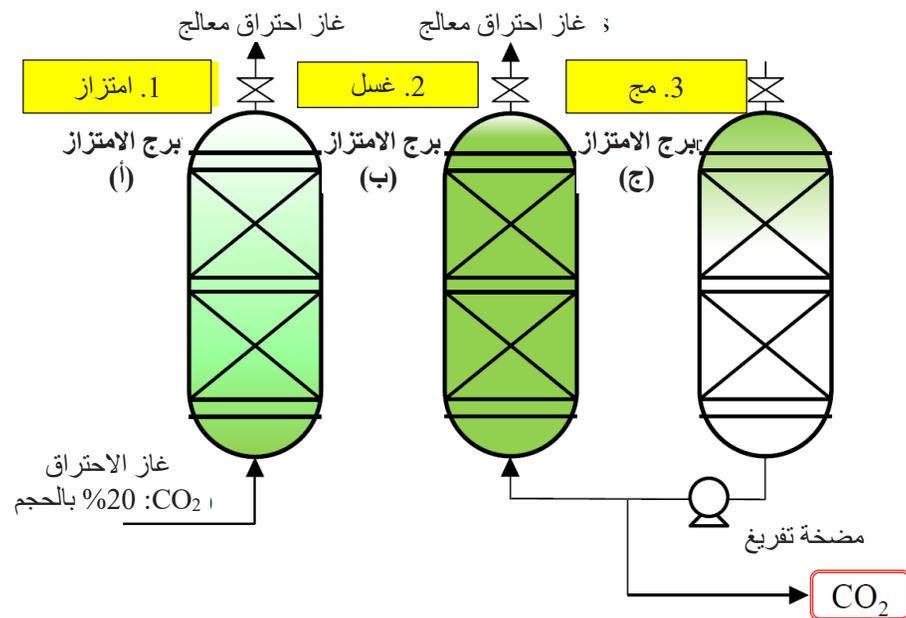


الشكل 18.6. تصميم مفهوم عملية SARC: (أ) مجموعة SARC المكونة من أربعة مفاعلات للتشغيل المستمر؛ (ب) مضخة حرارية تنقل الحرارة بين مفاعلين تابعين لـ SARC احدهما تحت الكربنة والآخر تحت إعادة التنشيط.

وهناك طريقة أخرى مثيرة للاهتمام لتحسين أداء عملية TSA وهي استخدام الامتزاز المتأرجح الكهربائي (Electrical Swing Adsorption (ESA))، حيث تم تصميم كل من المادة المازة والمعدات ليكونا موصلين للكهرباء. وبالرغم من أن متطلبات الطاقة للعملية مرتفعة، إلا أنها مناسبة للتطبيقات على نطاق صغير، حيث يمكن تحمل بصمة عملية صغيرة. وأجريت تحسينات أخرى من قبل شركة Inventys من خلال عملية VeloxoThermt (Inventys, 2017) والتي تستخدم مواد مازة صلبة في عملية TSA تتميز بسعتها الكبيرة وبكونها أسرع من عملية TSA التقليدية. ويتم حالياً تسويق هذه العملية بواسطة Svante (Svante, 2023). كما تم إحراز تقدم آخر من قبل باحثين طوروا عملية أطلق عليها اسم HTS (Jha et al., 2021). وتستخدم العملية كربونات فلز قلوي خاصة كمادة مازة، تُمكن الامتزاز عند درجات حرارة تتراوح بين  $70^\circ\text{C}$  و  $90^\circ\text{C}$ ، وإعادة التنشيط عند  $120^\circ\text{C}$  و  $130^\circ\text{C}$ ؛ ومن ثمة، فإن الفارق في درجة الحرارة

بين الامتزاز وإعادة التنشيط هو فقط 40-50° م ، مما يتيح استخدام مضخة حرارية لتخفيض الطلب على الحرارة. ويدعي مطورو هذه العملية تحقيق انخفاض في إجمالي الطلب على الطاقة بنسبة تصل إلى 60-70% لكل طن من الـ CO<sub>2</sub> الملتقط، وبالتالي خفض تكلفة التشغيل بنسبة 70%، وخفض التكلفة الرأسمالية بنسبة 40% مقارنةً بتكاليف عملية الأمين التقليدية. كما تصل كفاءة إزالة CO<sub>2</sub> إلى أعلى من 90% ونقاء المنتج يزيد عن 99%. وتجدر الإشارة إلى أنه تمت مراجعة الجهود الإضافية التي يتم متابعتها لتطوير تكنولوجيا TSA من قبل عدد من الباحثين (Bui et al., 2018).

ب. عمليات الامتزاز المتأرجح بالضغط (PSA) /الامتزاز المتأرجح بالفراغ (VSA). في هذه العمليات، يتم ضغط غاز المداخن الذي يحتوي على CO<sub>2</sub> وتوجيهه للتدفق عبر طبقة مازة. وعادةً ما يستمر تدفق الغاز حتى يقترب امتزاز CO<sub>2</sub> من التوازن مع المادة المازة الصلبة. ويعاد بعد ذلك إعادة تنشيط الطبقة عن طريق تخفيض الضغط، مما يؤدي إلى إطلاق غاز CO<sub>2</sub> والسماح بإزالتها. ويبين الشكل 19.6 تسلسل خطوات دورة PSA من اليسار إلى اليمين. ففي المفاعل الأيسر، يحدث امتزاز الـ CO<sub>2</sub> وعلى اليمين يتم إعادة تنشيط المادة الممتزة ويتم التقاط تيار الغاز الغني بالـ CO<sub>2</sub>. وتشمل مزايا العملية تحملها للملوثات النزرية وتوافر العديد من المواد المازة الممكن استخدامها والحاجة المحدودة للصيانة. وتتمثل عيوبها الرئيسية في متطلباتها العالية للطاقة، وحاجتها إلى طبقة امتزاز كبيرة، والآثار البيئية للمنشآت والمصانع الكبيرة، وتكلفتها الرأسمالية المرتفعة.



الشكل 19.6. مخطط تشغيل دورة تأرجح الضغط (PSA) (المصدر: Esaki et al., 2021).

وبالنسبة لعملية التآرجح الفراغي (VSA)، يعد الامتزاز الدوري في الأسيرة الثابتة تقنية ناضجة وتم تطبيق طرق مختلفة لإعادة تنشيط المادة المازة لالتقاط الكربون. وبشكل أساسي، يُزال CO<sub>2</sub> من المادة المازة عن طريق تطبيق فراغ على طبقة المادة المازة الغنية بالـ CO<sub>2</sub> مما يدفع CO<sub>2</sub> إلى المج. وتجدر الإشارة إلى أن الآليات والقوة الدافعة لكل من PSA و VSA هي نفسها، حيث يحدث امتزاز CO<sub>2</sub> عند ضغط مرتفع ويُمج عند ضغط منخفض، أقل من الضغوط المحيطة. وبالنسبة لغاز المداخن بعد الاحتراق، تم اختيار VSA لجهود التطوير نظراً لأن تيار اللقيم يتكون في الغالب من النيتروجين. وأُجريت دراسات موسعة على مدى العقدين الماضيين باستخدام الزيوليت والكربون المُنشط كمادة مازة، وتم تقييم العديد من دورات الامتزاز. ويبدو أن مرحلة واحدة من الـ VSA كافية لإنتاج الـ CO<sub>2</sub> بنقاء يصل إلى 95% تقريباً. ويمكن تحقيق أداء أفضل باستخدام الأطر العضوية المعدنية أو استخدام VSA على مرحلتين، إلا أن التكاليف سترتفع بشكل كبير. وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن أداء VSA يتأثر سلباً بوجود الرطوبة، وبالتالي، يجب تجفيف غاز المداخن قبل الامتزاز. علاوةً على ذلك، تتراوح متطلبات الطاقة للعملية بين 4.5-9 جيجا جول/طن ثاني أكسيد الكربون، وهو أعلى من متطلبات الطاقة لعمليات المذيبات الأمينية التقليدية. وأُجريت تحسينات أخرى على العملية من قبل الباحثين في معهد أبحاث تكنولوجيا الابتكار (RITE) اليابانية باستخدام بخار درجة حرارته منخفضة لتحسين التقاط الـ CO<sub>2</sub> (Fujiki et al., 2017). ويبدو أن كلاً من VSA و PSA أكثر ملاءمةً لعمليات التقاط الـ CO<sub>2</sub> على نطاق صغير، مثل تلك المتوقعة في صناعات IGCC والبتروكيماويات والصلب والأسمت حيث تتمتع غازات المداخن بمعدلات تدفق حجمية منخفضة نسبياً وضغوط جزئية أعلى للـ CO<sub>2</sub>.

ج. أنظمة الامتزاز/التبريد الهجينة. يوفر تكامل عمليات الامتزاز مع المفاعلات والأغشية فرصاً للتآزر بين التقنيات المختلفة. ومن المعروف جيداً أن إضافة المواد الممتازة إلى وحدات إعادة التشكيل البخاري أو مفاعلات إزاحة الماء - الغاز ( Sorption Enhanced Water Gas ) (Shift (SEWGS) وهي عملية تُستخدم فيها مادة مازة تتحمل درجات حرارة مرتفعة، مثل CaO، لزيادة إنتاج الهيدروجين إلى الحد الأقصى. وهذه العملية مناسبة لمنشآت الـ IGCC القائمة على الفحم الحجري ومحطات توليد الطاقة الكهربائية بالغاز الطبيعي. ولزيادة تحسين العملية، طُورت مادة مازة جديدة سعتها مرتفعة، ALKASORB+، أسفرت عن توفير التكاليف بنسبة 40% تقريباً في تطبيق IGCC، مقارنةً بتكاليف عملية Selexol التقليدية. ومواصفات CO<sub>2</sub> المُنتج باستخدام الامتزاز، مثل درجة النقاء تعتمد على ضغط النفخ ودرجة حرارة إعادة التنشيط،

وكلاهما من عوامل التكلفة المهمة. وإذا كان انخفاض نقاء  $CO_2$  مقبولاً، فيمكن تحقيق وفورات كبيرة، ويفتح فرصاً لاستخدام تقنية الامتزاز كتقنية فصل أمامية، لإعداد تيار الغاز للمعالجة النهائية بواسطة تقنية فصل أخرى، مثل أنظمة الالتقاط المبرد لإنتاج  $CO_2$  عالي النقاء إذا لزم الأمر. وتعتبر عملية التقاط  $CO_2$  بالتبريد أكثر فعالية إلى حد كبير عندما يكون تركيز  $CO_2$  أكبر من 70% وينتج عنها  $CO_2$  سائل، الذي يمكن ضغطه إلى ضغوط عالية باستخدام طاقة منخفضة نسبياً. ويجري حالياً تقييم مثل هذه العمليات الهجينة كالامتزاز/التبريد، وتشير النتائج إلى أنه من الممكن تحقيق معدل استرداد إجمالي يصل إلى 90% تقريباً، واستهلاك 1.40 جيجا جول/طن ثاني أكسيد الكربون، وهو أقل بكثير من الطاقة المطلوبة للعمليات التقليدية.

#### د. مواد مازة لالتقاط $CO_2$ الصلب لتكثيف العملية (Process Intensification (PI)). تكثيف

العملية هو مزيج من فصل  $CO_2$  وتفاعل لاحق في وحدة واحدة. ويعد أكسيد الكالسيوم ( $CaO$ ) مرشحاً جيداً لأنه يعمل في درجات حرارة عالية، وله قدرة عالية على امتصاص  $CO_2$  وتكلفته منخفضة. وتشمل المواد الأخرى الزيوليت، والسيليكا متوسطة المسام، وكربونات الفلزات القلوية والسيراميك، وأكاسيد فلزات الأرض القلوية، والأطر العضوية المعدنية. ويمكن استخدام هذه المواد الممتازة لتكثيف العمليات من خلال الجمع بين الفصل داخل المفاعل لزيادة الكفاءة الإجمالية. ومن بين الحلول التي يجري العمل على تطويرها ما يلي:

- إعادة تشكيل البخار المعزز بالامتزاز (SESR). هذه العملية تستخدم تقنية التكثيف (PI) لالتقاط ثاني أكسيد الكربون في المفاعل الذي يُنتج الـ  $CO_2$ ، كمفاعل إعادة التشكيل البخاري للميثان. وتقوم عملية SESR بإنتاج غاز تخليق غني بالهيدروجين من الغاز الطبيعي وفي نفس الوقت يُلتقط الـ  $CO_2$  باستخدام مادة مازة معبأة في نفس المفاعل. ومثال على هذا النوع من العمليات هو إنتاج الهيدروجين باستخدام إعادة التشكيل الحراري الذاتي ((Autothermal Reforming (ATR))، والذي يتضمن تفاعل ماص للحرارة (إعادة التشكيل البخاري) وتفاعل طارد للحرارة (أكسدة جزئية).
- الامتزاز المُعزَّز لتفاعل إزاحة الماء - الغاز (SEWGS). تجمع هذه العملية بين التقاط  $CO_2$  وتفاعل إزاحة الماء - الغاز ((Water Gas Shift (WGS))، ويتم فيها تغذية غاز التخليق إلى مفاعل SEWGS حيث يُستخدم التقاط  $CO_2$  للحصول على إنتاج معزز من الهيدروجين عند درجات حرارة وتركيز بخار منخفض مقارنةً بعملية WGS التقليدية. وتفاعل WGS طارد للحرارة، ومن ثم فهو مفضل عند درجات الحرارة المنخفضة. ولتحقيق حركية جيدة، يجب استخدام درجات حرارة مرتفعة نسبياً، مما يحد من التوازن ويؤدي إلى

- خفض الناتج. ولتحسين الإنتاجية، ترفع نسبة  $H_2O/CO_2$  على حساب زيادة متطلبات الطاقة.
- **الانتقاط المتكامل لـ  $CO_2$  واستخدامه في "مفاعلات الامتزاز/المواد مزدوجة الوظيفة (DFMs)"**. تجمع هذه العملية بين خطوات الفصل والتفاعل المطلوب. فعلى سبيل المثال، وُجد أن الجمع بين المادة الممتزة والمادة الحفازة يؤدي إلى أداء أفضل لتحويل  $CO_2$  إلى ميثان وغاز التخليق، لكل من تيارات الـ  $CO_2$  المركزة وتيارات  $CO_2$  من الهواء. والتطبيق الذي تمت دراسته على نطاق واسع للمواد المزدوجة الوظيفة DFMs هو الانتقاط المشترك للـ  $CO_2$  والميثان باستخدام الهيدروجين. وتحتوي مواد الـ DFMs عادةً على فلز قلوي أو فلز قلوي أرضي كمادة مازة ومادة حفازة للميثان مثل Ni أو Ru.
  - **عملية تحلق Ca-Cu**. تجمع هذه العملية بين وظيفة الامتزاز بواسطة أكسيد الكالسيوم ( $CaO$ ) للانتقاط  $CO_2$  مع وظيفة المادة الحفازة للحلقة الكيميائية  $Cu/CuO$  في إنتاج الهيدروجين من خلال اختزال الغاز الطبيعي. وينتج الهيدروجين المحفز عند درجة حرارة عالية، ويوفر الطاقة اللازمة لإعادة تنشيط المادة المازة (تكليس  $CaCO_3$ ). ويتم الحصول على الحرارة المطلوبة لإعادة التنشيط من تفاعل اختزال  $CuO$  بالغاز الطبيعي. ويحدث هذان التفاعلات في نفس الوقت عن طريق تغذية اللقيم (الغاز الطبيعي) عبر طبقة ثابتة، تحتوي على النسب المناسبة من  $CuO$  و  $CaCO_3$  (Buckingham et al., 2022; Bui et al., 2018).

#### 4.2.6. التوقعات المستقبلية لتقنيات الامتزاز.

مكنت الجهود المبذولة في تطوير التقنيات القائمة على المواد الممتزة التكنولوجية من الوصول إلى مستوى الجاهزية التكنولوجية 7، ومثال على ذلك المواد المازة الجافة القابلة لإعادة التنشيط والتي يقوم بتطويرها معهد أبحاث كيبكو (KEPCO Research Institute). وقد أثبتت المواد المازة الجديدة فعاليتها بالفعل على نطاق المختبر، ولكنها تتطلب مزيداً من التطوير لتأكيد فعاليتها باستخدام تيارات غاز المداخل لتقييم تأثير الشوائب على الأداء. كما أن هناك حاجة لمزيد من البحث والتطوير أيضاً لتحويل المواد الممتزة المرشحة من شكلها الحالي كمسحوق إلى أشكال مناسبة للتطبيقات على نطاق صناعي، مثل الكريات والخرز والمتراصات (monoliths) والألياف، أو دمج المكونات النشطة في دعائم هيكلية.

وهناك حاجة أيضاً إلى مزيد من جهود التطوير الهندسي لمعالجة تصاميم معدات الامتزاز لتحسين مدة دورة إعادة التنشيط. ومن ذلك ينبغي تقييم أداء المعدات المُحسنة للتلامس كالعجلة الدوارة (rotary

(wheel adsorber) التي استُحدثت لرفع القدرة على التماس بين اللقيم والمادة المازة، كما ينبغي بذل الجهود لتحسين المعدات التقليدية، التي تعتمد على الفرشة الثابتة، والفرشة المميعة (fluidised bed)، والفرشة المتحركة (moving bed). وينبغي أيضاً بذل الجهود لتعزيز القاعدة المعرفية المتعلقة بتوسيع نطاق التقنيات المستحدثة الناشئة، وتحديد حدود استخدامها أو تطبيقاتها، مع الأخذ في الاعتبار الطبيعة الصلبة للمواد المازة. وأخيراً، ومع الارتفاع المحتمل لدور الهيدروجين كناقل للطاقة، يجب تكثيف الجهود لضمان نضج بعض العمليات مثل SEWGS، التي يمكن أن يكون لها دور مستقبلي مهم في الصناعة (Bui et al., 2018).

### 3.6. مواد وتقنيات الأغشية لالتقاط CO<sub>2</sub>

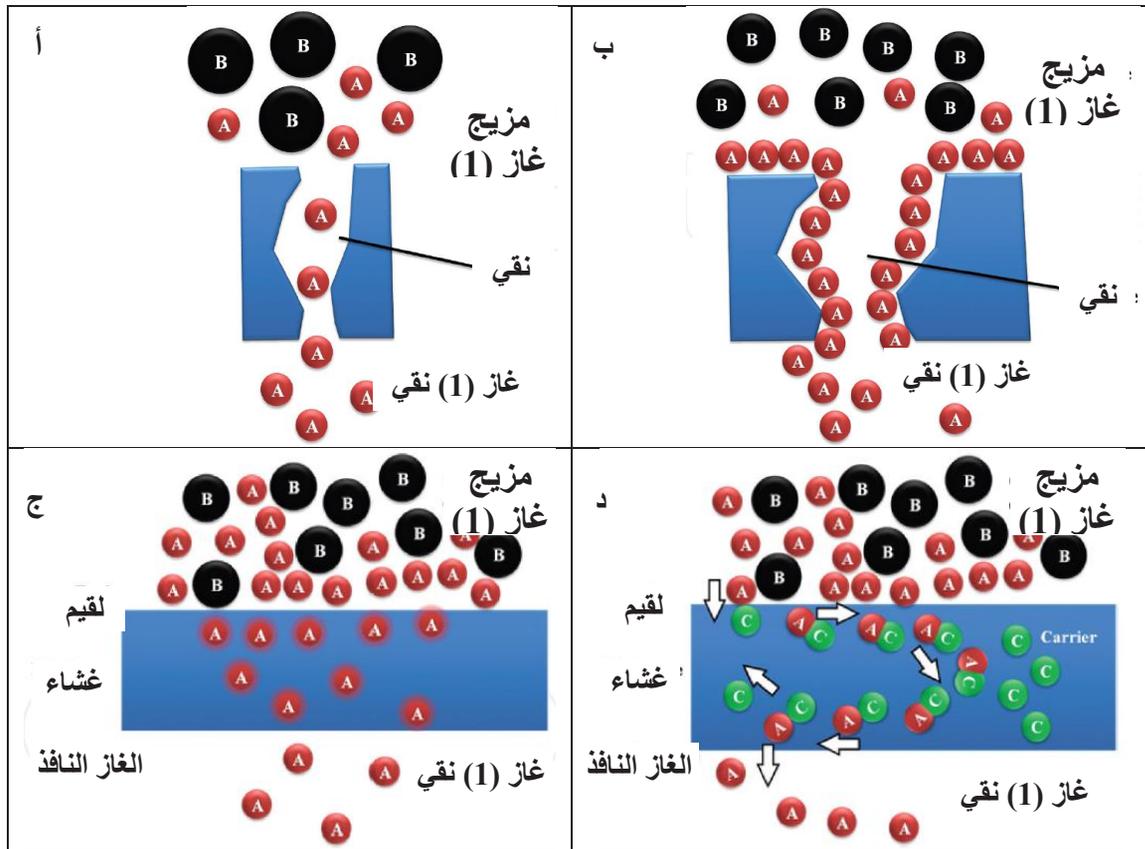
يعتمد الفصل الغشائي على استخدام طبقة رقيقة من مادة حاجزة نصف منفذة تفصل الوسط المائع عند تطبيق قوة دافعة. والقوى الدافعة عادةً هي الضغط، أو درجة الحرارة، أو فرق الجهد الكهربائي على جانبي الغشاء. ويقسم الغشاء تيار اللقيم إلى قسمين: تيار متخلل وتيار محتجز (محتفظ). ويعود استخدام الأغشية كتقنية فصل إلى القرن التاسع عشر، وبالتالي هي من التقنيات الراسخة جداً في العديد من التطبيقات الصناعية، ومن أهمها فصل مزيج الغازات وتنقية وتحلية المياه (من خلال تقنية التناضح العكسي). ومن ثمة، فقد نظرت الصناعة إلى تقنيات الفصل الغشائي كخيار منطقي لالتقاط ثاني أكسيد الكربون على مدى العقود القليلة الماضية. وعلاوةً على ذلك، بدأت تكنولوجيا الأغشية تلعب دوراً مهماً في فصل الهيدروجين عن الـ CO<sub>2</sub> على نطاق صناعي، وذلك بسبب جدواها الاقتصادية من حيث التصنيع مع تطور القدرات على تصميم الهيكل المسامي للأغشية وسهولة التشغيل، والمتانة الطويل الأمد، وتكاليف الصيانة المنخفضة، والمرونة العالية في تصميم المنشآت وفق احتياجات التطبيق. وبما أن انبعاثات غاز المداخن عبارة عن خليط من غازات مختلفة والغاز المستهدف الذي سيتم فصله هو ثاني أكسيد الكربون، فقد أصبح تطوير التكنولوجيا القائمة على الأغشية أحد أهداف صناعة الوقود الأحفوري. وأثبتت الأغشية بالفعل فعاليتها المحتملة للأسباب التالية:

- تتطلب تطبيقات الأغشية مرافق بسيطة لشبكها مع المرافق الصناعية الأخرى، مما يقلل بشكل كبير من التكلفة الرأسمالية. ومن الممكن أيضاً دمج فصل غازات متعددة في منشأة واحدة، كما يمكن تجميع المنشأة المطلوبة في وحدة متكاملة مَوْضبة، مما يقلل الحجم والوزن و يتيح نقلها وتشغيلها في أي مكان.
- أسلوب التشغيل بسيط ولا يتطلب أي مواد كيميائية أو أجزاء متحركة أو تسخين، وبالتالي يمكن لتكاليف التشغيل أن تكون محدودة للغاية نظراً لأن استبدال الأغشية هو العنصر الرئيسي في هذه

التكاليف، كما أن إنتاج الأغشية يتطلب استخداماً منخفضاً للمواد وللطاقة وحد أدنى من استخدام المياه.

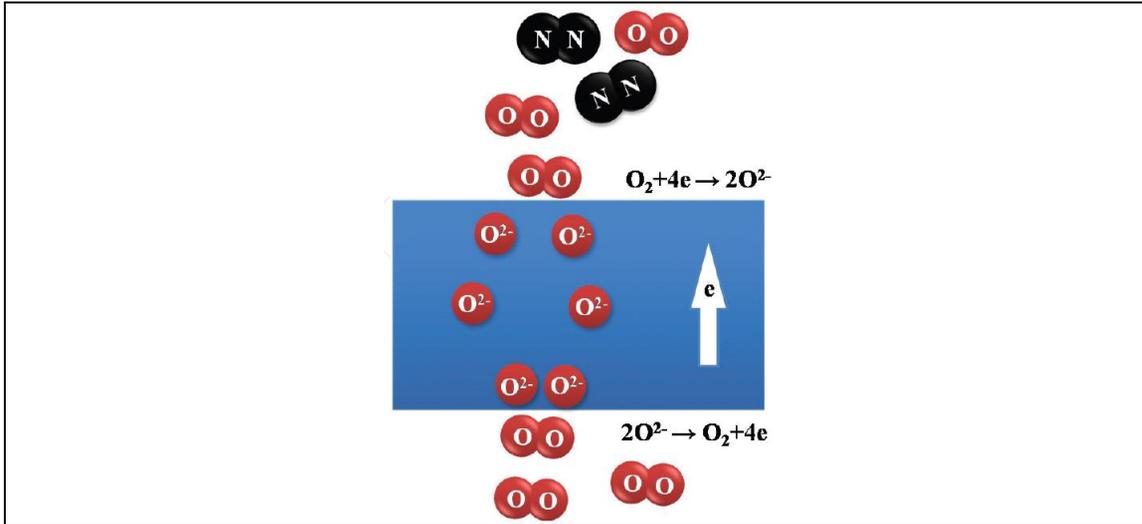
- تتميز الأغشية بأنها موثوقة وتتمتع بالثبات، ولأنها عادةً ما تكون بطيئة الأداء يمكن تشغيلها دون مراقبة لفترات طويلة، حتى في وجود الغازات الحمضية الرطبة.
- وأخيراً بالإمكان تعديل منظومة الأغشية بسهولة لتعمل على النحو المستهدف بناءً على مكونات اللقيم وذلك عبر ضبط أحداثيات التشغيل.

ويعزى فصل الغازات المختلفة بواسطة الأغشية إلى الاختلافات في نفاذيتها عبر الغشاء. وتعود الاختلافات إلى الخواص الفيزيائية و/أو الكيميائية للغازات. وبالتالي، تصمم الأغشية عادةً للاستفادة من هذه الاختلافات، مع الأخذ في الاعتبار الآليات الخمس التي تحدث عادةً أثناء الفصل كما هو موضح في الشكل 20.6 (Guozhao & Ming, 2017).



هـ

مزيج  
غاز (1)



الشكل 20.6. آليات فصل الغاز بواسطة الأغشية: (أ) آلية فصل الغريلة الحجمية؛ (ب) آلية فصل الانتشار السطحي؛ (ج) آلية فصل نشر المحلول؛ (د) آلية فصل النقل الميسرة؛ و (هـ) آلية فصل النقل الأيوني. (المصدر: Guozhao & Ming, 2017).

### 1.3.6. تصنيف الأغشية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

هناك عدة تصنيفات للأغشية التي تستخدم للفصل في الصناعة الكيميائية. وتعتمد التصنيفات عادةً على التركيب الكيماوي، والخصائص الهيكلية، ووجود مجموعات وظيفية في هيكلها، وطبيعة التطبيق، وما إلى ذلك. واستناداً إلى تركيبها الكيميائي، تنقسم الأغشية بشكل عام إلى مجموعتين:

أ. **الأغشية العضوية.** هذه الفئة من الأغشية هي الأكثر استخداماً في الصناعة لفصل ثاني أكسيد الكربون وأهمها الأغشية البوليميرية. وتتضمن الفئة العديد من الأغشية ذات الاختلافات الكبيرة من حيث البنية الفيزيائية والمواد التي تصنع منها. وهي مقاومة لدرجة الحرارة والضغط العالين، والمواد الكيميائية الأخرى الموجودة عادةً في غازات المداخن. وبالتالي، تعتبر الأغشية البوليميرية مادة فعالة لفصل ثاني أكسيد الكربون بسبب نفاذيتها وأدائها الانتقائي وقدرتها على التحكم في تنظيم مسامية الغشاء طوال عملية إنتاجها. ووصلت الأغشية البوليميرية إلى مستوى جاهزية تكنولوجية 7. ومع ذلك، فإن بعضها الذي يتم دمجها مع طرق فصل أخرى، كالأغشية البوليميرية/المهجنة مع تقنية الفصل المبرد التي ما تزال في المرحلة التجريبية النمطية وجاهزيتها التكنولوجية بحدود 6، وكالأغشية البوليميرية/المهجنة مع الفصل بالمذيبات والتي ما زالت عند جاهزية تكنولوجية تقدر بحوالي 4.

ب. **الأغشية غير العضوية.** تتضمن هذه الفئة العديد من الفئات الفرعية للأغشية التي تُنتج باستخدام الكربون والزيوليت والسيراميك والمواد المعدنية. وقد تم تطوير العديد من الأغشية ضمن هذه

الفئة في الماضي لدعم العديد من التطبيقات في الصناعات الكيميائية. وقد تم مؤخراً اقتراح تطبيقها لفصل CO<sub>2</sub> عن غازات المداخن، ومن ثمة، تُوجه حالياً أبحاث مكثفة نحو تحسين انتقائيتها تجاه ثاني أكسيد الكربون، وخفض ظروف التشغيل، وخفض تكلفة الغشاء. فعلى سبيل المثال، الأغشية الفلزية، مثل تلك المصنوعة من فلز البلاديوم، Pd وسبائكه، معروفة جيداً بنفاذيتها للهيدروجين بسبب ميل الهيدروجين العالي إلى الذوبان والانتشار في الفلزات مقارنةً بالغازات الأخرى. وقد تم التعرف على التطبيق المحتمل لهذه الأغشية في التقاط CO<sub>2</sub> قبل الاحتراق، وأصبح تطوير أغشية رقيقة ذات أداء أفضل وتكاليف أقل مجالاً بحثياً نشطاً على مدار العشرين عاماً الماضية. وبشكل عام، كُثفت الجهود المبذولة لتطوير الأغشية وتقنيات الفصل ذات الصلة بالتقاط CO<sub>2</sub> على مدار العقود الماضية. ويقدم الجدول 10.6 قائمة بأنواع الأغشية المختلفة قيد النظر ومزاياها وعيوبها الرئيسية. وخلال الفترة 2013-2023، كان هناك ما مجموعه 16 مشروعاً رئيسياً للبحث والتطوير تتراوح فتراتها بين 4-10 سنوات، منها ستة مشاريع على مستوى وحدات مخبرية أو منضدية (bench scale) تتناول التقاط CO<sub>2</sub> قبل الاحتراق ومستوى جاهزيتها التكنولوجية يتراوح بين 3-4. أما المشاريع العشرة المتبقية فكانت بمستويات تتراوح بين وحدات منضدية ووحدات نمطية (pilot scale) وتستهدف معالجة تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> بعد الاحتراق وجاهزيتها التكنولوجية تتراوح بين 4-7. وكان تقييم الأغشية البوليمرية موضوع البحث لتسعة مشاريع، في حين شملت المشاريع المتبقية تطوير أغشية عضوية وغير عضوية مختلفة، مثل أكسيد الجرافين، والمناخل الجزيئية الكربونية، وغيرها. وكانت الأهداف الرئيسية لجهود البحث والتطوير هي تحقيق نفاذية وانتقائية عالية، ومعالجة العيوب المذكورة في الجدول 10.6. وقد دُعمت جهود البحث والتطوير بهدف تأمين فهم أفضل لظواهر انتقال الغازات عبر الأغشية وتطوير تقنيات نمذجة محسنة، وكلاهما ضروري في توجيه الجهود البحثية نحو تحسين أداء الأغشية.

وعلى الرغم من التقدم الذي أحرز في هذا المجال، إلا أن الأغشية بشكل عام لا تزال تواجه بعض المشكلات المتعلقة بأدائها. وأهم العيوب هي: (1) انخفاض الكفاءة عند تركيزات CO<sub>2</sub> المنخفضة، مثل محدودية مرونتها عندما يكون تركيز CO<sub>2</sub> في تيار الغاز أقل من 20%، و(2) التأثير السلبي لدرجات الحرارة المرتفعة للقيم على الأداء، و(3) حساسية الأغشية للغازات المسببة للتآكل، و(4) عدم ثبات أداء الأغشية على مدى فترة طويلة من التشغيل (Dziejarski et al., 2023).

وتُصنف الأغشية أيضاً بناءً على التكوين أو الوحدات المستخدمة صناعياً لفصل الموائع. وقد تم تطوير أربعة تكوينات رئيسية، تكوينان ميكانيكيان وتكوينان وفق نوع المادة. وهذه التكوينات هي: (1) وحدات أغشية أنبوبية حيث يتم وضع العديد من هذه الأنابيب ضمن وعاء أسطواني واحد، و(2) لوحة غشائية

مسطحة وإطار وتتضمن الوحدة عادةً عدة لوحات مسطحة، و(3) ألياف شعرية مجوفة تتكون من طبقة رقيقة من بوليمر كثيف مدعوم على طبقة سفلية مسامية وتُجمع الألياف ضمن وحدة أسطوانية، و(4) وحدة اللفة الحلزونية وتتكون من أغشية بوليمرية رقيقة ملفوفة على شكل حلزوني ومرتبطة ضمن غلاف أسطواني. ويتضمن الشكل 21.6 الرسوم التخطيطية لهذه التكوينات المختلفة (NPC, 2021a).

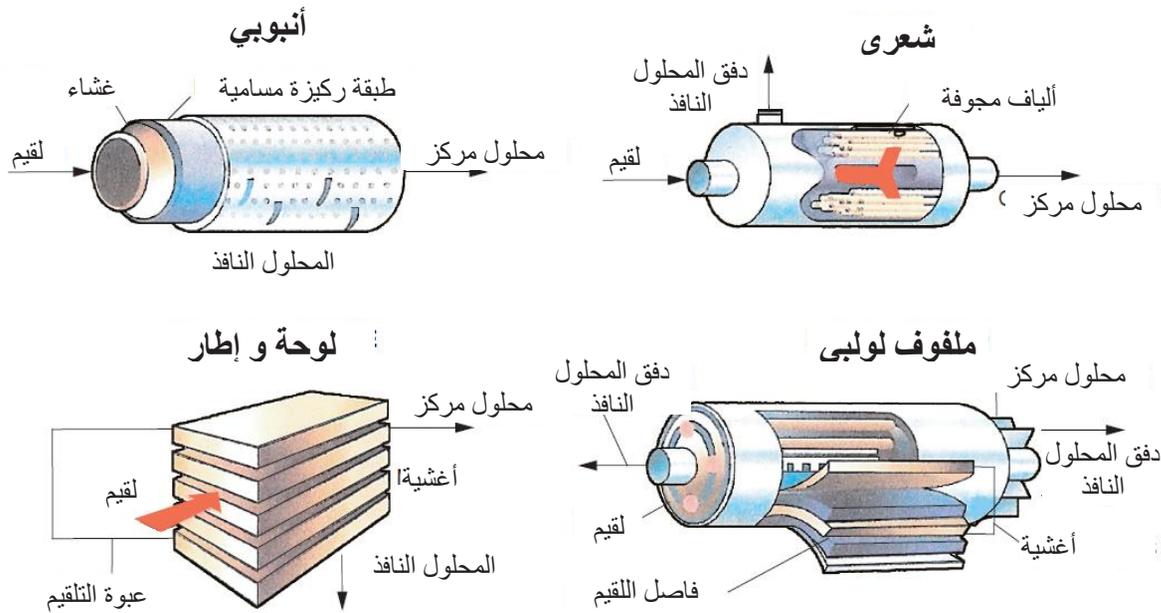
### 2.3.6. تطبيقات الأغشية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون

يتم تصنيف عمليات أغشية التقاط  $CO_2$  وتخزينه ضمن ثلاث فئات تشمل عمليات ما قبل الاحتراق، واحتراق الأكسي-وقود، وما بعد الاحتراق، على غرار الأنواع الأخرى من عمليات التقاط  $CO_2$  التي تم عرضها في هذا الفصل. وفيما يلي ملخص لعمليات الأغشية التي طُورت أو التي ما تزال في مراحل مختلفة من التطوير لكل فئة من هذه الفئات الثلاث.

الجدول 10.6. ملخص الأغشية وتطبيقاتها في التقاط  $CO_2$  وتخزينه (Guozhao & Ming, 2017)

نوع الغشاء	التطبيق	المزايا	العيوب
أغشية فلزية	ما قبل الاحتراق	انتقائية لانتهائية لـ $H_2/CO_2$	تكلفة عالية؛ تسممها بالشوائب؛ قوة دافعة منخفضة
أغشية كربونية	ما قبل الاحتراق	تأثير نخل حجمي جيد؛ انتقائية عالية $CO_2/H_2$	ارتفاع التكاليف؛ عرضة للتأثر بالأكسجين؛ ضعف مقاومتها للتقصيف
أغشية الألومينا	ما قبل الاحتراق	منخفضة التكلفة؛ الثبات الكيميائي والفيزيائي	انتقائية $H_2/CO_2$ منخفضة
أغشية الزيوليت	ما قبل وما بعد الاحتراق	منخفضة التكلفة؛ الثبات الكيميائي والفيزيائي	انتقائية $H_2/CO_2$ منخفضة
أغشية MOF	ما قبل وما بعد الاحتراق	حجم مسامي ومساحة سطحية كبيرة	تكلفة عالية
أغشية السيليكا	ما قبل الاحتراق	حجم مسامي مناسب؛ تكلفة منخفضة؛ ارتفاع الثبات الحراري	ضعف الثبات الحراري المائي

ثبات كيميائي وفيزيائي منخفض؛ سميقة جداً	تكلفة منخفضة؛ انتقائية عالية لـ $N_2/CO_2$	ما بعد الاحتراق	أغشية بوليمرية
متطلبات طاقة مرتفعة؛ صعوبة ختمها عند تصنيع الوحدات	انتقائية عالية للـ $O_2$ و $N_2$	احتراق أكسي-وقود-	أغشية الفلوريت
متطلبات طاقة مرتفعة؛ صعوبة ختمها عند تصنيع الوحدات؛ عرضة للتسمم بالشوائب	انتقائية عالية للـ $O_2$ و $N_2$	احتراق أكسي-وقود	أغشية البيروفسكايت



الشكل 21.6. تصميمات شائعة للأغشية (المصدر: NPC, 2021a; NPC, 2021b).

أ. عمليات أغشية الالتقاط ما قبل الاحتراق. تعتمد الأغشية الانتقائية لـ  $CO_2$  والتي يتخللها الغاز بشكل تفضيلي على اختلاف قدرتها على الامتزاز أو الذوبان المتأصلة بين الغازات المستهدفة للفصل. وبالتالي، يعتمد تطبيقها إما على الانتشار السطحي (surface diffusion) أو الانتشار كمحلول (solution diffusion). ولتعظيم فرق الامتزاز أو التحلل بين الغازات، يجب أن تكون درجة الحرارة منخفضة، وهو أمر غير مفضل في عمليات ما قبل الاحتراق. ومع ذلك، يستمر السعي لتطوير تكنولوجيا الأغشية كتقنية التقاط ما قبل الاحتراق لفصل  $CO_2$  عن غازات الوقود الأخرى قبل احتراق الغاز. وتشمل العمليات إنتاج غاز التخليق من خلال تغويز مخلفات النفط أو

الفحم الحجري وإعادة التشكيل البخاري لأبخرة الوقود الأحفوري. ويتم تطبيق تقنيات الفصل الغشائي لفصل الـ  $H_2$  و  $CO_2$  عند ضغوط عالية تصل إلى 80 ضغط جوي. ويتم ضغط التيار الغني بالـ  $CO_2$  ونقله للتخزين أو للاستخدام، ويُستخدم تيار الهيدروجين لتوليد الطاقة الكهربائية التي ينبعث منها بخار الماء بشكل أساسي في العادم. ويتم استكمال الطاقة اللازمة لتوليد الطاقة بالغازات الساخنة الناتجة عن تغويز اللقيم وإعادة التشكيل وإزاحة الماء - الغاز. ويمكن استخدام نوعين من الأغشية: الأغشية الانتقائية للـ  $H_2$  والأغشية الانتقائية للـ  $CO_2$ ، وكل نوع يدعم انتشار أحد الغازين بشكل تفضيلي.

تعتبر أغشية سبانك البلاديوم مثالية للأغشية الانتقائية لغاز  $H_2$ ، حيث ينقسم الـ  $H_2$  إلى ذرات تنتشر عبر الأغشية. والعيوب الرئيسية لهذه الأغشية هي (1) التكلفة العالية للبلاديوم مقارنةً بالأغشية الأخرى (مثل غشاء السيليكا)، و(2) الانتشار كمحلول أقل حساسية للضغط، و(3) الفشل الكارثي للمعدات عند درجات حرارة منخفضة بسبب التقصف الهيدروجيني، و(4) تأثير الملوثات مثل وجود  $CO_2$  و  $NH_3$  ومركبات الكبريت السلبي على انتشار الهيدروجين عبر غشاء البلاديوم. ولا تزال تقنية الفصل بواسطة أغشية البلاديوم في مراحلها التجريبية الأولية على نطاق مختبري صغير. أما الأغشية الأخرى التي هي ما تزال قيد البحث فهي الأغشية غير العضوية، وأغشية المنخل الجزيئي للكربون، والألومينا، وأغشية السيليكا، والتي تعمل من خلال تأثير الغربلة بالحجم الجزيئي. وتُبدي أغشية السيليكا إمكانات تجارية كبيرة لفصل الهيدروجين و  $CO_2$  بسبب خصائص مختلفة بما في ذلك وفرة السيليكا، والتكلفة المنخفضة، والثبات الحراري والكيميائي الجيد، والقدرة على التحكم في الأقطار المسامية، أما عيبها الرئيسي فهو حساسيتها لبخار الماء. بالإضافة إلى ما سبق، هناك مجموعة واسعة من الأغشية البوليمرية المتاحة لفصل الهيدروجين عن ثاني أكسيد الكربون. ومن أهم الملاحظات التي تم التوصل إليها النفاذية العالية للبوليميدات والانتقائية المرتفعة للبولي بنزيميدازول والبولي كلوريد الفينيل، ولكن نفاذيتها للـ  $H_2$  متدنية نسبياً. ومن أهم عيوب الأغشية البوليمرية هو ضعف ثباتها تحت درجات حرارة مرتفعة وعند التعرض لبعض الغازات مثل  $CO_2$  وبخار الماء وكبريتيد الهيدروجين. ومن الأغشية الأخرى المرشحة لفصل الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون، أغشية الزيوليت، التي تعمل وفق أحجام الأقفية المسامية. وتم تحديد أنواع قليلة فقط من الزيوليت المناسبة لهذا الغرض نظراً لأن آلية الغربال الجزيئي تتطلب أغشية مثالية. وكذلك تعتبر الأغشية المحضرة من الأطر العضوية المعدنية (MOFs)، التي يطلق عليها أسم "البلورات المسامية الناعمة" من الأغشية المرشحة الواعدة لفصل  $H_2/CO_2$  إذ أنها وعلى الرغم من الاعتدال النسبي لخاصية النفاذ الانتقائي العائدة لهذه

الأغشية، إلا أن نفاذيتها مرتفعة، ولكن درجة حرارة تشغيلها عادةً ما تكون أقل من درجات حرارة غاز اللقيم، وتصنيعها ما زال معقد ومكلف حالياً. وكما لاحظت أخيراً، لا يزال الفصل الغشائي لمرحلة ما قبل الاحتراق عند مستوى جاهزية تكنولوجية منخفض ولم يتم الانتهاء إلا من عدد قليل من الأنظمة الغشائية للفصل ما قبل الاحتراق التي وصلت إلى مستوى النطاق التجريبي النمطي (Guozhao & Ming, 2017).

ب. **أغشية الانتقال ما بعد الاحتراق.** يفصل الانتقال بعد الاحتراق مزيج ثاني أكسيد الكربون/النيتروجين عند درجات حرارة معتدلة وضغط جوي السائد في المحيط. ويتمثل التحدي الرئيسي بمعالجة موضوع انخفاض نسبة  $CO_2$  في غاز المداخن (حوالي 15%)، مما يؤثر على القوة الدافعة لانتشار ثاني أكسيد الكربون في الأغشية. ويعتمد فصل ثاني أكسيد الكربون/النيتروجين أيضاً على الاختلاف في قابلية الامتصاص والذوبان بين الغازات، مما يؤثر بدوره على الانتشار السطحي والانتشار كمحلول. ولثاني أكسيد الكربون الأفضلية في الانتشار، بالمقارنة مع  $N_2$ ، في معظم المواد الغشائية إما عن طريق الامتزاز أو الامتصاص، حيث أن قطره أصغر قليلاً من قطر الـ  $N_2$ ، مما يعزز انتشاره. وتضمن القابلية العالية لذوبان الـ  $CO_2$  في البوليمرات انتقائية كافية لفصل مزيج ثاني أكسيد الكربون/النيتروجين وله خصائص انتشار جيدة في نفس الوقت. لذلك، تُستخدم الأغشية الانتقائية للـ  $CO_2$  بشكل عام لعمليات الانتقال ما بعد الاحتراق. ولكي تكون هذه الأغشية فعالة، يجب أن تتمتع بنفاذية وانتقائية عالية لثاني أكسيد الكربون، مقارنةً مع النيتروجين، وثبات حراري وكيميائي عالي، وتكاليف مقبولة. ولتلبية هذه المتطلبات، تُعد الأغشية القائمة على البوليمر هي الأفضل أداءً حالياً، وتشمل هذه المواد الغشائية أسيتات السليلوز والبوليميدات والبولي سلفون والبولي كربونات.

ويُعد غشاء المصفوفة المختلطة (mixed matrix membrane) خياراً جديداً قيد التطوير، ويتكون من مادة غير عضوية على شكل جزيئات دقيقة أو نانوية في طور منفصل داخل مصفوفة بوليمرية مستمرة. وتوفر إضافة المواد غير العضوية في مصفوفة البوليمر خصائص حرارية وميكانيكية مُحسنة بالإضافة إلى ثبات أعلى. وتُظهر أغشية المناخل الجزيئية الكربونية، المصنوعة من البوليميدات أداءً مثيراً للاهتمام في تطبيقات فصل ثاني أكسيد الكربون إذ تتمتع هذه الفئة من الأغشية بخصائص نقل غاز جيدة للغازات الخفيفة، وثبات حراري وكيميائي مرتفع نسبياً. ومع ذلك، فإن هذه الأغشية هشة نسبياً ومكلفة مقارنةً بالأغشية البوليمرية (Guozhao & Ming, 2017).

ج. أغشية لاحتراق أكسي-الوقود. في احتراق أكسي-وقود، يُستخدم الأكسجين للاحتراق بدلاً من الهواء لتفادي وجود النيتروجين في غاز العادم. ومن ثمة، فإن تركيب غاز المداخن يتكون من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وشوائب ثانوية أخرى مثل ثاني أكسيد الكبريت. ويمكن فصل الماء عن طريق تكثيف البخار كما يمكن إزالة ثاني أكسيد الكبريت بالطرق التقليدية. ويمكن ضغط الغازات الغنية بـ  $CO_2$  المتبقية ونقلها وتخزينها. وتُتبع آلية النقل الأيوني لغشاء فصل الهواء لفصل مزيج  $O_2/N_2$  في الهواء، كما هو موضح في الشكل 20.6، حيث تُحول جزيئات الأكسجين إلى أيونات الأكسجين بواسطة جهد كهربائي مطبق أو بواسطة فارق الضغط الجزئي للأكسجين، ثم تعود الأيونات وتُكون جزيئات الأكسجين بعد مرورها عبر الغشاء. وتتميز هذه الأغشية بانتقائيتها للـ  $O_2$  من حيث المبدأ. وبشكل عام، تُستخدم الأغشية المعتمدة على الفلوريت والبيروفسكايت للوصول إلى أكسجين نقي من خلال هذه الآلية.

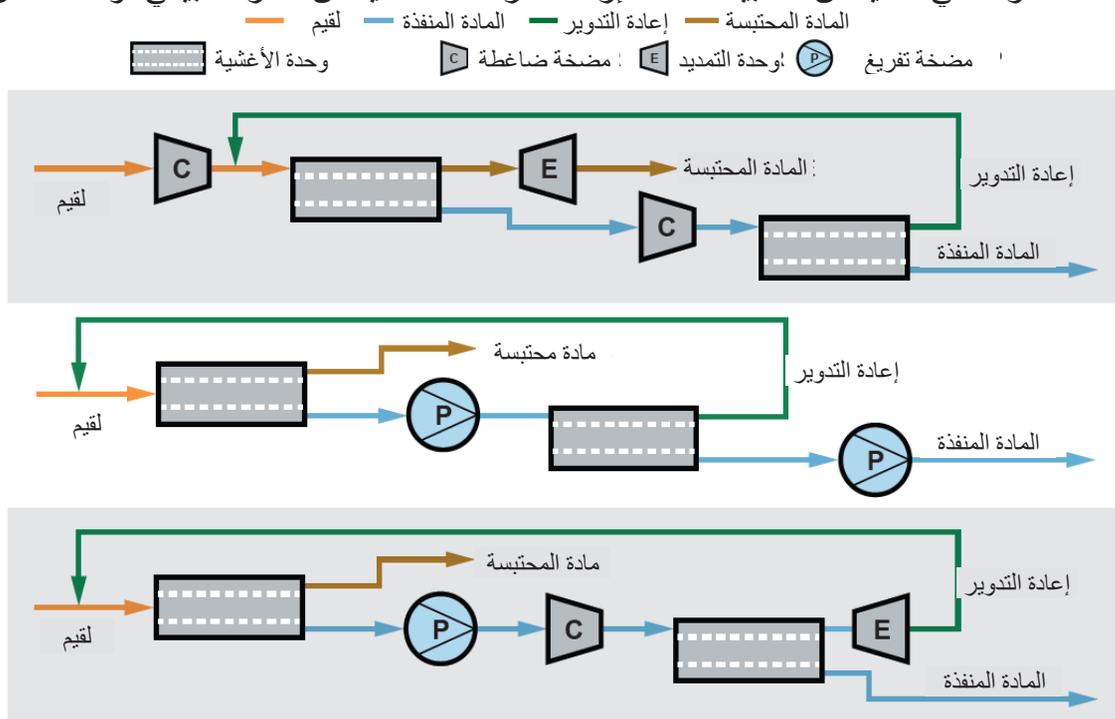
ولا تزال تقنيات الأغشية المخصصة لاحتراق أكسي-وقود في مراحلها الأولى من التطوير. وبالمقارنة مع تقنية فصل الهواء بالتبريد التقليدية، فإن متطلبات درجات الحرارة المرتفعة والتكاليف المرتفعة لإنتاج أغشية فصل الهواء غير مناسبة حالياً للتسويق. وتشمل التحديات كذلك درجة الحرارة العالية المطلوبة لختم الأغشية، والثبات الكيميائي والميكانيكي المنخفض نسبياً. وإلى الآن، لا تتوفر أي معلومات عن أي مشروع واسع النطاق مرتبط بأغشية أكسي-وقود (Guozhao & Ming, 2017).

### 3.3.6. تقنيات أغشية النقاط $CO_2$ الناضجة

أدت تطبيقات الأغشية الناجحة في الفصل الصناعي إلى توجه الصناعة نحو تطوير ونشر التكنولوجيا في تطبيقات فصل الـ  $CO_2$  عن الغاز الطبيعي وفصل النيتروجين عن الهواء. وقد أُدخلت تحسينات من خلال استعمال مواد بوليمرية متقدمة وتحسين إنتاج الأغشية منذ الثمانينات، وشهدت تكلفة أنظمة الأغشية انخفاضاً مطرداً. وهناك العديد من الأغشية التي تُسوق تجارياً بما في ذلك (1) أغشية  $TM^MPolySep$  من UOP، و(2) أغشية PRISM من Air Products، و(3) أغشية  $TM^MEDAL$  من Air Liquide. أما بالنسبة لصناعة النفط والغاز، فتقتصر التطبيقات عموماً على تلك المتعلقة بتقنية الغاز الطبيعي على نطاق صغير نسبياً. وفي الواقع، لا توجد أغشية تجارية يمكنها فصل الهيدروجين عن  $CO_2$  بشكل فعال بسبب الانتقائية المنخفضة (NETL, 2015a; NETL, 2015b; NETL, 2015c).

وتستخدم أغشية فصل الغاز حالياً في الصناعة في العديد من التطبيقات، وتشمل فصل الهيدروجين في إنتاج الأمونيا، وبعض التطبيقات في مصانع البتروكيماويات، وفصل النيتروجين عن الهواء، وإزالة  $CO_2$  من الغاز الطبيعي، واستعادة المركبات العضوية المتطايرة من الهواء أو النيتروجين. والأغشية الأكثر استخداماً لفصل الغازات مصنوعة من البوليمرات. وتعتمد أنظمة الفصل المستخدمة حالياً على عملية من مرحلتين. حيث أن هذه الأنظمة هي الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة، مع تحقيق كفاءة محسنة عند إعادة تدوير المرحلة الثانية من الشبكة إلى بداية الدورة كما هو موضح في تكوينات الأنظمة الثلاثة في الشكل 22.6 (NPC, 2021a).

وهناك العديد من مانحي تراخيص العمليات الذين قاموا بتطوير وتقديم تقنيات الفصل القائمة على الأغشية على مدى عدة عقود ماضية. ويقدم الجدول 11.6 قائمة بالأغشية التجارية ووحدات الأغشية، والشركات المرخصة أو المنتجة لها، والسمات الرئيسية لوحدات الأغشية. ويتم تقديم هذه التقنيات لفصل الغازات في العديد من التطبيقات، مثل إزالة الغازات الحمضية من الغاز الطبيعي، واستخلاص



الشكل 22.6. تكوينات مختلفة لدوائر غشائية ذات مرحلتين - مثري تسلسلي مع تكوين إعادة التدوير (المصدر: NPC, 2021a).

الهيدروجين والهيليوم، واستخراج الهيدروجين من تيارات العمليات الصناعية الكيماوية. واكتسب مانحو التراخيص ثروة من الخبرة العلمية والتكنولوجية والتي تعتبر حالياً القاعدة المعرفية الداعمة لتطوير تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  الغشائي.

وفيما يتعلق بالتقاط ثاني أكسيد الكربون، يظهر في الشكل 23.6 مخطط تدفق العملية لالتقاط ما بعد الاحتراق من محطة توليد الكهرباء. ويتم تغذية غاز المداخن من الغلاية إلى وحدة فصل غشائية متعددة المراحل. وتقوم وحدة الغشاء الأولى بفصل CO<sub>2</sub> والماء ومعالجة غاز المداخن، وفي المرحلة الثانية يتم فصل المزيد من CO<sub>2</sub>، الذي يعاد مرة أخرى عن طريق تيار الهواء إلى المرجل. ويمرر التيار الغني بـ CO<sub>2</sub> الناتج من وحدة الغشاء في المرحلة الأولى عبر مكثف لفصل الماء ولإنتاج CO<sub>2</sub> عالي النقاء. ويمرر الغاز المنبعث من المكثف عبر غشاء المرحلة الثالثة لمزيد من تنقية غاز المداخن من ثاني أكسيد الكربون، وإعادة تدوير تيار CO<sub>2</sub> من وحدة الغشاء هذه مرة أخرى إلى مكثف CO<sub>2</sub>. (Dziejarski et al., 2023).

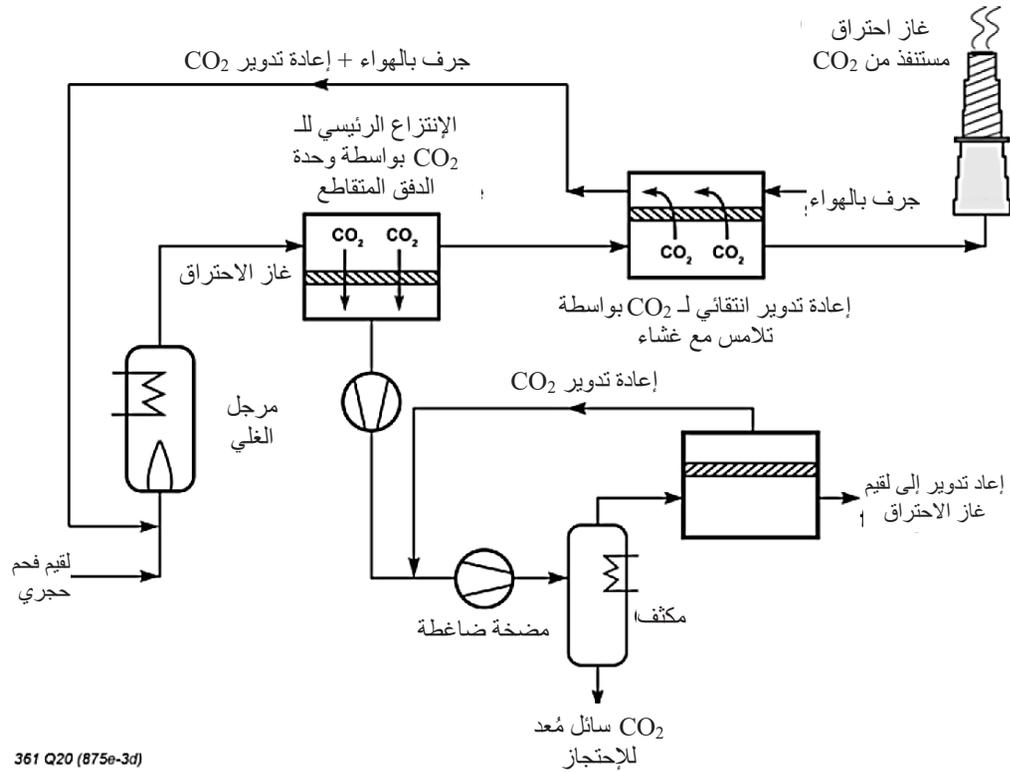
#### الجدول 11.6. عمليات الفصل بالأغشية والمرخصين لها

اسم العملية/المرخص	الميزات الرئيسية
أغشية سينارا (Cynara) أغشية فصل الغاز SLB/Apura	تستخدم أغشية سينارا (Cynara) لتيارات الغاز التي تحتوي على 10 - 90 مول% من ثاني أكسيد الكربون؛ تُستخدم كألياف مجوفة غير متماثلة لفصل CO <sub>2</sub> عن الهيدروكربونات. أكثر من 40 منشأة. Apura عبارة عن أغشية حلزونية لمعالجة الغاز الطبيعي وفصل ثاني أكسيد الكربون.
أغشية UOP Separex /Membrane Systems /UOP LLC، شركة هانيويل	أنظمة جافة؛ حد أدنى من الأجزاء المتحركة. تُستخدم في مرحلة المعالجة المسبقة قبل أنظمة الأغشية ذات المرحلة الواحدة أو المرحلتين. أكثر من 130 وحدة. مصنع واحد لالتقاط CO <sub>2</sub> وتخزينه.
أغشية HISELECT/ Linde HYSORP/ Engineering	تيارات الغاز التي تحتوي على CO <sub>2</sub> والتي تتطلب إزالة الغازات الحمضية وفصل الهيدروجين والهيليوم والتحكم في نقطة الندى؛ تقنيات PSA و TSA. تم تركيب العديد من الوحدات
الأغشية المنشورية Air Products/(Prism)	وحدات قائمة على الألياف المجوفة لمختلف التطبيقات بما في ذلك فصل النيتروجين والهيدروجين، وتحسين مواصفات الغاز الحيوي، ومحطات الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري، وعمليات الاحتراق الأخرى، وإزالة بخار الماء. تم تطوير الغشاء البوليمري في الجامعة النرويجية للعلوم والتكنولوجيا ولا تزال العملية قيد التطوير
أغشية Cameron /PN1 and Petronas	غشاء متعدد الألياف تم تطويره بالاشتراك مع بتروناس. أكثر من 30 عاماً من الخبرة، التطبيق الرئيسي إزالة الغازات الحمضية من الغاز الطبيعي
أغشية Sepuran/Evonik	ألياف مجوفة لفصل الغازات النبيلة وإنتاج النيتروجين وتحسين الغاز الحيوي

أغشية بوليمر المشبع بالفلور تُعبأ في وحدات أغشية حلزونية لإزالة CO<sub>2</sub> وتطبيقات استعادة الهيدروجين. يمكن تطبيق العملية على محطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري والغاز الطبيعي ومصانع الصلب ومصانع الأسمنت.

غشاء Polaris-Polarcap Membrane /Process Technology and Research

بالنسبة لفصل CO<sub>2</sub> الذي يستهدف التقاط وتخزين الكربون، هناك منشأة واحدة فقط تستخدم الأغشية على نطاق تجاري وتعمل حالياً في مشروع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في حقل النفط بتروبراس لولا، بسعة 0.7 مليون طن سنوياً. وبدأ تشغيل المنشأة في عام 2013، وتعمل منذ ذلك الحين. ويتم التقاط CO<sub>2</sub> من معالجة الغاز الطبيعي باستخدام أنظمة أغشية UOP Separex. ويُستخدم CO<sub>2</sub> المحتجز لتعزيز استخراج النفط. وأعلنت بتروبراس مؤخراً أنها سجلت رقماً قياسياً في التقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه وتخزينه جيولوجياً في عام 2022، ليصل إلى 10.6 مليون طن من CO<sub>2</sub> المعاد حقنه. ويُمثل هذا حوالي 25% من إجمالي CO<sub>2</sub> الذي ضخته الصناعة العالمية في العام الماضي في عمليات تعزيز



الشكل 23.6. تصميم عملية شركة Membrane Technology and Research Inc. (MTR) المكون من خطوتين غشائيتين لالتقاط CO<sub>2</sub> من غاز مداخن الغلايات التي تعمل بالفحم الحجري (المصدر: Merkel et al., 2018).

استخلاص النفط (Dziejarski et al., 2023; Hydrocarbon-Processing, 2012). وقد بُدلت جهود بحثية حول العديد من العمليات الأخرى للاحتراق المسبق والاحتراق بالأكسجين وما بعد الاحتراق، وهي ملخصة في الجدول 12.6.

#### 4.3.6. مستقبل التقاط CO<sub>2</sub> الغشائي

قدمت الأقسام السابقة من هذا الفصل معلومات أساسية بشأن الدور المحتمل لتكنولوجيا الأغشية في توفير حلول فعالة لخفض تكلفة التقاط ثاني أكسيد الكربون. وقد طُبقت هذه التكنولوجيا بنجاح لحل مجموعة واسعة من مشاكل الفصل الصناعي. وتُعتبر هذه النجاحات المحرك الرئيسي للصناعة للاستثمار في تطوير التقنيات المتعلقة بالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وتستمر برامج البحث المكثفة التي تدعمها مؤسسات التمويل مثل NETL وغيرها في رفع مستوى الجاهزية التكنولوجية للعديد من التقنيات الواعدة إلى المراحل التجريبية النمطية والصناعية. وتشمل التحديات الرئيسية التي يجب معالجتها (1) تطوير أغشية أكثر ثباتاً وأكثر تحملاً لشوائب غاز المداخن، مثل H<sub>2</sub>O و H<sub>2</sub>S و CO، بالإضافة إلى درجات الحرارة المرتفعة، و(2) تطوير أغشية أكثر انتقائية لفصل ثاني أكسيد الكربون، و(3) تطوير تقنيات فعالة من حيث التكلفة لإنتاج الأغشية على نطاق واسع، و(4) تطوير نماذج حسابية أكثر فعالية لتسريع فحص الأغشية الواعدة قبل العمل التجريبي. والاتجاهات الرئيسية التي يتم التركيز عليها لمزيد من التطوير والتي قد تؤدي إلى رفع مستوى الجاهزية التكنولوجية لتقنيات الأغشية هي (Bui et al., 2018):

أ. أغشية الكربونات المنصهرة المدعومة لضمان الحفاظ على انتقائيتها في بيئات الغاز المختلفة. بالإضافة إلى معالجة المشاكل الأخرى المرتبطة بوحدات الغشاء، مثل صعوبة ختم الأغشية في الوحدات.

ب. الأطر العضوية المعدنية من بين المواد الجديدة الواعدة نظراً لبنيتها المتنوعة التي يمكن تصميمها لتلبية احتياجات فصل الغاز المختلفة. ووفقاً لديمير وآخرون (Demir et al., 2022)، يتضمن أداء الأغشية المعتمدة على الأطر العضوية المعدنية لفصل CO<sub>2</sub> تخليق أغشية عالية الثبات والتي تقلل من تأثير الشوائب المتواجدة في غازات المداخن ودمج الأطر العضوية المعدنية مع المواد الغشائية لإنتاج أغشية مركبة.

ج. يعد استخدام تقنية تكثيف العملية لتحسين أداء الأغشية واعداداً جداً. ومن بين التحديات المحتملة التي يمكن معالجتها هي التغلب على قيود توازن التفاعل الكيميائي، والتي قد تؤدي إلى عدد أقل من وحدات المعالجة وتصميمات أبسط. وأحد هذه التطبيقات المحتملة هو دمج الغشاء في عملية

إزاحة الماء - الغاز (WGS)، لإزالة المنتجات بشكل مستمر وبالتالي التأثير على التوازن. لقد أثبتت الجهود البحثية باستخدام غشاء Pd-Ag و Pd بالفعل فعالية الغشاء في التغلب على توازن WGS. وتشمل الأمثلة الأخرى استخدام تركيبة مكونة من غشاء في وحدة إعادة التشكيل البخاري، والتي أثبتت نجاحها بالفعل شركة طوكيو غاز، والجمع بين أغشية الكربونات المنصهرة وعمليات الإزاحة ذات درجة حرارة مرتفعة، وعمليات الإزاحة ذات درجة حرارة منخفضة مع غشاء بوليمري في وجود مادة حفازة مناسبة، والجمع بين عمليتي الإزاحة في مفاعل غشائي واحد.

- د. يمكن أيضاً استخدام الأغشية في إعادة التشكيل البخاري من خلال وجود غشاء نفاذ للأكسجين يعمل عند درجة حرارة عالية حيث يتم تغذية الماء والميثان على جانبي الغشاء لإنتاج غاز التخليق على جانب الميثان والهيدروجين على جانب الماء.
- هـ. وأخيراً، يجب بذل الجهود لتخفيض التكلفة المرتبطة بسلسلة القيمة الكاملة، بما في ذلك تكاليف المواد الخام، وتكلفة تقنيات تصنيع الأغشية، وتكلفة وحدات الفصل.

الجدول 12.6. ملخص عمليات تكنولوجيا الأغشية المطبقة في التقاط CO<sub>2</sub> (Bui et al., 2018).

ملاءمة العملية للتكثيف	عملية الغشاء بشكل عام	طبيعة الغشاء	تفاعلات جهة الأكسدة أو المادة النافذة	تفاعلات جهة الاختزال أو الوقود	تفاعلات جهة التطبيق والشروط	عملية التقاط عمليات أغشية محتملة	عملية CO <sub>2</sub>
ما زالت محدودة حتى الآن، لم يتم إجراء أي عمل على اقتران هذه العمليات، على سبيل المثال، يتفاعل كيميائي آخر مثل الهدرجة.	فصل بسيط	غشاء نافذ للـ CO <sub>2</sub> أو CO <sub>2</sub> للهيدروجين. احتمال استخدام أغشية عضوية نظراً لانخفاض درجات الحرارة بعد الإزاحة.	$\text{CO}_2 (\text{M}) \rightarrow \text{CO}_2$ $2\text{H}(\text{M}) \rightarrow \text{H}_2$	<p>ضمن مزيج ما بعد الإزاحة:</p> $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 (\text{M})$ $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}(\text{M})$ $\text{CO}_2 (\text{M}) \rightarrow \text{CO}_2$	درجات حرارة منخفضة، قد تتطلب فارق في الضغط كقوة دافعة	ما بعد إزاحة CO <sub>2</sub> أو فصل الهيدروجين	ما قبل الاحتراق
نعم، يتم إجراء الفصل أثناء حدوث تفاعل الإزاحة، مما يزيل قيود التوازن لتحويل تفاعل الإزاحة.	فصل بسيط ولكن يمكن استخدامه للتغلب على قيود التوازن للتفاعل الثانوي.	لم يتم برهنة التكامل المباشر للغشاء المنفذ لـ CO <sub>2</sub> المدعوم على الكربونات المنصهر. جهد التوازن أغشية Pd للتغلب على قيود التوازن للتفاعل الثانوي.	$\text{CO}_2 (\text{M}) \rightarrow \text{CO}_2$ $2\text{H}(\text{M}) \rightarrow \text{H}_2$	<p>مع أو بدون غاز احتياحي:</p> $\text{CO}_2 (\text{M}) \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}(\text{M})$	إزالة المنتجات عند حدوث تفاعل الإزاحة، نطاق درجات الحرارة الممكن، قد يتطلب فارق ضغط على طرفي الغشاء.	دمج الغشاء في عملية الإزاحة مع أو بدون إعادة التشكيل في وحدة الغشاء قبل النقل	
نعم، يتم إنتاج تيارات منفصلة من غاز التخليق والهيدروجين	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	غشاء MIEC النفاذ للأكسجين	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(\text{M})$	<p>استهلاك الأكسجين من مياه اللقيم:</p> $\text{CH}_4 + \text{O}(\text{M}) \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	درجات حرارة مرتفعة، قد تكون هناك حاجة إلى الماء مع اللقيم للحد من ترسب الكربون	إعادة تشكيل غير مختلط	
نعم، يتم إنتاج تيارات منفصلة من CO <sub>2</sub> والهيدروجين.	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	غشاء MIEC النفاذ للأكسجين	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(\text{M})$	<p>تأكسد ناتج إعادة التشكيل:</p> $\text{CO} + \text{O}(\text{M}) \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{H}_2 + \text{O}(\text{M}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	تفاعل إزاحة مرتفع الحرارة مع عدم وجود قيود توازن	تفاعل إزاحة غير مختلط مع فصل الهيدروجين	

محدود	فصل بسيط	النفاذ	نفاذية الأكسجين بدجة حرارة عالية	فصل الهواء فقط	احتراق بالأكسجين
محدود لا يختلط النيتروجين مع الداقعة الكيميائية للاحتراق تدفع إلى التخلل	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	النفاذ غشاء MIEC للأكسجين غشاء MIEC للأكسجين	زيادة القوة الدافعة لنفاذ الأكسجين وارتفاع درجة الحرارة.	فصل الهواء المتكامل مع احتراق غشائي بالأكسجين	
قد تكون هناك احتمالات ولكن لم تستكشف بعد في أي منها	يمكن استغلال الفصل فقط ولكن النفاذية المشتركة لـ $CO_2$ والأكسجين تحقق فوائد ديناميكية حرارية.	غشاء كربونات منصهر مدعوم نفاذ لـ $CO_2$ غشاء كربونات منصهر يمكن استغلال نفاذية مشتركة لـ $CO_2$ والأكسجين	قد يحدث الفصل عند درجة حرارة عالية أو منخفضة، ويتطلب اختلاف الضغط عبر الغشاء.	$CO_2$ يتم التقاط بمفرده أو عبر التخلل المشترك لـ $CO_2$ والأكسجين	بعد الاحتراق يتم التقاط $CO_2$

ملاحظات: (M): تعني الغشاء؛ MIEC (mixed ionic-electronic conducting membrane based on ceramic)

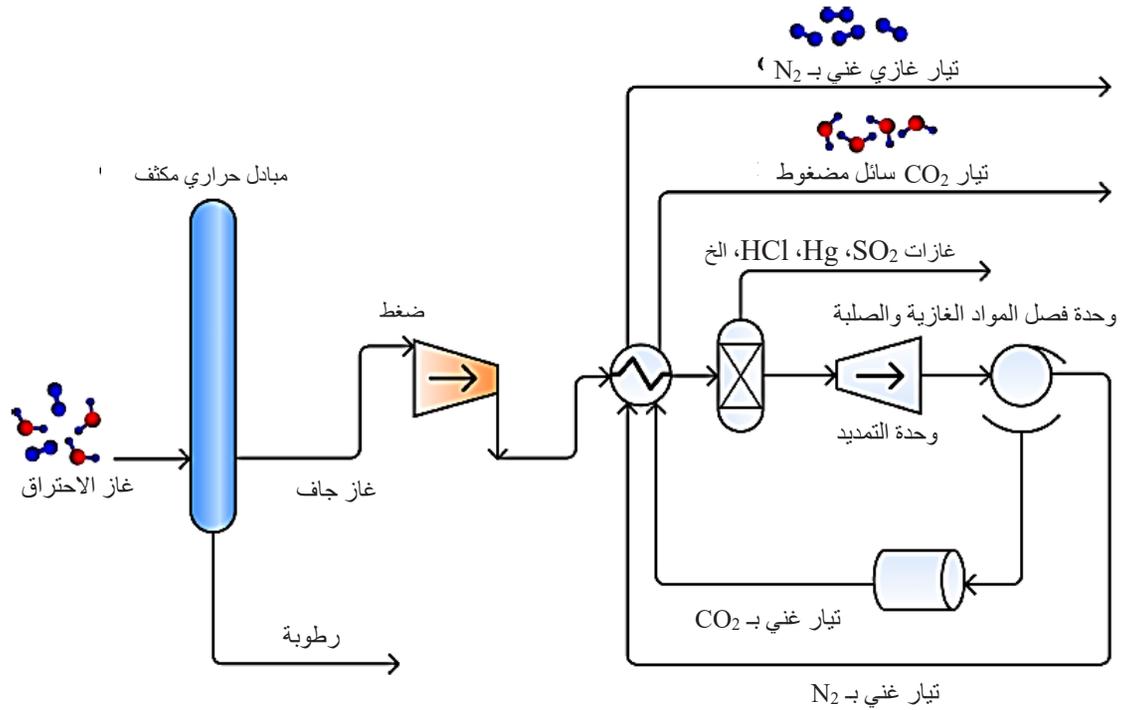
موصل قائم على مواد سيراميك

#### 4.6. التقاط CO<sub>2</sub> بالتبريد (Cryogenic)

يُستخدم تغيير الطور على نطاق واسع في الصناعة لفصل المكونات عن الخليط. وفي تيارات الغاز، من الممكن تحقيق ذلك عادةً عن طريق تبريد التيار حتى يتغير طور أحد المكونات أو أكثر إلى طور يمكن فصله فيزيائياً عن المكونات غير المتكثفة. ومن ثمة، فقد اعتُبرت تقنيات التبريد بمثابة تكنولوجيات محتملة لالتقاط CO<sub>2</sub> من تيارات غاز المداخن لعقود عديدة. وتُستخدم هذه التقنية الفارق في درجة الحرارة والضغط للنقطة الثلاثية للغازات المكونة لتيار غاز المداخن لفصل CO<sub>2</sub> فعلياً عن طريق إزالة CO<sub>2</sub> من المزيج، عن طريق تحويله إلى صقيع يمكن فصله بسهولة عن الأطوار الأخرى. من بين مزايا التبريد مقارنةً بطرق التقاط CO<sub>2</sub> الأخرى أنها فصل فيزيائي وليس كيميائي، وبالتالي لا يوجد أي تأثير على المنشأة الصناعية التي تصدر منها الانبعاثات، كما أن استهلاك الطاقة لكل طن من CO<sub>2</sub> المحتجز منخفض. وتنتج عمليات التبريد CO<sub>2</sub> عالي النقاء، إذا تمت إزالة الماء الموجود في غاز المداخن قبل الفصل، مقارنةً بـ CO<sub>2</sub> الناتج عن الامتصاص الكيميائي، والذي يكون ملوثاً عادةً بالأمينات. ويُستفاد من النقاء العالي لـ CO<sub>2</sub> على تنويع الاستخدامات المحتملة للمنتج، والعيب الأهم للتقنيات هو الصعوبات المرتبطة بتكون المواد الصلبة وطرق التعامل معها. ويُظهر الشكل 24.6 مخطط تدفق نموذجي مبسط لتكنولوجيا الفصل بالتبريد ((Cryogenic Carbon Capture (CCC)). ويتوجب الأخذ في الاعتبار عند تصميم وحدة الفصل بالتبريد خفض استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى. ويمكن تحقيق ذلك بشكل فعال من خلال دمج نقل الحرارة في مختلف مكونات الوحدة، وذلك من خلال تخفيض الفارق في درجات حرارة موائع المعالجة عند المخرج وموائع الخدمة عند المدخل إلى الحد الأدنى. ويشير استهداف اقتراب فارق درجة الحرارة من الصفر إلى أن درجة حرارة التيارين أصبحت متساوية، كما أنه يشير إلى حدوث انتقال لكافة الحرارة الممكنة وأنه تم تفادي فقدان أي طاقة. يقدم هذا القسم نظرة عامة على حالة تكنولوجيا التبريد لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وبالإضافة إلى ذلك، سيتم تلخيص التقدم الذي تم إحرازه في نشر التكنولوجيا على مستويات النطاق الصناعي بإيجاز.

#### 1.4.6. نظرة عامة على تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> بالتبريد

بحسب الباحثين (AlHumaidan et al., 2023)، تعتمد تقنية التقاط CO<sub>2</sub> بالتبريد (Cryogenic CO<sub>2</sub> Capturing (CCC) على الاختلاف في الخواص الفيزيائية لنقاط الغليان والتسامي لـ CO<sub>2</sub> في خليط غازي. وتوفر تكنولوجيا CCC ثاني أكسيد الكربون عالي النقاء في أطوار سائلة أو صلبة، وتتضمن التكنولوجيا عادةً الخطوات التالية: تجفيف الغازات والتبريد والضغط والتمدد. ويُعد الضغط



الشكل 24.6. رسم تخطيطي لفصل  $CO_2$  عن طريق عملية احتجاز الكربون المبرد (CCC) (المصدر: Dziejarski et al., 2023).

ودرجة الحرارة (P-T) وتركيبية الغاز العوامل الأساسية في توازن الأطوار للـ  $CO_2$  في مزيج كغاز أو سائل أو حالة صلبة. ويشير منحنى الطور P-T إلى نقاط حرجة مميزة عند كل محتوى  $CO_2$  في تركيبية خليط غازي تحت ظروف P-T مختلفة. واستناداً إلى البيانات المتاحة، توفر ملفات تعريف PT طريقتين للفصل بالتبريد: البخار-السائل والبخار-الصلب. وتتمتع تكنولوجيا CCC بميزات هامة، أهمها انعدام الحاجة لاستخدام مواد إضافية، كما أنه يتم تجنب الطلب الزائد على الطاقة مثل ما يحدث في تقنيات الفصل بالامتزاز عند إعادة تنشيط المواد المازة. وتُعد درجة الحرارة والضغط العوامل الأساسية في تكنولوجيا الفصل بالتبريد التي تؤثر على الفصل الفعال لـ  $CO_2$  من تيارات الغاز التي تحتوي على نسبة عالية من  $CO_2$  والنيروجين، ويتم فصل حوالي 90% و99% من  $CO_2$  عند درجات حرارة -120م° و-135م°، على التوالي. وفي المقابل، يفضل استخلاص  $CO_2$  من تيارات غاز المداخن (محتواه من الـ  $CO_2$  منخفض) على شكل صلب بدلاً من السائل عند أي ضغط أو درجة حرارة بسبب الخواص الديناميكية الحرارية.

وقد تم تطوير تقنيات التبريد للتغلب على عدد من المشاكل كالانسداد الناتج عن الماء المكثف، وفقدان الكفاءة الحرارية، وارتفاع استهلاك الطاقة. ويتم اختيار تقنية التبريد وفقاً لمحتوى تيار اللقيم من الـ

CO<sub>2</sub> ، اذ تتوفر آيارات منوعة مثل التبريد المنخفض، والتقطير، والأسرة المعبأة، والتجميد، والتسامي العكسي (Song et al., 2019). ويُعد نظام الأسرة المعبأة هو الخيار الأفضل لفصل CO<sub>2</sub> والماء في وقت واحد، ففي هذا النظام يُفصل الماء و CO<sub>2</sub> بناءً على خصائصهما الفيزيائية المختلفة المرتبطة بنقاط الندى والتسامي وطبيعة المواد المستخدمة في الأسرة المعبأة لتجنب الانسداد بالمياه وانخفاض الضغط (Babar et al., 2021; Tuinier et al., 2011b). وتتعامل أنظمة التقطير المبردة مع فصل الـ CO<sub>2</sub> والغازات الملوثة الأخرى عند درجات حرارة منخفضة وضغط مرتفع ويمكن تطبيقها إذا كان تيار الغاز غني بالـ CO<sub>2</sub> أكثر من 90% حجماً. وتتضمن هذه العملية الخطوات التالية: إزالة التسامي عن طريق تبريد غاز اللقيم (-100 إلى -135°م)، وإزالة الغاز الأخف بواسطة الـ CO<sub>2</sub> المتصلب، وضغطه عند ضغط مرتفع (100-200 ضغط جوي)، يلي ذلك التقطير للحصول على CO<sub>2</sub> سائل (Leung et al., 2014). وبالمقارنة مع عملية فصل CO<sub>2</sub> التقليدية، فإن عملية التبريد لإزالة التسامي تدعم بشكل فعال زيادة إنتاج الهيدروجين من تيار ثاني أكسيد الكربون-هيدروجين بمتطلبات منخفضة من الطاقة. وفي نفس الوقت، يتم تطبيق غاز اللقيم البارد في عملية التسامي والتسخين بـ CO<sub>2</sub> في برجين لإزالة التسامي لإطلاق CO<sub>2</sub> وهيدروجين عالي النقاء للتخزين والنقل. وبالتالي، فإن إزالة التسامي تكشف عن أقل استهلاك للطاقة مقارنة بتقنيات الفصل التقليدية على النحو التالي: الفصل بامتصاص MEA (8.19-11.21 ميجاجول/كجم CO<sub>2</sub>) < الفصل بالأغشية (1.81-8.93 ميجاجول/كجم CO<sub>2</sub>) < الفصل بالامتزاز والضغط المتأرجح (1.53-5.69 ميجاجول/كجم ثاني أكسيد الكربون) < الفصل بإزالة التسامي (0.81-3.35 ميجاجول/كجم ثاني أكسيد الكربون) (Yurata et al., 2019).

بالإضافة إلى ذلك، أُدخلت تكنولوجيا التبريد في الجيل التالي من التقنيات الهجينة التي تُحقق فصلاً عالياً للـ CO<sub>2</sub> بتكلفة منخفضة من خلال الجمع بين تقنيات التبريد وتقنيات النقاط الـ CO<sub>2</sub> التقليدية. ومن ثمة، فإن سلسلة جديدة من التقنيات الهجينة يجري تطويرها، وهي تقنيات الامتصاص المبرد، والامتزاز المبرد، والأغشية المبردة، وتقنيات الهيدرات المبردة. وتُعد هذه الأنظمة الهجينة بدائل واعدة ويمكنها فصل CO<sub>2</sub> مع استهلاك منخفض للطاقة من 1,163 إلى 1,249 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub> (Song et al., 2019). ومن الجدير بالذكر أنه عندما تم فصل CO<sub>2</sub> عن غاز مداخل محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بالفحم الحجري باستخدام منظومة الأغشية التقليدية بلغت التكلفة واستهلاك الطاقة 36.14 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> و 1.87 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub>، على التوالي. وأسهم استخدام منظومة الغشاء المبرد الهجين في تقليص هذه القيم إلى 28.81 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> و 1.55 جيجاجول/طن CO<sub>2</sub> (Li et al., 2022). وعلاوةً على ذلك، تكشف عملية الغشاء المبرد عن

استهلاك أقل للطاقة (2-4 ميجاجول/كجم من ثاني أكسيد الكربون) مقارنةً بتقنية التبريد المستقل (2.5-12 ميجاجول/كجم من CO<sub>2</sub>)، والغشاء أحادي المرحلة (2-6 ميجاجول/كجم من CO<sub>2</sub>)، وعمليات الامتصاص بالـ MEA (4 ميجاجول/كجم من CO<sub>2</sub>) (Belaisaoui et al., 2012).

#### 2.4.6. تقنيات التبريد لالتقاط الكربون

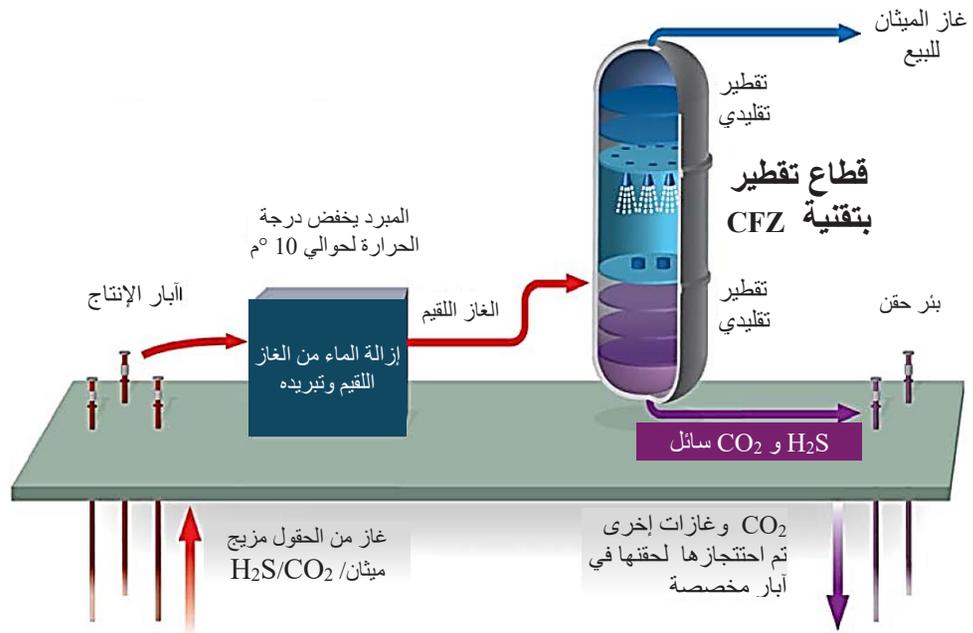
هناك العديد من تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> المبردة التي طُورت أو يُسعى إلى تطويرها حالياً بواسطة العديد من الجهات المرتبطة بصناعات النفط والغاز وتوليد الطاقة الكهربائية. ويعود الاهتمام الأولي بتطوير هذه التقنيات في الغالب إلى الحاجة إلى تنقية الغاز الطبيعي من CO<sub>2</sub> والشوائب الأخرى. وتحول الاهتمام بعد ذلك نحو التقاط CO<sub>2</sub> لتخفيض انبعاثات الوقود الأحفوري منذ أواخر القرن الماضي. وتأتي تقنيات التقاط الكربون بالتبريد في أشكال عديدة مثل تقنية التقطير المبرد الذي تتحكم فيه منطقة التجميد (CD-CFZ)، وتقنية التقاط الكربون المبرد/غاز المداخن المضغوط (CCC-CFG)، وتقنية التقاط الكربون المبرد/حلقة التبريد الخارجية (CCC-ECL)، وتقنية CryoCell®، وتقنية التبريد بواسطة المبردة Stirling، وتقنية الأسرة المعبأة المبردة، وتقنية إزالة التسامي. وفيما يلي ملخص للميزات الرئيسية لكل من هذه التقنيات المختلفة.

أ. **التقطير المبرد (Cryogenic Distillation).** التقطير المبرد تقنية راسخة تُحقق الفصل بناءً على نقاط الغليان المختلفة لـ CO<sub>2</sub> ومكونات الغاز الأخرى في الخليط. واستُخدمت التقنية لتنقية الغاز الطبيعي، حيث يتم إزالة CO<sub>2</sub> في الطور السائل. وهي تقنية كثيفة الاستهلاك للطاقة بسبب الضغط العالي المستخدم والحاجة إلى تجنب تكوّن مواد صلبة لحماية المعدات ومنع الانسداد. ولتجنب تصلب ثاني أكسيد الكربون يتم استخدام الهيدروكربونات الأثقل مما يزيد من قابلية ذوبان CO<sub>2</sub> في الطور السائل. وهي حالياً التقنية المستخدمة لتنقية وضغط CO<sub>2</sub> المحتجز في عمليات الاحتراق بالأكسجين، مع تركيز CO<sub>2</sub> أعلى من 50%. ويتم تحقيق درجة النقاوة والاسترداد المطلوبين عن طريق ضبط درجات حرارة التشغيل والضغط وإدراج مراحل فصل ومضية إضافية لإزالة المكونات ذات نقاط غليان منخفضة وبالتحديد الـ O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/Ar. وبالنسبة لإنتاج CO<sub>2</sub> عالي النقاوة لتلبية متطلبات تطبيقات الاستخلاص المعزز للنفط (EOR) تتم إضافة برج تجريد لتخفيض محتوى الأكسجين إلى 100 جزء في المليون. والعيب الآخر للتقنية هو الحاجة إلى إزالة الماء من اللقيم وصولاً إلى المستويات الدنيا لتجنب الانسداد بالجليد ولتجنب تكوّن CO<sub>2</sub> الصلب على سطح المبادل الحراري، و/أو زيادة انخفاض الضغط.

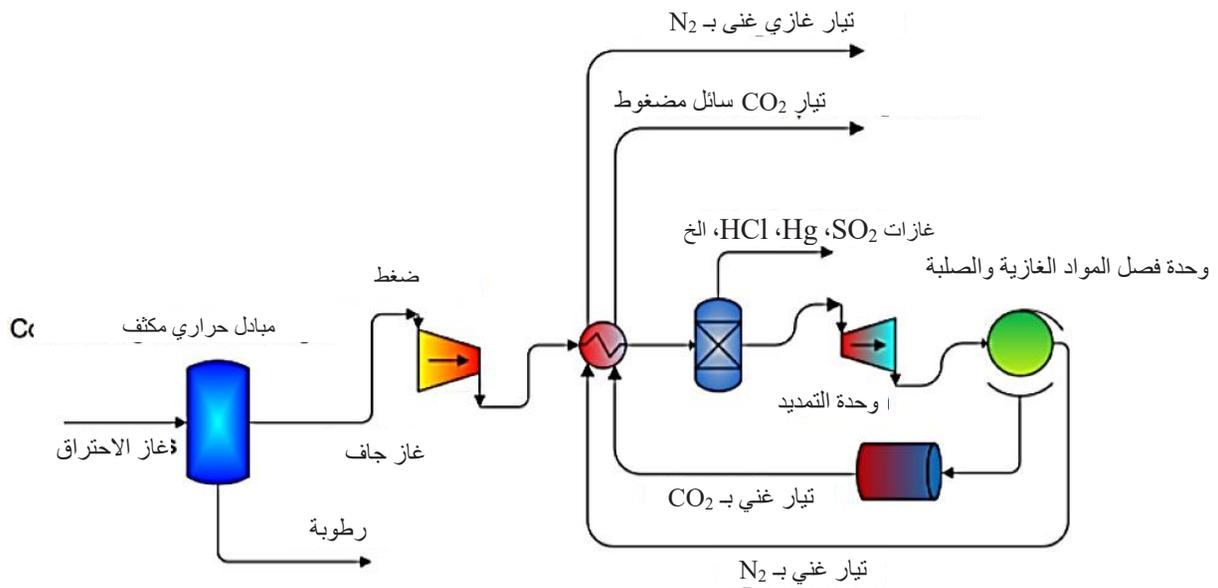
ب. التقطير المبرد من خلال التحكم بمنطقة التجميد (Cryogenic distillation controlled freezing zone (CD-CFZ)). يطبق التقطير في هذه التقنية تحت درجات حرارة منخفضة تتراوح ما بين -80 و -90°م، وتم طرح فكرة العملية في البداية لتجريد CO<sub>2</sub> من تيارات الغاز الطبيعي، ولكن مؤخراً تم اقتراحها لالتقاط CO<sub>2</sub> من غاز المداخن. وفي هذه العملية يُبرد تيار الغاز مسبقاً قبل دخوله إلى برج التقطير وتستخدم منطقة التجميد الخاضعة للرقابة في إعداد التقطير المبرد والتقنية قادرة على إزالة كل من كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. ويسمح القسم المركزي لبرج العملية بتجميد CO<sub>2</sub> وانصهاره، وتستخدم الصينية السفلية لمنطقة التجميد كصينية انصهار، والتي يتم الاحتفاظ بها على درجة حرارة أعلى قليلاً من درجة حرارة تجمد ثاني أكسيد الكربون. ويتم رش سائل التقطير المتواجد فوق منطقة التجميد على منطقة التجميد على شكل قطرات سائلة، وتتبخر المكونات الأخف التي تواجه درجات الحرارة الأكثر دفئاً ويتجمد CO<sub>2</sub> الذي يتزايد تركيزه في القطرات. ويمرر الغاز من قسم التقطير عبر منطقة التجميد ويسبب تسامي CO<sub>2</sub> الصلب. ويمكن لهذه العملية التعامل مع اللقيم المحتوي على CO<sub>2</sub> بنسب تتراوح بين 5-35% وكبريتيد الهيدروجين بين 5-35% (Michael Parker et al., 2011). ويُظهر الشكل 25.6 رسم تخطيطي مبسط للعملية. وقامت شركة إكسون بتطوير هذه العملية في منتصف الثمانينيات باستخدام وحدة نمطية أنشأت وشُغلت بين عامي 1985 و 1987. ونظراً للاهتمام المتزايد باللتقاط CO<sub>2</sub> خلال العقدين الماضيين، فقد تم إنشاء وتشغيل مصنع تجريبي شبه صناعي في عام 2008 وتقدم شركة إكسون موبيل حالياً تقنية CFZ كتقنية تجارية لالتقاط CO<sub>2</sub>.

ج. التقاط الكربون المبرد عن طريق غاز المداخن المضغوط ((Cryogenic carbon capture via compressed flue gas (CCC-CFG)). تعتمد هذه التقنية على تمدد الغاز المجفف إذ يُجفف غاز المداخن ويُضغط، ويُبرد باستخدام مبادل حراري، ثم يُعرض للتمدد ليتحول إلى CO<sub>2</sub> صلب. ويُسخن الـ CO<sub>2</sub> الصلب بواسطة التبادل الحراري لتكوين منتج CO<sub>2</sub> سائل (Cann, 2021). ويُوضح الشكل 26.6 عملية CCC-CFG.

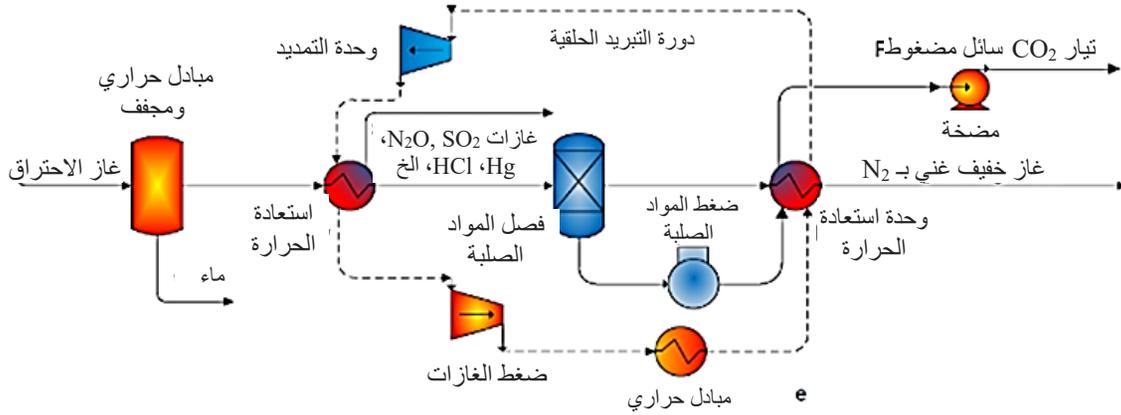
د. التقاط الكربون المبرد عبر حلقة تبريد خارجية (Cryogenic carbon capture via external cooling loop (CCC-ECL)). يُستخدم في هذه العملية التبادل الحراري لإزالة صقيع ثاني أكسيد الكربون كما هو موضح في الشكل 27.6. وتستخدم العملية مجففاً لإزالة محتوى الماء من غاز المداخن بأسلوب يماثل عملية التجفيف في عملية CCC-CFG. وتُستخدم حلقة تبريد من السائل المبرد لتبريد غاز المداخن وإزالة CO<sub>2</sub> من غاز المداخن. وبعد فصل CO<sub>2</sub> الصلب عن تيار الغاز والسائل الملامس يتم ضغط CO<sub>2</sub> الصلب إلى 70-80 ضغط جوي (Bar)،



الشكل 25.6. مخطط عملية التقطير في منطقة التجميد الخاضعة للتحكم (المصدر: Michael E. Parker et al., 2011).



الشكل 26.6. مخطط تدفق عملية CCC-CFG (المصدر: Baxter et al., 2019).

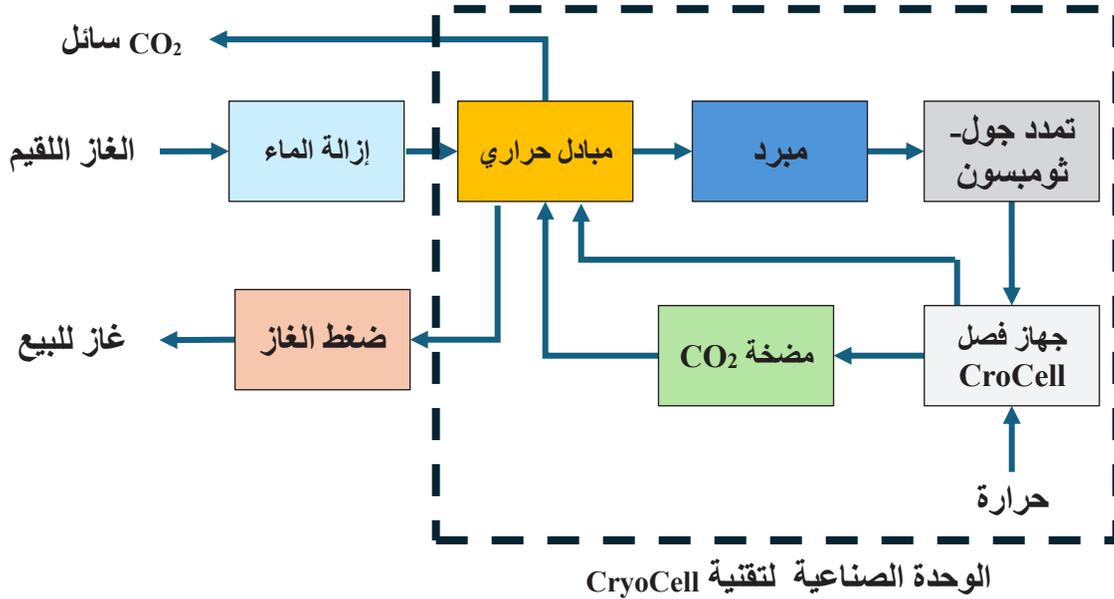


الشكل 27.6. مخطط تدفق عملية CCC-ECL (المصدر: Baxter et al., 2019).

ثم يمر تيار  $CO_2$  الصلب وتيار الغاز الهزيل المحتوي على نسبة  $CO_2$  منخفضة عبر مبادل حراري، مما يوفر استعادة الطاقة إلى المبرد الخارجي ( External Cryogenic Loop (ECL)) ويحول تيار  $CO_2$  الصلب إلى تيار سائل عالي الضغط. وتتغلب عملية CCC-ECL على بعض قيود المبادلات الحرارية، كما تم تحسين التعامل مع المواد الصلبة من خلال تكوين ملاط من  $CO_2$  السائل والصلب. ويتوجب أن يكون ضغط البخار لسائل التلامس منخفض لتجنب فقدان السائل عن طريق التبخر وتجنب التأثير السلبي على البيئة ( Baxter et al., 2019; Cann, 2021; Font-Palma et al., 2021).

ومن بين العمليات التي تقع أيضاً ضمن هذه الفئة، والتي انتقلت إلى مرحلة العرض التوضيحي (demonstration scale)، تقنية CryoCell<sup>®</sup>، التي طورتها شركة Cool Energy Ltd الأسترالية. وتهدف هذه العملية بشكل أساسي إلى معالجة الغاز الطبيعي لفصل ثاني أكسيد الكربون، ولكن لديها القدرة على معالجة مواد أولية أخرى. ويظهر في الشكل 28.6 مخطط تدفق العملية النموذجي للغاز الطبيعي ذو المحتوى المنخفض من  $CO_2$ . ويتميز مخطط تدفق العملية بالمرونة ويمكن تعديله ليناسب تركيبة الغاز الطبيعي المراد معالجته، ووفق المعلومات التي يقدمها المرخصون يبدو أن العملية قادرة على معالجة الغاز الطبيعي الغني الذي يحتوي على نسبة عالية من ثاني أكسيد الكربون. وقد صُممت وأنشأت وحدة شبه صناعية من قبل المطورين في حوض بيرث، غرب أستراليا بناءً على مخطط التدفق الموضح في الشكل 28.6. وسعة الوحدة 2 مليون قدم مكعب قياسي/اليوم. وأنشأت الوحدة في حقل غاز زيريس (Xyris) التابع لشركة ARC Energy بالقرب من دونغارا، بيرث، أستراليا، وأخذ اللقيم من رأس البئر وعولج في الوحدة ثم أعيد ليتم مزجه مع الغاز المعالج لشركة ARC Energy قبل التصدير. ويتكون الغاز الهزيل من  $CO_2$  3.5%، و  $C1$  92%، و  $C2$  2% كمكونات رئيسية. ويسمح تصميم الوحدة بزيادة

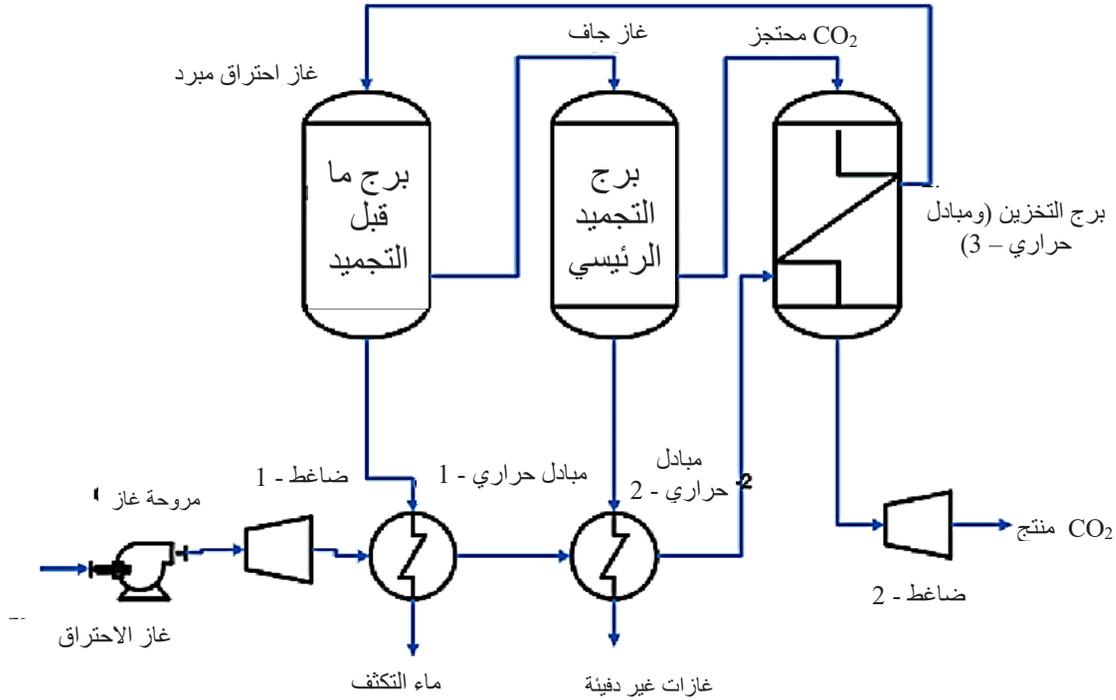
تركيز  $CO_2$  في غاز اللقيم بشكل مصطنع إلى ظروف الاختبار المطلوبة عن طريق حقن  $CO_2$  سائل. وسمح التركيز المنخفض لـ  $CO_2$  في غاز زيريس بإجراء التجارب بتركيزات أعلى مختلفة من  $CO_2$ . وتمكنت العملية من تحقيق فصل  $CO_2$  بمعدلات وصلت إلى نحو 55-75% وفق التركيز الأولي لـ  $CO_2$  في الغاز الطبيعي (Hart & Gnanendran, 2009).



الشكل 28.6. مخطط تدفق تقنية CryoCell (المصدر: Hart & Gnanendran, 2009).

٥. تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  المبردة بواسطة مبردات ستيرلينغ. اقترح بعض الباحثين (Song et al., 2012) استخدام مبردات Stirling في نظام التقاط  $CO_2$  المبرد في قسم ما قبل التجميد، وقسم التجميد الرئيسي وقسم التخزين. ويظهر الشكل 29.6 مخطط تدفق العملية. ولفصل الماء في غاز اللقيم يتم تبريد قسم التجميد المسبق عبر مبرد Stirling الأول، ويتم التخلص من الحرارة الزائدة لبرج التجميد الرئيسي عبر مبرد Stirling الثاني عند درجة حرارة إزالة التسامي. ويُجمع الـ  $CO_2$  الصلب في برج التخزين الذي يتم تبريده عبر مبرد Stirling الثالث، ويُبث الغاز المتبقي في محيط المنشأة. ويقدر استهلاك الطاقة الذي تم تحقيقه مع استرداد  $CO_2$  بنسبة 95% بـ 2.62 ميغا جول/كجم من  $CO_2$  ويمكن تخفيضه إلى 1.37 ميغا جول/كجم من  $CO_2$  عبر التكامل الحراري ضمن المنشأة، بما في ذلك الأنشطة المرتبطة بالالتقاط والضغط، ومن عيوب التقنية نمو طبقة من صقيع الـ  $CO_2$  التي تؤثر على انتقال الحرارة. ولم يتم تطبيق هذه العملية

على نطاق واسع أو نمطي حتى الآن بسبب الحاجة إلى المزيد من العمل المخبري وذلك باستخدام لقيم مماثل لغاز المداخن الفعلي المنبعث من الصناعة.



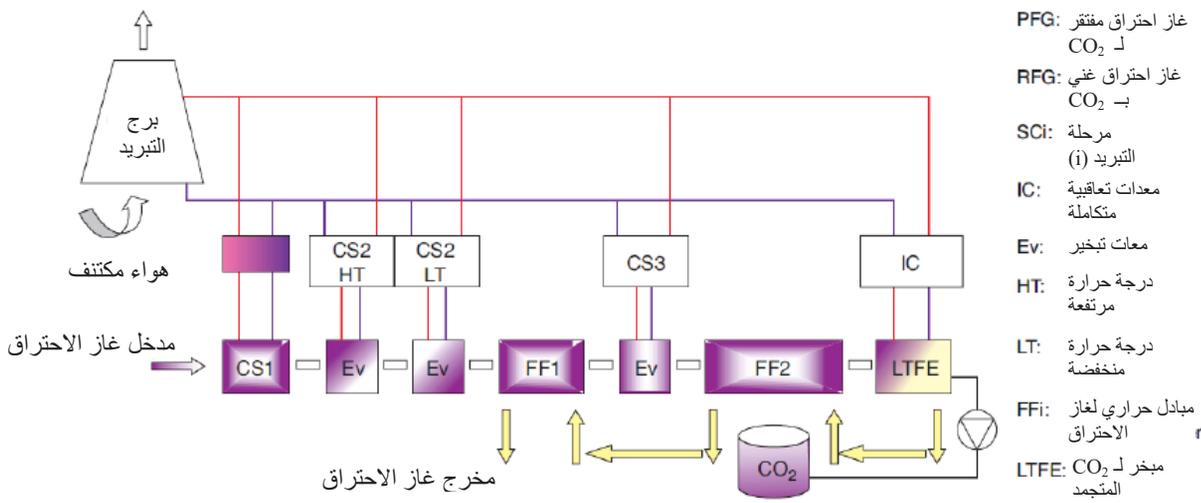
الشكل 29.6. مخطط التدفق لعملية التقاط CO<sub>2</sub> المبرد باستخدام Stirling Cooler مع استرداد الحرارة (المصدر: Keshavarz et al., 2019).

و. تكنولوجيا مكافحة التسامي. تستخدم هذه العملية سلسلة من معدات التمدد والتبخير لنتائج الـ CO<sub>2</sub> على معدات تبخير الصقيع ذات درجة الحرارة المنخفضة وتتناوب دورات الالتقاط وإزالة الجليد في كل واحدة وصولاً إلى عملية شبه مستمرة. ويوضح الشكل 30.6 تفاصيل هذه التقنية. وتتكون وحدة الفصل من خمسة أقسام:

- قسم تنظيف غاز المداخن باستخدام إزالة التكثيف والتبريد إلى -40°م،
- قسم التبادل الحراري بين المحتوى المنخفض والعالي لغاز المداخن،
- قسم مرحلة التبريد،
- قسم التجميد بالـ CO<sub>2</sub> باستخدام التبادل الحراري،
- قسم استرداد ثاني أكسيد الكربون.

ويتم تبريد غاز المداخن أولاً باستخدام مبادلات حرارية وصولاً إلى 0°م تقريباً لتجفيف غاز المداخن، ثم يتم تبريده مرة أخرى إلى -40°م بواسطة المبادل الحراري الأول ثم مرحلة التبريد

الثالثة، لإزالة أي مياه متبقية. ويبرد بعد ذلك غاز المداخن مسبقاً إلى -100°م باستخدام المبادل الحراري الثاني قبل الدخول إلى مبخر الصقيع ذي درجة الحرارة المنخفضة. وتستخدم بعد ذلك مجمدات ذات درجات حرارة منخفضة متعاقبة ( low-temperature-chest freezers ) (LTFE) لانقاط CO<sub>2</sub> بشكل مستمر عن طريق تدوير LTFE بين الانقاط وإعادة التنشيط. وتعتمد متطلبات الطاقة على كفاءة دورة التبريد وتركيز CO<sub>2</sub> في غاز المداخن. وقد أعلنت الشركة المطورة أن العملية قادرة على تحقيق معدل التقاط يصل إلى 90% تقريباً ( Cann, 2021; (Keshavarz et al., 2019).

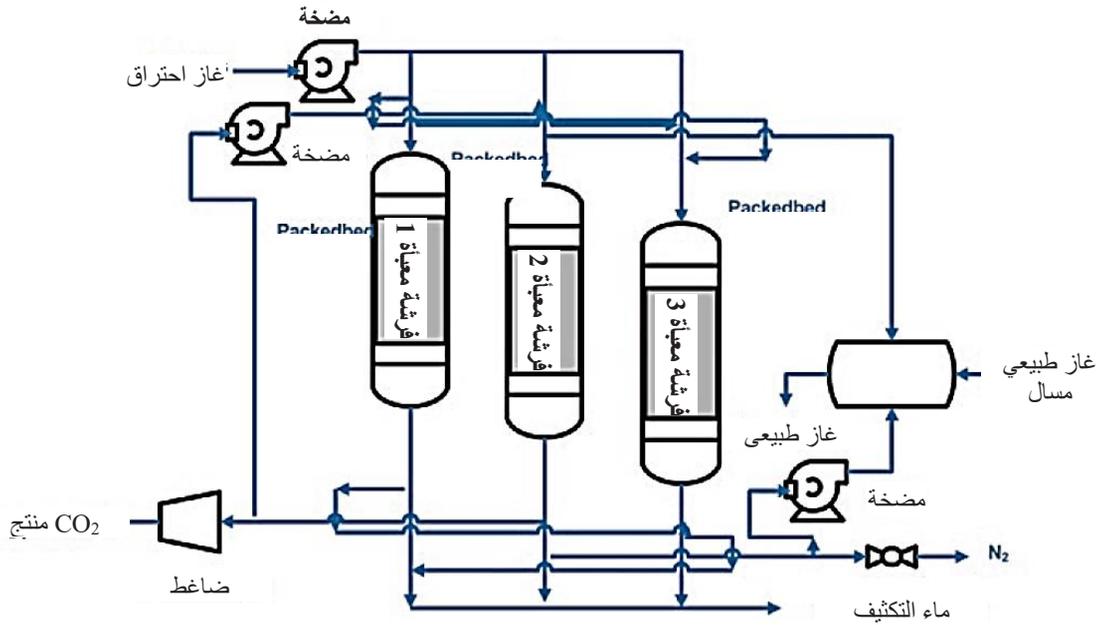


الشكل 30.6. مخطط التدفق لنظام احتجاز CO<sub>2</sub> المضاد للتسامي (المصدر: Cann, 2021).

وإحدى فوائد هذه التقنية هي أن إزالة CO<sub>2</sub> المتجمد الموجود على سطح المبادل الحراري يتم عن طريق تحويله من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة، وبالتالي يسمح باستعادة حرارة الاندماج إلا أنه يتوجب أن تتمتع مواد المعدات بضغط ميكانيكي جيد وموصلية حرارية جيدة. ومن بين المزايا، أن تصميم المنشأة تم على شكل وحدة مدمجة ولا تتسبب بأي تلوث. ويتم حالياً القيام بمزيد من التطوير لتحسين العملية.

ز. تكنولوجيا أسرة العبوات المبردة. تم تقديم هذه التقنية من قبل بعض الباحثين عام 2010 (Tuinier et al., 2010). والقاعدة العلمية التي طورت العملية على أساسها هي الاختلافات في نقاط الندى وتركيب المكونات في الغاز الطبيعي. ويحتوي السرير المعبأ المبرد واجهة متحركة لفصل CO<sub>2</sub> والماء معاً. وتشتمل دورة عملية التقاط CO<sub>2</sub> وفق هذه التقنية على ثلاث خطوات رئيسية: تبريد الطبقة، والتقاط CO<sub>2</sub>، وخطوات الاسترداد كما هو واضح من مخطط

تدفق العملية في الشكل 31.6، حيث يمر غاز اللقيم أولاً عبر الطبقة المعبأة التي تتكون من كتلة فولاذية أو أنابيب البوروسيليكات أو مواد تعبئة أخرى لالتقاط الماء وثاني أكسيد الكربون. وعلى سطح الطبقة المعبأة يقوم  $CO_2$  والماء بإزالة التسامي ويتكثفان عن طريق تبريد غاز المداخن. وفي الخطوة الأخيرة يتم استرداد  $CO_2$ . وتنفذ جميع الخطوات في الأسرة بالتوازي، وتتم عملية الفصل عند الضغط الجوي.



الشكل 31.6. مخطط تدفق عملية التقاط  $CO_2$  المبرد بواسطة فرشاة معبأة (المصدر: Rashid et al., 2020)

وتتنافس هذه العملية مع تكنولوجيا الامتصاص الكيميائي من حيث متطلبات الطاقة وتكاليف  $CO_2$  المحتجز. ويؤدي تراكم  $CO_2$  المتجمد على سطح ناقل الحرارة بمرور الوقت إلى تخفيض كفاءة خطوة الالتقاط حتى ينتشع سطح ناقل الحرارة بالـ  $CO_2$  المتجمد ويتطلب خطوة إعادة تنشيط (Cann, 2021; Keshavarz et al., 2019). وهناك جهود بحثية يتم القيام بها لتحسين أداء التكنولوجيا من قبل مجموعات بحثية مختلفة (Ali et al., 2016; 2018; 2014).

### 3.4.6. عمليات التبريد التجارية لالتقاط $CO_2$ والتحديات والاحتياجات البحثية

على الرغم من الجهود المكثفة التي بُذلت لتطوير تقنيات التبريد لتلبية متطلبات التقاط ثاني أكسيد الكربون، لم يتم حتى الآن إنشاء أي مصنع تجاري يعتمد على هذه التقنيات. ومع ذلك، فقد تم تطوير

عدد محدود من التقنيات لمستويات مخبرية متقدمة أو شبه تجارية، ويُقدم بعض مانحي التراخيص عمليات قائمة على التقنيات التالية:

– منطقة التجميد الخاضعة للرقابة التي ترخصها شركة إكسون موبيل، والتي تم وصفها في القسم 2.4.6 (ب).

– تقنية Cool Energy CryoCell التي تمت الإشارة إليها سابقاً في القسم 6.4.2 (د).

– تقنية شركة حلول الطاقة المستدامة (SES) ذ.م.م. عمليات ما بعد الاحتراق CCC-ECL و CCC-CFG التي يجري تطويرها (Frankman et al., 2021; Sayre et al., 2017).

ويمكنها أن تتكامل بسهولة مع المنشآت الصناعية التي ينبعث منها CO<sub>2</sub>، ولديها القدرة على التقاط شوائب غاز المداخن الأخرى مثل أكاسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين والزنابق. ونشأت هذه التقنية في جامعة بريجهام يونج (ولاية يوتا، الولايات المتحدة)، التي قامت بتشغيل عدة وحدات تجريبية صغيرة (0.25 طن يومياً و 1 طن يومياً) منذ عام 2014 وحقت التقاط بنسبة 95-99٪ في محطة لتوليد الطاقة الكهربائية، ومصنع للأسمت، ومحطة تسخين. وتُقدر تكلفة التقاط CO<sub>2</sub> بحوالي 30 دولاراً أمريكياً للطن المحتجز (NPC, 2021a). وتُخطط SES لإنشاء مصنع تجاري/تجربي نمطي بسعة 100 طن/يوم

– تُخطط شركة Orbital ATK Inc لبناء وحدة تجريبية نمطية تعتمد على نظام استخلاص CO<sub>2</sub> بالقصور الذاتي الأسرع من الصوت.

– تُقدم شركة Air Liquide عملية Cryocap™ FG لالتقاط CO<sub>2</sub> من غاز مداخن محتواه من CO<sub>2</sub> أعلى من 15%. ويبدو أن العملية تعتمد على تقنية تأرجح الضغط (PSA)/التبريد الهجينة. وتتراوح سعة الوحدة من 300 إلى 5000 طن يومياً، والتكلفة التقديرية لـ CO<sub>2</sub> المحتجز هي 40 إلى 80 يورو/طن CO<sub>2</sub> (Air-Liquids, 2021).

ومن الواضح أن جهود تطوير نهج التبريد لالتقاط CO<sub>2</sub> قد أدت إلى ظهور العديد من التقنيات المحتملة. ويقدم الجدول 13.6 مقارنة بين مزايا وعيوب التقنيات الرئيسية.

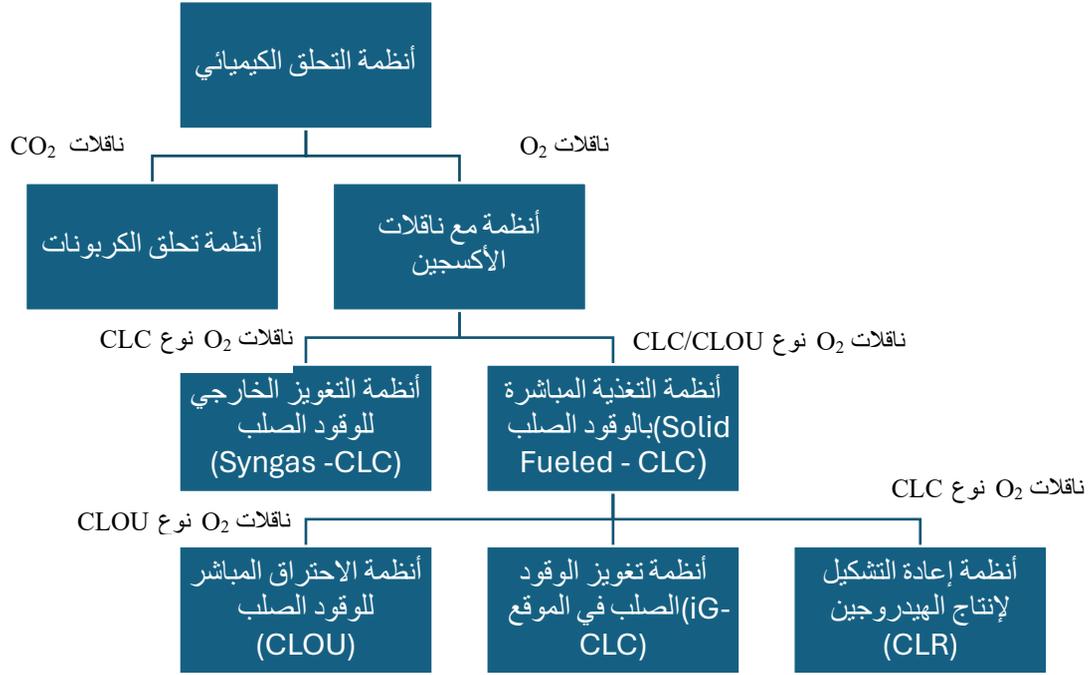
## 5.6. التحلق الكيميائي لالتقاط CO<sub>2</sub>

يعود تاريخ التحلق الكيميائي إلى أوائل القرن العشرين، ويتضمن بشكل أساسي استخدام أكسيد معدني صلب لنقل الأكسجين إلى تيار العملية بدلاً من استخدام الهواء، أو كربونات المعدن لنقل CO<sub>2</sub>. ويُقدم الشكل 32.6 ملخصاً للأنظمة المختلفة التي تم فحصها. وتجدر الإشارة إلى أن الأنظمة التي تحتوي على ناقلات الأكسجين متنوعة في حين أن ناقلات CO<sub>2</sub> محدودة إلى حد ما.

الجدول 13.6. ملخص لمزايا وتحديات تقنيات التبريد

الفئة	المزايا	التحديات	مصدر الطاقة	استهلاك الطاقة
التقطير	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تجنب تكلفة الضغط</li> <li>- وصول CO<sub>2</sub> إلى وحدات التخزين بسهولة</li> <li>- إمكانية لتوفير المياه</li> <li>- لا يوجد تآكل</li> <li>- لا توجد امكانية لتكون رغوة</li> <li>- إمكانية توفير الطاقة</li> <li>- إزالة الملوثات الأخرى</li> <li>- استخلاص CO<sub>2</sub> بنسبة 95.6 مول% على شكل سائل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تكلفة التقطير عالية</li> <li>- التكلفة الرأسمالية لفرق الضغط</li> </ul>	الضاغط والمبرد	1.401 كيلو وات ساعة/كجم CO <sub>2</sub>
فرشات معبأة	<ul style="list-style-type: none"> <li>- نسبة مساحة السطح إلى حجم البرج</li> <li>- إزالة H<sub>2</sub>O و CO<sub>2</sub> في وقت واحد</li> <li>- تقادي هبوط الضغط المرتفع</li> <li>- استخلاص CO<sub>2</sub> بنسبة 99 مول% على شكل سائل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مازالت بالمستوى المخبري</li> <li>- تتأثر بشكل مباشر بتوفر الغاز الطبيعي المسال (LNG)</li> </ul>	غاز N <sub>2</sub> سائل	1.8 ميجاجول كهرباء/كجم CO <sub>2</sub>
إزالة التسامي	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مستوى تجريبي نمطي</li> <li>- استهلاك طاقة أقل من امتصاص MEA</li> <li>- استخلاص CO<sub>2</sub> بنسبة 90 مول% على شكل سائل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- الضغوط الميكانيكية</li> <li>- تجميد CO<sub>2</sub> يؤثر سلباً على التوصيل الحراري</li> <li>- لا يمكن تحمل H<sub>2</sub>O</li> <li>- تتأثر مباشرة بموقع الغاز الطبيعي</li> </ul>	الغاز الطبيعي المسال	1.18 جيجاجول كهرباء/طن CO <sub>2</sub>
مبرد ستيرلينغ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- إزالة الماء و CO<sub>2</sub> في وقت واحد</li> <li>- إمكانية تخزين الطاقة</li> <li>- طاقة أقل مقارنة بامتصاص MEA</li> <li>- استخلاص CO<sub>2</sub> بنسبة 85 مول% على شكل مواد صلبة</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- فقدان الطاقة بسبب اختلاف درجات الحرارة</li> <li>- مازالت بالمستوى المخبري</li> <li>- صعوبة تكسير طبقة التجميد</li> </ul>	مبرد ستيرلينج	3.4 ميجاجول حراري/كجم CO <sub>2</sub>
Cryocell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- لا يتطلب نظام تسخين للعملية</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- قوة ضغط عالية</li> <li>- أكثر ملاءمة للمبردات ذات التركيز العالي لـ CO<sub>2</sub> (أكثر من 20%)</li> </ul>	مبرد	

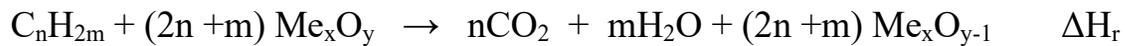
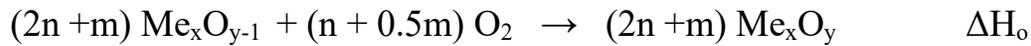
وسنقدم في الأقسام التالية ملخصات للأنظمة المختلفة التي هي قيد التطوير للتحلق الكيميائي مع حاملات الأكسجين مثل التحلق الكيميائي لفصل الهواء مع فك اقتران الأكسجين (CLOU)، واحتراق التحلق الكيميائي (CLC)، وإنتاج الهيدروجين بالتحلق الكيميائي أو إعادة تشكيل الوقود. وسيتبع ذلك ملخص لأنظمة تحلق الكربونات.



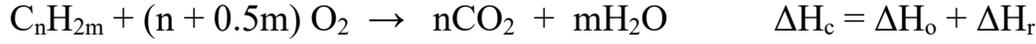
الشكل 32.6. تصنيف أنظمة التحلق الكيميائي (CLC = احتراق التحلق الكيميائي؛ CLOU = تحلق كيميائي مع فك اقتران الأكسجين؛ iG = التغويز في الموقع؛ CLR = إعادة التشكيل باستخدام التحلق الكيميائي) (Czakiert et al., 2022).

### 1.5.6. نظرة عامة على التحلق الكيميائي مع ناقلات الأكسجين.

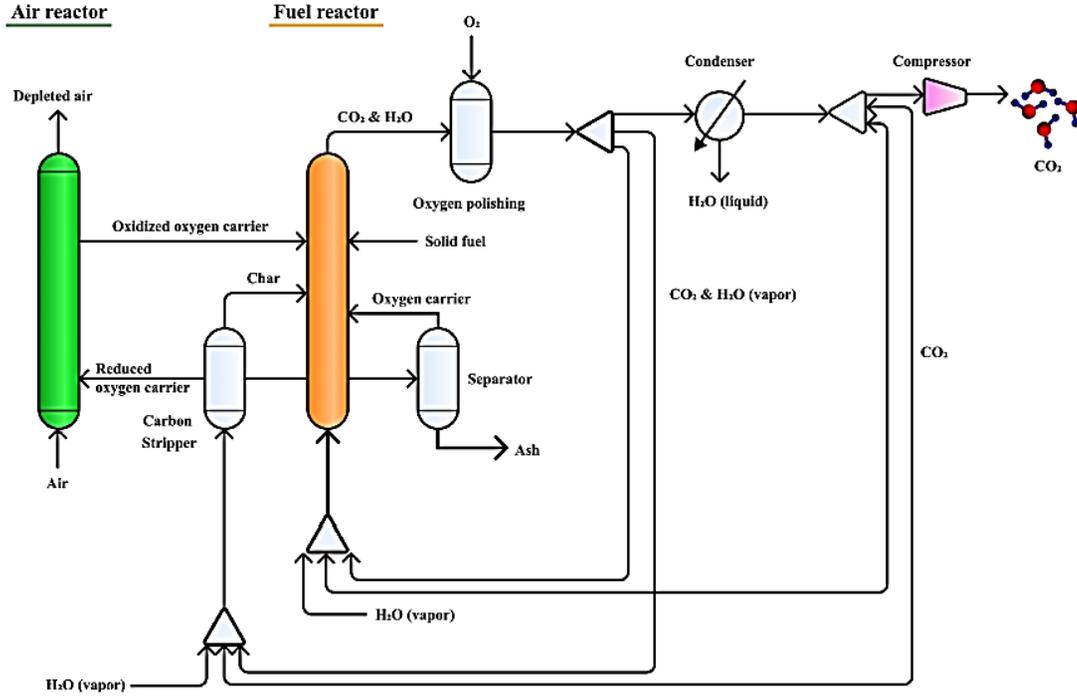
تعتمد العملية على التفاعل العكسي التالي:



حيث Me عادةً ما يكون فلزاً أو أكسيد فلز، مثل أكاسيد Fe، Mn، Cu، Co. والتفاعلات المذكوران أعلاه يؤديان إلى التفاعل الإجمالي التالي:



وإجمالي كمية الحرارة المنطلقة،  $\Delta H_c$ ، تساوي الحرارة الناتجة عن الاحتراق التقليدي مع الأكسجين الغازي. ويبين الشكل 33.6 مخطط تدفق العملية النموذجي.



الشكل 33.6. تمثيل تخطيطي لعملية الاحتراق بواسطة الحلقات الكيميائية Chemical-Looping Combustion (CLC) (المصدر: Dziejarski et al., 2023).

ويوفر في هذه العملية حامل الأكسجين، MexOy، الأكسجين للوقود الذي يولد الـ CO<sub>2</sub> والماء. ويتم بعد ذلك فصل أكسيد المعدن المختزل (MexOy-1) عن الطور الغازي وإرساله للأكسدة باستخدام O<sub>2</sub> من الهواء وإعادة تنشيط MexOy استعداداً لدورة أخرى. ويعود تاريخ مفهوم التحلق الكيميائي إلى أواخر القرن التاسع عشر عندما تم استخدامه لإنتاج الأكسجين من خلال "عملية برين (Brin process)" باستخدام BaO<sub>2</sub> كحامل للأكسجين. ويمكن استخدام نقل الأكسجين من خلال عدة طرق ذات صلة بالنقاط الكربون. وفي جميع عمليات التحلق الكيميائي التي تستهدف الأوكسجين، تلعب حاملات الأكسجين دوراً حيوياً. ومن ثمة، سيتم أولاً تقديم مراجعة موجزة لهذه الناقلات (Bui et al., 2018).

أ. **ناقلات الأكسجين.** لا غنى عن ناقلات الأكسجين الصلبة من أجل الأداء السليم لأنظمة الاحتراق التحلق الكيميائي (CLC). والخصائص الرئيسية التي تحدد أدائها هي:

- التفاعل مع الهيدروكربونات والأكسجين - سعة نقل الأكسجين (OTC)
- مقاومة ترسب الكربون على سطحها - الثبات الكيميائي والميكانيكي على مدى حياتها
- توفر المواد وتدني تكلفتها - السمية والأثر البيئي

ويتم تصنيفها من حيث المنشأ على أنها طبيعية أو صناعية. كما يتم تصنيفها أيضاً بناءً على عدد المركبات النشطة وبنيتها إلى مكون واحد (على سبيل المثال، NiO) ومكونات متعددة (على سبيل المثال،  $(Mn,Fe)_2O_3$ ). وأخيراً، يتم تصنيفها أيضاً بناءً على قدرة فصل الأكسجين في بيئة مفاعل الوقود (CLOU-type OC). ويتم تقسيم ناقلات الأكسجين الصلبة الأكثر شيوعاً ببساطة إلى خمس مجموعات، وهي: ناقلات الحديد والنحاس والمنغنيز والكوبالت والنيكل. ويتم تحميلها عادةً على قواعد دعم مختلفة مثل  $Al_2O_3$ ،  $MgAl_2O_4$ ،  $TiO_2$ ،  $SiO_2$ ، و  $ZrO_2$ ، والبننتونيت، مما يثري خصائصها المتأصلة.

ويتضمن الجدول 14.6 الخصائص الرئيسية لحاملات الأكسجين الأساسية. ونظراً للاختلافات في الخصائص، غالباً ما يتم استخدام ناقلات الأكسجين المختلطة مع دعائم مختارة، والتي صُممت لتلبية متطلبات كل تطبيق من تطبيقات التحلق الكيميائي. ويوضح الجدول 14.6 سعة نقل الأكسجين ((oxygen transport capacity (OTC))، والتي تعكس كمية الأكسجين التي يمكن توفيرها بواسطة الناقل، ممثلة بالنسبة:

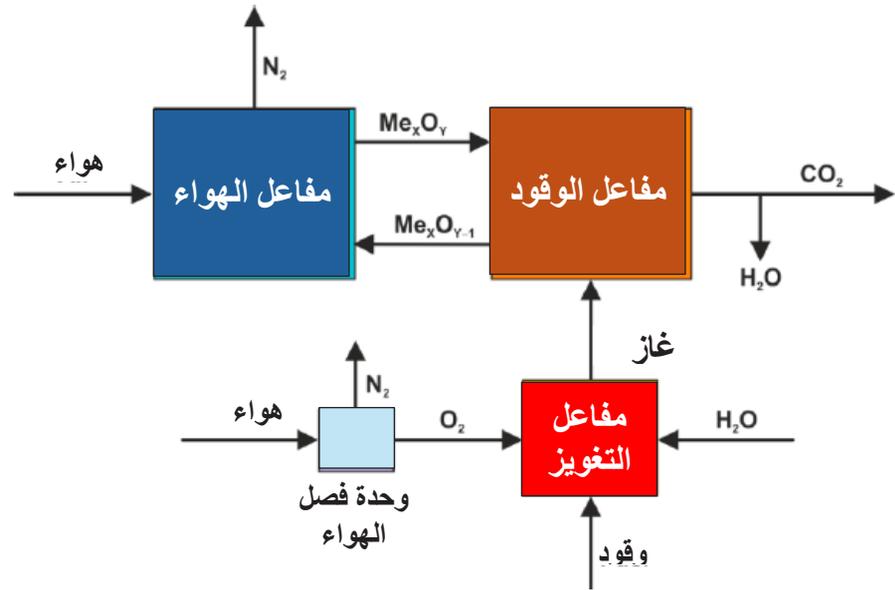
$$(Wt_{ox} - Wt_{re})/Wt_{ox}$$

عند تسخين حامل الأكسجين، وتكلفة المواد الأولية لإنتاج جميع الناقلات. وبالمقارنة فإن سعة المواد الأولية لحاملات الأكسجين الطبيعية الإلمنيت (ilmenite) و  $CaSO_4$  الأنهدريت هي 0.05 و 0.47 على التوالي وأسعارها 0.08 و >0.01 دولار أمريكي على التوالي.

ب. **عملية SynGas-CLC (SG-CLC).** تم تطوير عملية CLC في الأصل لاحتراق الوقود الغازي. وبالنسبة لاحتراق الوقود الصلب، تم اعتبار التغويز الأولي في وحدة خارجية في البداية بمثابة غاز تخليق. وتتيح منظومة Syngas CLC المقترحة تحويل الفحم الحجري في بيئة تحلق كيميائي (الشكل 34.6) من خلال إدخال وحدة فرز هواء منفصلة.

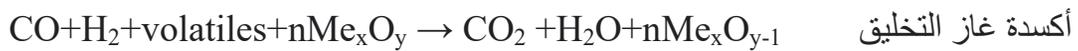
الجدول 14.6. الخصائص الرئيسية لحاملات الأكسجين (Czakiert et al., 2022)

CoO/Co	NiO/Ni	CuO/Cu	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	
منخفض	مرتفع جداً	مرتفع	متوسط	منخفض	التفاعل مع CH <sub>4</sub>
منخفض	متوسط	مرتفع جداً	مرتفع	متوسط	التفاعل مع CO <sub>2</sub> والهيدروجين
مرتفع (0.21)	مرتفع (0.21)	مرتفع (0.2)	متوسط (0.07)	منخفض (0.03)	سعة نقل الأكسجين
لا	لا	نعم	لا	لا	تأثير CLOU
مرتفع جداً (33.26)	مرتفع جداً (12.59)	مرتفع (6.14)	متوسط (0.41)	منخفض (0.28)	التكلفة (سعر السوق للمواد الأولية (دولار أمريكي/كجم)
مرتفع (1495 م°)	مرتفع (1455 م°)	منخفض (1084 م°)	متوسط (1244 م°)	مرتفع (1538 م°)	درجة الانصهار
ضارة للغاية	ضارة للغاية	ضارة	أمنة	أمنة	الصحة والبيئة

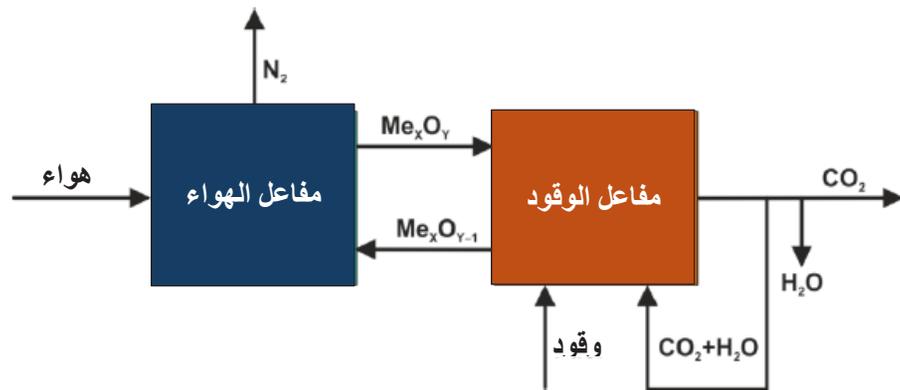


الشكل 34.6. نظام غاز التخليق CLC (SynGas) (المصدر: Czakiert et al., 2022).

يحول الفحم الحجري أولاً إلى غاز التخليق، والذي يُحرق بعد ذلك لتلامسه مع حاملات الأكسجين الصلبة من خلال التفاعلات التالية:



ج. **عملية التغويز CLC في الموقع (iG-CLC).** تتم عملية التغويز في هذه العملية داخل مفاعل الوقود، في حين يتم استخدام  $CO_2$  المعاد تدويره كعامل تغويز كما هو موضح في الشكل 35.6. ويُلغى هذا النهج التكاليف الرأسمالية والتشغيلية المرتبطة ببناء وتشغيل وحدة فصل الهواء الخارجية. ومن خلال هذه المنظومة، يختزل  $CO_2$  إلى  $CO$  بواسطة الفحم الحجري ويستمر احتراق الغازات القابلة للاحتراق وأكسدة حاملات الأكسجين كما هو مذكور في SG-CLC. ومع ذلك، يؤدي هذا النهج إلى انخفاض معدل تفاعلات التغويز وإبطاء عملية الاحتراق بأكملها باستخدام حاملات الأكسجين.



الشكل 35.6. نظام CLC للتغويز في الموقع (المصدر: Czakiert et al., 2022)

د. **التحلق الكيميائي مع فصل الأكسجين (Chemical looping with oxygen uncoupling (CLOU)).** تستخدم هذه التقنية ناقلات تُطلق الأكسجين الغازي داخل مفاعل الوقود مما يقلل من أهمية التغويز الأولي. وتشبه هذه التقنية إلى حد ما تقنية احتراق الأكسي-وقود، ولذلك فإن  $CO_2$  المعاد تدويره أو خليط  $CO_2/H_2O$  (في إعادة التدوير "الرطب") يعمل كغاز مميّع في الوحدة بدلاً من عامل تغويز كما هو موضح في الشكل 36.6. والتفاعلات التي تحدث هي:



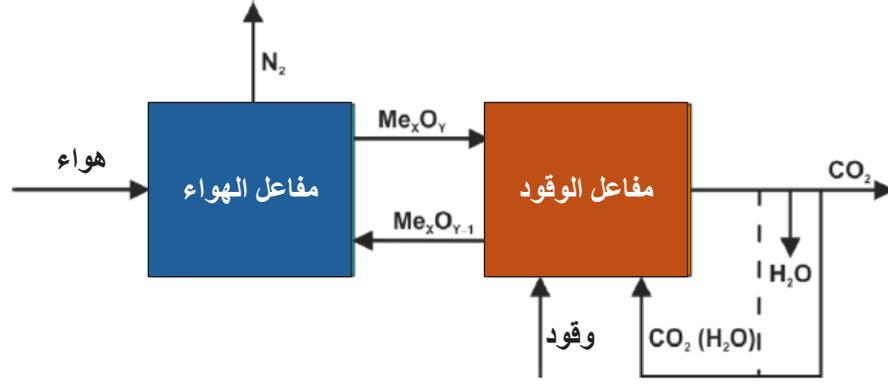
فك الارتباط بالأكسجين



احتراق الكربون



احتراق المواد المتطايرة



الشكل 36.6. الحلقات الكيميائية مع نظام فك الارتباط بالأكسجين (المصدر: Czakiert et al., 2022).

تركز الأبحاث الحالية على تطوير ناقلات الأكسجين منخفضة التكلفة التي تتمتع بسعة نقل أعلى للأكسجين وفعالية محسنة وقوة ميكانيكية عالية لتسريع تطوير تكنولوجيا الاحتراق الحلقي الكيميائي.

هـ. نهج إعادة التشكيل بالتحلق الكيميائي (Chemical looping reforming (CLR)). هناك طريقة أخرى للتحلق الكيميائي تستهدف إنتاج الهيدروجين ويشار إليها باسم إعادة التشكيل بالتحلق الكيميائي (CLR). وهناك تقنيتان في هذا النهج وهما CLR الجاف وCLR البخاري، حيث يتم تزويد مفاعل الوقود بـ  $CO_2$  أو الماء، على التوالي (الشكل 37.6). وفي كليهما، يتم إدخال الأكسجين إلى المفاعل باستخدام حاملات الأكسجين الصلبة وبالتالي يمكن وصف عملية التغويز بأكملها من خلال التفاعلات التالية:

تغويز ترسبات كربونية (Char) + (مواد متطايرة) volatiles → فحم حجري

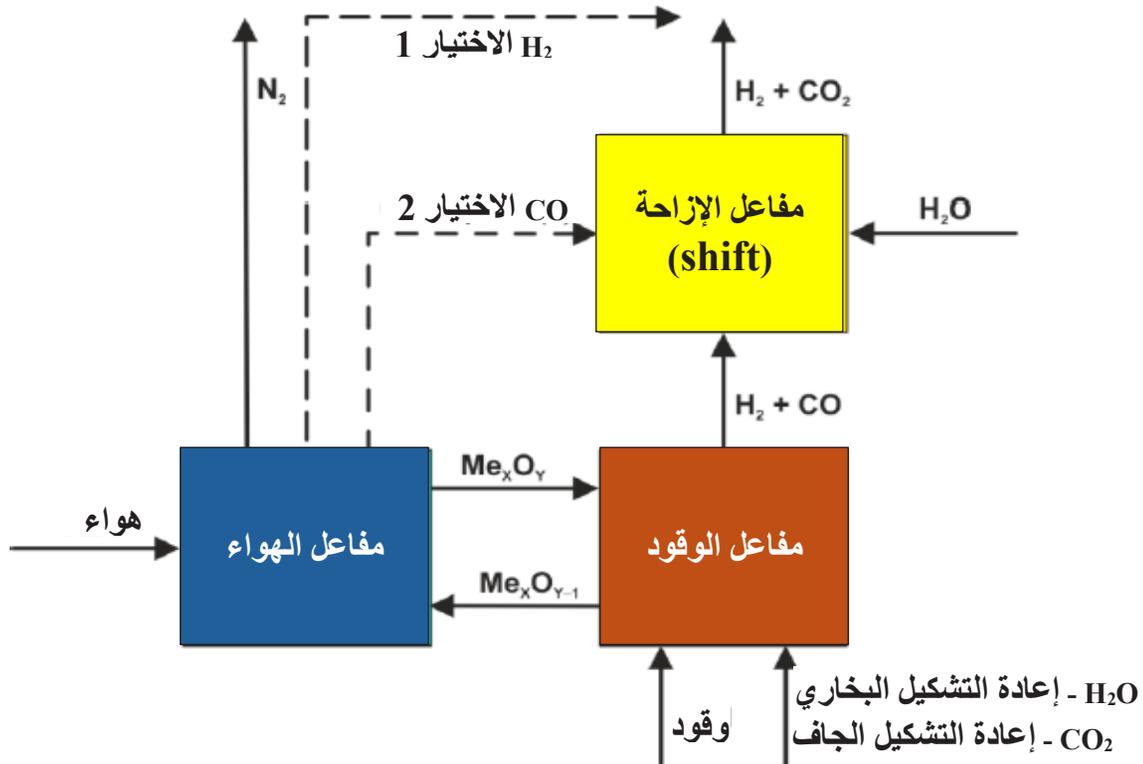
أكسدة  $char + n Me_xO_y \rightarrow CO + H_2 + n Me_xO_{y-1}$  + مواد متطايرة

إعادة تشكيل البخار  $char(C) + H_2O \rightarrow CO + H_2$

إعادة تشكيل جاف  $char(C) + CO_2 \rightarrow 2CO$

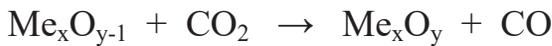
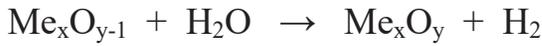
وتوجه نواتج التفاعلات الثلاثة السابقة من مفاعل الوقود إلى مفاعل إزاحة الماء - الوقود حيث يتحول  $CO$  إلى  $CO_2$  وفق المعادلة التالية:

$CO + H_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$



الشكل 37.6. نظام إعادة تشكيل الحلقات الكيميائية (CLR) (المصدر: Czakiert et al., 2022).

ولإعادة تنشيط حاملة الأكسجين، يُستخدم البخار وCO<sub>2</sub> كخيارات بدلاً من الهواء :



والتحدي الرئيسي لهذه العملية هو اختيار حامل الأكسجين والذي يتفاعل بسهولة شديدة مع الكربون (لتحويل الكربون إلى CO<sub>2</sub>) بدلاً من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. وهناك مجموعة محدودة جداً من هذه المواد تشمل بعض الخامات المعدنية (الفريت Ferrite)، مثل CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> أو BaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. من المهم أيضاً ملاحظة أنه يمكن أيضاً تسريع تفاعلات التغويز بواسطة المواد الحفازة التي يتم إدخالها مباشرة في مفاعل الوقود، والتي يشار إليها باسم تقنية CLR بمساعدة المادة الحفازة (Czakiert et al., 2022).

و. مفاعلات للتعلق الكيميائي. هناك ثلاثة أنواع من المفاعلات التي يجري تطويرها للاحتراق

بالتعلق الكيميائي، وهذه المفاعلات هي:

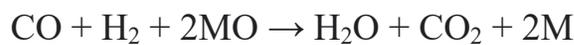
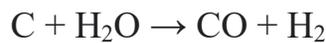
– المفاعلات الدوارة (السرير الدوار).

- المفاعلات المتأرجحة أو المفاعلات ذات القاعدة الثابتة (المعبأة).
  - مفاعلات ذات طبقة ممبعة مزدوجة
- ويجب أن تكون المفاعلات مصممة لتلبية متطلبات التشغيل السلس، وبالتالي يجب أن تستوفي المعايير التالية:
- التأكد من فترات بقاء كافية لحاملات الأكسجين في مفاعلات الهواء والوقود.
  - يتوجب التأكد من النقاط CO<sub>2</sub> بكفاءة، عن طريق فصل أقسام تحويل الوقود وإعادة تنشيط ناقلات الأكسجين عن بعضها بإحكام لمنع تسرب غاز CO<sub>2</sub> والفحم من الانزلاق إلى مفاعل الهواء.

### 2.5.6. التحلق الكيميائي لإنتاج الطاقة الكهربائية.

ينبع الاهتمام بالتحلق الكيميائي من الديناميكا الحرارية المفضلة للعملية. ويتم تجنب فقدان الطاقة بسبب تفاعل الاحتراق إلى حد ما عندما يتم ملامسة الوقود لأكسيد المعدن. وهذا يؤدي إلى تحسين كفاءة محطة توليد الطاقة الكهربائية بالوقود الأحفوري، وذلك لكون الضغط الجزئي للأكسجين منخفضاً للغاية، وبالتالي فإن الضغوط الجزئية لـ CO<sub>2</sub> أو غيره من الوقود غير المحترق تكون أيضاً منخفضة عند مخرج المفاعل. ونتيجةً لذلك فإن نسبة CO<sub>2</sub>/CO ستكون حوالي 10<sup>-5</sup>، مما يمكن من تحقيق الاحتراق الكامل. وفي الوقت نفسه، تكون درجة حرارة عملية التحلق الكيميائي أعلى من درجة حرارة مدخل التوربين، وبالتالي تدخل كل الحرارة المنبعثة في دورة الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم جهد الشغل لفصل الغازات قبل نقل الحرارة إلى دورة الطاقة بدلاً من فقدانها.

لقد تم بالفعل توسيع سعة تقنية التحلق الكيميائي إلى حوالي 1 ميجاوات. واستهدفت أعمال التطوير غاز التخليق والميثان والفحم الحجري وأنواع الوقود الصلب الأخرى. وفي حالة الوقود الصلب يظهر أن التحلق الكيميائي يعزز احتراق خليط الغاز (CO و H<sub>2</sub>) الناتج عن التغويز وفق التفاعلات التالية:



وبناءً على التفاعلات المذكورة أعلاه، يعتمد معدل تحويل الوقود الصلب على معدل تغويز الوقود. ويعتمد معدل العملية على تفاعل الوقود الصلب والتأثير التثبيطي لـ CO<sub>2</sub> والهيدروجين على معدل التغويز. ونتيجةً لذلك، يتم تسريع معدل التغويز إلى حد ما في وجود حامل الأكسجين الصلب. ويتم إنتاج فحم خامل مما يتسبب بحدوث مشاكل في المفاعلات المترابطة، إذا تم إعادة تدوير الفحم إلى

مفاعل الهواء. ولتجنب هذه المشكلة، يتم فصل الفحم فعلياً عن حامل الأكسجين باستخدام معدات تجريد الكربون، وإعادة تدويره مرة أخرى إلى مفاعل الوقود. وبدلاً من ذلك، يتم زيادة معدل تحويل الفحم باستخدام حاملات CLOU، التي تُطلق الأكسجين في الطور الغازي لزيادة معدل تحويل الكربون. وتُستخدم حاملات CLOU نموذجية، مثل أكسيد النحاس (II) والمواد القائمة على المنغنيز (على سبيل المثال، أكاسيد مختلطة من الحديد والمنغنيز أو البيروفسكايت (perovskites))، والتي تتمتع بتوازن عالٍ لضغط الأكسجين الجزئي ( $pO_2$ ) عند درجات حرارة مفاعل الوقود. ويمكن أيضاً إعادة أكسدة حاملات CLOU المختزلة بالهواء عند درجات حرارة مفاعل الهواء.

### 3.5.6. اقتصاديات ومستقبل التحلق الكيميائي

توفر تقنية التحلق الكيميائي كفاءات أعلى وتكاليف أقل مقارنةً بمحطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية التي تعمل بالفحم الحجري والمجهزة بتقنيات الالتقاط التقليدية، إذا كانت تكاليف رأس المال والتشغيل منافسة. ومع ذلك، وجد إكستروم وآخرون (Ekström et al., 2009) أنه بالنسبة للمحطات التي تعمل بالفحم الحجري، فإن تكلفة الالتقاط بتقنية التحلق الكيميائي وحرق أكسي-وقود يزيد بحوالي 119% و~137%، على التوالي، مقارنةً بتكاليف محطة تقليدية مرجعية. وينبغي أن تؤخذ في الاعتبار تكلفة وعمر المادة الحاملة للأكسجين وديمومة تشغيل المحطة عند إجراء مثل هذه التقييمات الاقتصادية. ومن ثمة، فإن الكثير من الأبحاث الحديثة حول الاحتراق بالتحلق الكيميائي تركز على هذه القضايا. ومن بين الأهداف المحددة التأكد من أن الجزيئات الحاملة للأكسجين تدوم حوالي 500 إلى 700 ساعة، الأمر الذي سيجعل تقنية التحلق الكيميائي فعالة من حيث التكلفة. ولبناء المزيد من الثقة في هذه العملية، يجري حالياً إجراء تجارب على مستوى وحدات تجريبية نمطية وشبه صناعية لمعالجة موثوقية المصنع وثبات المواد على المدى الطويل. وأخيراً، من المهم ملاحظة أن تكنولوجيا التحلق الكيميائي قد وصلت بالفعل إلى مستوى 7-8 مع الأخذ في الاعتبار حجم المصانع العاملة بالفعل.

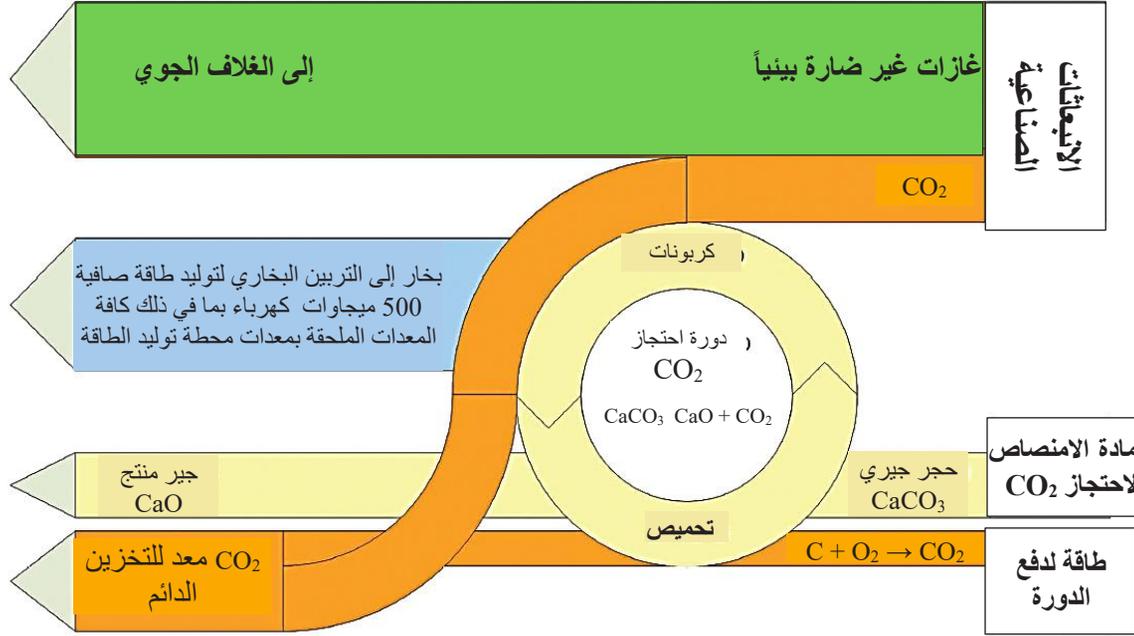
### 4.5.6. تكنولوجيا تحلق الكربونات.

تحلق الكربونات هي تقنية التقاط  $CO_2$  بعد الاحتراق بناءً على التفاعل التالي:



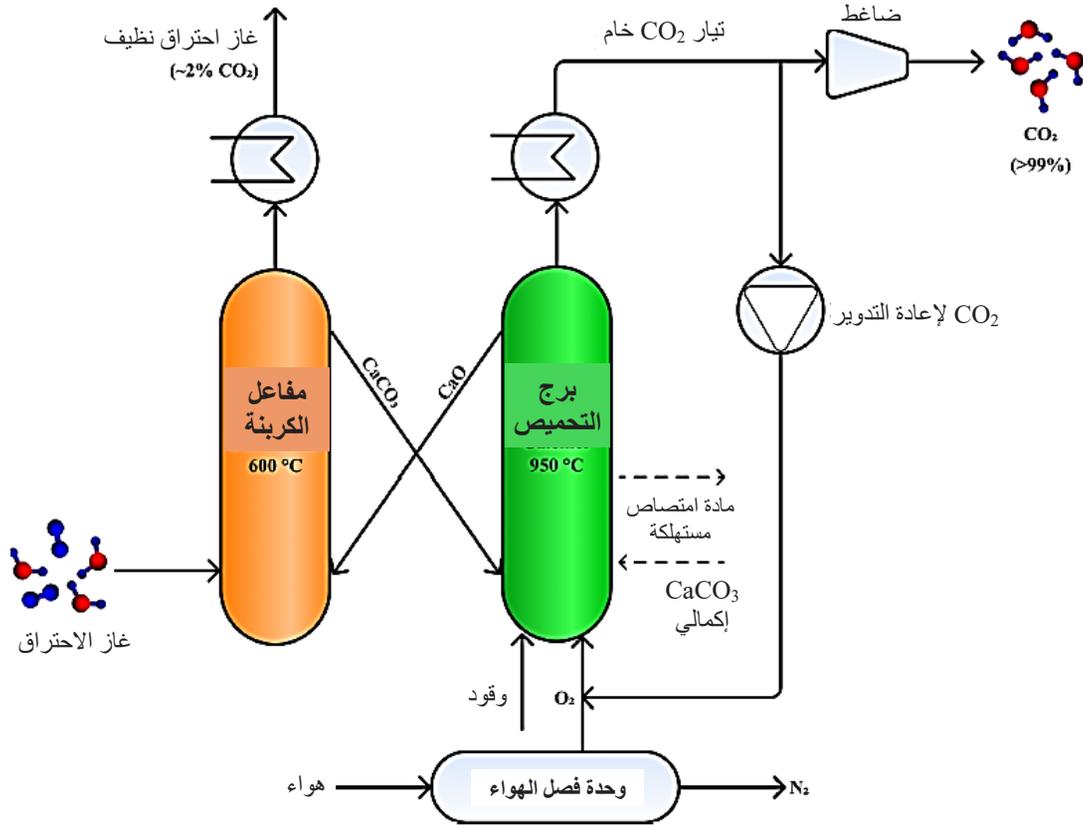
حيث M عادةً ما تكون فلز قلوي. ويتم استخدام نقل  $CO_2$  باستخدام التفاعل المذكور أعلاه في العديد من العمليات ذات الصلة بالتقاط الكربون من الصناعات ذات الانبعاثات الكثيفة مثل توليد الطاقة الكهربائية، وهو ما يظهر كمخطط في الشكل 38.6 بالنسبة لـ  $CaCO_3$ . وخلال دورة التشغيل، يُستخدم

الجبر في دورات متعددة لتخفيض التكاليف وزيادة كفاءة العملية، وبالتالي تُضاف وحدات الكربنة وإعادة التوليد للعملية لإعادة تنشيط المادة الماصة المستهلكة وإنتاج تيار نقي من  $CO_2$  للتخزين كما هو واضح من مخطط العملية في الشكل 39.6.



الشكل 38.6. مخطط عملية دورة تحلق الكالسيوم (CaL) (المصدر: Bui et al., 2018)

- وتتميز هذه العملية، كونها تقنية لالتقاط ثاني أكسيد الكربون، بثلاثة عوامل:
- انخفاض متطلبات الطاقة نظراً لاستخدام حرارة وحدة الكربنة/التكلس في توليد الطاقة الكهربائية باستخدام دورة بخار، مما يجعل العملية أكثر كفاءةً في استخدام الطاقة من عملية الغسل الأميني التقليدية
- الحجر الجيري مادة كيميائية غير خطيرة ومتوفرة على نطاق واسع وبأسعار منخفضة
- يمكن استخدام المادة الماصة المستهلكة في إنتاج الأسمنت، مما يوفر طريقة لإزالة الكربون جزئياً من هذه الصناعة. ويمكن استخدامه أيضاً لتصنيع الصلب، وإزالة الكبريت من غاز المداخن، وتكليس المحيطات.



الشكل 39.6. احتجاز CO<sub>2</sub> من غاز المداخن عن طريق عملية تحلق الكالسيوم (CaL) (المصدر: Dziejarski et al., 2023).

ووصلت الجاهزية التكنولوجية لهذه العملية حالياً إلى مرحلة النطاق التجريبي النمطي بمستوى 6. وهناك ثلاثة وحدات تجريبية نمطية تدعم تطويرها: في جامعة دارمشتات (ألمانيا)، وفي لايبيردا (إسبانيا)، وفي معهد أبحاث التكنولوجيا الصناعية (ITRI) في تايوان. وتشير تقديرات المعهد (ITRI) إلى أن عملية CaL المتكاملة ستوفر النقاط الكربون بتكلفة أقل من 30 دولاراً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون. وبالإضافة إلى ذلك، هناك العديد من المرافق التجريبية النمطية الصغيرة في جميع أنحاء العالم والتي يتم استخدامها لمعالجة مختلف القضايا المتعلقة بالتكنولوجيا.

لا يزال تطوير تقنية تحلق أكسيد الكالسيوم قيد التقدم. وهناك عدد من التحديات التي تحتاج إلى معالجة. وتشمل هذه التحديات التنشيط السريع للجير والاستنزاف بسبب التأثيرات الميكانيكية في الفرشات المميعة ومنهجية اختبار المواد المستخدمة وانخفاض أداء المواد المستخدمة عند درجات حرارة التكليل العالية ودور البخار وتأثيره في عملية الكربنة. بالإضافة إلى ذلك، هناك حاجة إلى جهود بحثية لتطوير مواد ماصة جديدة وخاصة المواد الماصة الطبيعية وكذلك تحسين أداء المواد عن طريق منصات نقالة على مواد داعمة، وإعادة تنشيط المواد الماصة المستهلكة، وتأثير الترطيب، والمعالجة المسبقة بـ مواد

مثل الأحماض العضوية، وإعادة الكربنة، وإضافة مواد كيميائية فعالة، واستخدام المعالجة الحرارية المسبقة، وتحضير مواد نشطة باستعمال السول-جيل أو ترسيب كربونات الكالسيوم أو تحضير المواد النانوية.

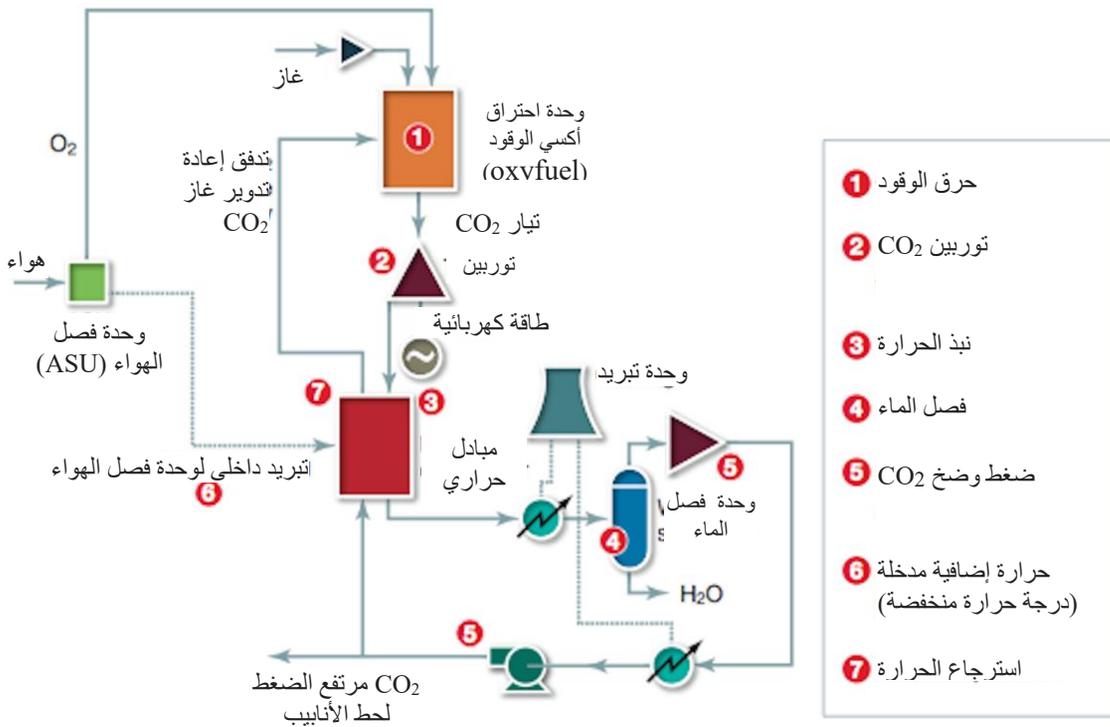
يمكن أن تستهدف أنشطة التطوير أيضاً توسيع نطاق تطبيق CaL بما يتجاوز استخدامه الحالي لالتقاط CO<sub>2</sub> في عمليات التغويز وعمليات إعادة التشكيل المحسنة لإنتاج الهيدروجين. كما يمكن تطبيق هذه التقنية في دورات مختلفة عديدة بوجود CuO كعامل اختزال لتوفير الطاقة الحرارية اللازمة للتكليس، وبالتالي تفادي الحاجة إلى جهاز تكليس يعمل بالأكسجين. وتشمل الاحتمالات الأخرى المثيرة للاهتمام استخدام CaCO<sub>3</sub> للتخزين الحراري بمفرده، والجمع بين تقنية CaL والطاقة الشمسية. وينبغي أيضاً تكثيف الجهود لتطوير تكوينات جديدة للوحدات الصناعية وتصميمات جديدة للمفاعلات.

وتشمل التحسينات الأخرى رفع درجة حرارة المواد الصلبة الداخلة إلى وحدة التكليس، والعمل بمستويات عالية جداً من الأكسجين الواصل إلى وحدة التكليس، والاعتماد على تفاعل التكليس للتحكم في درجات الحرارة. وقد بذلت أيضاً جهود لإدخال مفاعل إعادة الكربنة لتحقيق الثبات في قدرات حمل المواد المستخدمة ودعم النقاط ثاني أكسيد الكبريت من غازات المداخن. ويبدو أيضاً أن إضافة مثل هذه الوحدة يمكن أن يحسن اقتصاديات العملية من خلال خفض تكاليف الكهرباء المنتجة. كما تم تحقيق المزيد من التحسينات من قبل الباحثين الأوروبيين الذين يعملون على عملية CARINA المعتمدة على نقل الحرارة من جهاز احتراق خارجي إلى جهاز التكليس عبر أنابيب حرارتها عالية، والتي وجد أنها تؤدي إلى تحسين الكفاءة بنسبة 1.5% مقارنةً بعملية تحلق الكربونات القياسية. وقد أظهرت النتائج إلى الآن أن تكاليف تجنب الـ CO<sub>2</sub> أقل بحوالي 15-20% مقارنةً بعملية تحلق الكربونات القياسية. واعتمد هذا العمل على نتائج تم الحصول عليها من وحدة نمطية، وكانت معدلات النقاط CO<sub>2</sub> التي تم تحقيقها أعلى من 90% باستخدام غازات مداخن حقيقية ناتجة عن احتراق الفحم الحجري بسبب التأثير الإيجابي لبخار الماء. كما تم تحقيق عدد من الفوائد التشغيلية الأخرى. وأخيراً، لكي تخترق تقنية CaL السوق، هناك حاجة ملحة لوحدة شبه صناعية ذات سعة مرتفعة (Bui et al., 2018; Dziejarski et al., 2016; Sánchez-Biezma Sacristán, 2018; Ströhle et al., 2016).

## 6.6. عزل CO<sub>2</sub> بواسطة تقنية دورة علام (Allam)

تُعد دورة علام تقدماً حديثاً نسبياً في تقنيات توليد الطاقة الكهربائية إذ تم تطويرها في عام 2013. وتتميز بكفاءة دورة مرتفعة (بكفاءة حرارية تبلغ 58.0%) وانبعاثات صفيرية لأكاسيد النيتروجين ومواصفات للـ CO<sub>2</sub> المحتجز تتلائم مع متطلبات خطوط الأنابيب لعزله واستخدامه. وتم حماية

التكنولوجيا بسلسلة من براءات الاختراع، تم منح آخرها في عام 2022 (Allam et al., 2022). وهذه العملية عبارة عن دورة أكسي-وقود شبه مغلقة، يتم إطلاقها بشكل مباشر وتستخدم  $CO_2$  فوق الحرج عالي الضغط كمائع في التشغيل. ويبين الشكل 40.6 مخطط تدفق العملية (Fernandes et al., 2019; ModernPowerSystems, 2016). ويشتمل تشغيل دورة علام الاقتران بوحدة فصل للهواء (ASU)، تمكن فصل إنتاج الأكسجين عن الكهرباء من خلال تخزين الأكسجين السائل مما يُحسن من مرونة المنشأة عن طريق إزالة القيود الديناميكية البطيئة لوحدة ASU جزئياً. وعند تشغيل محطة دورة علام على الأكسجين المخزن، يمكن زيادة صافي كفاءة الدورة إلى 66.10% وصافي إنتاج الكهرباء بنسبة 17.67% لفترة من الزمن. وعلاوةً على ذلك، واستناداً إلى تحليل الديناميكا الحرارية والطاقة، فقد وُجد أنه من الأجدى اقتصادياً تشغيل وحدة دورة علام ووحدة تخزين الطاقة من قبل نفس الشركة، بحيث يتم اشتقاق طاقة وحدة تخزين الطاقة من محطة توليد الكهرباء، مما يؤدي إلى خفض الاضطرابات في تشغيل المحطات المتكاملة وتسهيل العمليات. وإقامة منشأة Allam و ASU في موقع بالقرب من المناطق الساحلية يُعد هاماً إذ تكون الظروف المحيطة مناسبة لذروة الأداء (Fernandes et al., 2019; Mitchell et al., 2019).



الشكل 40.6. مخطط تدفق العملية لمحطة توليد الكهرباء بدورة علام المدمجة (Allam Cycle) مع وحدة فصل الهواء (Power Plant) (المصدر: ModernPowerSystems, 2016).

وقد تبين أن تقنية دورة علام أدنى من الناحية الاقتصادية من دورة الغاز الطبيعي المركبة التقليدية (NGCC). ومع ذلك، فهي توفر عوائد مالية أفضل بشكل متزايد مقارنةً بـ NGCC بسبب ارتفاع الحوافز الضريبية لاحتباس الكربون نظراً لأن معدل الالتقاط يزيد عن 99% (Chaturvedi et al., 2021). وبإمكان محطة توليد كهرباء بتقنية دورة علام بسعة 300 ميغاوات أن تلتقط سنوياً حوالي 772,200 طن من الـ CO<sub>2</sub> إذا تم تشغيلها لمدة 330 يوماً في السنة، ويمكن استخدام الـ CO<sub>2</sub> لأغراض الاستخلاص المعزز للنفط أو التخزين أو أي من الاستخدامات الأخرى. ويمكن لمحطة في الولايات المتحدة أن تجني من الاستخلاص المعزز للنفط ومن عزله في التكوينات الجيولوجية الأخرى حوالي 27 مليون دولار و38.6 مليون دولار، على التوالي، من خلال الإعفاءات الضريبية التي يوفرها تشريع Q45 الأمريكي. وعلاوةً على ذلك، فإن اعتماد تقنية دورة علام للغاز الطبيعي يُعد أكثر فعالية في تخفيض انبعاثات الكربون من تحويل محطات الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري إلى محطات دورة مركبة متكاملة تعمل بالغاز الطبيعي مع التقاط الكربون (Fernandes et al., 2019). كما تُبين دراسة أجريت في بريطانيا أن محطات التوليد القائمة على تقنية دورة علام يمكن أن تتمتع بعدد من المزايا منها:

1. خفض تكاليف المنظومة إلى الحد الأدنى عند استخدام المحطات كمولدات أحمال أساسية نظراً لكفاءتها العالية وتكاليفها المنخفضة للكربون.
2. تخفيض كثافة CO<sub>2</sub> في الشبكة الكهربائية.
3. الحصول على مزيد من التخفيضات في كثافة CO<sub>2</sub> في الشبكة وتكاليف المنشأة عند تجهيز المحطة بمخزن للأكسيجين (Mitchell et al., 2019).

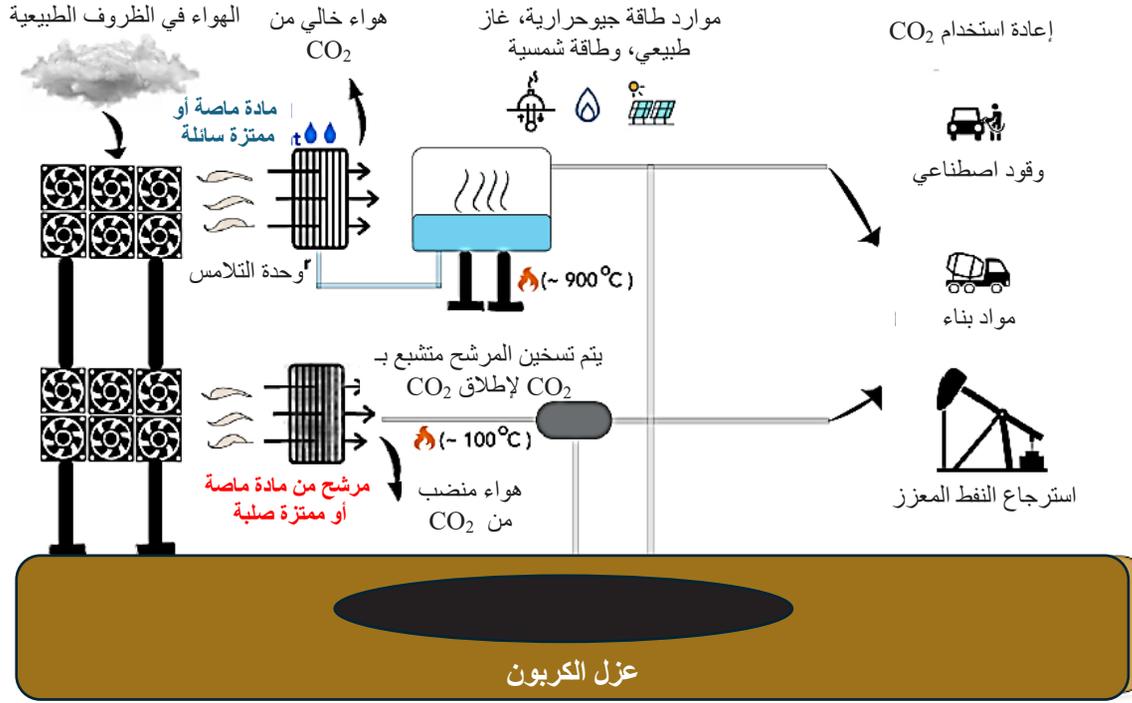
## 7.6. التقاط الكربون الجوي المباشر (DACC)

على عكس التقنيات التي تم استعراضها أعلاه، والتي كانت تعالج التقاط الكربون من مصادر ثابتة، تهدف DACC إلى تخفيض تركيز CO<sub>2</sub> عن طريق التقاطه من الغلاف الجوي. وهذه التقنية ضمن فئة ما يُشار إليه بتقنيات إزالة غازات الدفيئة (Greenhouse Gas Removal (GGR)) أو تقنيات الانبعاثات السلبية، والتي من حيث المبدأ تُخفف من انبعاثات CO<sub>2</sub> من مجموعة واسعة من المصادر، بما في ذلك المصادر المتحركة والمشتتة. ومن المهم أن نلاحظ أن تحقيق هدف اتفاق باريس المتمثل في الحد من الانحباس الحراري العالمي يلعب دوراً مهماً في إزالة CO<sub>2</sub> وتكنولوجيات الانبعاثات السلبية. ومن هنا اكتسبت تقنية التقاط الكربون الجوي المباشر (DACC) أهمية على مدى العقدين الماضيين

وتسارع تطورها إلى المرحلة التجارية بوتيرة مرتفعة إلى حد ما. وتمت تغطية هذا الموضوع من خلال العديد من المراجعات الحديثة ( Budinis, 2022; Bui et al., 2018; Daniel et al., 2022; Elizabeth Abramson, 2023; Gambhir & Tavoni, 2019; Mostafa et al., 2022; Ozkan et al., 2022; Sodiq et al., 2023).

والمفهوم الأساسي لـ DACC هو أنه على الرغم من حقيقة أن نسبة CO<sub>2</sub> تزيد قليلاً عن 0.04% بالحجم في الهواء، فمن الممكن التقاط كميات كبيرة كل عام عن طريق تلامس كميات كبيرة من الهواء ومواد ماصة أو مازة. وينبع الاهتمام بـ DACC من توقع أنه يمكن أن يكون لها دور مهم في تحقيق "أهداف الصفر الصافية"، والتي تشير إلى موازنة أي CO<sub>2</sub> منبعث في الغلاف الجوي من النشاط البشري مع إزالة كمية مماثلة من الـ CO<sub>2</sub>. ويعتمد كل من تقرير الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ بشأن الاحترار العالمي بمقدار 1.5°م على تقنيات إزالة CO<sub>2</sub> لتحقيق الأهداف المناخية. وتشير التوقعات إلى أنه ينبغي التقاط 90 و620 و980 مليون طن من CO<sub>2</sub> سنوياً عبر DACC بحلول عام 2030 و2040 و2050 على التوالي. ومن المتوقع أن تصل الكمية المتراكمة التي سيتم التقاطها بين عامي 2020 و2050 إلى حوالي 12 جيجا طن من ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يقرب من 11% من النمو في إجمالي CO<sub>2</sub> المحتجز خلال تلك الفترة. ومن المتوقع أيضاً أن يُستخدم 36% من CO<sub>2</sub> الذي يتم التقاطه مباشرةً من الهواء في عام 2050 مع الهيدروجين لإنتاج وقود هيدروكربوني اصطناعي (Budinis, 2022).

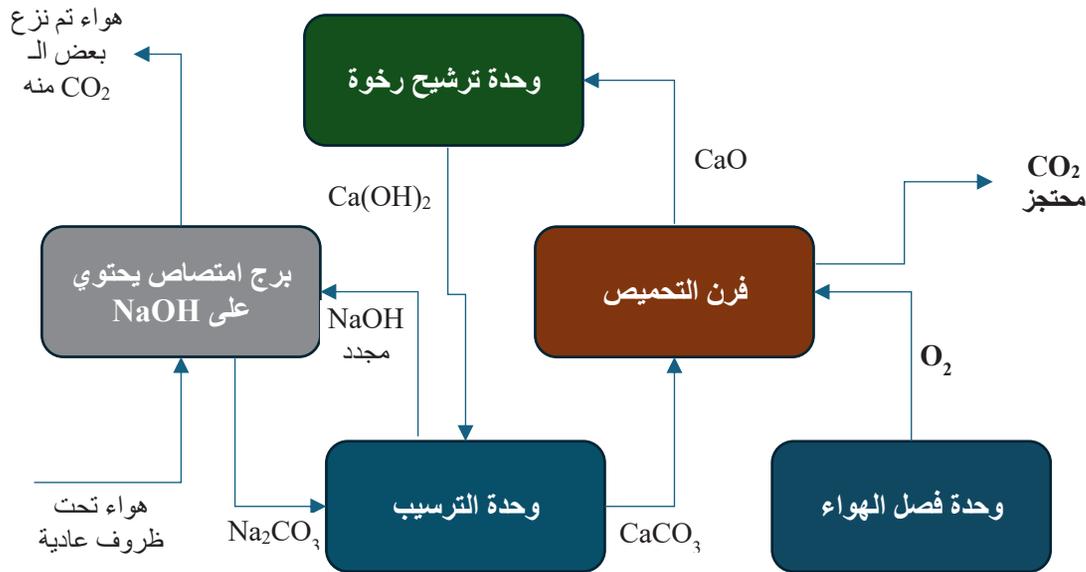
وهناك في الأساس طريقتان لتطبيق التكنولوجيا المتعلقة بـ DACC. تُعرف الطريقة الأولى باسم الامتصاص، حيث يذوب CO<sub>2</sub> في مادة ماصة، ويتم إعادة تنشيط المادة الماصة لتحرير الـ CO<sub>2</sub>. والطريقة الثانية هي الامتزاز، حيث تلتصق جزيئات CO<sub>2</sub> بسطح المادة المازة، ثم تتم معالجتها لمج CO<sub>2</sub> وإعادة تنشيط المادة المازة. وتم تلخيص هذين النهجين في الشكل 6.41. ويتم بعد ذلك جمع CO<sub>2</sub> المحتجز وتوجيهه لإعادة استخدامه لإنتاج وقود اصطناعي أو مواد بناء أو لأغراض الاستخلاص المعزز للنفط. وبدلاً من ذلك، يتم تخزين الـ CO<sub>2</sub> المحتجز من خلال خيارات التخزين التقليدية.



الشكل 41.6. التقاط غاز CO<sub>2</sub> من الهواء باستخدام وحدات الاحتجاز المباشر من الهواء (DAC) باستخدام مواد سائلة أوصلبة، وتخزينه، وإعادة استخدامه (المصدر: Ozkan et al., 2022).

### 1.7.6. تقنيات DAC باستخدام مواد ماصة قاعدية قوية

في هذا النهج يتم توجيه الهواء المحيط المحتوي على CO<sub>2</sub> ليلاصق مادة قاعدية سائلة قوية، مثل هيدروكسيد البوتاسيوم أو هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، ونتيجةً لذلك يتفاعل مع CO<sub>2</sub> مع القاعدة مكوناً محلول كربونات، والذي تتم معالجته بمحلول هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)<sub>2</sub>) لتكوين كربونات كالسيوم صلبة (CaCO<sub>3</sub>). ويُرسب الـ CaCO<sub>3</sub> بعد ذلك ويُرسَل إلى وحدة للتكليس، حيث يعالج عند درجات حرارة عالية جداً (حوالي 800°م) مع الأكسجين (O<sub>2</sub>) من وحدة فصل الهواء، مكوناً CO<sub>2</sub> نقي وأكسيد الكالسيوم (CaO). ويدمج CaO مع الماء في وحدة إطفاء الكلس لتكوين Ca(OH)<sub>2</sub> لإعادة استخدامه (Tavoni, 2019 & Gambhir). ويوضح الشكل 6.42 مخطط التدفق للخطوات المختلفة للعملية.

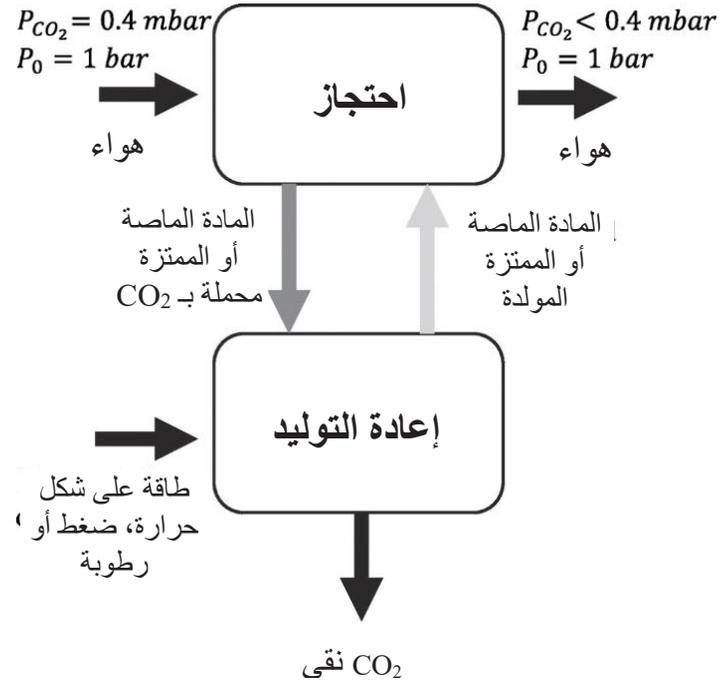


الشكل 42.6. احتجاز  $CO_2$  المباشر في الهواء باستخدام محاليل أو مواد شديدة القلوية (Tavoni and 2019 Gambhir).

### 2.7.6 DACC باستخدام المواد المازة الصلبة

في هذا النهج تُستخدم مواد مازة صلبة تعتمد على الأمينات لامتصاص  $CO_2$  من الغلاف الجوي وذلك في عملية تتكون من خطوتين. تتضمن الخطوة الأولى امتزاز ثاني أكسيد الكربون في حين تهدف الخطوة الثانية إلى إعادة تنشيط المادة المازة وفصل  $CO_2$  بمعالجة حرارية على درجة حرارة حوالي  $100^\circ C$  أو أقل أو بتأرجح الضغط أو تغييرات الرطوبة أو مزيج من هذه المعالجات. وتتطلب العملية طاقة أقل من المواد الماصة ذات القاعدة القوية لأن الامتزاز يؤدي إلى رابطة أضعف بين  $CO_2$  والمواد المازة. ويقدم الشكل 43.6 مخطط تدفق للعملية وظروف التشغيل النموذجية.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن في كلا النهجين المذكورين أعلاه، ينبغي أن تأتي مدخلات الكهرباء والحرارة المطلوبة من مصادر منخفضة الكربون مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الجيولوجية و/أو الغاز الطبيعي مع التقاط  $CO_2$  الناتج عن احتراق الغاز.



الشكل 43.6. التقاط CO<sub>2</sub> المباشر من الهواء باستخدام الممتزات الصلبة (P<sub>0</sub> = الضغط ، P<sub>CO2</sub> = ضغط CO<sub>2</sub> ، bar = بار (حوالي 1 ضغط جوي)) (المصدر: Yang et al., 2019).

### 3.7.6. تقييم جدوى DAC

بسبب انتشار الـ CO<sub>2</sub> في الغلاف الجوي، فإن التقاطه بواسطة DAC يتطلب استهلاكاً للطاقة أكبر بثلاث مرات مقارنةً بالتقاط وتخزين الكربون من غازات المداخن من المصادر الثابتة كما يتطلب كميات أكبر من المواد الماصة. ومع ذلك تتمتع DAC بميزة التقاط انبعاثات CO<sub>2</sub> من مصادر موزعة بشكل كبير مثل النقل والمباني واستخدام الأراضي، والتي لا يمكن التقاطها بواسطة تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التقليدية التي سبق ذكرها في الأقسام السابقة من هذا الفصل. كما أنها تتمتع بمرونة عالية من حيث الموقع الذي يمكن وضع المنشأة/مصنع فيه. فعلى سبيل المثال، يمكن وضعها بعيداً عن الشاطئ أو بالقرب من مرافق تخزين ونقل ثاني أكسيد الكربون، بدلاً من وضعها بالقرب من محطات توليد الطاقة الكهربائية أو المنشآت الصناعية التي تستخدم الوقود الأحفوري. ويمكن أيضاً تصميم الوحدة للاستفادة من الحرارة المهدرة من مصادر مثل العمليات الصناعية ومحطات الطاقة الحرارية. ويُعد استخدام الأراضي في محطات DAC وإزالة المياه وتأثيراتها على صحة النظام البيئي صغيرة أيضاً مقارنةً بالتقنيات الأخرى.

وفيما يتعلق بمسألة التكاليف، تشير التقديرات إلى أن تكلفة CO<sub>2</sub> المنتج من خلال تقنيات DAC تتراوح بين 94-232 دولاراً أمريكياً لكل طن من CO<sub>2</sub>، مما يعني أن التكلفة أعلى حالياً من تقنيات

تخفيض الانبعاثات الأخرى (Gambhir & Tavoni, 2019)). وفي دراسة حديثة (Mohamed et al. (2022)، أدى التصميم الأولي للحالة الأساسية باستخدام هيدروكسيد الصوديوم كمادة ماصة كيميائية إلى تكلفة كربون تبلغ 244 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub>، وتُشكل نفقات التشغيل 84% من التكلفة الإجمالية. ولتخفيض التكلفة وتحسين أداء العملية تم النظر في سيناريوهين وهما التكامل الحراري واستخدام الطاقة المتجددة. فمن خلال التكامل الحراري يمكن أن تتحسن نسبة الكربون (CO<sub>2</sub> الملتقط/CO<sub>2</sub> المنبعث) من قيمة 2.7 للحالة الأساسية إلى 3.73، مما يعني انبعاث كمية أقل من CO<sub>2</sub> لكل كمية ملتقطة بسبب انخفاض استهلاك الوقود. وانخفضت التكلفة الناتجة إلى 125 دولاراً/طن ثاني أكسيد الكربون. بالنسبة لسيناريو الطاقة المتجددة، ومن المفترض أن تُستخدم وحدة للتحويل الكهربائي لتوليد وتغذية الهيدروجين كوقود واستخدام الأكسجين للاحتراق في اوحدة التكليل. وأظهر هذا السيناريو أنه سيتم تكبد تكاليف تشغيل أعلى بسبب الوقود الأخضر الباهظ الثمن، وستصل التكلفة إلى 225 دولاراً/طن ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك فمن المتوقع أن تنخفض التكلفة عن طريق توسيع سعة المحطات، واستخدام الطاقة المتجددة منخفضة التكلفة، ومن خلال اكتساب المزيد من الخبرة.

وقد تم مؤخراً نشر بيانات حول تأثير دمج DACC مع استخدام CO<sub>2</sub> على اقتصاديات العملية (Daniel et al., 2022)، فقد تم دمج وحدة ماصة قوية DACC مع وحدة التحويل الكهربائي للأكسيد الصلب للاستخدام الكيميائي لـ CO<sub>2</sub> المحتجز لإنتاج غاز التخليق والأكسجين. ويهدف التكامل إلى توليد إيرادات لتعويض تكاليف وحدة DACC. وكشف تحليل تقني واقتصادي مفصل أن العملية غير مجدية اقتصادياً على أساس التكاليف الحالية والإيرادات المحتملة. ومع ذلك، يشير تحليل السيناريو إلى أنه في غضون 4 إلى 5 سنوات، يمكن أن تكون القيمة الحالية إيجابية ويمكن أن تكون التكلفة المتساوية محايدة مع التقدم في نضج التكنولوجيا والاقتصاد الصافي الصفري. وستكون الوحدة قادرة على التقاط أكثر من 24.2 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي فإن إزالة الكربون على المدى الفعلي ستكون حوالي 97% من الحد الأقصى النظري.

#### 4.7.6. الانتشار التجاري لـ DACC

تحظى DACC باهتمام متزايد بسبب عدد من الشركات الناشئة الناجحة. وضمن الأساليب المذكورة أعلاه لتقنيات DACC هناك العديد من التصاميم الأساسية المختلفة التي تم اعتمادها إما على نطاق تجريبي أو على نطاق شبه تجاري. ويقدم الجدول 15.6 قائمة بالمشاريع قيد التشغيل أو قيد الإنشاء أو

جدول 15.6. محطات DACC قيد التشغيل أو قيد الإنشاء أو في مراحل التطوير المتقدمة (Ozkan et al., 2022).

تاريخ التشغيل	التطبيق في الأسواق n	مصدر الطاقة الحرارية	نوع المادة الماصة	الطاقة الإنتاجية لانتقاط CO <sub>2</sub> (طن / سنة)	الموقع	نوع / حالة المصنع	الشركة
2015-2020	وقود متجدد، صناعات غذائية، مشروبات، بيوت الدفيئة الزراعية	طاقة حرارية جيولوجية، طاقة حرارية مهدرة، ألخ	مادة صلبة	الصلافية: 2000	في جميع أنحاء أوروبا	محطة تجريبية وتجارية/عاملة	Climeworks
2017	بيوت الدفيئة الزراعية	حرق النفايات	مادة صلبة	900	كانتون زيورخ (سويسرا) Kanton Zurich (Switzerland)	مصنع تجريبي/قيد التشغيل	
2021	خدمات CDR - Shopify Microsoft و Audi والتخزين عن طريق التمعدن	طاقة حرارية أرضية	مادة صلبة	4,000	أيسلندا Hellsheidi (Iceland)	منشأة تجارية/قيد التشغيل	
2015	وقود متعادل الكربون	غاز طبيعي	سائل	350	سكواميش ، كولومبيا البريطانية (كندا) Squamish, British Columbia (Canada)	محطة تجريبية/قيد التشغيل	Carbon Engineering
2022	التقاط CO <sub>2</sub> وتخزينها لمتجري Shopify والاستخلاص Virgin			1,500	سكواميش، كولومبيا البريطانية (كندا) Squamish, (Canada)	مركز الابتكار / قيد الإنشاء	

	المعزز للنفط والتقاط الكربون				British Columbia (Canada)	مصنع تجاري/ قيد الإنشاء	
منتصف 2020s				1,000,000	حوض بيرميان، تكساس (الولايات المتحدة الأمريكية) Permian basin, Texas		
2013	ليس للاستخدام التجاري	طاقة حرارية متبقية من الصناعة	التقاط CO <sub>2</sub> بشكل مباشر من الهواء	10,000	مينلو بارك، كاليفورنيا (الولايات المتحدة الأمريكية) Menlo Park, California	محطة تجريبية (DAC) / غير عاملة	<b>Global Thermostat</b>
2019	لغير التطبيقات التجارية			4,000	هانتسفيل، ألاباما (الولايات المتحدة الأمريكية) Huntsville, Alabama (USA)	مصنع تجاري/ غير عامل	
2022	بنزين اصطناعي	طاقة الرياح		250 كجم/ساعة	ماجالان (شيلي) Magallanes (Chile)	مصنع تجاري/مرحلة التخطيط	
2021	وقود يعتمد على CO <sub>2</sub> و CO <sub>2</sub> غاز صناعي	غاز طبيعي		2,000 للمحطة الواحدة	سابولبا، أوكلاهوما (الولايات المتحدة الأمريكية) Sapulpa, Oklahoma (USA)	محطات تجارية / قيد الإنشاء	
2022-23	زراعة، وقود معتمد على CO <sub>2</sub> كلقيم، مواد بناء، عزل CO <sub>2</sub>	لا يوجد، DAC السلبية	مواد ماصة لـ CO <sub>2</sub>	30 طنناً للمحطة الواحدة	أريزونا (الولايات المتحدة الأمريكية) Arizona (USA)	نموذج أولي / قيد الإنشاء	<b>Mechanical Tree</b>

النصف الثاني من عقد 2020	فصل		مدفوعة بالرطوبة	4 ملايين للمنشأة	مناطق مختلفة من العالم	منشآت تجارية /مرحلة التخطيط	
2014-2018	بيوت الدفيئة الزراعية	آلية تأرجح الرطوبة	مادة ماصة للتبادل الأيوني	100	نيويورك (الولايات المتحدة الأمريكية)	مصنع تجريبي/ قيد التشغيل	<b>Infinitree</b>

في مرحلة التخطيط المتقدمة. وتوجد حالياً 27 محطة منها 18 محطة عاملة ومحطتان غير عاملتين و5 محطات قيد الإنشاء ومحطتان في مرحلة التخطيط. وتبلغ الطاقة الإجمالية للمحطات العاملة 7350 طن/السنة، وبالتالي فهي تجريبية أو شبه تجارية، وأكبر محطة قيد الإنشاء والتي من المخطط أن تصل طاقتها إلى مليون طن/سنة. وتعتمد معظم المنشآت على مواد ماصة صلبة بينما أُعلن عن مصنع واحد فقط يستخدم مادة ماصة سائلة. وقد بدأت الأنشطة منذ عام 2014، وقد أدى نجاح التكنولوجيا إلى نمو في اعداد الشركات النشطة في هذا المجال وكذلك في زيادة اعداد المحطات قيد التنفيذ.

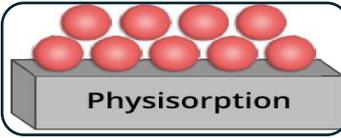
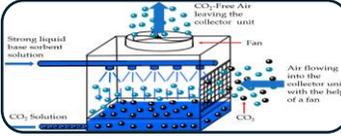
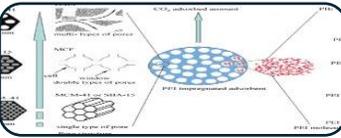
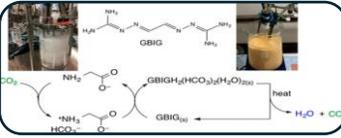
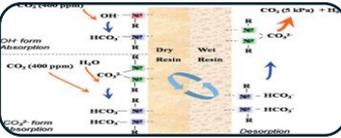
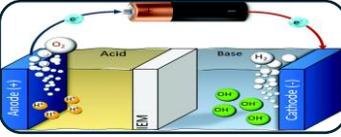
صممت معظم الشركات محطات تحتوي على مراوح يمكنها تدوير كميات كبيرة من الهواء بين المواد الماصة في فترة زمنية معينة. وتم تصميم وحدات من قبل جامعة ولاية أريزونا على شكل أشجار اصطناعية، التي يمكن أن توفر مساحات كبيرة من المواد الماصة على اتصال مع الغلاف الجوي، ومحاكاة عملية التمثيل الضوئي التي تقوم بها أوراق الأشجار الطبيعية في كيفية امتصاص CO<sub>2</sub>. ومن المهم الإشارة إلى أن المحطات العاملة بالفعل يمكن تكرارها في العديد من المواقع، ولكن ستكون هناك حاجة إلى حوالي 40,000 وحدة لإنتاج مليون طن من CO<sub>2</sub> سنوياً والتقاط جميع انبعاثات CO<sub>2</sub> العالمية الحالية. ويلزم إجراء تحليل كامل لدورة الحياة للمواد والطاقة وغيرها من الآثار المترتبة على إنشاء وصيانة المرافق من أجل دعم هذا التوسع (Tavoni, 2019; Ozkan et al., & Gambhir, 2022).

استناداً إلى الخبرة المكتسبة من المصانع المذكورة أعلاه، تحتل تقنيات DACC حالياً مستويات جاهزية تكنولوجية تتراوح بين 6-7، كما تمكنت الشركات النشطة في هذا الحقل من تحديد المجالات التي تتطلب المزيد من التحسينات. وهذه المجالات هي الموصلات، والمواد الماصة، وعملية إعادة التنشيط، ومصادر الطاقة المستخدمة، وزيادة سعة وحدات الالتقاط. والهدف من هذه التحسينات خفض التكاليف لتحقيق تكلفة أقل من 100 دولار/طن من ثاني أكسيد الكربون، مما يجعل DACC مجدية اقتصادياً. إن التقدم في مجالات التطوير المذكورة أعلاه سيمكن DACC من تحقيق الأهداف المحددة في اتفاقية باريس للحد من الانبعاثات الناتجة عن الخرسانة والنقل وصناعة الحديد والصلب وحرائق الغابات (Ozkan et al., 2022).

### 5.7.6. تحديات تطوير DACC

الثروة المعرفية التي تراكمت على مدى العقد الماضي من خلال تطبيق تقنيات DACC حددت متطلبات الطاقة الإجمالية للمنظومة باعتبارها عنق الزجاجة أمام تحقيق تسويق DACC. ومن ثمة فإن معظم الأبحاث تركزت في العقد الماضي على القضايا المتعلقة بتخفيض متطلبات الطاقة. ومع

ذلك، هناك أيضاً حاجة إلى تطوير فهم كامل للتكاليف والآثار البيئية المرتبطة بالتكنولوجيا، بالإضافة إلى معالجة القضايا المتعلقة بالقبول العام ومتطلبات السياسات. ومن ناحية التكنولوجيا، تعتمد عمليات DACC الأكثر تطوراً على المواد الماصة السائلة أو الصلبة. ولا تزال الجهود جارية لتطوير مواد ماصة وتقنيات أكثر كفاءة. ويوضح الشكل 44.6 الخيارات المختلفة قيد النظر حالياً. بالنسبة للمواد الماصة السائلة، تُعد طرق إعادة التنشيط الكهروكيميائية والسوائل الجديدة ذات متطلبات طاقة إعادة تنشيط منخفضة من بين الأهداف الأساسية. فبالنسبة للمواد الماصة الصلبة، هناك حاجة إلى مواد ماصة جديدة أكثر كفاءةً وفهم أفضل للعلاقات بين بنية المواد ونشاطها. وبالنسبة لجميع المواد الماصة، هناك أيضاً حاجة إلى تطوير عمليات تصنيع المواد الماصة على نطاق واسع لتخفيض تكلفتها. وبالإضافة إلى ذلك، يوفر عدد من عمليات DACC الجديدة والمعتمدة على المواد غير الماصة خيارات لطرق جديدة تماماً للتعامل مع إزالة ثاني أكسيد الكربون.

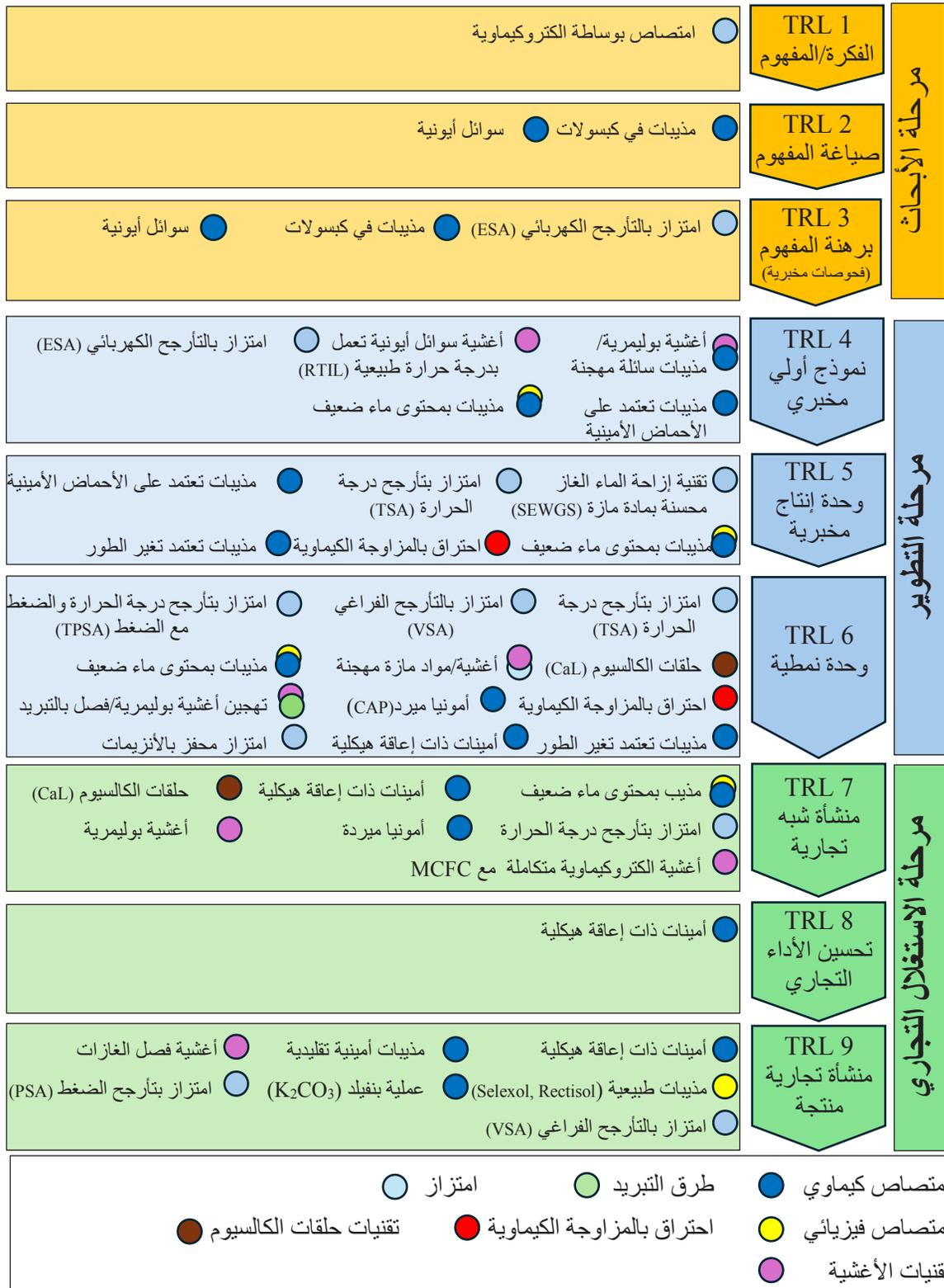
	زيوليت MOF COF		امتصاص / امتزاز فيزيائي
نظام سائل مهوى	NaOH KOH		امتصاص / امتزاز قاعدي
<ul style="list-style-type: none"> <li>تشريب فيزيائي</li> <li>ترابط إسهامي (سيلين)</li> <li>ترابط إسهامي مباشر</li> </ul>	1°، 2°، 3° أمينات		مواد معدلة بالأمينات
ترسبات البيكربونات	ثنائي إيمينو الجوانيديين		محاليل الأحماض الأمينية
	راتنجات الأمين التبادلية		التأرجح بالرطوبة
	كربوكسلة بمادة الكوينون		التأرجح الألكترو كيميائي

الشكل 44.6. تقنيات DACC (المصدر: Shi et al., 2022).

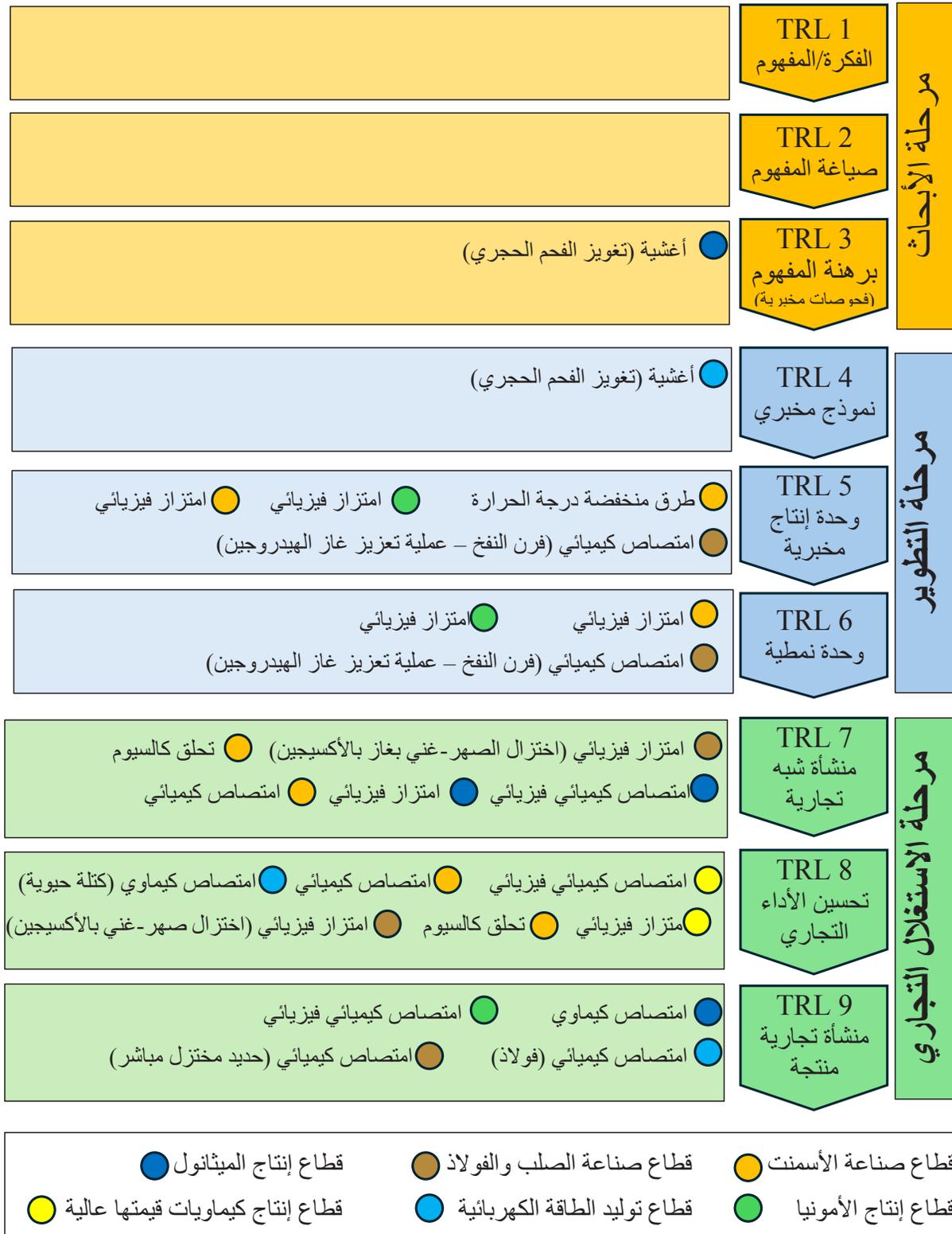
فيما يتعلق بفعالية تكلفة التكنولوجيا، هناك مجموعة واسعة من الأرقام المتباينة التي تم نشرها حول تكلفة CO<sub>2</sub> المحتجز من خلال DAC. وربما يكون هذا نتيجة لعدم وجود طرق تقييم موحدة ومعايير موثوقة لـ DAC. وينطبق نفس النقص أيضاً على تحليل مخزون دورة الحياة ومجموعات الافتراضات المستخدمة في إجراء هذه التحاليل (Erans et al., 2022; Sodiq et al., 2023).

### 8.6. خلاصة الوضع الحالي لتكنولوجيا التقاط ثاني أكسيد الكربون

لقد أظهر استعراض تكنولوجيا التقاط الكربون المقدم في هذا الفصل بوضوح أنه تم إحراز تقدم جيد في تطوير مجموعة واسعة من العمليات التي تستهدف تطبيقات مختلفة في مجموعة واسعة من المصادر الصناعية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويوضح الشكل 45.6 التقنيات الناضجة إضافة إلى التقنيات التي وصلت إلى مراحل مختلفة من التطوير. وتم إدراج مستويات الجاهزية التكنولوجية للعمليات لمختلف التطبيقات في الشكل 46.6. كما يتضمن الجدول 16.6 مزايا وعيوب تقنيات الالتقاط المختلفة (Dziejarski et al., 2023). ومن الممكن تسريع تطوير تقنيات الالتقاط التي وصلت إلى مستوى جاهزية 7، وهي مرحلة العرض التوضيحي (Demonstration stage)، مثل محطات توليد الطاقة بالفحم الحجري باحتراق أكسي-وقود والامتزاز، للوصول إلى الوضع التجاري في المستقبل القريب. ومن الواضح أن الارتقاء بالتنوع الواسع من التقنيات المقدمة في هذا الفصل إلى حدود جاهزية أعلى يمثل تحدياً كبيراً ويتطلب استثمارات ضخمة. ومع ذلك، يمكن مواجهة هذه التحديات من خلال زيادة التعاون بين جميع أصحاب المصلحة، وتعزيز تبادل المعرفة، والعمل المشترك لتجنب المشاكل مثل تلك التي تمت مواجهتها في تنفيذ مشروع IGCC في مقاطعة كيمبر وأدت إلى تعليقه (Bui et al., 2018).



الشكل 45.6. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لتقنيات احتجاز CO<sub>2</sub> (المخطط ليس شاملاً، MCFC = خلية وقود كربونات مصهور) (المصدر: Dziejarski et al., 2023).



الشكل 46.6. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لتقنيات فصل CO<sub>2</sub> حسب القطاع الاقتصادي (المخطط ليس شاملاً) (المصدر: (Dziejarski et al., 2023).

الجدول 16.6. مزايا وعيوب تقنيات فصل CO<sub>2</sub> (Dziejarski et al., 2023)

الطريقة	المزايا	العيوب/التحديات
الامتصاص الفيزيائي	<ul style="list-style-type: none"> <li>- كفاءة فصل CO<sub>2</sub> بنسبة تزيد عن 90%.</li> <li>- استهلاك منخفض للطاقة لإعادة تنشيط المواد الماصة.</li> <li>- درجة الحرارة المطلوبة للعملية أقل من الطرق الكيميائية.</li> <li>- انخفاض التآكل والسمية.</li> <li>- أكثر اقتصاداً عند الضغط الجزئي العالي لـ CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- انخفاض فعالية التقاط CO<sub>2</sub>.</li> <li>- انتقائية منخفضة تجاه CO<sub>2</sub>.</li> <li>- الحد من درجة حرارة التشغيل (تكون سعة المذيبات أفضل عند درجات الحرارة المنخفضة).</li> <li>- ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية.</li> <li>- غير مربح اقتصادياً إذا كان الضغط الجزئي لـ CO<sub>2</sub> أقل من 15% حجماً.</li> </ul>
الامتصاص الكيميائي	<ul style="list-style-type: none"> <li>- التكنولوجيا الأكثر نضجاً.</li> <li>- البساطة وإمكانية استخدامه مع انخفاض الضغط الجزئي لـ CO<sub>2</sub>.</li> <li>- مناسبة لإعادة التنشيط.</li> <li>- قدرات امتصاص عالية.</li> <li>- نقاء المنتج &gt; 99% حجم.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- الحاجة إلى تنظيف غازات العادم (الماء، أكاسيد النيتروجين، أكاسيد النيتروجين).</li> <li>- تآكل أجهزة العملية.</li> <li>- ارتفاع الطلب على الطاقة لإعادة تنشيط المذيب.</li> <li>- سمية المذيبات وفقدانها.</li> <li>- حجم امتصاص كبير.</li> <li>- التأثيرات البيئية نتيجة لتحلل المذيبات.</li> </ul>
الامتزاز	<ul style="list-style-type: none"> <li>- كفاءة فصل CO<sub>2</sub> أعلى من 85%.</li> <li>- سهولة الاستخدام وقابلية الصيانة للتركيب.</li> <li>- بما أنه يمكن إعادة استخدام المواد الماززة أو الممتزة، فإن توليد النفايات منخفض.</li> <li>- عملية عكسية (الامتزاز الفيزيائي).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- انتقائية منخفضة لثاني أكسيد الكربون.</li> <li>- امتزاز أقل لـ CO<sub>2</sub> مقارنة بتقنيات الفصل الأخرى، مثل الامتصاص أو التبريد.</li> <li>- قلة الخبرة.</li> <li>- قابلية التوسع.</li> <li>- مشاكل في مقاومة درجات الحرارة العالية.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- التصنيع المستمر ومنخفض التكلفة على نطاق واسع للمادة الممتازة.</li> <li>- حساسية لأكسيد الكبريت/النيتروجين والرطوبة.</li> <li>- ضعف متانة المواد المازة (تكلفة إضافية لاستبدال المواد)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مجموعة كبيرة من المواد ذات امتزاز للـ CO<sub>2</sub> مرتفع. متطلبات طاقة منخفضة لإعادة تنشيط المادة الممتازة.</li> <li>- نطاق تشغيل واسع.</li> <li>- إمكانية استخدام مخلفات الكتلة الحيوية أو المخلفات الصناعية كمواد أولية تقوم بتركيب الممتزات</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- مشاكل القوة عند الضغوط العالية.</li> <li>- متطلبات درجة الحرارة الصارمة.</li> <li>- الانسداد بالشوائب الموجودة في تيار الغاز.</li> <li>- الحساسية للغازات المسببة للتآكل.</li> <li>- الحاجة لضغط الغاز.</li> <li>- صعوبة الحفاظ على الأداء على مدى فترة التشغيل الطويلة.</li> <li>- يعد منع التبلل تحدياً كبيراً.</li> <li>- قضايا النفاذية والانتقائية.</li> </ul>	<p><b>تقنيات الأغشية</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- كفاءة فصل CO<sub>2</sub> بنسبة تزيد عن 80%.</li> <li>- عملية غير معقدة.</li> <li>- لا حاجة لطاقة لإعادة التنشيط.</li> <li>- منظومة وحدات بسيط.</li> <li>- عدم وجود مجاري النفايات.</li> <li>- كفاءة طاقة فصل أعلى مقارنة بالامتصاص والامتزاز.</li> <li>- لا توجد مواد كيميائية إضافية في عملية الفصل.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- خسارة كبيرة للطاقة بسبب التبريد (درجة حرارة منخفضة، حالة ضغط مرتفع).</li> <li>- استهلاك الطاقة لتخفيض مستوى الرطوبة في تيار غاز المداخل (منع تكوين الجليد وعرقله العملية. المعدات).</li> <li>- ارتفاع التكاليف الرأسمالية.</li> </ul>	<p><b>طرق التبريد</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- نقاء CO<sub>2</sub> العالي.</li> <li>- كفاءة فصل عالية (تصل إلى 99.9% حجم ثاني أكسيد الكربون).</li> <li>- إنتاج CO<sub>2</sub> السائل النقي الجاهز للنقل.</li> <li>- لا حاجة للكواشف الكيميائية.</li> <li>- مناسب لتيار الغاز عالي الضغط بتركيز عالي (&lt;50% حجم).</li> <li>- سهولة التوسع في التطبيقات الصناعية.</li> </ul>	

الاحتراق الحلقى الكيمىائى (CLC)	الاحتراق الحلقى الكيمىائى (CLC)	الاحتراق الحلقى الكيمىائى (CLC)
تحلقى الكالىسىوم (CaL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- البساطرة وإمكانىة استءءامها مع ضءظ جزئى منءض لءانى أكسىء الكرىون.</li> <li>- ىءكون غاز العاءم بشءل رئسى من <math>N_2</math>.</li> <li>- ىءكون نىار غاز العاءم من مءاعل الوءوء من <math>H_2O</math> و <math>CO_2</math> (ىمكن فصل <math>CO_2</math> بسهولة بواسطة مكءف).</li> <li>- ءءب استءهلاك طءاقة مرءفع وىءالىءى ءكءفة ءشءىة أقل.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ءءنى ءبءء ءامل الأكسءىن.</li> <li>- ءركىة الأكسءة والاءءزال بطىئة.</li> <li>- العملىة لا ءزال قىء ءءطوبر ولم ىءم ءءفءها على مسءوى صناعى.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مواد ءام رءىصءة لءءلىق المواد الماصءة.</li> <li>- الطرىقة المءلى لءءءبءء مءطءاء الطءاقة الءى ءعمل بالءمءءءى المسءوق، أو عملىة إءءاء الهىءروءىءىن المءزز بالامءصاص أو BECCS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- انءءاض امءصاص <math>CO_2</math> بسبب ءلبءء المواد الماصءة بعء عءء من الءوراء.</li> <li>- نءقءاء إضاءىة ءءعلق بالءءلل السرىع للمواد الماصءة.</li> <li>- إءارة نءاىاءءء المواد الماصءة.</li> </ul>

## الفصل 7 - استخدام ثاني أكسيد الكربون

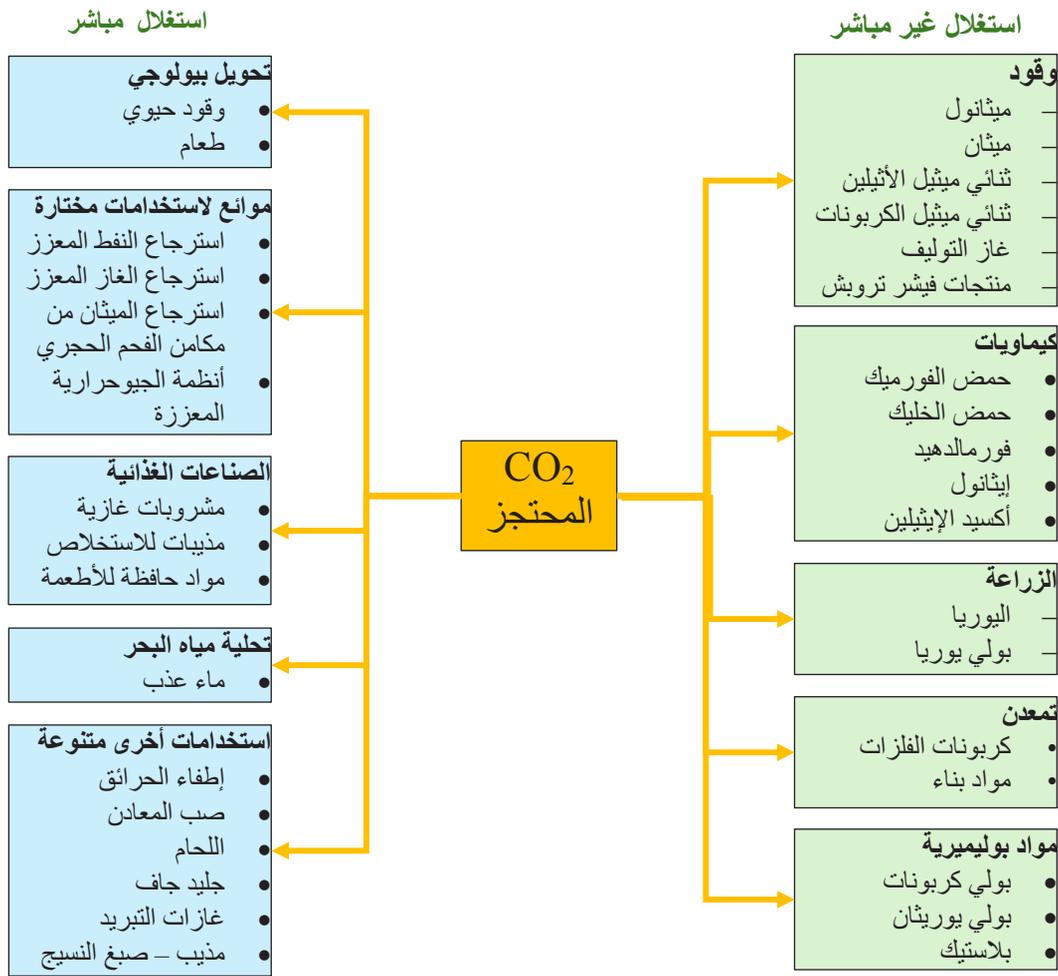
- 7.1. مقدمة حول استخدام ثاني أكسيد الكربون
- 7.2. الاستخدام المباشر لـ  $CO_2$  (الاستخدام المادي)
  - 7.2.1. استخدام  $CO_2$  في تعزيز استخلاص الهيدروكربون
  - 7.2.2. استخدام  $CO_2$  في إنتاج الوقود الحيوي عن طريق الطحالب الدقيقة
  - 7.2.3. استخدام  $CO_2$  في تحلية مياه البحر
  - 7.2.4. الاستخدام المباشر لـ  $CO_2$  في الصناعات الأخرى
- 7.3. الاستخدام غير المباشر لـ  $CO_2$  (الاستخدام الكيميائي)
  - 7.3.1. استخدام  $CO_2$  في إنتاج الميثانول
  - 7.3.2. استخدام  $CO_2$  في إنتاج الميثان
  - 7.3.3. استخدام  $CO_2$  في إنتاج ثنائي ميثيل الأثير
  - 7.3.4. استخدام  $CO_2$  في إنتاج كربونات ثنائي الميثيل
  - 7.3.5. استخدام  $CO_2$  في إنتاج غاز التخليق
  - 7.3.6. استخدام  $CO_2$  في إنتاج اليوريا
  - 7.3.7. استخدام  $CO_2$  في إنتاج المواد البوليمرية
  - 7.3.8. استخدام  $CO_2$  في التمدن
- 7.4. تقييم استخدام ثاني أكسيد الكربون
- 7.5. التحديات في استخدام  $CO_2$  والآفاق المستقبلية

## 1.7. مقدمة حول استخدام ثاني أكسيد الكربون

كما سبق ذكره في الفصل الثاني من هذا البحث، تعتبر انبعاثات CO<sub>2</sub> المحرك الرئيسي لتغير المناخ، والذي وصل إلى مستوى يندر بالخطر حيث وصل إلى 410 جزء في المليون تقريباً (Anwar et al., 2020). ووفقاً للبحوث الصادرة بهذا الشأن، تمثل انبعاثات CO<sub>2</sub> حوالي 77% من إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة (Ellabban et al., 2014). وتأتي هذه الانبعاثات من مصادر مختلفة، ولكن المساهم الرئيسي هو الوقود الأحفوري، وهو المصدر الرئيسي للطاقة في العالم (Vooradi et al., 2018). وللحد من الآثار السلبية للتغيرات المناخية، حدد اتفاق باريس للمناخ هدفاً يتمثل في الحد من الزيادة في درجة الحرارة العالمية إلى 1.5 أو 2°C وتركيز CO<sub>2</sub> لا يزيد عن 450 جزء في المليون وذلك بهدف الحد من الآثار السلبية للتغيرات المناخية (Anwar et al., 2020). ووفقاً لثيوفانيديس وآخرين ((Theofanidis et al., 2023)، يتطلب التحول إلى الاقتصاد الدائري إعادة تدوير الكربون بكفاءة من خلال اعتبار CO<sub>2</sub> كأحد المواد الأولية وليس كنفائات. ويستغل العالم في الوقت الحالي ما يقارب 3.7 جيجا طن سنوياً فقط من ثاني أكسيد الكربون، وتمثل هذه الكمية حوالي 10% فقط من الانبعاثات السنوية العالمية لثاني أكسيد الكربون، ويمكن زيادة هذه النسبة بشكل كبير عن طريق إدخال تكنولوجيات التقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه في قطاعات صناعية مختلفة مما يتيح الفرصة لفتح أسواق جديدة يمكن من خلالها تداول الوقود والمواد الكيميائية ومنتجات القيمة المضافة وتوليد أسواق لمنتجات معتمدة على الكربون.

ووفقاً لدراسة حديثة (Koytsuumpa et al., 2018)، فإن استخدام 10% من CO<sub>2</sub> الملتقط يمكن أن يولد سوقاً سنوياً تتراوح قيمتها ما بين 0.8 و1.1 تريليون دولار للمنتجات المعتمدة على الكربون. ومن المهم الإشارة إلى أن CO<sub>2</sub> يُستعمل حالياً على نطاق واسع كمادة خام في عدد كبير من التطبيقات ويُقدم الشكل 1.7 نظرة عامة على الخيارات المتاحة لاستخداماته (Berghout, 2019; Brinckerhoff, 2011; CURC, 2022; Ghiat & Al-Ansari, 2021; NARUC, 2022; NETL, 2022). وقد تم بالفعل تسويق بعض الخيارات تجارياً وتطبيقها على نطاق واسع، كما يتضح من الأحجام المتوقعة للـ CO<sub>2</sub> المستخدم والمنتجات المصنعة الموضحة في الجدول 1.7 لعام 2026 (Billig et al., 2019). وتشمل طرق تحويل الـ CO<sub>2</sub> إلى منتجات تجارية مزيماً من الصناعات الراسخة، مثل إنتاج اليوريا والميثانول، ومن المتوقع أن يستمر استهلاك CO<sub>2</sub> من خلال هذه الطرق التقليدية في النمو في المستقبل. ولا تزال الطرق الأخرى المبيّنة في الشكل 1.7، مثل التحول إلى الوقود ومواد البناء والمواد الكيميائية الجديدة والاستخلاص المعزز للنفط، في مراحل مختلفة من التطور التكنولوجي. ولقد حظي مفهوم التقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه باهتمام واسع في السنوات الأخيرة، ويشار إليه

أحياناً باسم التقاط الكربون وإعادة استخدامه (Carbon Capture and Reuse (CCR)). وتقترح معظم استراتيجيات خفض الـ  $CO_2$  حالياً استخدام  $CO_2$  باعتباره النهج الأكثر قابلية للتطبيق للحد من الآثار السلبية للاحتباس الحراري. وقد اجتذب هذا المفهوم المزيد من الاهتمام في السنوات الأخيرة بسبب قدرته على توليد إيرادات من خلال منتجاته ذات القيمة المضافة والتي يمكن أن تساعد في تعويض تكلفة التقاط الكربون. ويوضح الشكل 1.7 المسارات المحتملة لاستخدام  $CO_2$ ، والتي يمكن تصنيفها بشكل عام إلى فئتين: الاستخدامات المباشرة وغير المباشرة (Rafiee et al., 2018; Valluri et al., 2022; Zhu, 2019).



الشكل 1.7. مسارات استغلال ثاني أكسيد الكربون

ويسمى الاستخدام المباشر لـ  $CO_2$  أيضاً بالاستخدام الفيزيائي، حيث أن جزيئات  $CO_2$  تظل نقية أو مذابة في الخليط دون أي تفاعلات كيميائية. وفي المقابل، يتضمن الاستخدام غير المباشر تحويل  $CO_2$

إلى مواد كيميائية ومنتجات طاقة، وبالتالي يُعرف أيضاً باسم الاستخدام الكيميائي لثاني أكسيد الكربون. وعلى الرغم من قدرة الاستخدام الكيميائي على خفض كميات الـ CO<sub>2</sub> بالإضافة إلى عوائده الاقتصادية، إلا أنه لا يمكن أن يكون فعالاً في تخفيف الانبعاثات ما لم يتم الحصول على الهيدروجين والطاقة المستخدمة في التفاعلات من مصادر نظيفة ومستدامة. ومن المهم أيضاً ملاحظة أن العديد من المنتجات المعتمدة على الكربون تستهلك كميات صغيرة نسبياً من CO<sub>2</sub> وعادةً ما تعيد إطلاق الغاز إلى الغلاف الجوي عند استخدام المنتج.

الجدول 1.7. الطلب العالمي المقدر في السوق لعام 2026 على CO<sub>2</sub> لإنتاج المنتجات الكيميائية المختلفة (Billig et al., 2019).

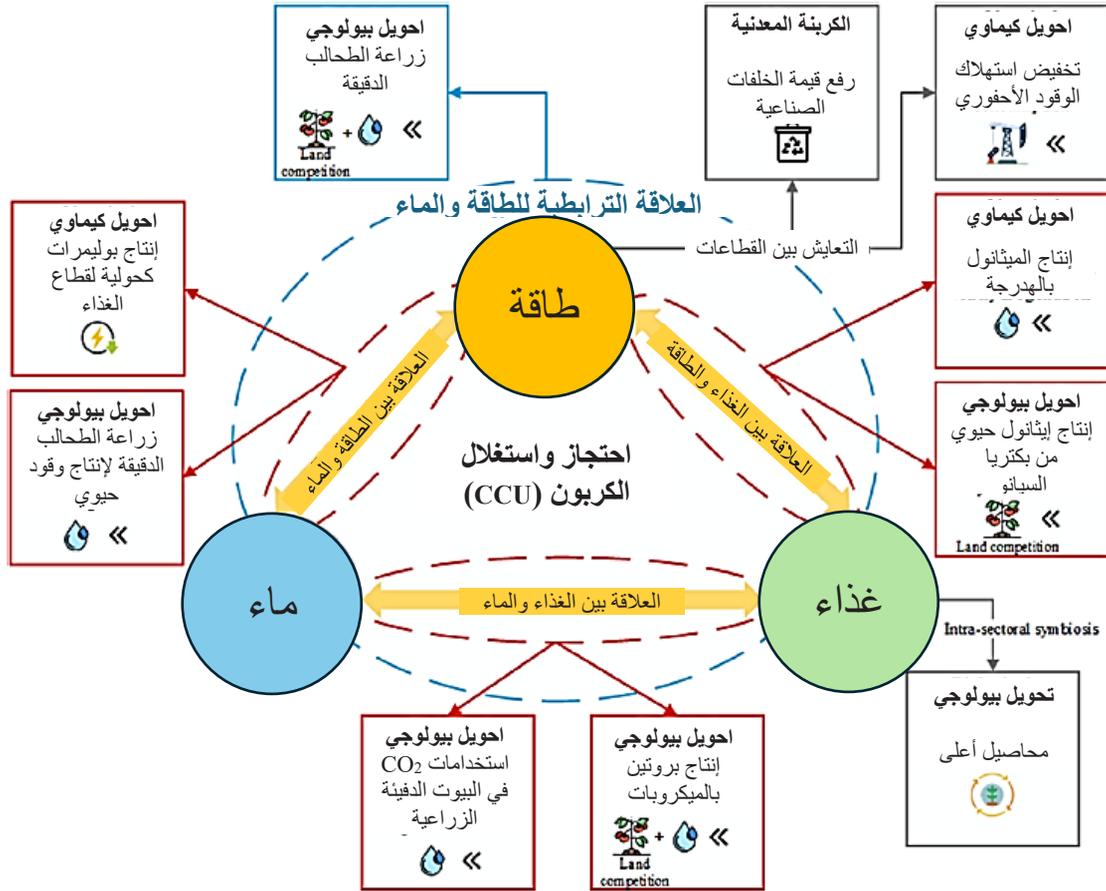
الحجم المقدر (طن متري)		المنتج / التطبيق
منتج	CO <sub>2</sub>	
<b>الانتفاع المباشر</b>		
2.9	2.9	مشروبات غازية
8.2	8.2	تعبئة المواد الغذائية
6.3	6.3	غاز صناعي
<b>مادة أولية</b>		
180.0	132.0	البوربا
250.0	70.0	الكربونات غير العضوية
25.0	5.0	الفورمالديهايد
5.0	1.0	البولي كربونات
2.0	0.5	الكربونات
3.0	1.5	بوليمرات الاكريليت
6.0	1.0	الكاربامات
1.0	0.9	حمض الفورميك
10.0	0.5	البولي يوريثان
<b>وقود</b>		
60.0	10.0	الميثانول
> 20.0	> 5.0	ثنائي ميثيل الأثير
40.0	3.0	ثلاثي بوتيل ميثيل إثير
1.0	2.0	الطحالب إلى وقود ديزل حيوي
249.8		المجموع

يستعرض هذا القسم بإيجاز التطورات الأخيرة والفرص المتاحة لاستخدام CO<sub>2</sub> والتخفيف منه، وذلك بهدف تشجيع المؤسسات العلمية وصانعي السياسات وأصحاب المصلحة والجهات الحكومية المعنية على مواصلة التركيز على هذا الموضوع وتسريع تنفيذه على نطاق صناعي في مختلف القطاعات. وتغطي هذه المراجعة المسارات الرئيسية لاستخدام CO<sub>2</sub> وتسلط الضوء بشكل أكبر على الفرص المتاحة بين القطاعات ضمن أنظمة الطاقة والمياه والغذاء (Energy Water Food (EWF) والتي تم عرضها ومناقشتها من قبل بعض الباحثين (Ghiat and Al-Ansari, 2021)، وتعتبر مفهوماً مهماً لإدارة الموارد كما هو ملخص في الشكل 2.7. وتم الاستنتاج أن مسارات CCU يمكن أن توفر فرصاً كبيرة تمتد إلى ما هو أبعد من قطاع التطبيق الخاص بها وإلى التآزر عبر القطاعات داخل أنظمة EWF.

وكما ذكر أعلاه (Theofanidis et al., 2023)، يتطلب التحول إلى الاقتصاد الدائري إعادة تدوير الكربون بكفاءة، وينبغي التحول إلى ما يسمى بـ "اقتصاد الكربون" من خلال اعتبار CO<sub>2</sub> مواد أولية (أي أحد الأصول) وليس نفايات صناعية، أي إيجاد تآزر بين الاستخدام المباشر (غير الاختزالي) وغير المباشر (الاختزالي) لثاني أكسيد الكربون وذلك بعد التقاطه. ومع هذا، فإن الثبات الديناميكي الحراري المتأصل للـ CO<sub>2</sub> يجعل من استخداماته الغير مباشرة أمراً صعباً، حيث يتطلب ذلك كميات كبيرة من الطاقة وبالإمكان استخدام الكهرباء المتجددة لتلبية متطلبات الطاقة. ولذلك، فإن أي تقدم في القطاعات الصناعية الثابتة الكبيرة التي تستهدف الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة هو أمر ذو أهمية كبيرة للمجتمع العالمي إذ سوف يستمر الاقتصاد العالمي في الاعتماد جزئياً على الهيدروكربونات بحلول منتصف القرن، مع مساهمة مسار التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في الحد من الانبعاثات والوصول إلى تحقيق الاستراتيجيات المناخية المنشودة.

## 2.7. الاستخدام المباشر لـ CO<sub>2</sub> (الاستخدام المادي)

كما ذكر سابقاً، فإن نهج الاستخدام المباشر يحافظ على جزيئات CO<sub>2</sub> نقية أو مذابة في الخليط دون أي تفاعلات كيميائية. ويمكن رؤية أمثلة على استخدامات CO<sub>2</sub> المباشرة أو المادية في المشروبات الغازية، والثلج الجاف، وطفائيات الحريق، والتبريد، ووسائط اللحام، والمذيبات. ومعظم هذه التطبيقات محدودة النطاق ولها تأثير محدود نسبياً على تخفيف ثاني أكسيد الكربون. وبالتالي، فإن الحاجة إلى استخدامات مباشرة واسعة النطاق أمر إلزامي للتخفيف من ظاهرة الاحتباس الحراري بشكل فعال. وسيركز هذا القسم في المقام الأول على التطبيقات المباشرة واسعة النطاق لثاني أكسيد الكربون، والتي تشمل الاستخلاص المعزز للهيدروكربون، وتحلية مياه البحر، والتمثيل الضوئي الذي يُثبت من خلاله الكربون مباشرةً في الطحالب الدقيقة.

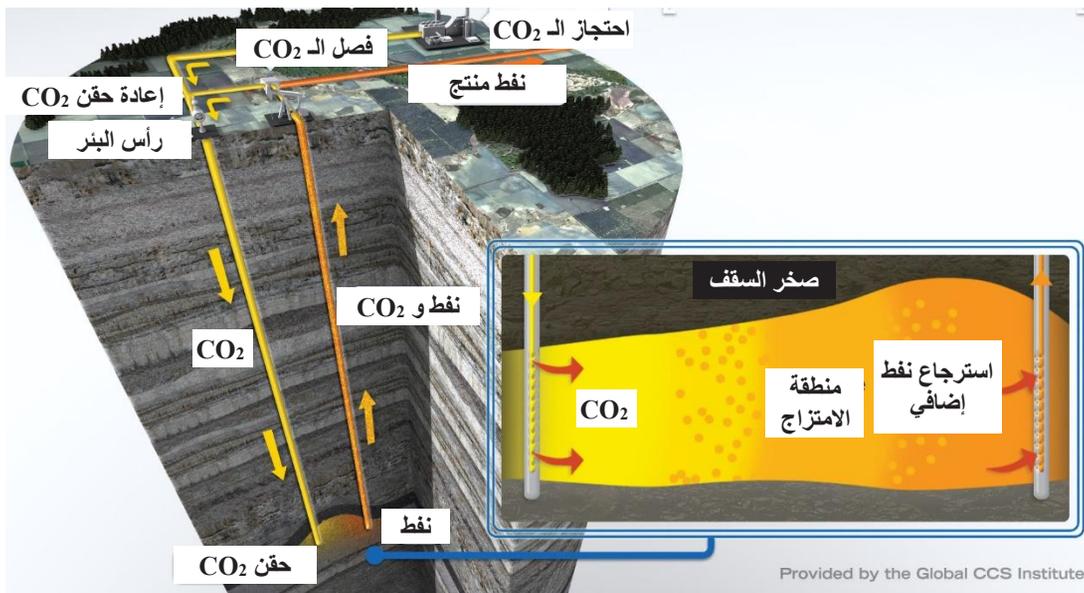


الشكل 2.7. فرص احتجاز واستغلال الكربون (CCU) ضمن أنظمة الطاقة/المياه/الغذاء (EWF).  
(المصدر: Ghat & Al-Ansari, 2021)

### 1.2.7. استخدام CO<sub>2</sub> في تعزيز استخلاص الهيدروكربونات

تستخدم صناعة إنتاج البترول غاز CO<sub>2</sub> في الاستخلاص المعزز للمواد الهيدروكربونية من المكامن الناضجة أو المستنفذة. ولذلك يعتبر الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> هو المسار الرئيسي الذي ركزت عليه صناعة النفط والغاز على مدى العقود الخمسة الماضية لتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويعود السبب الرئيسي لهذا الاهتمام إلى قدرة هذا التطبيق على تعويض تكلفة النقاط CO<sub>2</sub> من خلال عائدات النفط أو الغاز الذي يمكن إنتاجه. علاوةً على ذلك، تتمتع صناعة النفط والغاز بخبرة واسعة وقاعدة معرفية فيما يتعلق بمكامن النفط والغاز؛ وبالتالي، فإن استخدام هذه المكامن كمخزن دائم نهائي لـ CO<sub>2</sub> يعتبر أكثر موثوقية من أساليب التخزين الأخرى التي يُسعى إلى تطويرها. ويشمل مصطلح الاستخلاص المعزز للهيدروكربونات بالـ CO<sub>2</sub> تقنيات مختلفة مثل الاستخلاص المعزز للنفط (Enhanced Oil Recovery (EOR))، والاستخلاص المعزز للغاز (Enhanced Gas

Enhanced Coal (EGR) Recovery)، والاستخلاص المعزز للميثان من طبقة الفحم الحجري (Enhanced Coal (EGR) Recovery (ECBM) (Bed Methane Recovery) (Damiani et al., 2012). وتجدر الإشارة إلى أن تقنيات الاستخلاص المعزز للنفط (CO<sub>2</sub>-EOR) والغاز الطبيعي (CO<sub>2</sub>-EGR) هي تقنيات يُحقن من خلالها CO<sub>2</sub> المضغوط في المكامن لاستخلاص المزيد من النفط والغاز من المكامن ولتحسين معدل إنتاج، وذلك عن طريق زيادة ضغط المكامن وعن طريق ذوبان الـ CO<sub>2</sub> في النفط وتخفيض لزوجته. ويُفصل بعد ذلك الـ CO<sub>2</sub> المذاب عن النفط المستخرج وإعادة حقنه في البئر ويقدم الشكل 3.7 رسماً تخطيطياً للتطبيق يوضح المرافق الرئيسية المطلوبة.



الشكل 3.7. رسم تخطيطي توضيحي للاستخلاص المعزز للنفط المعتمد على CO<sub>2</sub> (المصدر: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/>)

وفي حالة استخلاص الغاز المعزز، يرتبط دور CO<sub>2</sub> بشكل أساسي بملء المسام الموجودة في مكامن الغاز لإزاحة الغاز الطبيعي نحو آبار الإنتاج. وبالمثل، يُحقن الـ CO<sub>2</sub> لاستخلاص الميثان من مكامن الفحم الحجري عن طريق إزاحة الميثان ضعيف الامتصاص (ECBM) (Busch & Gensterblum, 2011; Godec et al., 2014) ويتوفر للـ CO<sub>2</sub> المحقون عزلاً جيولوجياً بسبب امتزازه الجزئي على أسطح الفحم الحجري (Zheng et al., 2020). وبالإضافة إلى تقنيات استعادة الهيدروكربون المشار إليها أعلاه، يمكن أيضاً استخدام CO<sub>2</sub> في استخراج الطاقة من التكوينات الجيولوجية من خلال تقنية جديدة تُعرف باسم أنظمة الطاقة الحرارية الجيولوجية المعززة بـ CO<sub>2</sub> (Enhanced Geothermal Systems (EGS) (Wu and Li, 2020) يُستخدم الـ CO<sub>2</sub> فوق

الحرر كمائع لاستعارة الحرارة وتوليد الطاقة الكهربائية. ولتطبيق مفهوم EGS بشكل مثالي، يتوجب تدوير CO<sub>2</sub> بشكل مستمر من خلال منظومة مغلقة، فإذا تم تنفيذ مثل هذه المنظومة ونشرها على نطاق تجاري واسع، فمن المحتمل تخزين ملايين الأطنان من الـ CO<sub>2</sub> سنوياً (Damiani et al., 2012). ومن بين تقنيات استخلاص المواد الهيدروكربونية المحسنة، تعتبر تقنية الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام الـ CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-EOR) التكنولوجيا التجارية الأكثر رسوخاً في صناعة النفط، حيث استخدمت في إنتاج النفط منذ عدة عقود. وأشارت العديد من الدراسات الحديثة إلى أنه يمكن استغلال التقنية تجارياً لاستخراج مزيد من النفط وتحقيق تخزين جيولوجي طويل الأجل لـ CO<sub>2</sub> للتخفيف من ظاهرة الاحتباس الحراري واقترحت على سبيل المثال منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD)/الوكالة الدولية للطاقة (IEA) ثلاثة نماذج متميزة للجمع بين استخراج النفط وتخزين CO<sub>2</sub> مما يمكن أن يؤدي إلى مستوى تخزين تراكمي لـ CO<sub>2</sub> في حدود 60-360 جيجابطن في الخمسين عاماً القادمة (IEA, 2015)، إلا أن دراسة حديثة أخرى أشارت إلى أن الانتشار التجاري للاستخراج المعزز للنفط في تخزين CO<sub>2</sub> سيسمح لمعدل التخزين بالوصول إلى حوالي 1.8 جيجابطن من CO<sub>2</sub> سنوياً أي بحدود 60 جيجابطن بحلول عام 2050 (Hepburn et al., 2019).

ومن المهم الإشارة إلى أن الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> يعود إلى ستينيات القرن الماضي، عندما تم تطويره كأحد التقنيات المحتملة لاستخراج المزيد من النفط الموجود في حقول النفط المستنفذة. وقد بذلت صناعة النفط جهوداً كبيرة لتطوير هذه التكنولوجيا منذ ذلك التاريخ، وتهدف هذه الجهود إلى تطوير فهم كامل لإمكانات التكنولوجيا في استعادة النفط في مرحلة ما بعد استخراج النفط الثانوي (Secondary Oil Recovery) مع الأخذ في الاعتبار عوامل مختلفة، مثل الاختلافات الواسعة في خصائص مكامن النفط وخصائص النفط الخام. وقد طُورت طرق مختلفة لحقن CO<sub>2</sub> بما في ذلك الحقن المستمر للغاز، وحقن الماء والغاز المتناوب (Water Alternating Gas (WAG))، وحقن ستارة الماء (Water Curtain Injection (WCI))، وحقن WAG وWCI الهجين. بالإضافة إلى ذلك، يتم استخدام مضافات بوليمرية ومواد خافضة للتوتر السطحي وجسيمات نانوية للتحكم في إطفاح حقن CO<sub>2</sub> وتعزيزه (Núñez-López et al., 2019; Núñez-López et al., 2019; Al-Shargabi et al., 2022; Moskal, 2019).

ومن منظور تجاري، فإن فكرة استخدام CO<sub>2</sub> المعزز للنفط لإنتاج النفط وتخزين CO<sub>2</sub> تبدو أنها مجدية من الناحية الفنية والاقتصادية (IEA, 2015; Jiang et al., 2019; Núñez-López et al., 2019; Moskal, 2019). ومع ذلك، فإن دمج تخزين CO<sub>2</sub> على نطاق واسع وطويل الأجل في الاستخلاص المعزز للنفط يتطلب تحولاً نموذجياً عن ممارسات التشغيل الحالية

للاستخلاص المعزز للنفط، والتي تركز بشكل أساسي على زيادة إنتاج النفط مع الحد الأدنى من مدخلات ثاني أكسيد الكربون. ويرتبط توسيع هدف العملية ليشمل تخزين CO<sub>2</sub> بتكاليف إضافية تختلف بين المكامن بناءً على خصائصها الجيولوجية والجيوفيزيائية (IEA, 2015). وبسبب هذه التكاليف الإضافية، فمن غير المرجح أن يستخدم الاستخلاص المعزز للنفط في تخزين CO<sub>2</sub> على نطاق واسع في الأمدين القصير والمتوسط ما لم يتم تقديم حوافز إضافية أو فرض إجراءات تنظيمية.

وبالرغم من النضج التكنولوجي، إلا أن انتشار تقنية استخلاص CO<sub>2</sub> المعزز للنفط ظل محدوداً في النطاق الصناعي حتى عام 2000 ويرجع ذلك في الغالب إلى أسباب اقتصادية ترتبط بتوفر كميات كافية من الـ CO<sub>2</sub> وتكلفتها، خاصةً من مصادر بشرية (Núñez-López et al., 2019; Núñez-López & Moskal, 2019). وتكثف الاهتمام بالاستخراج المعزز للنفط بواسطة CO<sub>2</sub> على مدى العقدين الماضيين، خصوصاً بعد اعتباره أحد التقنيات الرائدة لتخزين CO<sub>2</sub> واستخراج الوقود الأحفوري، بما يتماشى مع أهداف اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (Metz et al., 2005; UNFCCC, 2022; UNFCCC, 2022). وينعكس هذا الاهتمام في العديد من المنشورات والكتب المتعلقة بالتقاط وتخزين الكربون وكذلك الاستخلاص المعزز للنفط (Al-Shargabi et al., 2022; Ampomah et al., 2022; Bui et al., 2018; Farajzadeh et al., 2022; IEA, 2015; Jiang et al., 2022; Kolster et al., 2017; Novak Mavar et al., 2021; Núñez-López et al., 2019; Núñez-López & Moskal, 2019). ووفقاً لعدد من الباحثين (López et al., 2019; Núñez-López & Moskal, 2019).

يُحتجز الـ CO<sub>2</sub> في مكامن النفط في أربعة أشكال مختلفة: (1) هيكلياً تحت حاجز صخري غير نفاذ و(2) مخلفات داخل المكامن كطور غير متحرك بسبب نفاذية النسبية المنخفضة وتباطؤ المنحنى الشعري و(3) كغاز مذاب في المياه المالحة والزيت و(4) التمعدن أي ترسبه كمادة معدنية مع مرور الوقت. ومما يعزز الثقة بهذه التقنية لخزن الـ CO<sub>2</sub> بأمان لفترات طويلة، أن النفط والغاز الطبيعي احتُجزا في نفس هذه المكامن لعشرات الآلاف من السنين على مدار الأزمنة الجيولوجية.

يعد التقاط الكربون وتخزينه/الاستخلاص المعزز للنفط، (CCSEOR)، عملية مماثلة لما سبق ذكره ولكن لهذه العملية هدف مزدوج يتمثل في استعادة كميات إضافية من النفط من المكامن التي انخفض فيها إنتاج النفط إلى ما دون المستويات الحرجة بينما يتم في نفس الوقت تخزين بعض الـ CO<sub>2</sub> المحقون بشكل دائم في المناطق المستنفذة من المكامن بدلاً من ضخه مرة أخرى إلى السطح. والدافع هنا هو توليد أكبر قدر ممكن من الدخل من النفط الإضافي لتعويض التكاليف المرتفعة لعملية التقاط وتخزين الكربون والتي تبلغ حوالي 70 دولاراً لكل طن من الـ CO<sub>2</sub> المخزن. في حين أن الهدف في عملية

الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> هو إنتاج أكبر قدر ممكن من النفط الإضافي باستخدام أقل قدر ممكن من ثاني أكسيد الكربون، دون أي اهتمام بشأن الاحتفاظ بالـ CO<sub>2</sub> في المكمن (أو في السيناريوهات المثلى لاستعادة أكبر قدر ممكن من CO<sub>2</sub> بحيث يمكن إعادة تدويره). ومع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه/الاستخراج المعزز للنفط، من الواضح أنه يجب أن يكون هناك توازن بين الهيدروكربون المستخرج (لتوليد الدخل) والكمية المخزنة من CO<sub>2</sub>، ولكي تكون العملية مجدية اقتصادياً يجب أن تكون كمية الـ CO<sub>2</sub> المحقونة أكبر بكثير من الكمية المثالية المطلوبة لإزاحة النفط. وتبين أن هذا التوازن مهم للغاية في تحديد مدى جدوى عمليات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه/الاستخراج المعزز للنفط. وبالتالي تعد التقنية شكلاً من أشكال استخدام CO<sub>2</sub> وهي حالياً الطريقة الوحيدة لإضافة قيمة إلى CO<sub>2</sub> بمقياس ميغاطن سنوياً. وتتراوح قيم النفط الإضافية النموذجية لعمليات الاستخلاص المعزز للنفط بالـ CO<sub>2</sub> من 5 إلى 15% من النفط الأصلي الموجود (Original Oil In-Place (OOIP))، ويُقدر الاستخدام النموذجي بحوالي 3 أطنان من CO<sub>2</sub> الملتقط وحقتها لتنتج حوالي 1 برميل من النفط الإضافي.

ولقد توسعت سعة مرافق التقاط وتخزين الكربون من أقل من 10 مليون طن من CO<sub>2</sub> في عام 2000 إلى أكثر من 40 مليون طن من الـ CO<sub>2</sub> في عام 2021، وارتفع عدد المرافق ذات السعة المرتفعة نسبياً من 5 في عام 2000 إلى 21 منشأة في عام 2021، منها 16 منشأة تستهدف الاستخلاص المعزز للنفط باعتباره الهدف الأساسي للتخزين (IEA, 2021a). وبالإضافة إلى ذلك، ووفقاً للمعهد العالمي للتقاط وتخزين الكربون (Global CCS Institute) (Turan et al., 2021)، فإن عدد مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التي هي في مراحل مختلفة من التطوير يزيد عن 100 مشروع، ومن المتوقع أن ترتفع السعة الإجمالية إلى ما يقرب من 150 مليون طن من CO<sub>2</sub> بحلول عام 2028.

وإحدى القضايا الحاسمة بالنسبة للتقاط وتخزين الكربون/الاستخراج المعزز للنفط هي أن هذا الخيار سيؤدي إلى إنتاج النفط أو الغاز الذي سيستخدم كوقود وينبعث منه ثاني أكسيد الكربون. وعندما يتم تضمين الانبعاثات من النفط المنتج، فإن عملية الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> "المتوازنة" تكون في الأساس محايدة للكربون، في حين يؤدي السيناريو "الثقيل" إلى تخزين صافي يصل إلى حوالي 33% تقريباً من الـ CO<sub>2</sub> المحقون. وسوف تكون الأرقام أفضل إذا تم استبدال النفط التقليدي الإضافي الذي يتم إنتاجه بمصادر هيدروكربونية جديدة مثل رمال القطران غير التقليدية أو النفط الثقيل، التي تتسبب بآثار كربونية أعلى بكثير. ومن ثمة، فإن تقنية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه/الاستخلاص المعزز للنفط لها فوائد واضحة في تخفيف انبعاثات الكربون. وسنقدم فيما تبقى من هذا القسم نظرة عامة على تقنية الاستخلاص المعزز للنفط بثاني أكسيد الكربون، وحالة انتشارها الحالية، وآفاقها المستقبلية.

أ. **نشاط CCS-EOR الحالي.** يوجد حالياً أكثر من 140 مشروعاً للاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون، معظمها في الولايات المتحدة. والهدف من معظم هذه المشاريع هو تخفيض صافي حقن CO<sub>2</sub> وزيادة استخلاص النفط إلى أقصى حد. ومنذ عام 2000، تم البدء بحوالي ستة مشاريع وهي في الواقع تستهدف النقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه عبر الاستخراج المعزز للنفط. ويرد ملخص لهذه المشاريع في الجدول 2.7. ولضمان نجاح مشاريع النقاط وتخزين الكربون عبر الاستخراج المعزز للنفط، هناك حاجة إلى توصيف إضافي للموقع وتقييم المخاطر، وذلك لضمان سلامة تخزين الـ CO<sub>2</sub>، ومراقبة تنفيس الغاز من المكمن والانبعاثات الهاربة المرتبطة بالمعدات السطحية، ومراقبة ما تحت السطح، وتعزيز المراقبة الميدانية باستخدام أجهزة مراقبة على السطح. ويجب اتخاذ هذه التدابير لضمان التخزين على المدى الطويل. وتتوفر تحليلات تفصيلية لجدوى الجمع بين الاستخلاص المعزز للنفط بواسطة CO<sub>2</sub> والنقاط وتخزين الكربون في تقرير حديث (IEA, 2015). وحددت وكالة الطاقة الدولية في التقرير ثلاثة سيناريوهات محتملة:

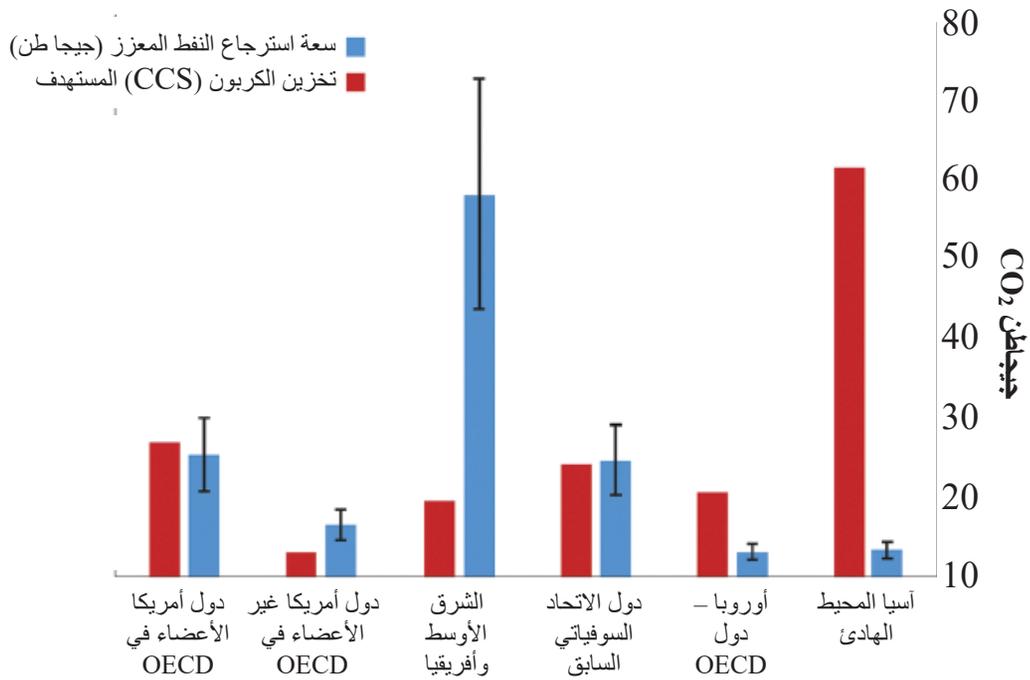
- **استخلاص (CO<sub>2</sub>-EOR+) التقليدي أو الخفيف** حيث تُستكمل تقنية الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> التقليدية بإجراء تقييم كامل لمخاطر النقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والتحقق منها مع الحد الأدنى من الزيادة في كمية CO<sub>2</sub> المحقونة. وتقدر القيم المرتبطة بهذا السيناريو استخدام صافي لحوالي 0.3 طن ثاني أكسيد الكربون/برميل النفط المنتج وتحقيق استخلاص نفط بنسبة تقارب 6.5% من النفط الأصلي الموجود في مكانه (Original Oil in Place (OOIP)).
- **استخلاص (CO<sub>2</sub>-EOR+) متقدم أو "متوازن"** حيث يكون الهدف هو زيادة كمية CO<sub>2</sub> المخزنة وكمية النفط المسترد. وتقدر القيم المرتبطة بهذا السيناريو استخدام صافي لحوالي 0.6 طن CO<sub>2</sub>/برميل نفط منتج وتحقيق استخلاص نفط بنسبة تقارب 13% من مجمل النفط في الموقع (OOIP).
- **استخلاص (CO<sub>2</sub>-EOR+) للحد الأقصى أو "الاستخلاص الثقيل"** حيث يكون التركيز على تخزين ثاني أكسيد الكربون، وتقدر القيم المرتبطة بهذا السيناريو حقن ~ 0.9 طن CO<sub>2</sub>/برميل نفط منتج وتحقيق استرداد نفط بنسبة تقارب 13% من مجمل النفط في الموقع (OOIP) وهو نفسه كما في السيناريو المتوازن، ولكن لن يكون هناك إعادة حقن المياه المنتجة أو إعادة تدوير CO<sub>2</sub>.

الجدول 2.7. المشاريع الرئيسية الحالية المتعلقة بـ CO<sub>2</sub> والتقاط وتخزين الكربون بهدف الاستخراج المعزز للنفط (IEA, 2015)

المشروع	توصيف المشروع
Weyburn-Midale; IEAGHG, Cenovus, Apache (2000)	- CO <sub>2</sub> من شمال داكوتا بيولا يزود محطة الغاز بالوقود عبر خط أنابيب بطول 320 كم - حقن 420 مليون طن من CO <sub>2</sub> حتى الآن؛ هدف 40 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون - توقع زيادة قدرها 220 مليون برميل من النفط من حقول وايبورن-ميدال
Boundary Dam Unit 3, SaskPower, October 2014 (Saskatchewan, Canada)	- محطة طاقة تعمل بالفحم الحجري (الليغنيت) بسعة 110 ميغاوات - يلتقط 95% من انبعاثات CO <sub>2</sub> (و100% من SO <sub>2</sub> ) - نقل 1 مليون طن من CO <sub>2</sub> سنوياً عبر خط أنابيب بطول 65 كيلومتراً إلى حقل وايبورن من أجل الاستخلاص المعزز للنفط - بعض الـ CO <sub>2</sub> تم تخزينه في طبقة المياه الجوفية المالحة القريبة (2 كم) (مشروع Aquistore)
NRG Petra Nova, Texas (2015)	- محطة طاقة تعمل بالفحم الحجري بسعة 240 ميغاوات مع التقاط الغاز بعد الاحتراق (90%) - حقن 1.4 مليون طن من CO <sub>2</sub> سنوياً في حقل نفط ويست رانش
Petrobras, BG Brasil, Petrogal Brasil (2013)	- 7 مليون طن من CO <sub>2</sub> سنوياً من إنتاج الغاز الطبيعي - يتم حقن الـ CO <sub>2</sub> لغرض الاستخلاص المعزز للنفط على عمق 5-7 كيلومترات تحت سطح البحر، و300 ميل قبالة شاطئ ريو - أعمق حقن لـ CO <sub>2</sub> في العالم
Saudi Aramco Uthmaniyah Project, Saudi Arabia (2015)	- 0.8 مليون طن من CO <sub>2</sub> من معالجة الغاز المستخدم في الاستخلاص المعزز للنفط من حقل العثمانية

ب. سعة التخزين لمتطلبات CO<sub>2</sub>-EOR. تبلغ انبعاثات CO<sub>2</sub> الحالية حوالي 100 مليون برميل يومياً، مقارنةً بمستويات إنتاج النفط البالغة حوالي 90 مليون برميل يومياً. وتحتاج الصناعة إلى التقاط 15-20% من إجمالي انبعاثات CO<sub>2</sub> لتحقيق أهداف تخفيف الكربون العالمية على النحو المحدد في COP21 وذلك للحفاظ على مستويات CO<sub>2</sub> في الجو عند حوالي 450 جزء في المليون. ويتراوح إجمالي السعة المطلوبة بحلول عام 2050 بين 120-160 جيجابطن من ثاني أكسيد الكربون، والتي يجب التقاطها بمعدل ~10 جيجابطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. ويعادل

ذلك انبعاثات ما يقرب من 3000 منشأة رئيسية. وتظهر السعة العالمية لتخزين CO<sub>2</sub> المعزز للنفط في الشكل 4.7 والجدول 3.7، وتوجد معظم هذه السعة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية، أما السعة المتاحة في المناطق الأخرى فمنخفضة للغاية. ويبدو أن إمكانات الاستخلاص المعزز للنفط لا تتوافق مع المناطق التي لديها أكبر نمو سكاني متوقع وأعلى استهلاك للوقود الأحفوري، باستثناء الشرق الأوسط وأفريقيا وأمريكا الشمالية ودول الاتحاد السوفيتي السابق. واستناداً إلى دراسة استقصائية للأنشطة الجارية المتعلقة بالاستخراج المعزز للنفط بثاني أكسيد الكربون، تقود الولايات المتحدة الجهود الحالية في تطوير وانتشار هذه التكنولوجيا؛ وعليه فمن المرجح أن تكون أمريكا الشمالية، وبشكل أكثر تحديداً، الولايات المتحدة الأمريكية هي الرائدة.



الشكل 4.7. الطاقة العالمية على الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> مقارنةً بأهداف التخفيف من CO<sub>2</sub> (OECD = منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية) (المصدر: Bui et al., 2018).

الجدول 3.7. إمكانية تخزين CO<sub>2</sub> المقدرة من خلال الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> في أحواض النفط العالمية (Godec, 2011).

اسم المنطقة	الاستخلاص (MMBO)	عدد الأحواض	نسبة CO <sub>2</sub> إلى النفط (طن لكل برميل)	CO <sub>2</sub> المخزن ( GtCO <sub>2</sub> )
آسيا - المحيط الهادئ	18,376	6	0.27	2.7-5.0
أمريكا الوسطى والجنوبية	31,697	6	0.32	4.7-10.1
أوروبا	16,312	2	0.29	2.5-4.7
الاتحاد السوفييتي السابق	78,715	6	0.27	11.8-21.6
الشرق الأوسط وشمال أفريقيا	230,640	11	0.3	34.6-70.1
أمريكا الشمالية/غير الولايات المتحدة	18,080	3	0.33	2.7-5.9
الولايات المتحدة	60,204	14	0.29	9.0-17.2
جنوب آسيا	—	0	N/A	—
أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى والقارة القطبية الجنوبية	14,505	2	0.32	2-4.4
المجموع	468,529	50	0.296	70-139

ومع الأخذ في الاعتبار هذه الاختلافات بين موقع سعة التخزين ومصادر الانبعاثات، فإن السعة الإجمالية للاستخلاص المعزز للنفط "الخفيف" بالـ CO<sub>2</sub> تبلغ حوالي 35 جيجا طن CO<sub>2</sub>، وهو ما يمثل حوالي 30٪ من هدف عام 2050. ويبلغ حجم النفط الإضافي المحتمل من عمليات الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> حتى عام 2050 حوالي 190 مليار برميل، في حين أن السيناريوهات "المتوازنة" و"الثقيلة" يمكن أن توفر 375 مليار برميل إضافية خلال نفس الفترة، أي أكثر من عشرة أضعاف الاستهلاك السنوي الحالي من النفط. ولذلك فإن القدرة التقنية العالمية لـ CO<sub>2</sub>-EOR على تخزين CO<sub>2</sub> وتوفير نفط إضافي كبيرة جداً، وستمكن إيرادات النفط الإضافية من تمويل المشاريع المطلوبة. كما أنه سيتمكن صناعة النفط والغاز من تحقيق الأهداف الحالية المحددة لسيناريو 2050م.

ج. اقتصاديات ثاني أكسيد الكربون-الاستخلاص المعزز للنفط (CO<sub>2</sub>-EOR). يُعد الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO<sub>2</sub> مربحاً إذا كان سعر النفط بحدود 65 دولاراً أمريكياً للبرميل وتكلفة CO<sub>2</sub> بحدود 30 دولاراً أمريكياً للطن إلا أن أسعار CO<sub>2</sub> أقل من ذلك بالنسبة لمصادر CO<sub>2</sub> الموجودة بشكل طبيعي. وقد حُددت الدوافع الرئيسية لتعزيز دور تقنية CO<sub>2</sub> للاستخلاص المعزز للنفط على النحو التالي:

- المتطلبات التنظيمية العالمية التي توفر تعريفات أفضل للانبعاثات التي يتعين تخفيفها وتحدد نطاقاً واسعاً من الحوافز المالية لتخزين ثاني أكسيد الكربون.
  - ارتفاع أسعار النفط لتعزيز قيمة النفط الإضافي المنتج لكل طن من CO<sub>2</sub> مخزن.
  - تخفيضات في التكاليف الأساسية لعملية الاستخلاص المعزز للنفط، وخاصةً متطلبات التكلفة الإضافية لالتقاط وتخزين الكربون المذكورة آنفاً.
  - تعزيز تبادل المعرفة الفنية والمالية بين أصحاب المصلحة.
- يعد الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> "الخفيف" التقليدي حالياً هو الخيار الأفضل لأسعار النفط المنخفضة وارتفاع أسعار ثاني أكسيد الكربون. ويصبح الخيارين "المتوازن" و"الثقيل" مفضلين بمجرد زيادة إيرادات التخلص من CO<sub>2</sub> من خلال ارتفاع أسعار النفط أو الترويج لاستخدام CO<sub>2</sub> كمادة خام لمجموعة متنوعة من المنتجات.
- د. **مستقبل ثاني أكسيد الكربون-الاستخراج المعزز للنفط.** الدافع الرئيسي لتعزيز عملية الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> هو تحقيق فهم أفضل لعمليات إزاحة CO<sub>2</sub> القابلة للامتزاج في الأماكن من أجل تعزيز الاستخلاص والتخزين. ومن شأن هذا الفهم أن يبني الثقة في اعتماد هذا الحل كأداة لتخفيض ثاني أكسيد الكربون، كما سيؤدي أيضاً إلى زيادة الكفاءة وانخفاض التكاليف وتخفيض المخاطر وطمأننة الجمهور بأن التكنولوجيا آمنة ومأمونة. ويجب أن تتركز أنشطة البحث والتطوير والتجارب الميدانية على قضايا الضمان الرئيسية المذكورة في قسم سابق من هذا الفصل، وخاصةً مراقبة الانبعاثات من الحقول التي يُضخ الـ CO<sub>2</sub> فيها أو الأنشطة المرتبطة بالتوقف عن استخدام الموقع. ومن المهم أيضاً أن تقوم صناعة النفط والغاز ببناء روابط أفضل مع المستخدمين النهائيين لمنتجاتهم الذين يساهمون أيضاً بالانبعاثات، مثل صناعات توليد الطاقة الكهربائية والأسمدة والحديد والصلب، حيث يمكن تأمين CO<sub>2</sub> بتكاليف أفضل أو على الأقل من خلال ترتيبات تقاسم التكاليف. وتنطبق نفس الحجج المقدمة فيما يتعلق بالنفط هنا أيضاً على استخدام استخلاص CO<sub>2</sub> المعزز للنفط من موارد الوقود الأحفوري الأخرى، مثل إنتاج الميثان المعزز من طبقة الفحم الحجري والغاز الصخري.

### 2.2.7. استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج الوقود الحيوي من الطحالب الدقيقة

تعتمد الحياة على الأرض على الطحالب، وتنتج هذه الأحياء الدقيقة المُكونة من خلية واحدة نصف الأكسجين الموجود على هذا الكوكب وتستهلك كمية كبيرة من CO<sub>2</sub> أثناء عملية التمثيل الضوئي، وتحول ضوء الشمس والـ CO<sub>2</sub> والمواد المغذية (مثل النيتروجين والفسفور) إلى كتلة حيوية و طاقة

بطريقة سريعة جداً (Huang & Tan, 2014)). وأظهر تحويل CO<sub>2</sub> إلى كتلة حيوية بواسطة الطحالب الدقيقة إمكانية جيدة جداً لخفض الـ CO<sub>2</sub> (Brennan & Owende, 2010). فبالإضافة إلى التثبيت المباشر لثاني أكسيد الكربون، تتمتع الطحالب الدقيقة بقيمة تجارية ضخمة لأنها تنتج دهون وبروتين وكربوهيدرات، والتي يمكن معالجتها بعمليات لاحقة لإنتاج الطاقة ومواد كيميائية ومواد غذائية (Mathimani & Pugazhendhi, 2019).

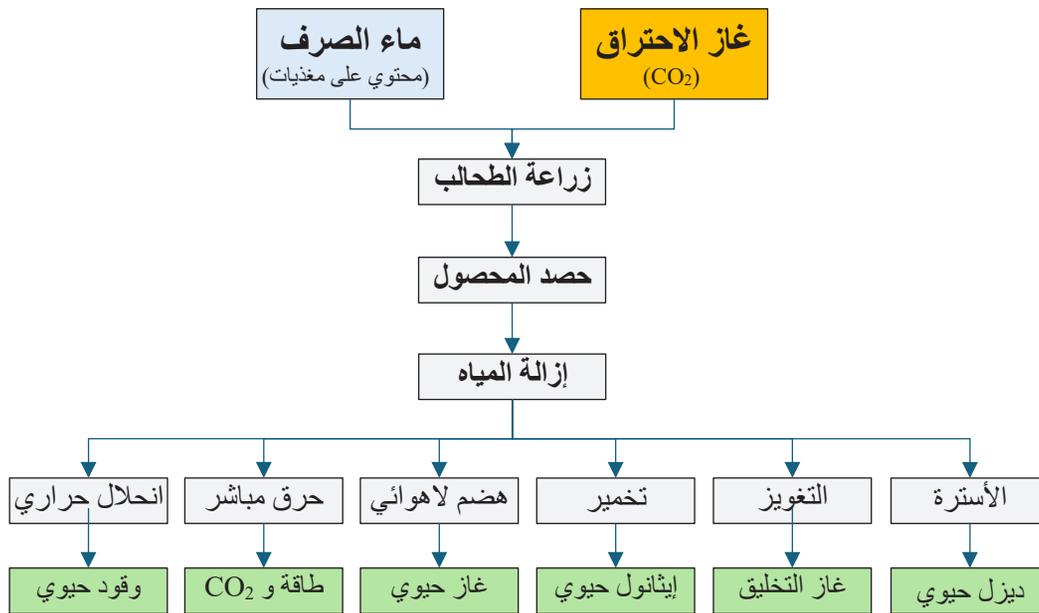
وتعتبر الطحالب الدقيقة من أهم المصادر الواعدة لإنتاج الوقود الحيوي (مثل الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي والبيوتانول الحيوي ... إلخ)، والتي تعتبر مصادر طاقة متجددة محايدة للكربون (Ou et al., 2021). وبالمقارنة مع النباتات الأرضية، تتمتع الطحالب الدقيقة بكفاءة أعلى في التمثيل الضوئي، وإنتاجية أفضل للكتلة الحيوية، وإنتاج مجموعة أوسع من الوقود الحيوي (Huang & Tan, 2014; Su et al., 2017). وأفادت وزارة الطاقة الأمريكية أن الطحالب الدقيقة يمكن أن تكون أكثر إنتاجية بمقدار 100 مرة من المواد الخام التقليدية للطاقة الحيوية، في حين أشارت وكالة الطاقة الدولية إلى أن الإنتاجية العالية للكتلة الحيوية للطحالب بإمكانها أن تقلل من المنافسة مع الاستخدامات الإنتاجية الأخرى للأراضي (Collotta et al., 2018; Voloshin et al., 2016). وفيما يتعلق بتثبيت ثاني أكسيد الكربون، يمكن للطحالب الدقيقة تثبيت CO<sub>2</sub> بنسبة 10-50 مرة أكثر من النباتات الأرضية (Mata et al., 2010)، وقد أفادت العديد من الدراسات الحديثة أنه يمكن تثبيت حوالي 1.8 طن من CO<sub>2</sub> عن طريق زراعة طن واحد من الطحالب الدقيقة (Acién Fernández et al., 2012; Farrelly et al., 2013; Wu et al., 2018).

وتعد زراعة الطحالب المناسبة لإنتاج الوقود الحيوي أمراً سهلاً نسبياً ويمكن إجراؤه تحت إشراف بسيط باستخدام مصدر مناسب للضوء ودرجة الحموضة ودرجة الحرارة ومصدر للكربون ومواد مغذية ملائمة للعملية (Anwar et al., 2020; Fared et al., 2017). يوضح الجدول 4.7 نطاق الشروط العامة لزراعة الطحالب، في حين يوضح الشكل 5.7 رسم تخطيطي للعملية بأكملها، والتي تتضمن زراعة الطحالب، وحصادها، ونزح المياه منها، وتحويلها إلى أنواع مختلفة من الوقود الحيوي. ويمكن تنمية الطحالب في أنظمة زراعة مختلفة ولكن النظام الأكثر كفاءة هو المفاعل الحيوي الضوئي ذو البرج الرأسي لأنه مدمج وغير مكلف وفعال للإنتاج على نطاق واسع (Faried et al., 2017). ويمكن استخدام غازات المداخن الصادرة عن الصناعات ومحطات الطاقة في زراعة الطحالب الدقيقة نظراً لاحتوائها على تركيزات عالية من ثاني أكسيد الكربون، وهي ضرورية لنشاط التمثيل الضوئي (Collotta et al., 2018; Zhu et al., 2014). ويمكن القيام بالاستزراع من خلال إنشاء مواقع إنتاج الطحالب بالقرب من مصادر إنتاج غاز المداخن للسماح بالحقق المباشر لغازات المداخن في

أحواض إنتاج الطحالب المفتوحة، إلا انه يتوجب إزالة الغازات الضارة (مثل أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين) قبل حقن غازات المداخن في أحواض إنتاج الطحالب لأنها تؤثر سلباً على نمو الطحالب عن طريق خفض مستوى الأس الهيدروجيني (Huang & Tan, 2014).

الجدول 4.7. نطاق الظروف المتوجب الالتزام بها لزراعة الطحالب (Adeniyi et al., 2018; )  
(Huang and Tan, 2014).

المحددات	نطاق	النطاق الأمثل
درجة الحرارة (°م)	27-16	24-18
الملوحة (جم.لتر-1)	40-12	24-20
شدة الضوء (لوكس)	1000-10,000	5000-2500
الفترة الضوئية (الضوء:الظلام، ساعات)	12:12	20:0 (min) – 16:8 (max)
الأس الهيدروجيني	7-9	8.77-8.22



الشكل 5.7. تحويل الكتلة الحيوية من الطحالب إلى وقود حيوي (المصدر: Anwar et al., 2020; )  
(Collotta et al., 2018).

وتُحصد الكتلة الحيوية من مزارع الطحالب عادةً من خلال عمليتين متتاليتين: التخثر والتلبد، يلي ذلك نزع المياه باستخدام الطرد المركزي. وتُجفف بعد ذلك الكتلة الحيوية المحصودة تحت ضوء الشمس المعتدل أولاً ثم بالفرن عند درجة حرارة 55 °م. وتُحول الكتلة الحيوية إلى وقود حيوي من خلال

عمليات كيميائية وتكنولوجيا حيوية مختلفة مثل الأسترة التحويلية، والتغويز، والهضم اللاهوائي، والاحتراق المباشر، والتحلل الحراري، والتخمير (الشكل 5.7). وينتج عن عملية الأسترة وقود الديزل الحيوي عن طريق استخلاص الزيت في البداية من الكتلة الحيوية للطحالب من خلال تكسير الخلايا ميكانيكياً واستخلاص المادة الزيتية الخام بالمذيبات، ثم تفاعل الزيت المستخرج مع الكحول (أي الميثانول أو الإيثانول) في وجود KOH أو NaOH لإنتاج إستر ميثيل الحمض الدهني (FAME) المعروف باسم وقود الديزل الحيوي (Aghbashlo et al., 2018; Sun et al., 2011). ومن ناحية أخرى، تُطبق عادةً عمليات التغويز والهضم اللاهوائي لإنتاج غاز التخليق والغاز الحيوي (أي الميثان) من الكتلة الحيوية للطحالب (Tabatabaei et al., 2020) على التوالي. وبدلاً من ذلك، يمكن استخدام الاحتراق المباشر والانحلال الحراري لإنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية (Azizi et al., 2018) بينما تُستخدم عملية التخمير لتحويل الكربوهيدرات الموجودة في الكتلة الحيوية كيميائياً إلى إيثانول حيوي (Kazemi Shariat Panahi et al., 2019).

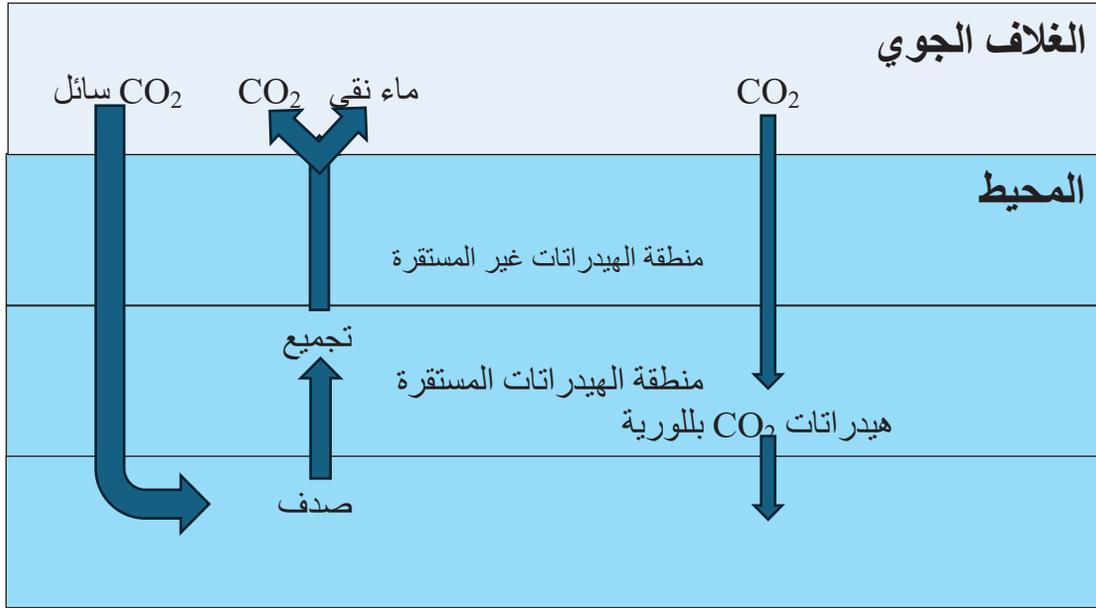
ويتضمن الجدول 5.7 مقارنة بين الانبعاثات الصادرة عن وقود الديزل الحيوي للطحالب الدقيقة مع تلك الصادرة عن الديزل البترولي. وعلى الرغم من أن الانبعاثات متماثلة نسبياً، إلا أن الوقود الحيوي الطحلبى يقدم العديد من المزايا الاقتصادية والبيئية مقارنةً بالوقود التقليدي. فمن المنظور الاقتصادي، يتمتع هذا المفهوم بإمكانيات تجارية هائلة لأنه يقدم العديد من المنتجات الثانوية ذات القيمة المضافة مثل الدهون والبروتين والكربوهيدرات. ومن وجهة نظر بيئية، فإن مفهوم إنتاج الوقود الحيوي من الطحالب الدقيقة يوفر منتجات طاقة مستدامة ناتجة عن تدوير الـ CO<sub>2</sub>. وأشارت بعض الدراسات الحديثة إلى أن استخدام الوقود الحيوي للطحالب يمكن أن يقلل من صافي انبعاثات الكربون بنسبة تقارب 78% مقارنةً بالوقود الأحفوري (Ali et al., 2017; Mathimani & Pugazhendhi, 2019)، ويرجع هذا الانخفاض بشكل رئيسي إلى حقيقة أن احتراق الوقود الحيوي يحدث في دورات كربون مغلقة، حيث يتيح نمو الطحالب واستزراعها إمكانية إعادة امتصاص انبعاثات الكربون، ويمكن أيضاً أن يرتبط انخفاض انبعاثات عدم الوقود الحيوي الطحلبى بمحتوى الأكسجين العالي مما يوفر خصائص احتراق أفضل وانبعاثات أقل. وعلى الرغم من مزايا الاستخدام المباشر لـ CO<sub>2</sub> في استزراع الطحالب الدقيقة، إلا أن التطبيقات الصناعية للتكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة لم يتم تنفيذها على نطاق واسع بسبب العوائق الاقتصادية والفنية المرتبطة بزراعة الطحالب وطرق معالجتها وتحويلها إلى المنتجات النهائية المطلوبة (Anwar et al., 2020; Ou et al., 2021; Rafiee et al., 2018).

الجدول 5.7. مقارنة بين مكونات الانبعاثات الغازية من الديزل البترولي ووقود الديزل الحيوي من الطحالب الدقيقة (Wahlen et al., 2013)

الغازات	الديزل البترولي	وقود الديزل الحيوي المنتج من الطحالب الدقيقة
ثاني أكسيد الكربون (%)	3.70	3.79
أول أكسيد الكربون (%)	0.10	0.09
هيدروكربون غير المحترق (جزء في المليون)	28.96	19.75
أكسيد النيتروجين (جزء في المليون)	25.71	21.87
الأكسجين (%)	15.30	21.87

### 3.2.7 استخدام CO<sub>2</sub> في تحلية مياه البحر

يعتبر مفهوم تحلية مياه البحر بواسطة CO<sub>2</sub> نهج مبتكر يستغل ظاهرة قدرة الـ CO<sub>2</sub> على التفاعل بشكل طبيعي مع الماء عند ضغط مرتفع ودرجة حرارة منخفضة لتكوين هيدرات الـ CO<sub>2</sub> البلورية (Al-Anezi & Hilal, 2006; Max et al., 2008). وتتشكل هذه البلورات ثلاثية الأبعاد عن طريق محاصرة جزيئات CO<sub>2</sub> في أقفاص تشكلها الروابط الهيدروجينية لجزيئات الماء (Bozorgian, 2020). وتتميز هذه الهيدرات بأنها أكثر كثافة من الماء، وتميل إلى الهبوط نحو قاع البحر والبقاء هناك لفترة طويلة من الزمن، مما يجعلها خياراً مناسباً لعزل CO<sub>2</sub> (Cao et al., 2022). ولأغراض تحلية المياه، يجب العمل على أن تطفو هذه الهيدرات بدلاً من أن تغرق، حيث يمكن تحقيق هذا الطفو الإيجابي عن طريق حقن CO<sub>2</sub> في الطور السائل، بدلاً من الغاز على عمق يبلغ حوالي كيلومتر واحد عن سطح البحر (Izquierdo-Ruiz et al., 2016). وفي هذه المنطقة المستقرة من الهيدرات، يُشكل CO<sub>2</sub> السائل "أصداف" من الهيدرات ترتفع نحو سطح الماء كما هو موضح في الشكل 6.7 وتُجمع هذه الأصداف قبل الوصول إلى منطقة الهيدرات غير المستقرة، ومن ثمة يُنتج الماء النقي عن طريق تحويل درجة الحرارة إلى البيئة المحيطة والضغط إلى الغلاف الجوي، في حين يمكن إعادة تدوير CO<sub>2</sub> لدورة الحقن التالية. وينبغي تقييم الأثر البيئي لتحلية مياه البحر بواسطة CO<sub>2</sub> بعناية لأن زيادة تركيز CO<sub>2</sub> يمكن أن يتسبب في ارتفاع حموضة البيئة البحرية المحيطة بالموقع مما يؤثر سلباً على الحياة البحرية (Saravanan et al., 2021).



الشكل 6.7. تحلية مياه البحر باستخدام CO<sub>2</sub> المحتجز (المصدر: Al-Anezi & Hilal, 2006; Anwar et al., 2020)

#### 4.2.7 الاستخدام المباشر لـ CO<sub>2</sub> في الصناعات الأخرى

تعد صناعة المواد الغذائية واحدة من أكبر مستخدمي CO<sub>2</sub> (Damiani et al., 2012). وأحد الطرق الرئيسية لاستخدام CO<sub>2</sub> في صناعة المواد الغذائية هو المشروبات الغازية. كما يتم استخدام كمية كبيرة من الـ CO<sub>2</sub> السائل في تبريد الأطعمة وحفظها. علاوة على ذلك، تم اقتراح CO<sub>2</sub> مؤخراً كبديل لغازات التبريد الاصطناعية في التبريد وتكييف الهواء في كل من التطبيقات الثابتة والمتنقلة (Barta et al., 2021)، كما تم استخدام ثاني أكسيد الكربون كغاز خامل للوقاية من الحرائق وإطفاءها (Chen et al., 2017; Ge et al., 2020).

وتسمح الخصائص الاستثنائية لـ CO<sub>2</sub> في الطور ما فوق الحرج أيضاً باستخدامه كموائع ممتازة في توليد الطاقة، وكمذيب آمن لاستخلاص المواد الغذائية، وكمذيب نظيف لصبغ المنسوجات. ونال استخدام CO<sub>2</sub> في الطور ما فوق الحرج في توليد الطاقة اهتماماً خاصاً نظراً للتحسن الذي تم تحقيقه في نقل الحرارة وتصميم التوربينات والكفاءة العامة (Chen et al., 2018; Muhammad et al., 2019). واستخدم CO<sub>2</sub> فوق الحرج كمذيب بنجاح في العديد من عمليات الاستخلاص، بما في ذلك استخلاص الدهون والزيوت النباتية والأحماض الدهنية (Rochfort et al., 2020; Valluri et al., 2022). ويتمتع الاستخلاص بواسطة CO<sub>2</sub> فوق الحرج بمزايا تفوق تلك العائدة للمذيبات العضوية

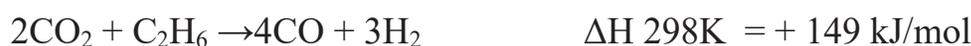
التقليدية، مثل التأثير البيئي الضئيل وتجنب المذيبات الضارة في المنتجات الغذائية. ويُعد استخدام CO<sub>2</sub> فوق الحرج في صباغة المنسوجات أيضاً تطبيقاً واعداً آخر من المنظور البيئي، مع الأخذ في الاعتبار كمية مياه الصرف الصحي المرتبطة بصناعة النسيج. وأشارت الجهود البحثية الأخيرة إلى أن استخدام CO<sub>2</sub> فوق الحرج في الصباغة يمكن أن يقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة والمياه من خلال التبسيط الذي تم إدخاله على خطوة التجفيف وفصل المذيب عن الأصباغ (Abou Elmaaty & Abd El- (Aziz, 2018; Ramsey et al., 2009).

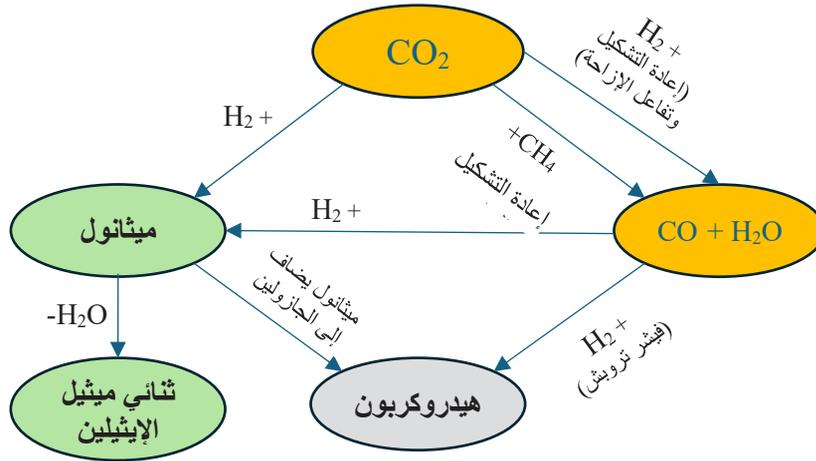
### 3.7. الاستخدام غير المباشر لـ CO<sub>2</sub> (الاستخدام الكيميائي)

حاز موضوع تطوير استخدام CO<sub>2</sub> كسلعة لإنتاج المواد الكيميائية على اهتمام مكثف على مدى العقود القليلة الماضية بسبب إمكاناته العالية للمساهمة في خفض الانبعاثات. وتنعكس اتجاهات التطوير في برامج المختبر الوطني الأمريكي لتكنولوجيا الطاقة (NETL)، والذي يركز على ثلاثة مسارات: (أ) استخدام الطحالب لإنتاج المنتجات الحيوية و (ب) التحويل التحفيزي لإنتاج الوقود والمواد الكيميائية و(ج) التمدن أو التحويل إلى مواد بناء أو إنتاج مواد غير عضوية (NETL, 2022). وطرق التحويل هذه متشابهة بشكل أساسي، حيث يتم استهلاك الـ CO<sub>2</sub> بشكل أساسي عن طريق تفاعله مع الهيدروجين أو مواد كيميائية مختزلة أخرى، وأحياناً بوجود مادة حفازة. ويتم توفير الطاقة المطلوبة لدفع التفاعلات المطلوبة إما حرارياً أو كهربائياً أو ضوئياً. ونتيجة للأبحاث المكثفة، حدثت تطورات هامة خلال العقود الماضية في التحويل المستحث الكهروكيميائي. واستعرضت شركة Küngas (Küngas, 2020) مؤخراً تحويل CO<sub>2</sub> إلى CO باستخدام تقنيات كهروكيميائية منخفضة وعالية الحرارة. ويرجع التركيز على CO إلى الاستخدام الواسع النطاق له كمادة أو كتلة بناء في الصناعة الكيميائية. وأظهرت خلايا التحليل الكهربائي للأكسيد الصلب ذات درجة الحرارة المرتفعة أداءً أعلى بكثير مقارنةً بالتحليل الكهربائي عند درجة حرارة منخفضة والتحليل الكهربائي للكربونات المنصهرة. وقد تم بالفعل توسيع نطاق التكنولوجيا ويجري التخطيط لإنشاء مصانع تجارية. وأخيراً، من المهم الإشارة إلى أن الاهتمام باستخدام CO<sub>2</sub> قد اكتسب زخماً كبيراً على مدار العقد الماضيين وأن العديد من المؤسسات والجمعيات والمجالس تنشط في معالجة الفجوات التكنولوجية الحالية ودعم تطوير السياسات واللوائح ذات الصلة ((Berghout, 2019; CURC, 2022; NARUC, 2022; NETL, 2022).

ويعتبر تحويل CO<sub>2</sub> إلى مواد كيميائية ومنتجات طاقة أمر مشجع ويمكن أن يسهم بشكل كبير في تخفيف ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن القيود الديناميكية الحرارية في تحويل CO<sub>2</sub> والخمول النسبي للـ CO<sub>2</sub> تجعل تطوير عمليات ومواد حفازة أكثر كفاءةً ضروريةً لا غنى عنها للتخفيف من CO<sub>2</sub> وإنتاج منتجات ذات قيمة مضافة (Alper & Yuksel Orhan, 2017; Chauvy & De Weireld, 2020). وفي هذا الصدد، تجدر الإشارة إلى أن كمية CO<sub>2</sub> المستهلكة في توليد المواد الكيميائية منخفضة نسبياً مقارنةً بانبعاثات CO<sub>2</sub> العالمية. لذلك، نوه بعض الباحثين إلى أن تحويل CO<sub>2</sub> إلى منتجات الطاقة هو الطريق الأكثر جدوى لتخفيض انبعاثات CO<sub>2</sub> وتخفيض الاعتماد على الوقود الأحفوري (Centi & Perathoner, 2009; Saravanan et al., 2021). ومن أمثلة منتجات الطاقة هذه الميثانول، وأثير ثنائي الميثيل (DME)، والميثان، وكربونات ثنائي الميثيل (DMC). ومع ذلك، فإن تكلفة منتجات الطاقة المستدامة التي يتم تدويرها باستخدام CO<sub>2</sub> لا تزال غير قادرة نسبياً على المنافسة مع تكلفة منتجات الوقود الأحفوري، ولا تزال معظم التقنيات المرتبطة بهذا المفهوم قيد التطوير. وعلاوةً على ذلك، تتطلب إعادة تدوير CO<sub>2</sub> إلى وقود مصدراً نظيفاً ومستداماً وغير مكلف للهيدروجين، وهو غير متوفر حالياً على نطاق تجاري (AlHumaidan et al., 2023). ويوضح الشكل 7.7 المسارات المختلفة التي يمكن من خلالها تحويل CO<sub>2</sub> إلى منتجات طاقة، بينما يقارن الجدول 6.7 خصائص منتجات الطاقة المعاد تدويرها من الـ CO<sub>2</sub> مع خصائص الوقود الأحفوري التقليدي (Huang & Tan, 2014).

ويعد الالتقاط المتكامل لـ CO<sub>2</sub> وتحويله (Integrated CO<sub>2</sub> Capture and Conversion) ((ICCC)) عملية ناشئة وواعدة قادرة على تخفيض انبعاثات CO<sub>2</sub> وإنتاج منتجات ذات قيمة مضافة في الموقع مثل الميثان وغاز التخليق. وتبدأ عملية ICCE النموذجية من مرحلة التقاط ثاني أكسيد الكربون، حيث يتم تطبيق مواد مزدوجة الوظيفة ((Dual Function Materials (DFMs)) لالتقاط CO<sub>2</sub> من غازات المداخن أو الهواء المحيط حتى التشبع. وبعد ذلك، تُعرض الـ DFMs الغازية إلى مواد مختزلة، مثل H<sub>2</sub> وCH<sub>4</sub>، لبدء مرحلة تحويل CO<sub>2</sub> في الموقع. ويُحول الـ CO<sub>2</sub> الممتص في هذه المرحلة إلى منتجات مختلفة (على سبيل المثال، CH<sub>4</sub>، CO، أو غاز التخليق)، ويُعاد تنشيط الـ DFMs في نفس الوقت وفقاً للتفاعلات التالية:





الشكل 7.7. مخطط الاستخدام غير المباشر لـ CO<sub>2</sub> (المصدر: Van-Dal & Bouallou, 2013).

الجدول 6.7. مقارنة خصائص الوقود المعاد تدويره من CO<sub>2</sub> مع خصائص الهيدروجين والوقود

التقليدي (Huang & Tan, 2014)

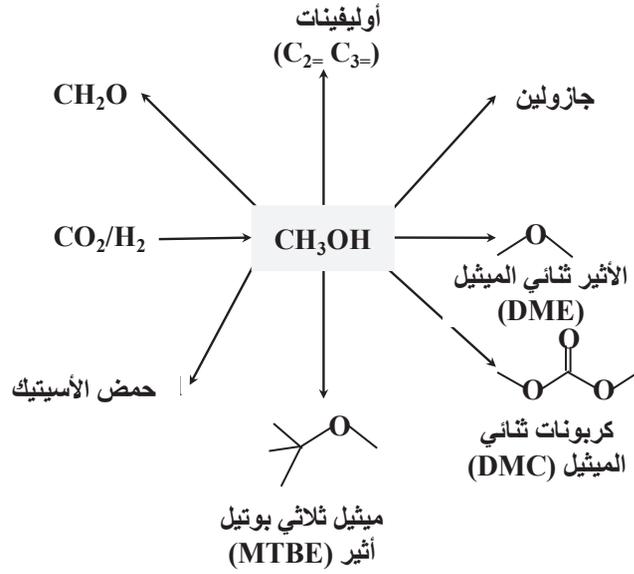
الوقود التقليدي			الهيدروجين	وقود منتج بإعادة تدوير CO <sub>2</sub>			خاصية
الديزل	البنزين	البروبان		DME	DMC	الميثانول	
86/14/0	88-85/ 12-15/0	82/18/0	-	52/13/35	40/7/53	38/12/50	C/H/O (الكتلة %)
180-360	30-190	-42	-253	-25	90	65	نقطة الغليان (م°)
>63	-43	-104	-253	-41	18	11	نقطة الاشتعال (م°)
0.84	0.75	0.50	$8.9 \times 10^{-5}$	0.67	1.07	0.79	الكثافة (كجم/لتر)
0.6-7.5	1.4-7.6	0.4-2.1	4-74	3.4-17	4.2-13	5.5-36	حدود القابلية للاشتعال (الحجم %)
15-25	90-100	112	>130	35	127	100	رقم الأوكتان البحثي (RON)
40-55	-	5	-	55-60	-	5	رقم السيتان
45.8	47.0	50.2	142.2	31.7	19.6	22.9	قيمة التسخين العالية HHV (جيجا جول/طن)
42.8	44.0	46.3	120.2	28.9	13.5	20.1	قيمة التسخين المنخفضة LHV (جيجا جول/طن)

وتركزت جهود التطوير على تفاعلات التحول إلى ميثان (ICCC-Met)، وإزاحة الماء-الغاز العكسي (ICCC-RWGS)، وإعادة التشكيل الجاف (ICCC-DR) حتى الآن منذ اقتراح المفهوم في عام 2015. وأجريت دراسات مستفيضة حول المواد المزدوجة الوظيفة حتى الآن. ووجد أن تصميم

المفاعلات وتحسين الظروف التشغيلية للعملية يعتمد على منتجات التفاعل المستهدفة والمادة المزوجة الوظيفة المستخدمة. وبشكل عام، تُستخدم المواد الماصة مثل  $K_2O$  و  $Na_2O$  و  $MgO$  و  $CaO$  عند درجات حرارة مختلفة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون. وينتج عن العملية مواد مختلفة مثل الميثان، وثاني أكسيد الكربون، وغاز التخليق في درجات حرارة مختلفة بناءً على الديناميكا الحرارية وتحدد المنتجات بواسطة حركيات التفاعلات وأنواع المواد الحفازة. أما بالنسبة للـ DFMs، فقد أُجريت أبحاث حول المواد المستندة إلى Ni على نطاق واسع لكل عملية من عمليات الـ ICCC المذكورة أعلاه، في حين تم دراسة الـ DFMs المستندة إلى Ru في الغالب لعملية الـ ICCC-Met. وطُورت أيضاً مواد مزوجة الوظيفة أخرى معتمدة على فلزات أخرى، مثل Cu و Fe و Co وما إلى ذلك، بشكل أساسي لعملية الـ ICCC-RWGS. ولا تزال عمليات الـ ICCC في مراحلها الأولى من التطوير، ومن الضروري إجراء المزيد من الدراسات لتعزيز أدائها وتحقيق تطبيقاتها الصناعية (Chen et al., 2022a).

### 1.3.7 استخدام $CO_2$ في إنتاج الميثانول

يعتبر تخليق الميثانول من خلال تحويل  $CO_2$  طريقة واعدة للتخفيف من انبعاثات  $CO_2$ . والميثانول ( $CH_3OH$ )، المعروف أيضاً باسم الكحول الميثيلي، هو سائل عديم اللون ذو رائحة مميزة. ويُعتبر مركباً مهماً لتصنيع العديد من المواد الكيميائية (الشكل 8.7) مثل حمض الأسيتيك، والفورمالدهيد، وميثيل ثلاثي بوتيل إيثر (MTBE)، وثنائي ميثيل إيثر (DME)، وميثيل امين (Dalena et al., 2018). كما يمكن استخدام الميثانول مباشرة كوقود في المركبات نظراً لخصائص احتراقه الممتازة وانبعاثاته المنخفضة (Olah et al., 2009). ويعتبر تشغيل المركبات بالميثانول النقي فعالاً للغاية، إلا أن استخدامه لهذا الغرض مقيد بسبب سمية الميثانول المرتفعة. وللتغلب على سمية الميثانول وانخفاض كثافة الطاقة، يُخاط الميثانول مع الجازولين بنطاق واسع من التركيزات (Olah et al., 2009). وعلاوةً على ذلك، بالإمكان استخدام الميثانول كوقود لتوليد الكهرباء عن طريق تقنية خلايا وقود الميثانول المباشرة (Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)) (Kamarudin et al., 2009)، أو استخدامه لتخزين الهيدروجين في صورة سائلة (AlHumaidan et al., 2023; Aziz et al., 2020).

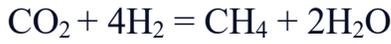


الشكل 8.7. طرق تحويل الميثانول (المصدر: Quadrelli et al., 2011).

ويمكن إنتاج الميثانول من CO<sub>2</sub> إما مباشرةً من خلال هدرجة CO<sub>2</sub> أو بشكل غير مباشر عن طريق تحويل CO<sub>2</sub> إلى CO ثم الهدرجة، كما هو موضح سابقاً في الشكل 7.7 (Dalena et al., 2018; Goepfert et al., 2014). وقد تمت دراسة إنتاج الميثانول من CO<sub>2</sub> المحتجز من الناحية النظرية على نطاق تجاري (Pérez-Fortes et al., 2016; Van-Dal & Bouallou, 2013)، حيث اكدت النتائج جدوى المفهوم في حال توفر هيدروجين خالي من الكربون منتج بواسطة التحليل الكهربائي للمياه والطاقة المتجددة. وقد أثبتت عملية تخليق الميثانول من الـ CO<sub>2</sub> المحتجز والهيدروجين المتجدد بسعات مرتفعة نسبياً في وحدات تجريبية نمطية (Quadrelli et al., 2011). وتجدر الإشارة أخيراً إلى تزايد معدل الإنتاج العالمي للميثانول خلال العقود الماضية بمتوسط 10% سنوياً، وتمتلك الصين 50% من السعة الإنتاجية والاستهلاك العالمية للميثانول (Pérez-Fortes et al., 2016). ومثل هذا الطلب المرتفع جعل إنتاج الميثانول من CO<sub>2</sub> موضوعاً بحثياً غزير الإنتاج، حيث تم تحقيق العديد من التطورات الحديثة (Abdelaziz et al., 2017; Albo et al., 2017; Saravanan et al., 2021).

### 2.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج الميثان

يعتبر إعادة تدوير CO<sub>2</sub> المحتجز إلى غاز الميثان (CH<sub>4</sub>) نهجاً مستداماً يمكن أن يقلل من استهلاك الوقود الأحفوري ومن ثم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويتحول الـ CO<sub>2</sub> إلى ميثان من خلال تفاعل ساباتيير (Sabatier reaction)، حيث يتم هدرجة CO<sub>2</sub> بالكامل لتكوين الميثان والماء:



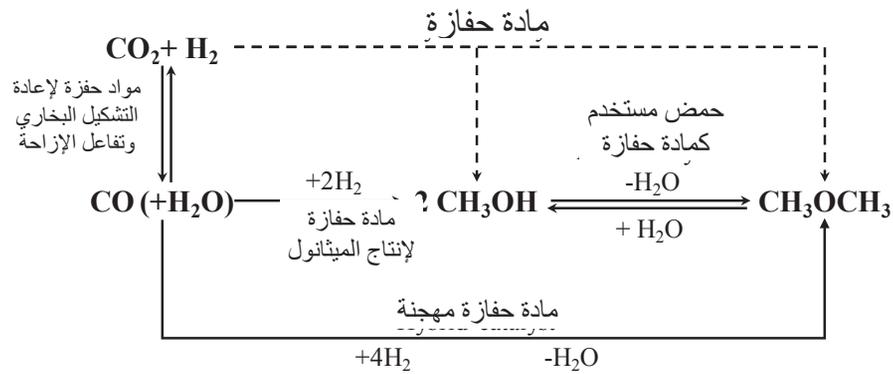
$$\Delta H_{298\text{K}} = -165 \text{ kJ/mol}$$

ويعتبر التفاعل مناسباً من الناحية الديناميكية الحرارية، ومع ذلك، فإن اختزال الكربون المؤكسد بالكامل إلى ميثان له قيود حركية ويتطلب مواد حفازة لتحقيق معدل تفاعل مُرضٍ وانتقائية مقبولة للمنتج. وعلى مدى العقود الماضية، نجح الباحثون في تحقيق تحسينات كبيرة في تفاعلات تحويل  $\text{CO}_2$  إلى ميثان من خلال تحسين الأداء التحفيزي وآلية التفاعل وتصميم المفاعل ومعايير التشغيل (Saravanan et al., 2021; Wannakao et al., 2015; Wei & Jinlong, 2011). ووفقاً للأوراق العلمية المنشورة، يعد Ru و Rh أكثر الفلزات نشاطاً وانتقائية في تفاعلات تحويل  $\text{CO}_2$  إلى ميثان، ومع ذلك يستخدم الـ Ni على نطاق أوسع لأنه أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية في التطبيقات التجارية (Loder et al., 2020; Wei & Jinlong, 2011). ويعتبر العائق الرئيسي أمام المواد الحفازة المعتمدة على النيكل هو ثباتها، حيث يؤدي التفاعل بين حبيبات النيكل والـ  $\text{CO}_2$  إلى تليد الفلز بسبب تكوين كربونيلات نيكل متحركة. ويمكن حل مشكلة التليد عن طريق زيادة انتشار حبيبات النيكل باستخدام فلزات نبيلة (أي Ru و Rh) كفلزات مروجية (Ocampo et al., 2011). وتتأثر أيضاً الخواص التحفيزية (أي النشاط والانتقائية والثبات) في تفاعلات تحويل  $\text{CO}_2$  إلى ميثان بطبيعة المواد المستخدمة كدعامة (Italiano et al., 2020; Wei & Jinlong, 2011)، حيث أفادت الدراسات الحديثة أن  $\text{CeO}_2$  هو الأكثر نشاطاً وفعالية والدعم الانتقائي في تفاعلات تحويل  $\text{CO}_2$  إلى ميثان (Tada et al., 2014; Ye et al., 2020). ووفقاً لهذه الدراسات، يُعزى التحسين في نشاط تفاعلات تحويل الـ  $\text{CO}_2$  إلى ميثان وانتقائية الميثان مع  $\text{CeO}_2$  بشكل أساسي إلى قدرته على تشتيت الفلزات النشطة بدرجة عالية (أي Ni و Ru) وقدرته على تعزيز اختزال الـ  $\text{CO}_2$  إلى CO ومركبات كربونية. وأفادت دراسات أخرى أن الزيوليتات هي أيضاً مواد داعمة محتملة لتفاعلات تحويل  $\text{CO}_2$  إلى ميثان (Eckle et al., 2011; Graça et al., 2014).

### 3.3.7 استخدام $\text{CO}_2$ في إنتاج ثنائي ميثيل الأثير (DME)

ثنائي ميثيل الأثير (DME،  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) هو غاز عديم اللون وغير سام يمكن تصنيعه من ثاني أكسيد الكربون باستخدام أساليب مختلفة، كما هو موضح في الشكل 9.7 (De Falco et al., 2016; Quadrelli et al., 2011; Schakel et al., 2016). ففي إحدى الطرق، يتم تحويل  $\text{CO}_2$  إلى CO من خلال تفاعل RWGS، ثم يتم تحويل غاز التخليق إلى ميثانول، والذي يُحول لاحقاً إلى DME باستعمال مادة حفازة حمضية. وبدلاً من ذلك، يمكن تصنيع الـ DME مباشرةً من غاز التخليق باستخدام

مادة حفازة هجين ثنائية الوظيفة تجمع بين هدرجة  $\text{CO}_2$  ونزع هيدروجين الميثانول. وقد قام بعض الباحثين (Luu et al., 2016) أيضاً بأبحاث حول الإنتاج المباشر للـ DME باستخدام إعادة التشكيل الجاف للميثان (DMR) وإعادة التشكيل المزدوج (BiR). وتم تفضيل DMR على BiR لأنه ينتج غازاً تخليقياً يحتوي على نسبة  $\text{H}_2/\text{CO}$  بقيمة 1، وهي النسبة المثالية لتخليق الـ DME. ويتم استخدام DME كبديل واعد لوقود الديزل أو كمادة مضافة في محركات الديزل نظراً لخواصه وبالتحديد ارتفاع عدد السيتان ومحتواه المرتفع من الأكسجين، مما يعزز بشكل كبير عملية الاحتراق ويقلل من انبعاثات  $\text{CO}_2$  وأكاسيد النيتروجين والجسيمات (Cai et al., 2016). ويستخدم DME أيضاً كبديل لغاز البترول المسال (LPG) بسبب نقطة غليانه المنخفضة، ويعتبر DME وسيطاً في إنتاج العديد من المواد الكيميائية والبتروكيماويات، مثل أسيتات الميثيل وكبريتات ثنائي الميثيل والبروبيلين (Anggarani et al., 2014; Quadrelli et al., 2011).



الشكل 9.7. مخطط تخليق أثير ثنائي الميثيل (DME) (المصدر: Quadrelli et al., 2011).

#### 4.3.7 استخدام $\text{CO}_2$ في إنتاج كربونات ثنائي الميثيل (DMC)

كربونات ثنائي الميثيل (DMC،  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) مادة كيميائية صديقة للبيئة ولها العديد من المزايا مثل قابليتها للتحلل الحيوي، وبالتالي انخفاض امكانية تراكمها في البيئة، وانخفاض ثباتها وسميتها (Huang & Tan, 2014). وتُظهر الـ DMC أيضاً نشاطاً كبيراً تجاه الأمينات والفينولات، مما يجعلها مادة قابلة للتفاعل ذات قيمة لإنتاج العديد من المواد العضوية المفيدة (Keller et al., 2010). وعلاوةً على ذلك، تستخدم الـ DMC كمادة مضافة لرفع عدد الأوكتان في الوقود بسبب محتواها العالي من الأكسجين (Pacheco & Marshall, 1997). ويمكن أن تُستخدم أيضاً كمذيب بديل أو مادة مضافة في الدهانات والمواد اللاصقة نظراً لقوة ذوبانها (Keller et al., 2010). علاوةً على ذلك،

فإن إضافة DMC إلى الالكتروليتات في بطارية ليثيوم أيون يزيد بشكل كبير من الموصلية ويحسن كفاءة الدورات الكهروكيميائية (Naejus et al., 1998). وهناك عدة طرق لتصنيع DMC، من بينها التوليف المباشر لـ DMC من CO<sub>2</sub> والميثانول. وعلى الرغم من الجهود المبذولة لتسهيل التوليف المباشر لـ DMC، إلا أن العملية لا تزال محصورة في نطاق الأبحاث المخبرية وبعيدة عن التسويق بسبب قيود التوازن الديناميكي الحراري. وللتغلب على هذه القيود، تم اقتراح العديد من المواد الحفازة المتجانسة وغير المتجانسة إلى جانب العديد من التقنيات الجديدة، بما في ذلك تطبيق نظام فوق الحرج، ونظام الكهروكيميائي، والنظام السائل الأيوني، ومفاعل الغشاء، والترطيب بالنتريلات (Cao et al., 2012; Tamboli et al., 2017; Zhang et al., 2021).

### 5.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج غاز التخليق

يمكن أيضاً استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج غاز التخليق (CO و H<sub>2</sub>) من خلال عمليات إعادة التشكيل المختلفة مثل إعادة تشكيل الميثان الجاف (DMR)، وإعادة تشكيل الميثان المدمج (CMR)، وإعادة التشكيل الثلاثي للميثان (TRM). ولقد حظيت عمليات إعادة التشكيل هذه مؤخراً باهتمام كبير لأنها تساهم بشكل مباشر في الحد من اثنين من الغازات الرئيسية المسببة للاحتباس الحراري (أي ثاني أكسيد الكربون والميثان) عن طريق تحويلهما إلى غاز التخليق، والذي يعتبر مادة خام قيّمة للعديد من العمليات الكيميائية (Garcia et al., 2015). وفي الـ DMR، يتم تصنيع غاز التخليق من خلال تفاعل ماص للحرارة بين CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> (Mondal et al., 2016; Muraza & Galadima, 2015; Usman et al., 2015). ويشير التحليل الديناميكي الحراري للـ DMR إلى أن تحويل الميثان يبدأ عند 350°م تقريباً ويصل إلى 99٪ تقريباً عند 900°م. وعند درجة حرارة إعادة التشكيل المنخفضة نسبياً، تكون انتقائية التفاعل أكثر تجاه الكربون الصلب والماء، ولكنها تتحول تدريجياً نحو تكوين غاز التخليق مع زيادة درجة الحرارة (Noor et al., 2013). وعادةً ما يتأثر إنتاج غاز التخليق في DMR بالحدوث المتزامن لتفاعل إزاحة الماء-الغاز العكسي (RWGS)، مما يؤدي إلى أن تكون نسبة غاز التخليق أقل من واحد (1 > H<sub>2</sub>/CO). ولتخفيض التفاعل العكسي RWGS وزيادة إنتاج الهيدروجين، يجب القيام بعملية الـ DMR عند درجة حرارة معالجة أعلى من 850°م (Pakhare & Spivey, 2014). ولتعزيز أداء DMR وإنتاج غاز التخليق، ركزت الدراسات الحديثة على وسائل تعزيز التفاعل الديناميكي الحراري في ظروف معالجة مختلفة (Ayodele et al., 2019; Carapellucci &

(Giordano, 2020; Chein & Hsu, 2019) وحاولت دراسات أخرى أيضاً تخفيض تكوين فحم الكوك في DMR من خلال تطوير مواد حفازة يمكن أن تعزز امتصاص  $CO_2$  (Abdullah et al., 2017; Al-Fatesh et al., 2017; Djinovic & Pintar, 2017; Wang et al., 2020). وعلى الرغم من الجهود الكبيرة التي يبذلها الباحثون في جميع أنحاء العالم لتطوير DMR، فإن العملية لم تصل بعد إلى المستوى الصناعي بسبب ارتفاع تكاليف التشغيل.

وتعتبر CMR عملية إعادة تشكيل بخاري أخرى تستخدم  $CO_2$  لإنتاج غاز التخليق. وتجمع هذه العملية بشكل أساسي بين عمليتين لإعادة التشكيل (DMR و SMR)، وبالتالي تستخدم عاملين مؤكسدين:  $H_2O$  و  $CO_2$ . وتتمثل المزايا الرئيسية لـ CMR في المرونة في إنتاج غاز التخليق بنسب  $H_2/CO$  مختلفة والقدرة على خفض تكوين فحم الكوك (Arora & Prasad, 2016; Pham Minh et al., 2018). وتُعزى القدرة على إنتاج غاز التخليق بالنسب المرغوبة إلى المرونة في التحكم في تكوين المواد المتفاعلة، في حين أن الانخفاض في الترسيب الكربوني يعزى إلى وجود مادتين مؤكسدين، مما يعزز بشكل كبير تغويز فحم الكوك. وتم نشر تطورات جديدة في أداء CMR في عدد من الأوراق العلمية الحديثة (Fuqiang et al., 2019; Jokar et al., 2018).

كما تعتبر TRM أيضاً عملية إعادة تشكيل بخاري تحفيزية أخرى تستخدم  $CO_2$  في إنتاج غاز التخليق (Pham Minh et al., 2021). وتستخدم العملية مزيجاً من ثلاث مواد مؤكسدة:  $H_2O$ ، و  $CO_2$ ، و  $O_2$ ، وبالتالي، يمكن اعتبارها مزيجاً من ثلاث عمليات: SMR، و DMR، والأوكسدة الجزئية للميثان (Partial Oxidation of Methane (POM)). وتتمتع عملية TRM بالمرونة تماثل المرونة التي تتمتع بها عملية CMR لإنتاج غاز التخليق بنسب مختلفة من  $H_2/CO$ ، وهو أمر ضروري للعديد من العمليات اللاحقة مثل تخليق الميثانول وتفاعلات التخليق Fisher-Tropsch. وعلى الرغم من أن TRM معروفة بترسبات فحم الكوك المنخفضة، إلا أن العملية لا تزال تواجه صعوبات فنية تحد من تنفيذها على المستوى الصناعي (Arora and Prasad, 2016). وتتعلق إحدى هذه الصعوبات بالتحكم السليم في المواد المؤكسدة الثلاثة، حيث أن أدنى اضطراب في توازن اللقيم يمكن أن يؤثر بشكل كبير على أداء العملية. ويعد ثبات المادة الحفازة تحدياً آخر في TRM، على الرغم من الانخفاض الملحوظ في تكوين فحم الكوك. ومن أمثلة أسباب فقدان المادة الحفازة لنشاطها في TRM التحلل الحراري (التليد)، وتفاعلات الأبخرة مع المواد الصلبة، والتسمم بشوائب الغاز (Pham Minh et al., 2021). وتم تطوير مواد حفازة متنوعة من أجل TRM لتحسين الثبات التحفيزي ومعدل التحويل وانتقائية المنتج (Garcia-Vargas et al., 2015; Kumar et al., 2019; Pham et al., 2021; Singha et al., 2016; Zou et al., 2016). وركزت دراسات أخرى أيضاً على الجوانب الأساسية

لإدارة TRM مثل الديناميكا الحرارية وآلية التفاعل ( Borreguero et al., 2020; Zhang et al., ) (2014).

### 6.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج اليوريا

يعد تخليق اليوريا (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) طريقة أخرى قابلة للتطبيق لاستخدام ثاني أكسيد الكربون. وإنتاج اليوريا هو في الأساس عملية من خطوتين حيث يتم أولاً تفاعل الأمونيا السائلة (NH<sub>3</sub>) مع CO<sub>2</sub> لتكوين الكاربامات، والتي تتحلل بعد ذلك إلى اليوريا. وتعتبر اليوريا المركبة ضرورية للعديد من التطبيقات بما في ذلك تصنيع الأسمدة والبلاستيك والعديد من المنتجات التجارية الأخرى. وهناك تقنيات مختلفة لإنتاج اليوريا، ولكن التقنيات الأكثر استخداماً هي عمليات تجريد الأمونيا وعمليات تجريد ثاني أكسيد الكربون، المسؤولة عن إنتاج 70% من الطلب العالمي على اليوريا ( Quadrelli et al., ) (2011). وقامت بعض الدراسات بتقييم استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج اليوريا وأشارت إلى أن هذا المفهوم لا يمكن اعتباره نهجاً قابلاً للتطبيق للتخفيف من CO<sub>2</sub> نظراً لأن كمية CO<sub>2</sub> المتولدة في إنتاج اليوريا تتجاوز الكمية المستهلكة ( Muradov, 2014; Rafiee et al., 2018; Saravanan et al., ) (2021).

### 7.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في إنتاج المواد البوليمرية

يعتبر الباحث إينوي (Inoue) الرائد في استخدام CO<sub>2</sub> في تصنيع البوليمرات في عام 1969، عندما قام ببلورة CO<sub>2</sub> مع الإيبوكسيد لإنتاج البولي كربونات (Inoue et al., 1969). وبعد عقود من الجهود المتواصلة، تقدم تصنيع المواد البوليمرية المعتمدة على CO<sub>2</sub> بشكل ملحوظ. ومن أمثلة البوليمرات المعتمدة على CO<sub>2</sub> كربونات البولي بروبيلين (PPC) (Du et al., 2004) وكربونات البولي سيكلوهكسين (PCHC) (Liu et al., 2015). ويعتبر PPC نوعاً فريداً من البلاستيك المعتمد على CO<sub>2</sub> القابل للتحلل ويعتبر البديل الأخضر للبولي إيثيلين، في حين أن PCHC معروف بدرجة حرارة التحول الزجاجي العالية وقوته الميكانيكية المتميزة ويعتبر البديل الأخضر للبولي ستايرين (Coa and Wang, 2021). وتعد البوليوولات المعتمدة على CO<sub>2</sub> أيضاً بدائل مهمة للبوليوولات التقليدية المعتمدة على البترول، والتي يمكن أن تساهم في تخفيف CO<sub>2</sub> وتخفيض البصمة الكربونية في العديد من العمليات الكيميائية. وتم دمج البوليوولات المعتمدة على CO<sub>2</sub> بنجاح لتكوين البولي يوريثان (PUs) ذات الخصائص الحرارية والميكانيكية المختلفة، مع ذاكرة شكل ممتازة وخصائص مقاومة للتآكل (Alagi et al., 2017). وناقش العديد من الأوراق العلمية والمراجعات المنشورة مؤخراً بشكل شامل الوظائف المتنوعة للمواد البوليمرية المعتمدة على CO<sub>2</sub> والإنجازات العلمية في تطوير المواد حفازة

وتقنيات التحضير والتصنيع ( Grignard et al., 2019; Kozak et al., 2018; Li et al., 2018; )  
(Muthuraj & Mekonnen, 2018; Song et al., 2020).

### 8.3.7 استخدام CO<sub>2</sub> في التمعدن أو إنتاج مواد معدنية (Minerals)

يشير تمعدن الكربونات إلى عمليات يتحول من خلالها الـ CO<sub>2</sub> إلى مواد معدنية صلبة وغالباً ما تكون على شكل صخور، مثل الكربونات غير العضوية، عبر تفاعله مع أيونات بعض الفلزات. ومن أكبر مزايا هذا النهج هو أن CO<sub>2</sub> يرتبط بشكل دائم بالصخور التي تكونت ولا يمكنه الهروب مرة أخرى إلى الغلاف الجوي. ويحدث تمعدن الـ CO<sub>2</sub> أيضاً كعملية طبيعية يتم من خلالها إزالة 0.3 جيجا طن من CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي سنوياً. ويتم ذلك عندما تتفاعل أكاسيد الأرض القلوية مع الـ CO<sub>2</sub> لإنتاج معادن عالية الثبات، مثل CaCO<sub>3</sub> و MgCO<sub>3</sub> (Rosa et al., 2022). وأدخل مفهوم تمعدن CO<sub>2</sub> إلى صناعة الأسمنت والخرسانة، والتي تعتبر واحدة من أكبر الصناعات التي تنتج انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، حيث تمثل 5-8% من جميع انبعاثات CO<sub>2</sub> البشرية المنشأ (Jang et al., 2016). وتوضح بصمة CO<sub>2</sub> في صناعة الأسمنت أن طناً واحداً من الأسمنت ينتج طناً واحداً من ثاني أكسيد الكربون. ويعزى هذا الانبعاث الكبير لـ CO<sub>2</sub> بشكل أساسي إلى تحلل الخامات المعدنية المستخدمة ككافيم والاستهلاك الكبير للوقود الأحفوري اللازم لعملية التحميص (1400 م°). وللحد من هذه الانبعاثات الضخمة، تم إدخال عدة طرق لإعادة تدوير CO<sub>2</sub> في عمليات تصنيع الخرسانة (Lippiatt et al., 2016; Xuan et al., 2016; Monkman et al., 2016; Mo et al., 2019). وبغض النظر عن الطريقة المستخدمة، فإن مفهوم عزل CO<sub>2</sub> في مواد البناء على شكل كربونات يوفر ميزتين. أولاً، يعمل على تحسين قوة ضغط الخرسانة، وبالتالي المساهمة في إنتاج منتجات مجدية اقتصادياً. وثانياً، يقلل من البصمة الكربونية في عملية تصنيع الخرسانة، وبالتالي يساعد في التخفيف من التغيرات المناخية. وبسبب هذه الفوائد، صنفت وزارة الطاقة الأمريكية (DOE) عمليات التمعدن لمنتجات البناء كواحدة من مجالات التركيز الأساسية للأبحاث في برنامج النقاط الكربون (Damiani et al., 2012). ومع ذلك، أشارت دراسة حديثة إلى أن صافي فائدة CO<sub>2</sub> من عزل CO<sub>2</sub> في الخرسانة من المرجح أن يكون سلبياً عندما يتم احتساب انبعاث CO<sub>2</sub> في العملية برمتها (أي الالتقاط والنقل والاستخدام) (Ravikumar et al., 2021). وربما يكون من المهم أيضاً تسليط الضوء على الاستخدامات الأخرى لمنتجات تمعدن CO<sub>2</sub> كمادة مألوفة لصناعات الورق والبلاستيك (Cuéllar-Franca and Azapagic, 2015)، والتي قد تؤدي إلى استخدام أوسع.

## 4.7. تقييم استخدام ثاني أكسيد الكربون

يعد استخدام CO<sub>2</sub> مجالاً بحثياً متوسعاً يضم العديد من التقنيات الناشئة. وهناك بالفعل مجموعة واسعة من المنتجات المعتمدة على CO<sub>2</sub> والتي وصلت إلى المرحلة التجارية، وكذلك العديد من المنتجات التي هي في مرحلة متقدمة من التطوير. ويقدم الجدول 7.7 ملخصاً لهذه المنتجات والتقنيات المختلفة والحجم المقدر لأسواقها. إلا أن هناك حاجة إلى القيام بتقييمات صحيحة لهذه التقنيات نظراً لأن تطويرها وانتشارها عادةً ما يكون مكلفاً.

الجدول 7.7. سوق بعض المواد الكيميائية المشتقة من CO<sub>2</sub> ومستوى تطوير التقنيات المتعلقة بإنتاجها (Lin et al., 2022).

المنتجات	حجم سوق (طن متري سنوياً)	سعر السوق (دولار أمريكي/طن)	مستوى التطوير
اليوريا	~180	450-300	تسويق تجاري
الميثانول	~65	500-380	تسويق تجاري
البولي يوريثين	~18	2250-1800	تسويق تجاري
البولي كربونات	~5	4000-2900	تسويق تجاري
كربونات الكالسيوم	~115	380-50	وحدة نمطية و إثبات بوحدة تجارية
الإيثانول	~80	580-450	وحدة نمطية و إثبات بوحدة تجارية
كربونات الصوديوم	~62	390-50	وحدة نمطية و إثبات بوحدة تجارية
حمض الفورميك	~3	1000-690	وحدة نمطية و إثبات بوحدة تجارية
كربونات المغنيسيوم	~21	850-450	أبحاث مخبرية
حمض الأسيتيك	~16	750-450	أبحاث مخبرية
أكريليك	6	3000-1700	أبحاث مخبرية

وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن التقييم التقني الاقتصادي وتقييم الأثر البيئي وتقييم الأثر الاجتماعي ليست موحدة في تقييم تقنيات استخدام ثاني أكسيد الكربون، مما يجعل المقارنة بين التقنيات غير موثوقة وغير متسقة (Zimmermann and Schomäcker, 2017) ولا يمكن كشف النقاب عن هذا النقص في التقييم إلا من خلال تطوير أساليب أكثر منهجية والاستناد إلى مؤشرات موحدة. وفي محاولة حديثة، من قبل بعض الباحثين (Zimmermann et al., 2020) تم وضع مبادئ توجيهية موحدة بشأن إجراء التقييمات التقنية والاقتصادية وتقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment (LCA)) لتقنيات استخدام ثاني أكسيد الكربون. ويغطي عملهم أساليب تحسين المقارنات التي تشمل التعرف على نضج التكنولوجيا، وتحديد حدود المنظومة، وتحديد الأنظمة المرجعية. وفي جهد سابق، تم تقديم عدداً من طرق التقدير لتقييم توازن CO<sub>2</sub> في عمليات الاستخدام (Müller & Arlt, 2014). ووفقاً لهذا الجهد،

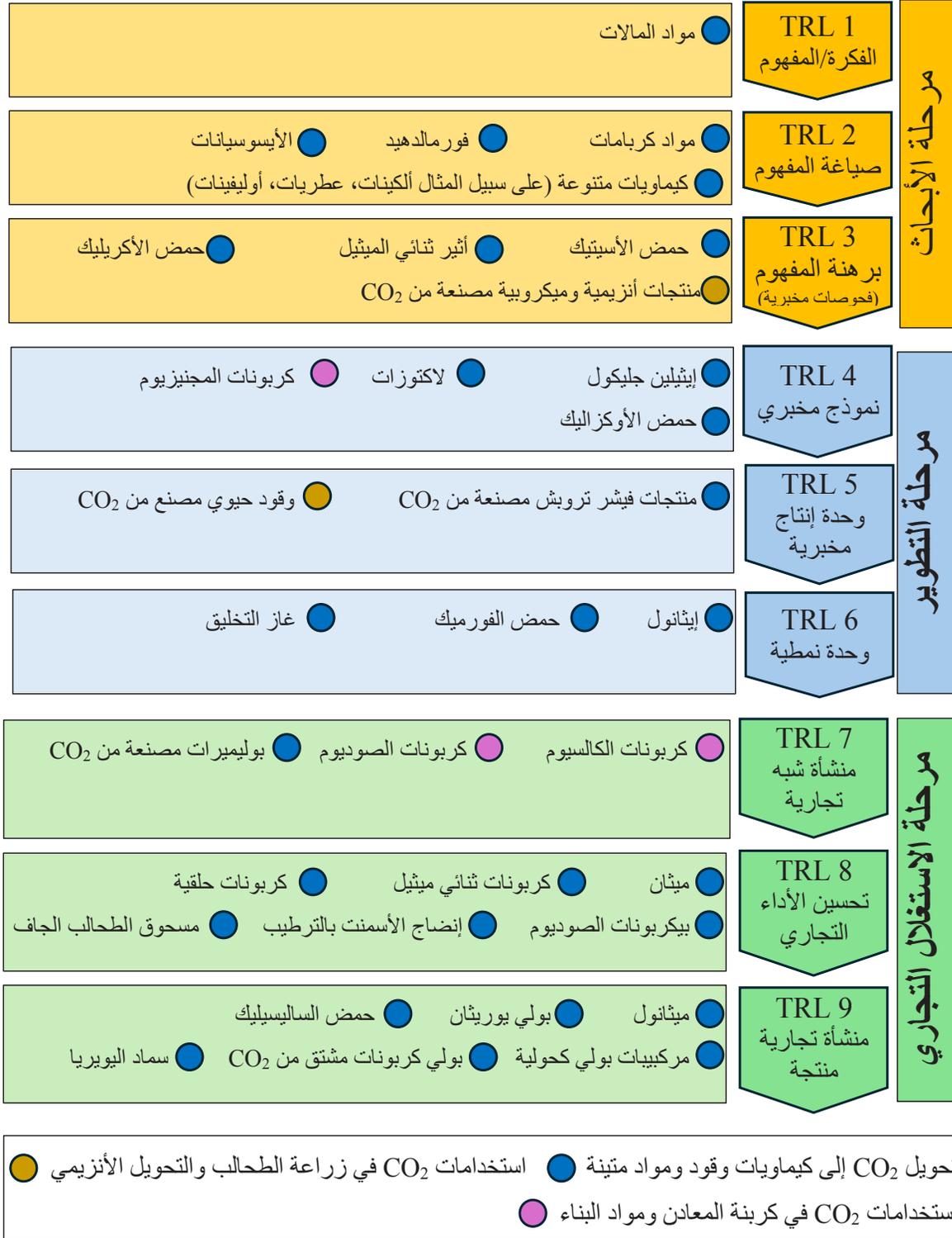
تتطلب التقييمات الصحيحة لتوازن CO<sub>2</sub> محاكاة مفصلة لتفاعل الاستخدام وسلسلة التوريد بأكملها. كما تم اقتراح طريقة شاملة أخرى لتقييم استخدام CO<sub>2</sub> من قبل بعض الباحثين (Angunn et al., 2014)، والذي يمكن وصفها بأنها تقييم دورة الحياة الممتد مع التقييمات الفنية والاقتصادية. وتم تطبيق هذه الطريقة في حالتين عامتين تتعلقان بإنتاج الوقود الحيوي من الطحالب وإنتاج الميثانول. كما قدم باحثين آخرين أيضاً (Pérez-Fortes et al., 2016) نهجاً للتقييم الفني والاقتصادي لاستخدام CO<sub>2</sub>، والذي تم تطبيقه في تخليق اليوريا وإنتاج الميثانول، وأشاروا إلى أن النهج المقترح قابل لفحص مسارات استخدام CO<sub>2</sub> الأخرى مثل تخليق البوليمر، وتمعدن CO<sub>2</sub>، وإنتاج حمض الفورميك.

### 5.7. التحديات في استخدام CO<sub>2</sub> والآفاق المستقبلية

ستؤدي التنمية الاقتصادية في جميع أنحاء العالم إلى زيادة مستوى انبعاث ثاني أكسيد الكربون وذلك لأن مصادر الطاقة الأولية تأتي في المقام الأول من الوقود الأحفوري. ولذلك، فإن التخفيف من انبعاثات CO<sub>2</sub> يتطلب نقلة نوعية في منظومة الطاقة وزيادة كبيرة في استخدام ثاني أكسيد الكربون. وقد أشارت المناقشة السابقة بوضوح إلى أن استخدام CO<sub>2</sub> يمكن أن يقلل من انبعاثات الكربون عن طريق عزل CO<sub>2</sub> في المنتجات وعن طريق استبدال مدخلات الوقود الأحفوري. ومع ذلك، فإن الوضع الحالي لاستخدام CO<sub>2</sub> يوضح بشكل أساسي ثلاثة تحديات تتعلق بتكلفة التقاط ثاني أكسيد الكربون، ومتطلبات الطاقة، وتوسيع نطاق السوق (Spinner et al., 2012). وتشمل تكاليف تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> كلاً من النفقات الرأسمالية والتشغيلية. ومما يزيد في تعقيد موضوع التقاط CO<sub>2</sub> هو أنه لا يعتبر منتجاً عالي القيمة مما يجعل الجدوى الاقتصادية لاستخدامه بشكل عام متدنية. ولجعل مفهوم التقاط CO<sub>2</sub> أكثر جدوى، هناك حاجة إلى المزيد من التطبيقات الصناعية ذات المنتجات المرعبة.

ويمكن أيضاً تعزيز جدوى هذا المفهوم من خلال تنفيذ استخدام CO<sub>2</sub> على نطاق واسع، ويجب أن تركز الدراسات المستقبلية أيضاً على تعزيز جانب الكفاءة من خلال تخفيض استهلاك الطاقة وزيادة معدل التحويل وانتقائية المنتج ومد عمر المواد الحفازة. وعلى نحو مماثل، قد يؤدي دمج الطاقات المتجددة مع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه إلى إنشاء أنظمة أكثر كفاءةً لالتقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه. وفي هذا السياق، يعد استخدام مصادر الطاقة المتجددة في إنتاج الهيدروجين على نطاق تجاري أمراً إلزامياً أيضاً لإعادة تدوير CO<sub>2</sub> وإنتاج الوقود. كما يمكن أيضاً أن يساهم استخدام الأساليب الكيميائية الحيوية والكيميائية الأنزيمية والتحفيز الضوئي بشكل إيجابي في المنظور المستقبلي لاستخدام ثاني أكسيد

الكربون، مع الأخذ في الاعتبار النطاق الواسع من المنتجات القيمة من هذه الأساليب المتقدمة (Aresta et al., 2013; Mustafa et al., 2020; Saravanan et al., 2021). ويشير الوضع الحالي لمختلف مجالات استخدام CO<sub>2</sub> كمادة أولية إلى أن الغالبية العظمى من تطبيقات CO<sub>2</sub> الجديدة لا تزال في مراحل مبكرة من التطوير إلى حد ما، باستثناء إنتاج اليوريا والاستخلاص المعزز للنفط وبعض الكيماويات (الشكل 10.7) (Dziejarski et al. 2023). وأشار استعراض حديث لأنشطة استخدام CO<sub>2</sub> إلى أن إحدى العقبات الرئيسية التي تعيق تحول تكنولوجيات CO<sub>2</sub> نحو التسويق التجاري هي حجم تنفيذها، حيث تميل غالبية المشاريع إلى أن تقتصر على مناطق محددة مثل الولايات المتحدة وألمانيا وإيطاليا والمملكة المتحدة (Zimmermann & Schomäcker, 2017). وتشير مثل هذه النتائج بوضوح إلى أن تطوير التكنولوجيا وانتشارها لا يمكن أن يكون مدفوعاً بالسياسات فحسب، بل بطلب السوق الحقيقي (أي منتجي ومستهلكي ثاني أكسيد الكربون). وبشكل عام، يعتمد المنظور المستقبلي لتخفيف CO<sub>2</sub> في المقام الأول على تطوير انتشار التقنيات المتقدمة القادرة على تخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتخفيض الطلب على الوقود الأحفوري، وتعويض تكلفة التقاط الكربون من خلال توليد منتجات ذات قيمة مضافة. ولتحقيق هذه الأهداف، فلا بد من توجيه التركيز نحو تحديد تكنولوجيات استخدام CO<sub>2</sub> الواعدة، والاعتراف بالقيود الفنية والاقتصادية التي تواجهها، وحل هذه القيود والحوجز التجارية من خلال تطوير برامج البحث والتطوير الضخمة لمعالجة هذه القضايا.



الشكل 10.7. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لأهم طرق استغلال CO<sub>2</sub> باستثناء الاستخلاص المعزز للنفط والغاز (EOR, EGR) (المصدر: Dziejarski et al. 2023)

## الفصل 8 - عزل ثاني أكسيد الكربون

- 1.8. نظرة عامة حول عزل ثاني أكسيد الكربون
- 2.8. التخزين في التكوين الجيولوجي
- 3.8. التخزين عن طريق التمعدين
- 4.8. التخزين في المحيطات
- 5.8. التخزين في طبقات الفحم الحجري وخزانات النفط والغاز المستنفذة

## 1.8. نظرة عامة حول عزل الكربون

يُنْتَجَج الـ  $CO_2$  ويُعاد تدويره من خلال العديد من الأنشطة غير البشرية، ولا يشكل إنتاجه الطبيعي أهمية لهذا البحث إلا من حيث إمكانية تلافي حدوثه، إلا أن عزله الطبيعي سوف يلقي ببعض الضوء على الطرق المحتملة لتخزين  $CO_2$  المحتجز، كما هو مبين في الشكل 1.8.

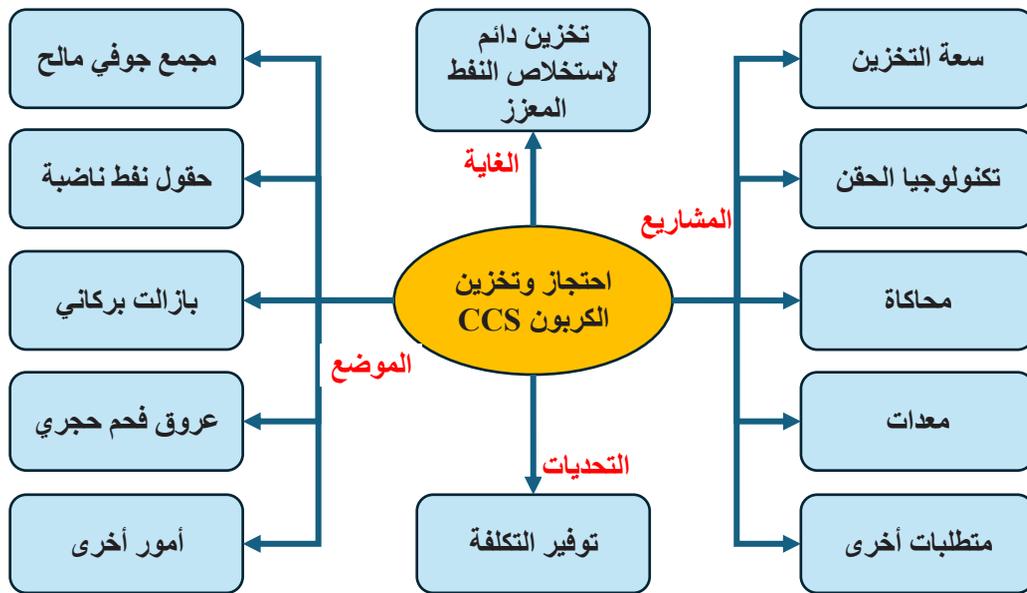


الشكل 1.8. دورة الكربون في الطبيعة (المصدر: <https://cleanet.org/index.html>; [https://www.sciencelearn.org.nz/image\\_maps/3-carbon-cycle](https://www.sciencelearn.org.nz/image_maps/3-carbon-cycle)).

وهناك مساران رئيسيان لإعادة التدوير الطبيعي للـ  $CO_2$ . وفي المسار الأول، يعاد تدوير كمية كبيرة من  $CO_2$  على الأرض من خلال عملية التمثيل الضوئي، وتحويل  $CO_2$  والماء إلى مجموعة واسعة من النباتات، بما في ذلك مجموعة واسعة من المنتجات الزراعية الغذائية البشرية، فيما يسمى حالياً "تقنيات الانبعاثات السلبية (NET) (NASEM, 2019)". وتقوم النباتات بتخزين الكربون على شكل كربوهيدرات ويقدر أنها تمتص حوالي ربع إجمالي  $CO_2$  الذي يدخل الغلاف الجوي. ويُخزن جزء من الـ  $CO_2$  الممتص على الأرض في كائنات التربة المختلفة، مثل البكتيريا. أما المسار الرئيسي الثاني لإعادة تدوير  $CO_2$  فهو عبر الذوبان في المحيطات والتمعدن، سواءً على السطح أو في المياه العميقة. ستتم مراجعة هذين المسارين بشكل موجز في أقسام هذا الفصل.

في الجهود البشرية للحد من مستويات  $CO_2$  في الغلاف الجوي، يتم التقاط  $CO_2$  أولاً وذلك وفق النهج المفصل في الفصل السادس عبر (أ) الالتقاط من مصدر ثابت في منشأة صناعية مثل محطة توليد طاقة

كهربائية أو مصنع أسمنت أو مصنع للصلب و (ب) التقاط  $CO_2$  من الغلاف الجوي من الهواء ميكانيكياً من خلال استخدام تقنية DAAC التي تمت مناقشتها في القسم 5.8.6. وبمجرد التقاطه، يعد  $CO_2$  لنقله وتجميعه عادةً في محاور إلى مواقع، كما سنناقش في الفصل التاسع، حيث يمكن استخدامه أخيراً أو التخلص منه بشكل دائم. وساهمت العمليات الطبيعية المذكورة أعلاه في تطوير المفاهيم الأولية المتعلقة بمصير الـ  $CO_2$  المحتجز، بالإضافة إلى مفاهيم أخرى للحد من تأثير الأنشطة البشرية على البيئة. ويعد الالتزام بخيار التخزين والموقع عملية معقدة تتطلب موارد واسعة النطاق لضمان توافرها مع جميع السياسات واللوائح، وقد أخص ذلك في ورقة حديثة (Yang et al., 2023)، ويوضح الشكل 2.8 الخيارات والمتطلبات المتعلقة بالتخزين بشكل تخطيطي مختصر.



الشكل 2.8. خيارات تخزين  $CO_2$  ومتطلبات تطوير مشروع (المصدر: Yang et al., 2023).

تناولنا في الفصل السابع موضوع إعادة تدوير الـ  $CO_2$  كمادة خام لتصنيع مجموعة واسعة من المنتجات، مثل الوقود ومواد البناء وغيرها من المواد المفيدة. وقمنا أيضاً بتغطية استخدامه في عملية الاستخلاص المعزز للنفط بثاني أكسيد الكربون، وهو خيار التخزين الأكثر جاذبية حتى الآن. وسنركز في هذا الفصل على التخزين الدائم لـ  $CO_2$  بكميات كبيرة مما يمكن من تحقيق الأهداف المحددة للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى هدي 2 و  $1.5^\circ C$ . وركزت صناعة النفط والغاز وأصحاب المصلحة الآخرين جهودها بشكل رئيسي على التخزين في التكوينات الجيولوجية العميقة، حيث ينتهي  $CO_2$  في

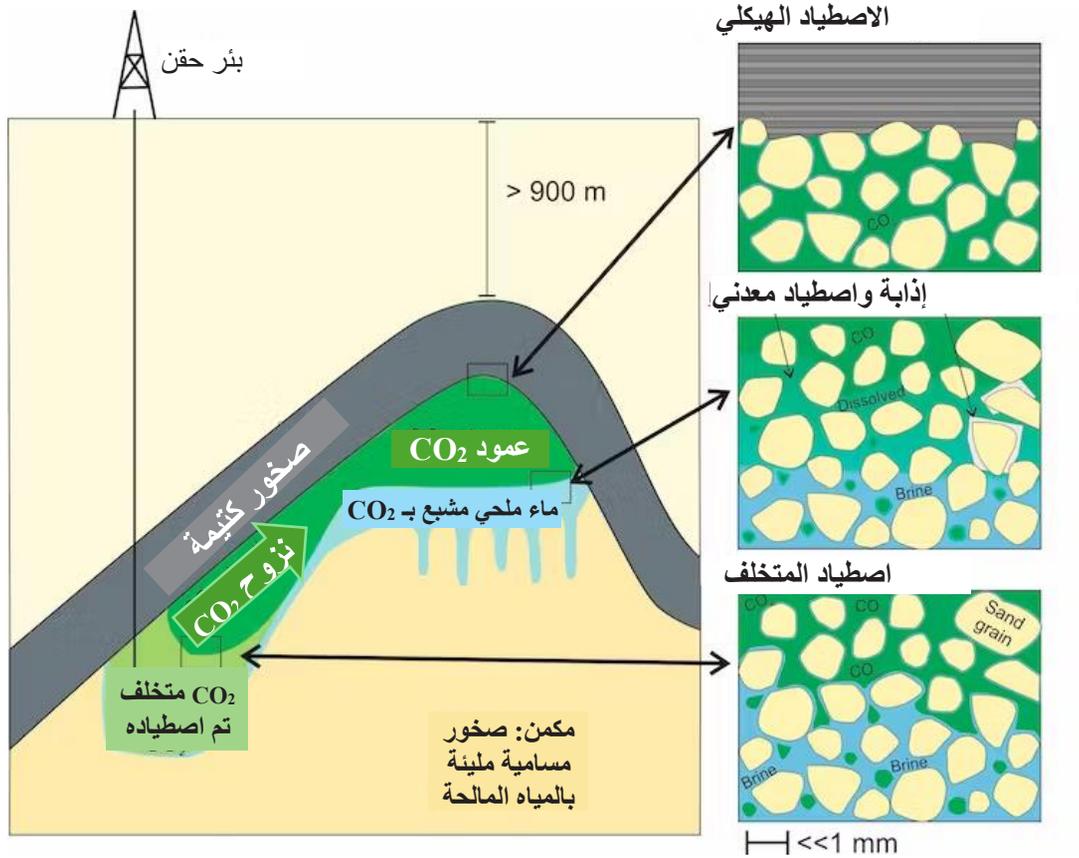
طبقات المياه الجوفية المالحة العميقة، والتي سيتم مراجعتها في القسم التالي. ومن الخيارات الأخرى التي هي قيد النظر التخزين في المحيطات ومن خلال التمعدن، التي لا تزال في مرحلة مبكرة جداً من التطوير وسيتم مراجعتها بإيجاز في القسم 3.8.

ويحظى تخزين CO<sub>2</sub> باهتمام كبير من المؤسسات البحثية والوكالات الدولية وصناعة النفط والغاز. وتم تشكيل عدد من المنظمات التي تركز على هذا الموضوع، مثل GeoNet CO<sub>2</sub> الأوروبية (CO<sub>2</sub> GeoNet) التي تأسست عام 2004 وتضم 27 معهداً بحثياً من 21 دولة أوروبية، ويدعمها أكثر من 300 باحث من ذوي الخبرة المتعددة التخصصات لمعالجة كافة التحديات المتعلقة بتخزين ثاني أكسيد الكربون، وتحالف التقاط الكربون (Carbon Capture Coalition) (<https://carboncapturecoalition.org/>)، وهي مجموعة أمريكية تضم أكثر من 100 شركة واتحاد ومنظمة للحفاظ على البيئة والنشطة في مجال تطوير سياسات بيئية متخصصة في مجال التقاط وتخزين الكربون، وتدعم انتشار تقنيات إدارة الكربون. وهناك أيضاً رابطة التقاط الكربون وتخزينه (CCSA) (CCS Association) ([www.ccsassociation.org](http://www.ccsassociation.org))، وهي رابطة أوروبية تضم ما يقرب من 100 شركة ومنظمة تهدف إلى تسريع الانتشار التجاري لالتقاط الكربون واستخدامه وتخزينه ([www.ccsassociation.org](http://www.ccsassociation.org)). واستُحدثت مؤخراً مبادرة النفط والغاز بشأن المناخ (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) (<https://www.ogci.com>). وبالإضافة إلى الجمعيات والمجموعات المذكورة أعلاه، هناك العديد من المنظمات والمعاهد الأخرى المذكورة في <https://www.cua.earth/ccus-organizations> والتي تركز على التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. وينعكس الاهتمام بتخزين CO<sub>2</sub> بشكل واضح أيضاً في الأعمال البحثية العديدة التي تم نشرها بشأن هذا الموضوع (Bui et al., 2018; CO<sub>2</sub> GeoNet, 2008; GCSI, 2022a; NASEM, 2019; PTRC, 2014; Yang et al., 2023).

## 2.8. التخزين في التكوينات الجيولوجية

يعد التخزين الدائم لـ CO<sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية حالياً هو المحور الرئيسي للصناعة بعد الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون، وربما يرجع ذلك إلى قاعدة المعرفة الواسعة والخبرة التي طورتها صناعة النفط والغاز في هذا المجال من خلال نشاطها المتعلق بإنتاج النفط والغاز. ومن ثمة، فإن الجهود المكرسة لتطوير الحلول ذات الصلة المتعلقة بتخزين CO<sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية كانت قيد التطوير خلال العقود القليلة الماضية. والهدف من هذه التقنية في الأساس هو حقن CO<sub>2</sub> عميقاً تحت السطح عبر بئر عالي الدقة وفي خزان جيولوجي تحت الأرض، وغالباً ما يتم

ذلك على عمق أكثر من 5000 قدم. وبمجرد وصول CO<sub>2</sub> إلى الخزان، يتم عزله بشكل آمن من خلال آليات الاصطياد التالية الموضحة من خلال الرسم في الشكل 3.8:



الشكل 3.8. آليات احتجاز CO<sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية (المصدر: Flude, 2020).

أ. الاصطياد الهيدروديناميكي أو الهيكلي (Hydrodynamic or Structural Trapping). في هذه الفئة من التخزين، والتي يشار إليها باسم "الختم بواسطة صخرة الغطاء"، تعمل طبقة صخرية غير مسامية وغير منفذة كغطاء عملاق في أعلى المكمن الجيولوجي المستهدف للتخزين، حيث يعزل الـ CO<sub>2</sub> المحقون تحتها، وغالباً ما يبلغ سمك هذه الطبقة الصخرية مئات الأقدام وتحافظ على الـ CO<sub>2</sub> المخزن بشكل آمن.

ب. الاصطياد المتخلف (Residual Trapping). تتكون المكمن الجيولوجية المستخدمة لتخزين CO<sub>2</sub> من طبقات ضخمة من الصخور المسامية. وفي الاصطياد المتخلف يتم احتواء CO<sub>2</sub> داخل المسام الصغيرة والفارغة للصخر نفسه بحيث يصبح الغاز بعد حقنه ثابت في موضعه وغير قادر على التحرك.

ج. الذوبان أو الاصطياد بالتمعدن (Solubility or Dissolution/Mineral Trapping). في آلية الاصطياد هذه، يتم إجبار  $CO_2$  الذي يتم حقنه من خلال الانتشار الجزيئي على الذوبان في المحاليل الملحية المتكونة بشكل طبيعي داخل الخزان. ويؤدي ذوبان  $CO_2$  إلى ارتفاع كثافة المحاليل الملحية، مما يؤدي إلى انخفاضها في تكوين المكنم، وبالتالي خفض الهجرة التصاعدية العكسية لـ  $CO_2$  وزيادة سعة تخزين الخزان.

وستتم مراجعة التقدم المتعلق بسعة تخزين  $CO_2$  المتاحة والتحديات الحالية التي تواجهها تكنولوجيا التخزين في التكوينات الجيولوجية والتي تحد من انتشارها على نطاق أوسع.

### 1.2.8. السعة التخزينية في التكوينات الجيولوجية

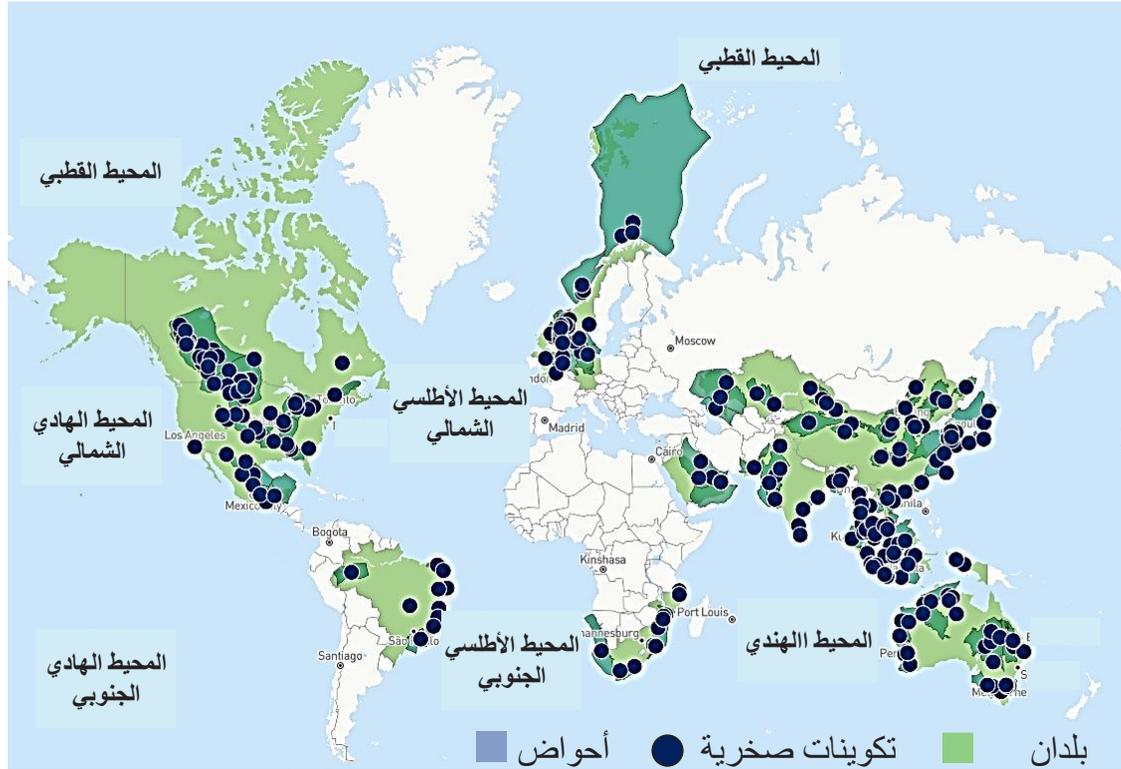
يتم تعريف سعة التخزين على أنها قدرة موقع أو منطقة ما على تخزين  $CO_2$  بشكل دائم في باطن الأرض، وهذه المعلومات ضرورية لضمان فعالية التكلفة المرتبطة بدورة النقاط  $CO_2$  وتخزينه الكاملة، أي النقاط  $CO_2$  ونقله وعزله مع الأخذ في الاعتبار حجم الاستثمار المطلوب، وتشمل الأنشطة المبكرة المتعلقة بتحديد التوزيع العالمي لسعة التخزين تلك التي أبلغ عنها عدد من المجموعات البحثية (Hendriks et al., 2004; Dooley, 2013; Cook and Zakkour, 2015) وآخرين. وتفترض تقديرات السعة أن بعض الفراغ المسامي لوحدة جيولوجية يمكن توفيرها لتخزين  $CO_2$ ، وأن هناك حيز مسامي متاح لحقن  $CO_2$  في باطن الأرض أكبر بكثير مما هو مطلوب. ومع ذلك، فمن المحتمل أن بعض العوامل قد تحد من الحجم المسامي المتاح في بعض التكوينات الجيولوجية مع مرور الوقت. وقد تختلف السعة المقدرة مع مرور الوقت، وبالتالي لتحديد التباين يتوجب اتباع نهج ديناميكي لتقدير السعة، كما حدث في مشروع NORDICCS (Lothe et al., 2015). ويستند تقدير السعة إلى حد كبير إلى الثروة المعرفية والبيانات والنماذج والأدوات التي تم تطويرها لأغراض الصناعة النفطية. ومع ذلك، هناك تعقيدات كبيرة في استخدام قاعدة المعرفة هذه دون تكييفها مع المتطلبات المحددة لتخزين  $CO_2$ ، والإجراءات التي سيتم اعتمادها أثناء التنفيذ (Bui et al., 2018).

وتم بذل جهود حثيثة لتحسين تقدير سعة تخزين  $CO_2$ . ومن بين الجهود الأخيرة العمل الذي أبلغ عنه كيرنز وآخرون (Kearns et al., 2017) حيث قدروا أن سعة تخزين  $CO_2$  التي يمكن الوصول إليها تتراوح بين حوالي 8,000 و55,000 جيجا طن على مستوى العالم باستخدام تكنولوجيا التخزين الحالية. وتم مؤخراً بذل جهود متضافرة لتطوير قائمة جرد أكثر موثوقية لمواقع عزل  $CO_2$  الجيولوجية المحتملة من قبل مبادرة قامت بها مجموعة OGCI في إطار برنامج مدته 6 سنوات بعنوان "كتالوج موارد تخزين  $CO_2$  (The  $CO_2$  Storage Resource Catalogue (CSRC)). ويتولى تنفيذ هذا

البرنامج المعهد العالمي CCS (GCCSI) بدعم من مؤسسة Storegga للنشاطات المرتبطة بالتقييم الفني وإعداد قاعدة البيانات والتقارير. ويستهدف CSRC إلى بناء رؤية عالمية للجاهزية التجارية لموارد تخزين CO<sub>2</sub> في الأسواق الرئيسية باستخدام نظام إدارة موارد التخزين (Storage Resources Management System (SRMS) الذي طورته جمعية مهندسي البترول (SPE, 2017). ويوفر SRMS نظام تصنيف ومنهجية تعتمد على المحفزات التجارية بما في ذلك اللوائح التنظيمية، والمؤشرات الرئيسية لتطوير المشروع، والحد من التقييم الغير موضوعي للموارد والسماح بمقارنة إمكانات الموارد ومدى نضجها. وتشمل منهجية CSRC و SRMS تخزين CO<sub>2</sub> في طبقات المياه الجوفية المالحة وحقول النفط والغاز المستنفذة كلياً أو جزئياً ولكنها تستبعد الاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> (EOR - CO<sub>2</sub>) وخيارات التخزين الأخرى مثل التخزين في الفحم الحجري المتعذر استخراجها والتمعدن والصخر الزيتي الغني بالمواد العضوية. وأكمل البرنامج دورته الثالثة ونشر مخرجاته التي غطت 852 موقعاً في 30 دولة من خلال تقرير صدر في مارس 2022 (Baines et al., 2022). ومن بين الدول العربية المشمولة في التقرير الكويت وعمان وقطر والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة، ويتضمن الشكل 4.8 خريطة توضح ما تم التوصل إليه، كما يلخص الجدول 1.8 النتائج الرئيسية المتعلقة بمواقع التخزين الجيولوجي المتاحة في الدول الثلاثين التي تم تناولها في الدورات الثلاث الأولى.

بالاستناد إلى الجدول 1.8، تم تصنيف الموارد وفقاً للتعريفات التالية (SPE, 2017):

- **مخزنة.** يشير هذا المصطلح إلى الكمية التراكمية لـ CO<sub>2</sub> التي يتم حقنها وتخزينها من مشروع واحد أو عدة مشاريع.
- **سعة التخزين (Storage Capacity).** تشير إلى موارد التخزين التي من المتوقع أن تكون متاحة تجارياً في التكوين الجيولوجي من تاريخ معين فصاعداً في ظل ظروف محددة. ويجب أن تستوفي هذه الموارد أربعة معايير: (1) اكتشاف التكوين الجيولوجي المستهدف وتوصيفه (بما في ذلك الاحتواء) و(2) أن يكون من الممكن الحقن بالمعدلات المطلوبة و(3) أن يكون مشروع التطوير تجارياً، و(4) أن يكون مورد التخزين غير مستخدم سابقاً للتخزين.
- **السعة التجارية الفرعية (Sub-Commercial Capacity).** وتشير إلى موارد التخزين المحتملة، والتي يمكن الوصول إليها في التكوينات الجيولوجية المعروفة، ولكن المشاريع المطبقة ليست ناضجة للتطوير التجاري لأسباب مثل الحاجة إلى مزيد من التقييم للتكوين الجيولوجي أو المزيد من التطوير أو عدم وجود التزام إداري.



الشكل 4.8: خريطة للمسح الجيولوجي لتخزين CO<sub>2</sub> يغطي بلدان وأحواض وتكوينات مختارة (المصدر: Baines et al., 2022).

الجدول 1.8. ملخص موارد تخزين CO<sub>2</sub> في مارس 2022 يغطي 30 دولة (2022).

التصنيف*	مشروع مورد تخزين CO <sub>2</sub> (Gt) - لم يتم تحديد مشروع له	مورد تخزين CO <sub>2</sub> (Gt) - تم تحديد مشروع له
مخزنة	0.043	0.043
سعة التخزين	0.211	0.211
السعة التجارية الفرعية	577	66.3
موارد تخزين غير مكتشفة	13,377	30.0
المجموع	13,954	96.6

\* للحصول على تعريفات التصنيف، يرجى الرجوع إلى النص أدناه.

– موارد تخزين غير مكتشفة (Undiscovered Storage Resources). الكمية المقدرة لإجمالي موارد التخزين اعتباراً من تاريخ معين، والتي لم يتم التأكد من صلاحيتها للتخزين ضمن التكوين الجيولوجي المستهدف. ويتضمن ذلك موارد التخزين المحتملة، والتي سيتم الوصول إليها من خلال تطبيق مشاريع الاستكشاف/التطوير المستقبلية، وبالتالي يكون لديها فرصة مرتبطة بالاستكشاف وفرصة بالتطوير. وتتضمن الفئة أيضاً موارد التخزين التي يتعذر الوصول إليها،

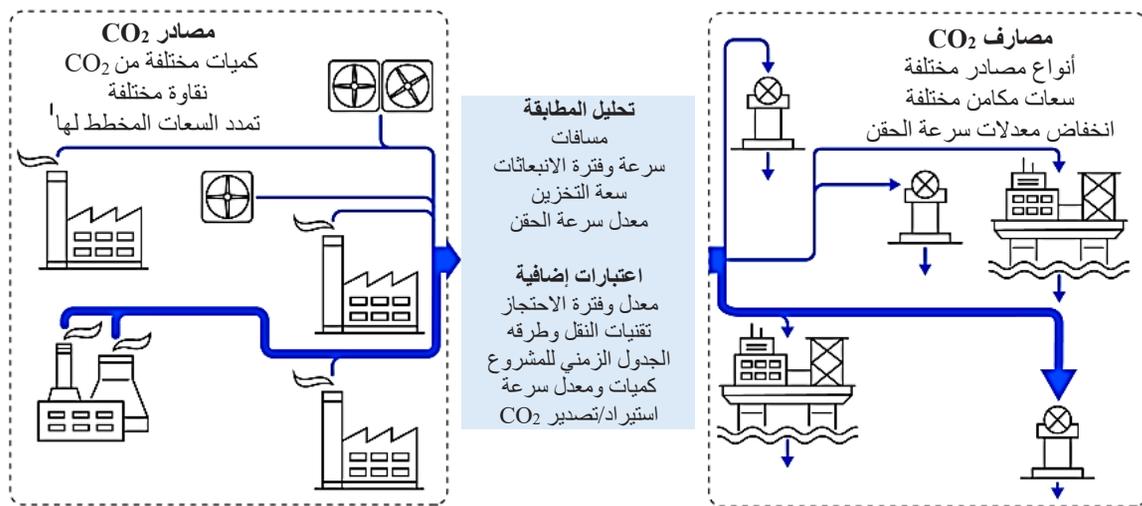
وهي موارد غير قابلة للاستخدام من خلال مشاريع تطوير التخزين المستقبلية لأسباب مختلفة قد يتم التخلص منها في المستقبل.

– **المجموع.** التخزين النهائي المقدر ((Estimated Ultimate Storage (EUS)) الذي يتم تطبيقه على أي تكوين جيولوجي لتحديد تقديرات الكميات القابلة لتخزين CO<sub>2</sub> اعتباراً من تاريخ معين، والتي يمكن تخزينها في ظل ظروف فنية وتجارية محددة، بالإضافة إلى تلك الكميات التي تم حقنها وتخزينها بالفعل.

كما يمكن الملاحظة من الجدول 1.8، أنه تم تحديد حوالي 14,000 جيجابطن من موارد التخزين وتم تصنيف أكثر من 95% من هذه الموارد على أنها غير مكتشفة (محتملة) بناءً على منهجية SRMS. وتجدر الملاحظة أيضاً إلى أن موارد التخزين التي يتم استخدامها حالياً تبلغ فقط 96.6 جيجابطن أو 0.7% من الموارد التي تم تقييمها عالمياً. وتشير النتائج بوضوح إلى أن إمكانات التخزين العالمية كبيرة. ومع ذلك، فإن الموارد المصنفة على أنها تجارية تقتصر حالياً على دول محددة هي أستراليا وكندا والنرويج والولايات المتحدة. وأحد الأسباب المحتملة هو أن هذه الدول الأربع بذلت جهوداً لاستخراج المزيد من النفط والغاز من مكامنها خلال العقود الأربعة إلى الخمسة الماضية، الأمر الذي يتطلب دراسات مكثفة وبيانات جيولوجية مفصلة. وبالإضافة إلى ذلك، تمكنت هذه الدول من تطوير فرق من خبراء أكثر استعداداً لتلبية احتياجات تقدير متطلبات تخزين الـ CO<sub>2</sub>. ومن الواضح أن جميع الدول الأخرى تحتاج إلى بذل المزيد من الجهود فيما يتعلق بتقييم هذه الموارد من أجل تحديد احتياجات تخزين CO<sub>2</sub> العالمية بشكل مناسب ودقيق. واستناداً إلى تقرير OGCI، لا تتماشى معظم تقييمات موارد التخزين الحالية مع منهجية SRMS وأن هناك صعوبات في إعادة تقييم الموارد باستخدام منهجية SRMS باستخدام المعلومات المنشورة أو المتوفرة فقط.

بالإضافة إلى التقديرات المذكورة أعلاه لموارد التخزين، قامت دول مجلس التعاون الخليجي (GCCSI, 2023b) بتطوير قاعدة بيانات التخزين الخاصة بها CO<sub>2</sub>RE، والتي تعتمد على نفس المنهجية المعتمدة لمشروع مبادرة النفط والغاز العالمية المذكور أعلاه (GCCSI, 2020). كما أبلغت CO<sub>2</sub>GeoNet مؤخراً عن إمكانية تخزين CO<sub>2</sub> في 32 دولة أوروبية (CO<sub>2</sub>GeoNet, 2008). وعلى الرغم من عدم نشر أي بيانات أو أرقام، إلا أنه تمت الإشارة إلى أن تحديث تقييمات سعة التخزين الوطنية قد تم الإبلاغ عنها من قبل غالبية الدول التي تم تقييمها. علاوةً على ذلك، بالنسبة لمعظم الدول الأوروبية، يتم النظر في طبقات المياه الجوفية المالحة وحقول الهيدروكربون المستنفذة لتخزين CO<sub>2</sub> في المرحلة الكثيفة مع تفضيل المواقع البحرية على المواقع البرية في معظم الدول الساحلية. وشدد التقرير على الحاجة إلى وضع أطلس أوروبي حديث وموحد ومنسق لتخزين ثاني أكسيد الكربون. ويعد

مختبر تكنولوجيا الطاقة الوطني الأمريكي (NETL) من بين الرواد الذين عملوا في هذا المجال، وقد قام أيضاً بتطوير ونشر الإصدار الخامس من أطلس CO<sub>2</sub> لأمريكا الشمالية في عام 2015 الذي يغطي الولايات المتحدة الأمريكية وكندا (NETL, 2015b)، ويوفر جرد شامل لمواقع تخزين الـ CO<sub>2</sub> في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا. كما نشطت الوكالة الدولية للطاقة أيضاً في هذا المجال ونشرت مؤخراً كتيباً يركز في الغالب على منهجية تطوير موارد تخزين CO<sub>2</sub> في العالم (IEA, 2022b). وتم التحقق في الدليل من تطابق موارد CO<sub>2</sub> مع موقع التخزين المستهدف من حيث حجم الـ CO<sub>2</sub> وسعة التخزين (الشكل 5.8). ومن الواضح أن هذا يؤدي إلى تحسين فرص الحصول على الاستثمارات المطلوبة لسلسلة القيمة الكاملة لالتقاط وتخزين ثاني أكسيد الكربون، بما في ذلك الاستثمارات في نقل ثاني أكسيد الكربون. ومن الواضح أيضاً من الدراسات والبيانات المتراكمة أن مواقع تخزين CO<sub>2</sub> موزعة بالتساوي تقريباً في جميع أنحاء العالم كما هو موضح في الشكل 4.8. وقد تناول الكتيب بشكل موسع المنهجية المطلوبة التي يجب اتباعها للتأكد من أن جميع البيانات المطلوبة لإعداد الموقع مؤهلة لتخزين ثاني أكسيد الكربون. ويلخص الشكل 6.8 مدى الجهد المطلوب. وتتضمن العملية على الأقل ثلاث بوابات قرار تحدد مستقبل الموقع.



الشكل 5.8. مطابقة مصادر ومصارف CO<sub>2</sub> (المصدر: IEA, 2022b; IEA, 2022c; IEA, 2022d) (تمثل الأوزان الخطية أحجام مختلفة من CO<sub>2</sub> من الالتقاط إلى التخزين).



## 2.2.8. تحديات تكنولوجيا تخزين التكوينات الجيولوجية

واستناداً إلى تنوع وحجم المشاريع التي تم تنفيذها بالفعل، فإن الثروة المعرفية المرتبطة بالمجالات المتعلقة بتكنولوجيا التخزين في التكوينات الجيولوجية متقدمة حالياً بشكل جيد، وتشمل الفيزياء الحرارية، وعلوم الأرض، وهندسة المكامن، والرصد المطلوب، وتقنيات تقييم السعات. ولكن من الواضح أن هناك حاجة إلى مزيد من الأبحاث مع الأخذ في الاعتبار البيانات الواردة في الجدول 1.8 ومدى تطبيق التقنية حتى تاريخه. وفي هذا القسم، سنلخص بإيجاز المجالات المختلفة التي لا تزال بحاجة إلى مزيد من البحث والتطوير:

أ. **خصائص السوائل وعلوم الأرض.** لقد تم بالفعل إحراز تقدم جيد فيما يتعلق بالخصائص الفيزيائية الحرارية لـ  $CO_2$  ومدى اختلاطه مع سوائل الخزان وتفاعله مع الصخور. ولهذه القضايا أهمية كبيرة في اختيار موقع التخزين، وتصميم استراتيجيات الحقن، والتنبؤ بمصير  $CO_2$  الذي يتم حقنه. ومع ذلك، فلا تزال هناك حاجة لإجراء المزيد من الأبحاث لفهم منظومة  $CO_2$  الملحية بشكل كامل في ظل ظروف التخزين في المواقع التي سيتم تخزين معظم  $CO_2$  فيها من خلال الذوبان في المحلول الملحي. وبشكل أكثر تحديداً، هناك حاجة لتقييم تأثير الشوائب الموجودة في تيار الـ  $CO_2$  والتغيرات في تركيبة المحلول الملحي بسبب ذوبان الخامات المعدنية المتواجدة في التكوين الجيولوجي بواسطة المحلول الحمضي الذي يتشكل أثناء حقن ثاني أكسيد الكربون. ويضيف حقن  $CO_2$  في مكامن النفط المهجورة مشكلة إضافية بسبب التركيب الكيميائي المتنوع للنفط، وبالتالي ضرورة فهم الخواص الفيزيائية الحرارية لخليط  $CO_2$  والهيدروكربونات، والذي يتطلب أخذ عينات من النفط من قاع البئر لضمان فهم أفضل لزواوية التلامس بين أطوار السوائل/الموائع القابلة للامتزاج جزئياً مع الأسطح المعدنية. كما أن هناك قضية أخرى مهمة تتعلق بتطوير فهم أفضل لتأثير عدم تجانس الصخور على التدفق.

ب. **هندسة المكامن وتطوير المواقع.** ترتبط الكثير من المعرفة المتعلقة بتطوير مواقع تخزين  $CO_2$  وتستند إلى المعرفة المتراكمة للصناعة فيما يتعلق بالمكامن وذلك تلبيةً لاحتياجات إنتاج النفط والغاز. ومثل هذه المعرفة تقلل إلى حد كبير من الجهود والاستثمارات اللازمة لتطوير وبدء مشاريع تخزين ثاني أكسيد الكربون. فعلى سبيل المثال، بالنسبة للخزانات الخمسة المقترحة في المملكة المتحدة والتي تستهدف تخزين الـ  $CO_2$ ، هناك فقط خزانان يتطلبان آباراً تقييمية لتوصيف الموقع. ومع ذلك، فإن الخبرة المتعلقة بتطوير مشاريع مخصصة لتخزين  $CO_2$  في طبقات المياه

الجوفية المالحة لا تزال محدودة للغاية. وهناك حاجة إلى مزيد من البحث والتطوير في العديد من القضايا بما في ذلك المنهجية والتقنيات التي تهدف إلى (1) تخفيض مخاطر التسرب و(2) منع انتقال تدفق CO<sub>2</sub> المتصاعد نحو مسارات التسرب المحتملة و(3) تخفيض تكاليف حفر الآبار ومعالجة المياه المالحة و(4) تعزيز معدل الاصطياد المتخلف للـ CO<sub>2</sub> و(5) تعزيز الاصطياد بالذوبان من خلال إعادة حقن المحلول الملحي أو إذابة CO<sub>2</sub> في محلول ملحي على السطح. ومن الواضح أيضاً أن هناك حاجة إلى بذل جهود لخفض الفترات الزمنية التي تتطلبها الأنشطة المطلوبة لتنفيذ مشاريع تخزين ثاني أكسيد الكربون بدءاً من التخطيط إلى مرحلة بدء التشغيل، والتي تتطلب حالياً فترة تتراوح من 7 إلى 10 سنوات.

ج. **المراقبة والكشف عن التسرب وعلاجه.** بالإمكان اعتبار الكثير من تقنيات المراقبة المستخدمة لإنتاج النفط العمود الفقري لقاعدة المعرفة الخاصة بمراقبة تخزين ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من التطوير لتقدير كمية CO<sub>2</sub> المخزنة، وحدود تدفق CO<sub>2</sub> المتصاعد وسمك الدفق المتصاعد، ومدى تشبع المسامات بالموائع. كما أن هناك حاجة إلى مزيد من الجهود البحثية من أجل (1) تحديد خصائص الطبقة الرقيقة بشكل أفضل وقياس التشبع باستخدام البيانات المستمدة من المسوحات السيزمية و(2) تطوير تقنيات لتمكين القياسات الجيوفيزيائية للآبار والمراقبة بالقرب من البئر و(3) تطوير تقنيات لقياس توزيع CO<sub>2</sub> بين الطور المائي والاصطياد المتخلف و(4) تطوير تقنيات المراقبة للكشف عن التسرب ومعالجته و(5) مراقبة تدفق CO<sub>2</sub> نحو سطح مواقع التخزين على الأرض أو قاع البحر و(6) تطوير المعرفة المتعلقة بمعالجة التسربات أو مسبباتها والآثار المترتبة على ذلك، وتخفيف مخاطر التسرب في المناطق البعيدة عن الآبار، وأخيراً (7) تخفيض التكاليف وتحسين الوقت اللازم لإجراء المراقبة المطلوبة.

### 3.2.8. الانتشار التجاري لتخزين ثاني أكسيد الكربون

استناداً إلى قاعدة بيانات مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه (IEA, 2023a) التابعة للوكالة الدولية للطاقة، هناك 11 مشروعاً مخصصاً لتخزين ثاني أكسيد الكربون، منها مشروعين تم إيقاف تشغيلهما، بينما استمرت تسعة مشاريع قيد التشغيل (عاملة). ويقدم الجدول 2.8 قائمة بالمشاريع التي ما تزال قيد التشغيل ومواقعها وملاكها وسعتها. وتتوزع المشاريع على 7 دول، بما في ذلك مشروع واحد في قطر. وبدأ أقدم مصنع قيد التشغيل في عام 1996 في النرويج.

الجدول 2.8. قائمة مشاريع التخزين المخصصة لـ CO<sub>2</sub> (IEA, 2023a)

القطاع	السعة الإنتاجية (مليون طن من CO <sub>2</sub> /العام)	سنة البداية	الشركاء	الدولة	اسم المشروع
التقاط الهواء المباشر	0.004	2021	Climeworks, CarbFix	أيسلندا	Climeworks Orca
معالجة الغاز الطبيعي	4-3.4	2019	Chevron, Shell, ExxonMobil, Osaka Gas, Tokyo Gas, Chubu Electric Power	أستراليا	Gorgon CCS
الوقود الحيوي	5-1.0	2017	ADM	الولايات المتحدة	Illinois Industrial Carbon Capture and Storage (Illinois)
معالجة الغاز الطبيعي	2.1	2019	قطر للبترول، إكسون موبيل Qatar Petroleum, ExxonMobil	قطر	Qatar LNG
تحويلات وقود أخرى	1.2 -1	2015	Shell, Marathon oil, Chevron Canada, CNRL	كندا	Quest (ALB)
الوقود الحيوي	0.18	2022	Plains CO <sub>2</sub> Reduction Partnership, Energy & Environmental Research Centre, Red Trail Energy	الولايات المتحدة	Red Trail Energy BECCS Project (ND)
معالجة الغاز الطبيعي	1	1996	Equinor, Eni	النرويج	Sleipner
معالجة الغاز الطبيعي	0.7	2008	Equinor, Petoro, TotalEnergies, Neptune, Wintershall	النرويج	Snohvit CO <sub>2</sub> capture and storage
الهيدروجين/الأمنيا	0.1	2016	Japan CCS	اليابان	Tomakomai CCS demo project
	<b>11.11-9.8</b>				<b>السعة الإجمالية</b>

ولا تزال السعة الإجمالية للمنشآت العاملة منخفضة للغاية مقارنةً بسعة التخزين المتاحة والمذكورة في الجدول 1.8 والتي تقدر بحوالي 211 مليون طن. وبحسب قاعدة بيانات الوكالة الدولية للطاقة، فإن هناك 6 مشاريع قيد الإنشاء ستبدأ التشغيل بين عامي 2024-2025 وبطاقة إجمالية تبلغ 5.3 مليون طن، بالإضافة إلى 51 مشروع في مرحلة التخطيط والمستهدف بدء تشغيلها بين عامي 2023-2030 وبسعة إجمالية تتراوح بين 138-148 مليون طن، علماً بأن هناك ما يقرب من 50٪ من المشاريع لم يتم الإعلان عنها بعد. ومعظم هذه المشاريع موجودة في الولايات المتحدة وكندا وأستراليا، و5 مشاريع

فقط موجودة في النرويج والدنمارك. وفي رأينا، فإن نمو القاعدة المعرفية الخاصة بتكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه سيؤدي حتماً إلى تسارع نمو مشاريع تخزين CO<sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية خلال العقد المقبل.

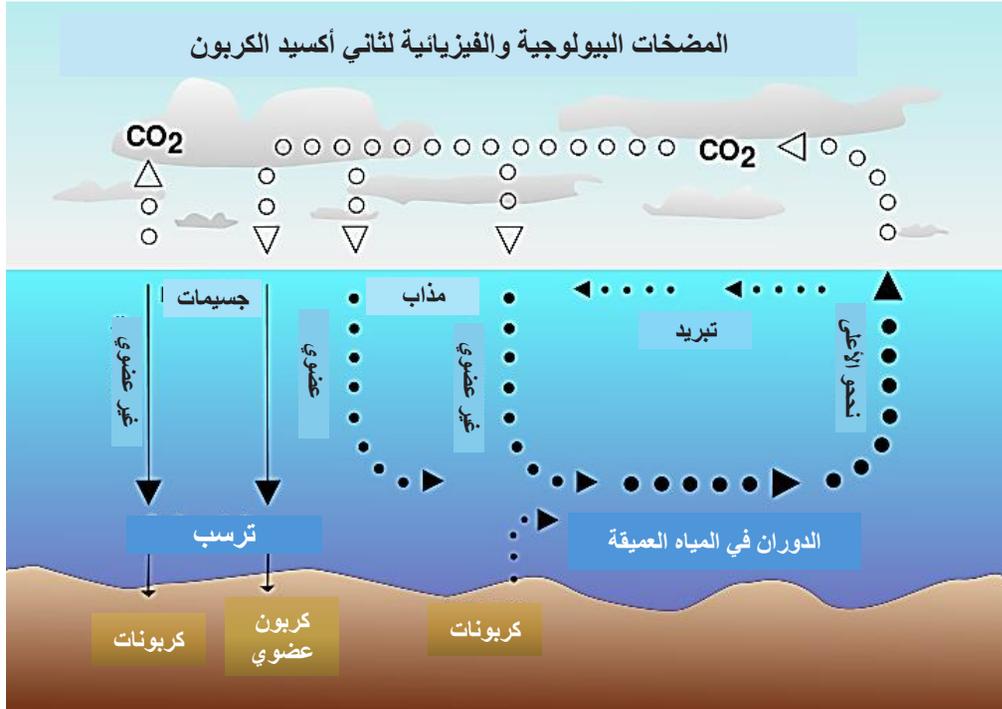
### 3.8. تقنيات الانبعاثات السلبية: التخزين في المحيطات والتمعدن (الترسيب المعدني) والغطاء النباتي

مع الأخذ في الاعتبار عمليات إعادة التدوير والتخزين التي تحدث في الطبيعة والتي تم ذكرها بإيجاز في القسم 1.8، من المهم ملاحظة أن هذه المسارات هي حالياً الطرق الرئيسية لتخفيض CO<sub>2</sub> في الغلاف الجوي. ومن ثمة، ليس من المستغرب أن نلاحظ أن من بين الاتجاهات الحالية في المجتمع العلمي هو تقييم هذه العمليات بشكل أكثر شمولاً وتطوير التقنيات التي يمكن استخدامها لتسريعها (NASEM, 2019). وسيستعرض هذا القسم مراجعة موجزة لحالة المعرفة والتقدم المحرز في الطرق الرئيسية المحتملة المتعلقة بتخزين CO<sub>2</sub> في البحار/المحيطات والتمعدن (تكوين رواسب معدنية) والغطاء النباتي.

#### 1.3.8. التخزين في البحار/المحيطات.

تعد عمليات تخزين CO<sub>2</sub> في البحار/المحيطات حالياً طريقاً رئيسياً لإعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون، سواءً على السطح أو في المياه العميقة. فعلى السطح، يحدث تبادل في الاتجاهين بين مياه البحار/المحيطات والغلاف الجوي. ويتحد CO<sub>2</sub> مع مياه البحر/المحيط لتكوين أيونات حمض الكربونيك والبيكربونات والكربونات. وتمتص نباتات العوالق النباتية الموجودة على سطح المحيط الـ CO<sub>2</sub> من المياه السطحية وتحوله إلى جزيئات حيوية، والتي تعد جزءاً من السلسلة الغذائية للحياة البحرية. وبدلاً من ذلك، إما أن تترسب العوالق النباتية إلى أعماق المحيط لتشكل رواسب في قاع المحيط أو تحملها تيارات المحيط العميقة وتظل منتشرة في هذه التيارات لفترة طويلة جداً. وتتحول العوالق النباتية المحتوية على كربونات الكالسيوم إلى صخور، وبعضها يحبس في الرواسب لتكوين الغاز والنفط. ويتضمن الشكل 7.8 وصفاً لهذه العمليات، والتي يشار إليها باسم المضخات البيولوجية والفيزيائية للـ CO<sub>2</sub> في المحيطات. والتفاعلات الكيميائية التي تؤدي إلى تخزين CO<sub>2</sub> هي:



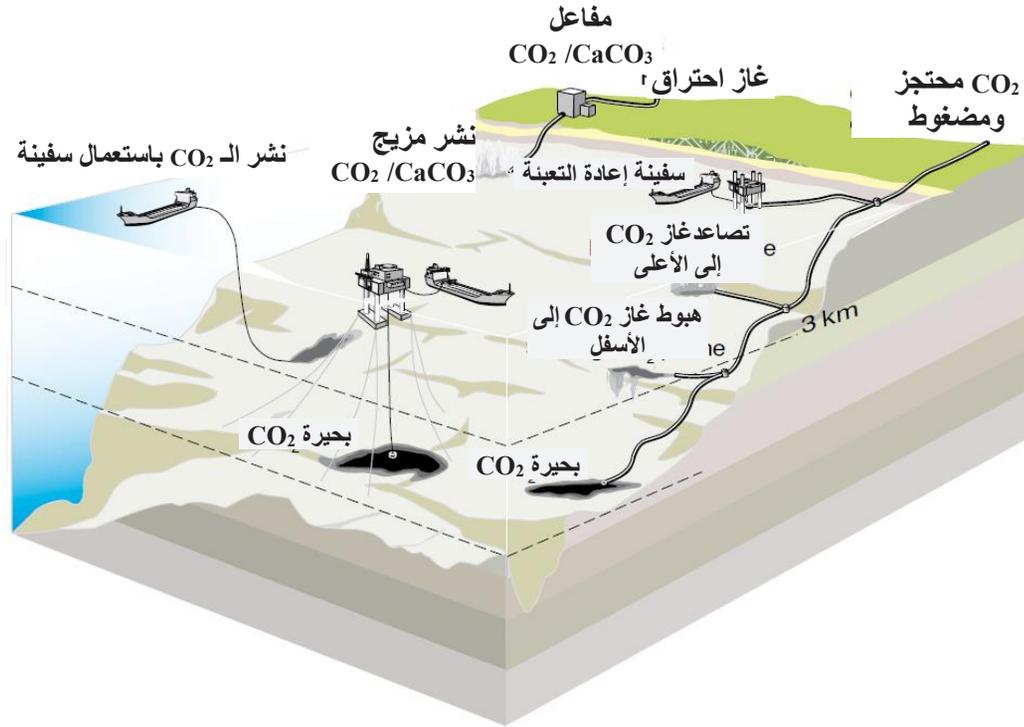


الشكل 7.8. تمثيل تخطيطي لعمليات تخزين CO<sub>2</sub> في المحيطات (المصدر: NSF, 2018).

ويعد التفاعل الأول عملية فيزيائية تحدث في طبقات المياه الضحلة الملاصقة للغلاف الجوي بينما يعد التفاعل الثاني عملية بيولوجية معقدة تؤدي إلى تكوين الأصداف البحرية، وتقوم بها مختلف الكائنات الحية في البحار/المحيطات مما يؤدي إلى إنتاج المرجان ومجموعة متنوعة من المحار، مثل بلح البحر وجراد البحر وسرطان البحر.

ومع الأخذ في الاعتبار الحقائق المذكورة أعلاه فيما يتعلق بدورة CO<sub>2</sub> في المحيطات، بدأ المجتمع العلمي، الذي ينشط في مجال التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، جهوداً لاستكشاف إمكانية تسريع دور المحيطات كطريقة لتخزين ثاني أكسيد الكربون. وتمت مناقشة الطرق الممكنة في تقرير IPCC لعام 2005 (Metz et al., 2005)، وتم تلخيصها في الشكل 8.8. وبشكل أساسي، يُضخ الـ CO<sub>2</sub> المحتجز من الشاطئ أو داخل البحر ويوزع على أعماق مختلفة في المحيط، لتسريع ذوبانه في الماء مما يجعله في متناول مختلف المضخات الفيزيائية أو البيولوجية الطبيعية الموضحة في الشكل.

وأصبحت تقنيات عمليات تثبيت CO<sub>2</sub> في الماء ناضجة بالفعل بما في ذلك تكنولوجيا الفقاعات الدقيقة الجديدة (Xue et al., 2014)، التي ما تزال قيد التطوير وتخضع لنقاش مكثف بشأن تأثيرها المحتمل على المدى الطويل على بيئة المحيطات كما هو موضح في عدد من الأوراق العلمية (Aaron, 2014; Böttcher et al., 2023; Heilweck et al., 2023; IEF, 2023; Lebling et al., 2022).



الشكل 8.8. طرق تخزين CO<sub>2</sub> في المحيطات (المصدر: Metz et al., 2005).

### 2.3.8. تمعدن الكربون (المصيدة المعدنية) (Mineral trapping).

تمعدن الكربون (Carbon Mineralization (CM))، والذي يشار إليه أيضاً باسم "الاصطياد المعدني" هو نوع متسارع من عزل CO<sub>2</sub> من خلال تفاعله مع السيليكات القلوية الحاملة للمعادن الأرضية. ويخزن الـ CO<sub>2</sub> على شكل كربونات مستقرة ولديها القدرة على تخزين أكثر من 10,000 جيجابطن من الكربون. وبدأت الفكرة في القرن الماضي ثم امتدت لاحقاً لتشمل مواد أولية أخرى بدلاً من المعادن مثل النفايات الصناعية والخبث. وفي بعض الأحيان يؤدي التغيير المستمر إلى منتجات قابلة للتطبيق تجارياً، وهو ما تمت مناقشته في القسم 8.3.7. وسنركز في هذا القسم على تقنيات التصنيع المستمر التي تهدف فقط إلى تخزين ثاني أكسيد الكربون، وقد تمت مراجعة الموضوع بالتفصيل في العديد من الأوراق العلمية (Atashin, 2016; Hills et al., 2020; Kelemen et al., 2019; Metz et al., 2005; NASEM, 2019; Romanov et al., 2015).

وتركز الجهود الحالية على تطوير نهجين وهما التكنولوجيات داخل الموقع وخارجه. ويتم تنفيذ نهج خارج الموقع فوق سطح الأرض، مما يتطلب التعدين ومعالجة المعادن والمواد الخام ونقل المنتجات والتخلص من نفايات العملية، وهي مكلفة وتتضمن بعض الصعوبات الفنية. وقد تمت دراسة هذا النهج على نطاق واسع، مما أدى إلى تطوير عدد قليل من التكنولوجيات المجدية اقتصادياً. وتتبع جدوى هذه التقنيات من تعويض التكاليف إما عن طريق استخدام المواد الأولية للنفايات المعدنية المتولدة من مصنع

إنتاج قائم يتطلب التخلص الآمن من نفاياته أو أن المنتجات لديها إمكانات سوقية جيدة للاستخدام كما تمت مناقشته في القسم 8.3.7. ويتم تنفيذ النهج في الموقع عن طريق تدوير الموائع الغنية بالـ  $CO_2$  في التكوينات المناسبة لتكوين معادن كربونات تحت السطح. ويعالج هذا النهج العديد من مشكلات تخزين المواد الصلبة خارج الموقع ولكنه يظل مجرد تخمين إلى حد كبير حتى هذا التاريخ ويتطلب بذل جهود إضافية لمزيد من التطوير. وعندما تُضخ الموائع الغنية بالـ  $CO_2$  تحت الأرض فإنها تعمل على تسريع التفاعلات الكيميائية مع المعادن القلوية الموجودة تحت السطح. ومع هذا النوع من الاصطياح يتفاعل  $CO_2$  مع المعادن الموجودة في التكوينات الصخرية على المستوى الجزيئي عبر سلسلة من التفاعلات الجيوكيميائية. وتؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين معادن كربونات جديدة وصلبة ومستقرة. ويصبح الـ  $CO_2$  الذي تم التقاطه جزءاً من الصخور الموجودة تحت الأرض. وسنتناول في الأقسام الفرعية التالية القضايا الرئيسية المتعلقة بتمعدن الكربون مع التركيز على التقنيات المرتبطة بالموقع (Atashin, 2016; NASEM, 2019).

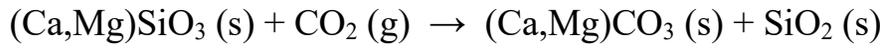
– **مصادر المعادن المطلوبة.** يتطلب تمعدن الكربون كاتيونات ثنائية التكافؤ، مثل  $Ca^{2+}$ ، و  $Mg^{2+}$ ، و  $Fe^{2+}$ ، والتي يمكن أن تشكل كربونات صلبة. ويوفر الجدول 3.8 قائمة بالمعادن الشائعة التي يتم أخذها في الاعتبار بالنسبة لهذه التقنية. وتعتبر السيليكات الغنية بالمعادن هي الأكثر وفرة في الطبيعة وتحتوي على كميات عالية من المغنيسيوم والكالسيوم. ويُفضل استخدام السيليكات المعتمدة على المغنيسيوم لأنها تحتوي على تركيز أعلى من أكسيد المعدن. وتتوفر أكبر كمية من سيليكات المغنيسيوم على شكل الأوليفين والفورستيريت والسربنتين. ويتمتع الأوليفين بأفضل خصائص تخزين الكربون، وذلك بسبب تركيز أكسيد المعدن وكثافة التخزين العالية، وهو عبارة عن مزيج صلب من  $Mg_2SiO_4$  و  $Fe_2SiO_4$  وقد تم استخدامه على نطاق واسع في صناعة مسابك المعادن لصب قوالب الرمل. ومن المهم أيضاً ملاحظة أن المعادن الحاملة للمغنيسيوم قادرة على إطلاق أعلى مستويات الطاقة من خلال التفاعل الطارد للحرارة. ويمكن استرداد هذه الطاقة لتعويض جزء من إجمالي متطلبات الطاقة للعملية.

– **كيمياء وطرق الكربنة المعدنية.** كما ذكر أعلاه، تعتبر السيليكات من أهم المعادن التي يمكن استخدامها لتخزين ثاني أكسيد الكربون إلا أن العديد من المعادن الأخرى تعتبر مرشحة جيدة لعزل  $CO_2$  بالتمعدن. وأثناء الكربنة المعدنية، تتفاعل المركبات الحاملة لأكسيد الفلز ثنائي التكافؤ ( $Ca$ ،  $Mg$ ،  $Fe$ ) أو الأكاسيد الثنائية التكافؤ الأخرى مع  $CO_2$  لتكوين كربونات كما هو موضح في المعادلة التالية لمعدن الأوليفين:

الجدول 3.8. مقارنة المعادن المختلفة لالتقاط CO<sub>2</sub> (Atashin, 2016)

RCO <sub>2</sub> (كجم/كجم)	RC (كجم/كجم)*	CaO (بالوزن %)	MgO (بالوزن %)	نوع الصخور
1.8	6.8	0.3	49.5	الأوليفين Olivine الزبرجد الزيتوني
2.3	~ 8.4	~ 0	~ 40	السربنتين Serpentine
~ 3.6	13.0	35	-	الولاستونيت Wollastonite
2.1	7.6	-	44	التلك
7.1	26	9.4	6.2	البازلت

RC = نسبة كتلة الصخور اللازمة لالتقاط وحدة كتلة الكربون؛ RCO<sub>2</sub> = نسبة كتلة الصخور اللازمة لالتقاط وحدة كتلة ثاني أكسيد الكربون



وتعتبر معادن المغنيسيوم والكالسيوم أفضل المرشحين للتمعدن، حيث أنها تشكل منتجات كربونات مستقرة عند تفاعلها مع ثاني أكسيد الكربون. كما أنها تتمتع بقابلية ذوبان منخفضة للغاية وتتبعث منها الحد الأدنى من تلوث المياه نتيجة للترشيح. ويمكن استخدام العديد من المعادن الأخرى بما في ذلك: السربنتين المتعدد الأنواع (Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>)، والبورتلانديت (Ca(OH)<sub>2</sub>)، والبروسيت (Mg(OH)<sub>2</sub>)، والارنيت (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)، والأنورثيت (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)، والجنيث (Ca<sub>9</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>)، والأكرومانيت (OH)<sub>2.6</sub>H<sub>2</sub>O/Ca<sub>1.67</sub>SiO<sub>1.57</sub>(OH)<sub>4.2</sub>)، والرانكينيت (Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)، والتوبرموريت (Ca<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>(OH)<sub>2.4</sub>H<sub>2</sub>O/)، واللاستونيت (CaSiO<sub>3</sub>)، والبيروكسين (ديوبسيدي) (CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)، والتريمولايت (Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>)، والإنستاتيت (MgSiO<sub>3</sub>)، واللامونيت (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12.4</sub>H<sub>2</sub>O).

وتجدر الإشارة إلى أن عملية الكربنة التي تحدث نتيجة تفاعل السيليكات أو الأكسيد أو الهيدروكسيد مع الـ CO<sub>2</sub> طاردة للحرارة ومواتية من الناحية الديناميكية الحرارية. كما تزداد طاقة جيبس (Gibbs Energy) الحرة لتفاعل الكربنة بزيادة درجة الحرارة. ومن ثمة، في حالة الأوليفين، يتناقص الاتجاه الديناميكي الحراري للكربنة مع زيادة درجة الحرارة، مما يحد من عملية الكربنة المعدنية ديناميكياً إلى نطاق درجة حرارة يتراوح بين 150-200°م عند الضغط الجوي. وهناك اعتبار آخر وهو تحلل منتجات الكربونات التي يجب ألا تزيد درجة حرارتها عن 900°م بالنسبة لكربونات الكالسيوم و300°م

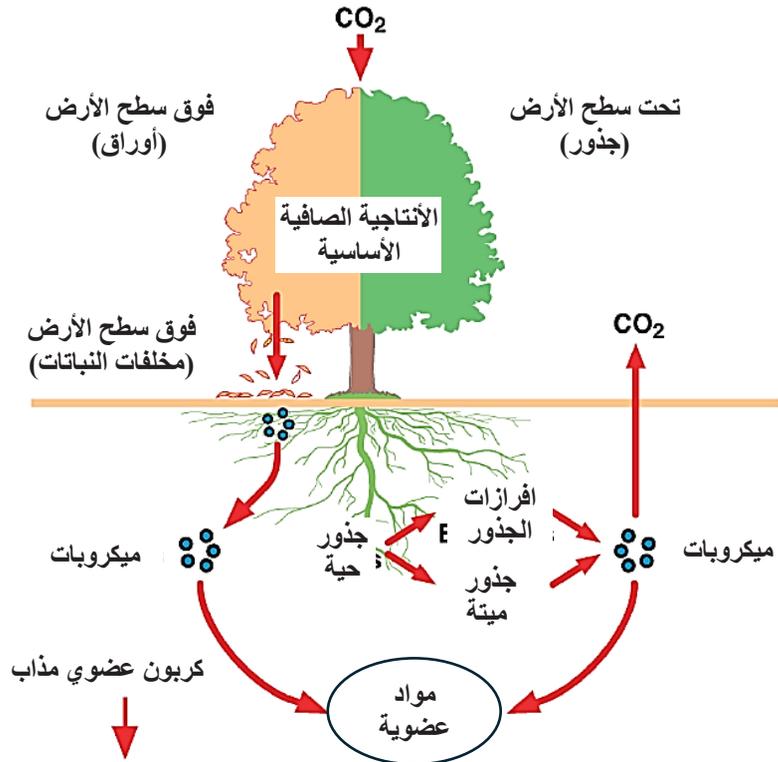
لكربونات المغنيسيوم. وبالتالي، ينبغي أن يحافظ على درجات الحرارة بمستويات أقل من هذه الحدود. وتتركز معظم الأبحاث المتعلقة بالتخزين عن طريق تمعدن الكربون في الموقع على التكوينات الصخرية المافية والمافية للغاية، وخاصةً المقاطعات الكبيرة من صخور الحمم البازلتية والكتل الكبيرة من البيريدوتيت في الغلاف الجيولوجي الأرضي، بسبب وفرتها وتوزيعها الجغرافي الواسع ومعدلات تمعدن الكربون السريعة (Atashin, 2016; Hills et al., 2020; NASEM, 2019). وقد بُذلت جهود بحثية مكثفة لتطوير تقنية تمعدن الكربون بواسطة شركة Carbfix ومقرها أيسلندا (<https://www.carbfix.com/>) منذ عام 2008 ومن خلال مشروع Wallula Basalt بواسطة المختبر الوطني لشمال غرب المحيط الهادئ (<https://www.pnnl.gov/projects/carbon-storage/wallula-basalt-project>) منذ عام 2013 في ولاية واشنطن، الولايات المتحدة الأمريكية. وكانت النتائج باستخدام غاز المداخل المحتوي على CO<sub>2</sub> وكبريتيد الهيدروجين مشجعة حيث أظهرت أن الكثير من الغازات المذابة يمكن تمعدنها في غضون أشهر بتكلفة تقدر بنحو 25 دولاراً أمريكياً/طن من خليط الغاز في موقع CarbFix2، وأن التكنولوجيا توفر معالجة آمنة وطويلة الأمد لتخزين الـ CO<sub>2</sub> (Gunnarsson et al., 2018). وعلى الرغم من هذه النتائج الإيجابية، من المهم ملاحظة المزايا والعيوب الحالية لتقنية تمعدن الكربون في الموقع (الجدول 4.8) كما أبرزتها التقارير الأخيرة (Hills et al., 2020; NASEM, 2019).

### 3.3.8. إزالة الكربون الأرضي وعزله.

عزل الكربون الأرضي هو زيادة كمية الكربون العضوي (Organic Carbon (OC)) في المخزون البيولوجي، نتيجة امتصاص النباتات للـ CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي ودمجه في المحيط الحيوي. ومخزونات الكربون محل الاهتمام هي تلك التي يمكن أن تستمر لعدة عقود، مثل الكتلة الحيوية الخشبية والحطام النباتي الخشن والمواد العضوية في التربة (Soil Organic Matter (SOM)). ويزداد المخزون الدائم من الكربون الأرضي عن طريق زيادة معدل مدخلات الكربون وانخفاض مخرجات الكربون. وهذا يعني زراعة المزيد من الأشجار مع المزيد من الكتلة الحيوية لكل وحدة مساحة، والحفاظ على الكتلة الحيوية على مدى فترة زمنية أطول، وتخفيض فقدان الكتلة الحيوية الخشبية من خلال الأنشطة الطبيعية أو البشرية. كما يعني أيضاً زيادة معدل مدخلات الحطام المشتق من النباتات إلى التربة وتخفيض معدل تحلل المركبات العضوية الموجودة في التربة. ويلخص الشكل 9.8 هذه العمليات بشكل تخطيطي (NASEM, 2019; Oldenburg et al., 2008).

الجدول 4.8. مزايا وعيوب تقنية كربنة المعادن في الموقع (Hills et al., 2020; NASEM, 2019).

إيجابيات - فوائد	سلبيات
تتوفر "خزانات" صخرية ضخمة، منها تكوينات الحمم البازلتية ذات مسامية عالية ويمكن الوصول إليها على أعماق أقل من 1000 متر.	التكنولوجيا قيد التطوير وعدد من القضايا العلمية تتطلب المزيد من جهود البحث والتطوير
إمكانات موزعة في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك قاع المحيطات	متطلبات البنية التحتية والجهود الهندسية مرتفعة
إمكانية التوسع مرتفعة	يحتاج CO <sub>2</sub> إلى إذابة أو أن يكون في طور فوق الحرج؛ حركية التفاعل بطيئة
إمكانية تخزين عشرات المليارات من الأطنان من CO <sub>2</sub> سنوياً، وفي نهاية المطاف تخزين آلاف تريليونات الأطنان من الانبعاثات لسنوات عديدة	قد لا يكون هذا النهج مقبولاً في المجتمع
تشمل الفوائد الجانبية دعم تطوير التكنولوجيا المتعلقة باستخراج النفط والغاز من المكامن الضيقة، والتعدين في الموقع (على سبيل المثال، لليورانيوم)، وإنتاج الطاقة الحرارية الجيولوجية	الآثار السلبية المحتملة على التكوينات الرسوبية، وخاصة تلوث الموارد المائية والزلازل المستحثة



الشكل 9.8. العمليات الأرضية لتدوير الكربون (المصدر: Oldenburg et al., 2008).

في هذا القسم من مراجعتنا، سنغطي هذا الموضوع بإيجاز نظراً لأن مساهمته المحتملة في التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في أي منطقة محدودة بسبب ندرة موارد المياه والاستخدام المحتمل البديل للأراضي من أجل حلول أكثر فعالية لصافي الطاقة الصفريّة، مثل توليد الطاقة المتجددة. وتستند المراجعة إلى عدد من الأوراق والتقارير العلمية التي تم نشرها على مدار الخمسة عشر عاماً الماضية (Janzen et al., 2022; NASEM, 2019; Oldenburg et al., 2008; Sha et al., 2022; Sheikh et al., 2014; Srivastava et al., 2010; Trivedi et al., 2018).

وينبع النهج المتبع في التقاط الكربون الأرضي من الدروس المستفادة على مدى 200 إلى 300 سنة الماضية فيما يتعلق باستخدام الأراضي وإدارتها. وتبلغ التقديرات الأخيرة للخسائر البشرية المنشأ في مخزونات الكربون الأرضية حوالي 145 جيجابطن من الكربون من الكتلة الحيوية الخشبية والتربة من 1850 إلى 2015، و133 جيجابطن من مخزون الكربون في التربة على مدى الـ 12,000 سنة الماضية، و379 جيجابطن من الكتلة الحيوية على مدى الـ 10,000 سنة الماضية. وبالتالي، حدث بشكل أساسي استنفاد كبير للكتلة الحيوية ومخزونات الكربون في التربة، بالإضافة إلى زيادة كبيرة في تدفق CO<sub>2</sub> إلى الغلاف الجوي خلال المائتي عام الماضية بسبب تحويل النظم البيئية المحلية إلى أراضي زراعية مُدارة. ولذلك، فإن الإدارة الأفضل لموارد الأراضي يمكن أن تؤدي إلى عكس هذا الاتجاه. وينبع الأساس المنطقي لمتابعة عزل الكربون الأرضي لإزالة CO<sub>2</sub> من ثلاثة عوامل:

– إن "التكنولوجيا" الخاصة بامتصاص النباتات لـ CO<sub>2</sub> وتخزينه في مجتمعات الكربون الحيوي الأطول عمراً معروفة، وهي قادرة على المنافسة بقوة وبشكل اقتصادي مع الخيارات الأخرى لإزالة الكربون وتخفيف آثاره.

– السعة التخزينية عالية جداً مع الأخذ في الاعتبار مخزون الكربون التاريخي مقارنةً بالمخزون المعاصر. ومن الواضح أن هذا الاتجاه يمكن عكسه من خلال استخدام الأراضي وإدارتها.

– قد تؤدي زيادة الكتلة الحيوية ومخزونات الكربون في التربة إلى فوائد إضافية، مثل حماية انسياب مياه الأمطار، وتحسين التنوع البيولوجي، وصحة التربة وخصوبتها.

ولدعم عزل الكربون الأرضي الطبيعي، من المهم إدارة الموارد الطبيعية بكفاءة، مع مراعاة العوامل الثلاثة المذكورة أعلاه (NASEM, 2019). ومن هنا فإن التوجهات العالمية الحالية هي التركيز على الأنظمة والممارسات التالية والعمل على تحسينها:

أ. **الممارسات المتعلقة بالغابات.** ينصب تركيز الإدارة المحسنة على (1) تجنب تحويل أراضي الغابات إلى استخدامات أخرى للأراضي ذات معدلات أقل لإزالة ثاني أكسيد الكربون و(2) تحويل الأراضي غير الحرجية إلى غابات وبالتالي زيادة إزالة الكربون ومخزونات و(3) تعديل

ممارسات إدارة الغابات إما لزيادة مخزون الكربون أو زيادة صافي إزالة CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي أو كليهما. ولقد تم بالفعل تطوير واعتماد مجموعة واسعة من الخيارات والممارسات الموصى بها.

ب. **الممارسات التقليدية في الأراضي الزراعية والمراعي.** من المهم أن نلاحظ أن معظم الأراضي الزراعية في جميع أنحاء العالم لا تتم إدارتها على النحو الأمثل لزيادة تخزين الكربون في التربة. وتتوفر العديد من ممارسات إدارة الحفظ التي يمكن أن تزيد من مخزون الكربون في التربة ويمارسها بعض المزارعين بنجاح. وفي العديد من الحالات، تمت دراسة هذه الممارسات جيداً من خلال تجارب ميدانية طويلة الأمد وملاحظات ميدانية مقارنة. ويتضمن الجدول 5.8 عدة فئات من ممارسات الإدارة التي يمكن أن تؤدي إلى زيادة مدخلات الكربون في التربة أو تقليل خسائر الكربون من التربة. فعلى سبيل المثال، يمكن للمزارعين أن يعتمدوا محاصيل تزيد من مدخلات الكربون في التربة عن طريق استبدال الأراضي العارية الشتوية بمحاصيل التغطية الموسمية التي تُنتج كميات كبيرة من المخلفات، وزيادة نسبة محاصيل الأعلاف العشبية والبقولية المعمرة. ويمكن لمثل هذه الاختيارات الزراعية أن تزيد من الوقت الذي يتم خلاله الحفاظ على الغطاء النباتي الحي على التربة وزيادة كمية الكربون المشتق من الجذور المضافة إلى التربة. ويبين الجدول 6.8 نتائج بعض الممارسات التي أدت إلى تعزيز المواد الكربونية في التربة.

الجدول 5.8. الإجراءات الزراعية التقليدية لزيادة تخزين الكربون العضوي وتعزيز إزالة CO<sub>2</sub> من الغلاف الجوي (NASEM, 2019).

ممارسات الإدارة	زيادة مدخلات الكربون	تخفيض خسائر الكربون
زيادة الإنتاجية والاحتفاظ بالمخلفات	X	
تغطية المحاصيل	X	
عدم الحراثة وأعمال الحرث المحافظة الأخرى	X	X
إضافة السماد والكمبوست	X	
التحويل إلى الأعشاب المعمرة والبقوليات	X	X
الحراثة الزراعية	X	X
إعادة ترطيب التربة العضوية (أي الخث والوحد)		X
تحسين إدارة أراضي الرعي	X	X

الجدول 6.8. تأثير اعتماد ممارسات الحفظ للأراضي الزراعية السنوية على معدلات عزل الكربون في التربة (NASEM, 2019).

المنطقة (عدد المقارنات الميدانية)	فارق الكربون العضوي في التربة $\Delta$ (طن/هكتار سنوياً)	الممارسات المعتمدة
عالمياً والولايات المتحدة (170)	0.36-0.32	المحاصيل المغطاة
عالمياً والولايات المتحدة (94) (معتدل جاف ومعتدل رطب)	0.34-0.1	دورات محسنة
عالمياً والولايات المتحدة (924)	0.80-0.15	عدم الحرثة

ج. تعديل التربة بالمواد العضوية. يمكن أن تؤدي إضافة المواد العضوية مثل السماد الحيواني وبقايا النباتات إلى زيادة محتويات الكربون في التربة، من خلال الكربون المضاف في التعديل والتحسين الذي تضيفه على الخصائص الفيزيائية للتربة وتوافر العناصر الغذائية. ولا تؤدي مثل هذه التعديلات بشكل مباشر إلى إزالة  $CO_2$  من الغلاف الجوي، ولكن التحسن في أداء التربة يؤدي إلى زيادة إنتاجية النبات ومدخلات الكربون المتبقية، وبالتالي تحفيز الزيادة الحقيقية في إزالة  $CO_2$ .

د. تحويل الأراضي الزراعية السنوية إلى نباتات معمرة (Annual Cropland to Perennial Vegetation (ACPV)). تعتبر ممارسة ACPV هي الوسيلة الأكثر فعالية لزيادة مخزون الكربون في التربة. ويمكن أن تكون النباتات المعمرة عبارة عن أعشاب معمرة وإنتاج الأعلاف أو التشجير أو محاصيل الطاقة المخصصة أو كحفظ جانبي. والأعشاب المعمرة المخصصة كمحاصيل طاقة التي تمت زراعتها في الأراضي الزراعية السابقة عادةً ما تزيد من المواد الكربونية في التربة، وبالتالي بإمكانها الأسهام في صافي رصيد غازات الدفيئة لتلك الأنظمة. وأظهرت النتائج المنشورة أن التحويل السنوي للأراضي الزراعية إلى مراعي بلغ 341 حقلاً والتحويل السنوي للأراضي الزراعية إلى غابات يصل إلى 257 حقلاً مما أدى إلى زيادة متوسط الكربون العضوي في التربة في حدود 0.9-0.56 طن كربون/هكتار/سنة و0.16-0.54 طن كربون/هكتار/سنة، على التوالي.

ه. الحراثة الزراعية. يشير هذا المصطلح إلى زراعة الأشجار في الأراضي المخصصة للمراعي والمحاصيل السنوية. وقد تشمل الأشجار مزارع حدودية أو عازلة، مثل الأسوار، أو

مصدات الرياح، أو حواجز الغابات، أو تُستخدم في تسلسل زمني أو بالتناوب مع المحاصيل السنوية. وعادةً ما تؤدي إضافة هذه الأنواع الخشبية المعمرة مع المحاصيل السنوية أو المراعي إلى زيادة مخزون الكربون في التربة ومخزونات الكتلة الحيوية الخشبية.

و. **تحسين إدارة أراضي الرعي.** تعد هذه الأراضي، التي يشار إليها غالباً باسم المراعي أو الأراضي العشبية، من الأراضي المدارة التي تحتوي على أعلى نسبة من الكربون في التربة. وتحافظ الأعشاب المعمرة التي تهيمن عادةً على هذه الأراضي على جزء كبير من الكربون المثبت ضوئياً تحت الأرض، وهي تُستخدم عادةً للرعي. وبالتالي، فإن إدارة الرعي، والتي تتعلق بشكل أساسي بكمية وتوقيت ومدة إزالة النباتات بواسطة حيوانات الرعي، تؤثر على إنتاجية الأرض وتخزينها للكربون. ومع الرعي الجائر، تنخفض إنتاجية النبات وبالتالي امتصاص الكربون، كما ينخفض مخزون الكربون في التربة. ومن شأن الإدارة الأكثر كثافة للتربة، مثل التسميد وإضافة الكلس والري، أن تعزز إنتاجية النباتات ومخزونها من الكربون. فعلى سبيل المثال، تبين أن تحسين الخصوبة وتحسين الرعي يؤديان إلى زيادة متوسطة في الكربون العضوي في التربة في حدود 0.57 طن كربون/هكتار/سنة و0.3-1.3 طن كربون/هكتار/سنة، على التوالي.

ز. **إعادة ترطيب التربة العضوية.** عادةً ما تكون الأراضي الرطبة غنية جداً بالمواد العضوية. ومن ثمة، غالباً ما يتم تحويلها للاستخدام الزراعي في جميع أنحاء العالم. ونتيجةً لذلك، فإنها عادةً ما تفقد موادها العضوية عن طريق التحلل. والعمل على استعادة الأراضي الرطبة ونباتاتها المعمرة تعيد تكوين التربة كمصرف صافي للكربون.

وبالإضافة إلى التدخل الإداري المذكور أعلاه، هناك أيضاً عدد قليل من الخيارات الأخرى قيد النظر والتي تشمل (1) التعديل باستخدام الفحم الحيوي و(2) تقليب التربة بعمق و(3) زراعة المحاصيل السنوية ذات مدخلات الكربون المتزايدة و(4) زراعة محاصيل الحبوب والبذور الزيتية المعمرة التي تحتوي على قدر أكبر من الكربون تحت الأرض. وتعتبر هذه التدخلات بالإضافة إلى تقنيات إدارة الأراضي المذكورة أعلاه إجراءات محتملة جيدة لدعم عزل الكربون الأرضي الطبيعي. ومع ذلك، فإن معظمها لا يزال في مرحلة البحث ولا يزال تطبيقها على المستويات التجارية محدود ولكنها في نمو. ويلزم بذل المزيد من الجهود لتطويرها على نطاق واسع وتحديد أفضل الممارسات التي ينبغي اتباعها.

#### 4.8. التوقعات المستقبلية لتخزين ثاني أكسيد الكربون

حقق مجال تخزين CO<sub>2</sub> تقدماً جيداً على مدار السنوات العشر الماضية، فقد تم إثبات جدوى هذه العملية من خلال العديد من المشاريع الصناعية، والتي كان معظمها مشاريع تتعلق بالاستخلاص المعزز للنفط. ولا تزال المعرفة والخبرة المتعلقة بالتخزين في طبقات المياه الجوفية المالحة محدودة. بالإضافة إلى ذلك، سبق وأن قامت صناعة النفط بتطوير التكنولوجيا المتعلقة برصد CO<sub>2</sub> لأغراض الاستخلاص المعزز للنفط، ولديها خبرة جيدة في هذا المجال والتي يمكن تطبيقها في مجال تخزين الـ CO<sub>2</sub>. ومن الواضح أنه مع تزايد الحاجة إلى التخزين الدائم، هناك حاجة إلى جهود البحث والتطوير لتطوير تقنيات مراقبة أفضل. ومن المتوقع أن تكون الأهداف الرئيسية للأبحاث في المجالات التي تعزز القدرة على قياس التنبؤات بكمية CO<sub>2</sub> المخزنة، ومدى تحرك مسار الـ CO<sub>2</sub> التصاعدي في المكمن، والتشبع الجيوفيزيائي، ومدى التقاط CO<sub>2</sub> وذوبانه. بالإضافة إلى ذلك، هناك حاجة إلى تطوير تكنولوجيا الكشف عن تسرب CO<sub>2</sub> لضمان امتثال تخزين CO<sub>2</sub> للوائح وهذا يتطلب زيادة حساسية مؤشرات تسرب ثاني أكسيد الكربون، مثل تقنيات مراقبة الضغط وقياس تدفق CO<sub>2</sub> على السطح فوق مواقع التخزين. وهناك أيضاً حاجة ملحة لتطوير أساليب محسنة لمعالجة مشكلات تسرب ثاني أكسيد الكربون، مثل الأختام الكيميائية وتحسين إدارة الضغط في الموقع.

لقد تم بالفعل تطوير تقنيات تحديد خصائص الموقع بشكل جيد ويمكن تطبيق ما تم التوصل إليه من ثروة معرفية على مواقع تخزين ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، هناك حاجة إلى تعزيز المعرفة في بعض المجالات خاصة تلك المتعلقة بتقييم مخاطر تخزين ثاني أكسيد الكربون. ومن بين المجالات ذات الأولوية ما يلي: (1) تقييم تأثير الشوائب الموجودة عادةً في تيارات CO<sub>2</sub> على خصائص منظومة ثاني أكسيد الكربون-المحلول الملحي و(2) تأثيرات الهيدروكربونات في التكوين الجيولوجي على تخزين ثاني أكسيد الكربون و(3) تأثير عدم تجانس صخور الخزان أو المكمن على خصائص التدفق. علاوةً على ذلك، هناك حاجة إلى تحسين التقديرات والقياس الكمي لسعة تخزين CO<sub>2</sub> الدائمة لضمان كفاية سعة تخزين الـ CO<sub>2</sub> المخطط لالتقاطه. وينبغي أن تستند هذه التقديرات إلى نماذج ديناميكية متغيرة بمرور الوقت، تأخذ في الاعتبار تراكم الضغط والحقن وتحرك مسار الـ CO<sub>2</sub> في المكمن أو الخزان (Bui et al., 2018).

## الفصل 9 - نقل ثاني أكسيد الكربون

- 1.9. نظرة عامة حول نقل ثاني أكسيد الكربون
- 2.9. نقل  $CO_2$  عبر خطوط الأنابيب
  - 1.2.9. محتوى تيار  $CO_2$  من المركبات الموصى به للنقل
  - 2.2.9. التجفيف والضغط
  - 3.2.9. متطلبات التصميم لخطوط أنابيب النقل
- 3.9. نقل  $CO_2$  عن طريق السفن
- 4.9. نقل  $CO_2$  عن طريق الشاحنات والسكك الحديدية
- 5.9. المحاور والتجمعات العنقودية لثاني أكسيد الكربون
- 6.9. التوقعات المستقبلية لنقل ثاني أكسيد الكربون

## 1.9. نظرة عامة حول نقل ثاني أكسيد الكربون

بعد الالتقاط من مصدر الانبعاثات أو من خلال الالتقاط المباشر للهواء، يتوجب تحويل  $CO_2$  إلى طور يمكن التحكم فيه من أجل النقل، مما يتطلب ضغط و/أو تسهيل ثاني أكسيد الكربون، وتحويل الغاز إلى طور كثيف للاستفادة من كثافته الأكبر. ويُستخدم حالياً نسبة كبيرة من  $CO_2$  المحتجز في الموقع (in-situ) أو يتم نقله عبر خطوط الأنابيب أو الشاحنات أو مقطورات السكك الحديدية المزودة بصهاريج إلى مواقع بالقرب من منشأة الالتقاط للاستخدام أو التخزين. وبما أن معظم مرافق التقاط ثاني أكسيد الكربون، سواءً الحالية أو المستقبلية، سعتها صغيرة نسبياً للسماح بالاستخدام أو التخزين الفعال من حيث التكلفة، فإن الصناعة تخطط لإنشاء محاور ( $CO_2$  hubs) لتسهيل جمع الغاز من المجمعات الصناعية المنتشرة في مناطق مختلفة من العالم. والغرض من هذه المحاور تجميع الـ  $CO_2$  لنقله على نطاق واسع إلى مراكز للاستخدام النهائي أو التخزين. ووفق متطلبات الالتقاط وتخزين الكربون، فإن خطوط الأنابيب والنقل بالسفن هما الخياران الأمثلان في الوقت الحاضر حيث أن كلاهما مدعومان بتقنيات ناضجة وراسخة. ويعتمد اختيار أي من هذين الخيارين على كمية الـ  $CO_2$  والمسافة بين موقع الالتقاط ونقطة التخزين أو الاستخدام. أما بالنسبة للكميات الأصغر والتوزيع على نطاق أقصر، فتتوفر الشاحنات ومقطورات السكك الحديدية المزودة بصهاريج وتعتبر الحل الأفضل للنقل من النواحي الاقتصادية. ويلخص الشكل 1.9 مزايا وعيوب خيارات النقل، وتقدم الأقسام التالية مراجعة موجزة للوضع الحالي لتقنيات النقل وخطط إنشاء محاور لثاني أكسيد الكربون.

## 2.9. نقل $CO_2$ عبر خطوط الأنابيب

بشكل عام، يتم حالياً نقل غالبية الـ  $CO_2$  عبر خطوط الأنابيب. ويُفضل استخدام الطور الكثيف للـ  $CO_2$  نظراً لأن الحفاظ على درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة للغاز يمثل مشكلة إلى حد ما. ويتم تحديد مستوى الضغط بناءً على عدد من العوامل (parameters) مثل معدل التدفق وانخفاض الضغط والهيدروديناميكا والخصائص الفيزيائية الحرارية للغاز المضغوط. وترتبط الخصائص الديناميكية بدورها بمكونات تيار ثاني أكسيد الكربون. ومن ثمة، فإن تصميم منظومة خطوط الأنابيب، وإلى حد ما تصميم سفن الشحن، يتطلب معرفة كاملة بجميع العوامل المذكورة أعلاه وفهم تفاعلها (Bui et al., 2018). وفيما يلي لمحة موجزة عن أهم العوامل التي تؤثر على نقل ثاني أكسيد الكربون.

	السلبات	الإيجابيات
   	<ul style="list-style-type: none"> <li>• الالتزام بالمعايير الصارمة لكل من مصدر ووجهة الـ CO<sub>2</sub> ، كما يتوجب أن يكونوا قرب خط السكك الحديدية</li> <li>• التكاليف المرتبطة بالنقل باهظة</li> <li>• تتأثر بتقلبات الطقس وحركة المرور</li> <li>• تكلفة القوى العاملة والوقود مرتفعة للغاية</li> <li>• تتطلب بنية تحتية لخطوط الأنابيب واستثمارات مالية مرتفعة في البداية</li> <li>• تم وضع معايير صارمة على معدات الشحن البحري فيما يتعلق بدرجة الحرارة والضغط</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>صهاريج سكك الحديد</b></li> <li>• لا تتأثر بحالة الطقس أو حركة المرور</li> <li>• لا توجد ضرورة لإنشاء بنية تحتية متخصصة</li> <li>• <b>صهاريج النقل على الطرقات</b></li> <li>• غير مقيدة بمصدر أو وجهة الـ CO<sub>2</sub></li> <li>• لا توجد ضرورة لاستثمارات لإنشاء البنية التحتية</li> <li>• <b>خطوط الأنابيب</b></li> <li>• الكميات التي يمكن نقلها كبيرة</li> <li>• تكاليف النقل قليلة</li> <li>• <b>السفن</b></li> <li>• الاقتصادية جيدة</li> <li>• التقدم التكنولوجي وصل إلى مرحلة النضج</li> </ul>

الشكل 1.9. تقييم مزايا وعيوب تقنيات نقل CO<sub>2</sub> (المصدر: (Dziejarski et al., 2023).

### 1.2.9. محتوى CO<sub>2</sub> من المركبات في التيار المعد للنقل.

بالنسبة للنقل باستخدام خطوط الأنابيب، من الضروري تحديد تفاصيل جميع المركبات والشوائب الموجودة في تيار الـ CO<sub>2</sub> بدقة، بما في ذلك المواد الكيميائية والشوائب التي يحتويها غاز المداخل أو المواد الكيميائية المستخدمة أثناء الالتقاط. ومن بين هذه الشوائب الماء نظراً لدوره في تآكل فولاذ الأنابيب، والغازات غير القابلة للتكثيف مثل N<sub>2</sub> أو O<sub>2</sub> أو Ar والتي تؤثر على توازن الغاز والسائل في الخليط. ويجب أن تفي مكونات تيار الغاز المعالج والمضغوط بالمتطلبات الموصى بها لمحتوى الغاز من المكونات الفردية كما هو موضح في الجدول 1.9. وتسبب الغازات غير المتكثفة الموجودة في الخليط زيادة غلاف الطور مما يؤثر على كمية الطاقة المطلوبة للضغط أو التسييل وكذلك النقل عبر خطوط الأنابيب، كما انها قد تؤثر على سلوك التدفق الديناميكي (Bielka et al., 2023; Bui et al., 2018).

الجدول 1.9. التركيزات الموصى بها لمكونات تيار غاز الـ CO<sub>2</sub> لأغراض النقل بواسطة خطوط الأنابيب.

مكونات تيار الغاز	وحدة	التركيز الموصى به
CO <sub>2</sub>	%	< 95
H <sub>2</sub> O	جزء في المليون	> 50
H <sub>2</sub> S	جزء في المليون	> (10-50)
O <sub>2</sub>	جزء في المليون	> 10
N <sub>2</sub>	%	> 4
H <sub>2</sub>	%	> 4
Ar	%	> 4
CO	جزء في المليون	> 2000
أكاسيد النيتروجين (NO <sub>x</sub> )	جزء في المليون	> 100
أكاسيد الكبريت (SO <sub>x</sub> )	جزء في المليون	> 50
الهيدروكربونات (HC)	%	> 2

### 2.2.9. التجفيف والضغط.

يتم عادةً تجفيف غاز الـ CO<sub>2</sub> قبل ضغطه وذلك باستخدام تقنيات مختلفة، ويرجع السبب في ذلك إلى أن غاز المداخن يحتوي عادةً على نسبة مرتفعة من بخار الماء عند نقطة الانبعاث تزيد عن القيم المسموح بها للنقل وينتج عنها تكون حمض الكربونيك، الذي يمكن أن يساهم في إعاقة تدفق الغاز. وتسهم عملية التجفيف بشكل أساسي في منع تكوين الهيدرات تحت الضغوط المرتفعة وتقلل من تآكل المعدات في منشأة الـ CCUS. ويهدف تجفيف الغاز إلى الوصول إلى محتوى مائي يقل عن 50 جزء في المليون. وتشمل الطرق المستخدمة حالياً لتجفيف CO<sub>2</sub> استخدام المذيبات أو الامتصاص الفيزيائي، ويعد السيليكسول (Selexol) الذي يعتمد على الجليكول والريكتيسول (Rectisol) الذي يعتمد على الميثانول من المذيبات الأكثر استخداماً. واستُخدمت تقنية الامتصاص الكيميائي (باستعمال الأمينات) في منشآت على الأقل، كما استُخدمت أيضاً تكنولوجيا المناخل الجزيئية (molecular sieves) في إحدى المنشآت. ويجري حالياً النظر في تقنيات أخرى لتجفيف الـ CO<sub>2</sub> وفي تصاميم مستجدة مبتكرة لاستخدامها في مشاريع مستقبلية تتعلق بالتقاط الـ CO<sub>2</sub> وتخزينه، وتشمل هذه التقنيات الأغشية المركبة المقاومة للماء لفصل CO<sub>2</sub> عن الميثان، والمناخل الجزيئية وتجفيف CO<sub>2</sub> باستخدام ثلاثي إيثيلين جلايكول ((Triethylene glycol (TEG)).

وبعد اتمام عملية الترفيف، يتم ضغط الـ CO<sub>2</sub> أو تسييله، وهي عملية تتطلب كمية عالية من الطاقة وبالتالي تستوجب اختياراً مناسباً للنهج الذي ينبغي اتباعه (Witkowski et al., 2013). ولتخفيض متطلبات الطاقة، يتم اللجوء إلى إعادة استخدام الحرارة المتولدة كجزء من منظومة التبريد البيئي، بالإضافة إلى خفض الشوائب إلى الحد الأدنى لأنها تؤثر على متطلبات الطاقة (Bielka et al., 2018; Bui et al., 2023).

### 3.2.9. متطلبات التصميم لخطوط أنابيب النقل.

تُصمم خطوط أنابيب نقل الـ CO<sub>2</sub> وفقاً للمعايير المستخدمة في تصميم خطوط أنابيب الغاز الطبيعي، وتشمل العوامل التي ينبغي النظر فيها محتوى الغاز من الشوائب والكثافة واللزوجة والانضغاط وطبيعة الشوائب. ويجب أن تتم المحافظة على ظروف التشغيل، مثل الضغوط ودرجات الحرارة، والحفاظ على الغاز في حالة أحادية الطور على طول الأنبوب. ولذلك ينبغي أخذ ما يلي بعين الاعتبار:

أ. **تصميم شبكة خطوط الأنابيب.** نظراً لارتفاع تكلفة خطوط الأنابيب، تعطى الأولوية عند تصميم الشبكة إلى اختيار النهج الأمثل من حيث التكلفة والذي يتضمن تقديرات تكلفة موثوقة تعتمد على بيانات كافية. ويتوجب تصميم شبكة أنابيب نقل الـ CO<sub>2</sub> وفقاً للمواصفات والاعتبارات العامة التالية:

- السماح بالربط مع أجهزة البث المختلفة في جميع أنحاء المنطقة الجغرافية للشبكة المخططة
- اختيار السعة المناسبة مع مراعاة النمو المحتمل لالتقاط وتخزين الكربون إما من خلال نمو مصادر الانبعاثات الحالية أو تلبية احتياجات مصادر انبعاثات محتملة جديدة
- القدرة على معالجة التقطع العرضي في معدل تدفق اللقيم
- التغيرات المستقبلية المحتملة في مكونات تيارات ثاني أكسيد الكربون
- المخاطر القائمة والمحتملة المتعلقة بالمنشأة والمجتمع المجاور والبيئة
- وجود تجهيزات كافية لمعالجة التسرب مثل مانعات التشقق وصمامات الإغلاق في حالات الطوارئ لعزل التسربات.

ب. **الاعتبارات المادية.** تؤثر مواد خطوط الأنابيب على كل من التكلفة الرأسمالية الأولية وفي مرحلة لاحقة على تكلفة التشغيل. ومن ثمة، يعد اختيار نوعية فولاذ خطوط الأنابيب أمراً ضرورياً مع التركيز على القدرة على مقاومة الأعطاب والتوقف عن التشغيل بسبب التشقق والتآكل والتكلفة المرتبطة بذلك. ويجب حماية الأنابيب من التآكل بشكل مناسب من خلال الحماية الكاثودية، والطلاءات الواقية الخارجية، وغيرها من التدابير الضرورية. وتشمل الاعتبارات الأخرى تجنب

حدوث كسور لينة (ductile) وهشة (brittle). ولتجنب عبء التكاليف، ينبغي بذل جهود محاكاة كافية باستخدام نماذج السوائل والهيكليّة لتقييم احتمال انتشار الشقوق/تخفيف ضغط السوائل. وتجدر الإشارة إلى أن لدى صناعة النفط والغاز معرفة عميقة وخبرة متميزة بموضوع تصميم شبكات خطوط الأنابيب تكونت على مدى العقود العديدة الماضية لدعم أنشطة الصناعة في مجال الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون وقبلها في مجال خطوط أنابيب الغاز الطبيعي. ويتجاوز حجم شبكة خطوط أنابيب CO<sub>2</sub> العاملة حالياً 46,000 كيلومتر في جميع أنحاء العالم معظمها في الولايات المتحدة الأمريكية. ويوضح الشكل 2.9 شبكة نقل الـ CO<sub>2</sub> الحالية الممتدة في خمس مناطق ومشاريع التقاط الـ CO<sub>2</sub> وتخزينه الرئيسية التي تدعم شبكات النقل حالياً كما هو مذكور في الجدول 2.9. ومن المؤكد أن قاعدة البيانات المتعلقة بشبكة نقل الـ CO<sub>2</sub> الحالية كافية لدعم النمو المتسارع المتوقع للطلب على CO<sub>2</sub> (Bui et al., 2018).



الشكل 2.9. خريطة خطوط أنابيب CO<sub>2</sub> في الولايات المتحدة (المصدر: NPC, 2021b).

### 3.9. نقل CO<sub>2</sub> عن طريق السفن.

ما زال نقل الـ CO<sub>2</sub> بالسفن في حده الأدنى، وبالتالي فإن تجربة استخدامه أقل بكثير من النقل عبر خطوط الأنابيب. وتستخدم التقنية على نطاق ضيق في أوروبا لنقل CO<sub>2</sub> لتلبية متطلبات الصناعات

الغذائية من مصادر ذات سعة كبيرة إلى محطات توزيع ساحلية. وأول ناقلة بنيت لهذا الغرض في العالم كانت سفينة Coral Carbonic التي بدأت بالعمل عام 1999، ولها قدرة على نقل حوالي 1250 طناً من الـ CO<sub>2</sub> السائل، عند ضغط يتراوح بين حوالي 217 إلى 290 رطل لكل بوصة مربعة ودرجة حرارة تبلغ حوالي -22 درجة فهرنهايت. وفيما يتعلق بنقل كميات أكبر من الـ CO<sub>2</sub> باستخدام السفن، فمن المرجح أن تكون المواصفات حوالي 101 رطل لكل بوصة مربعة و-58 درجة فهرنهايت، بالقرب من النقطة الثلاثية لأطوار الـ CO<sub>2</sub>. ومن مميزات الشحن بالسفن القدرة على تحويل التكاليف الرأسمالية الأولية المرتفعة بالنسبة لخطوط الأنابيب إلى تكاليف تشغيلية. وبشكل عام، يعد الشحن بالسفن الأقل تكلفة للنقل عبر مسافات بعيدة جداً، وللمصادر الصغيرة الموزعة، وللمشاريع القصيرة المدى، وللمشاريع التي لديها رأس مال محدود غير كافٍ لبناء شبكة خطوط الأنابيب. وتجدر الملاحظة هنا إلى أن معظم التكلفة مرتبطة بتكاليف تشغيل تعود تحديداً إلى عملية التسييل، وعليه فإن التكنولوجيا تتطلب بذل المزيد من جهود التطوير لتحسين عملية التسييل بهدف تخفيض تكاليفها. وبالإضافة إلى ما سبق، لا تزال هناك بعض الصعوبات التشريعية التي تحتاج إلى معالجة في بعض المناطق من العالم، مثل أوروبا، وذلك للتغلب على المشكلات المتعلقة بانتشار التكنولوجيا (Bui et al., 2018). ونظراً للتوقعات المتعلقة بنمو الشحن باستخدام السفن لدعم نقل ثاني أكسيد الكربون، فقد أصدرت المنصة الأوروبية للانبعاثات الصفريّة (ZEP) وCCSA مؤخراً تقريراً شاملاً حول هذا الموضوع لتوجيه القيمين على صناعة التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه الأوروبية والمشرعين بشأن حالة التكنولوجيا والسياسات المطلوبة التي يتوجب اعتمادها لتسهيل انتشار التكنولوجيا (ZEP-CCSA, 2022). ويمكن للقارئ الرجوع إلى هذا المرجع للحصول على تفاصيل أكثر حول هذا الموضوع.

#### 4.9. نقل CO<sub>2</sub> عن طريق الشاحنات والسكك الحديدية المزودة بصهاريج

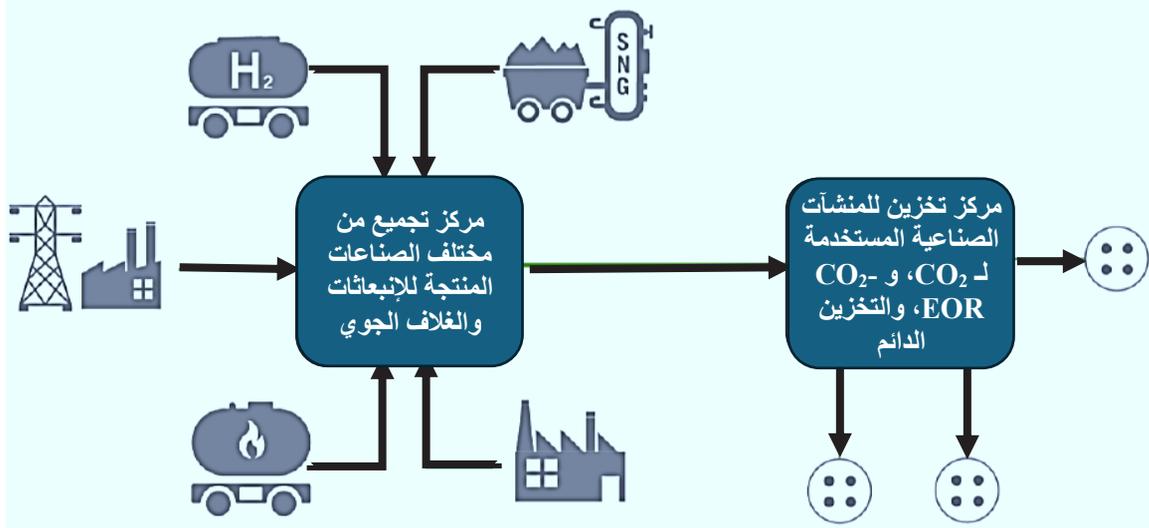
يمكن نقل CO<sub>2</sub> بالشاحنات والسكك الحديدية المزودة بصهاريج مناسبة بكميات صغيرة تصل إلى بضعة مئات من الأطنان، ويُستكمل الشحن عادةً بواسطة السفن عن طريق نقل كميات صغيرة من الـ CO<sub>2</sub> إلى المواقع الصناعية للاستخدام النهائي. ويمكن استخدام الشاحنات والسكك الحديدية أيضاً لنقل CO<sub>2</sub> من مواقع الالتقاط إلى مواقع التخزين. وبشكل عام لا يمكن اعتبار نقل CO<sub>2</sub> بالشاحنات والسكك الحديدية اقتصادياً أو قابلاً للتطوير، ولكنه حل مؤقت ذو تكلفة باهظة جداً مقارنة بالنقل عبر خطوط الأنابيب بسبب وفورات الحجم. ومع ذلك، فإن النقل بالشاحنات والسكك الحديدية مهم لبعض الحالات في سلسلة القيمة من نقطة إلى نقطة على نطاق ضيق، وفي حالات استحالة إنشاء خطوط أنابيب أو

أثناء مرحلة بناء شبكة خطوط الأنابيب ومن المتوقع أن يستمر استخدامها في حالات المسافات القصيرة نسبياً ولتلبية المتطلبات العاجلة للمستخدم (NPC, 2021b).

### 5.9. المحاور (Hubs) والتجمعات العنقودية (Clusters) المرتبطة بنقل ثاني أكسيد الكربون

وكما هو متوقع، فإن التوسع في تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  وتخزينه سوف يشمل حتماً العديد من المصانع الصغيرة الحجم التي تنتج انبعاثات إجمالية قليلة نسبياً. وبالتالي ربما يكون من غير المجدي اقتصادياً بالنسبة لمثل هذه المصانع الصغيرة أن تفكر في تطبيق سلسلة التقاط ونقل وتخزين  $CO_2$  كاملة. ومع ذلك، فإن كمية الانبعاثات من عدد من هذه المصانع الصغيرة يمكن أن يكون كبيراً وبالتالي يكون تجميعه في محور بسعة كافية مجدي اقتصادياً. وقد واجه العالم مشكلات مماثلة في مختلف الأنشطة والصناعات عبر التاريخ، وتم حلها عن طريق اللجوء إلى إنشاء تجمعات عنقودية. وهذه التجمعات عبارة عن تركيز جغرافي للشركات المترابطة في مجال معين والتي تدمج جهودها لتلبية احتياجات محددة، مثل تحسين إمكانية الوصول إلى المواد الخام والعمالة والتصدير إلى الأسواق.

وبالنسبة لالتقاط وتخزين الكربون، فإن مثل هذه التجمعات ستمكن المنشآت التي تنتج انبعاثات  $CO_2$  سواءً كانت كبيرة أم صغيرة والمتواجدة على مقربة من بعضها البعض من الانضمام معاً لتقاسم البنية التحتية والتكاليف المرتبطة والمطلوبة لتجميع ونقل الـ  $CO_2$ . وقد تشمل البنية التحتية خطوط الأنابيب ومرافق الضغط وصهاريج التخزين وموانئ الاستيراد والتصدير، ومواقع التخزين الجيولوجي و/أو حقول النفط المناسبة للاستخلاص المعزز للنفط (EOR) بالإضافة إلى الحصول على الموافقات من الجهات المعنية المحلية والحكومات. ومثل هذه التجمعات تقع عادةً في المناطق التي تشمل مجموعة من الشركات التي تود التحكم بانبعاثاتها، مثل مرافق توليد الطاقة الكهربائية، ومصانع الصلب، ومنتجي الأسمت، ومصافي النفط، والصناعات البتروكيمياوية. كما أن هذه التجمعات تعمل كحلقة وصل بين أصحاب المصلحة المهتمين بالتقاط الـ  $CO_2$  وأصحاب المصلحة المهتمين بتوزيع الـ  $CO_2$  وتخزينه أو استخدامه كما هو موضح في الشكل 3.9. وتوفر التجمعات عادةً خدمات ضغط ونقل الـ  $CO_2$  من موقع إلى موقع آخر مما يقلل من تكلفة البنية التحتية للنقل. وقد اكتسب هذا الموضوع أهمية على مدى العقدين الماضيين وصدرت حوله عدد من التقارير من قبل مؤسسات متخصصة وباحثين (Abramson, 2022; Atashin, 2016; GCCSI, 2016; Guo, 2020; IEA, 2022c; ) (IEAGHG, 2015; OGCI, 2022; Sun et al., 2021).



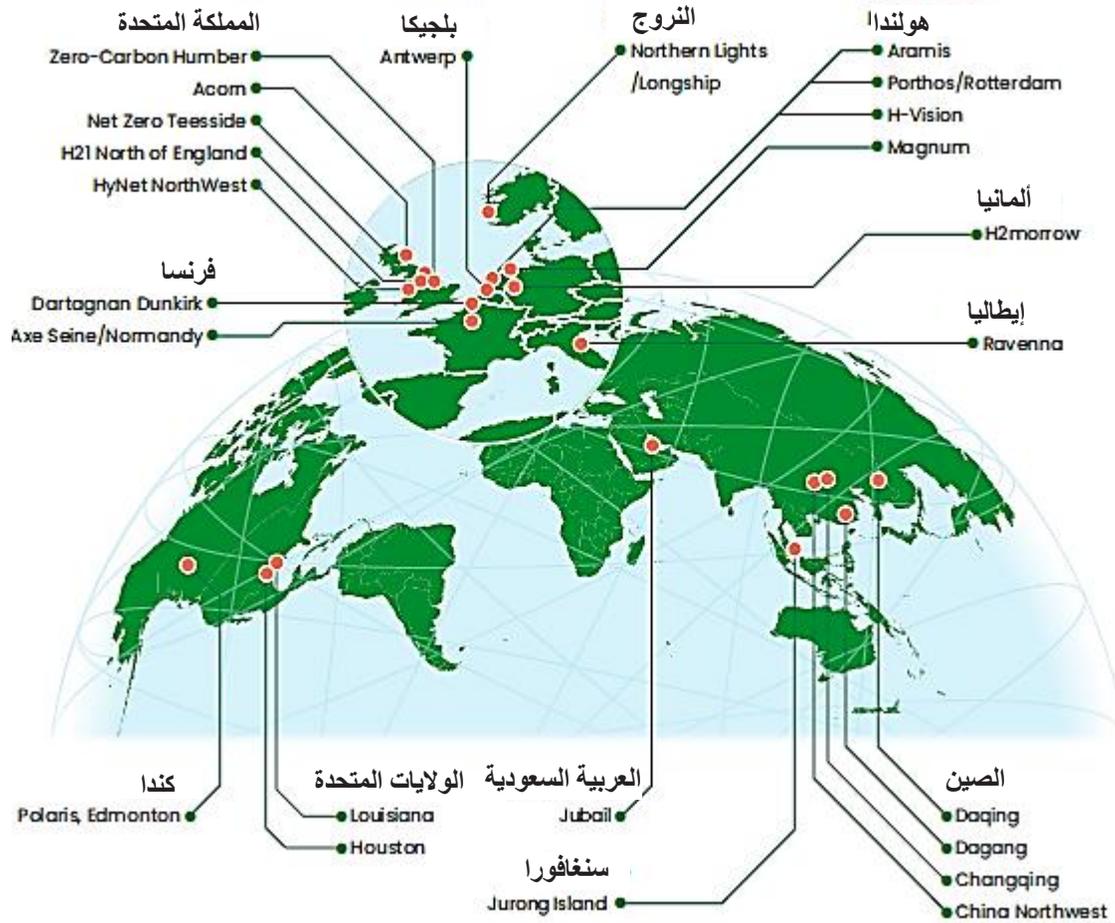
الشكل 3.9. تجميع وتوزيع مجموعات ومحاور CO<sub>2</sub> (المصدر: GCCSI، 2016).

والجدير بالذكر أن صناعة النفط والغاز تتمتع بخبرة جيدة في هذا المجال. فأبار إنتاج النفط أو الغاز الطبيعي ترتبط عادةً بمراكز التجميع المرتبطة بمرافق التخزين الرئيسية. كما ترتبط مرافق التخزين بدورها بمنشآت التصدير ومصافي النفط ومجمعات البتروكيماويات ومحطات توليد الطاقة الكهربائية. وتوجد بالفعل عدد من المحاور النشطة لغاز الـ CO<sub>2</sub> والتي تعمل في مجال توزيع خطوط أنابيب ثاني أكسيد الكربون، وأبرزها مركزي دنفر سيتي ومكامي في تكساس بالولايات المتحدة، والتي تنشط في مجال تزويد الصناعة النفطية بالـ CO<sub>2</sub> لأغراض الاستخلاص المعزز للنفط (EOR).

والميزة الرئيسية للتجموعات والمحاور هي تسهيل تخطيط وتصميم المرافق، خاصةً في المواقع الجغرافية الضيقة، وخفض التكلفة. وعادةً ما يتم البدء في مثل هذا المشروع بواسطة مصدر رئيسي كبير للانبعاثات يوفر نسبة كبيرة من الـ CO<sub>2</sub> ضمن مجموعة من مشاريع التقاط ثاني أكسيد الكربون. وعند البدء في التخطيط لمثل هذا المشروع، يأخذ المصدر الرئيسي في الاعتبار مصادر الانبعاثات المحتملة الأخرى في المنطقة ويطور تصميم مرافقه لتحقيق أقصى قدر من الفوائد عبر اقتصاديات الحجم. ويجدر التنويه بالمزايا الرئيسية من منظور استراتيجي التي حددها تقرير معهد CCS العالمي (GCCSI، 2016) وهي:

- خفض التكلفة من خلال استخدام البنية التحتية المشتركة
- تمكين النقاط مصادر صغيرة الحجم
- تخفيض المخاطر التجارية للتخزين
- تمكين CCS في المناطق دون الوصول إلى التخزين المحلي المناسب
- تمكين الإنتاج الصناعي منخفض الكربون.

ومع الأخذ في الاعتبار المزايا المذكورة أعلاه، فقد تم بالفعل تطوير عدد من التجمعات والمحاور إضافةً إلى عدد آخر في مرحلة التخطيط. ويقدم الشكل 4.9 خريطة للمحاور والتجمعات في مراحل مختلفة من التطوير، ومن المتوقع أن يتم تشغيل معظم هذه المشاريع بين عامي 2023 و2026.



الشكل 4.9. مراكز التجميع الناشئة لاحتجاز واستغلال وتخزين CO<sub>2</sub> بدعم من شركات OGCI (المصدر: OGCI, 2022)

## 6.9. التوقعات المستقبلية لنقل ثاني أكسيد الكربون.

يشير الاستعراض القصير أعلاه حول نقل CO<sub>2</sub> بوضوح إلى أن تكنولوجيا نقل CO<sub>2</sub> ناضجة، كما يسلط الضوء على أهمية النقل في دعم التقاط وتخزين الكربون. ومن المهم أن نلاحظ هنا أن منظومة النقل تعمل كداعم ومنسق بين مصادر انبعاثات CO<sub>2</sub> ومواقع التخزين/الاستخدام. لذلك، يجب عليها فرض متطلبات على الجانبين لضمان سلامة وكفاءة أداء المرافق، وكذلك ضمان مواصفات الـ CO<sub>2</sub> لتتوافق مع متطلبات التخزين والاستخدام. ويجب على مالكي وسائل النقل أيضاً تجنب الإفراط في التصميم والتكاليف المرتبطة به وتحسين التصميم بحيث (أ) يتم تضمين بعض المرونة فيما يتعلق بجودة

تدفقات اللقيم و(ب) التطور المحتمل لشبكة التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه وتجنب الإفراط في التخطيط لسعة تفوق الاحتياجات المتوقعة و (ج) ضمان الاستخدام الديناميكي للبنية التحتية للحد من المخاطر. ولا يزال أصحاب مشاريع نقل الـ CO<sub>2</sub> والجهات الحكومية المعنية يواجهون عدداً من العوائق التي تتطلب اتخاذ إجراءات لتسهيل تطوير شبكات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والمحاور والتجمعات العنقودية. وعلى وجه التحديد، يجب معالجة القضايا التالية في أقرب وقت ممكن لضمان نمو هذا القطاع بما يتماشى مع الأهداف المحددة لبرامج التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري (GCCSI, 2016):

- يلزم إجراء تقييمات أكثر شمولاً لدورة الحياة ((Life Cycle Analysis (LCA)) للنقل والشحن عبر خطوط الأنابيب لاستكمال التقييمات المتوفرة في الأدبيات، والتي كانت ضيقة في نطاق تصميمها.
- دعم السياسات للتطوير الاستباقي لحلول البنية التحتية الاستراتيجية لنقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون. ويشمل ذلك السياسات التي توفر حوافز لتطوير تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في القطاعات الصناعية حيث تكون فرص الحد من انبعاثات CO<sub>2</sub> محدودة من خلال تحديد أسعار مناسبة للكربون واستهداف تطوير البنية التحتية الاستراتيجية لنقل وتخزين CO<sub>2</sub> كحلول أساسية.
- الاستثمار المسبق في تطوير سعة نقل وتخزين CO<sub>2</sub> المستقلة كبنية تحتية استراتيجية لتشجيع وتسريع الاهتمام والاستثمار في مجال التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه من جانب الجهات المصدرة للانبعاثات.
- دراسة العوائق القانونية والتنظيمية أمام تطوير التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، بما في ذلك التصديق على بروتوكول لندن، ومعالجة عدم وجود قوانين خاصة بالتقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، وتوفير الأمن المالي، والالتزامات طويلة الأجل لعمليات التخزين، ووضع معايير لمراعاة نقل CO<sub>2</sub> عبر الحدود، ورفع الحظر المفروض على شحن CO<sub>2</sub> عبر الحدود للتخزين الجيولوجي البحري.
- المشاركة العامة لتخفيض المخاطر غير الفنية لتطوير التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه.
- تنويع مواقع التخزين للمشروعات حيث تتوفر الظروف المناسبة لتخفيض المخاطر.

## الفصل 10 - اقتصاديات CCUS

- 10.1. تسويق النقاط ثاني أكسيد الكربون
- 10.2. اقتصاديات النقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه قبل عام 2018
- 10.3. آخر التطورات في اقتصاديات CCUS
- 10.4. تجارة الكربون

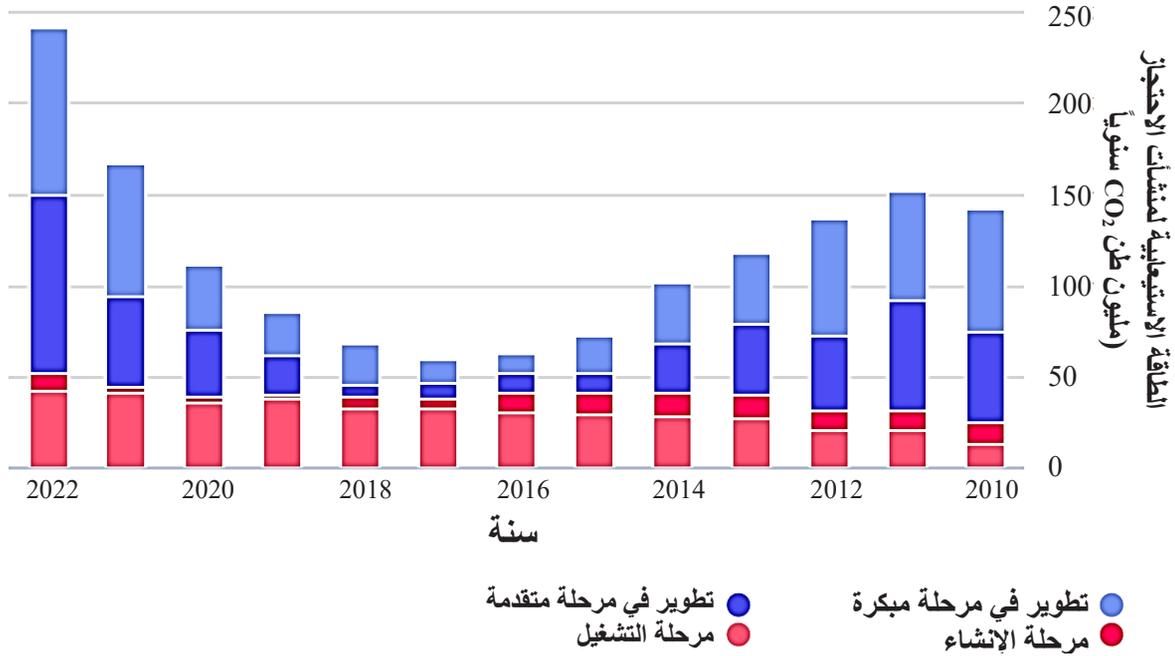
في الفصول السابقة، تمت مراجعة نطاق واسع من التقنيات الداعمة لسلسلة قيمة التقاط CO<sub>2</sub> واستخدامه وتخزينه والتي وصلت إلى مرحلة متقدمة من النضوج أو في مراحل مختلفة من التطوير. واستخدمت بعض التقنيات في مشاريع تجارية بلغ عددها ما مجموعه 196 منشأة صناعية قيد التشغيل أو قيد التخطيط. كما تتوفر معلومات على أنه على مدى السنوات القليلة المقبلة ستكون هناك أكثر من 150 منشأة في مراحل مختلفة من التطوير، وهو ما يمثل تسارعاً كبيراً في أنشطة التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه خلال العقد الماضي، وعادةً ما يكون هذا التسارع انعكاساً لثقة أقوى داخل الصناعة في جدوى مشاريعها من المنظورين التكنولوجي والاقتصادي. وقد تمت تغطية الجوانب التكنولوجية بشكل جيد في الفصول السابقة. وفي هذا الفصل، سيتم التركيز على حالة الأسواق المرتبطة بمجال التقاط واستخدام الكربون وتخزينه، والجوانب الاقتصادية المرتبطة به، والحوافز والدوافع الاقتصادية ذات الصلة وخاصةً تجارة الكربون.

### 1.10. أسواق التقاط ثاني أكسيد الكربون

قامت الوكالة الدولية للطاقة بتطوير قاعدة بيانات شاملة لمشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه تشمل جميع المشاريع والمنشآت العاملة والمتوقفة عن التشغيل والمنشآت قيد الإنشاء وتلك المخطط لإنشاءها (IEA, 2023b). وفي هذا القسم، سوف نركز على المشاريع المخصصة لتخزين ثاني أكسيد الكربون، باستثناء المشاريع المرتبطة بالاستخلاص المعزز للنفط بـ CO<sub>2</sub> التي تم عرضها في قسم سابق من هذا التقرير. واستناداً إلى قاعدة بيانات الوكالة الدولية للطاقة، فإن المعرفة المتعلقة بالتقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه بشكل عام، وتخزين CO<sub>2</sub> بشكل خاص، ارتفعت بشكل كبير على مدى السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية. وقد ثبت أن حقن CO<sub>2</sub> وعزله بمعدلات تزيد عن 1 مليون طن من الـ CO<sub>2</sub> سنوياً في مواقع فردية أمر ممكن من الناحية الفنية، وذلك من خلال ما مجموعه 14 مشروعاً صناعياً عاملاً، بما في ذلك ثلاثة منشآت حقن في أنظمة طبقات المياه الجوفية المالحة.

ويعد حقن الـ CO<sub>2</sub> في مكامن النفط حالياً هو المخزن الرئيسي الذي يضم 11 مشروعاً من أصل 14 مشروعاً قيد التشغيل وأكثر من 90% من كمية الـ 30 مليون طن من الـ CO<sub>2</sub> المحتجز والمعزول سنوياً. وتقدر السعة التخزينية لمكامن النفط الناضبة بحوالي 350 جيجاطن من ثاني أكسيد الكربون، وهي ما يكفي لمعظم متطلبات تخزين الـ CO<sub>2</sub> على النطاق الصناعي المخطط لها في المستقبل القريب. ويوضح الشكل 1.10 توجهات مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه على نطاق تجاري منذ عام 2010. ومن الواضح أن قدرات الالتقاط أظهرت نمواً متسارعاً خلال السنوات الخمس الماضية، ويلخص الجدول 1.10 وضع المشاريع في نهاية الربع الثالث من عام 2022 من حيث عدد المشاريع وسعتها الاستيعابية

حيث يلاحظ ارتفاع عدد المشاريع بنحو 44% مقارنةً ببيانات 2021. ويشمل عدد المشاريع مشاريع الالتقاط والنقل والتخزين، في حين تقتصر البيانات المتعلقة بالسعة على "الالتقاط الفعلي لثاني أكسيد الكربون"، وقد بلغت النسبة المئوية لنمو السعة منذ عام 2018 حوالي 34%.



الشكل 10.1. خطوط أنابيب المرافق التجارية منذ عام 2010 حسب قدرة الاحتجاز (مليون طن سنوياً) (المصدر: GCCSI, 2022a; GCCSI, 2022b).

الجدول 1.10. مرافق التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التجارية حسب العدد وإجمالي سعة التقاط CO<sub>2</sub> (منتصف سبتمبر 2022) (GCCSI, 2022a; GCCSI, 2022b)

وضع المنشأة الحالي	عدد مرافق الالتقاط	السعة الاستيعابية للالتقاط (مليون طن سنوياً)
قيد التشغيل	30	42.5
مرحلة الإنشاء	11	9.6
مرحلة تطوير متقدمة	78	97.6
مرحلة تطوير مبكرة	75	91.8
التشغيل معلق (متوقف)	2	2.3
المجموع	196	243.9

وتصدر الولايات المتحدة هذا المجال عالمياً من حيث عدد المشاريع، مع 34 مشروعاً جديداً، تليها كندا (19 مشروعاً) والمملكة المتحدة (13 مشروعاً) والنرويج (8 مشاريع) وأستراليا وهولندا وأيسلندا (6 مشاريع لكلٍ منها)، ويمكن أن يعزى هذا النمو إلى السياسات والحوافز التي اعتمدت خلال هذه الفترة كما هو مذكور في الفصل الثالث. وفي الوقت نفسه، من المهم ملاحظة أنه بالنسبة لبعض الشركات، يُنظر إلى التقاط وتخزين الكربون كأداة حاسمة في تخفيض تعرضها للمخاطر الاقتصادية المرتبطة بانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، إما بشكل مباشر أو من حيث قيمتها في سلسلة الإنتاج المتعلقة بها، وبالتالي فإن اللجوء إليها يُنظر إليه على أنه تخفيف لمخاطر الأعمال الإستراتيجية. وبالنسبة لشركات أخرى، تُعد تقنية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه فرصة للاستفادة من صناعة جديدة ومتنامية. ومن التغييرات الملحوظة الأخرى التي حدثت مؤخراً هو نمو التعاون الإقليمي في تخطيط وتنفيذ مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والأمثلة على ذلك تشمل دول بحر الشمال ودول جنوب شرق آسيا ودول منطقة آسيا - المحيط الهادئ.

ويقدم الجدول 2.10 والجدول 3.10 قوائم بمنشآت التقاط الـ CO<sub>2</sub> في عام 2022 والتي هي قيد التشغيل أو قيد الإنشاء. ومن بين إجمالي المنشآت العاملة، تهدف 20 منشأة بسعة إجمالية تبلغ 31 مليون طن سنوياً (حوالي 73% من الإجمالي) إلى تخزين الـ CO<sub>2</sub> باستخدام الاستخلاص المعزز للنفط، وتهدف 9 منشآت بسعة إجمالية تبلغ 10.6 مليون طن سنوياً (حوالي 25% من الإجمالي) استخدام التخزين الجيولوجي، ومنشأة واحدة تستهدف تطبيقات مختلفة. ويبلغ متوسط سعات المنشآت المرتبطة بالاستخلاص المعزز للنفط والتخزين الجيولوجي 1.55 و1.2 مليون طن سنوياً، على التوالي. وبالنسبة للمصادر الصناعية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، فإن ما يقرب من 46% من المنشآت ترتبط بمعالجة الغاز الطبيعي، في حين أن الباقي مخصص للصناعات الكيماوية المختلفة، ومصنع واحد لإنتاج الحديد والصلب. ومن حيث الدول، تصدر الولايات المتحدة الأمريكية عدد المنشآت حيث يوجد 13 منشأة قيد التشغيل بسعة إجمالية تبلغ 19.8 مليون طن سنوياً (ما يقرب من 46% من الإجمالي)، وبعض هذه المنشآت تعمل منذ عدة عقود، مما يمنح الولايات المتحدة الأمريكية خبرة كبيرة في هذا المجال، وتشمل الدول النشطة الأخرى كندا (5 منشآت) والصين (3 منشآت)، بينما تتوزع الـ 9 منشآت المتبقية بين دول مختلفة.

الجدول 2.10. قائمة مرافق التقاط CO<sub>2</sub> العاملة في عام 2022. (Madejski et al., 2022; GCCSI, 2022a; GCCSI, 2022b; C2ES, 2023)

المنشأة	الدولة	تاريخ التشغيل	السعة الانتقاط (مليون طن CO <sub>2</sub> سنوياً)	المنشأة الصناعية
1. محطة تيريل لمعالجة الغاز الطبيعي Terrell Natural Gas Processing Plant (Formerly Val Verde Natural Gas Plants)	تكساس، الولايات المتحدة الأمريكية	1972	0.5	تقوم المنشأة بمعالجة الغاز الطبيعي (مع عدة مرافق أخرى) وتزويد CO <sub>2</sub> في غرب تكساس من خلال أول خط أنابيب نقل لـ CO <sub>2</sub> طويل المدى وواسع النطاق إلى حقل نفطي
2. شركة كوخ للنيتروجين Koch Nitrogen Company Enid Fertilizer plant	أوكلاهوما، الولايات المتحدة الأمريكية	1982	0.2	مصنع للأسمدة يقوم بتزويد CO <sub>2</sub> لحقول النفط في جنوب أوكلاهوما
3. مصنع معالجة الغاز إكسون شوت كريك Exxon Shute Creek Gas Processing Plant	الولايات المتحدة الأمريكية	1986	7	مصنع معالجة الغاز الطبيعي يخدم أنظمة خطوط أنابيب CO <sub>2</sub> لشركات إكسون موبيل، وشيفرون، وأناداركو بتروليوم إلى حقول النفط في وايومنغ وكولورادو، وهو أكبر منشأة تجارية لالتقاط الكربون في العالم.
4. حقل مول سانك للاستخلاص المعزز للنفط باستخدام CO <sub>2</sub>	المجر	1992	0.16	معالجة الغاز الطبيعي من أجل الاستخلاص المعزز للنفط
5. مرافق سليبنر لتخزين الـ CO <sub>2</sub> Storage Sleipner CO <sub>2</sub> Facility	النرويج، منشأة بحرية	1996	1	يلتقط هذا المشروع CO <sub>2</sub> الناتج عن معالجة الغاز لتخزينه في خزان من الحجر الرملي البحري. وهو أول مشروع تخزين جيولوجي في العالم
6. مصنع الوقود التخليقي في وويورن-ميدال	داكوتا، الولايات	2000	3	مصنع تحويل الفحم الحجري إلى غاز طبيعي اصطناعي وأسمدة ومنتجات ثانوية أخرى. وتم من خلاله تزويد CO <sub>2</sub>

Great Plains Gasification Synfuels Plant and Weyburn-Midale	المتحدة الأمريكية				إلى حقول Apache EOR و Cenovus في ساسكاتشوان، كندا
7. محطة معالجة الغاز بجنوب تشيستتر Core Energy/South Chester Gas Processing Plant	ميشيغان، الولايات المتحدة الأمريكية	2003	0.35		تلتقط شركة Core Energy الـ CO <sub>2</sub> من معالجة الغاز الطبيعي من أجل الاستخلاص المعزز للنفط في شمال ميشيغان
8. CO <sub>2</sub> لتخزين Snøhvit	قبالة سواحل النرويج	2008	0.7		يتم التقاط CO <sub>2</sub> من منشأة الغاز الطبيعي المسال على جزيرة في بحر بارنتس. يتم تخزين CO <sub>2</sub> المحتجز في خزان تحت سطح البحر
9. مصنع أركالون للإيثانول الحيوي Chaparral/Conestoga Energy Partners' Arkalon Bioethanol CO <sub>2</sub> plant Facility	كانساس، الولايات المتحدة الأمريكية	2009	0.29		أول مصنع للإيثانول يستخدم التقاط الكربون، ويوفر 170,000 طن من CO <sub>2</sub> سنوياً لشركة تشابارال للطاقة، لاستخدامها في الاستخلاص المعزز للنفط في حقول النفط في تكساس
10. مصنع سينشري التابع لشركة أوكسيدنتال بتروليم Occidental Petroleum's Century Plant	تكساس، الولايات المتحدة الأمريكية	2010	5		يتم ضغط غاز CO <sub>2</sub> الناتج عن منشأة معالجة الغاز الطبيعي ونقله لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط في حوض بيرميان
11. حقل نفط ما قبل الملح في حوض بتروليم سانتوس CCS PETROBRAS Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	البرازيل	2011	7		يضمن المشروع التقاط CO <sub>2</sub> من معالجة الغاز الطبيعي لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط في حقلي النفط لولا وسابيهوا

يتم التقاط CO <sub>2</sub> من مصنع الإيثانول الحيوي ونقله إلى حقل الاستخلاص المعزز للنفط في كانساس	0.1	2012	الولايات المتحدة الأمريكية	مصنع بونانزا Conestoga Energy Partners/PetroSantander Bonanza plant	12
غاز CO <sub>2</sub> المنتج من وحدتي إنتاج الهيدروجين في المصفاة لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط في حقول نفط تكساس	1	2013	تكساس، الولايات المتحدة الأمريكية	مصنع شركة Air Products Steam Port Arthur Methane Reformer	13
يتم التقاط تيار CO <sub>2</sub> الناتج عن عملية إنتاج الأسمدة النيتروجينية المعتمدة على تغويز فحم الكوك وضغطه ونقله إلى حقل النفط الذي تديره شركة تشابارال من أجل الاستخلاص المعزز للنفط في شمال شرق أوكلاهوما	0.9	2013	كانساس، الولايات المتحدة الأمريكية	محطة تغويز تشابارال/سي في آر للطاقة Chaparral/CVR Energy Coffeyville Gasification Plant	14
CO <sub>2</sub> من مصنع أسمدة للاستخدام في الاستخلاص المعزز للنفط	0.3	2013	الولايات المتحدة الأمريكية	مصنع PCS NITROGEN	15
أول عملية تحديث على نطاق تجاري لمحطة طاقة تعمل بالفحم الحجري مع تكنولوجيا التقاط الكربون، وبيع CO <sub>2</sub> محلياً من أجل الاستخلاص المعزز للنفط في ساسكاتشوان	1	2014	ساسكاتشوان، كندا	مرفق التقاط الكربون وتخزينه لسد ساسك باور الحدودي - شركة شل SaskPower Boundary Dam Carbon Capture and Storage Facility; Shell	16
CO <sub>2</sub> من إنتاج الميثانول لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط	0.1	2015	الصين	مصنع تكنولوجيا النفط كاراماي دونهوا Karamay Dunhua Oil Technology CCUS EOR	17

18	مشروع Shell Quest project	ألبرتا، كندا	2015	1.3	التقاط الناتج عن إنتاج الهيدروجين من مجمع تحسين البتومين يلتقط ويحقن في تكوين ملحي
19	العثمانية للاستخلاص المعزز للنفط Uthmaniyah CO <sub>2</sub> -EOR Demonstration	المملكة العربية السعودية	2015	0.8	يلتقط المشروع CO <sub>2</sub> من محطة استخلاص سوائل الغاز الطبيعي في الحوية. ويستخدم CO <sub>2</sub> المحتجز في عملية الاستخلاص المعزز للنفط في حقل الغوار النفطي
20	مشروع أبوظبي لالتقاط وتخزين الكربون - المرحلة الأولى Abu Dhabi CCS Project - Phase 1	الإمارات العربية المتحدة	2016	0.8	تم استخدام تكنولوجيا التقاط الكربون لأول مرة في مصنع الحديد والصلب التابع لشركة الإمارات لصناعات الصلب، ويتم استخدام CO <sub>2</sub> المحتجز في الاستخلاص المعزز للنفط من قبل شركة بترول أبوظبي الوطنية
21	شركة ADM Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	الولايات المتحدة الأمريكية	2017	1	بدأت الشركة في التقاط CO <sub>2</sub> من منشأة لإنتاج الإيثانول وعزله في تكوين ملحي عميق قريب
22	شركة CNPC Jilin Oil Field EOR CO <sub>2</sub>	الصين	2018	0.6	التقاط CO <sub>2</sub> من محطة معالجة الغاز الطبيعي لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط
23	شركة Gorgon Carbon Dioxide Injection	أستراليا	2019	4	التقاط CO <sub>2</sub> من محطة معالجة الغاز الطبيعي للتخزين الجيولوجي
24	قطر للغاز الطبيعي المسال Qatar LNG CCS	قطر	2019	2.2	التقاط CO <sub>2</sub> من محطة معالجة الغاز الطبيعي للتخزين الجيولوجي
25	خط شل كويست ألبرتا للكربون Shell Quest Alberta Carbon Trunk Line (ACTL), North West Redwater and Sturgeon Refinery CO <sub>2</sub> Stream	ألبرتا، كندا	2020	1.6	التقاط CO <sub>2</sub> من وحدة إنتاج الهيدروجين في مصفاة سكو تفورد. الإجمالي حوالي 5 ملايين طن من CO <sub>2</sub> المخزن والمستخدم في الاستخلاص المعزز للنفط

إنتاج الأسمدة، ويستخدم الـ CO <sub>2</sub> المحتجز في الاستخلاص المعزز للنفط	0.3	2020	كندا	خط ألبرتا للكربون Alberta Carbon Trunk Line with Nutrien CO <sub>2</sub> Stream	26
التقاط من الجو مباشر؛ يخزن الـ CO <sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية	0.004	2021	أيسلندا	شركة ORCA	27
معالجة الغاز الطبيعي؛ يخزن الـ CO <sub>2</sub> في التكوينات الجيولوجية	0.2	2022	كندا	منشأة Glacier Gas Plant MCCS	28
التقاط CO <sub>2</sub> من إنتاج المواد الكيميائية لاستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط	1	2022	الصين	منشأة SINOPEC Qilu- Shengji CCUS	29
التقاط CO <sub>2</sub> من إنتاج الإيثانول للتخزين الجيولوجي	0.18	2022	الولايات المتحدة الأمريكية	منشأة Red Trail Energy CCS	30
	<b>42.58</b>			السعة الإجمالية	

الجدول 3.10. قائمة مرافق التقاط CO<sub>2</sub> قيد الإنشاء في عام 2022 (GCCSI, 2022a; GCSI, 2022b). القائمة مرافق التقاط CO<sub>2</sub> قيد الإنشاء في عام 2022 (GCCSI, 2022a; GCSI, 2022b).

طبيعة التخزين المستهدفة	الانتقاط من (مليون سنوياً CO <sub>2</sub> )	سعة الانتقاط (مليون سنوياً CO <sub>2</sub> )	صناعة المنشأة	تاريخ التشغيل	الدولة	المنشأة
الاستخلاص المعزز للنفط	0.3	0.3	معالجة الغاز الطبيعي	2023	الصين	سينوك بحر الصين الجنوبي - التقاط CO <sub>2</sub> وتخزينه CNOOC South China Sea Offshore CCS
الاستخلاص المعزز للنفط	0.3	0.3	توليد الطاقة	2023	الصين	التقاط الكربون من محطة غوديان تايشو لتوليد الطاقة Guodian Taizhou Power Station Carbon Capture
تخزين جيولوجي	1.7	1.7	معالجة الغاز الطبيعي	2023	أستراليا	مشروع Santos Cooper Basin CCS Project
تخزين جيولوجي	0.03	0.03	الانتقاط المباشر من الهواء	2024	أيسلندا	منشأة Mammoth
غير متوفر	0.4	0.4	إنتاج الأسمت	2024	النرويج	نورسيم بريفيك - مصنع أسمت Norcem Brevik - Cement Plant
غير متوفر			إنتاج الأسمت	2024	النرويج	. نورسيم بريفيك - طريق الشحن Norcem Brevik - Shipping Route
تخزين جيولوجي			متنوع	2024	النرويج	الشفق القطبي الشمالي - تخزين Northern Lights - Storage

تخزين جيولوجي	0.5	الالتقاط المباشر من الهواء	2024	الولايات المتحدة الأمريكية	Oxy And Engineering Direct Air Capture and EOR Facility	منشأة Carbon Capture	.8
غير متوفر	0.4	حرق النفايات	2025	النرويج	Hafslund Oslo Klemetsrud Waste to Energy Plant	منشأة - Celsio to Energy Plant	.9
قيد التقييم	1	معالجة الغاز الطبيعي	2025	قطر	North Field East Project (NFE) CCS	منشأة Project (NFE) CCS	.10
تخزين جيولوجي	5	متنوع	2026	الولايات المتحدة الأمريكية	Louisiana Clean Energy Complex	منشأة Energy Complex	.11
	9.6					السعة الإجمالية	.12

بالنسبة للمنشآت الجديدة قيد الإنشاء، فإن الاستخدام النهائي للـ  $CO_2$  هو 5 منشآت مخصصة للتخزين الجيولوجي، ومنشأتين للاستخلاص المعزز للنفط، ولم يتم تحديد الاستخدام النهائي للمنشآت الأربعة المتبقية بعد. كما أن مصادر الانبعاثات لهذه المنشآت أصبحت أكثر تنوعاً، حيث يوجد منشأتين مرتبطتين بصناعة الأسمت، ومنشأتين من التقاط الهواء المباشر، ومنشأة واحدة من توليد الطاقة الكهربائية، والباقي من صناعات أخرى.

وتعتمد معظم المنشآت المدرجة في الجدول 2.10 والجدول 3.10 على تقنيات الامتصاص/التجريد الناضجة (Oko et al., 2017). ووفقاً لبعض الباحثين (Bataille et al., 2015)، تعتمد معظم مشاريع التقاط  $CO_2$  وتخزينه العاملة على فصل  $CO_2$  قبل الاحتراق عن خليط الغاز، ومع ذلك، يمكن استخدام التقاط  $CO_2$  وتخزينه أيضاً من غازات العادم بعد الاحتراق الناتجة عن عمليات الحرق الكبيرة، وبالتالي توسيع مساهمتها للتخفيف من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ومن شأن بعض التطورات التقنية في هذا المجال أن تلعب دوراً أوسع في التقاط وتخزين الكربون، مثل استخدام تقنيات التحلق الكيميائي التي ترتبط بتقنية الاحتراق المباشر للوقود مع الأكسجين بحيث لا يكون هناك حاجة لفصل النيتروجين من تيار الـ  $CO_2$ .

وعلى الرغم من الآفاق الواعدة، أشار بعض الباحثين (Chen et al., 2022b) في مراجعة حديثة للموضوع إلى أن تطبيق CCUS لا يزال محدوداً للغاية بسبب المخاطر والشكوك المختلفة المرتبطة بالجوانب المالية والتقنية والبيئية والصحية والسلامة (EHS)، وقد خلصوا إلى أن "العصر الذهبي" لانتشار تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  وتخزينه في العالم يقع في الفترة من 2040 إلى 2060، ومن 2030 إلى 2050 في الصين. ولتحقيق هذا الهدف يجب على العالم زيادة دعمه للتغلب على التحديات بما في ذلك توسيع الجهود لاستكشاف سعة التخزين الجيولوجية، وزيادة الدعم المالي وتحفيز السوق، واستكمال الإطار التنظيمي المطلوب وآلية تقاسم المخاطر للتغلب على هذه التحديات. ويجب على شركات النفط والغاز، وكذلك أصحاب المصلحة الآخرين، الاستفادة من أحدث الابتكارات التكنولوجية التي يتم تطويرها أيضاً، مثل علوم البيانات والروبوتات والذكاء الاصطناعي، حيث تعد مثل هذه التقنيات ضرورية في مواجهة التحديات المتعددة المتغيرات في مجال تقني صناعي كمجال التقاط وتخزين الكربون. وقد تمت مؤخراً مراجعة الاستخدام المحتمل للذكاء الاصطناعي في صناعة النفط والغاز بشكل شامل (عماد مكي، 2022)، حيث سُلط الضوء على العديد من التطبيقات في صناعات تكرير البترول والبتر وكيموايات، والتي يمكن أن تؤدي إلى الحفاظ على الطاقة وخفض الانبعاثات من هذه الصناعات. من المحتمل أن تكون التطبيقات المحتملة في حقول النفط وتوصيف مواقع تخزين  $CO_2$  المحتملة واعدة ويمكن أن تؤدي إلى تسريع تطوير تكنولوجيا التقاط  $CO_2$  وتخزينه.

2.10. اقتصاديات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه

تمت معالجة اقتصاديات CCUS في العديد من الأوراق والتقارير التي يعود تاريخها إلى أكثر من عقد من الزمن. وتم الاستشهاد بالأوراق العلمية التي قد يرغب بعض القراء في الرجوع إليها هنا للحصول على مزيد من المعلومات ( Adams II et al., 2017; Bataille et al., 2015; Ekström et al., 2009; GCSI, 2011b; Naims, 2016; Tayara, 2013; Tuinier et al., 2011a; al., 2009; Zahid, 2015). وترتكز مراجعتنا في هذا الفصل على الأوراق الصادرة بعد عام 2018، حيث أن مخرجات الدراسات الاقتصادية حساسة لأحدث البيانات الفنية والمالية المتاحة حول التقنيات. وتعتمد معظم الدراسات الاقتصادية على البيانات التي تم الحصول عليها من أداء المصانع التجريبية أو شبه التجارية أو التجارية، وغالباً ما تكون هذه البيانات محدودة بسبب السرية وأفاقها التجارية. وسنبداً المراجعة بتقديم إحاطة حول المخرجات المنشورة قبل عام 2018.

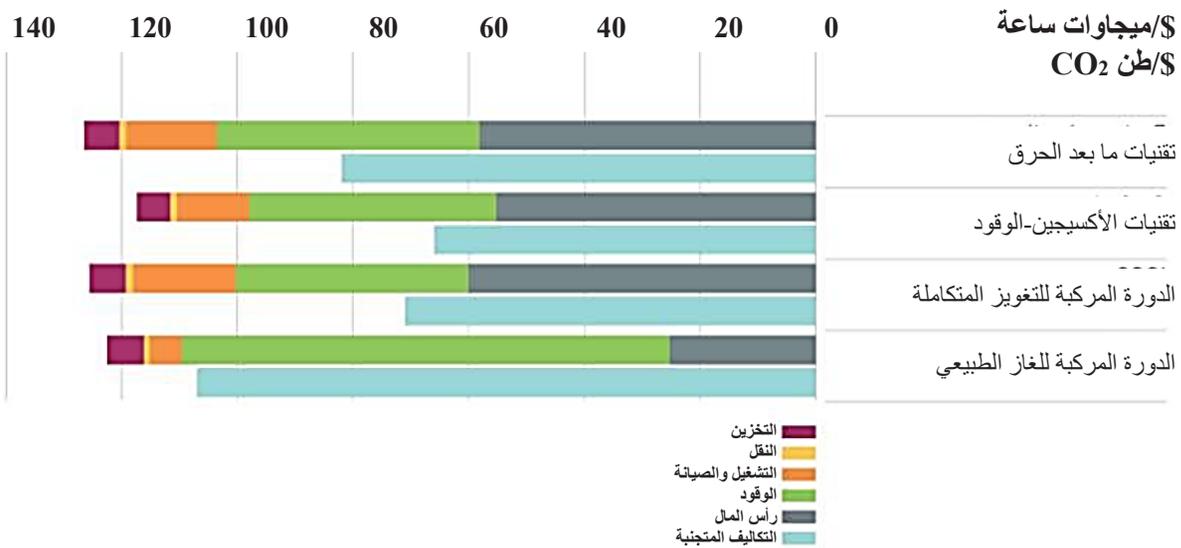
خُصت الدراسات الاقتصادية السابقة بشكل عام إلى أن التكلفة المرتبطة بتقنية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه منخفضة نسبياً مقارنةً بتقلبات أسعار الطاقة الأحفورية، وعليه يمكن استيعابها من قبل المستخدمين النهائيين ومن قبل صناعات النفط والغاز وتوليد الطاقة الكهربائية وغيرها من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة. كما عمل المعنيون على موازنة المنهجية المتبعة في التقييمات الاقتصادية لتسهيل قبول النتائج. ومن مخرجات هذه الجهود استخدام المؤشر الاقتصادي "تجنب ثاني أكسيد الكربون" بوحدة (دولار أمريكي/طن)، كمقياس لمقارنة الأداء الفني والاقتصادي لمختلف تقنيات واستراتيجيات التقاط ثاني أكسيد الكربون. ويمثل الـ CO<sub>2</sub> الذي يتم تجنبه التكلفة الإضافية لمنشأة التقاط CO<sub>2</sub> لمنشأة صناعية أو محطة توليد كهرباء مقارنةً بنفس المحطة دون التقاط ثاني أكسيد الكربون. ويتم التعبير عن CO<sub>2</sub> الذي يتم تجنبه على النحو التالي:

$$\text{تجنب ثاني أكسيد الكربون} = \frac{\text{LCOE (التقاط)} - \text{LCOE (المرجع)}}{\text{انبعاثات CO2 (التقاط)} - \text{انبعاثات CO2 (المرجع)}}$$

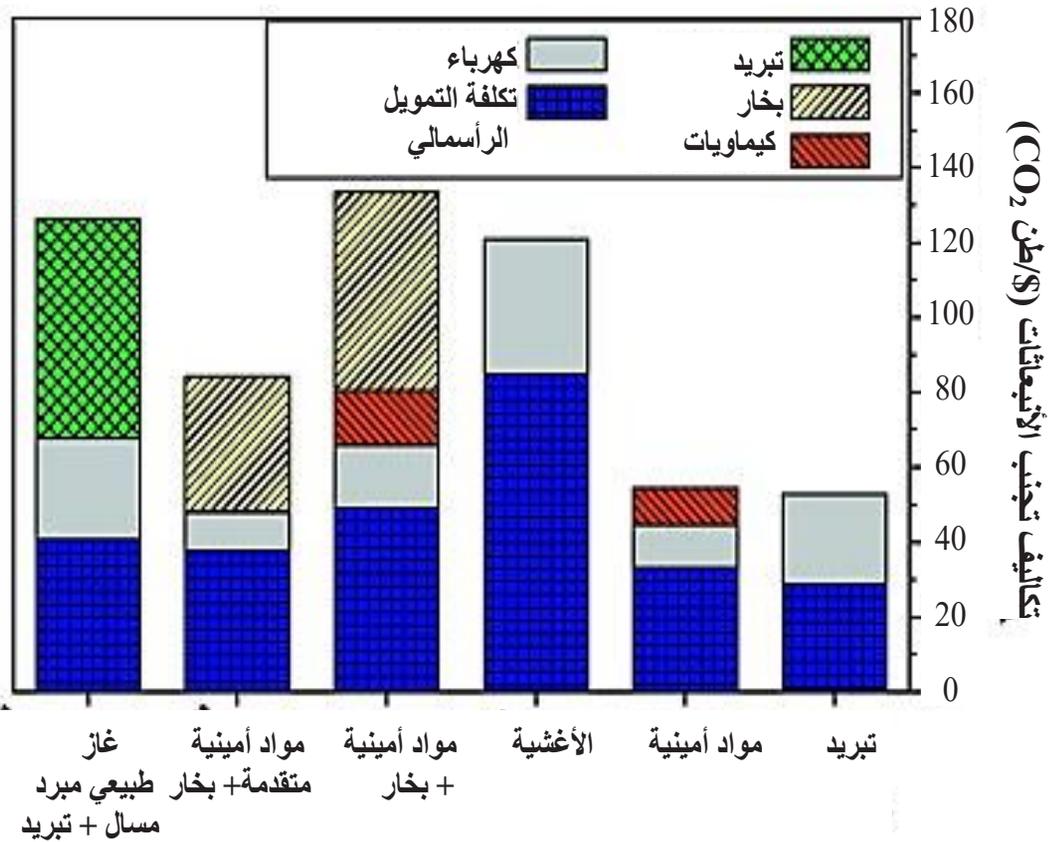
حيث LCOE (levelized cost of electricity) هي التكلفة المستوية للكهرباء، أي التكلفة على مدار عمر المنشأة/الطاقة الكهربائية المنتجة أو الإنتاج على مدار العمر، و"المرجع" هو المنشأة أو المصنع المرجعي دون التقاط ثاني أكسيد الكربون، و"التقاط" هو نفس المصنع المرجعي الذي يتم فيه التقاط CO<sub>2</sub> (Guozhao & Ming, 2017).

وإحدى الجهود المبكرة لمعالجة تكاليف التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه هي الندوة التي عقدتها وكالة الطاقة الدولية في عام 2011 وضمت مشاركين من وكالة الطاقة الدولية وشركات النفط والغاز وشركات

الطاقة الكهربائية وعدد من الجامعات (GCCSI, 2011a; GCSI, 2011b). كما تم نشر تكاليف التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه عبر سلسلة القيمة من قبل شورت (Short, 2011)، وتم تلخيصها في الشكل 2.10. ويبين الشكل أن التكلفة المتساوية بلغت حوالي 120 دولاراً أمريكياً في عام 2010، ويُعزى معظمها إلى الطاقة (أي الوقود) والتكاليف الرأسمالية المرتبطة بالتقاط ثاني أكسيد الكربون، والتي تمثل حوالي 75% من التكلفة الإجمالية لأنظمة التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه (Jha et al., 2021; Short, 2011). وتجدر الإشارة إلى أن محطات توليد الطاقة الكهربائية كانت محور معظم دراسات التقييم الاقتصادي مثل تلك التي أجراها عدد من الباحثين (Tuinier et al. 2011; Battaille et al. 2013; Zhao et al. 2013; Ji and Zhao, 2017; Adams II et al., 2017; Battaille et al., 2015; Guozhao & Ming, 2017; Tuinier et al., 2011a). وتناولت هذه الدراسات مكونات محطات الطاقة المختلفة والوقود وتقنيات التقاط الكربون. وقد تم تلخيص النتائج في الشكل 3.10 والجدول 4.10 - 6.10.



الشكل 2.10. تكاليف احتجاز CO<sub>2</sub> وتخزينه التي تم تجنبها بالدولار الأمريكي لعام 2010. والتكلفة المتجنبة هي الخيار الأقل تكلفة لنفس مصدر الوقود دون احتجاز CO<sub>2</sub> وتخزينه (المصدر: Short, 2011).



الشكل 3.10. تكاليف تجنب الانبعاثات لبعض تقنيات احتجاز CO<sub>2</sub> (المصدر: Tuinier et al., 2011a).

وركزت إحدى هذه الدراسات (Tuinier et al., 2011a) على تكلفة تقنيات تجنب الـ CO<sub>2</sub> المختلفة. كما وجدت دراسة أخرى (Bataille et al., 2015) أن إضافة CSS يرفع تكلفة الكهرباء بمعدل 70% للتوليد باستخدام الفحم الحجري و50% للتوليد بالدورة المركبة للغاز. ووجدوا أيضاً أن التكلفة التقديرية التي تم تجنبها للـ CO<sub>2</sub> تتراوح ما بين 82 دولاراً إلى 115 دولاراً لكل طن من CO<sub>2</sub> لمحطات الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري، ومن 112 دولاراً إلى 170 دولاراً لكل طن من CO<sub>2</sub> لمحطات الدورة المركبة للغاز الطبيعي. وتبلغ متوسط التكلفة المقدرة لإعادة تجهيز محطة عاملة لتوليد الكهرباء تعمل بالفحم الحجري نحو 35% أعلى من تكلفة إضافة تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه إلى محطة جديدة. وقام تشاو وآخرون (Zhao et al., 2013) بدراسة تكلفة LCOE وتجنب CO<sub>2</sub> باستخدام تقنيات التقاط مختلفة للـ CO<sub>2</sub> وتخزينه مقارنةً مع حالة محطة توليد الطاقة بالفحم الحجري المسحوق، وبالتالي مقارنة الأداء بين التقنيات المختلفة. وخلصت دراسة (Guozhao and Ming, 2017) إلى أن المنشأة المجهزة بوحدة التقاط CO<sub>2</sub> الغشائية بـ 100%، أفضلاً، لتكلفة الطاقة وتجنب تكلفة CO<sub>2</sub>

مقارنةً بمنشأة مجهزة بوحدة التقاط باستخدام الأمينات. وتكلفة CO<sub>2</sub> التي يتم تجنبها من خلال التقاط الـ CO<sub>2</sub> بواسطة تقنية الغشاء أفضل بنسبة 30% تقريباً من التكلفة المعتمدة على الأمينات.

الجدول 4.10 خصائص منشآت جديدة الأولى من نوعها لمحطات الكهرباء الحرارية ذات حمل أساسي ومزودة بتقنية التقاط الكربون ( Bataille et al., 2015)

دولار أمريكي/الطن (تم تجنيبه)	التكاليف الإضافية لمحطة التقاط CO <sub>2</sub> وتخزينه				انبعاثات الغازات الدفينة			كفاءة وكفاءته			المصدر
	التكلفة المستوية (دولار/ميجاواط ساعة)	الطاقة (دولار/ميجاوات ساعة)	التشغيل (دولار/ميجاوات ساعة)	رأس المال (دولار/كيلوات)	الانبعاثات المتجنبة (جم/كيلوات ساعة)	معدل الالتقاط (%)	عقوبة كفاءة الطاقة (%)	الكفاءة الحرارية (%)	القدرة الإجمالية (MW)		
99	64	3	8	3072	646	87	-22	33	481	CCPC (2008) Keephills	
82	52	3	7	2474	636	88	-20	36	491	CCPC (2008) Point Tupper	
98	68	4	10	3185	695	87	-24	30	479	CCPC (2008) Shand	
110	76	5	20	2993	692	88	-29	28	663	DOE (2010)	
115	82	4	22	3216	708	87	-28	28	650	EIA (2011)	
101	68	5	14	2863	676	86	-30	27	663	GCCSI (2011) PC 1	
98	66	5	13	2815	680	86	-28	28	661	GCCSI (2011) PC 2	

محطات الفحم الحجري فوق الحرج (Coal Supercritical)

100	69	5	-	3736	689	86	-28	28	550	IEA (2011)
<b>101</b>	<b>68</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>3044</b>	<b>678</b>	<b>87</b>	<b>30 -</b> <b>26</b>		<b>580</b>	المتوسط
محطات التوربة المركبة للغاز الطبيعي (NGCC)										
134	43	9	10	1334	320	90	-15	43	511	DOE (2010)
170	51	9	14	1733	303	90	-14	45	340	EIA (2011)
113	35	9	5	1207	309	88	-14	44	520	GCCSI (2011)
112	30	8	-	1238	265	85	-14	48	461	IEA (2011)
<b>132</b>	<b>40</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>1378</b>	<b>299</b>	<b>88</b>	<b>-14</b>	<b>45</b>	<b>458</b>	المتوسط

الجدول 5.10. تكلفة الطاقة وتكلفة CO<sub>2</sub> الذي تم تجنبه من الدراسات التقنية والاقتصادية (Zhao et al., 2013)

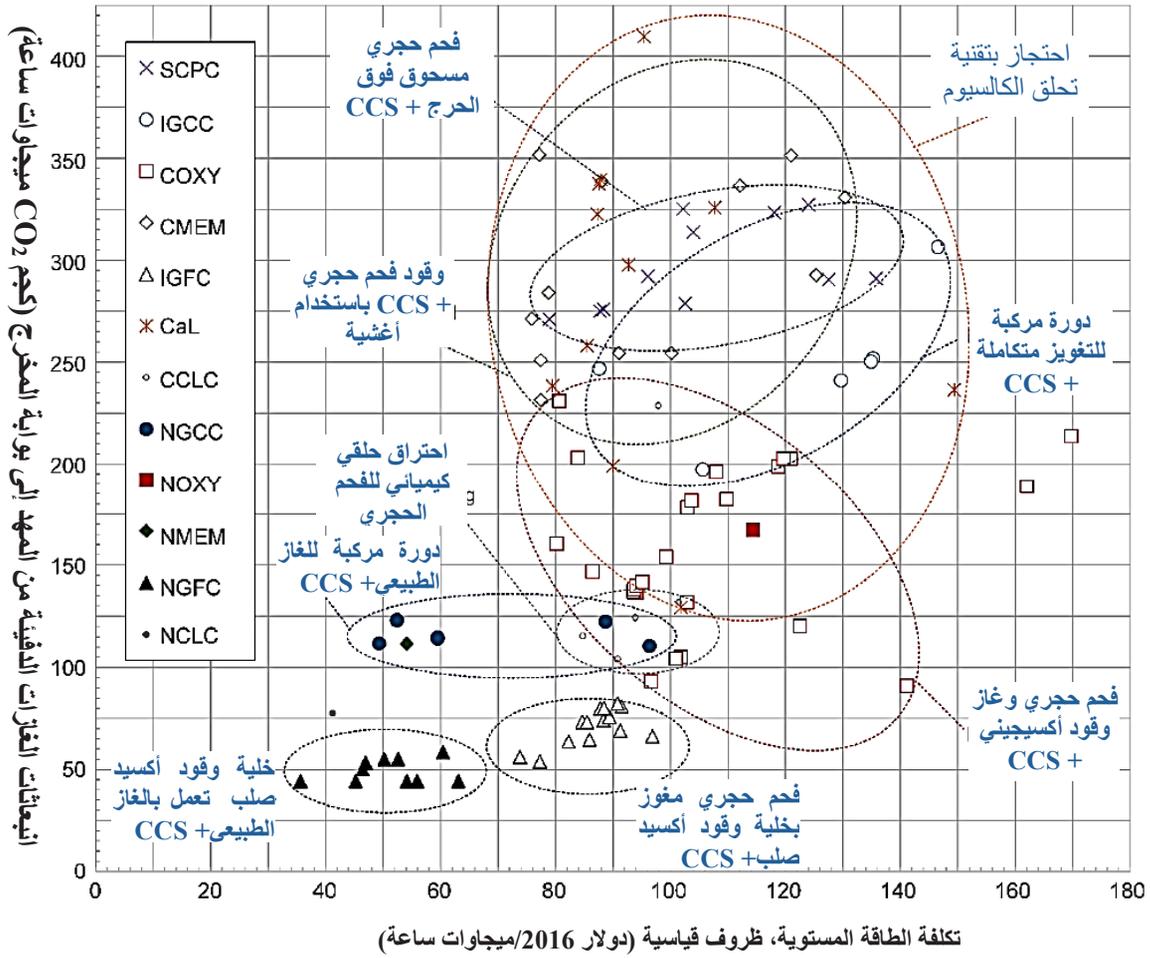
تقنية الالتقاط					
تعلق الكالسيوم	الأغشية	كربونات الفلزات القلوية e	الأمونيا المبردة	أحادي ميثيل الأمين	
788	781	774	799	807	مرجع انبعاثات CO <sub>2</sub> (كجم/ميجاوات في الساعة)
125	92	84	109	112	التقاط انبعاثات CO <sub>2</sub> (كجم/ميجاوات في الساعة)
52	63	65	64	57	تكلفة الطاقة المرجعية (دولار أمريكي/ميجاوات في الساعة)
71	106	88	99	100	كلفة الالتقاط المرجعية (دولار أمريكي/ميجاوات في الساعة)
36.3	+69.6	+36.2	+55.5	+75.1	الفرق في سعر التكلفة للكهرباء مقارنة بالمحطة الأساسية دون التقاط وتخزين الكربون المحدث (%)
29	68	34	53	61	تكلفة CO <sub>2</sub> التي تم تجنبها (دولار/طن ثاني أكسيد الكربون)

الجدول 6.10. المقارنات التقنية والاقتصادية بين التقاط CO<sub>2</sub> المعتمد على الأمينات والفصل الغشائي (Ming, 2017 & Guozhao)

شركة تكنولوجيا الأغشية والأبحاث	معهد أبحاث الطاقة الكهربائية	جامعة كارنيجي ميلون	المؤسسة/ المنظمة
معتمدة على الأغشية	معتمدة على الأمين	معتمدة على الأمين	تكنولوجيا التقاط CO <sub>2</sub> وتخزينه CCS technology
الولايات المتحدة الأمريكية	الولايات المتحدة الأمريكية	الولايات المتحدة الأمريكية	الموقع
إلينوي Illinois	Bitcoal	Bitcoal	نوع الفحم الحجري رقم 6
580	600	575	حجم المحطة (ميجاوات)

90	85	90		معدل التقاط CO <sub>2</sub> وفق التصميم (%)
760	836	811	القيمة المرجعية	انبعاثات CO <sub>2</sub> (كجم/ميجاوات في الساعة)
87	126	107	الالتقاط	
550	600	528	القيمة المرجعية	صافي الطاقة الناتجة (ميجاواط)
461	550	493	الالتقاط	
41.4	40	41.4	القيمة المرجعية	صافي كفاءة المحطة (الجهود المنخفضة %)
34.4	29.1	31.5	الالتقاط	
7	10.9	9.9		الكفاءة المفقودة (%)
1727	2104	1696	القيمة المرجعية	التكاليف الرأسمالية (دولار/كيلوواط)
2627	3516	2759	الالتقاط	
62	77	62	القيمة المرجعية	تكلفة الطاقة (دولار/مليون كيلوواط)
93	127	104	الالتقاط	
46	71	58		قيمة CO <sub>2</sub> الذي تم تجنبه (دولار/طن)

وفي دراسة أخرى تم من خلالها القيام بمراجعة نقدية أكثر شمولاً لدراسات اقتصاديات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التي تم إجراؤها قبل عام 2017 وتم تلخيص النتائج عن طريق إظهار تشتت الأرقام المتعلقة بـ LCOE وانبعاثات دورة الحياة في الشكل 4.10 (Adams II et al., 2017). واستعرضت هذه الدراسة الدراسات التقنية والاقتصادية لأنظمة محطات توليد الطاقة ذات قدرات التقاط CO<sub>2</sub> والمنشورة منذ عام 2007 وأجرت مقارنة متوازنة أخذت في الاعتبار العوامل التالية: تعديل المحطات على نفس النطاق باعتباره المنشأة الأساسية المحددة، وضبط العملة والموقع والسنة، مع تعديل الاختلافات في معدلات التقاط ثاني أكسيد الكربون، والضغوط، وتعريفات بوابة المنشأة، وتكاليف الحوسبة لـ CO<sub>2</sub> التي يتم تجنبها.



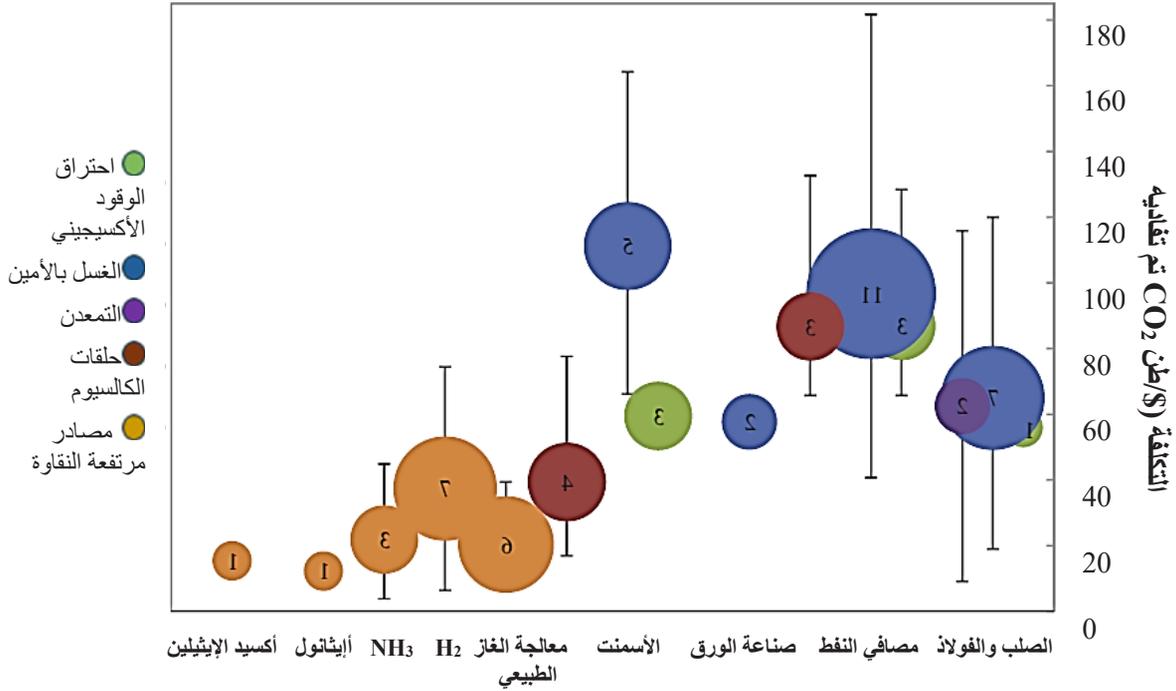
الشكل 4.10. تكلفة الطاقة في الظروف القياسية (LCOE) لكل مصنع مقابل انبعاثات الغازات الدفيئة المحسوبة لدورة الحياة باستخدام متوسط سعر الوقود لعام 2016. (CaL = احتجاز الكربون بتحلل الكالسيوم؛ CCLC = الاحتراق التحللي الكيميائي للفحم الحجري؛ CMEM = الفحم الحجري عمليات فصل الأغشية المعتمدة على COXY = احتراق أكسي-وقود القائم على الفحم الحجري؛ IGCC = الدورة المركبة للتغويز المتكاملة؛ IGFC = خلية وقود التغويز المتكاملة (أكسيد صلب)؛ NCLC = الاحتراق التحللي الكيميائي القائم على الغاز الطبيعي؛ NGCC = الدورة المركبة للغاز الطبيعي؛ NGFC = خلية وقود الغاز الطبيعي (الأكسيد الصلب)؛ NMEM = عمليات فصل الأغشية المعتمدة على الغاز الطبيعي؛ NOXY = حرق الغاز الطبيعي بالأكسجين؛ SCPC = فحم حجري مسحوق فوق الحرج (المصدر: Adams II et al., 2017).

وخلصت الدراسة إلى ضرورة توخي الحذر في تقدير مبالغ الاستثمارات لتحسين تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> المعتمدة على المذيبات والأغشية. وعلاوة على ذلك، تمت التوصية بالاستثمار في تطوير تكنولوجيا أكسي-وقود وتكنولوجيا خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC) مع اختيار الوقود المستخدم بناءً على

أسعار السوق. ويمكن على المدى القريب تحقيق تخفيضات فورية في تكلفة التقاط انبعاثات CO<sub>2</sub> من خلال تكنولوجيا الدورة المتكاملة أو المركبة للغاز الطبيعي (NGCC) الحالية. بالنسبة لصناعة الأسمت، فقد تبين أن تكلفة التقاط CO<sub>2</sub> باستخدام فرن حرق بالأكسجين تبلغ 60 دولاراً أمريكياً/طن ثاني أكسيد الكربون بينما تبلغ تكلفة التقاطه بتعلق الكالسيوم حوالي 20-75 دولاراً أمريكياً/طن ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي هما أكثر فعالية من حيث التكلفة من تقنيات الامتصاص بالأمينات (65-175 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub>). وتعزى التكلفة العالية لتكنولوجيا الامتصاص بالأمينات إلى الحاجة إلى حماية الأمينات من أكاسيد النيتروجين وأكسيد الكبريت إضافةً إلى متطلبات الطاقة العالية. ومن المتوقع أن يؤدي بناء منشأة في الشرق الأقصى إلى تخفيض التكلفة التي يتم تجنبها لالتقاط الـ CO<sub>2</sub> (Bui et al., 2018). كما تم نشر دراسة أكثر شمولاً لتكاليف CO<sub>2</sub> التي تم تجنبها في الصناعات كثيفة الاستخدام للطاقة من قبل مجموعة باحثين (Leeson et al., 2017)، ويعرض الشكل 5.10 نتائج هذه الدراسة.

واستناداً إلى هذا البحث، بالنسبة لصناعة الحديد والصلب، تتراوح تكلفة تجنب الـ CO<sub>2</sub> ضمن نطاق واسع بين 50 إلى 120 دولاراً أمريكياً لكل طن من CO<sub>2</sub> استناداً إلى دراسات مختلفة، ونُشرت أيضاً بيانات حول النسب المئوية للانبعاثات التي تم التقاطها ووجد أنها تقع ضمن نطاق يتراوح ما بين 20 إلى 65%. أما بالنسبة لصناعة الأسمت، فقد بلغت قيمة التكلفة التي تم تجنبها لـ CO<sub>2</sub> في حدود 40 إلى 164 دولاراً أمريكياً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون، وتراوحت الانبعاثات التي تم التقاطها بين 60 و 90%. وبالنسبة لصناعة تكرير البترول، نُشرت مجموعة من قيم تكلفة تجنب الـ CO<sub>2</sub> لالتقاط ما بعد الاحتراق، وقُدرت التكاليف بحوالي 40 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> لقسم التغويز، و 65 دولاراً أمريكياً تقريباً/طن CO<sub>2</sub> للغلايات والأفران، وحوالي 120 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> للمجموعة ككل. ويمكننا أن نستنتج بناءً على المراجعة الفنية في الفصول السابقة ومراجعة الجوانب الاقتصادية في هذا القسم، أن التقاط الكربون بعد الاحتراق هو الأكثر نضجاً بين مسارات التقاط الكربون المعروفة حالياً. وهناك العديد من الخيارات التي تجعلها مناسبة لدمجها في محطات توليد الطاقة الكهربائية الحالية ومصافي تكرير البترول ومصانع الصلب والأسمت وإنتاج غاز الهيدروجين وسفن الشحن البحري. وقد تمكنت تقنيات الامتصاص من تحقيق تحسينات كبيرة مما يجعلها الأكثر نضجاً من بين تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه المتاحة. كما تعد تقنيات الالتقاط الأخرى، وتحديدًا تقنيات التبريد والأغشية، تقنيات واعدة أيضاً. وقد أظهرت دراسات التقييم الاقتصادي المبكرة أن التقاط وتخزين الكربون يمكن أن يصبح ممكناً، وأن تكاليفه يمكن استيعابها إلا أنه لا تزال هناك حاجة إلى تحسينات لخفض التكاليف. إن العوامل الرئيسية، التي تلعب دوراً أساسياً في اختيار تقنية التقاط الكربون المجدية على المستوى

الصناعي، هي مستوى نضج التكنولوجيا والنفقات الرأسمالية وكفاءة إزالة ثاني أكسيد الكربون والتكلفة المستوية للطاقة (LCOE) وتكلفة CO<sub>2</sub> التي يتم تجنبها. وينبغي أن تنخفض هذه التكلفة الأخيرة بمقدار 30-50 دولاراً أمريكياً/طن CO<sub>2</sub> مع انخفاض استهلاك الطاقة إلى حوالي 0.20 ميجاوات ساعة/طن CO<sub>2</sub> (Cann, 2021).

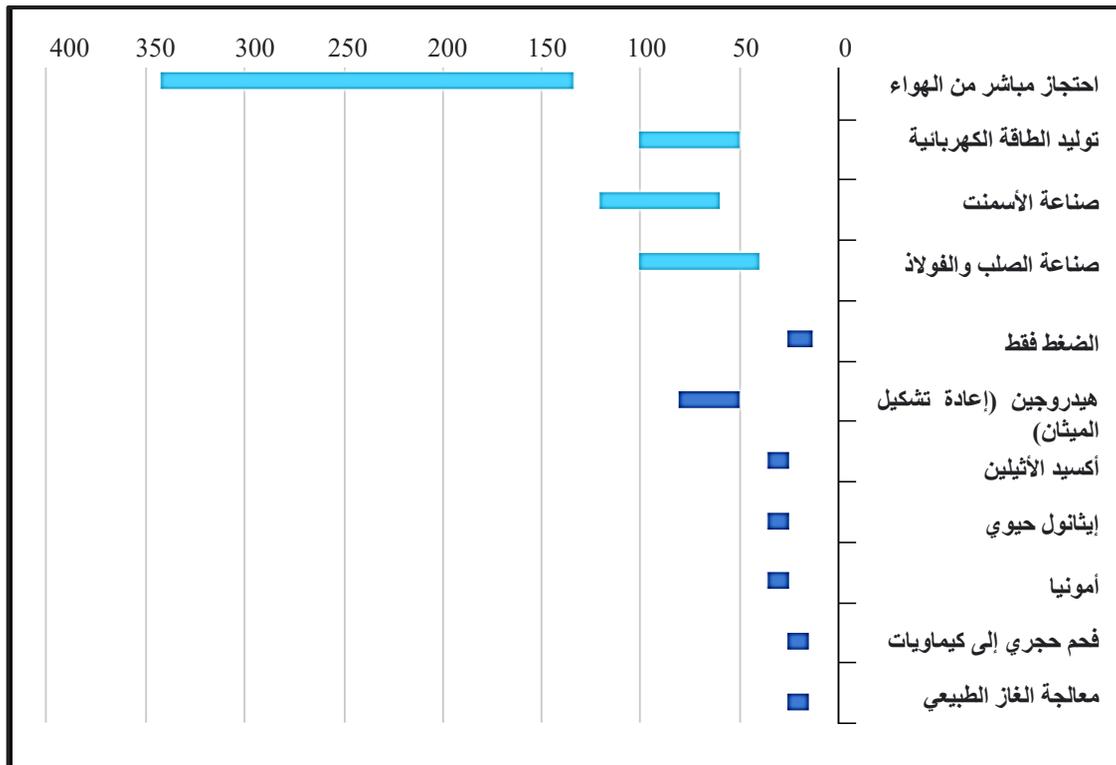


الشكل 5.10. متوسط تكاليف التقنيات في الصناعات المختلفة. (أشرطة الخطأ = النطاق الكامل للتكاليف الموجودة في الأدبيات؛ قطر الفقاعة = عدد مصادر بيانات التكلفة للصناعة والتكنولوجيا؛ تقع أشرطة الخطأ داخل الفقاعة إذا لم تظهر (المصدر: Leeson et al., 2017)).

### 3.10. مستجدات تطورات اقتصاديات CCUS

نُشرت العديد من الأوراق العلمية على مدى السنوات الخمسة الماضية منذ عام 2018 حول اقتصاديات التقاط واستخدام وتخزين الكربون (CCUS). ومن المحتمل أن تكون هذه الزيادة في الاهتمام بالموضوع مدفوعة بالعوامل التالية: (1) التطورات التكنولوجية السريعة التي حدثت والتي أدت إلى تحسينات خاصة في متطلبات الطاقة للتكنولوجيات التي وصلت بالفعل إلى المرحلة التجارية و(2) ارتفاع عدد التقنيات التي انتقلت إلى جاهزية تكنولوجية أعلى من 7 و(3) الزيادة في عدد مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التي أصبحت في مرحلة التخطيط. وفي هذا القسم، سيتم التركيز على آخر

التطورات التي حدثت فيما يتعلق باقتصاديات CCUS، فقد تم إجراء عدد من الدراسات التي تقدم نظرة معمقة لحالة التقنيات المتاحة ( IEA, 2020; IEA, 2021b; IEA, 2021c; Kearns et al., ) ويتضمن الشكل 6.10 ( IEA, 2020; IEA, 2021b; IEA, ) (2021; Pechman et al., 2022) والجدول 7.10 (Pechman et al., 2022) أحدث الأرقام المتعلقة بالتكاليف. ويبدو من هذين المصدرين أنه لم يكن هناك انخفاض كبير في التكلفة التي تم تجنبها لثاني أكسيد الكربون، ولا يزال أساس التقديرات يقتصر على العدد المنخفض نسبياً من الدراسات التي تم إجراؤها. فعلى سبيل المثال، من الواضح أن تكلفة CO<sub>2</sub> أقل بكثير بالنسبة للمصادر المركزة مثل معالجة الغاز الطبيعي وإنتاج الهيدروجين وتقع في حدود 20-50 دولاراً أمريكياً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون. أما بالنسبة لتوليد الطاقة وصناعة الأسمنت وصناعات الحديد/الصلب، وهي قطاعات مهمة لالتقاط وتخزين الكربون، فلا تزال التكلفة مرتفعة نسبياً في حدود 40-130 دولاراً أمريكياً لكل طن من ثاني أكسيد الكربون. وفيما يتعلق بالنقل والتخزين، تُقدر التكاليف في حدود 2-8 دولار أمريكي/طن و8-20 دولار أمريكي/طن، على التوالي. ومع ذلك، تعكس التقارير الأخيرة بوضوح فهماً أفضل للعوامل التي تؤثر على تقدم وتطور وانتشار تقنيات CCUS على نطاق أوسع.



الشكل 6.10. التكلفة المتساوية لاحتجاز CO<sub>2</sub> حسب القطاع (المصدر: IEA, 2020, 2021).

على سبيل المثال، ركزت إحدى الدراسات (Pechman et al., 2022) على سوق الولايات المتحدة الأمريكية، وأشارت إلى أن اقتصاديات منشآت التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه تعتمد على كل من تكاليف الالتقاط/التخلص والإيرادات التي يمكن توليدها من منتجات مصادر الانبعاثات، مثل الكهرباء أو الأسمت أو الصلب أو من مبيعات CO<sub>2</sub> الملتقطة. وتم تحديد أربعة مصادر محتملة للإيرادات:

- إيرادات سوق منتجات هذه المصانع التي تسمح باسترداد تكاليف التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه
- الإعانات الضريبية مثل تشريع 45Q في الولايات المتحدة الأمريكية
- تسعير الكربون
- الإيرادات المتعلقة بالغازات الدفيئة

وتعتمد معظم مصادر الإيرادات المذكورة أعلاه على السياسات واللوائح الوطنية والدولية المرتبطة بموضوع CCUS. وبالتالي، يجب بذل الجهود لمراجعة اللوائح من أجل الحصول على تقاسم معقول للتكاليف المرتبطة بـ CCUS من قبل جميع الأطراف المعنية.

#### الجدول 7.10. تقديرات مفصلة لتكلفة احتجاز CO<sub>2</sub> وتخزينه (Pechman et al., 2022)

نوع المحطة	تكلفة الالتقاط، دولار/طن متري (سنة)	COE, تكلفة المعدات المملوكة للمنشأة، دولار/ميغاوات/ساعة	ملاحظات
الفحم الحجري المسحوق دون الخرج بعد الاحتراق	\$44.6 (2018)	\$106.3	لا يشمل النقل والخدمات؛ سعر مبيعات CO <sub>2</sub> المستخدم لتكلفة الالتقاط
	82.88-53.76 دولاراً (2019)	118.752-76.16 دولاراً	تم تحويلها بسعر 1.12 يورو لكل دولار
الفحم الحجري المسحوق فوق الخرج باستخدام تقنية أوكسي- الوقود	48-43 دولاراً	108 دولاراً	التكلفة مقدرة لمصنع غير محدد؛ النطاق يتضمن تكاليف تتراوح بين 7 دولارات و12 دولاراً/طنناً مترياً للنقل والخدمات
فحم حجري مسحوق بعد الاحتراق	36.07 دولاراً أمريكياً (2020)	70.57 دولاراً أمريكياً	لا يشمل النقل والخدمات (مقدرة بنحو 10 دولارات للطن المتري)؛ تم التعديل من دولار 2012 إلى دولار 2020

الدورة المركبة لتغويز الفحم الحجري (IGCC) الاحتراق المسبق	\$82.7-119.4 (2018)	\$139.4-166.5	لا يشمل النقل والخدمات؛ سعر مبيعات CO <sub>2</sub> المستخدم لتكلفة الالتقاط
	\$34-39 (2017)	\$102	التكلفة مخصصة لمصنع غير محدد؛ النطاق يتضمن تكاليف تتراوح بين 7 و 12 دولاراً/طناً مترياً للنقل والخدمات
	\$20.29 (2020)	\$57.94	لا يشمل النقل والخدمات والمقدرة بحوالي 10 دولار/طن؛ معدلة من دولار 2012 إلى دولار 2020
الدورة المركبة للغاز الطبيعي (NGCC) ما بعد الاحتراق	79.60 دولاراً أمريكياً (2018)	70.90 دولاراً أمريكياً	لا يشمل النقل والخدمات؛ سعر مبيعات CO <sub>2</sub> المستخدم لتكلفة الالتقاط
	36-31 دولاراً (2017)	62 دولاراً	التكلفة مخصصة لمصنع غير محدد؛ النطاق يتضمن تكاليف تتراوح بين 7 و 12 دولاراً/طناً مترياً للنقل والخدمات
	106.40-69.44 دولراً أمريكياً (2019)	\$53.76-104.16	
	46.22 دولاراً أمريكياً (2020)	48.81 دولاراً أمريكياً	لا يشمل النقل والخدمات والمقدرة بحوالي 10 دولار/طن؛ معدلة من دولار 2012 إلى دولار 2020
كافة أنواع المحطات	80-40 دولاراً (2019)	لم يتم نشرها	(IEA 2019)؛ يعتمد النطاق على مجموعة متنوعة من التقنيات وتكوينات المنشأة؛ تم استبعاد النقل والخدمات

وتعكس توصيات هؤلاء الباحثين (Pechman et al., 2022) الواردة في القائمة التالية بوضوح دور

حكومة الولايات المتحدة الأمريكية في دعم CCUS:

1. وضع خطة وطنية لإزالة الكربون توضح دور التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه والحاجة إليه.

2. تشجيع الإجراءات التنظيمية للدولة التي تقلل من تكلفة الخدمة والمخاطر التنظيمية المرتبطة بتطوير منشآت التقاط وتخزين الكربون، بما في ذلك الإعلانات المسبقة عن الحياطة، وتوفير عوائد نقدية لأعمال البناء قيد التنفيذ (CWIP)، ودعم التوريد.
  3. تشجيع الولايات والحكومة الفيدرالية على اعتماد أحكام الدفع المباشر لدعم التقاط وتخزين الكربون.
  4. توفير التمويل والمساعدة الفنية لتعزيز القدرات التحليلية لوحدات التحكم بالتلوث والمرافق وأصحاب المصلحة في الولايات لتخطيط مسارات إزالة الكربون بشكل أفضل.
  5. إدراج التقاط  $CO_2$  وتخزينه كتقنية مؤهلة في معايير محافظ الولايات للطاقة المتجددة.
  6. دراسة تأثير تصميم سوق الـ  $CO_2$  على استرداد التكاليف الرأسمالية لتكنولوجيا التقاط  $CO_2$  وتخزينه.
  7. دراسة قيمة التقاط  $CO_2$  وتخزينه لضمان السعة الكافية لتوفير خدمات الموثوقية الأساسية.
  8. وضع آليات لقياس والتحقق من قيمة تعويضات الكربون.
  9. وضع أدوات يوصى باتباعها بشأن الإجراءات التنظيمية والتشريعية للولايات المرتبطة بإزالة الكربون، بما في ذلك معالجة تعويضات الكربون، والسياسات التي تؤثر على التقاط وتخزين الكربون، ومعايير محفظة الطاقة المتجددة، ومنهجيات للتخطيط المتكامل للموارد.
  10. تحليل مقترحات تسعير الكربون وتأثيرها على التقاط  $CO_2$  وتخزينه
- وقدم تقرير للوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2020) تقيماً لسلسلة القيمة الشاملة لـ CCUS، وُحدد في الفصل الختامي من التقرير مجالين يتوجب التركيز عليهما ومعالجتهما لتسريع انتشار التقاط  $CO_2$  وتخزينه. ويتطلب كل مجال من مجالات التركيز معالجة عدد من التحديات الأكثر ارتباطاً بالحاجة إلى السياسات واللوائح التنظيمية. وفيما يلي ملخص لهذه التحديات:
- أ. مجال التركيز الأول: اعتبارات مرتبطة بالسياسات
    - تطوير السياسات الداعمة للانتشار السريع لتقنيات CCUS
    - التأكد من أن السياسات مصممة لتناسب تحديات قطاعات الصناعة المختلفة والموقع الجغرافي لنشاط CCUS.
  - ب. مجال التركيز الثاني: أولويات الانتشار السريع للـ CCUS، والتي تتطلب في الغالب سياسات ولوائح ودعمًا حكوميًا
    - تهيئة الظروف للاستثمار
    - استهداف المراكز الصناعية ذات البنية التحتية المشتركة لثاني أكسيد الكربون

- تحديد وتشجيع تطوير تخزين ثاني أكسيد الكربون
- تعزيز الابتكار التكنولوجي

ومن الواضح أن جميع أصحاب المصلحة، أي موردي الوقود الأحفوري ومصافي التكرير والصناعات البتروكيمياوية وغيرها من القطاعات الصناعية التي تعتبر مصدراً رئيسياً لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، يجب أن يشاركوا بالأنشطة المتعلقة بتطوير السياسات المطلوبة. ومن المهم عند تطوير السياسات الأخذ في الاعتبار التوصيات الواردة في العديد من الأوراق العلمية والتقارير المتعلقة بهذا المجال (Brandl et al., 2021; Cabrera et al., 2022).

ومن المثير للاهتمام أن نلاحظ أنه تم بذل مجموعة متنوعة من الجهود البحثية على مدى السنوات القليلة الماضية، والتي تناولت مجموعة واسعة من القضايا المتعلقة باقتصاديات التقاط  $CO_2$  وتخزينه. وشملت القضايا السياسات واللوائح والتحليل المعمق للحواجز الاقتصادية وتوقعات إيرادات التقاط  $CO_2$  وتخزينه وتحديد أولويات الجهود البحثية. فعلى سبيل المثال، لوحظ أن المؤسسات التي تنفذ التقاط الكربون وتخزينه لا تتحمل تكلفة عملية التقاط الكربون فحسب، بل تتحمل أيضاً خسارة بعض إنتاج المؤسسة بسبب تنفيذ التقاط الكربون. وينطبق هذا بشكل خاص على صناعة توليد الطاقة الكهربائية التي يتوجب عليها تخصيص جزء من الطاقة الكهربائية المنتجة لأغراض الـ CCS. وبالإضافة إلى ذلك، فإن تكلفة النقل البحري مرتفعة بسبب استخدام المواد المضادة للتآكل في شبكة الأنابيب، مما يرفع تكلفتها بنسبة 40-70% مقارنةً بمنشآت النقل البري، وتزداد التكلفة مع مسافة النقل. وبالنسبة للتخزين، لا يزال هناك حاجة إلى استثمارات كبيرة لتغطية تكاليف البحث الفني المتعلق بسلامة التخزين. وأخيراً، من المتوقع أن تنخفض تكاليف التكنولوجيا مع مرور الوقت (Shen et al., 2022).

وفي جهود بحثية أخرى، تمت مراجعة التأخير في اتخاذ القرارات الاستثمارية وتبين أن معظمها يرجع إلى الشكوك الحالية المتعلقة بمختلف جوانب مشاريع التقاط  $CO_2$  وتخزينه. ومن ثم، يوصى باستخدام تحليل الخيارات الحقيقية (ROT) في دراسات جدوى مشاريع الـ CCU وبالتالي إدخال المرونة في قرارات الاستثمار. وتضمنت التوصيات أيضاً الحاجة إلى استخدام ROT في قرارات الاستثمار البحثي المستقبلية نظراً لأن هذه القرارات تتصف أيضاً بعدم اليقين (Lamberts-Van Assche and Compernelle, 2022).

كما ركزت جهود عدد من الباحثين على جانب الإيرادات لتحسين اقتصاديات CCUS (Hepburn et al., 2019)، وتم التركيز على 10 مسارات لاستخدام  $CO_2$ ، وتوقع الباحثون أن كل مسار يمكن أن يستخدم أكثر من 0.5 جيجا طن من الـ  $CO_2$  سنوياً. ويتضمن الجدول 8.10 المنتجات المحتملة والحالية. ولا تزال العوائق التي تحول دون انتشار هذه التكنولوجيات مرتفعة. وبالتالي تمت التوصية

بإعطاء الأولوية للجهود المبذولة لتطوير التقنيات والتركيز على تقنيات مختارة تستهدف إزالة العوائق التي تحول دون اعتمادها. ومما لا شك فيه أن تحديد الأولويات مهم نظراً لأن إمدادات CO<sub>2</sub> لا تزال محدودة. وينبغي للسياسات أن تحفز التخفيض الحقيقي للانبعاثات وإزالتها على أساس دورة الحياة. ومن بين الأهداف خفض تكلفة الالتقاط كوسيلة لخفض تكلفة CO<sub>2</sub> كمادة خام. ومن المطلوب أيضاً إجراء أبحاث حول المواد والعوامل الحفازة التي يمكن أن تؤدي إلى مجموعة واسعة من منتجات الـ CO<sub>2</sub> منخفضة التكلفة وبالتالي تساهم في تخفيض الـ CO<sub>2</sub>. ومن الممكن أيضاً توجيه الجهود نحو تطوير مواد بناء لتحل محل الأسمت البورتلاندي، والعمليات البيولوجية البرية التي توفر فرصاً لاستخدام CO<sub>2</sub> وإزالته وتخزينه. كما تم اقتراح عدد من القضايا المتعلقة بالسياسات لدعم استخدام ثاني أكسيد الكربون.

وحددت عدد من العوائق غير الفنية أمام مشاريع الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام الـ CO<sub>2</sub> وفي مشاريع التخزين البحرية. وهذه العوائق تشمل: (1) عدم إمكانية الوصول إلى إمدادات كافية وفي الوقت المناسب من ثاني أكسيد الكربون و(2) الافتقار إلى نماذج الأعمال الخاصة بمحطات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه البحرية و(3) ارتفاع متطلبات الاستثمار الرأسمالي والنفقات التشغيلية و(4) خسارة الإنتاج أثناء تعديل المرافق و(5) الشكوك المحيطة بالإيرادات، والتي تعزى إلى أسعار النفط، والقضايا التنظيمية، ووضوح الالتزامات طويلة الأجل. وتمت التوصية للحكومات والشركات الصناعية العمل على: تطوير خطط للمحاور الإقليمية للـ CO<sub>2</sub> والبنى التحتية للنقل وتطوير نماذج أعمال ولوائح خاصة للاستخلاص المعزز للنفط باستخدام الـ CO<sub>2</sub> للمشاريع البحرية وتسريع تطوير التكنولوجيا (Eide et al., 2019).

وتمت معالجة الجوانب الاجتماعية المرتبطة بالـ CCUS في دراسة أجراها بعض الباحثين (Pieri et al., 2023)، في محاولة لتطوير فهم موقف الرأي العام فيما يتعلق بمخرجات CCUS. واستهدفت الدراسة مدى رغبة الجمهور في شراء المنتجات المشتقة من ثاني أكسيد الكربون وقبول استخدامها. وخلصت الدراسة إلى أن هناك اتجاهًا إيجابيًا لبعض المنتجات المشتقة من CO<sub>2</sub>، مثل الوقود إذا كانت أرخص أو أفضل للبيئة. ويختلف مستوى القبول باختلاف الجنس والعمر. وأشار الاستطلاع إلى أن الجمهور متعاطف للغاية مع جهود السياسة والصناعة للترويج والاستثمار في انتشار CCUS وأوصت الدراسة بضرورة توصيل عدد أكثر من الرسائل مصممة بشكل أفضل خصيصاً لعامة الناس والتي تجعل الروابط بين CCU والعمل المناخي أكثر وضوحاً.

الجدول 8.10. تكاليف الاستخدام مقارنة بتكاليف المنتج، ومراجعة النطاق (Hepburn et al., 2019)

الاتجاه المتوقع للتكلفة في عام 2050مقارنةً بالتقنية المستخدمة حالياً**	التكلفة المتوقعة في عام 2050 مقارنةً بالتقنية المستخدمة حالياً**	الفرق (%)	سعر بيع المنتج الفرق في الوقت الحاضر *	متوسط تكلفة المنتج المصنوع باستخدام CO <sub>2</sub> ضمن نطاق الدراسة*	المسار
نزولاً	من المحتمل أن تكون أرخص	30%-	2,040	1,440	البوليمرات
نزولاً	إجماع غير كافٍ	30%+	400	510	الميثانول
نزولاً	من المحتمل أن تكون أكثر تكلفة	380%+	360	1,740	الميثان
نزولاً	من المحتمل أن تكون أكثر تكلفة	250%+	1,200	4,160	وقود فيشر – ترويش
نزولاً	إجماع غير كافٍ	320%+	660	2,740	ثنائي ميثيل إيثر
إجماع غير كافٍ	من المحتمل أن تكون أكثر تكلفة	170%+	1,000	2,680	الطحالب الدقيقة
نزولاً	إجماع غير كافٍ	20%+	18	21	حصى الإنشاءات
نزولاً	من المحتمل أن تكون أرخص	20%-	71	56	معالجة الأسمت
للأعلى	من المحتمل أن تكون أكثر تكلفة	غير متوفر	غير متوفر	غير متوفر.	الاستخلاص المعزز للنفط CO <sub>2</sub> ⇨

\* دولار أمريكي لكل طن من المنتج؛ \* ملخص، استقصاء آراء الخبراء وحكم مجموعة المؤلفين

كما تمت الإشارة في دراسة مثيرة للاهتمام إلى أن تركيز العديد من مخرجات الأبحاث السابقة كان على التحديات التقنية والاقتصادية التي تؤثر على جدوى تقنيات التقاط  $CO_2$  وتخزينه الفردية (Storrs et al., 2023). وتم إيلاء اهتمام أقل لتحديات انتشار التقنيات المتعددة التخصصات والأمور غير التقنية والتي لم يتم استكشافها بعد. وحدد البحث التحديات التي تواجه CCUS وصنف العوامل إلى عوامل اقتصادية واجتماعية وتكنولوجية ومؤسسية وبيئية وتنظيمية. ونظراً للنضج المتزايد لتقنيات التقاط  $CO_2$  وتخزينه، سيتم التحول من العرض الفني والاختبار إلى التنفيذ في العقود القادمة. وخلص الباحثون إلى أن الخبرات المكتسبة من تنفيذ المزيد من المشاريع وتقييم ورصد آثارها قد أسهم في تحسين فهم الجدوى وكذلك تطبيق أطر الجدوى في الممارسة العملية.

يعكس الاستعراض الموجز للمنشورات المتعلقة باقتصاديات CCUS بوضوح التقدم الذي أحرزته الـ CCUS نحو مرحلة تكنولوجية متقدمة باتجاه الانتشار المتسارع. وتتميز الدراسات الحديثة بالتنشيد على الحاجة إلى نهج تقييمي شامل يوازن بين الجدوى الاقتصادية والمنافع الاجتماعية والبيئية التي يمكن تأمينها. كما تؤكد الدراسات على ضرورة تأمين تمويل سليم يوازن بين التكاليف والإيرادات من خلال التركيز على مواقع الاستخدام المحتملة. وهذا يتماشى مع الاتجاهات الحديثة بين الاقتصاديين لتجنب تقديم الدعم المالي والحد من استخدامه كأداة لتسهيل التغلب على العقبات المؤقتة من خلال برامج الحوافز. ويمكن أيضاً ملاحظة التقدم المتسارع في توجهات زيادة تبادل المعرفة التي تعكسها الزيادة في عدد المنظمات التابعة لمختلف أصحاب المصلحة المعنيين بعمليات التقاط  $CO_2$  وتخزينه، وهو ما تمت الإشارة إليه في قسم سابق من هذه الدراسة.

#### 4.10. أسواق الكربون

يشير مصطلح "أسواق الكربون" إلى تجارة أرصدة الكربون بين الأطراف ذات العلاقة لتحفيز الاستثمارات في البنية التحتية لالتقاط وتخزين الكربون وتمكين المسارات الأقل تكلفة لتحقيق أهداف خفض الانبعاثات. وقد تم إطلاقها كآلية في إطار اتفاقية كيوتو للتنمية النظيفة (CDM) لتسريع وتسهيل الامتثال للاتفاقية. وفي إطار هذه الآلية، إذا قامت شركة أو كيان بتخفيض انبعاثاتها إلى ما دون الحد الذي حددته هيئة تنظيمية، فيمكن تداول البدلات غير المستخدمة مع شركات أو كيانات أخرى تتطلب بدلات إضافية. ويتم تحديد سعر البدلات من قبل السوق، لذلك يمكن للشركات التي لديها انبعاثات اختيار النهج الأكثر فعالية من حيث التكلفة بين شراء البدلات أو الاستثمار في التكنولوجيات والمنشآت للحد من انبعاثاتها. ويتم تنظيم السوق إلى حد ما من قبل الحكومات من خلال تحديد حدود للانبعاثات وإدارة البدلات لتحقيق أهداف الانبعاثات الأكثر طموحاً على مستوى الدولة. وعادةً، تقوم الدولة بإنشاء نظام

تداول الانبعاثات (ETS) لمراقبة السوق وإنفاذ اللوائح. وقد ارتفع عدد هذه الأنظمة إلى أكثر من 45 نظاماً نشطاً أو قيد التطوير أو في مرحلة التخطيط. ومن المتوقع أن يصل حجم سوق الكربون إلى نحو 50-100 مليار دولار أمريكي سنوياً بحلول عام 2030، مدفوعاً بالتزامات صافي صفر انبعاثات من القطاع الخاص. ويتم التداول ضمن أسواق الكربون الطوعية (VCM) التي أنشأتها منظمات خاصة. وتتيح أنظمة VCM للمستثمرين والحكومات والمنظمات غير الحكومية والشركات شراء تعويضات الكربون، والتي تسمى تخفيضات الانبعاثات المؤكدة (VERs)، من مطوري المشاريع وأطراف ثالثة أخرى وبعد التحقق من هذه التخفيضات يتم إدراج المشروع في سجل VCM والذي يتتبع الـ VERs والاتجار بها (GCCSI, 2022a).

ومنذ انتهاء صلاحية آلية كيو توك للتنمية النظيفة في عام 2020، تم استبدالها بالمادة 6 من اتفاق باريس بشأن آلية التنمية المستدامة (SDM). ولأخصت الاختلافات الرئيسية بين الآليتين (SDM و CDM) في الجدول 9.10. وما زالت المعايير والقواعد والإجراءات الخاصة بـ SDM قيد التطوير حالياً. وتتعاون اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ مع الأطراف الأخرى، بما في ذلك شبكة حلول التنمية المستدامة التابعة للأمم المتحدة، لوضع إرشادات تسمح لأصحاب المصلحة "بالتقييم والإبلاغ بشفافية وبشكل مستقل عن تأثير مبادراتهم المناخية ومساهماتهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة". والهدف من ذلك هو تشجيع المشاريع التي من شأنها تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة وفي الوقت نفسه تحقيق تقدم كبير نحو تحقيق أهداف التنمية المستدامة السبعة عشر للأمم المتحدة (Pechman et al., 2022).

ومن المحتمل أن تعالج آلية التنمية المستدامة عدداً من التحديات والعقبات التي تمت مواجهتها في تنفيذ آلية التنمية النظيفة. ومن المتوقع أن يؤدي ذلك إلى زيادة التنسيق بين الحكومات والقطاع الخاص لمواءمة منهجيات المشروع وتمكين الدول من التجارة مع بعضها البعض لتحقيق مساهماتها المحددة وطنياً، ومما لا شك فيه سيسهم ذلك في اقتصاد ونمو الـ CCUS.

## الجدول 9.10. مقارنة أطر سياسات تعويض الانبعاثات بموجب بروتوكول كيوتو واتفاق باريس

(Pechman et al., 2022)

اتفاقية باريس آلية التنمية المستدامة SDM	بروتوكول كيوتو آلية التنمية النظيفة CDM
يجب أن تساهم التعويضات في التخفيضات الإجمالية للانبعاثات أو التخفيف منها	تعمل التعويضات على تحويل الانبعاثات، ولكنها لا تقلل منها
يتم أخذ أهداف التخفيف الخاصة بالدول والتقدم الذي أحرزته بمرور الوقت في الاعتبار	ليس لدى الدول النامية أهداف خفض، ولا التزامات مستقبلية بالعمل المناخي
يجب أن تدعم الحوافز طموحات الدول في مجال العمل المناخي وتشجع تنفيذ السياسات الصديقة للمناخ	خلق حوافز لمواصلة العمل كالمعتاد، وفي بعض الحالات زيادة الانبعاثات من أجل دفع ثمنها للحد منها
يجب أن تعكس الاعتمادات وتعزز التقنيات والسياسات المخفضة للانبعاثات	تمت الموافقة على الاعتمادات للعديد من المشاريع غير الإضافية
يجب أن تساهم التعويضات في: (1) التخفيف الحقيقي والقابل للقياس وطويل الأمد و(2) التنمية المستدامة التي تساهم في الابتعاد عن الاعتماد على الوقود الأحفوري	قدمت التعويضات مساهمات مشكوك فيها نحو التنمية المستدامة، وفي بعض الأحيان أدت إلى تقييد استخدام الوقود الأحفوري

## الفصل 11 - الوقود من الكتلة الحيوية والنفايات

- 11.1. مقدمة حول الكتلة الحيوية واستخدام النفايات
- 11.2. الوقود والمواد الكيميائية من الكتلة الحيوية
  - 11.2.1. الطحالب كمادة خام للوقود الحيوي
  - 11.2.2. إنتاج الكتلة الحيوية للطحالب ومعالجتها إلى المنتجات النهائية
- 11.3. تقنيات إعادة تدوير النفايات البلاستيكية

### 1.11. مقدمة حول الكتلة الحيوية واستخدام النفايات

ركزت الفصول السابقة على المصادر الحالية لإنبعاثات الغازات الدفيئة ومحاولات الحد منها عبر التقاطها. وفي هذا الفصل، سيتم تناول مشكلة ظاهرة الاحتباس الحراري من جانب العرض من خلال تطوير إمدادات الطاقة المستدامة التي لها تأثير ضئيل على البيئة. ففي الفصل الأول، قمنا بمراجعة موجزة لتوجهات إمدادات الطاقة الرئيسية النشطة حالياً. ولوحظ أن الوقود الحيوي يعد من مصادر الطاقة المتجددة التي تلعب دوراً كأحد مصادر الإمداد. وتتبع أهمية هذا الوقود كون لديه كثافة طاقة عالية مماثلة للوقود الأحفوري، والتي يمكن أن تمكن من تخزينه بفعالية من حيث التكلفة لتلبية احتياجات توليد الطاقة الكهربائية ذات الحمل الأساسي، فضلاً عن احتياجات بعض تطبيقات الطاقة العالية.

ويُركز هذا الفصل على الوقود الحيوي والنفايات كمواد خام لها دور محتمل في تلبية متطلبات الطاقة العالمية ضمن التحول الحالي للطاقة وهدفها المتمثل في تحويل الطاقة نحو انبعاثات صفرية. ويعود مفهوم استخدام الكتلة الحيوية كمصدر للطاقة إلى احتياجات البشر المبكرة للطاقة، وقد بدأ استخدامها لإنتاج وقود يلبي متطلبات الطاقة الحديثة كبديل لمصادر الوقود الأحفوري التقليدية في السبعينيات من القرن الماضي، كما بدأ استخدام النفايات البلاستيكية كمواد خام لتلبية مجموعة متنوعة من الاحتياجات البشرية منذ بضعة عقود بعد إدراك الأثر البيئي السلبي لهذه النفايات بسبب الثبات العالي للمواد البلاستيكية. وعند مراجعة هذين المجالين، أُخذت أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة (SDGs) في الاعتبار، وخاصةً فيما يتعلق بتوافر بعض الموارد داخل دول المنطقة العربية فيما يتعلق بالوقود الحيوي والنفايات. وترتبط أهداف التنمية المستدامة ذات الصلة بالغذاء والمياه والطاقة والعمل المناخي والحياة على الأرض مع بعضها البعض، كما هي مبينة في الشكل 1.11.

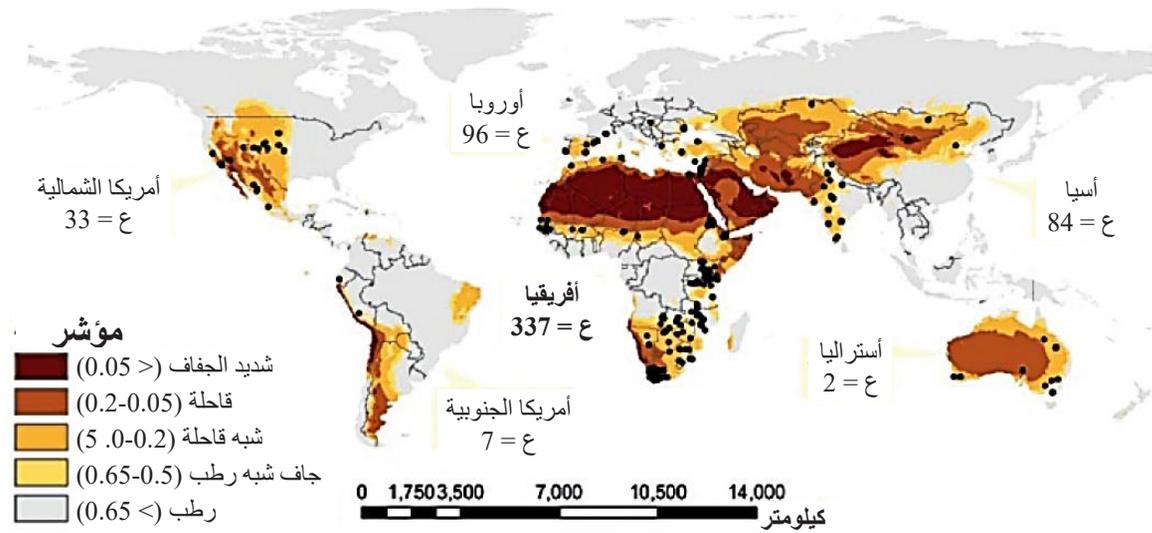
ومن الضروري التنويه أولاً أن المنطقة العربية تتميز بأنها منطقة تتراوح ما بين كونها منطقة شديدة الجفاف إلى منطقة قاحلة مع انخفاض شديد في هطول الأمطار كما هو مبين في الشكل 2.11. والموارد المائية محدودة في معظم دول المنطقة، ولا تلبى الموارد المائية المتوفرة في العديد من الدول الهدف 6 من أهداف التنمية المستدامة. ومن ثمة ولتحقيق هذا الهدف، كان هناك اعتماد متزايد على تحلية مياه البحر لدعم احتياجات السكان. كما أن الأراضي الزراعية محدودة وتتطلب جهوداً تنموية كبيرة لتمكين دول المنطقة من تحقيق الهدف 2 من أهداف التنمية المستدامة المتمثل في ارتفاع عدد السكان. ومع ذلك، تتمتع المنطقة بموارد كبيرة من الوقود الأحفوري والطاقة الشمسية، وتُتخذ بعض التدابير لمكافحة تغير المناخ من خلال تنويع مصادر الطلب على الطاقة وتبذل الجهود لحماية واستعادة النظم الإيكولوجية الأرضية. وقد نستوضح من هذه الخلفية القصيرة أن المنطقة لا تستطيع دعم تطوير الوقود

الحيوي في نفس الاتجاه مثل العديد من مناطق العالم الأخرى. ومن هنا لا بد من توجيه الجهود أولاً لتحديد الخيارات الأفضل لدول المنطقة التي تمكنها من الاستفادة من التقدم التكنولوجي الذي يتم تحقيقه.



بحارثة أوريك  
البحث الفائر

الشكل 1.11. أهداف التنمية المستدامة المرجح تأثرها بالوقود الحيوي والنفائات.



الشكل 2.11. خريطة العالم المتعلقة بالجفاف والتي تشير إلى المناطق شديدة الجفاف والقاحلة وشبه القاحلة والجافة شبه الرطبة (ع = عدد المواقع التي تم جمع بيانات منها) (المصدر: Schild, 2019).

اما فيما يتعلق بموضوع استخدام النفايات، فيجب على المنطقة أن تتخذ مبادرات لاستكشاف وتطوير وتنفيذ التقنيات التي تمكنها من إدارة المشاكل المرتبطة بالنفايات بشكل أفضل. ويمكن نشر بعض التقنيات المتاحة لإنتاج المنتجات التي تحتاجها المنطقة، وفي الوقت نفسه تقليل أو إزالة مكبات النفايات التي يمكن أن تؤدي إلى استخدام أفضل للأراضي وفقاً للهدف 15 من أهداف التنمية المستدامة. وفي الأقسام التالية، سيتم استعراض حالة الوقود الحيوي وتقنيات إعادة تدوير النفايات بإيجاز. وسيكون التركيز على التقنيات التي يمكن أن تكون مفيدة للمنطقة.

## 2.11. الوقود والمواد الكيميائية من الكتلة الحيوية

استخدم الإنسان الكتلة الحيوية كأول وقود ويعود تاريخ ذلك إلى الخطوات الأولى للتطور البشري (Niele, 2005) وقد شمل ذلك استخدامه عدداً من أنواع الكتل الحيوية مثل الخشب والمخلفات الزراعية. واستمرت الكتلة الحيوية بالحفاظ على دورها كمصدر للطاقة حتى يومنا هذا في جميع أنحاء العالم في أشكالها المتعددة بما في ذلك الخشب والفحم والزيت النباتي والنفايات الزراعية أو الصناعية، لتلبية احتياجات البشر فيما يتعلق بالتدفئة والإضاءة وإعداد الطعام، وتعتبر بالنسبة لبعض المجتمعات مصدر الطاقة الوحيد المتاح. ووفقاً لبعض الأرقام، فإن 6% من إمدادات الطاقة العالمية تأتي من هذا المصدر. ومع ذلك، هناك وعي أكبر اليوم بأن حرق الكتلة الحيوية يؤثر سلباً على مصارف الكربون الطبيعية، وينبعث منها الغازات الدفيئة مما يلحق الضرر بالبيئة الطبيعية.

بدأت الاستخدامات الحديثة المبكرة للكتلة الحيوية كوقود لتشغيل المحركات والسيارات في القرن التاسع عشر مع بداية الثورة الصناعية. وكان الجيل الأول عبارة عن وقود مشتق من المحاصيل الغذائية مثل قصب السكر والذرة. وفي القرن الماضي، اكتسبت منتجات مثل الإيثانول ووقود الديزل الحيوي شهرة في السبعينيات والثمانينيات كوقود بديل. وكان التحدي الرئيسي هو أن هذه المنتجات تتنافس على الأراضي الزراعية مع إنتاج الغذاء. ونتيجةً لذلك، بُذلت جهود للاستفادة من النباتات غير الصالحة للأكل، مثل النباتات الشبيهة بالأعشاب ومخلفات الزراعة والغابات. وعلى الرغم من أن هذه المواد الأولية ليست صالحة للأكل إلا أن بعضها يُستخدم كغذاء للماشية، بينما يساهم استخدام جزء منها في تدهور الأراضي ويتطلب كميات كبيرة من المياه. وأدى ذلك إلى تطوير وقود الكتلة الحيوية المعتمدة على الطحالب وعلى النفايات كمواد خام. ويتم حالياً تسويق مجموعة من أنواع الوقود الحيوي مثل الجازولين الحيوي، والديزل الحيوي، والكيروسين الحيوي النفاث. وعلى الرغم من الجهود المبذولة، يُقدر الطلب على الوقود الحيوي في عام 2021 بنحو 4 إكساجول (IEA, 2022a)، وهو أقل من 1% من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة (IEA, 2021c). وعلى مدى السنوات القليلة الماضية، كان

الوقود الحيوي موضوعاً للعديد من الأوراق العلمية بما في ذلك أوراق مراجعة (Jafri et al., 2022; Jeswani et al., 2020; Lundquist et al., 2010; NASEM, 2019; Saad et al., 2019; Stafford et al., 2017; Vaillant, 2020; Velvizhi et al., 2023). وواضح من أعداد الأوراق أن هناك حماساً قوياً بشأن تطوير الوقود الحيوي خلال العقدين الماضيين كما يتجلى ذلك في جهود شركات النفط والغاز الرائدة، مثل إكسون موبيل (ExxonMobil, 2023)، وريلاينس إندستريز (Reliance-Industries, 2023)، وشيفرون (Chevron, 2023)، وشركة توتال للطاقة (TotalEnergies, 2023)، وشركة BP (BP, 2023)، وشركة إيكوينور (Equinor, 2023).

ويبدو أن الدافع الرئيسي لمعظم هذه التطورات اللوائح التي تتطلب مزج الوقود الأحفوري التقليدي مع الوقود الحيوي. ولجأت بعض الشركات في الآونة الأخيرة إلى الاستحواذ على منتجين معروفين للجيل الأول من الوقود الحيوي، كما تبين أيضاً أن تطوير وقود حيوي يعتمد على المنتجات الزراعية غير الغذائية أو الطحالب يتطلب بحثاً متعمقاً ويعتمد على مدى استثمارها في أجيال جديدة من المنتجات الحيوية، وقد بذلت كل من إكسون موبيل وريلاينس جهوداً حثيثة في هذا الاتجاه. وأشارت الوكالة الدولية للطاقة في تقرير التتبع الخاص بها بشأن الوقود الحيوي إلى أن التقدم في مجال الوقود الحيوي لا يسير في المسار المأمول لتحقيق أهداف عام 2030 (IEA, 2022a). وعلى الرغم من أن الوقود الحيوي يمكن أن يساعد في التخفيف من تغير المناخ عن طريق تخفيض انبعاثات الكربون، إلا أنه يبدو أن تسريع نمو دور الوقود الحيوي يعاني من المشكلات التالية التي قام بتحديد الباحثين ستافورد وآخرون (Stafford et al., 2017):

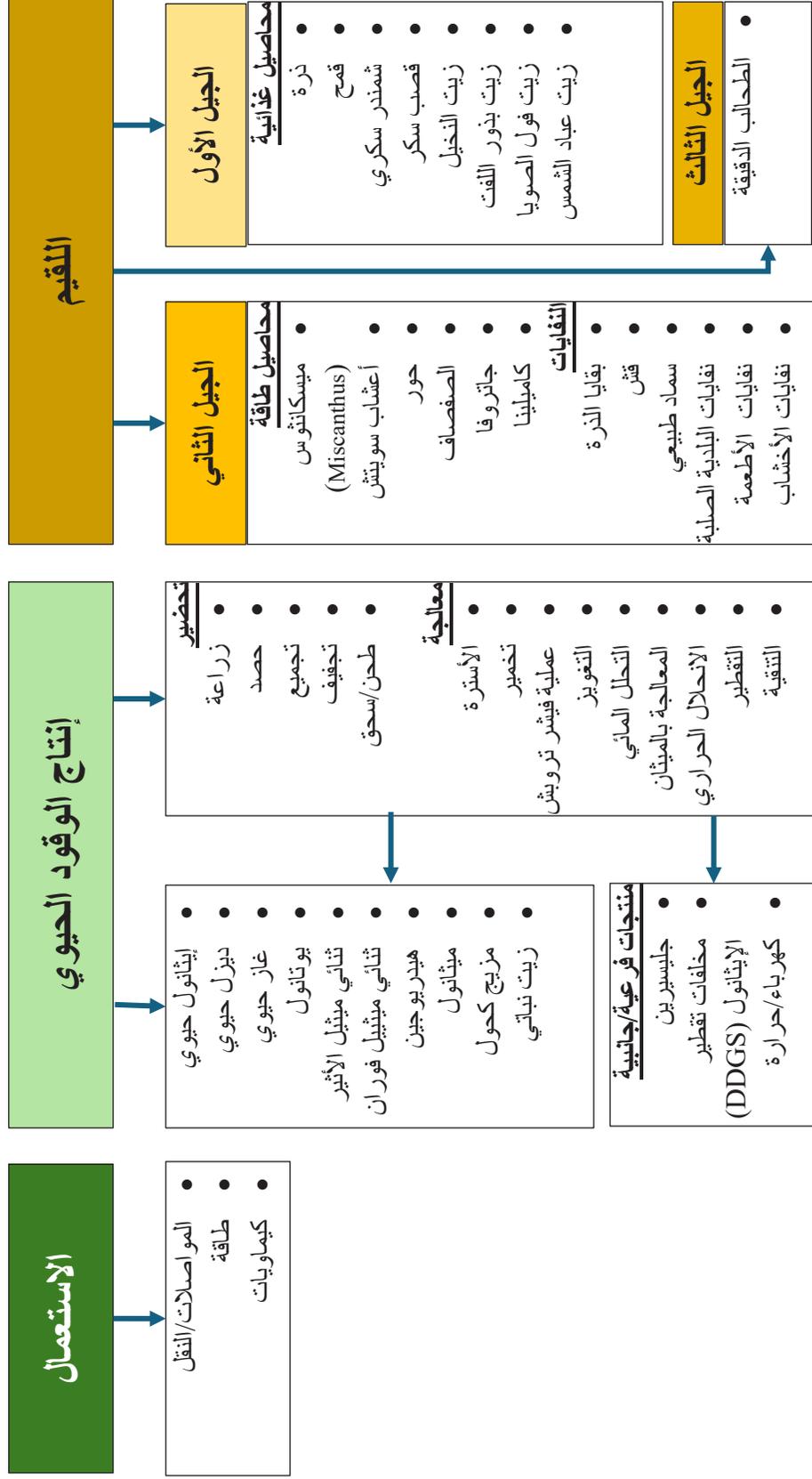
- يستخدم الوقود الحيوي التجاري الحالي المحاصيل الغذائية والسماد ومخلفات المحاصيل ومخلفات الطعام لإنتاج الإيثانول والديزل الحيوي والميثان الحيوي وذلك من خلال استخدام تقنيات الجيل الأول. ويوفر الوقود الحيوي الحالي ما نسبته 20-80% من انبعاثات الكربون مقارنةً بانبعاثات الوقود الأحفوري. ولا تزال التقنيات الأخرى المستجدة لإنتاج الوقود الحيوي من الجيل الأول في مراحل مختلفة من البحث والتطوير.
- تكنولوجيايات الجيل الثاني والثالث التي تستخدم المكونات غير الغذائية للكتلة الحيوية سوف تعطي إنتاجية أفضل للوقود الحيوي وتتفوق في الأداء على تكنولوجيايات الجيل الأول. ومع ذلك، فهي لا تزال عند مستويات جاهزية تكنولوجية (TRL) منخفضة، وهي في الوقت الحالي ليست قادرة على المنافسة من حيث التكلفة كما أن فوائدها غير مؤكدة. وربما تكون النفايات وبقايا الكتلة الحيوية هي أفضل المواد الخام، إلا أن كمياتها المعروضة محدودة نسبياً.

- يعتبر استخدام مسارات تحويل الوقود الحيوي المتقدمة التي تعتمد على الليجنوسليلوز منهجاً يتيح توفير قدرأ أكبر من الكربون، ولكن بما أن هذه المسارات لم يتم تحديدها بعد بشكل كافٍ، فإن الفوائد المرجوة لا يمكن تأكيدها إلى الآن.
- تعد معظم أنواع الوقود الحيوي في الوقت الحالي أكثر تكلفةً من نظيراتها النفطية، وسيؤثر مدى انتشار الوقود الحيوي في السوق بالسياسات المعتمدة بالإضافة إلى تكاليف المواد الأولية التي تمثل 40-60% من إجمالي التكاليف.
- يتطلب تطوير الوقود الحيوي تقيماً دقيقاً وإصدار شهادات لسلسلة التوريد ودورة حياة الوقود الحيوي.
- الحجم المحدود للأراضي الخصبة المتاحة للزراعة يُشكل مصدر قلق عالمي، واستخدام هذه الأراضي لإنتاج الوقود الحيوي يتنافس مع استخدامها لإنتاج الغذاء ومنتجات الكتلة الحيوية القِيمة الأخرى (كالأعلاف والأخشاب وبعض المواد الكيميائية الخصوصية والألياف وإنتاج المنسوجات)، وبالتالي يؤثر على هدف التنمية المستدامة 2 وربما الهدف 15 من أهداف التنمية المستدامة.
- تعتمد فوائد الوقود الحيوي على المادة الأولية المستخدمة ومسار التحويل والسياق المحلي. وبالرغم من المشاكل المذكورة أعلاه، تجدر الإشارة إلى أن العديد من التقنيات وصلت بالفعل إلى مرحلة عالية من الجاهزية التكنولوجية كما هو موضح في الجدول 1.11. وفي رأينا أن التنوع الكبير في المواد الأولية والعمليات والمنتجات التي هي قيد الدراسة كما هو موضح في الشكل 3.11، سيؤثر على تقدم مزيد من التقنيات نحو النضج ومع الأخذ في الاعتبار القضايا المذكورة أعلاه، وأهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة، والقيود المفروضة على موارد المياه والأراضي الزراعية الحالية في المنطقة العربية، يبدو أن المنطقة العربية ليس لديها الامكانيات المطلوبة لتصبح فاعلة ومؤثرة في إنتاج الوقود الحيوي. وفي مراجعتنا، يبدو أن الفرص الوحيدة المتاحة في هذا المجال لدول المنطقة هي الوقود المعتمد على الطحالب والنفائات، والذي سيتم عرضه بإيجاز في الأقسام الفرعية التالية.

الجدول 1.11. عمليات وقود حيوي مختارة والشركات المطورة لها ومستويات جاهزية التكنولوجيا (TRLs) (NASEM, 2019)

TRL	الشركة المطورة	المنتجات	العملية	اللقيم
6	PNNL/Genifuels	هيدروكربونات سائلة	التسييل الحراري المائي	الطحالب
6	KIIT	الإيثانول	تخمير	
7	RIIHL	وقود الديزل الحيوي	استخراج	
10	العديد من الشركات	الميثان	الهضم اللاهوائي	السكر/النشا
8	Green Biologics	البيوتانول	تخمير	
10	العديد من الشركات	الإيثانول	تخمير	
3	Virent/Shell	هيدروكربونات سائلة	إعادة التشكيل الطور المائي	
3	Virent	هيدروكربونات سائلة	إعادة التشكيل الطور المائي	النفائات العضوية
4	PNNL/Genifuels	هيدروكربونات سائلة	التسييل الحراري المائي	
10	العديد من الشركات	الميثان	الهضم اللاهوائي	
8	Enerkem & LanzaTech	الإيثانول	تغويز	
6	CRI/GTI	هيدروكربونات سائلة	التحلل المائي	
10	العديد من الشركات	الميثان	الهضم اللاهوائي	المحاصيل الزيتية/النفائات
10	العديد من الشركات	زيت نباتي	استخلاص	
10	العديد من الشركات	وقود ديزل حيوي	استخلاص	
5	Licella	وقود حيوي	التحلل المائي	الليجنو سيلولوس
10	العديد من الشركات	كريات	التكثيف	
8	Arbaflame/SINTEF	كتلة حيوية بمحتوى مائي منخفض	تقليص الماء من الكتلة الحيوية	
9	العديد من الشركات	الميثان	الهضم اللاهوائي	
9	Green Biologics	البيوتانول	تخمير	
10	العديد من الشركات	الإيثانول	تخمير	
10	العديد من الشركات	الفحم والفحم الحيوي	الانحلال الحراري	
5	العديد من الشركات	هيدروكربونات سائلة	الانحلال الحراري	
8	CRI/GTI	هيدروكربونات سائلة	التحلل المائي	
7	العديد من الشركات	هيدروكربونات سائلة	تغويز	

ملاحظة: CRI، شركة CRI Catalyst من مجموعة Shell؛ GTI، معهد تكنولوجيا الغاز؛ KIIT، المعهد الكوري للتكنولوجيا الصناعية؛ PNNL، المختبر الوطني لشمال غرب المحيط الهادئ؛ RIIHL، ريلانس للاستثمارات الصناعية والقابضة المحدودة.



الشكل 3.11. نظرة عامة على المواد الأولية وعمليات الإنتاج لمختلف أنواع الوقود الحيوي (المصدر: Jeswani et al., 2020 = DDGS = حبوب التقطير الداكنة مع المواد الصلبة، وهي منتج ثانوي للمعالجة).

### 1.2.11. الطحالب كمادة خام للوقود الحيوي

الطحالب الدقيقة هي كائنات مجهرية تقوم بالتمثيل الضوئي وقادرة على النمو في نطاق واسع من البيئات المائية والبرية. وهناك ما لا يقل عن 70,000 نوع من الطحالب التي تم تحديدها وتسميتها من الكائنات التي لها خلايا قادرة على النمو بمعدلات عالية جداً مقارنةً بمحاصيل البذور الزيتية الأرضية، وتحتوي على نسبة عالية من الدهون والكربوهيدرات. ومحتوى الدهون في الطحالب، أمر مهم لإنتاج وقود الديزل الحيوي وقد يصل في بعض السلالات إلى نسبة 85% من وزن الخلية الجافة. وتعتمد الطحالب الدقيقة الضوئية التي تنمو في الماء على غاز الـ CO<sub>2</sub> من الهواء وعلى المواد المغذية من الموانع المائية لإنتاج جزيئات كبيرة وصغيرة متنوعة تحت أشعة الشمس. وبالتالي يتم التركيز حالياً على متابعة تطوير طرق استزراع وتحويل الطحالب الدقيقة كمادة خام لإنتاج الخام

وتعتبر المزايا الرئيسية لاستخدام الكتلة الحيوية للطحالب كمادة أولية هي:

- إنتاجية عالية محتملة لبعض الأنواع مما قد يجعلها مصدراً رئيسياً للدهون (الزيوت) والبروتينات والكربوهيدرات.
  - يمكن استخدام كل الكتلة الحيوية للطحالب تقريباً من خلال تحويلها إلى منتجات مختلفة، بما في ذلك الوقود الحيوي والمواد الخام الحيوية.
  - يمكن لبعض الأنواع أن تنمو في المياه عالية الملوحة أو مياه الصرف الصحي مع إمكانية الاستفادة من ثاني أكسيد الكربون من الجو، مما يعالج بعض مشاكل معالجة مياه الصرف الصحي، وتحديداً إزالة ملوثات مثل مركبات الأمونيوم والنترات والفوسفات.
  - يمكن تكرير الخام الحيوي باستعمال البنية التحتية الحالية لتكرير النفط لإنتاج منتجات نهائية ضمن مواصفات أنواع الوقود النفطي الحالي.
- وقد تزايدت الجهود التعاونية في هذا المجال من خلال جمعيات واتحادات مثل الرابطة الأوروبية للكتلة الحيوية للطحالب (EABA, 2023)، ومنظمة الكتلة الحيوية للطحالب (ABO, 2023) والتحالف الوطني للوقود الحيوي المتقدم والمنتجات الحيوية (NAABB, 2023). وتركز العديد من الجهود التعاونية على تحديد وتوصيف أنواع الطحالب التي يمكن أن تكون مرشحة جيدة لإنتاج الكتلة الحيوية الخام، وخطوات المعالجة لتحويل الكتلة الحيوية الخام إلى منتجات مفيدة.

### 2.2.11. إنتاج الكتلة الحيوية للطحالب وطرق معالجتها وتحويلها إلى منتجات نهائية

يتم إنتاج الوقود الحيوي والكيمائيات الحيوية للطحالب عبر عدة خطوات كما هو ملخص في الشكل 4.11. والمرحلة الأولى هي اختيار نوع وطريقة استزراع الطحالب، ويتم التركيز على الطحالب التي

لها كتلة حيوية تحتوي على التركيب الكيميائي النهائي المطلوب. وتتطلب زراعة الطحالب عادةً ثاني أكسيد الكربون ومياه (يمكن أن تكون مياه مالحة أو مياه الصرف الصحي) ومواد مغذية (ربما من مياه الصرف الصحي) وأشعة الشمس. ويمكن إجراء الاستزراع في أحواض مفتوحة (أحياناً تكون محمية في بيوت بلاستيكية) أو في مجمعات أنبوبية شفافة، وذلك لوقاية الاستزراع من التلوث.



#### الشكل 4.11. مراحل إنتاج المنتجات النهائية للطحالب

وبمجرد حدوث نمو كافٍ للطحالب، تُحصَد الطحالب وتُجفف وتُطحن ثم تُنقل إلى موقع المعالجة إذا لم تكن داخل منشأة الاستزراع. وتخضع الكتلة الحيوية الخام للطحالب في منشآت معالجة الكتلة الحيوية لواحدة أو أكثر من خطوات المعالجة، مثل التخمر والتحلل المائي والأسترة لإنتاج كحولات أو زيوت حيوية خام جاهزة لمزيد من التكرير والتحويل وصولاً إلى منتجات نهائية. وفي مرحلة التكرير، يتم عادةً تقطير الكتلة الحيوية الخام وتنقيتها وتخضع أحياناً لخطوات تكرير اعتيادية لضبط المنتج النهائي وفقاً للمواصفات المطلوبة للمزج مع الجازولين أو وقود الطائرات أو الديزل. كما تُستخدم أحياناً منتجات المرحلة 2 مباشرةً كمادة خام للتغويز أو الانحلال الحراري لإنتاج منتجات حيوية نهائية. وبالإضافة إلى الوقود، يتم إنتاج منتجات ثانوية مثل الغليسرين والكهرباء والحرارة بشكل مشترك. وعادةً ما يتم العمل على تحسين خطوات المعالجة في المراحل 2 - 4 وفقاً لمكونات الكتلة الحيوية للطحالب، وغالباً

ما تتم مرحلة التكرير في مصفاة للبترول. ومما لا شك فيه أن تكنولوجيا الوقود الحيوي الطحلي قد تقدمت، وتم بالفعل إنجاز الكثير من العمل في جميع أنحاء العالم للوصول إلى جاهزية تكنولوجية متقدمة، كالإنجازات التي قامت بها شركة إكسون موبيل (ExxonMobil, 2023) وشركة ريلانيس (Reliance-Industries, 2023).

استناداً إلى الاستعراض الموجز أعلاه، فإن الوقود الحيوي الأكثر ملاءمةً الذي يمكن أن تنتجه المنطقة العربية هو الوقود الحيوي القائم على الطحالب، إذ تتمتع المنطقة العربية بسواحل ممتدة في معظم الدول العربية. وتمتلك معظم دول المنطقة أيضاً مواقع برية متاحة ليس لها أي استخدام حالياً، وتشمل هذه المواقع المناطق المحظورة للنفط والغاز. ويمكن استخدام هذه المواقع لإنشاء مرافق زراعة الطحالب، كما يمكن التقاط CO<sub>2</sub> المطلوب من محطات توليد الطاقة الكهربائية أو بعض المنشآت الصناعية، وعلى الرغم من أن هذا سيتنافس مع احتياجات المنطقة للـ CO<sub>2</sub> في تطبيقات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز، إلا أن الكميات المطلوبة لاستزراع الطحالب ستكون محدودة. علاوةً على ذلك، يمكن أن تساهم زراعة الطحالب في معالجة مياه الصرف الصحي مما يخفف من التأثير السلبي لهذه المياه على البيئة. كما أن هناك أيضاً إمكانية الاستفادة من المياه المالحة المتولدة في حقول النفط بسبب تحسين أنشطة استخلاص النفط باستخدام حقن المياه، وبالتالي ضرورة التعرف على الطحالب التي تتحمل الملوحة العالية ومحاولة تطوير استزراعها للاستفادة منها في إنتاج وقود حيوي يتلاءم مع متطلبات المنطقة. ومن ذلك استخدام الوقود الحيوي المنتج على المستوى الإقليمي لتلبية المتطلبات المستقبلية المحتملة لمزج الوقود الحيوي مع وقود الطيران النفطي.

يتطلب المسار لبدء مثل هذه الصناعة في المنطقة تقييماً دقيقاً وعملاً أولاً لضمان توفر أنواع الطحالب المحلية التي يمكن استخدامها لمثل هذا النشاط. وإذا كانت هناك ضرورة لاستيراد أنواع طحالب من مناطق أخرى، فيجب إجراء تقييم بيئي للتأكد من عدم وجود آثار سلبية من إدخال هذه الأنواع إلى المنطقة.

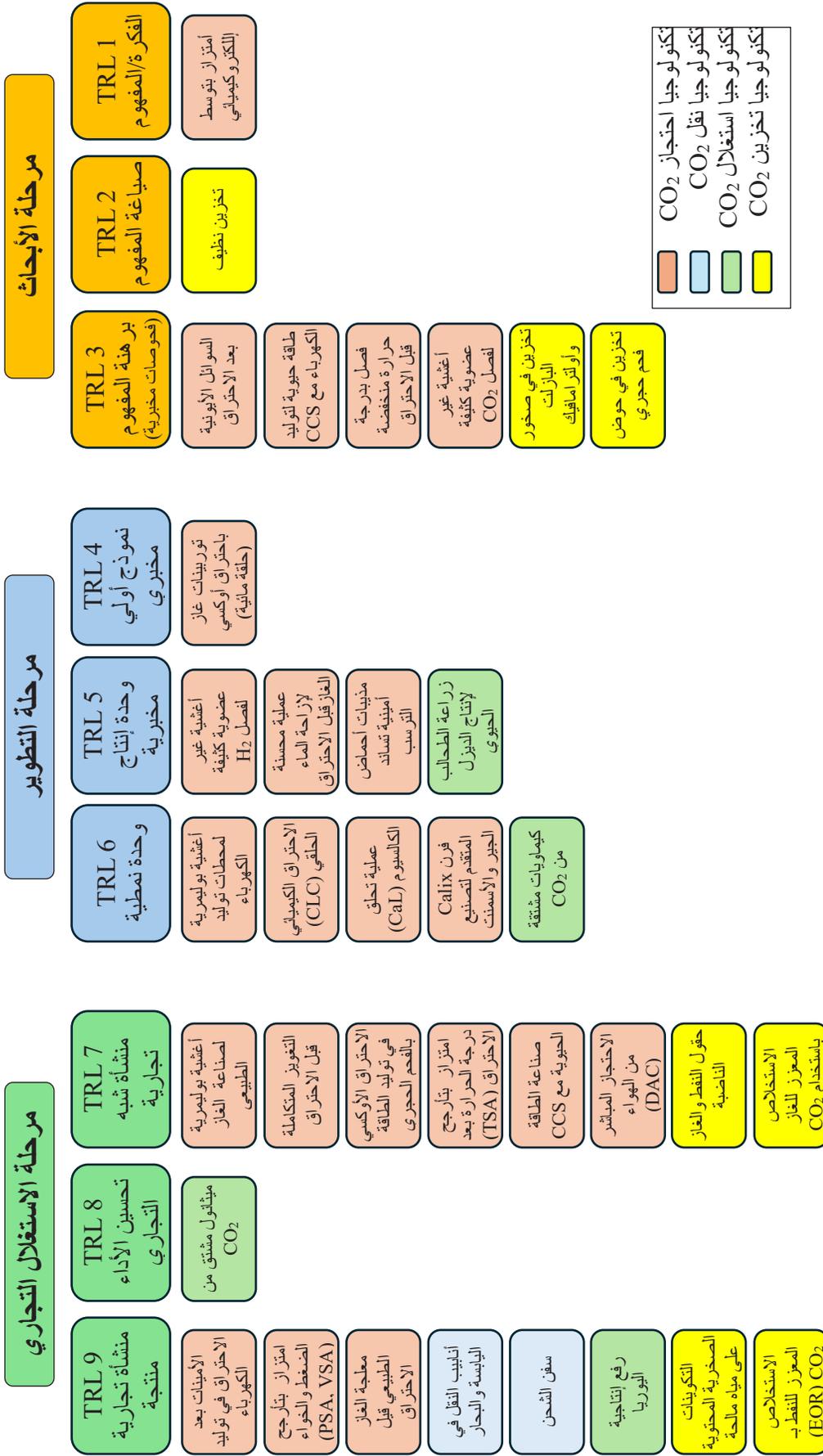
### 3.11. تقنيات إعادة تدوير النفايات البلاستيكية

تزايدت المخاوف بشأن النفايات بشكل عام، والنفايات البلاستيكية بشكل خاص خلال العقود القليلة الماضية. والسبب الرئيسي للقلق هو ثبات المواد البلاستيكية ومقاومتها للتحلل لفترات زمنية طويلة تاركةً آثاراً سلبية على النظام البيئي في جميع أنحاء العالم. أما مصدر القلق الرئيسي الثاني فهو الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والتي كشف عن تواجدها في الغلاف الجوي، وفي المياه في جميع أنحاء المحيطات، وفي الرئات البشرية، وداخل السلسلة الغذائية البشرية. ولم يتم بعد تحديد التأثير الصحي

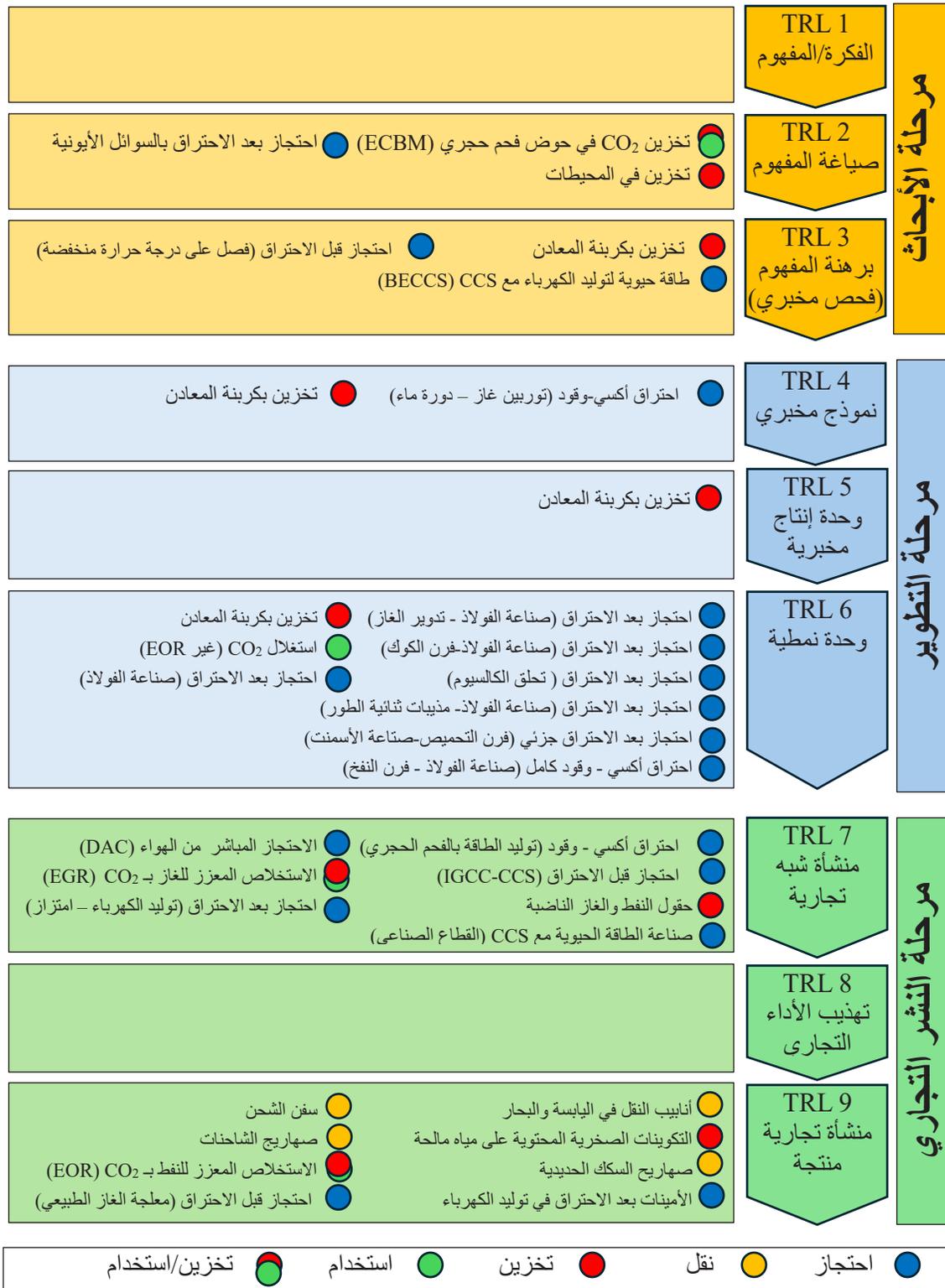
للجسيمات البلاستيكية الدقيقة، ولكن قد يكون لها تأثير على المدى البعيد. أما المسألة الثالثة فهي إمكانية إعادة استخدام البلاستيك كمواد خام لصناعة البلاستيك، وكذلك كمصدر للهيدروكربون لإنتاج الوقود. ويمكن أن يكون لإعادة تدوير البلاستيك تأثير غير مباشر على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، على الأقل من خلال تخفيض الانبعاثات الناتجة عن صناعة البتروكيماويات في إنتاج البوليمرات البكر. لقد كشف بحثنا في موضوع إعادة تدوير البلاستيك أن ارتباطه بالموضوع الرئيسي لهذا البحث وبالتحديد انبعاثات CO<sub>2</sub> والتقاط وتخزين الكربون، محدود إلى حد ما. وعلاوةً على ذلك، فقد تم مؤخراً إجراء بحث ممتاز حول هذا الموضوع ونشره أحد خبراء منظمة الأوبك مؤخراً (ياسر محمد بغدادي، 2020).

## الفصل 12 - الاستنتاجات والتوصيات

تم القيام بهذا العمل البحثي بهدف تحديد مدى تطور تكنولوجيا التقاط واستخدام وتخزين ثاني أكسيد الكربون (CCUS) وتسليط الضوء على الثغرات التي تعيق انتشار التقنيات الواعدة على نطاق أوسع. ويمكننا أن نستنتج في هذه المرحلة أن العديد من تقنيات التقاط  $CO_2$  وتخزينه متقدمة جداً من منظور مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) والنتجرات بين 6-9 لكامل سلسلة قيمة التقاط  $CO_2$  وتخزينه كما هو موضح في الشكل 1.12 والشكل 2.12 واللذان يظهران اتفاق كبير في المعلومات. ويتضح من الأرقام أن الجزء الوحيد من سلسلة القيمة الذي بلغ مرحلة النضج الكافي هو قطاع نقل ثاني أكسيد الكربون، على الرغم من أن بعض المحاور لا تزال تحتاج إلى مزيد من التطوير. كما أن العديد من التقنيات في القطاعات المتبقية من سلسلة القيمة لا تزال تتطلب جهوداً لتسويقها والتي تشمل الالتقاط والاستخدام والتخزين. وتظهر المراجعة التي أجريناها في الفصول السابقة بوضوح أن هناك جهوداً مكثفة للبحث والتطوير تم بذلها للوصول بمعظم هذه التقنيات إلى مرحلة النضج أو قريبة من النضج. وكشفت المراجعة أيضاً أن أحد الأسباب الرئيسية لبطء التقدم في التنفيذ هو التنوع الكبير في المتغيرات في المراحل المختلفة لعمليات التقاط  $CO_2$  وتخزينه. ففيما يتعلق بمرحلة الاحتجاز، تتنوع المصادر النقطية للـ  $CO_2$  بشكل كبير نظراً للتنوع الكبير في أنواع الوقود والتقنيات المستخدمة في هذه المصادر، مما يؤدي إلى إنتاج غازات مداخن بكميات ومواصفات تيارات  $CO_2$  متنوعة. وبالمثل بالنسبة للتخزين والاستخدام، فإن المكامن الجيولوجية المحتملة أو الخيارات الأخرى للتخزين والاستخدام لديها مجموعة واسعة من المتطلبات. وهناك حاجة لبناء القاعدة المعرفية المرتبطة بهذه المجالات لضمان موثوقية كل من مواقع التخزين أو الاستخدامات المختلفة. ومن ثمة، لا يزال يتعين بذل جهود كبيرة لتعديل وتكييف كل مشروع لالتقاط وتخزين الكربون وتخزينه تقريباً وفقاً لخصائص الموقع والمتطلبات التنظيمية المرتبطة بالبيئة المحيطة بالمشروع. هذا بالإضافة إلى ضرورة بذل المزيد من الجهود والدراسات لتطوير التقنيات الناشئة.



الشكل 1.12. مستوى الجاهزية التكنولوجية (TRL) لبعض تقنيات احتجاز واستغلال وتخزين الكربون (CCUS) (المصدر: Hong, 2022).



الشكل 2.12. الوضع الحالي لتقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه من منظور الجاهزية التكنولوجية (TRL). (المصدر: Bui et al., 2018; Dziejarski et al., 2023). (ملاحظة: BECCS = الطاقة الحيوية مع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه، ECBM = ميثان طبقة الفحم الحجري المعزز، IGCC = الدورة المركبة المتكاملة للتغويز، EGR = الاستخلاص المعزز للغاز، EOR = معزز استخراج النفط، NG = الغاز الطبيعي. ليس المقصود من قائمة التقنيات أن تكون شاملة.

تُظهر الاشكال 1.12 و 2.12 أن معظم تقنيات الالتقاط الناشئة والواعدة لا تزال في الغالب عند مستوى جاهزية تكنولوجية لا تزيد عن 6-7 بسبب التكلفة العالية المنسوبة إليها. وهناك تقنيتان فقط من تقنيات الالتقاط يمكن تصنيفهما على أنهما بمستوى جاهزية 9 (أي بمرحلة التسويق التجاري)، وهما الالتقاط قبل الاحتراق (معالجة الغاز الطبيعي) والالتقاط بعد الاحتراق (محطات الطاقة/الأمينات المائية) حيث كانت صناعة النفط والغاز على معرفة وخبرة معمقة بهما منذ عقود عديدة. ولا تزال التقنيات التي وصلت إلى مستوى جاهزية 6 أو 7 تتطلب المرور عبر مرحلة التصنيع أو العرض التجريبي والتحسين لتخفيض التكاليف الرأسمالية والتكاليف التشغيلية. وعلى الرغم من أن تقنيات الامتصاص الناضجة وتقنيات التبريد مع الـ PSA تُستخدم على نطاق واسع، إلا أن هناك حاجة إلى مزيد من التطوير لتناسب تطبيقاتها مع المكونات المتنوعة لغاز المداخن وخفض استهلاكها للطاقة وتكاليفها. وتعد تقنيات الالتقاط الناشئة ضمن فئات الأغشية والامتزاز واعدة جداً ولكنها لا تزال تتطلب مزيداً من التحسين لخصائص المواد لتمكين استخدامها للالتقاط من مصادر مختلفة لقاط  $CO_2$  وتخفيض تكاليفها.

ويبدو استخدام  $CO_2$  في الوقت الحالي كخيار جذاب للغاية للحد من انبعاثات  $CO_2$  على نطاق واسع، حيث تشمل الخيارات الاستخلاص المعزز للنفط والتمعدن والتحويل إلى وقود حيوي ومواد كيميائية. إلا إن مستوى الجاهزية التكنولوجية لخيارات الاستخدام المختلفة هي في الغالب عند مستوى لا يزيد عن 7 باستثناء الاستخلاص المعزز للنفط وعدد من خيارات استخدام  $CO_2$  التقليدية والتي يتم تسويقها واستغلالها تجارياً بالفعل. فبالنسبة لعملية الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون، يبدو أن هناك حاجة إلى دمج المعرفة والخبرة التي تم الحصول عليها من المشاريع التجريبية والصناعية على حد سواء ووضع بروتوكولات واضحة لتسريع عملية التقييم المطلوبة والموافقات التنظيمية، وهذا يتطلب كذلك العمل على تهيئة  $CO_2$  وطرق تحويله إلى منتجات متنوعة ذات قيمة مضافة، مما يقتضي جهوداً كبيرة في مجال البحث والتطوير وصولاً إلى مرحلة النضوج التكنولوجي.

وتلخص كذلك الاشكال 1.12 و 2.12 بعض التقنيات الواعدة التي هي في مراحل جاهزية تكنولوجية تتراوح ما بين 3 و 7/6. ومن الواضح أن هناك العديد من التقنيات الأخرى التي تم تحديدها في هذه المراجعة والتي تعد أيضاً مهمة واعدة، وتقدم هذه التقنيات إلى مرحلة النضج يحتاج استثمارات مالية كبيرة ودعم حكومي واهتمام من مختلف أصحاب المصلحة.

وأخيراً، ووفقاً للـ GCCSI (GCCSI, 2022a)، فإن الوقت اللازم لتطوير وبناء منشأة جديدة لالتقاط وتخزين الكربون أو تعديل منشأة حالية لالتقاط وتخزين الكربون يقرب من 9 سنوات. ويوضح الشكل 3.12 مخطط زمني للمهام المطلوبة (GANT Chart) لإستكمال المشروع بدءاً من الفكرة إلى مرحلة

البدء بالتشغيل. وحتى الآن، فإن المهام الأطول تطلباً للوقت هي استكمال عمليات تقييم الأثر البيئي، بالإضافة إلى الحصول على الموافقات للتخزين الجيولوجي لـ CO<sub>2</sub> من الجهات التنظيمية في حالة وجود لوائح تنظيمية. وتشمل المهام الأخرى التي تتطلب وقتاً طويلاً دراسات الجدوى والاتفاقيات التجارية والهندسة التفصيلية والإنشاءات. ومن الواضح أن هناك حاجة واضحة وملحة لتطوير وتحسين وتقدير أمد العملية.

يؤدي البحث المقدم في هذه الوثيقة إلى عدة توصيات لدعم وتسريع تطوير وتسويق تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. وفيما يلي رأينا في الإجراءات المطلوبة:

1. يتطلب حجم التحديات التي تواجهها تقنيات التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه التعاون بين جميع أصحاب المصلحة المختلفين، بما في ذلك الجهات المرتبطة بجوانب العرض والطلب على الوقود الأحفوري بالإضافة إلى السلطات التنظيمية البيئية. وعلى الرغم من وجود العديد من الجمعيات الدولية بالفعل، إلا أن العضوية في هذه الجمعيات تحتاج إلى التوسع والتنوع. علاوةً على ذلك، ينبغي تعزيز التفاعل وتبادل المعرفة بين الجهات والجمعيات المختلفة النشطة حالياً في جميع أنحاء العالم.
2. ينبغي تنسيق الأنظمة البيئية في جميع أنحاء العالم للتأكد من أن الـ CO<sub>2</sub> المنتج من مصادر مختلفة يلبي مواصفات معينة مطلوبة للتخزين والاستخدام. وقد أصبحت هذه القضية أساسية، مع الأخذ في الاعتبار اتجاه الجهود الرامية إلى تحويل CO<sub>2</sub> إلى سلعة كيميائية للاستخدام أو إلى سلعة مشتركة لتحسين خيارات التخزين الفعالة من حيث التكلفة.
3. تحتاج صناعة الوقود الأحفوري إلى تطوير خطط وتوجهات أفضل يمكن أن تساعد في تحديد أولويات مجموعة متنوعة من جهود التطوير التكنولوجي التي تجري في مؤسسات مختلفة في جميع أنحاء العالم.
4. ينبغي بذل الجهود لتحسين الجدول الزمني المطلوب لتنفيذ مشاريع التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه. ويتوجب اختصار المتطلبات الزمنية الحالية التي تبلغ حوالي 9 سنوات، كما هو موضح في الشكل 3.12، لضمان موثوقية الجوانب الاقتصادية والتنظيمية للمشروع، والتي تعتبر ضرورية لتأمين الموارد المالية المطلوبة.
5. هناك حاجة إلى تعزيز التعاون على المستوى الإقليمي وبين الدول العربية في مجال التقاط وتخزين الكربون. ويمكن لمنظمة أوابك أن تلعب دوراً رئيسياً في تعزيز تبادل المعرفة والوعي من خلال سلسلة مؤتمرات الطاقة العربية الحالية التي تنظمها، و/أو إطلاق سلسلة مؤتمرات جديدة متخصصة في تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه.

السنة	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ن	ن	ن	ن	ن	ن	ن	ن	ن
الموافقات									
الحصول على الموافقة باستكشاف خزان جيولوجي									
أعداد وتقديم التصريح عن خزان جيولوجي									
تقييم التأثير البيئي وأخذ الموافقات									
السماح بأعمال الحقن في خزان جيولوجي									
دراسات جيولوجية									
غربة بيانات الحوض (دراسة مكتبية)									
المراجعة الأولية للجرده									
تحديد موقع التخزين وتقييمه (جمع بيانات)									
تطوير حقل التخزين والتصميم الهندسي									
دراسات احتجاز ونقل CO <sub>2</sub>									
تحديد نطاق احتجاز ونقل CO <sub>2</sub> ودراسة جدوى أولية									
دراسات جدوى احتجاز ونقل CO <sub>2</sub>									
دراسات التصميم الهندسي المبني									
اتخاذ قرار بخصوص الاستثمار المالي									
مفاوضات تجارية مع الشركات المرشحة									
التعاقد للتنفيذ									
تنفيذ المشروع									
أعداد التفاصيل الهندسية للمشروع									
شراء المتطلبات									
تنفيذ الإنشاءات									
القيام باختبارات التشغيل الأولى									
التشغيل									

الشكل 3.12. مخطط GANT المبسط لتنفيذ مشروع CCS المعقد.

6. كما يمكن لمنظمة أوابك أن تساهم في تطوير الخبرات المطلوبة في المجالات الفنية المتنوعة المطلوبة لتطوير وانتشار تكنولوجيا التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه من خلال برامج تدريب دورية مماثلة للبرنامج الحالي "أساسيات النفط والغاز" الذي تقدمه المنظمة حالياً.
7. ينبغي للجامعات ومؤسسات البحث ومؤسسات التمويل الإقليمية أن تسترشد بتوجهات صناعة النفط والغاز لإعطاء الأولوية للعلوم والتكنولوجيا المتعلقة بالتقاط وتخزين الكربون في صميم أنشطتها. وينبغي تقديم دورات متخصصة تتعلق بالموضوع في مختلف أقسام الهندسة والعلوم والاقتصاد والعلوم البيئية لضمان تحقيق التدفق المستمر للقوى العاملة المطلوبة على مدى العقد أو العقدين القادمين. ويجب أن تتناول الدورات احتياجات جانبي العرض والطلب.
8. ونظراً لأهمية التقاط CO<sub>2</sub> وتخزينه في المنطقة، يوصى بتقديم جوائز الإنجاز والتقدير على المستويين القطري والإقليمي لتعزيز الوعي بالمجال وزيادة مستوى المساهمات الإقليمية في تطوير التكنولوجيات ذات الصلة. ويمكن لمنظمة أوابك أن تقود الجهود من خلال تقديم جائزة إقليمية يتم تقديمها خلال مؤتمرات الطاقة العربية.

9. ينبغي توسيع الاقتراحات المذكورة أعلاه للمنطقة لتشمل أنشطة وجهود مماثلة تتعلق بمواضيع رئيسية أخرى ذات صلة بتحول الطاقة الحالي، والتي تتناول وتلبي احتياجات المناطق، بما في ذلك الطاقة المتجددة والهيدروجين وتغير المناخ والطاقة والعلاقة بين المياه والبيئة، والتحكم في انبعاثات الغازات الدفيئة.

## المراجع

### المراجع العربية

أوابك، 2021. التقرير الإحصائي السنوي 2021. منظمة الأقطار العربية المصدرة للنفط (الأوابك)، دولة الكويت.  
<https://opecorg.org/Home/Publications/Reports/Annual-Statistical-report>

أوابك، 2016. حرق الغاز على الشعلة. منظمة الأقطار العربية المصدرة للنفط (الأوابك)، دولة الكويت، أغسطس 2016.

أوابك، 2019. دراسة واقع وآفاق الطاقات المتجددة والانعكاسات المحتملة على الصناعة النفطية. منظمة الأقطار العربية المصدرة للنفط (الأوابك)، دولة الكويت، نيسان/أبريل 2019.

وائل حامد عبد المعطي، 2021. إنتاج الهيدروجين ودوره في عملية تحول الطاقة. منظمة الأقطار العربية المصدرة للنفط (الأوابك)، دولة الكويت، آذار/مارس 2021.

عماد مكي، 2018. انبعاثات صناعة تكرير النفط ومصادرها وطرق معالجتها. النفط والتعاون العربي، المجلد الرابع والأربعون 2018- العدد 164، ص 7-190.

عماد مكي، 2020. ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في صناعة تكرير النفط في الدول العربية. النفط والتعاون العربي، المجلد السادس والأربعون 2020- العدد 173، ص 113-296.

عماد مكي، 2022. دور التحول الرقمي في تحسين أداء صناعة التكرير والبتروكيماويات. النفط والتعاون العربي، المجلد الثامن والأربعون 2022- العدد 180، ص 7-99.

مظفر البرازي، 2020. استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي في الدول الأعضاء في منظمة أوابك. النفط والتعاون العربي، المجلد السادس والأربعون 2020- العدد 175، ص 119-214.

ماجد عبدالله المنيف، 2019. البترول والتحويلات في نظام الطاقة العالمي. النفط والتعاون العربي، المجلد الخامس والأربعون 2019- العدد 168، ص 7-28.

محمدالسياد، 2019. تطورات اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية لتغير المناخ بعد اتفاق باريس. النفط والتعاون العربي، المجلد الخامس والأربعون 2019- العدد 168، ص 63-94.

محمد الشطي، فهد نوري وخالد المزدي، يوسف عبد الرحمن وسعاد الرضوان، ناصر العنزي وهيثم لبابيدي وسرور العنبي وأسامة الصايغ ومأمون عيسى حليبي. 2014. فرص المحافظة على الطاقة في الصناعة البترولية. قدمت في مؤتمر الطاقة العربي العاشر، أبو ظبي، دولة الإمارات العربية المتحدة، ديسمبر 21-23.

ياسر محمد بغدادي، 2020. إعادة تدوير النفايات البلاستيكية: فرص استثمارية وحلول بيئية. إدارة الشؤون الفنية، منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، يونيو/حزيران 2020، دولة الكويت.

### المراجع الإنجليزية

Aaron, C. 2014. Ocean Carbon Sequestration by Direct Injection. in: *CO2 Sequestration and Valorization*, (Eds.) M. Claudia do Rosario Vaz, E. Victor Paulo Pecanha, IntechOpen. Rijeka, pp. Ch. 3.

- Abdelaziz, O.Y., Hosny, W.M., Gadalla, M.A., Ashour, F.H., Ashour, I.A., Hulteberg, C.P. 2017. Novel process technologies for conversion of carbon dioxide from industrial flue gas streams into methanol. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **21**, 52-63.
- Abdullah, B., Abd Ghani, N.A., Vo, D.-V.N. 2017. Recent advances in dry reforming of methane over Ni-based catalysts. *Journal of Cleaner Production*, **162**, 170-185.
- ABO. 2023. The Algae Biomass Organization. <https://algaebiomass.org/>
- Abou Elmaaty, T., Abd El-Aziz, E. 2018. Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: A review. *Textile Research Journal*, **88**(10), 1184-1212.
- Abramson, E., E. Thomley, D. McFarlane. 2022. US Carbon and Hydrogen Hubs Atlas. Great Plains Institute, Minneapolis, Minnesota, USA. <https://carboncaptureready.betterenergy.org/wp-content/uploads/2023/02/DAC-Hubs-Atlas-2023.pdf>.
- Abu-Zahra, M., Sodiq, A., Feron, P. 2016. Commercial liquid absorbent-based PCC processes. *Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide*, 757-778.
- Acién Fernández, F.G., González-López, C.V., Fernández Sevilla, J.M., Molina Grima, E. 2012. Conversion of CO<sub>2</sub> into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO<sub>2</sub> removal? *Applied Microbiology and Biotechnology*, **96**(3), 577-586.
- Adams II, T.A., Hoseinzade, L., Madabhushi, P.B., Okeke, I.J. 2017. Comparison of CO<sub>2</sub> Capture Approaches for Fossil-Based Power Generation: Review and Meta-Study. *Processes*, **5**(3), 44.
- Adeniyi, O.M., Azimov, U., Burluka, A. 2018. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**, 316-335.
- Aghaie, M., Rezaei, N., Zendehboudi, S. 2018. A systematic review on CO<sub>2</sub> capture with ionic liquids: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **96**, 502-525.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hosseinpour, S. 2018. On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor. *Energy Conversion and Management*, **164**, 385-398.
- Air-Liquids. 2021. Technology Handbook. Air Liquide Engineering and Construction. <https://engineering.airliquide.com/sites/engineering/files/2022-09/technohandbook11oct.pdf>
- Akhtar, F., Andersson, L., Ogunwumi, S., Hedin, N., Bergström, L. 2014. Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders. *Journal of the European Ceramic Society*, **34**(7), 1643-1666.
- Al-Fatesh, A.S., Arafat, Y., Atia, H., Ibrahim, A.A., Ha, Q.L.M., Schneider, M., M-Pohl, M., Fakeeha, A.H. 2017. CO<sub>2</sub>-reforming of methane to produce syngas over Co-Ni/SBA-15 catalyst: Effect of support modifiers (Mg, La and Sc) on catalytic stability. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **21**, 395-404.
- Al-Shargabi, M., Davoodi, S., Wood, D.A., Rukavishnikov, V.S., Minaev, K.M. 2022. Carbon Dioxide Applications for Enhanced Oil Recovery Assisted by Nanoparticles: Recent Developments. *Acs Omega*, **7**(12), 9984-9994.

- Al-Anezi, K., Hilal, N. 2006. Effect of Carbon Dioxide in Seawater on Desalination: A Comprehensive Review. *Separation & Purification Reviews*, **35**(3), 223-247.
- Alagi, P., Ghorpade, R., Choi, Y.J., Patil, U., Kim, I., Baik, J.H., Hong, S.C. 2017. Carbon Dioxide-Based Polyols as Sustainable Feedstock of Thermoplastic Polyurethane for Corrosion-Resistant Metal Coating. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**(5), 3871-3881.
- Albo, J., Beobide, G., Castaño, P., Irabien, A. 2017. Methanol electrosynthesis from CO<sub>2</sub> at Cu<sub>2</sub>O/ZnO prompted by pyridine-based aqueous solutions. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **18**, 164-172.
- AlHumaidan, F.S., Absi Halabi, M., Rana, M.S., Vinoba, M. 2023. Blue hydrogen: Current status and future technologies. *Energy Conversion and Management*, **283**, 116840.
- Ali, A., Maqsood, K., Redza, A., Hii, K., Shariff, A.B.M., Ganguly, S. 2016. Performance enhancement using multiple cryogenic desublimation based pipeline network during dehydration and carbon capture from natural gas. *Chemical Engineering Research and Design*, **109**, 519-531.
- Ali, A., Maqsood, K., Shin, L.P., Sellappah, V., Garg, S., Shariff, A.B.M., Ganguly, S. 2018. Synthesis and mixed integer programming based optimization of cryogenic packed bed pipeline network for purification of natural gas. *Journal of Cleaner Production*, **171**, 795-810.
- Ali, A., Maqsood, K., Syahera, N., Shariff, A.B.M., Ganguly, S. 2014. Energy Minimization in Cryogenic Packed Beds during Purification of Natural Gas with High CO<sub>2</sub> Content. *Chemical Engineering & Technology*, **37**(10), 1675-1685.
- Ali, M., Sultana, R., Tahir, S., Watson, I.A., Saleem, M. 2017. Prospects of microalgal biodiesel production in Pakistan – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **80**, 1588-1596.
- Allam, R.J., Forrest, B.A., Fetvedt, J.E. 2022. Production of low pressure liquid carbon dioxide from a power production system and method, U.S. Patent 11,231,224.
- Allan, J.I., Bhandary, R.R. 2022. What's on the agenda? UN climate change negotiation agendas since 1995. *Climate Policy*, 1-11.
- Alper, E., Yuksel Orhan, O. 2017. CO<sub>2</sub> utilization: Developments in conversion processes. *Petroleum*, **3**(1), 109-126.
- Altintas, C., Avci, G., Daglar, H., Nemati Vesali Azar, A., Erucar, I., Velioglu, S., Keskin, S. 2019. An extensive comparative analysis of two MOF databases: high-throughput screening of computation-ready MOFs for CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> adsorption. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**(16), 9593-9608.
- Ampomah, W., McPherson, B., Balch, R., Grigg, R., Cather, M. 2022. Forecasting CO<sub>2</sub> Sequestration with Enhanced Oil Recovery, Vol. 15, MDPI, pp. 5930.
- Anggarani, R., Wibowo, C.S., Rulianto, D. 2014. Application of Dimethyl Ether as LPG Substitution for Household Stove. *Energy Procedia*, **47**, 227-234.
- Angunn, E., Nada, A., Gaëlle, B.-C. 2014. Evaluation of Carbon Dioxide Utilisation Concepts: A Quick and Complete Methodology. *Energy Procedia*, **63**, 8010-8016.
- Anwar, M.N., Fayyaz, A., Sohail, N.F., Khokhar, M.F., Baqar, M., Khan, W.D., Rasool, K., Rehan, M., Nizami, A.S. 2018. CO<sub>2</sub> capture and storage: A way forward for sustainable environment. *Journal of Environmental Management*, **226**, 131-144.

- Anwar, M.N., Fayyaz, A., Sohail, N.F., Khokhar, M.F., Baqar, M., Yasar, A., Rasool, K., Nazir, A., Raja, M.U.F., Rehan, M., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nizami, A.S. 2020. CO<sub>2</sub> utilization: Turning greenhouse gas into fuels and valuable products. *Journal of Environmental Management*, **260**, 110059.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., Angelini, A. 2013. The changing paradigm in CO<sub>2</sub> utilization. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **3-4**, 65-73.
- Arora, S., Prasad, R. 2016. An overview on dry reforming of methane: strategies to reduce carbonaceous deactivation of catalysts. *RSC Advances*, **6**(110), 108668-108688.
- Asgari, M., Streb, A., van der Spek, M., Queen, W., Mazzotti, M. 2021. Synergistic material and process development: Application of a metal-organic framework, Cu-TDPAT, in single-cycle hydrogen purification and CO<sub>2</sub> capture from synthesis gas. *Chemical Engineering Journal*, **414**, 128778.
- Atashin, S. 2016. Mineral Sequestration for Permanent CO<sub>2</sub> Storage. UWSpace.
- Ayodele, B.V., Mustapa, S.I., Alsaffar, M.A., Cheng, C.K. 2019. Artificial Intelligence Modelling Approach for the Prediction of CO-Rich Hydrogen Production Rate from Methane Dry Reforming. *Catalysts*, **9**(9).
- Aziz, M., Wijayanta, A.T., Nandiyanto, A.B.D. 2020. Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization, Vol. 13, pp. 3062.
- Azizi, K., Keshavarz Moraveji, M., Abedini Najafabadi, H. 2018. A review on bio-fuel production from microalgal biomass by using pyrolysis method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3046-3059.
- Babar, M., Mukhtar, A., Mubashir, M., Saqib, S., Ullah, S., Quddusi, A.H.A., Bustam, M.A., Show, P.L. 2021. Development of a novel switched packed bed process for cryogenic CO<sub>2</sub> capture from natural gas. *Process Safety and Environmental Protection*, **147**, 878-887.
- Baines, S., Consoli, C., Davies, A., Jennings, R., Lashko, E., Wright, A. 2022. CO<sub>2</sub> Storage Resource Catalogue–Cycle 3 Report. in: *Oil and Gas Climate Initiative (OGCI)*. <https://www.ogci.com/CO2-storage-resource-catalogue/>
- Baltus, R.E., Counce, R.M., Culbertson, B.H., Luo, H., DePaoli, D.W., Dai, S., Duckworth, D.C. 2005. Examination of the Potential of Ionic Liquids for Gas Separations. *Separation Science and Technology*, **40**(1-3), 525-541.
- Barrow, M., B. Buckley, T. Caldicott, T. Cumberlege, J. Hsu, S. Kaufman, K. Ramm, D. Rich, W.I Temple-Smith. 2013. Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emission (version 1.0). <https://ghgprotocol.org/scope-3-technical-calculation-guidance>.
- Barta, R.B., Groll, E.A., Ziviani, D. 2021. Review of stationary and transport CO<sub>2</sub> refrigeration and air conditioning technologies. *Applied Thermal Engineering*, **185**, 116422.
- Bataille, C., Melton, N., Jaccard, M. 2015. Policy uncertainty and diffusion of carbon capture and storage in an optimal region. *Climate Policy*, **15**(5), 565-582.
- Baufume, S., Hake, J.F., Linszen, J., Markewitz, P. 2011. Carbon capture and storage: A possible bridge to a future hydrogen infrastructure for Germany? *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**(15), 8809-8821.
- Baxter, L.L., Baxter, A., Bever, E., Burt, S., Chamberlain, S., Frankman, D., Hoeger, C., Mansfield, E., Parkinson, D., Sayre, A. 2019. Cryogenic Carbon Capture Development Final/Technical Report. Sustainable Energy Solutions, Orem, UT (United States).

- BCG. 2022. How Energy Companies Can Organize for the Low-Carbon Era, <https://www.bcg.com/publications/2022/how-energy-companies-can-implement-low-carbon-solutions>.
- Belaïssaoui, B., Le Moullec, Y., Willson, D., Favre, E. 2012. Hybrid membrane cryogenic process for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Membrane Science*, **415-416**, 424-434.
- Berghout, N. 2019. Putting CO<sub>2</sub> to Use: Creating value from emissions, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/putting-CO2-to-use>.
- Bhatia, P., Cummis, C., Brown, A., Rich, D., Draucker, L., & Lahd, H. . 2011. Corporate value chain (scope 3) accounting and reporting standard (Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard) in: *WRI & WBCSD.*, pp. 1-156. <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol-corporate-value-chain-scope-3-accounting-and-reporting-standard>.
- Bielka, P., Kuczyński, S., Nagy, S. 2023. CO<sub>2</sub> Compression and Dehydration for Transport and Geological Storage. *Energies*, **16**(4), 1804.
- Billig, E., Decker, M., Benzinger, W., Ketelsen, F., Pfeifer, P., Peters, R., Stolten, D., Thrän, D. 2019. Non-fossil CO<sub>2</sub> recycling—The technical potential for the present and future utilization for fuels in Germany. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **30**, 130-141.
- Booras, G.D.D., N. Holt, R. Schoff, and J. Wheeldon, . 2011. Engineering-Economic Evaluations of Advanced Coal Technologies with Carbon Capture and Storage. *Electric Power Research Institute (EPRI)*, June 2011. <https://www.epri.com/research/products/000000000001022025>
- Boot-Handford, M.E., Abanades, J.C., Anthony, E.J., Blunt, M.J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J.R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J.P., Haszeldine, R.S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R.T.J., Pourkashanian, M., Rochelle, G.T., Shah, N., Yao, J.G., Fennell, P.S. 2014. Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, **7**(1), 130-189.
- Borreguero, A.M., Dorado, F., Capuchino-Biezma, M., SÁnchez-Silva, L., Garcia-Vargas, J.M. 2020. Process simulation and economic feasibility assessment of the methanol production via tri-reforming using experimental kinetic equations. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(51), 26623-26636.
- Böttcher, M., Geden, O., Schenuit, F. 2023. Into the blue: The role of the ocean in climate policy. Europe needs to clarify the balance between protection and use. SWP Comment.
- Bozorgian, A. 2020. Investigation of the history of formation of gas hydrates. *Journal of Engineering in Industrial Research*, **1**(1), 1-18.
- BP. 2021. Statistical Review of World Energy 2021, 70th Edition. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- BP. 2023. Bioenergy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>
- Brandl, P., Bui, M., Hallett, J.P., Mac Dowell, N. 2021. Beyond 90% capture: Possible, but at what cost? *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **105**, 103239.

- Brea, P., Delgado, J.A., Águeda, V.I., Gutiérrez, P., Uguina, M.A. 2019. Multicomponent adsorption of H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO and CO<sub>2</sub> in zeolites NaX, CaX and MgX. Evaluation of performance in PSA cycles for hydrogen purification. *Microporous and Mesoporous Materials*, **286**, 187-198.
- Brennan, L., Owende, P. 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2), 557-577.
- Brinckerhoff, P. 2011. Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide. *Global CCS Institute*, **260**.  
<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/14026/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide.pdf>
- Brouwer, J., Feron, P., Asbroek, N. 2006. CO<sub>2</sub> Absorption Using Precipitating Amino Acids In Spray Tower. *9th International CO<sub>2</sub> Capture Network Meeting, Copenhagen, Denmark*.
- Buckingham, J., Reina, T.R., Duyar, M.S. 2022. Recent advances in carbon dioxide capture for process intensification. *Carbon Capture Science & Technology*, **2**, 100031.
- Budinis, S. 2022. Direct Air Capture: A key technology for net zero. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/78633715-15c0-44e1-81df-41123c556d57/DirectAirCapture\\_Akeytechnologyfornetzero.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/78633715-15c0-44e1-81df-41123c556d57/DirectAirCapture_Akeytechnologyfornetzero.pdf)
- Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A., Anthony, E.J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P.S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L.A., Hallett, J.P., Herzog, H.J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G.C., Matuszewski, M., Metcalfe, I.S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D.M., Rubin, E.S., Scott, S.A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J.P.M., Webley, P., Wilcox, J., Mac Dowell, N. 2018. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy and Environmental Science*, **11**(5), 1062-1176.
- Busch, A., Gensterblum, Y. 2011. CBM and CO<sub>2</sub>-ECBM related sorption processes in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, **87**(2), 49-71.
- C2ES. 2023. Carbon Capture Milestones. <https://www.c2es.org/content/carbon-capture/>
- Cabrera, G., Dickson, A., Nimubona, A.-D., Quigley, J. 2022. Carbon capture, utilisation and storage: Incentives, effects and policy. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **120**, 103756.
- Cadena, C., Anthony, J.L., Shah, J.K., Morrow, T.I., Brennecke, J.F., Maginn, E.J. 2004. Why Is CO<sub>2</sub> So Soluble in Imidazolium-Based Ionic Liquids? *Journal of the American Chemical Society*, **126**(16), 5300-5308.
- Cai, M., Palčić, A., Subramanian, V., Moldovan, S., Ersen, O., Valtchev, V., Ordonsky, V.V., Khodakov, A.Y. 2016. Direct dimethyl ether synthesis from syngas on copper-zeolite hybrid catalysts with a wide range of zeolite particle sizes. *Journal of Catalysis*, **338**, 227-238.
- Cann, D.G. 2021. Experimental exploration of cryogenic CO<sub>2</sub> capture utilising a moving bed.
- Cao, H.; Wang, X., Carbon dioxide copolymers: Emerging sustainable materials for versatile applications. *SusMat* **2021**, 1, (1), 88-104.
- Cao, X., Wang, H., Yang, K., Wu, S., Chen, Q., Bian, J. 2022. Hydrate-based CO<sub>2</sub> sequestration technology: Feasibilities, mechanisms, influencing factors, and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **219**, 111121.

- Cao, Y., Cheng, H., Ma, L., Liu, F., Liu, Z. 2012. Research Progress in the Direct Synthesis of Dimethyl Carbonate from CO<sub>2</sub> and Methanol. *Catalysis Surveys from Asia*, **16**(3), 138-147.
- Carapellucci, R., Giordano, L. 2020. Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis. *Journal of Power Sources*, **469**, 228391.
- Carpenter, A. 2012. CO<sub>2</sub> abatement in the iron and steel industry. *IEA Clean Coal Centre*, **25**, 193.
- CCE. 2020. Guide to the Circular Carbon Economy". Available at: Guide – Circular Carbon Economy. <https://www.cceguide.org/wp-content/uploads/2020/08/00-CCE-Guide-Overview.pdf>
- CCSA. 2022. CCSA. -The trade association promoting the commercial deployment of Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS). <https://www.ccsassociation.org/>.
- CCSL. 2023. Custom CO<sub>2</sub> capture technology solutions at industrial scale. <https://www.carbonclean.com/technology-licence>.
- Centi, G., Perathoner, S. 2009. Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels. *Catalysis Today*, **148**(3), 191-205.
- Chao, C., Deng, Y., Dewil, R., Baeyens, J., Fan, X. 2021. Post-combustion carbon capture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **138**, 110490.
- Chaturvedi, R., Kennedy, E., Metew, S. 2021. CO<sub>2</sub> sequestration by Allam Cycle. [https://repository.upenn.edu/cbe\\_sdr/135](https://repository.upenn.edu/cbe_sdr/135)
- Chauvy, R., De Weireld, G. 2020. CO<sub>2</sub> Utilization Technologies in Europe: A Short Review. *Energy Technology*, **8**(12), 2000627.
- Chein, R.-Y., Hsu, W.-H. 2019. Thermodynamic analysis of syngas production via chemical looping dry reforming of methane. *Energy*, **180**, 535-547.
- Chen, B., Ockwig, N.W., Millward, A.R., Contreras, D.S., Yaghi, O.M. 2005. High H<sub>2</sub> Adsorption in a Microporous Metal–Organic Framework with Open Metal Sites. *Angewandte Chemie International Edition*, **44**(30), 4745-4749.
- Chen, H., Wang, Z., Chen, X., Chen, X., Wang, L. 2017. Increasing permeability of coal seams using the phase energy of liquid carbon dioxide. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **19**, 112-119.
- Chen, J., Xu, Y., Liao, P., Wang, H., Zhou, H. 2022a. Recent Progress in Integrated CO<sub>2</sub> Capture and Conversion Process Using Dual Function Materials: A State-of-the-Art Review. *Carbon Capture Science & Technology*, **4**, 100052.
- Chen, S., Liu, J., Zhang, Q., Teng, F., McLellan, B.C. 2022b. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **167**, 112537.
- Chen, S., Soomro, A., Yu, R., Hu, J., Sun, Z., Xiang, W. 2018. Integration of chemical looping combustion and supercritical CO<sub>2</sub> cycle for combined heat and power generation with CO<sub>2</sub> capture. *Energy Conversion and Management*, **167**, 113-124.
- Chevron. 2023. Renewable Fuels and Products. <https://elsegundo.chevron.com/our-businesses/renewable-fuels-and-products>

- Chou, C.T., Chen, F.H., Huang, Y.J., Yang, H.S. 2013. Carbon Dioxide Capture and Hydrogen Purification from Synthesis Gas by Pressure Swing Adsorption. *Icheap-11: 11th International Conference on Chemical and Process Engineering, Pts 1-4*, **32**, 1855-1860.
- Chung, Y.G., Gómez-Gualdrón, D.A., Li, P., Leperi, K.T., Deria, P., Zhang, H., Vermeulen, N.A., Stoddart, J.F., You, F., Hupp, J.T., Farha, O.K., Snurr, R.Q. 2016. In silico discovery of metal-organic frameworks for precombustion CO<sub>2</sub> capture using a genetic algorithm. *Science Advances*, **2**(10), e1600909.
- CO<sub>2</sub> GeoNet. 2008. What does CO<sub>2</sub> geological storage really mean?. <http://www.CO2geonet.com/explore-ccs/>.
- Collotta, M., Champagne, P., Mabee, W., Tomasoni, G. 2018. Wastewater and waste CO<sub>2</sub> for sustainable biofuels from microalgae. *Algal Research*, **29**, 12-21.
- Cook, G., Zakkour, P. 2015. CCS deployment in the context of regional developments in meeting long-term climate change objectives, Report 2015/TR3, IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG).
- Cormos, C.C. 2011. Evaluation of power generation schemes based on hydrogen-fuelled combined cycle with carbon capture and storage (CCS). *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**(5), 3726-3738.
- Cox, M., Mokaya, R. 2017. Ultra-high surface area mesoporous carbons for colossal pre combustion CO<sub>2</sub> capture and storage as materials for hydrogen purification. *Sustainable Energy & Fuels*, **1**(6), 1414-1424.
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A. 2015. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **9**, 82-102.
- Cui, G., Wang, J., Zhang, S. 2016. Active chemisorption sites in functionalized ionic liquids for carbon capture. *Chemical Society Reviews*, **45**(15), 4307-4339.
- CURC. 2022. Carbon Utilization Research Council (CURC). <http://www.curc.net/>
- Czakiert, T., Krzywanski, J., Zylka, A., Nowak, W. 2022. Chemical Looping Combustion: A Brief Overview. *Energies*, **15**(4), 1563.
- Daglar, H., Keskin, S. 2019. High-Throughput Screening of Metal Organic Frameworks as Fillers in Mixed Matrix Membranes for Flue Gas Separation. *Advanced Theory and Simulations*, **2**(11), 1900109.
- Dalena, F., Senatore, A., Marino, A., Gordano, A., Basile, M., Basile, A. 2018. Chapter 1 - Methanol Production and Applications: An Overview. in: *Methanol*, (Eds.) A. Basile, F. Dalena, Elsevier, pp. 3-28.
- Damiani, D., Litynski, J.T., McIlvried, H.G., Vikara, D.M., Srivastava, R.D. 2012. The US department of Energy's R&D program to reduce greenhouse gas emissions through beneficial uses of carbon dioxide. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, **2**(1), 9-16.
- Daniel, T., Masini, A., Milne, C., Nourshagh, N., Iranpour, C., Xuan, J. 2022. Techno-economic Analysis of Direct Air Carbon Capture with CO<sub>2</sub> Utilisation. *Carbon Capture Science & Technology*, **2**, 100025.
- Data, O.W.i. 2022. Gas Reserves 2020.

- Data, O.W.i. 2023. Oil reserves, 2020.
- Dave, A., Dave, M., Huang, Y., Rezvani, S., Hewitt, N. 2016. Process design for CO<sub>2</sub> absorption from syngas using physical solvent DMEPEG. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **49**, 436-448.
- De Falco, M., Capocelli, M., Centi, G. 2016. Dimethyl ether production from CO<sub>2</sub> rich feedstocks in a one-step process: Thermodynamic evaluation and reactor simulation. *Chemical Engineering Journal*, **294**, 400-409.
- de Kleijne, K., Hanssen, S.V., van Dinteren, L., Huijbregts, M.A.J., van Zelm, R., de Coninck, H. 2022. Limits to Paris compatibility of CO<sub>2</sub> capture and utilization. *One Earth*, **5**(2), 168-185.
- Demir, H., Aksu, G.O., Gulbalkan, H.C., Keskin, S. 2022. MOF Membranes for CO<sub>2</sub> Capture: Past, Present and Future. *Carbon Capture Science & Technology*, **2**, 100026.
- Dhoke, C. 2021. Demonstration of Swing adsorption cluster concept (SARC) for CO<sub>2</sub> capture. *Ph. D. Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, April 2021.*
- Djinovic, P., Pintar, A. 2017. Stable and selective syngas production from dry CH<sub>4</sub>- CO<sub>2</sub> streams over supported bimetallic transition metal catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **206**, 675-682.
- DNV. 2022. Carbon Capture and Storage: an effective tool to speed-up decarbonization of Industry, <https://www.dnv.com/to2030/technology/carbon-capture-and-storage.html>.
- Dooley, J.J. 2013. Estimating the Supply and Demand for Deep Geologic CO<sub>2</sub> Storage Capacity over the Course of the 21st Century: A Meta-analysis of the Literature. *Energy Procedia*, **37**, 5141-5150.
- Du, L.C., Meng, Y.Z., Wang, S.J., Tjong, S.C. 2004. Synthesis and degradation behavior of poly(propylene carbonate) derived from carbon dioxide and propylene oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, **92**(3), 1840-1846.
- Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., Andersson, K. 2023. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, **342**, 127776.
- EABA. 2023. European Algae Biomass Association. <https://www.eaba-association.org/en/1675214263>
- ECI. 2022. Environmental Change Institute (ECI), Tracking progress to a safe climate. <https://www.globalwarmingindex.org/>.
- Eckle, S., Anfang, H.-G., Behm, R.J. 2011. Reaction Intermediates and Side Products in the Methanation of CO and CO<sub>2</sub> over Supported Ru Catalysts in H<sub>2</sub>-Rich Reformate Gases. *The Journal of Physical Chemistry C*, **115**(4), 1361-1367.
- EIA, U. 2013. Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States.
- Eide, L.I., Batum, M., Dixon, T., Elamin, Z., Graue, A., Hagen, S., Hovorka, S., Nazarian, B., Nøkleby, P.H., Olsen, G.I., Ringrose, P., Vieira, R.A.M. 2019. Enabling Large-Scale Carbon Capture, Utilisation, and Storage (CCUS) Using Offshore Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Infrastructure Developments—A Review. *Energies*, **12**(10), 1945.

- Ekström, C., Schwendig, F., Biede, O., Franco, F., Haupt, G., de Koeijer, G., Papapavlou, C., Røkke, P.E. 2009. Techno-Economic Evaluations and Benchmarking of Pre-combustion CO<sub>2</sub> Capture and Oxy-fuel Processes Developed in the European ENCAP Project. *Energy Procedia*, **1**(1), 4233-4240.
- Elizabeth Abramson, D.M., Amy Jordan, Daniel Rodriguez, Jonathan Ogland-Hand, Nathan Holwerda. 2023. An Atlas of Direct Air Capture - Opportunities for Negative Emissions in the United States., Great Plains Institute, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F. 2014. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 748-764.
- Engineering, Oil and Gas Process. 2018. Fluor Econamine FG Plus Process. <http://www.oilngasprocess.com/gas/fluor-econamine-fg-plus-process.html>
- Equinor. 2023. Equinor and CNPEM in partnership for biofuel R&D. <https://www.bnamericas.com/en/news/equinor-and-cnpeem-in-partnership-for-biofuel-rd>
- Erans, M., Sanz-Pérez, E.S., Hanak, D.P., Clulow, Z., Reiner, D.M., Mutch, G.A. 2022. Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges. *Energy & Environmental Science*, **15**(4), 1360-1405.
- ESA. 2018. Putting renewable energy on the map. European Space Agency. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Space\\_for\\_Earth/Energy/Putting\\_renewable\\_energy\\_on\\_the\\_map](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Putting_renewable_energy_on_the_map)
- Esaki, T., Kuronuma, H., Kobayashi, N. 2021. Analysis of CO<sub>2</sub> Pressure Swing Adsorption Simulation by Considering the Transport Phenomena in the Adsorber. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, **9**(3), 39-54.
- Europe., C.V. 2022. CO<sub>2</sub> Value Europe. -The non-profit association representing the Carbon Capture and Utilisation (CCU) community in Europe. <https://CO2value.eu/>.
- European-Commission. 2023. Low emissions intensity lime and cement. <https://cordis.europa.eu/project/id/654465>
- ExxonMobil. 2023. Advanced Biofuels. <https://corporate.exxonmobil.com/what-we-do/lower-emission-transportation/advanced-biofuels>
- Farajzadeh, R., Glasbergen, G., Karpan, V., Mjeni, R., Boersma, D.M., Eftekhari, A.A., Casquera Garcia, A., Bruining, J. 2022. Improved oil recovery techniques and their role in energy efficiency and reducing CO<sub>2</sub> footprint of oil production. *Journal of Cleaner Production*, **369**, 133308.
- Fariied, M., Samer, M., Abdelsalam, E., Yousef, R.S., Attia, Y.A., Ali, A.S. 2017. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 893-913.
- Farrelly, D.J., Everard, C.D., Fagan, C.C., McDonnell, K.P. 2013. Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **21**, 712-727.
- Fernandes, D., Wang, S., Xu, Q., Buss, R., Chen, D. 2019. Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit. *Clean Technologies*, **1**(1), 325-340.

- Fernandez, E.S., Goetheer, E.L. 2011. DECAB: Process development of a phase change absorption process. *Energy Procedia*, **4**, 868-875.
- Feron, P. 2016. *Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide*. Woodhead publishing.
- Flude, S.J.A. 2020. Carbon capture and storage has stalled needlessly – three reasons why fears of CO<sub>2</sub> leakage are overblown. <https://theconversation.com/carbon-capture-and-storage-has-stalled-needlessly-three-reasons-why-fears-of-co-leakage-are-overblown-130747>.
- Font-Palma, C., Cann, D., Udemu, C. 2021. Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications. *C*, **7**(3), 58.
- Frankman, D., Burt, S., Beven, E., Parkinson, D., Wagstaff, C., Roberts, W., Baxter, L. 2021. Recent cryogenic carbon capture™ field test results. *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference*. pp. 15-18.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I.T., Olsen, A., Peters, G.P. 2022. Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data Discussions*, **2022**, 1-159.
- Fujiki, J., Chowdhury, F.A., Yamada, H., Yogo, K. 2017. Highly efficient post-combustion CO<sub>2</sub> capture by low-temperature steam-aided vacuum swing adsorption using a novel polyamine-based solid sorbent. *Chemical Engineering Journal*, **307**, 273-282.
- Fuqiang, W., Lin, J., Ziming, C., Huaxu, L., Jianyu, T. 2019. Combination of thermodynamic analysis and regression analysis for steam and dry methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(30), 15795-15810.
- Gambhir, A., Tavoni, M. 2019. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*, **1**(4), 405-409.
- Gao, X., Yang, S., Hu, L., Cai, S., Wu, L., Kawi, S. 2022. Carbonaceous materials as adsorbents for CO<sub>2</sub> capture: synthesis and modification. *Carbon Capture Science & Technology*, **3**, 100039.
- Garcia-Vargas, J.M., Valverde, J.L., Diez, J., Dorado, F., Sanchez, P. 2015. Catalytic and kinetic analysis of the methane tri-reforming over a Ni<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>-SiC catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**(28), 8677-8687.
- Garcia, J.A., Villen-Guzman, M., Rodriguez-Maroto, J.M., Paz-Garcia, J.M. 2022. Technical analysis of CO<sub>2</sub> capture pathways and technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**(5), 108470.
- Garcia, L., Subramani, V., Basile, A., Veziroaylu, T.N. 2015. 4 - Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks. in: *Compendium of Hydrogen Energy*, Woodhead Publishing. Oxford, pp. 83-107.
- Gatti, M., Martelli, E., Marechal, F., Consonni, S. 2014. Review, modeling, Heat Integration, and improved schemes of Rectisol®-based processes for CO<sub>2</sub> capture. *Applied Thermal Engineering*, **70**(2), 1123-1140.
- GCCSI. 2011a. Economic assessment of carbon capture and storage technologies. Canberra, Australia: Global CCS Institute. .
- GCCSI. 2011b. Proceedings from CCS Cost Workshop. IEA, Paris, 22-23 March 2011. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/24816/20111108-proceedings-ccs-cost-workshop.pdf>.

- GCCSI. 2016. Understanding Industrial CCS Hubs and Clusters Special Report: The Global Status of CCS Institute, Melbourne.
- GCCSI. 2020. Global Storage Resource Assessment – 2019 Update 10365GLOB-Rep-01-01 June 2020. [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/07/Global-Storage-Resource-Assessment\\_-2019-Update\\_-June-2020.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/07/Global-Storage-Resource-Assessment_-2019-Update_-June-2020.pdf).
- GCCSI. 2022a. Global Status of CCS 2022, Global CCS Institute, Melbourne, Australia. <https://www.globalccsinstitute.com/>
- GCCSI. 2022b. The world's leading CCS think tank, Global CCS Institute, Melbourne, Australia. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2022/>.
- GCCSI. 2023a. Abu Dhabi CCS Project (Phase 1 being Emirates Steel Industries (ESI) CCS Project), Global CCS Institute, 2016. <https://CO2re.co/FacilityData>
- GCCSI. 2023b. Storage Indicator Database <https://CO2re.co/StorageData>.
- Ge, L., Shao, Y., Wang, Y., Zhang, G., Zhang, Z., Liu, L. 2020. Experimental research on inerting characteristics of carbon dioxide used for fire extinguishment in a large sealed space. *Process Safety and Environmental Protection*, **142**, 174-190.
- Ghiat, I., Al-Ansari, T. 2021. A review of carbon capture and utilisation as a CO<sub>2</sub> abatement opportunity within the EWF nexus. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **45**, 101432.
- Godec, M., Koperna, G., Gale, J. 2014. CO<sub>2</sub>-ECBM: A Review of its Status and Global Potential. *Energy Procedia*, **63**, 5858-5869.
- Godec, M.L. 2011. Global technology roadmap for CCS in industry sectoral assessment CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery. *United Nations Industrial Development Organization*.
- Goeppert, A., Czaun, M., Jones, J.-P., Surya Prakash, G.K., Olah, G.A. 2014. Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products - closing the loop. *Chemical Society Reviews*, **43**(23), 7995-8048.
- Graça, I., González, L.V., Bacariza, M.C., Fernandes, A., Henriques, C., Lopes, J.M., Ribeiro, M.F. 2014. CO<sub>2</sub> hydrogenation into CH<sub>4</sub> on NiHNaUSY zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, **147**, 101-110.
- Grignard, B., Gennen, S., Jérôme, C., Kleij, A.W., Detrembleur, C. 2019. Advances in the use of CO<sub>2</sub> as a renewable feedstock for the synthesis of polymers. *Chemical Society Reviews*, **48**(16), 4466-4514.
- Gunnarsson, I., Aradóttir, E.S., Oelkers, E.H., Clark, D.E., Arnarson, M.P., Sigfússon, B., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Matter, J.M., Stute, M., Júlíusson, B.M., Gíslason, S.R. 2018. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **79**, 117-126.
- Guo, J.-X. 2020. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design. *Computers & Chemical Engineering*, **132**, 106632.
- Guozhao, J., Ming, Z. 2017. Membrane Separation Technology in Carbon Capture. in: *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*, (Ed.) Y. Yongseung, IntechOpen. Rijeka, pp. Ch. 3.
- Hart, A., Gnanendran, N. 2009. Cryogenic CO<sub>2</sub> capture in natural gas. *Energy Procedia*, **1**(1), 697-706.

- Heilweck, M., Moore, D., Fears, W.B., Waldron Jr, R.P. 2023. An Assessment of the Potential Value for Climate Remediation of Ocean Calcifiers in Sequestration of Atmospheric Carbon. <https://videleaf.com/wp-content/uploads/2023/01/An-Assessment-of-the-Potential-Value-for-Climate-Remediation-of-Ocean-Calcifiers-in-Sequestration-of-Atmospheric-Carbon.pdf>.
- Hendriks, C., Graus, W., van Bergen, F. 2004. Global carbon dioxide storage potential and costs. *Ecofys, Utrecht*, **64**. [http://www.ecofys.com/files/files/ecofys\\_2004\\_globalcarbondioxidestorage.pdf](http://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2004_globalcarbondioxidestorage.pdf).
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J.C., Smith, P., Williams, C.K. 2019. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature*, **575**(7781), 87-97.
- Hills, C.D., Tripathi, N., Carey, P.J. 2020. Mineralization Technology for Carbon Capture, Utilization, and Storage. *Frontiers in Energy Research*, **8**.
- Hills, T., Leeson, D., Florin, N., Fennell, P. 2016. Carbon Capture in the Cement Industry: Technologies, Progress, and Retrofitting. *Environmental Science & Technology*, **50**(1), 368-377.
- Hoffmann, J.W., Hackett, G.A., Lewis, E.G., Chou, V.H. 2017. Derate Mitigation Options for Pulverized Coal Power Plant Carbon Capture Retrofits. *Energy Procedia*, **114**, 6465-6477.
- Hong, W.Y. 2022. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO<sub>2</sub> emissions future. *Carbon Capture Science & Technology*, **3**, 100044.
- Huang, C.-H., Tan, C.-S. 2014. A Review: CO<sub>2</sub> Utilization. *Aerosol and Air Quality Research*, **14**(2), 480-499.
- Hydrocarbon-Processing. 2012. Petrobras selects UOP technology for offshore gas processing in Brazil. <https://hydrocarbonprocessing.com/news/2012/11/petrobras-selects-uop-technology-for-offshore-gas-processing-in-brazil>.
- IAEA. 2021. IAEA Increases Projections for Nuclear Power Use in 2050. <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-increases-projections-for-nuclear-power-use-in-2050>.
- Idem, R., Tontiwachwuthikul, P., Gelowitz, D., Wilson, M. 2011. Latest research on fundamental studies of CO<sub>2</sub> capture process technologies at the international test centre for CO<sub>2</sub> capture. *Energy Procedia*, **4**, 1707-1712.
- IEA. 2015. Storing CO<sub>2</sub> through Enhanced Oil Recovery - Combining EOR with CO<sub>2</sub> storage (EOR+) for profit. International Energy Agency (IEA), Paris, France.
- IEA. 2016. 20 Years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment, Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) and International Energy Agency (IEA), Paris, France, 2016.
- IEA. 2019. Transforming Industry Through CCUS. International Energy Agency (IEA): Paris. <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>.
- IEA. 2020. Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage.
- IEA. 2021a. About CCUS, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>.

- IEA. 2021b. Is carbon capture too expensive?, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- IEA. 2021c. Key World Energy Statistics 2021, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.
- IEA. 2022a. Biofuels, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/biofuels>.
- IEA. 2022b. CO<sub>2</sub> storage resources and their development, Paris. <https://www.iea.org/reports/CO2-storage-resources-and-their-development>,
- IEA. 2022c. CO<sub>2</sub> Transport and Storage, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/CO2-transport-and-storage>,
- IEA. 2022d. Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level. International Energy Agency, Paris, France. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>,;
- IEA. 2023a. CCUS Projects Database. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>.
- IEA. 2023b. Policies Database. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/policies>
- IEAGHG. 2015. Carbon capture and storage cluster projects: review and future opportunities, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, London, UK. [https://ieaghg.org/docs/General\\_Docs/Reports/2015-03.pdf](https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2015-03.pdf).
- IEAGHG. 2022a. 2022-09 Defining the Value of Carbon Capture, Utilisation and Storage for a Low-Carbon Future. <https://ieaghg.org/ccs-resources/blog/new-ieaghg-technical-report-2022-09-defining-the-value-of-carbon-capture-utilization-and-storage-for-a-low-carbon-future>
- IEAGHG. 2022b. 2022-TR03 Quantifying the Socio-Economic Value of CCUS: A Review. <https://carbondioxide-removal.eu/2022/10/24/ieaghg-webinar-quantifying-the-socio-economic-value-of-ccus-a-review/>
- IEAGHG. 2023. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Technical Reports. <https://ieaghg.org/publications/technical-reports>
- IEF. 2023. Oceans Offer Tantalizing Carbon Capture Potential. Will it be Realized? : <https://www.ief.org/news/oceans-offer-tantalizing-carbon-capture-potential-will-it-be-realized>.
- IIGCC. 2022. Climate Investment Roadmap - A tool to help investors accelerate the energy transition through investment and engagement. The Institutional Investors Group on Climate Change, London, UK. [https://www.iigcc.org/media/2022/04/JC0426\\_IIGCC\\_Climate-Transition-Report\\_FINAL.pdf](https://www.iigcc.org/media/2022/04/JC0426_IIGCC_Climate-Transition-Report_FINAL.pdf).
- Inoue, S., Koinuma, H., Tsuruta, T. 1969. Copolymerization of carbon dioxide and epoxide with organometallic compounds. *Die Makromolekulare Chemie*, **130**(1), 210-220.
- Inventys. 2017. VeloxoThermt process, Burnaby, BC Canada, <http://inventysinc.com/> .
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Ed.) V.e.a. Masson-Delmotte, Cambridge Univ. Press, 2021. [https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)

- IPCC. 2022. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf)
- IPCC. 2023. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- IRENA. 2022. Renewable capacity highlights [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf)
- Italiano, C., Llorca, J., Pino, L., Ferraro, M., Antonucci, V., Vita, A. 2020. CO and CO<sub>2</sub> methanation over Ni catalysts supported on CeO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides. *Applied Catalysis B: Environmental*, **264**, 118494.
- Izquierdo-Ruiz, F., Otero-de-la-Roza, A., Contreras-García, J., Prieto-Ballesteros, O., Recio, J.M. 2016. Effects of the CO<sub>2</sub> Guest Molecule on the sI Clathrate Hydrate Structure. *Materials*, **9**(9), 777.
- Jafri, Y., Ahlström, J.M., Furusjö, E., Harvey, S., Pettersson, K., Svensson, E., Wetterlund, E. 2022. Double Yields and Negative Emissions? Resource, Climate and Cost Efficiencies in Biofuels With Carbon Capture, Storage and Utilization. *Frontiers in Energy Research*, **10**.
- Jang, J.G., Kim, G.M., Kim, H.J., Lee, H.K. 2016. Review on recent advances in CO<sub>2</sub> utilization and sequestration technologies in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, **127**, 762-773.
- Janzen, H.H., van Groenigen, K.J., Powlson, D.S., Schwinghamer, T., van Groenigen, J.W. 2022. Photosynthetic limits on carbon sequestration in croplands. *Geoderma*, **416**, 115810.
- Jeswani, H.K., Chilvers, A., Azapagic, A. 2020. Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*, **476**(2243), 20200351.
- Jha, A., Ravuru, V., Yadav, M., Mandal, S., Das, A. 2021. A critical analysis of CO<sub>2</sub> capture technologies. *Hydrocarbon Processing*(6), 59-65.
- Jiang, J., Rui, Z., Hazlett, R., Lu, J. 2019. An integrated technical-economic model for evaluating CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery development. *Applied Energy*, **247**, 190-211.
- Jiang, S., Li, Y., Wang, F., Sun, H., Wang, H., Yao, Z. 2022. A state-of-the-art review of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery as a promising technology to achieve carbon neutrality in China. *Environmental Research*, **210**, 112986.
- Jokar, S.M., Parvasi, P., Basile, A. 2018. The evaluation of methane mixed reforming reaction in an industrial membrane reformer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**(32), 15321-15329.
- Joss, L., Gazzani, M., Mazzotti, M. 2017. Rational design of temperature swing adsorption cycles for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Science*, **158**, 381-394.
- Kamarudin, S.K., Achmad, F., Daud, W.R.W. 2009. Overview on the application of direct methanol fuel cell (DMFC) for portable electronic devices. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**(16), 6902-6916.

- KAPSARC. 2022. Fostering Net-Zero Transition Pathways: The Role of Clean Hydrogen, <https://www.kapsarc.org/research/publications/fostering-net-zero-transition-pathways-the-role-of-clean-hydrogen/>.
- Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Aghbashlo, M., Karimi, K., Tabatabaei, M. 2019. Shifting fuel feedstock from oil wells to sea: Iran outlook and potential for biofuel production from brown macroalgae (ochrophyta; phaeophyceae). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **112**, 626-642.
- Kearns, D., Liu, H., Consoli, C. 2021. Technology readiness and costs of CCS. in: *Global CCS institute*.
- Kearns, J., Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Kheshgi, H., Chen, Y.-H.H., Paltsev, S., Herzog, H. 2017. Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO<sub>2</sub> Storage Capacity Worldwide. *Energy Procedia*, **114**, 4697-4709.
- Kelemen, P., Benson, S.M., Pilorgé, H., Psarras, P., Wilcox, J. 2019. An Overview of the Status and Challenges of CO<sub>2</sub> Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, **1**.
- Keller, N., Rebmann, G., Keller, V. 2010. Catalysts, mechanisms and industrial processes for the dimethylcarbonate synthesis. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **317**(1), 1-18.
- Keshavarz, A., Ebrahimzadeh Sarvestani, M., Rahimpour, M.R. 2019. Cryogenic CO<sub>2</sub> Capture. in: *Sustainable Agriculture Reviews 38: Carbon Sequestration Vol. 2 Materials and Chemical Methods*, (Eds.) Inamuddin, A.M. Asiri, E. Lichtfouse, Springer International Publishing. Cham, pp. 251-277.
- Kolster, C., Masnadi, M.S., Krevor, S., Mac Dowell, N., Brandt, A.R. 2017. CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery: a catalyst for gigatonne-scale carbon capture and storage deployment? *Energy & Environmental Science*, **10**(12), 2594-2608.
- Koytsoumpa, E.I., Bergins, C., Kakaras, E. 2018. The CO<sub>2</sub> economy: Review of CO<sub>2</sub> capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, **132**, 3-16.
- Kozak, C.M., Ambrose, K., Anderson, T.S. 2018. Copolymerization of carbon dioxide and epoxides by metal coordination complexes. *Coordination Chemistry Reviews*, **376**, 565-587.
- Kumar, R., Kumar, K., Choudary, N.V., Pant, K.K. 2019. Effect of support materials on the performance of Ni-based catalysts in tri-reforming of methane. *Fuel Processing Technology*, **186**, 40-52.
- Küngas, R. 2020. Review—Electrochemical CO<sub>2</sub> Reduction for CO Production: Comparison of Low- and High-Temperature Electrolysis Technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, **167**(4), 044508.
- Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W., Faaij, A. 2011. Techno-economic assessment and comparison of CO<sub>2</sub> capture technologies for industrial processes: Preliminary results for the iron and steel sector. *Energy Procedia*, **4**, 1981-1988.
- Kyoto-Protocol. 2022. What is the Kyoto Protocol? Available at: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol). Accessed on 14/10/2022.
- Lababidi, H.M.S., M. Absi Halabi, and Osama Al-Sayegh. 2015. Energy Efficiency Opportunities in Oil and Gas industries. in: *10th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems/Sustainability of Energy*

- Production and Utilization in the Persian/Arabian Gulf*, Vol. SDEWES 2015-0352. Dubrovnic, Croatia.
- Lamb, W.F., Grubb, M., Diluio, F., Minx, J.C. 2022. Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: an analysis of trends and progress by sector. *Climate Policy*, **22**(1), 1-17.
- Lamberts-Van Assche, H., Compernelle, T. 2022. Using Real Options Thinking to Value Investment Flexibility in Carbon Capture and Utilization Projects: A Review. *Sustainability*, **14**(4), 2098.
- Lebling, K., Northrop, E., McCormick, C., Bridgwater, L. 2022. Towards Responsible and Informed Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Research and Governance Priorities.
- Lee, Z.R., Quinn, L.D.J., Jones, C.W., Hayes, S.E., Dixon, D.A. 2021. Predicting the Mechanism and Products of CO<sub>2</sub> Capture by Amines in the Presence of H<sub>2</sub>O. *The Journal of Physical Chemistry A*, **125**(45), 9802-9818.
- Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., Fennell, P.S. 2017. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **61**, 71-84.
- Lelilac. 2023. Decarbonizing Cement and Lime. Available at: <https://www.leilac.com/>
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M. 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 426-443.
- Li, R., Lian, S., Zhang, Z., Song, C., Han, R., Liu, Q. 2022. Techno-economic evaluation of a novel membrane-cryogenic hybrid process for carbon capture. *Applied Thermal Engineering*, **200**, 117688.
- Li, Y., Zhang, Y.-Y., Hu, L.-F., Zhang, X.-H., Du, B.-Y., Xu, J.-T. 2018. Carbon dioxide-based copolymers with various architectures. *Progress in Polymer Science*, **82**, 120-157.
- Lin, Q., Zhang, X., Wang, T., Zheng, C., Gao, X. 2022. Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage. *Engineering*, **14**, 27-32.
- Lin, X., Jia, J., Zhao, X., Thomas, K.M., Blake, A.J., Walker, G.S., Champness, N.R., Hubberstey, P., Schröder, M. 2006. High H<sub>2</sub> Adsorption by Coordination-Framework Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, **45**(44), 7358-7364.
- Lippiatt, N., Ling, T.-C., Eggermont, S. 2019. Combining hydration and carbonation of cement using super-saturated aqueous CO<sub>2</sub> solution. *Construction and Building Materials*, **229**, 116825.
- Liu, Y., Ren, W.-M., Zhang, W.-P., Zhao, R.-R., Lu, X.-B. 2015. Crystalline CO<sub>2</sub>-based polycarbonates prepared from racemic catalyst through intramolecularly interlocked assembly. *Nature Communications*, **6**(1), 8594.
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S.J., Giron, C., Ciais, P. 2022. Monitoring global carbon emissions in 2021. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**(4), 217-219.
- Loder, A., Siebenhofer, M., Lux, S. 2020. The reaction kinetics of CO<sub>2</sub> methanation on a bifunctional Ni/MgO catalyst. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **85**, 196-207.

- Lothe, A., Emmel, B., Bergmo, P., Mortensen, G.M., Frykman, P. 2015. Updated estimate of storage capacity and evaluation of Seal for selected Aquifers (D26). NORDICCS Technical Report D 6.3. 1401 (D26).
- Lu, Z., Du, L., Tang, K., Bai, J. 2013. High H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Adsorption Capacity of a Highly Porous (2,3,4)-Connected Metal–Organic Framework. *Crystal Growth & Design*, **13**(6), 2252-2255.
- Lundquist, T., Woertz, I., Quinn, N., Benemann, J. 2010. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production., 2010, Energy Biosciences Institute. *University of California, Berkeley: Berkeley, CA*, 153.
- Luu, M.T., Milani, D., Wake, M., Abbas, A. 2016. Analysis of di-methyl ether production routes: Process performance evaluations at various syngas compositions. *Chemical Engineering Science*, **149**, 143-155.
- Lyons, M., Durrant, P., Kochhar, K. 2021. REACHING ZERO WITH RENEWABLES-CAPTURING CARBON-Technical Paper 4/2021 by Martina Lyons, Paul Durrant and Karan Kochhar.
- MacDowell, N., Florin, N., Buchard, A., Hallett, J., Galindo, A., Jackson, G., Adjiman, C.S., Williams, C.K., Shah, N., Fennell, P. 2010. An overview of CO<sub>2</sub> capture technologies. *Energy & Environmental Science*, **3**(11), 1645-1669.
- Machado, R.D.P.G.M.D.a.F.G. 2019. Toward a Carbon-Free World: Negative Emissions Technologies. A.T. Kearney Energy Transition Institute. [www. energy-transition-institute.com](http://www.energy-transition-institute.com).
- Mackenzie, W. 2022. CCUS: 2023 Will Be a Milestone Year, <https://www.woodmac.com/news/opinion/ccus-2023-outlook/>.
- Madejski, P., Chmiel, K., Subramanian, N., Kuś, T. 2022. Methods and Techniques for CO<sub>2</sub> Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. *Energies*, **15**(3), 887.
- Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., Schreiber, A., Müller, T.E. 2012. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO<sub>2</sub>. *Energy & Environmental Science*, **5**(6), 7281-7305.
- Masoudi Soltani, S., Lahiri, A., Bahzad, H., Clough, P., Gorbounov, M., Yan, Y. 2021. Sorption-enhanced Steam Methane Reforming for Combined CO<sub>2</sub> Capture and Hydrogen Production: A State-of-the-Art Review. *Carbon Capture Science & Technology*, **1**, 100003.
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), 217-232.
- Mathimani, T., Pugazhendhi, A. 2019. Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **17**, 326-330.
- Max, M., Sheps, K., Tatro, S., Brazel, L., Osegovic, J. 2008. SEAWATER DESALINATION AS A BENEFICIAL FACTOR OF CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION. *6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH)*, 2008.
- McKinsey and Co. 2022. Scaling the CCUS industry to Achieve Net Zero Emission. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/scaling-the-ccus-industry-to-achieve-net-zero-emissions>

- Meijer, K., Guenther, C., Dry, R. HIsarna, 2011. Pilot Plant Project, METEC Conference, Germany, 2011, [http://www.riotinto.com/documents/\\_Iron%20Ore/HIsarna\\_0711\\_METEC\\_Conference.pdf](http://www.riotinto.com/documents/_Iron%20Ore/HIsarna_0711_METEC_Conference.pdf).
- Merkel, T., Kniep, J., Fulton, D., Watson, R., Sakib, N., Westling, E., Prakash, A., Hofmann, T., Huang, I., Nguyen, V. 2018. Integrated Testing of a Membrane CO<sub>2</sub> Capture Process with a Coal-Fired Boiler. Membrane Technology and Research, Inc., Newark, CA (United States). Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1457176/>
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., Meyer, L. 2005. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MHI. 2023. CO<sub>2</sub> CAPTURE TECHNOLOGY: CO<sub>2</sub> CAPTURE PROCESS. Mitsubishi Heavy Industries Engineering. [https://www.mhi.com/products/engineering/CO2\\_plants\\_process.html](https://www.mhi.com/products/engineering/CO2_plants_process.html).
- Michael E. Parker, P.E., Northrop, S., Valencia, J.A., Foglesong, R.E., Duncan, W.T. 2011. CO<sub>2</sub> management at ExxonMobil's LaBarge field, Wyoming, USA. *Energy Procedia*, **4**, 5455-5470.
- Mitchell, C., Avagyan, V., Chalmers, H., Lucquiaud, M. 2019. An initial assessment of the value of Allam Cycle power plants with liquid oxygen storage in future GB electricity system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **87**, 1-18.
- Mo, L., Hao, Y., Liu, Y., Wang, F., Deng, M. 2019. Preparation of calcium carbonate binders via CO<sub>2</sub> activation of magnesium slag. *Cement and Concrete Research*, **121**, 81-90.
- Modern Power Systems. 2016. Breaking ground for a groundbreaker: the first Allam Cycle power plant. <https://www.modernpowersystems.com/features/featurebreaking-ground-for-a-groundbreaker-the-first-allam-cycle-power-plant-4893271/featurebreaking-ground-for-a-groundbreaker-the-first-allam-cycle-power-plant-4893271-477348.html>
- Mondal, K., Sasmal, S., Badgandi, S., Chowdhury, D.R., Nair, V. 2016. Dry reforming of methane to syngas: a potential alternative process for value added chemicals—a techno-economic perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**(22), 22267-22273.
- Monkman, S., MacDonald, M., Hooton, R.D., Sandberg, P. 2016. Properties and durability of concrete produced using CO<sub>2</sub> as an accelerating admixture. *Cement and Concrete Composites*, **74**, 218-224.
- Mostafa, M., Antonicelli, C., Varela, C., Barletta, D., Zondervan, E. 2022. Capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere: Design and analysis of a large-scale DAC facility. *Carbon Capture Science & Technology*, **4**, 100060.
- Muhammad, H.A., Lee, G., Cho, J., Bhatti, U.H., Baik, Y.-J., Lee, B. 2019. Design and optimization of CO<sub>2</sub> pressurization system integrated with a supercritical CO<sub>2</sub> power cycle for the CO<sub>2</sub> capture and storage system. *Energy Conversion and Management*, **195**, 609-619.
- Müller, K., Arlt, W. 2014. Shortcut Evaluation of Chemical Carbon Dioxide Utilization Processes. *Chemical Engineering & Technology*, **37**(9), 1612-1615.
- Muradov, N. 2014. Industrial Utilization of CO<sub>2</sub>: A Win–Win Solution. in: *Liberating Energy from Carbon: Introduction to Decarbonization*, (Ed.) N. Muradov, Springer New York. New York, NY, pp. 325-383.

- Muraza, O., Galadima, A. 2015. A review on coke management during dry reforming of methane, Vol. 39, pp. 1196-1216.
- Mustafa, A., Lougou, B.G., Shuai, Y., Wang, Z., Tan, H. 2020. Current technology development for CO<sub>2</sub> utilization into solar fuels and chemicals: A review. *Journal of Energy Chemistry*, **49**, 96-123.
- Muthuraj, R., Mekonnen, T. 2018. Recent progress in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as feedstock for sustainable materials development: Co-polymers and polymer blends. *Polymer*, **145**, 348-373.
- NAABB. 2023. The National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts. <https://www.energy-xprt.com/companies/national-alliance-for-advanced-biofuels-and-bio-products-naabb-46460>
- Naejus, R., Coudert, R., Willmann, P., Lemordant, D. 1998. Ion solvation in carbonate-based lithium battery electrolyte solutions. *Electrochimica Acta*, **43**(3), 275-284.
- Naims, H. 2016. Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**(22), 22226-22241.
- NARUC. 2022. National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC). <https://www.naruc.org/>.
- NASEM. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. . in: *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, The National Academies Press. Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/25259>.
- National Academies of Sciences, E., Medicine. 2021. *Accelerating Decarbonization of the U.S. Energy System*. The National Academies Press, Washington, DC. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25932/accelerating-decarbonization-of-the-us-energy-system>
- NETL. 2015a. Carbon Dioxide Capture Handbook. Carbon Capture Program, National Energy Technology Laboratory (NETL), US Department of Energy (DOE), August 2015;. <https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/Carbon-Dioxide-Capture-Handbook-2015.pdf>
- NETL. 2015b. Carbon Storage Atlas. National Energy Technology Laboratory (NETL) , US Department of Energy (DOE), August 2015. [www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov)
- NETL. 2015c. Compendium of Carbon Capture Technology, Carbon Capture Program, National Energy Technology Laboratory (NETL), US Department of Energy (DOE), July 2015. <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/ATLAS-V-2015.pdf>.
- NETL. 2022. The Carbon Utilization Program, National Energy Technology Laboratory. <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-utilization>
- Niele, F. 2005. *Energy: engine of evolution*. Elsevier. ISBN10:044451886X
- Noor, Z.Z., Yusuf, R.O., Abba, A.H., Abu Hassan, M.A., Mohd Din, M.F. 2013. An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **20**, 378-384.
- Novak Mavar, K., Gaurina-Međimurec, N., Hrnčević, L. 2021. Significance of Enhanced Oil Recovery in Carbon Dioxide Emission Reduction. *Sustainability*, **13**(4), 1800.
- NPC. 2021a. Meeting the Dual Challenge A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage, Appendix F – Emerging CO<sub>2</sub> Capture Technologies. The

- National Petroleum Council, Washington D. C., USA. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Appendix\\_F-030521.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Appendix_F-030521.pdf).
- NPC. 2021b. Meeting the Dual Challenge A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage, Chapter Six – CO<sub>2</sub> Transport. The National Petroleum Council, Washington D. C., USA. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Chap\\_6-030521.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-10/CCUS-Chap_6-030521.pdf).
- NPC. 2022. National Petroleum Council, An Oil and Natural Gas Advisory Committee to the Secretary of Energy, Washington D. C., USA. <https://www.npc.org/>
- NREL. 2021. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, US. NREL/FS-6A50-80580, September 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>.
- NSF. 2018. NSF, NASA scientists explore ocean's 'twilight zone' to uncover links between carbon and plankton. National Science Foundation, June 18, 2018. [https://www.nsf.gov/news/mmg/media/images/720px-CO2\\_pump\\_hg.svg.png](https://www.nsf.gov/news/mmg/media/images/720px-CO2_pump_hg.svg.png).
- Núñez-López, V., Gil-Egui, R., Hosseini, S.A. 2019. Environmental and Operational Performance of CO<sub>2</sub> -EOR as a CCUS Technology: A Cranfield Example with Dynamic LCA Considerations. *Energies*, **12**(3), 448.
- Núñez-López, V., Moskal, E. 2019. Potential of CO<sub>2</sub> -EOR for Near-Term Decarbonization. *Frontiers in Climate*, **1**. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00005/full>
- Ocampo, F., Louis, B., Kiwi-Minsker, L., Roger, A.-C. 2011. Effect of Ce/Zr composition and noble metal promotion on nickel based Ce<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> catalysts for carbon dioxide methanation. *Applied Catalysis A: General*, **392**(1), 36-44.
- OGCI. 2022. THE CCUS HUB PLAYBOOK A guide for regulators, industrial emitters and hub developers. <https://ccushub.ogci.com/wp-content/uploads/2022/03/State-of-play.pdf>
- Oko, E., Wang, M., Joel, A.S. 2017. Current status and future development of solvent-based carbon capture. *International Journal of Coal Science & Technology*, **4**(1), 5-14.
- Olah, G.A., Goeppert, A., Prakash, G.K.S. 2009. Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons. *The Journal of Organic Chemistry*, **74**(2), 487-498.
- Oldenburg, C.M., Torn, K.M. DeAngelis, J.B. Ajo-Franklin, R.G. Amundson, C.J. Bernacchi, G.M. Bond, E.L. Brodie, M. Carerra, J.N. Christensen, A.B. Cunningham, B. Fouke, T.C. Hazen, A.K. Jain, M. Kleber, K.G. Knauss, S. Nakagawa, K.L. O'Hara, W.J. Parton, W.L. Silver, J.W. Six, W.I. Stringfellow, T.K. Tokunaga, T. Xu, and D. Zilberman (2008). Biologically Enhanced Carbon Sequestration: Research Needs and Opportunities. Report on the Energy Biosciences Institute Workshop on Biologically Enhanced Carbon Sequestration, October 29, 2007, Berkeley, CA.
- Osman, A.I., Mehta, N., Elgarahy, A.M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A.a.H., Rooney, D.W. 2022. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, **20**(1), 153-188.
- Ou, L., Banerjee, S., Xu, H., Coleman, A.M., Cai, H., Lee, U., Wigmosta, M.S., Hawkins, T.R. 2021. Utilizing high-purity carbon dioxide sources for algae cultivation and biofuel

- production in the United States: Opportunities and challenges. *Journal of Cleaner Production*, **321**, 128779.
- Ozkan, M., Nayak, S.P., Ruiz, A.D., Jiang, W. 2022. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience*, **25**(4), 103990.
- Pacheco, M.A., Marshall, C.L. 1997. Review of Dimethyl Carbonate (DMC) Manufacture and Its Characteristics as a Fuel Additive. *Energy & Fuels*, **11**(1), 2-29.
- Pakhare, D., Spivey, J. 2014. A review of dry (CO<sub>2</sub>) reforming of methane over noble metal catalysts. *Chemical Society Reviews*, **43**(22), 7813-7837.
- Paris-Agreement. 2022. The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Accessed on 14/10/2022.
- Pechman, C., K. Kline, S. Lichtenberg, J. Loiter, B. Neenan, E. Nethercutt, and T. Stanton. 2022. The Economics of Carbon Capture and Sequestration, The National Regulatory Research Institute, The National Energy Technology Lab, Department of Energy, USA, DOE/NETL-2021/3215, February 1, 2022. Available at: <https://pubs.naruc.org/pub/5E2BBD6A-1866-DAAC-99FB-BAD3DC5213C2>
- Pérez-Fortes, M., Schöneberger, J.C., Boulamanti, A., Tzimas, E. 2016. Methanol synthesis using captured CO<sub>2</sub> as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy*, **161**, 718-732.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Friedlingstein, P., Jackson, R.B., Korsbakken, J.I., Le Quéré, C., Pregon, A. 2020. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. *Nature Climate Change*, **10**(1), 3-6.
- Pham Minh, D., Pham, X.-H., Siang, T.J., N. Vo, D.-V. 2021. Review on the catalytic tri-reforming of methane - Part I: Impact of operating conditions, catalyst deactivation and regeneration. *Applied Catalysis A: General*, **621**, 118202.
- Pham Minh, D., Siang, T.J., Vo, D.-V.N., Phan, T.S., Ridart, C., Nzihou, A., Grouset, D., Azzaro-Pantel, C. 2018. Chapter 4 - Hydrogen Production From Biogas Reforming: An Overview of Steam Reforming, Dry Reforming, Dual Reforming, and Tri-Reforming of Methane. in: *Hydrogen Supply Chains*, Academic Press, pp. 111-166.
- Pham, X.-H., Ashik, U.P.M., Hayashi, J.-I., Perez Alonso, A., Pla, D., Gomez, M., Pham Minh, D. 2021. Review on the catalytic tri-reforming of methane - Part II: Catalyst development. *Applied Catalysis A: General*, **623**, 118286.
- Pieri, T., Nikitas, A., Angelis-Dimakis, A. 2023. Public Acceptance and Willingness to Pay for Carbon Capture and Utilisation Products. *Clean Technologies*, **5**(1), 436-450.
- Pierie. 2022. Conventional coal reserves. <https://pierie.nl/energy/future/conventional-coal-reserves/>; Accessed on 12/10/2022)
- Posco. 2017. Tand Primetals Technologies, The Finex process: Economic and environmentally safe ironmaking, Posco Ltd. (Incheon, South Korea) and Primetals Technologies Ltd. (Linz, Austria), 2015, Vol. March 2017.
- PTRC. 2014. What Happens When CO<sub>2</sub> is Stored Underground? Q&A from the IEAGHG Weyburn-Midale CO<sub>2</sub> Monitoring and Storage Project. in: *Global Carbon Capture and Storage Institute, Docklands, Australia*. Petroleum Technology Research Centre, Regina, Canada. [www.globalccsinstitute.com](http://www.globalccsinstitute.com) and <http://ptrc.ca>

- Qiao, Z., Wang, N., Jiang, J., Zhou, J. 2016. Design of amine-functionalized metal–organic frameworks for CO<sub>2</sub> separation: the more amine, the better? *Chemical Communications*, **52**(5), 974-977.
- Quadrelli, E.A., Centi, G., Duplan, J.-L., Perathoner, S. 2011. Carbon Dioxide Recycling: Emerging Large-Scale Technologies with Industrial Potential. *ChemSusChem*, **4**(9), 1194-1215.
- Quan, Z., Bruce, C., Bingyun, L. 2017. Emerging New Types of Absorbents for Postcombustion Carbon Capture. in: *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*, (Ed.) Y. Yongseung, Intech Open. Rijeka, pp. Ch. 4.
- Radgen, P., Rode, H., Reddy, S., Yonkoski, J. 2014. Lessons Learned from the Operation of a 70 Tonne per Day Post Combustion Pilot Plant at the Coal Fired Power Plant in Wilhelmshaven, Germany. *Energy Procedia*, **63**, 1585-1594.
- Rafiee, A., Rajab Khalilpour, K., Milani, D., Panahi, M. 2018. Trends in CO<sub>2</sub> conversion and utilization: A review from process systems perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**(5), 5771-5794.
- Rajasekaran, N., Vinoba, M., Al-Sheeha, H., Rana, M.S. 2021. The Synergistic Character of Highly N-Doped Coconut–Shell Activated Carbon for Efficient CO<sub>2</sub> Capture. *ChemistrySelect*, **6**(34), 9149-9156.
- Ramsey, E., Sun, Q., Zhang, Z., Zhang, C., Gou, W. 2009. Mini-Review: Green sustainable processes using supercritical fluid carbon dioxide. *Journal of Environmental Sciences*, **21**(6), 720-726.
- Rao, A.B., Rubin, E.S., Berkenpas, M.B. 2004. An integrated modeling framework for carbon management technologies. Carnegie Mellon University (US). Volume 1 – Technical Documentation: Amine-Based CO<sub>2</sub> Capture and Storage Systems for Fossil Fuel Power Plant. Final Report, U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/836715>.
- Rashid, M, Q. Hussain, M. Al-Wabel, M. Ahmad, et al., 2020. Carbon Sequestration in Alkaline Soils. In In: Inamuddin, Asiri, A., Lichtfouse, E. (eds) Sustainable Agriculture Reviews 38. Sustainable Agriculture Reviews, vol 38. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29337-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29337-6_6)
- Ravikumar, D., Zhang, D., Keoleian, G., Miller, S., Sick, V., Li, V. 2021. Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit. *Nature Communications*, **12**(1), 855.
- Reliance-Industries. 2023. Powering a clean planet. <https://www.ril.com/Innovation-R-D/R-D.aspx>
- REN21. 2023. Renewable 2022 - Global Status Report. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf).
- Rochfort, S., Isbel, A., Ezernieks, V., Elkins, A., Vincent, D., Deseo, M.A., Spangenberg, G.C. 2020. Utilisation of Design of Experiments Approach to Optimise Supercritical Fluid Extraction of Medicinal Cannabis. *Scientific Reports*, **10**(1), 9124.
- Romanov, V., Soong, Y., Carney, C., Rush, G.E., Nielsen, B., O'Connor, W. 2015. Mineralization of Carbon Dioxide: A Literature Review. *ChemBioEng Reviews*, **2**(4), 231-256.

- Rosa, L., Becattini, V., Gabrielli, P., Andreotti, A., Mazzotti, M. 2022. Carbon dioxide mineralization in recycled concrete aggregates can contribute immediately to carbon-neutrality. *Resources, Conservation and Recycling*, **184**, 106436.
- Russell, S. 2016. A Recommended Methodology for Estimating and Reporting the Potential Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Reserves. World Resources Institute, Washington, DC, USA. Available at: [https://files.wri.org/d8/s3fs-public/A\\_Recommended\\_Methodology\\_for\\_Estimating\\_and\\_Reporting\\_the\\_Potential\\_Greenhouse\\_Gas\\_Emissions\\_from\\_Fossil\\_Fuel\\_Reserves.pdf](https://files.wri.org/d8/s3fs-public/A_Recommended_Methodology_for_Estimating_and_Reporting_the_Potential_Greenhouse_Gas_Emissions_from_Fossil_Fuel_Reserves.pdf).
- Saad, M.G., Dosoky, N.S., Zoromba, M.S., Shafik, H.M. 2019. Algal Biofuels: Current Status and Key Challenges. *Energies*, **12**(10), 1920.
- Sánchez-Biezma Sacristán, A. 2018. *Novel calcium looping CO<sub>2</sub> capture process incorporating sorbent reactivation by recarbonation (ReCaL): final report*. Publications Office. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f24545b2-9c46-11e8-a408-01aa75ed71a1>
- Sanchez Fernandez, E., Heffernan, K., van der Ham, L.V., Linders, M.J.G., Eggink, E., Schrama, F.N.H., Brilman, D.W.F., Goetheer, E.L.V., Vlugt, T.J.H. 2013. Conceptual Design of a Novel CO<sub>2</sub> Capture Process Based on Precipitating Amino Acid Solvents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**(34), 12223-12235.
- Saravanan, A., Senthil kumar, P., Vo, D.-V.N., Jeevanantham, S., Bhuvaneshwari, V., Anantha Narayanan, V., Yaashikaa, P.R., Swetha, S., Reshma, B. 2021. A comprehensive review on different approaches for CO<sub>2</sub> utilization and conversion pathways. *Chemical Engineering Science*, **236**, 116515.
- Sayre, A., Frankman, D., Baxter, A., Stitt, K., Baxter, L. 2017. Field Testing of Cryogenic Carbon Capture. Presented at the Carbon Management Technology Conference held in Houston, Texas, USA, 17-20 July 2017.
- Schakel, W., Oreggioni, G., Singh, B., Strømman, A., Ramírez, A. 2016. Assessing the techno-environmental performance of CO<sub>2</sub> utilization via dry reforming of methane for the production of dimethyl ether. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **16**, 138-149.
- Schild, J. 2019. The monetary valuation of water-related ecosystem services, Leiden University. The Netherlands. ISBN: 978-94-028-1818-5. Available at: <https://openaccess.leidenuniv.nl/>
- Seoane, B., Coronas, J., Gascon, I., Benavides, M.E., Karvan, O., Caro, J., Kapteijn, F., Gascon, J. 2015. Metal-organic framework based mixed matrix membranes: a solution for highly efficient CO<sub>2</sub> capture? *Chemical Society Reviews*, **44**(8), 2421-2454.
- Sha, Z., Bai, Y., Li, R., Lan, H., Zhang, X., Li, J., Liu, X., Chang, S., Xie, Y. 2022. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. *Communications Earth & Environment*, **3**(1), 8.
- Sheikh, A.Q., Skinder, B.M., Ashok, K., Ganai, B.A. 2014. Terrestrial carbon sequestration as a climate change mitigation activity. *Journal of Pollution Effects & Control*, 1-8.
- Shen, M., Kong, F., Tong, L., Luo, Y., Yin, S., Liu, C., Zhang, P., Wang, L., Chu, P.K., Ding, Y. 2022. Carbon capture and storage (CCS): development path based on carbon neutrality and economic policy. *Carbon Neutrality*, **1**(1), 37.
- Shi, X., Lin, Y., Chen, X. 2022. Development of sorbent materials for direct air capture of CO<sub>2</sub>. *MRS Bulletin*, **47**(4), 405-415.

- Short, C. 2011. Costs – what are they needed for? . *CCS Costs Workshop. IEA, Paris*, , 22-23 March 2011. pp. 24. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/24816/20111108-proceedings-ccs-cost-workshop.pdf>
- Singha, R.K., Das, S., Pandey, M., Kumar, S., Bal, R., Bordoloi, A. 2016. Ni nanocluster on modified CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanoporous composite for tri-reforming of methane. *Catalysis Science & Technology*, **6**(19), 7122-7136.
- Sodiq, A., Abdullatif, Y., Aissa, B., Ostovar, A., Nassar, N., El-Naas, M., Amhamed, A. 2023. A review on progress made in direct air capture of CO<sub>2</sub> . *Environmental Technology & Innovation*, **29**, 102991.
- SOLARGIS. 2023. Solar Resource Maps of the World. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>.
- Song, B., Qin, A., Tang, B.Z. 2020. New polymerizations based on green monomer of carbon dioxide. *Acta Chimica Sinica*, **78**(1), 9.
- Song, C.-F., Kitamura, Y., Li, S.-H., Ogasawara, K. 2012. Design of a cryogenic CO<sub>2</sub> capture system based on Stirling coolers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **7**, 107-114.
- Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H., Kitamura, Y. 2019. Cryogenic-based CO<sub>2</sub> capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **101**, 265-278.
- SPE. 2017. CO<sub>2</sub> Storage Resources Management System (SRMS), Version 1.02, Society of Petroleum Engineers.
- Spinner, N.S., Vega, J.A., Mustain, W.E. 2012. Recent progress in the electrochemical conversion and utilization of CO<sub>2</sub>. *Catalysis Science & Technology*, **2**(1), 19-28.
- Srivastava, R., McIlvried, H., Vikara, D., Carr, T., Wielopolski, L., Katherine, G. 2010. Best Practices for: Terrestrial Sequestration of Carbon Dioxide. *National Energy Technology Laboratory, United Department of Energy*. Available at: [www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov)
- Stafford, W., Lotter, A., Brent, A., von Maltitz, G. 2017. Biofuels technology: A look forward. WIDER Working Paper. 9292563114.
- Storrs, K., Lyhne, I., Drustrup, R. 2023. A comprehensive framework for feasibility of CCUS deployment: A meta-review of literature on factors impacting CCUS deployment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **125**, 103878.
- Ströhle, J., Epple, B., Reitz, M., Karl, J., Höftberger, D., Junk, M. 2016. *Carbon capture by means of indirectly heated carbonate looping process (CARINA) : final report*. Publications Office. <http://bookshop.europa.eu>.
- Su, Y., Song, K., Zhang, P., Su, Y., Cheng, J., Chen, X. 2017. Progress of microalgae biofuel's commercialization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **74**, 402-411.
- Sun, A., Davis, R., Starbuck, M., Ben-Amotz, A., Pate, R., Pienkos, P.T. 2011. Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. *Energy*, **36**(8), 5169-5179.
- Sun, X., Alcalde, J., Bakhtbidar, M., Elío, J., Vilarrasa, V., Canal, J., Ballesteros, J., Heinemann, N., Haszeldine, S., Cavanagh, A., Vega-Maza, D., Rubiera, F., Martínez-Orio, R., Johnson, G., Carbonell, R., Marzan, I., Travé, A., Gomez-Rivas, E. 2021. Hubs and clusters approach to unlock the development of carbon capture and storage – Case study in Spain. *Applied Energy*, **300**, 117418.

- Svante. 2023. Forward-Thinking Carbon Management Solutions are Here. <https://svanteinc.com/>.
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Kazemi Shariat Panahi, H., Nizami, A.-S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K. 2020. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 1: Upstream strategies. *Renewable Energy*, **146**, 1204-1220.
- Tada, S., Ochieng, O.J., Kikuchi, R., Haneda, T., Kameyama, H. 2014. Promotion of CO<sub>2</sub> methanation activity and CH<sub>4</sub> selectivity at low temperatures over Ru/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**(19), 10090-10100.
- Tamboli, A.H., Chaugule, A.A., Kim, H. 2017. Catalytic developments in the direct dimethyl carbonate synthesis from carbon dioxide and methanol. *Chemical Engineering Journal*, **323**, 530-544.
- Tayara, L. 2013. Feasibility analysis for carbon capture and utilization in cement-concrete industries. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montréal, Québec, Canada <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/vd66w319z?locale=en>
- Theofanidis, S.A., Antzaras, A.N., Lemonidou, A.A. 2023. CO<sub>2</sub> as a building block: from capture to utilization. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **39**, 100902.
- TotalEnergies. 2023. Biofuels. <https://miningsolutions.totalenergies.com/renewables-and-low-carbon-energies/biofuels>
- Trivedi, P., Singh, B.P., Singh, B.K. 2018. Chapter 1 - Soil Carbon: Introduction, Importance, Status, Threat, and Mitigation. in: *Soil Carbon Storage*, (Ed.) B.K. Singh, Academic Press, pp. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00001-9>
- Tuinier, M.J., Hamers, H.P., van Sint Annaland, M. 2011a. Techno-economic evaluation of cryogenic CO<sub>2</sub> capture—A comparison with absorption and membrane technology. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **5**(6), 1559-1565.
- Tuinier, M.J., van Sint Annaland, M., Kramer, G.J., Kuipers, J.A.M. 2010. Cryogenic CO<sub>2</sub> capture using dynamically operated packed beds. *Chemical Engineering Science*, **65**(1), 114-119.
- Tuinier, M.J., van Sint Annaland, M., Kuipers, J.A.M. 2011b. A novel process for cryogenic CO<sub>2</sub> capture using dynamically operated packed beds—An experimental and numerical study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **5**(4), 694-701.
- Turan, G., Zapantis, A., Kearns, D., Tamme, E., Staib, C., Zhang, T., Burrows, J., Gillespie, A., Havercroft, I., Rassool, D. 2021. Global status of CCS 2021. *CCS Accelerating to net zero, 2021*.
- UN 2023. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. Available at: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- UNEP. 2022. Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. United Nations Environment Programme, Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.
- UNFCCC. 2022. Information note: Removal activities under the Article 6.4 mechanism Version 02.0. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb003-aa-a04.pdf>

- UNFCCC. 2022. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change#>. Accessed on 14/10/2022.
- US-EPA. 2018. Emerging Trends in Supply Chain Emissions Engagement. Available at: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-06/documents/emerging\\_trends\\_in\\_supply\\_chain\\_emissions\\_engagement.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-06/documents/emerging_trends_in_supply_chain_emissions_engagement.pdf).
- US-EPA. 2023. GHG Inventory Development Process and Guidance. Available at: <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-inventory-development-process-and-guidance>.
- Usman, M., Wan Daud, W.M.A., Abbas, H.F. 2015. Dry reforming of methane: Influence of process parameters—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **45**, 710-744.
- Vaidya, P.D., Kenig, E.Y. 2007. CO<sub>2</sub> -Alkanolamine Reaction Kinetics: A Review of Recent Studies. *Chemical Engineering & Technology*, **30**(11), 1467-1474.
- Vaillant, T., R. Debarre, P. Gahlot, C. Grillet, J.-K. Intisar, C. Tapolcai and J. Webster, . 2020. Biomass to energy: Developing sustainable carbon circularity. *FactBook, the Kearney Energy Transition Institute*.
- Valluri, S., Clarendon, V., Kawatra, S. 2022. Opportunities and challenges in CO<sub>2</sub> utilization. *Journal of Environmental Sciences*, **113**, 322-344.
- Van-Dal, É.S., Bouallou, C. 2013. Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Journal of Cleaner Production*, **57**, 38-45.
- Van der Stel, J., Meijer, K., Teerhuis, C., Zeijlstra, C., Keilman, G., Ouweland, M., Steel, T. 2013. Update to the Developments of HIsarna: An ULCOS alternative ironmaking process. *IEAGHG/IETS Iron and steel industry CCUS and process integration workshop, IEA Greenhouse Gas R&D Programme*.
- Velvizhi, G., Nair, R., Goswami, C., Arumugam, S.K., Shetti, N.P., Aminabhavi, T.M. 2023. Carbon credit reduction: A techno-economic analysis of “drop-in” fuel production. *Environmental Pollution*, **316**, 120507.
- Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Alqaheem, Y., Alomair, A.A., Pérez, A., Rana, M.S. 2017. Recent progress of fillers in mixed matrix membranes for CO<sub>2</sub> separation: A review. *Separation and Purification Technology*, **188**, 431-450.
- Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Choi, S.Y., Park, K.T., Kim, H.J., Jeong, S.K. 2014. Harvesting CaCO<sub>3</sub> Polymorphs from In Situ CO<sub>2</sub> Capture Process. *Journal of Physical Chemistry C*, **118**(31), 17556-17566.
- Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Grace, A.N., Kim, D.H., Yoon, Y., Nam, S.C., Baek, I.H., Jeong, S.K. 2013. Carbonic Anhydrase Promotes the Absorption Rate of CO<sub>2</sub> in PostCombustion Processes. *Journal of Physical Chemistry B*, **117**(18), 5683-5690.
- Voloshin, R.A., Rodionova, M.V., Zharmukhamedov, S.K., Veziroglu, T.N., Allakhverdiev, S.I. 2016. Biofuel production from plant and algal biomass. *International journal of hydrogen energy*, **41**(39), 17257-17273.
- Vooradi, R., Bertran, M.-O., Frauzem, R., Anne, S.B., Gani, R. 2018. Sustainable chemical processing and energy-carbon dioxide management: Review of challenges and opportunities. *Chemical Engineering Research and Design*, **131**, 440-464.

- Wahlen, B.D., Morgan, M.R., McCurdy, A.T., Willis, R.M., Morgan, M.D., Dye, D.J., Bugbee, B., Wood, B.D., Seefeldt, L.C. 2013. Biodiesel from Microalgae, Yeast, and Bacteria: Engine Performance and Exhaust Emissions. *Energy & Fuels*, **27**(1), 220-228.
- Wang, F., Han, K., Yu, W., Zhao, L., Wang, Y., Wang, X., Yu, H., Shi, W. 2020. Low Temperature CO<sub>2</sub> Reforming with Methane Reaction over CeO<sub>2</sub>-Modified Ni@SiO<sub>2</sub> Catalysts. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**(31), 35022-35034.
- Wannakao, S., Artrith, N., Limtrakul, J., Kolpak, A.M. 2015. Engineering Transition-Metal-Coated Tungsten Carbides for Efficient and Selective Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub> to Methane. *ChemSusChem*, **8**(16), 2745-2751.
- WEF. 2022. Which country is currently producing the most nuclear power? World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2022/01/energy-nuclear-power-production-electricity-sustainable/>
- Wei, W., Jinlong, G. 2011. Methanation of carbon dioxide: an overview. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, **5**(1), 2-10.
- White, L.A. 1943. Energy and the evolution of culture. *American anthropologist*, **45**(3), 335-356.
- WRI. 2004. The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised Edition. World Resources Institute, Washington, DC, USA. <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol-0>
- Wu, W., Lin, K.-H., Chang, J.-S. 2018. Economic and life-cycle greenhouse gas optimization of microalgae-to-biofuels chains. *Bioresource Technology*, **267**, 550-559.
- Wu, Y., Li, P. 2020. The potential of coupled carbon storage and geothermal extraction in a CO<sub>2</sub>-enhanced geothermal system: a review. *Geothermal Energy*, **8**(1), 19.
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S. 2016. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, **65**, 67-74.
- Xue, Z., Nishio, S., Hagiwara, N., Matsuoka, T. 2014. Microbubble Carbon Dioxide Injection for Enhanced Dissolution in Geological Sequestration and Improved Oil Recovery. *Energy Procedia*, **63**, 7939-7946.
- Yang, B., Shao, C., Hu, X., Ngata, M.R., Aminu, M.D. 2023. Advances in Carbon Dioxide Storage Projects: Assessment and Perspectives. *Energy & Fuels*, **37**(3), 1757-1776.
- Yang, M., Ma, C., Xu, M., Wang, S., Xu, L. 2019. Recent Advances in CO<sub>2</sub> Adsorption from Air: a Review. *Current Pollution Reports*, **5**(4), 272-293.
- Ye, R.-P., Li, Q., Gong, W., Wang, T., Razink, J.J., Lin, L., Qin, Y.-Y., Zhou, Z., Adidharma, H., Tang, J., Russell, A.G., Fan, M., Yao, Y.-G. 2020. High-performance of nanostructured Ni/CeO<sub>2</sub> catalyst on CO<sub>2</sub> methanation. *Applied Catalysis B: Environmental*, **268**, 118474.
- Yurata, T., Lei, H., Tang, L., Lu, M., Patel, J., Lim, S., Piumsomboon, P., Chalermisinsuwan, B., Li, C.e. 2019. Feasibility and sustainability analyses of carbon dioxide – hydrogen separation via de-sublimation process in comparison with other processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(41), 23120-23134.
- Zahid, U. 2015. Techno-Economic Assessment of CO<sub>2</sub> Transport for Carbon Capture and Storage. Ph.D Thesis, SCHOOL OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL

ENGINEERING COLLEGE OF ENGINEERING SEOUL NATIONAL UNIVERSITY August 2015.

- Zeman, F., Lackner, K. 2008. The Reduced Emission Oxygen Kiln A White Paper Report for the Cement Sustainability Initiative of the World Business Council on Sustainable Development July 31, 2008 Lenfest Center for Sustainable Energy Columbia University in New York Report No. 2008.01. Available at: <https://www.recuperaresiduosencementeras.org/wp-content/uploads/2017/10/The-Reduced-Emission-Oxygen-Kiln.pdf>.
- Zeman, F., Lackner, K. 2006. The zero emission kiln. *International Cement Review*, 2006, 55-58.
- Zeng, H., Qu, X., Xu, D., Luo, Y. 2022. Porous Adsorption Materials for Carbon Dioxide Capture in Industrial Flue Gas. *Front. Chem.* 10:939701. Available at: [Frontiers | Porous Adsorption Materials for Carbon Dioxide Capture in Industrial Flue Gas \(frontiersin.org\)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2022.939701/full)
- ZEP. 2022. ZEP 2022- Zero Emissions Platform. <https://zeroemissionsplatform.eu/>
- ZEP-CCSA. 2022. Network Technology Guidance for CO<sub>2</sub> transport by ship. ZEP/CCSA Report, March 2022. Available at: <https://zeroemissionsplatform.eu/guidance-for-CO2-transport-by-ship/>.
- Zhang, M., Xu, Y., Williams, B.L., Xiao, M., Wang, S., Han, D., Sun, L., Meng, Y. 2021. Catalytic materials for direct synthesis of dimethyl carbonate (DMC) from CO<sub>2</sub>. *Journal of Cleaner Production*, **279**, 123344.
- Zhang, Y., Zhang, S., Gossage, J.L., Lou, H.H., Benson, T.J. 2014. Thermodynamic Analyses of Tri-reforming Reactions To Produce Syngas. *Energy & Fuels*, **28**(4), 2717-2726.
- Zhao, M., Minett, A.I., Harris, A.T. 2013. A review of techno-economic models for the retrofitting of conventional pulverised-coal power plants for post-combustion capture (PCC) of CO<sub>2</sub>. *Energy & Environmental Science*, **6**(1), 25-40.
- Zheng, S., Yao, Y., Elsworth, D., Liu, D., Cai, Y. 2020. Dynamic fluid interactions during CO<sub>2</sub>-ECBM and CO<sub>2</sub> sequestration in coal seams. Part 2: CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O wettability. *Fuel*, **279**, 118560.
- Zhu, B., Sun, F., Yang, M., Lu, L., Yang, G., Pan, K. 2014. Large-scale biodiesel production using flue gas from coal-fired power plants with Nannochloropsis microalgal biomass in open raceway ponds. *Bioresource Technology*, **174**, 53-59.
- Zhu, Q. 2019. Developments on CO<sub>2</sub> -utilization technologies. *Clean Energy*, **3**(2), 85-100.
- Zhuang, Q., Clements, B. 2017. Synergistic Effect on CO<sub>2</sub> Capture by Binary Solvent System. *Recent Advances in Carbon Capture and Storage. Synergistic Effect on CO<sub>2</sub> Capture by Binary Solvent System | IntechOpen.*
- Zimmermann, A.W., Schomäcker, R. 2017. Assessing Early-Stage CO<sub>2</sub> utilization Technologies—Comparing Apples and Oranges? *Energy Technology*, **5**(6), 850-860.
- Zimmermann, A.W., Wunderlich, J., Müller, L., Buchner, G.A., Marxen, A., Michailos, S., Armstrong, K., Naims, H., McCord, S., Styring, P., Sick, V., Schomäcker, R. 2020. Techno-Economic Assessment Guidelines for CO<sub>2</sub> Utilization. *Frontiers in Energy Research*, **8**, p-5.
- Zitelman, K., Ekmann, J., Huston, J., Indrakanti, P. 2018. Carbon Capture, Utilization, and Sequestration: Technology and Policy Status and Opportunities. NARUC 2018. <https://pubs.naruc.org/pub/8C07B393-A9A0-3F04-4832-D43790E10B91>
- Zou, H., Chen, S., Huang, J., Zhao, Z. 2016. Effect of additives on the properties of nickel molybdenum carbides for the tri-reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**(38), 16842-16850.

## تقارير

### الدورة الثانية لقمة ليبيا للطاقة والاقتصاد

عبد الفتاح دندي\*

## الدورة الثانية لقمة ليبيا للطاقة والاقتصاد

طرابلس- دولة ليبيا، 13-14 يناير 2024



التقارير

### المقدمة

بمشاركة وزارية بارزة وحضور كبرى شركات الطاقة والنفط العربية والعالمية، وبرعاية حكومة الوحدة الوطنية الليبية ومساهمة ومشاركة العديد من الوزارات والهيئات والمؤسسات الدولية والمحلية، قام رئيس الوزراء في الحكومة الليبية معالي السيد عبدالحميد الدبيبة بافتتاح فعاليات النسخة الثانية من قمة ليبيا للطاقة والاقتصاد، في العاصمة طرابلس خلال الفترة 13-14 يناير 2024. وقد شارك في هذه النسخة أكثر من 1300 مشاركا من أكثر من 30 دولة، يمثلون ضعف المشاركين في النسخة الأولى للقمة التي عُقدت عام 2021. ومثل المشاركين في القمة العديد من الدول منها تركيا وإيطاليا وإسبانيا وفرنسا والجزائر، وعدد من الشركات الرائدة في مجال النفط والغاز والطاقات المتجددة، أبرزها إيني الإيطالية، ورييسول الاسبانية، وتوتال انيرجيز الفرنسية، وأويل إنفست الهولندية، و BGN البريطانية، وسوناطراك الجزائرية، وعدد من المنظمات المهمة بشأن الطاقة كمنظمة أوبك ومنظمة أوابك ومنظمة منتجي البترول الافارقة «APPO».

## فعاليات اليوم الأول

### الكلمة الافتتاحية

افتتح فعاليات القمة معالي رئيس الوزراء في الحكومة الليبية السيد عبدالحميد الدبيبة، بكلمة أكد فيها على دعم حكومة الوحدة الوطنية بشكل غير محدود لقطاع النفط والطاقة ووضعها خططا لمضاعفة إنتاج النفط والغاز والاستكشاف وتطوير البنية التحتية للحقول النفطية، والتوسع في الاستكشاف، بما يدعم المؤسسة الوطنية للنفط



والاقتصاد الوطني. وشدد الدبيبة على العمل لإزالة المعوقات التي تواجه قطاع الطاقة، مشددا على سعي الحكومة لخلق البرامج المهمة وإنعاش الاقتصاد الوطني وحل الصعوبات التي تواجه التنمية في مجال النفط والغاز. وأشار الدبيبة إلى أن ملف الطاقة الكهربائية كان تحديا كبيرا وبذلت الحكومة جهودا لاستقرار الشبكة الكهربائية وتشجيع رؤوس الأموال على الاستثمار في ليبيا من خلال مشاريع عودة الحياة. وأضاف أن الحكومة الليبية تسعى إلى الاستقرار وتحسين بيئة الاستثمار وتشجيع رؤوس الأموال للعمل في ليبيا، معتبرا أن مشروعات «عودة الحياة» عززت الاستقرار في البلاد. وأشار إلى الاهتمام بالبحث عن مصادر الطاقة البديلة والمتجددة، بما في ذلك استخدام تكنولوجيا الطاقة الشمسية باستغلال إمكانات ليبيا لإقامة أضخم حقول الطاقة الشمسية في المنطقة. وأكد السعي إلى احتلال ليبيا مرتبة في مقدمة الدول المتفوقة في هذا المجال، مع تصدير الفائض منها إلى دول الجوار والقارة السمراء ودول البحر المتوسط.

## الجلسة الوزارية الحوارية



التقارير

تحدث في هذه الجلسة كل من معالي وزير النفط والغاز في دولة ليبيا المهندس محمد عون، والأمين العام لـ «منظمة منتجي البترول الأفارقة» د عمر فاروق إبراهيم، ووزيرة الطاقة المالطية ميريام دالي، ووزير الطاقة التركي ألب أرسلان بيرقدار. وفيما يلي إيجاز لأهم ما تم التطرق له في هذه الجلسة:



قال معالي وزير النفط والغاز في دولة ليبيا المهندس محمد عون إن ليبيا تملك كميات جيدة من الوقود الصخري في حقول ومواقع غير مستكشفة بعد، مضيفاً أن أكثر من 30 % من مساحة الدولة الليبية لم تستكشف حتى الآن. وأضاف عون أنه «هناك لجنة بدأت تولي مهمة الاستكشاف وتوصلت إلى نتائج ونأمل أن نقوم بتجربة فعلية في حفر أحد الآبار للتأكد

في الأيام المقبلة. وشدد عون على أن الحاجة إلى الوقود الأحفوري لا تزال قائمة بالرغم من كل ما يكتب وما يقال عن التوجه إلى الطاقة

الجديدة أو البديلة. وقال أن تقارير منظمة أوبك أكدت أن الحاجة إلى الوقود الأحفوري ستستمر وتتزايد حتى العام 2045. ويرى عون أنه من الضروري العمل على معالجة الآثار البيئية للوقود الأحفوري بالتوازي مع الطاقات البديلة، «فهذا هو الحل الأمثل»، مشيراً إلى ضرورة الاعتماد على الغاز في الانتقال للطاقة المتجددة. وأشار عون إلى أنه قد تم اكتشاف الغاز في شرق وغرب المتوسط، وقد ساعدت شركة أمريكية على اكتشاف غاز «عروس البحر» في وسط المتوسط، وأكد عون على قدرة البلاد على تزويد أوروبا بالطاقة المتجددة، وهو ما يتماشى مع الالتزامات المشتركة بالمسؤولية البيئية وخفض انبعاثات الكربون. وأشار إلى أن القارة الأفريقية بها كميات هائلة من الغاز، وما يؤكد ذلك هو العمل على إنشاء خطي الغاز نيجيريا إلى أوروبا، لما تتمتع به الدولة الأفريقية من كميات هائلة من مخزون الغاز لدى نيجيريا.

من جهته، قال الأمين العام لـ«منظمة منتجي البترول الأفارقة» عمر فاروق إبراهيم إن ليبيا سيكون لها دوراً مهماً في مجال الطاقة في القارة السمراء مستقبلاً. وأضاف د. إبراهيم، أن الطاقة المتجددة مهمة في رؤية ليبيا للمستقبل، فهي من بين الدول العشرة الأكبر حول العالم في هذا المجال. وأشار إلى أن ليبيا يمكنها أن تلعب دوراً أكبر بما لديها من إمكانيات تسمح لها بذلك على المستوى العالمي. كما طالب د فاروق



إبراهيم دولة ليبيا بتطوير آلياتها باستعمال التكنولوجيات المتطورة للاستكشاف والحفر والإنتاج لتكون قادرة على مضاعفة إنتاجها من الطاقة. وأستبعد د. إبراهيم تحرك العالم السريع نحو الطاقات المتجددة والاستغناء عن الطاقات الأحفورية.



ومن جانبها، أكدت وزيرة الطاقة المالطية ميريام دالي أن ليبيا تعتبر شريكا قويا في مجال الطاقة بالنسبة لمالطا، ويمكن لها أن تلعب دورا رياديا في القطاع. وأضافت أنه يمكن تحقيق الكثير من المصالح بالتعاون مع ليبيا باعتبار البلدين يطلان على البحر المتوسط، مشيرة إلى أن هذه الميزة الجغرافية تفتح آفاق واسعة للتعاون اذا ما تم الاخذ في الاعتبار أن ليبيا يتوقع أن تكون رائدة في مجال الطاقة.



وقال وزير الطاقة التركي ألب أرسلان بيرقدار إن بلاده تملك علاقات ناجحة في عدة ملفات مع ليبيا ويجب توسيعها لتشمل مجال الطاقة. وأضاف بيرقدار أن ليبيا مهمة للسوق العالمية وليس لتركيا فقط وذلك لعدة أسباب منها التحديات التي يواجهها مجال الطاقة في العالم. وأشار الوزير التركي إلى تأثير إمدادات الطاقة بسبب الأوضاع العالمية، وقال لقد أصبحت الإمدادات أصعب بكثير من الماضي، ولتخطي ذلك لا بد من العمل على الشراكة الدولية والعالمية، فلا يمكن لدولة

أن تعمل وحدها. ولفت بيرقدار إلى المشاكل الجيوسياسية التي تؤثر على إمدادات الطاقة، مشددا على ضرورة إزالة المعوقات التي تواجه قطاع الطاقة. كما تحدث عن أهمية توفير الطاقة النظيفة والعمل على تقليل الانبعاثات من الوقود التقليدي. وتابع أن ليبيا لها باع طويل في صناعة النفط والغاز، وتركيا تمتلك علاقة ناجحة في عدة ملفات ولا بد من توسيعها لمجال الطاقة. وشدد وزير الطاقة والبيئة التركي على

ضرورة التعامل بشكل عاجل وسريع تجاه اعتماد الطاقة البديلة، مبينا أن الانتقال للطاقة البديلة يجب أن يكون مدروسًا وعادلاً ومبنيًا على سياسات وبحوث وليس عشوائيا أو عاطفيا، وأضاف أن العالم لا يزال بحاجة للنفط، مدلا على ذلك بتصاعد الطلب عليه كل يوم خاصة مع تزايد عدد سكان الأرض ونمو اقتصادات جديدة.

### كلمة المؤسسة الوطنية للنفط الليبية

أما رئيس المؤسسة الوطنية للنفط الليبية، فرحات بن قداره، فقال أن المؤسسة منذ إنشائها حافظت على العلاقات الإستراتيجية مع شركائها الدوليين لتحقيق الاستقرار في أمن الطاقة العالمي، مشيرا الى أن المؤسسة وضعت استراتيجية طموحة في مجال الطاقة تهدف لإعادة ليبيا إلى مصاف الدول المنتجة وتحقيق التنمية الاقتصادية المستدامة للبلاد. مضيفا أن "المؤسسة هدفها



رفع الإنتاج إلى 2 مليون برميل في اليوم ومضاعفة إنتاج الغاز خلال 3 سنوات لإعادة ليبيا لمصاف الدول المنتجة للطاقة ، ولفت بن قداره إلى أن رفع الإنتاج مقرون بتعزيز علاقاتنا الإستراتيجية، مؤكدا التزام المؤسسة الوطنية للنفط بتعهداتها بخفض انبعاثات الكربون. واختتم بن قداره كلمته بالإشارة إلى أن هذه القمة تمثل فرصة للتعاون وتوطيد العلاقات الدولية وأنهم متحمسون لبدء حوار منفتح يدعم رؤية المؤسسة لقطاع الطاقة.

## كلمات رؤساء شركات النفط والطاقة العالمية



أكد مدير المنبع لشركة إيني الإيطالية لوكا فيجناني دعمهم المؤسسة الوطنية للنفط في رؤيتها لتطوير قطاع الطاقة، مضيفاً أنهم عملوا مع المؤسسة العام الماضي لرفع إنتاج الغاز وتقوية الحقول النفطية. ومن جهته، حث المدير التنفيذي للاستكشاف والإنتاج لشركة ريسبول الإسبانية فرانسيسكو جيا على دعم اقتصاد الدول التي يجري العمل فيها مثل ليبيا، مؤكداً أن عملهم مع ليبيا لا يمكن مقارنته مع أي دولة أخرى، حسب وصفه. ولفت جيا إلى أن ليبيا من الدول المهمة والأساسية، وأنهم يراهنون عليها للاستمرار معاً في الاستكشاف والحفر والتنقيب. وأكد جيا أن الشركات الأجنبية لا تمثل شيئاً بدون الشركات الليبية الوطنية، لافتاً إلى أن التزامهم يتمثل في إنشاء وبناء البنى التحتية للمجتمعات المحلية في مواقع عملهم. ومن جانبه، أعلن رئيس مجموعة أويل إنفست الهولندية على توقيع عقد مع ليبيا المتعلق بالتخلص من الكربون في الإنتاج النفطي. وبدوره، قال المدير التنفيذي لشركة بي إن جي البريطانية رويبا بايجان إن ليبيا لديها كميات هائلة

من الغاز وإمكانيات كبيرة فيما يتعلق بالطاقة الشمسية. وأضاف بايجان أن هناك إمكانيات كبيرة لليبيا للانتقال والتركيز على إنتاج الغاز. ومن جانبه، أكد رئيس منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا بشركة توتال الفرنسية جوليان بوجيه أن هناك فرصة كبيرة لليبيا للانتقال للغاز. وأضاف بوجيه أنهم يدعمون هدف ليبيا برفع إنتاجها لمليون برميل وخفض التلوث والانبعاثات. ولفت بوجيه إلى أن ليبيا لديها مصادر نطف وغاز ممتازة كما لديها أفضل مصادر الطاقة النظيفة في العالم، حسب وصفه. وأشار بوجيه إلى أن هذه القمة فرصة لتأكيد الالتزام الوثيق مع الشركاء الدوليين، مضيفاً أنهم يخططون لمشروع للطاقة المتجددة بقدرة 600 ميغاوات في ليبيا، حسب قوله. وردد بوجيه تأكيده على أن زيادة الشراكات والتعاقدات أمر مهم للغاية بالنسبة للدولة الليبية.

## فعاليات اليوم الثاني

أستهلّت فعاليات اليوم الثاني من القمة بجلسة افتتاحية تم خلالها إلقاء كلمات من كل من منظمة الاقطار العربية المصدرة للبتترول، ومنظمة أوبك، وشركة سوناطراك، وفيما يلي إيجاز لتلك الكلمات:

### كلمة منظمة الاقطار العربية المصدرة للبتترول «أوابك»



قام السيد عبدالفتاح دندي، مدير الادارة الاقتصادية والمشرف على غدارة الاعلام والمكتبة بإلقاء كلمة منظمة أوابك نيابة عن سعادة الامين العام للمنظمة المهندس جمال عيسى اللوغانى، حيث أشار الى المكانة المرموقة التي تتبوأها الدول الأعضاء في منظمة أوابك على خارطة البترول العالمية، وقال ما يعزز هذه المكانة استحوادها على الجزء الأكبر

من الاحتياطات العالمية المؤكدة من النفط والغاز، وما تقوم بإنتاجه وتصديره من هذين المصدرين إلى الأسواق العالمية. وقال أن خامات النفط الليبية تتمتع بميزة نسبية كونها خامات خفيفة وذات محتوى كبريتي منخفض جدا وهذا ما يلائم العديد من مصافي التكرير وخاصة في السوق الأوروبية. وأضاف دندي أن ليبيا تتمتع بموقع جغرافي متميز فهي على مقربة من الاسواق الاوروبية التي يتوقع ان تشهد تزايد في الطلب على النفط والغاز في المستقبل، وهذا ما سيتيح الفرصة لتطوير قطاع الطاقة الليبي من أجل توفير الإمدادات البترولية اللازمة لتلك الأسواق. وقال على الرغم من مضي نصف قرن تقريبا

من العمليات الاستكشافية، إلا أن دولة ليبيا لاتزال تتمتع بإمكانيات نفطية وغازية هائلة وهذا ما يجعل شركات الطاقة العالمية تبحث عن فرص الاستفادة من تلك الامكانيات من خلال إبرام عقود المشاركة في الاستكشاف والإنتاج.

وأضاف السيد دندي أنه من خلال استشراف المستقبل القريب للسوق النفطية نلاحظ أن توقعات المنظمات والهيئات المتخصصة بالطاقة تشير إلى أن معظم الزيادة في احتياجات العالم من الطاقة لعقود عديدة قادمة سيتم تلبيتها من النفط والغاز الطبيعي اللذان من المتوقع أن يستحوذا على نسبة 53.7% في مزيج مصادر الطاقة المستهلكة عالميا حتى عام 2045 بحسب توقعات منظمة أوبك. وقال أن هذه التوقعات تضع الدول المنتجة والمصدرة للنفط أمام تحدي كبير للقيام بدورها المؤمل في توفير تلك الاحتياجات من خلال ضخ استثمارات بمستويات غير مسبوقة من اجل تلبية ذلك النمو المتوقع في الطلب على الطاقة، وضمان أمن الطاقة، وبالطبع خفض الانبعاثات وفقاً لما نصت عليه اتفاقية باريس، ومكافحة الفقر الطاقى الذي نلاحظه اليوم- فالحقيقة المحزنة هي أنه هناك أكثر من 700 مليون نسمة لا يمكنهم الوصول إلى الكهرباء، و2.4 مليار نسمة يستخدمون أنظمة للطاقة غير كفؤة ومضرة للصحة وملوثة للبيئة.

وأكد السيد دندي على إن استغلال المصادر الهيدروكربونية مع التحكم في انبعاثاتها من خلال التقنيات النظيفة «CCUS» سيعزز امكانية وصول العالم إلى الحياد الصفري المنشود في عام 2050، وبذلك ستكون هذه المصادر جزء من الحل نحو التحول المتوازن والمتدرج والمسؤول نحو مصادر طاقة أكثر ديمومة الذي يأخذ في الاعتبار الظروف والأولويات لكل دولة.

واختتم دندي الكلمة قائلاً نحن نعتقد جازمين بأن الآفاق المستقبلية لتطوير قطاع الطاقة في دولة ليبيا واعدة، والإمكانات متاحة، والامر

يتطلب تكاثف الجهود للقيام ببعض الإصلاحات من خلال تعزيز الأمن القومي والتركيز على الشأن الاقتصادي بشكل أكبر فمن شأن ذلك خلق بيئة استثمارية جاذبة للشركات البترولية الكبرى المتعطشة لتطوير هذا القطاع الهام.

### كلمة منظمة الدول المنتجة للنفط « أوبك »



قام الدكتور محمد الكاظمي، إدارة دراسات الطاقة في المنظمة، بإلقاء كلمة منظمة أوبك نيابة عن معالي الاستاذ هيثم الغيص الامين العام للمنظمة، حيث استعرض مخرجات التقرير السنوي الذي يصدر عن منظمة أوبك حول « آفاق النفط العالمية » قائلاً أنه من المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على الطاقة الأولية من حوالي 291 مليون برميل مكافئ نفط يومياً في عام 2022 إلى ما يقرب من 359 مليون برميل مكافئ نفط يومياً في عام

2045، أي بزيادة قدرها 68.3 مليون برميل مكافئ نفط يومياً، أو 23 % خلال فترة التوقعات. وأضاف من المتوقع أن يتباطأ النمو تدريجياً من المعدلات القصيرة الأجل المرتفعة نسبياً إلى زيادات أكثر تواضعاً على المدى الطويل، وذلك تماشياً مع اعتدال النمو السكاني والاقتصادي. وسيكون نمو الطلب على الطاقة مدفوعاً من قبل الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، والذي من المتوقع أن يرتفع بمقدار 69 مليون برميل يومياً خلال فترة التوقعات. ومن المتوقع أن يأتي نحو 28 % من النمو خارج بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية من الهند وحدها. وفي الوقت نفسه، من المتوقع أن ينخفض الطلب على الطاقة في بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بشكل هامشي خلال فترة التوقعات. وقال

الكاظمي، من المتوقع أن يزداد الطلب على جميع أنواع الوقود الأولية على المدى الطويل، باستثناء الفحم بسبب سياسات الطاقة والالتزامات المناخية. ومن المتوقع أن يكون النمو الأقوى لمصادر الطاقة المتجددة الأخرى (لا سيما الرياح والطاقة الشمسية)، والتي ستزيد بمقدار 34.3 مليون برميل في اليوم، بناءً على الدعم القوي للسياسات في العديد من المناطق. وأشار أنه من المتوقع أن ترتفع حصة مصادر الطاقة المتجددة الأخرى في مزيج الطاقة من حوالي 2.7% في عام 2022 إلى 11.7% في عام 2045. وسيتم الطلب على النفط بقوة أيضاً، وعلى الرغم من انخفاض حصته في مزيج الطاقة بشكل متواضع، فسيظل النفط مستحوذاً على الحصة الأكبر بحلول عام 2045 بنسبة 29.5%. ومن المتوقع أن يرتفع الطلب على الغاز الطبيعي بمقدار 20 مليون برميل يومياً خلال فترة التوقعات، ليصل إلى 87 مليون برميل يومياً في عام 2045. وستتخفص حصة الوقود الأحفوري في مزيج الطاقة من أكثر من 80% في عام 2022 إلى حوالي 69% في عام 2045، بسبب انخفاض حصة الفحم بشكل ملحوظ. وفي الفترة نفسها، لا تزال حصة النفط والغاز مجتمعة في مزيج الطاقة تمثل 54% في عام 2045.

## كلمة شركة سوناطراك الجزائرية



تطرق الرئيس/المدير العام السيد رشيد حشيشي في كلمته الى التحديات التي تملئها الاحتياجات المستقبلية للطاقة، وتحديدًا الغاز الطبيعي الذي يعتبر طاقة انتقالية أساسية و محورية، فضلا عن اعتماد الطاقات المتجددة التي تحقق مكاسب اقتصادية واجتماعية وتساهم في التقليل من البصمة الكربونية. واعتبر رشيد حشيشي، استئناف نشاط شركة سوناطراك في حوض غدامس غرب ليبيا، يعد تأكيدًا على التزام الجزائر الواضح تجاه التنمية الطاقوية في المنطقة، وعلى بداية طور جديد من الشراكات مع دولة ليبيا.

## حلقة نقاشية بعنوان

## « ليبيا الجديدة مبنية على الطاقة »



تحدث في هذه الجلسة عضو مجلس إدارة المؤسسة الوطنية للنفط خليفة عبد الصادق، الذي أشار إلى إن ليبيا تخطط لطرح مناقصات للنفط والغاز في الربع الأخير من العام الحالي، والتي ستكون جاذبة للغاية للمستثمرين، وتعد جولة التراخيص هذه هي الأولى للبلاد منذ العام 2007 حيث تنطلق ليبيا إلى زيادة الإنتاج والصادرات بعد أكثر من عقد من حالة عدم الاستقرار السياسي الذي أصاب نشاط التنقيب عن موارد جديدة بالشلل. وقال عبدالصادق نعمل لتحقيق هذا الهدف في الوقت الحالي، كما نسعى لتطوير قاعدة البيانات وتحديد المجالات، وكذلك قياس الشروط المالية مقارنة بدول المنطقة، وأردف قائلاً أن جولة العطاءات التي طال انتظارها ستكون أساسية للحفاظ على مستويات الإنتاج في ليبيا في المستقبل. وأوضح أنه يمكن الوصول إلى هدف الإنتاج قصير المدى البالغ مليوني برميل يوميا باستخدام الأصول الحالية للمؤسسة، علماً أن أقصى إنتاج لليبيا استقر عند نحو

1.2 مليون برميل يوميا، وتابع ما يتعين علينا القيام به هو مجرد تعزيز تطوير الحقول وإعادة تنشيط آبار النفط المغلقة. بدوره، أكد المدير الإداري لشركة «إيني» شمال أفريقيا أنطونيو بالداसार أن ليبيا تمثل سوقا تنافسية للغاية من منظور الطاقة ومن حيث وصولها إلى الأسواق المتميزة، لكن يمكن تحسين البنية التحتية بشكل أكبر. وقال بالداसार إن ليبيا بحاجة إلى استعادة ثقة شركات الخدمات، التي تساعد شركات الطاقة في التنقيب ونقل النفط والغاز إلى مصافي التكرير.

### حلقة نقاشية بعنوان

## «الطاقات المتجددة داعم للتحول الاقتصادي»



من أهم ما تم التطرق إليه في هذه الجلسة أن ليبيا تسعى إلى الالتزام بلعب دور محوري في السوق الدولية بتزويد أوروبا بالطاقات المتجددة، فيما تعمل على جعلها محورا رئيسيا لتوليد الكهرباء من الشمس والرياح بحلول العام 2030. وتم بيان الإمكانيات الكبيرة للتحول نحو الطاقة المتجددة في ليبيا، حيث ان 88 % من أراضي البلاد

الشاسعة صحراوية، ووفق تحليل بيانات متوسط سرعة الرياح تتراوح ما بين 6 و7.7 متر في الثانية على ارتفاع 40 مترا فوق مستوى سطح الأرض، مما يؤكد إمكانات طاقة الرياح القوية في البلاد. وفيما يتعلق بإمكانات الطاقة الشمسية، تتمتع ليبيا بحوالي 3200 ساعة سطوع سنوية ومتوسط إشعاع يبلغ 6 كيلووات في الساعة لكل متر مربع في اليوم. وللإشارة فإن كل كيلومتر مربع من صحراء ليبيا يتلقى طاقة شمسية تعادل 1.5 مليون برميل من النفط الخام سنويا.

وبموجب خطتها الاستراتيجية للطاقة المتجددة 2013-2025، تهدف الحكومة الليبية إلى مساهمة مصادر الطاقة المتجددة بنسبة 10 % في مزيج الطاقة بحلول العام 2025 و30 % بحلول العام 2030. وتوقعا للزيادة في احتياجات الطاقة، أطلق جهاز الطاقات المتجددة في ليبيا عديد المشاريع الطموحة لتنمية قدرة الشبكة الوطنية للكهرباء. ولتسهيل استثمارات الطاقة المتجددة، أبرمت الحكومة الليبية عدة اتفاقيات مع لاعبين عالميين في مجال الطاقة. ففي عام 2021، وقع جهاز الطاقات المتجددة مذكرة تفاهم مع شركة «توتال إنرجي»، بالتعاون مع الشركة العامة للكهرباء الليبية، لتطوير محطة السدادة للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 500 ميغاوات.

ومن المتوقع أن يكون المشروع الأكبر في البلاد، حيث يستفيد من تكنولوجيا الطاقة الشمسية المتطورة بما يصل إلى 1.2 مليون لوح شمسي ويولد 152 تيراواط/ساعة سنويا. وأعربت شركة توتال الفرنسية عن ثقتها في التعامل مع الإطار التنظيمي الحالي في ليبيا، مؤكدة على التزام المشروع بتوفير طاقة أنظف وأكثر موثوقية.

## حلقة نقاشية بعنوان

### « تمويل المشاريع الليبية: الاستثمار، المنافسة، والشراكة »



قال وزير الاقتصاد والتجارة بحكومة الوحدة محمد الحويج إن أصول المؤسسة الليبية للاستثمار المجمدة بسبب العقوبات في الخارج يمكن استخدامها للاستثمار في قطاع النفط في البلاد. وأضاف الحويج نحن لا نريد أن نرى هذه الأصول المجمدة محفوظة في البنوك الأوروبية دون استخدامها، وهي في الواقع تفقد بعض قيمتها، مضيفاً أنه يمكننا إيجاد نظام أو آلية لنتمكن من استخدامه فقط لقطاع النفط. وكشف أن ليبيا تخطط لزيادة ناتجها المحلي الإجمالي إلى نحو 250 مليار دولار، حيث يمثل قطاع النفط والغاز 40% من الاقتصاد. وجرى تجميد العديد من أصول صندوق الثروة السيادية في العام 2011 كجزء من حملة دولية على النظام السابق. وقال أننا وضعنا رؤية لخطة عشرية تستهدف زيادة التنوع الاقتصادي وتقليل الاعتماد على النفط، ولإنجاح الخطة العشرية فإنها تحتاج إلى إسهم الشركات الأجنبية وعلى رأسها الشركات النفطية.

## الملاحظات الختامية

أختتمت أعمال قمة ليبيا للطاقة والاقتصاد التي عقدت في العاصمة طرابلس والتي حضر فعاليتها أكثر من 1300 مشارك من أكثر من 30 دولة منها تركيا وإيطاليا وإسبانيا وفرنسا والجزائر، وعدد من الشركات الرائدة في مجال النفط والغاز والطاقات المتجددة، وعدد من المنظمات العربية والدولية، وقد تم التوصل الى عدد من الاستنتاجات من أهمها:

- قيام دولة ليبيا بوضع رؤية لخطة عشرية تستهدف زيادة التنوع الاقتصادي وتقليل الاعتماد على النفط، ولإنجاح الخطة العشرية فإنها تحتاج إلى إسهام الشركات الأجنبية وعلى رأسها الشركات النفطية
- وضعت الحكومة الليبية خططا لمضاعفة إنتاج النفط، وتطوير البنية التحتية للحقول النفطية، والتوسع في الاستكشاف، بما يدعم المؤسسة الوطنية للنفط والاقتصاد الوطني.
- تخطط دولة ليبيا لطرح مناقصات للنفط والغاز في الربع الأخير من العام الحالي، والتي ستكون جاذبة للغاية للمستثمرين. وجولة التراخيص هذه هي الأولى للبلاد منذ العام 2007 حيث تتطلع دولة ليبيا إلى زيادة الإنتاج والصادرات بعد أكثر من عقد من حالة عدم الاستقرار السياسي الذي أصاب نشاط التنقيب عن موارد جديدة بالشلل.
- الاستمرار في تنفيذ المشاريع المعتمدة فيما يخص نشاط الإنتاج وتطوير الاحتياطي والحفر وصيانة المشاريع.
- الاهتمام بالبحث عن مصادر الطاقة البديلة والمتجددة، بما في ذلك استخدام تكنولوجيا الطاقة الشمسية باستغلال إمكانات ليبيا لإقامة أضخم حقول الطاقة الشمسية في المنطقة.

- دعوة وزارة الاقتصاد والتجارة في دولة ليبيا إلى رفع التجميد عن بعض الأصول الليبية المجمدة في الخارج لاستثمارها في قطاع الطاقة، حيث تسعى دولة ليبيا إلى تحقيق الاستقرار وتحسين بيئة الاستثمار وتشجيع رؤوس الأموال للعمل فيها.

information to readers on the key issues that should be focused on in future R&D. The chapter also highlights the need for facilitating carbon trading.

Chapter 11 addresses briefly the progress of technologies related to fuel production from biomass and waste, which shows that number of technologies are already mature and are being deployed. The chapter also focuses on the potential applications of these technologies in arid regions.

The research concluded that from technology perspectives, CCUS is in a good position for a wider scale deployment, and the efforts that are being exerted worldwide to further develop relevant technologies will enable the introduction of new options across the whole value chain. The research also identified a number of recommendations on both global and regional levels. Foremost among the recommendations is the need for more extensive collaboration among various stakeholders to accelerate development efforts and ensure that CCUS is deployed on a wider scale in line with the goals set for 2050 for GHG emissions.

technologies and their technology readiness level. The chapter then provides a brief review on the commercialization status of capture technologies and compares the advantages and disadvantages of the different categories.

Chapter 7 addresses the subject of CO<sub>2</sub> utilization, which is the main focus of the concept of Circular Carbon Economy. Hence, the subject has been thoroughly reviewed. The chapter initially addresses the current utilization venues for CO<sub>2</sub>, then the technologies for direct physical utilization, which includes enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub>-EOR), and the indirect chemical utilization. Under each of these broad categories, the different options are presented. The chapter is concluded with an assessment of the status of the technologies, the current difficulties, and the future perspective.

Chapter 8 is devoted to the different options for CO<sub>2</sub> sequestration. The focus is on storage in geological formation, since it is currently the most favored storage option. The chapter also addresses the options for sequestration through negative emissions technologies, namely ocean storage, minerals carbonization, and terrestrial carbon removal, and finally presents the future outlook for storage.

Chapter 9 provides a good review on the different CO<sub>2</sub> transport methods, since the subject plays an important role in the future CCUS value chain. The chapter briefly presents the different transport options, including pipelines, ships, road and rail tankers, and briefly addresses the need for hubs to support the linkage between capturing outputs and final utilization or storage. The technologies related to all of these methods are mature and well developed, and some minor policy related issues are required to be addressed.

Chapter 10 provides a brief review of the commercialization of CCUS and the efforts made regarding the economic assessment of CCUS, with focus on the current costs of different CCUS approaches. The purpose is to provide

UNFCCC and IPCC to reach a global agreement on the approach to address global warming, and finally the sources and volume of anthropogenic GHG emissions contribution of both the supply and demand sides.

Chapter 3 addresses the policies and the scenarios that aim at controlling and reducing GHG emissions by global regions and selected countries. These policies were compared with the trends in setting in policies concerning hydrogen.

Chapter 4 includes a review of the decarbonization of the energy intensive industries, which are currently heavily dependent on fossil fuels, and consequently they are among the main contributors to GHG emissions. The chapter includes also a briefing on the protocols that has been developed to determine the levels of emissions from various contributors. Then, the research focused on the oil and gas industries, the iron and steel industries, and the cement industry, since they are among the main contributors to emissions. The efforts that are being taken by these industries was briefly described.

Chapter 5 is an introductory chapter for CCUS. It starts with a definition of various abbreviations used followed by an overview of CCUS and its historical development. This is followed by addressing the potential role of CCUS in the energy transition and an assessment of the efforts that are being exerted currently in developing the relevant technologies based on a statistical survey of the open literature on the subject.

Chapter 6 focuses on carbon capture, which is the first and most important step in the CCUS value chain, since much of the cost is associated with it. The chapter provides an extensive review of the 8 categories of carbon capture technologies, absorption, adsorption, membranes, cryogenic, chemical looping, calcium looping, power generation by Allam cycle, and direct air capture. The focus is mostly on the stages of development of these

## Abstract

# Carbon Capture Utilization and Storage: Prospects of the Decarbonization of the Oil and Gas Industry

---

Dr Mamun Absi Halabi \*  
Dr Faisal Al-Humaidan \*\*

---

Global warming is the main driver for the current energy transition. In order for the transition to achieve its objective of limiting 2°C, and preferably to 1.5°C, by 2050, the efforts to reduce greenhouse gas emissions, particularly CO<sub>2</sub>, must be intensified. To achieve this goal, it is now realized that the efforts must be directed toward eliminating or substantially reducing CO<sub>2</sub> emissions. It is also realized that to reduce CO<sub>2</sub> emissions, there are two pathways. The first is to accelerate the development and deployment of renewable energy resources, which includes accelerating the development of green hydrogen. The second pathway is to accelerate efforts to decarbonize the current fossil fuel energy system through carbon capture utilization and storage (CCUS) technologies. Both pathways are logical and there are enough reasons to pursue. The second pathway, CCUS, which is the subject matter of this research, enjoys a wealth of knowledge accumulated through its application and deployment over the past decades. An extensive number of research articles, review papers, books, and technical reports related to CCUS has been published, particularly over the past decade. Hence, the objective of this research is focused on reviewing the current status of CCUS technologies, their commercial deployment, and the existing technology gaps.

In Chapter 1, a background on the role of energy in human development, the available fossil fuels, renewable and nuclear energy resources, and the potential future role of fossil fuels were briefly summarized. The objective is to provide the reader with background information that is essential in setting the future paths for meeting future world energy demand.

Chapter 2 is focused on the current challenges facing fossil fuels in light of the objectives of the current energy transitions. These challenges are mainly the GHG emissions of the industry within both the supply and the demand sides. The report started with a briefing on global warming, then the efforts of

\* Principal Scientist, Independent Energy Consultant, Dubai, UAE.

\*\* Research Scientist, Petroleum Research Center, Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait

## Contents

First-Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2022

### Carbon Capture Utilization and Storage: Prospects of the Decarbonization of the Oil and Gas Industry 7

Dr Mamun Absi Halabi, Dr Faisal Al-Humaidan **Abstract 7**

#### Reports

### Libya Energy & Economic Summit

Abdulfattah Dandi **333**

**Oil and Arab Cooperation is an Arab journal aiming at spreading petroleum and energy knowledge while following up the latest scientific developments in the petroleum industry**

Articles published in this journal reflect the opinions of their authors and not necessarily those of OAPEC.

- Articles should not exceed 40 pages (including text, tables, and figures) excluding the list of references. The full text of the article should be sent electronically as a Word document.
- Figures, maps, and pictures should be sent in a separate additional file in JPEG format.
- “Times New Roman” should be used with font size 12. Line spacing should be 1.5. Text alignment should be “justified”.
- Information sources and references should be referred to/enlisted in a clear academic method.
- When citing information from any source (digital, specific vision, or analysis), plagiarism should be avoided. Such information should be rephrased by the researcher’s own words while referring to the original source. For quotations, quotation marks (“...”) should be used.
- It is preferred to write the foreign names of cities, research centres, companies, and universities in English not Arabic.
- The researcher’s CV should be attached to the article if it was the first time he/she cooperates with the journal.
- Views published in the journal reflect those of the authors and do not necessarily represent the views of OAPEC. The arrangement of the published articles is conditioned by technical aspects.
- Authors of rejected articles will be informed of the decision without giving reasons.
- The author of any published article will be provided with 5 complementary copies of the issue containing his/her article.

**Articles and reviews should be sent to:  
The Editor-in-Chief, Oil and Arab Cooperation Journal, OAPEC**

**P.O.Box 20501 Safat -13066 Kuwait  
Tel.: (+965) 24959000 - (+965) 24959779  
Fax : (+965) 24959755**

**E-mail : [oapec@oapecorg.org](mailto:oapec@oapecorg.org) - [www.oapecorg.org](http://www.oapecorg.org)**

## **PUBLICATION RULES**

### **DEFINITION AND PURPOSE**

**OIL AND ARAB COOPERATION** is a refereed quarterly journal specialized in oil, gas, and energy. It attracts a group of elite Arab and non- Arab experts to publish their research articles and enhance scientific cooperation in the fields relevant to the issues covered by the journal. The journal promotes creativity, transfers petroleum and energy knowledge, and follows up on petroleum industry developments.

### **RESEARCH ARTICLES**

The journal welcomes all research articles on oil, gas, and energy aiming at enriching the Arab economic literature with new additions.

### **BOOK AND RESEARCH REVIEWS**

The journal publishes articles presenting analytical reviews on books or studies published on oil, gas, and energy in general. These reviews work as references for researchers on the latest and most important petroleum-industry-related publications.

### **REPORTS**

They tackle a conference or seminar attended by the author on the condition that they are relevant to oil, gas, and energy. Also, the author should obtain the permission of the institution that delegated or sponsored him/her to attend that event allowing him/her to publish their article in our journal. The report should not exceed 10 pages including figures, charts, maps, and tables if available.

### **RESEARCH CONDITIONS**

- Publication of authentic research articles in Arabic which observe internationally recognized scientific research methodology.



## OIL AND ARAB COOPERATION

### *Editor - in - Chief*

#### **Jamal Essa Al Loughani**

Secretary General, Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)

### *Managing Editor*

#### **Abdulfattah Dandi**

Director of Economics Dept. and Supervisor of Media and Library Dept.  
OAPEC

### *Editorial Board*

#### **Eng. Imad Nassif Makki**

Director of Technical Affairs Dept.  
OAPEC

#### **Dr. Dawwod Bahzad**

Director Science and Technology Dept.  
Kuwait Institute for Scientific Research

#### **Dr. Belkacem L aabas**

Chief Economist  
Arab Planning Institute

**Prices**

Annual Subscription ( 4 issues including postage)

**Arab Countries:**

Individuals: KD 8 or US \$25

Institutions: KD 12 or US\$45

**Other Countries:**

Individuals: US\$ 30

Institutions: US\$ 50

All Correspondences should be directed to:  
**Editor-in-Chief of Oil and Arab Cooperation Journal**



# OIL AND ARAB COOPERATION





ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES  
OAPEC

# OIL & ARAB COOPERATION



Volume 51 - 2024 - Issue 188

## First-Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2022

- **Carbon Capture Utilization and Storage: Prospects of the Decarbonization of the Oil and Gas Industry**

**Dr Mamun Absi Halabi, Dr Faisal Al-Humaida**

### Reports

- **Libya Energy & Economic Summit**  
**Abdulfattah Dandi**

