Modern Journal of Health and Applied Sciences *(MJHAS)*

E-ISSN 3078-2791; P-ISSN 3078-2783

Journal homepage: https://mucjournals.muc.edu.ps/index.php/MJHAS

آليات الحد من تغير المناخ: تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه أنموذجا

Mechanisms to Limit Climate Change,Carbon Capture, Utilization and Storage Technology as a Model

Jaber Ghnimi [1*]

[1] Assistant Professor, Interdisciplinary International School, Sousse.

ARTICLE INFO

Received: 11th February 2025
Received in revised form: 24th March 2025
Accepted: 01st April 2025
Published: 15th September 2025

***Corresponding Author:**
Jaber Ghnimi
E-mail:
Janaghnimi4@gmail.com

Citation : Ghnimi, J. (2025). Āliyyāt al-ḥadd min taghayyur al-munākh: Tiknūlūjiyā iltiqāṭ al-karbūn wa-istikhdāmihi wa-takhzīnihi unmūdhajan [Mechanisms to limit climate change: Carbon capture, utilization and storage technology as a model]. *Modern Journal of Health and Applied Sciences*, 2(2), 48-61.

Copyright © 2025 The Author(s). Published by Modern University College.

Open Access

This work is licensed under a Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International license.

DOI: https://doi.org/10.70411/MJHAS.2.2.2025205

ABSTRACT

This study examines the definition of carbon capture, utilisation, and storage technology as one of the approved options for reducing greenhouse gas emissions, achieving carbon neutrality, and achieving net zero carbon emissions. It also analyses the stages and requirements of this technology, which, despite its importance, faces major challenges, most notably the high cost of its infrastructure and its environmental and health damages. The study also addressed the uses and prospects of this technology in the Gulf Cooperation Council countries. It concluded that carbon capture, utilisation, and storage (CCUS) technology is a promising technology for reducing carbon dioxide emissions. It requires the participation of various stakeholders and the establishment of a set of legal, regulatory, and economic frameworks. However, the high costs associated with its infrastructure and the environmental and health impacts it produces have been an obstacle to the widespread use of this technology worldwide. The recommendations included the need to establish legislative and regulatory f rameworks compatible with carbon capture, transport, and storage (CCUS) technology; encourage investment in carbon capture, transport, and storage (CCTS) projects by providing grants, soft loans, and tax exemptions; and enhance international and regional cooperation in the field of CCUS technology.The researcher relied on a plan that outlines the stages and requirements of carbon capture, utilisation, and storage technology in the first section and further examines the feasibility of this technology and its prospects in the Gulf Cooperation Council countries in the second section.

Keywords: Climate change, Carbon capture, Carbon utilisation, Carbon storage, Capacity building.

الملخص

تطرّقت هذه الدراسة إلى عرض تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه باعتبارها من الآليات الحديثة المعتمدة للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة وتحقيق هدف الحياد الكربوني، أي الوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر. كما تناولت مراحل تطبيق هذه التقنية ومتطلباتها المختلفة، مع الإشارة إلى التحديات التي تعيق انتشارها، وعلى رأسها التكلفة المرتفعة للبنية التحتية والتأثيرات البيئية والصحية المصاحبة لها. وناقشت الدراسة كذلك فرص استخدام هذه التكنولوجيا في دول مجلس التعاون الخليجي، واستشرفت آفاق تطويرها في المنطقة. وقد خلصت النتائج إلى أن تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه تُعد من الحلول الواعدة في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، لكنها تتطلب تنسيقًا متعدد الأطراف وإرساء أطر قانونية وتنظيمية واقتصادية مناسبة. غير أن ارتفاع تكاليفها وما قد ينجم عنها من آثار جانبية بيئية وصحية يمثلان عائقًا حقيقيًا أمام تبنيها على نطاق واسع. وبناءً عليه، أوصت الدراسة بضرورة سن تشريعات مرنة تتماشى مع خصوصية هذه التكنولوجيا، وتحفيز الاستثمارات من خلال توفير الدعم المالي، كالقروض الميسرة، والمنح، والتسهيلات الضريبية، إلى جانب تعزيز التعاون الإقليمي والدولي في هذا المجال.اعتمد الباحث في هذه الدراسة على إطار منهجي يُبرز في المبحث الأول مختلف مراحل تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، إلى جانب متطلباتها الأساسية، بينما خُصص المبحث الثاني لتحليل الجدوى التطبيقية لهذه التقنية واستشراف آفاقها المستقبلية داخل دول مجلس التعاون الخليجي.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، استخدام الكربون، تخزين الكربون، التقاط الكربون، بناء القدرات.

المقدمة

يعاني كوكب الأرض من تفاقم ظاهرة التغير المناخي، ويُعد ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الانبعاثات المرتبطة باستخدام الوقود الأحفوري – كالفحم، والنفط، والغاز الطبيعي – من أبرز العوامل المسببة لها. هذه الانبعاثات، الصادرة من وسائل النقل، المنشآت الصناعية، ومحطات توليد الطاقة، تتضمن ما يُعرف بالغازات الدفيئة، التي تمتص الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من سطح الأرض وتُعيد إشعاعها، مما يؤدي إلى تصاعد ظاهرة الاحتباس الحراري وزيادة متوسط درجات الحرارة العالمية.[1]

في سياق الجهود العالمية لمواجهة مخاطر التغير المناخي، تم اعتماد اتفاقية باريس لسنة 2015، والتي تُعد حتى اليوم من أبرز المعاهدات الدولية المعنية بالتصدي لهذا التحدي البيئي. وتُلزم هذه الاتفاقية الدول الموقعة عليها باتخاذ إجراءات فعالة لخفض انبعاثات الغازات الدفيئة التي تسهم في ارتفاع درجات الحرارة على كوكب الأرض. ومن بين أهدافها الرئيسية تحقيق ما يُعرف بـ "الحياد الكربوني" أو "صافي الانبعاثات الصفرية" خلال النصف الثاني من القرن الحادي والعشرين، أي تحقيق توازن بين كميات الانبعاثات الصادرة وتلك التي يتم التخلص منها من الغلاف الجوي. كما تنص الاتفاقية على إجراء مراجعة دورية كل خمس سنوات لتقييم مدى التقدم المحرز نحو تحقيق أهدافها، ضمن آلية تُعرف باسم "التقييم العالمي". وفي هذا الإطار، برزت عدة تقنيات حديثة تهدف إلى تقليص انبعاثات الغازات الدفيئة إلى مستويات يمكن للنظم البيئية الطبيعية التعامل معها والتكيف مع تأثيراتها.

وفي هذا السياق، برزت تقنية احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS) كأحد الحلول المبتكرة، حيث تعتمد على جمع غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن العمليات الصناعية، ثم الاستفادة منه عبر تحويله إلى منتجات قابلة للتسويق والاستخدام التجاري.

عرّفت الوكالة الدولية للطاقة تقنية استخدام الكربون وتخزينه بأنها "عملية تهدف إلى احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن الأنشطة التي تعتمد على المواد الأولية الحيوية – مثل الكتلة الحيوية – لإنتاج الطاقة الحرارية أو الكهرباء أو الوقود الحيوي، ثم نقله وتخزينه بشكل آمن لمنع إطلاقه في الغلاف الجوي".

وقد قام فريق عمل الطاقة الحيوية مع احتجاز وتخزين الكربون، التابع لمنتدى القادة المعنيين بتقنيات احتجاز الكربون، بتعريف هذه التقنية على أنها "نهج يجمع بين استخدام مصادر الطاقة الحيوية بمختلف أشكالها – سواء لإنتاج الكهرباء أو الحرارة أو الوقود – وبين عمليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، بهدف تقليل الانبعاثات بشكل فعال".

أما لجنة التغير المناخي في المملكة المتحدة، فقد قدّمت تعريفًا لتقنية استخدام الكربون وتخزينه، باعتبارها أسلوبًا يعتمد على تحويل مصادر حيوية مثل الكتلة الحيوية، الغاز الحيوي، والنفايات ذات الأصل العضوي إلى طاقة – سواء كهرباء، حرارة، وقود، أو غاز الميثان – مع احتجاز انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن هذه العمليات وتخزينها في تكوينات جيولوجية آمنة.

عرّفت الجمعية العالمية للغاز الحيوي تقنية استخدام الكربون وتخزينه على أنها "دمج بين إنتاج الطاقة وعمليات احتجاز وتخزين الكربون، حيث تُعالج النفايات العضوية داخل وحدات الهضم الحيوي، ويتم خلال هذه العملية التقاط غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج، بهدف منعه من الوصول إلى الغلاف الجوي".[2]

تُستخدم تقنية احتجاز وتخزين الكربون في الولايات المتحدة الأمريكية منذ عام 1972، حيث نجحت منشآت معالجة الغاز الطبيعي في ولاية تكساس في التقاط كميات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون، تجاوزت 200 مليون طن، تم حقنها وتخزينها في طبقات جيولوجية تحت سطح الأرض.

بحسب تقرير المعهد العالمي لاحتجاز وتخزين الكربون الصادر عام 2022، بلغ عدد المشروعات الكبرى في هذا المجال على مستوى العالم 194 منشأة بحلول نهاية ذلك العام، مقارنة بـ51 فقط في عام 2019، مما يعكس نموًا ملحوظًا. وتوزعت هذه المشروعات جغرافيًا على النحو الآتي: 94 مشروعًا في الأمريكيتين، منها 80 في الولايات المتحدة وحدها، و73 في أوروبا، من بينها 27 في المملكة المتحدة، إضافة إلى 21 مشروعًا في منطقة آسيا والمحيط الهادئ، و6 مشروعات في منطقة الشرق الأوسط.

شهدت القدرة الإجمالية لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون في المشروعات قيد التطوير نموًا ملحوظًا خلال عام 2022، حيث وصلت إلى 244 مليون طن سنويًا، مسجلة بذلك زيادة بنسبة 44% مقارنة بالعام السابق، ما يعكس تسارعًا كبيرًا في تبني هذه التقنية عالميًا.

يفيد المعهد العالمي لاحتجاز وتخزين الكربون بأن هذه التقنية قد أثبتت موثوقيتها، حيث يتم استخدامها بشكل آمن وفعّال منذ أكثر من 45 عامًا.[3]

أهمية الموضوع

يُعد التغير المناخي تحديًا عالميًا خطيرًا يهدد مستقبل الإنسانية، ويُعزى بدرجة كبيرة إلى انبعاثات غازات الكربون الناتجة عن الأنشطة الصناعية، ومحطات توليد الطاقة، ووسائل النقل. هذا الوضع يستدعي من المجتمع الدولي تطوير واعتماد حلول تكنولوجية مبتكرة للحد من هذه الظاهرة، ومن أبرز هذه الحلول تقنية التقاط الكربون ونقله واستخدامه وتخزينه، التي بدأ العديد من الدول في تطبيقها بهدف تقليص انبعاثات الغازات الدفيئة.

[1] مصطفى، سالم، العدالة المناخية في ضوء اتفاقية باريس لتغير المناخ، مجلة العلوم القانونية، 2023، ص23.
[2] مصطفى، سالم، العدالة المناخية في ضوء اتفاقية باريس لتغير المناخ، مجلة العلوم القانونية، 2023، ص23.
[3] التقرير العالمي لالتقاط الكربون وتخزينه لعام 2022.

إشكالية البحث

تُعد تقنية التقاط الكربون ونقله واستخدامه وتخزينه من الابتكارات الحديثة التي تلعب دورًا متزايد الأهمية في التخفيف من آثار التغير المناخي. وتتمحور الإشكالية الأساسية لهذا البحث حول دراسة المراحل المختلفة لتطبيق هذه التكنولوجيا، والمتطلبات اللازمة لنجاحها، بالإضافة إلى تقييم مدى جدواها واستشراف آفاق استخدامها في دول مجلس التعاون الخليجي.

تساؤلات البحث

وتتفرع عن الإشكالية الرئيسية مجموعة من التساؤلات الفرعية التي يسعى البحث إلى معالجتها، وهي كالآتي :

1. ما المقصود بتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS)؟
2. ما هي المراحل الأساسية التي تمر بها هذه التقنية؟
3. من هي الأطراف الفاعلة المشاركة في تطبيق هذه التكنولوجيا؟
4. ما الأطر القانونية والتنظيمية والمالية التي تؤطر استخدام هذه التقنية؟
5. ما أبرز المزايا التي تقدمها، وما التحديات التي تعيق انتشارها؟
6. كيف تبدو آفاق تطبيق هذه التكنولوجيا في دول مجلس التعاون الخليجي؟

أهداف البحث

تنبع أهمية هذه الدراسة من الطابع الحديث لتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، باعتبارها من أبرز الحلول الواعدة التي تهدف إلى تقليص الانبعاثات الغازية المسببة لظاهرة التغير المناخي. وقد أدى هذا الدور المحوري إلى جذب اهتمام متزايد من قبل الباحثين وصناع القرار والجهات المعنية بمواجهة تحديات المناخ كافة.

منهجية البحث

اعتمد الباحث في هذه الدراسة على توظيف أكثر من منهج علمي لضمان شمولية التحليل ودقته، حيث استند أولًا إلى المنهج الوصفي التحليلي القائم على الاستقراء والاستنباط؛ وذلك لتحليل تقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه من حيث مكوناتها، جدواها، متطلباتها، وآفاق تطبيقها في دول مجلس التعاون الخليجي. كما استعان بالمنهج المقارن من خلال دراسة تجارب عدد من الدول في هذا المجال، بهدف استخلاص أوجه الشبه والاختلاف وتحديد أفضل الممارسات.

الدراسات السابقة

- بريشي، بلقاسم، الحماية الدولية لمواجهة ظاهرة الاحتباس الحراري، كلية الحقوق والعلوم السياسية، مذكرة لنيل شهادة الماجستير، جامعة سيدي بلعباس، 2017-2018، وتتضمن دراسة للآليات الدولية لمواجهة ظاهرة تغير المناخ.

- مجدي، زينب، تغير المناخ في الدول العربية، بحث منشور في المجلة الدولية للسياسات العامة في مصر، 2023، و يستعرض آثار تغير المناخ والسياسات المتبعة في الدول العربية.

المبحث الأول: مراحل ومتطلبات تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

المطلب الأول: مراحل تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

الفرع الأول: التقاط الكربون

يُقصد بالتقاط الكربون، عملية فصل ثاني أكسيد الكربون المنبعث من محطات توليد الطاقة أو المنشآت الصناعية، وذلك بهدف الحد من تسربه إلى الغلاف الجوي وتقليل تأثيره على المناخ.[4]

توجد عدة طرق لالتقاط الكربون تتمثل في:

أولًا. التقاط الكربون من المصدر

يُطلق على إحدى تقنيات التقاط الكربون اسم "الالتقاط ما بعد الاحتراق"، وتُستخدم لتنقية غازات العادم المنبعثة من مداخن المنشآت الصناعية ومحطات الطاقة، من خلال فصل ثاني أكسيد الكربون عن باقي المكونات الغازية قبل إطلاقها في الجو. يمكن تنفيذ عملية التقاط الكربون من المصدر في ثلاث مراحل مختلفة: قبل الاحتراق، أو أثنائه، أو بعده، وذلك بحسب نوع الوقود والتقنية المستخدمة في إنتاج الطاقة أو العمليات الصناعية.[5]

1. التقاط الكربون قبل الاحتراق

تعتمد هذه التقنية على فصل الكربون من الوقود قبل عملية الاحتراق، وتُعرف بفعاليتها من حيث الكفاءة في تقليل الانبعاثات. غير أن تطبيقها العملي يقتصر على نوع محدد من محطات الطاقة يُعرف باسم "محطة الدورة المدمجة للتغويز (IGCC) "، ما يجعل استخدامها محدودًا من حيث الانتشار.

[4] Yoro KO, Daramola MO. Chapter 1—CO_2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: Rahimpour MR, Farsi M, Makarem MA, editors. Advances in carbon capture. Cambridge: Woodhead Publishing; 2020. p3–5.

[5] فيكرام فيشال، أتسوماسا ساكاي، بريا براساد، خوسيه بينيتيز توريس إنجفيلد اومبادزتفيدف، ريتشارد إسبوزيتو، جورج كوبرنا، باميال تومسكي ميسر بوك سبرينتس باربرا رولينج، أنا روكساس، التقاط الكربون و اسخدامه و تخزينه، كتيب لواضعي السياسات، 2004، ص 27-31.

2. التقاط الكربون بعد الاحتراق

ترتكز هذه التقنية على التقاط غاز ثاني أكسيد الكربون بعد احتراق الوقود، حيث يُفصل عن غازات المداخن الناتجة عن عملية الاحتراق، وذلك باستخدام أنظمة تنقية متخصصة قبل إطلاقها في الغلاف الجوي.

3. التقاط الكربون أثناء الاحتراق

تعتمد هذه التقنية على احتراق الوقود باستخدام الأكسجين النقي بدلًا من الهواء، مما يؤدي إلى توليد غازات مداخن تتكون أساسًا من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء، ما يُسهل عملية فصل الكربون لاحقًا.

ثانيًا. التقاط الكربون من الهواء مباشرة

تعتمد هذه التقنية على إزالة ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء المحيط، بدلاً من استخلاصه من مصدر الانبعاث. ويتم ذلك باستخدام أجهزة متخصصة تحتوي على مواد كيميائية قادرة على الارتباط بجزيئات ثاني أكسيد الكربون وفصلها عن الغلاف الجوي. ورغم أن هذه الطريقة تُعد من الحلول الواعدة في مواجهة التغير المناخي، إلا أنها ما تزال تواجه تحديات كبرى، وعلى رأسها ارتفاع التكاليف وكثرة استهلاك الطاقة.[6]

ومن الأمثلة البارزة على تطبيق تقنية الالتقاط المباشر من الهواء، قيام شركة النفط الأمريكية "أوكسيدنتال" بتطوير أكبر منشأة من هذا النوع بالقرب من عدد من حقول النفط في ولاية تكساس. كما أن شركة "Clime works" السويسرية قامت بإنشاء مشروع "Orca" بالقرب من العاصمة الآيسلندية ريكيافيك، والذي يُعد من المشروعات الرائدة عالميًا في مجال التقاط الكربون من الغلاف الجوي.

الفرع الثاني: نقل الكربون

بعد التقاط ثاني أكسيد الكربون، يُحوّل عادة إلى حالته السائلة تمهيدًا لنقله نحو مواقع التخزين المناسبة. ويتم النقل غالبًا عبر شبكات من الأنابيب البرية أو البحرية، وهي الوسيلة الأكثر استخدامًا نظرًا لانخفاض تكلفتها مقارنة بالوسائل الأخرى. ومع ذلك، قد تُسهم هذه العملية في انبعاثات كربونية إضافية ناتجة عن النقل ذاته. وتجدر الإشارة إلى أن الولايات المتحدة تعتمد هذه الوسيلة منذ قرابة خمسة عقود، حيث تمتلك شبكة تفوق 5000 ميل من خطوط الأنابيب المخصصة لهذا الغرض.

إلى جانب خطوط الأنابيب، يمكن أيضًا نقل ثاني أكسيد الكربون باستخدام وسائل أخرى مثل السكك الحديدية، وذلك عبر عربات صهريجية مضغوطة مصممة لنقل ثاني أكسيد الكربون في حالته السائلة، ما يتطلب تطوير بنية تحتية خاصة لهذا الغرض. كما يمكن استخدام السفن البحرية لنقل كميات كبيرة من الكربون، وقد شهدت اليابان في عام 2023، تدشين سفينة بسعة 1,450 مترًا مكعبًا مخصصة لنقل ثاني أكسيد الكربون المسال. وبالنسبة للمسافات القصيرة، تُستخدم الشاحنات كخيار عملي لنقل كميات محدودة من هذا الغاز.

الفرع الثالث: استخدام الكربون و تخزينه

1- الاستخدام

تشمل تقنيات استخدام الكربون إمكانية تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى منتجات ذات قيمة مضافة، بدلًا من إطلاقه في الغلاف الجوي. ومن أبرز تطبيقاتها استخدام ثاني أكسيد الكربون في عمليات الاستخلاص المعزز للنفط واسترجاع الغاز عبر تقنيات متقدمة. كما يمكن تحويله إلى مجموعة متنوعة من المنتجات الصناعية، مثل مواد البناء، والخرسانة، وأسود الكربون، والألياف الكربونية، والبلاستيك، وغيرها من المواد التي تدخل في سلاسل القيمة الصناعية.

2- التخزين

تعتمد عملية تخزين ثاني أكسيد الكربون جيولوجيًا على حقنه في تكوينات أرضية مناسبة، مثل الخزانات النفطية والغازية المستنفدة، والتكوينات الجيولوجية الحاوية للمياه المالحة العميقة، بالإضافة إلى طبقات الفحم غير القابلة للاستخراج، وذلك بهدف عزله بشكل آمن وطويل الأمد عن الغلاف الجوي.[7]

المطلب الثاني: متطلبات تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

تتطلب تقنية استخدام الكربون وتخزينه تضافر جهود عدة جهات فاعلة، إلى جانب العمل على تطوير القدرات البشرية والتقنية (الفرع الأول)، كما تقتضي وجود أطر قانونية، تنظيمية، ومؤسساتية ملائمة لضمان نجاح تنفيذها (الفرع الثاني).

الفرع الأول: المشاركة وبناء القدرات

أولًا. المشاركة

تتطلب تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه تعاونًا متعدد الأطراف، يشمل الجهات الآتية:

1. **صانعو السياسات**: يتمثل دورهم في وضع الإطار العام لتطوير هذه التقنية، من خلال دعم السياسات المشجعة للابتكار، وتعزيز التعاون بين القطاعين العام والخاص، إضافة إلى إشراك مختلف أصحاب المصلحة في عمليات صنع القرار.
2. **الجهات التنظيمية**: تضطلع بمهمة إعداد الأطر القانونية والتنظيمية اللازمة، ومراقبة تنفيذها، فضلًا عن مراجعة وإصدار التصاريح المتعلقة بالمشروعات.
3. **مطورو المشاريع**: يتولون مسؤولية تنفيذ المشروعات على الأرض، من خلال التخطيط، وتقييم أصحاب المصلحة، والتواصل الداخلي والخارجي لضمان قبول المجتمع ودعم الأطراف المعنية.

[6] طواهرية، منى، التغيرات المناخية ورهانات السياسة البيئية الدولية، مجلة اقتصاديات شمال افريقيا، 2020، ص27.

[7] المدهون، إبراهيم رباح، محاسبة الكربون ومخاطر التغيرات المناخية، مجلة المحاسب الفلسطيني، ديوان الرقابة الإدارية والمالية، 2023، ص57.

4. **المجتمع**: يُعد فاعلًا أساسيًا في هذه المنظومة، من خلال مشاركته في الحوارات المجتمعية، والمطالبة بالمعلومات، والتعبير عن المخاوف، والضغط على الجهات المختصة لضمان مراعاة الأبعاد البيئية والاجتماعية للتقنية.

وجدير بالذكر أن نجاح تنفيذ هذه التقنية بشكل آمن وفعّال يستلزم تفاعلًا وتنسيقًا مستمرًا بين جميع الأطراف المعنية، بما يضمن تبادل الخطط، وتشارك المعلومات، ومعالجة التحديات المشتركة.

ثانيًا. بناء القدرات

يتحقق بناء القدرات الضرورية لتطبيق تقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه من خلال عدة وسائل رئيسية، من بينها:

1. **التوعية بالمشروع**

وذلك عبر تنفيذ مشروعات ناجحة على أرض الواقع، وتنظيم حملات إرشادية وعروض توعوية لشرح أهمية التقنية وآلية عملها، بهدف تعزيز القبول المجتمعي والدعم المؤسسي.

2. **تأسيس شبكات قوية**

تهدف إلى تعزيز التعاون والتواصل بين مختلف الجهات المعنية بتنفيذ مشروعات التقاط الكربون، بما يضمن تبادل الخبرات وتنسيق الجهود بين الفاعلين.

3. **إنشاء مراكز متخصصة للاختبار والتدريب**

تتولى هذه المراكز مهام تطوير واختبار تقنيات الالتقاط والتخزين، إضافة إلى تدريب الكفاءات المستقبلية اللازمة لتشغيلها. فعلى سبيل المثال، أطلقت الهند في عام 2021، أول مركز وطني للتميز في هذا المجال، يُعنى بتطوير التصاميم المبتكرة، وتعزيز التعاون العلمي والتقني، وتوجيه جهود البحث والابتكار نحو تطبيقات فعالة لتقنية التقاط الكربون. ويعمل هذا المركز على تحويل ثاني أكسيد الكربون الملتقط إلى مواد كيميائية، إلى جانب استخدامه في عمليات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز، مع التركيز على تطوير طرق منخفضة التكلفة ومستدامة.

4. **دعم واستثمار البحث والتطوير والانتشار**

يتعيّن على الدولة أن تضطلع بدور محوري في دعم البحث الأكاديمي المتخصص داخل الجامعات والمؤسسات التعليمية، بما يعزز الابتكار في مجال التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه. كما ينبغي على الجمعيات العلمية والمهنية الكبرى في مجالات علوم الأرض والهندسة أن تنخرط في أنشطة بناء القدرات المتعلقة بهذه التقنية. ويشمل ذلك دعم برامج البحث والتطوير في أربعة محاور أساسية: تقنيات الالتقاط، مسارات الاستخدام، وسائل النقل، والحلول الجيولوجية أو التقنية للتخزين.[8] يساهم الاستثمار في البحث والتطوير والنشر العلمي في تعزيز جهود إزالة الكربون والحد من التأثيرات البيئية الناتجة عن الانبعاثات. ويتطلب هذا الاستثمار دعم التقنيات في مختلف مراحل التطوير، بدءًا من البحث الأساسي وصولًا إلى التطبيق العملي على نطاق واسع. ومن الضروري أن لا يُحصر هذا الجهد في مجال واحد فقط، بل يجب أن يشمل طيفًا واسعًا من التطبيقات، بما يساهم في تسريع تبني التكنولوجيا ونشرها كأداة فعّالة في تقليل الغازات الدفيئة.

5. **التدريب والتعليم**

يُعد تثقيف الأفراد وتدريبهم على تقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه خطوة أساسية نحو بناء مستقبل مستدام. وفي هذا الإطار، أُنشئت المدرسة الصيفية الدولية متعددة التخصصات عام 2007، لتقديم برامج تدريبية مكثفة تمتد لأسبوع، تستهدف الباحثين والعلماء الراغبين في تعميق فهمهم لهذه التكنولوجيا. كما أطلق مكتب الطاقة الأحفورية وإدارة الكربون، التابع لوزارة الطاقة الأمريكية، منذ عام 2004، مبادرة "التجربة البحثية في عزل الكربون"، وهي برنامج تعليمي رائد يوجَّه إلى الطلاب والمهنيين، بهدف إعداد جيل جديد من المختصين القادرين على قيادة قطاع تقنيات الكربون والمساهمة في التحول نحو الطاقة النظيفة.

الفرع الثاني: توفير الأطر القانونية والمالية

يتطلب نجاح تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه توفر بيئة تشريعية وتنظيمية داعمة، تشمل من جهة أولى **أطرًا قانونية وتنظيمية** واضحة (أولًا)، ومن جهة ثانية **أطرًا مالية واقتصادية** محفّزة (ثانيًا)، وذلك لضمان استدامة هذه المشروعات وتسريع تبنّيها على نطاق واسع.

أولًا. إقرار الأطر القانونية والتنظيمية

يتجسد الإطار القانوني والتنظيمي لتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه في مجموعة السياسات، والتشريعات، والآليات القانونية التي تُعنى بدعم تطوير هذه الصناعة الناشئة، وضمان توافقها مع معايير حماية البيئة. وفي هذا السياق، من الضروري وضع أطر واضحة تشمل ما يلي:

1. ضبط معايير الأداء

- المعايير الوطنية

تُعرّف معايير الأداء باعتبارها أدوات تنظيمية تُلزم الشركات والمؤسسات الصناعية بخفض مستويات الانبعاثات الكربونية الناتجة عن أنشطتها. وتهدف هذه المعايير إلى دفع المؤسسات نحو تبني تقنيات أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. فعلى سبيل المثال، قد تقوم بعض الدول بسنّ معايير

[8] بنزايد، سارة، تأثير السياسة الطاقوية على تغير المناخ في إطار التنمية المستدامة، مجلة الريادة لاقتصاديات الأعمال، 2016، ص33.

محددة لقطاع صناعة السيارات، تُلزم الشركات المنتجة بتطوير مركبات تُظهر أداءً محسّنًا من حيث استهلاك الوقود، وتقليل الانبعاثات الناتجة عن عملية التشغيل.[9] وينطبق الأمر كذلك على فرض معايير خاصة بصناعة وتشغيل السيارات الكهربائية، التي تعتمد على الطاقة الكهربائية بدلًا من الوقود الأحفوري. وتمتاز هذه المركبات بعدة فوائد بيئية مقارنة بالسيارات المزودة بمحركات احتراق داخلي، من أبرزها تقليص التلوث الهوائي المحلي، نظرًا لعدم انبعاث ملوثات العادم منها، مثل المركبات العضوية المتطايرة، الهيدروكربونات، أول أكسيد الكربون، الأوزون، الرصاص، وأكاسيد النيتروجين بمختلف أنواعها.

- المعايير الدولية

تُعتمد المعايير الدولية من خلال توافق بين الدول الأعضاء ضمن إطار **المنظمة الدولية للتوحيد القياسي(ISO)** ، والتي تضم في عضويتها دولًا ومنظمات تمثيلية، يشارك عنها خبراء دوليون مختصون في مختلف المجالات. يتولى هؤلاء الخبراء إعداد وصياغة المبادئ التوجيهية الخاصة بكل معيار، قبل أن تُعرض على التصويت لاعتمادها رسميًا. ومن أبرز هذه المعايير ذات الصلة بتكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، معيار **(ISO/TC 265)**، الذي أُنشئ عام 2011، ويُعنى بوضع المواصفات الفنية والتنظيمية لهذه التقنية، مما يساهم في توحيد الأطر المرجعية وتسهيل اعتمادها وتطبيقها داخل كل دولة.

2. اعتماد أُطر التحرك المبكر

والتي تتمثل في:

1. وضعَ الاتحاد الأوروبي إطارًا تشريعيًا لتخزين ثاني أكسيد الكربون منذ عام 2009، من خلال التوجيه **EC/2009/31** المتعلق بالتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون، والذي يحدد القواعد الفنية والبيئية لضمان سلامة عمليات التخزين تحت الأرض. كما تم التنصيص على تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه ضمن **قانون صناعة الحياد الصفري (Net-Zero Industry Act)**، باعتبارها من التقنيات الأساسية لتحقيق أهداف الاتحاد الأوروبي في خفض الانبعاثات الكربونية والوصول إلى الحياد المناخي.
2. يُعد برنامج الفئة السادسة للتحكم في الحقن تحت الأرض في الولايات المتحدة الأمريكية أحد المبادرات المهمة التي تهدف إلى حماية المصادر الجوفية لمياه الشرب من التأثيرات السلبية لأنشطة الحقن تحت الأرض. ويتم إدارة هذا البرنامج حاليًا على المستوى الفيدرالي، باستثناء ثلاث ولايات هي داكوتا الشمالية، وايومنغ ، ولويزيانا، حيث تدير هذه الولايات البرنامج بشكل مستقل.[10]
3. الإطار التنظيمي النموذجي للوكالة الدولية للطاقة: يُعد المثال المتعلق بالإطار التنظيمي للمسؤولية خلال مرحلة النقل من نقطة الانطلاق إلى موقع التخزين أحد الأمثلة المبكرة على تحديد المسؤوليات. وقد تضمن هذا الإطار ثلاث طرق رئيسية لمعالجة المسؤولية طويلة الأجل: إما من خلال تحميل السلطة المختصة المسؤولية، أو تحميل المسؤولية للمشغل، أو عدم التنصيص على المسؤولية طويلة الأجل بشكل صريح، وفي هذه الحالة يُفترض بالمشغل أن يتحمل المسؤولية عن موقع التخزين بشكل دائم. وتجدر الإشارة إلى أن قاعدة الفئة السادسة تتطلب رعاية الموقع بعد الحقن لمدة 50 عامًا، حيث يُلزم المشغل بمراقبة عمود ثاني أكسيد الكربون وضمان استمرار المسؤولية المالية.
4. تنص توجيهات الاتحاد الأوروبي المتعلقة بتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه على تحميل المشغل مسؤولية موقع التخزين حتى مرحلة النقل، وهي فترة تمتد لمدة لا تقل عن 20 عامًا بعد توقف الحقن وإغلاق الموقع.

3. اعتماد الاتفاقيات الدولية

وتتمثل في:

1. اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار لعام 1982: على الرغم من أن هذه الاتفاقية لم تنظم تقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه بشكل صريح، إلا أن المادة (210) منه تنص على أن إلقاء النفايات يُعتبر شكلًا من أشكال التلوث. كما تُلزم المادة (195) بعدم نقل الأضرار أو المخاطر، سواء بشكل مباشر أو غير مباشر، من منطقة إلى أخرى.
2. بروتوكول عام 1996 للاتفاقية المتعلقة بمنع التلوث البحري الناجم عن إلقاء النفايات والمواد الأخرى لعام 1972 (بروتوكول لندن): يُعد بروتوكول لندن معاهدة قانونية دولية شاملة تهدف إلى حماية البيئة البحرية، ويشمل البروتوكول (54) طرفًا متعاقدًا. ويحظر البروتوكول تصدير ثاني أكسيد الكربون للتخزين البحري، حيث يُعتبر ذلك بمثابة التخلص منه في البحر، مما يتعارض مع أهداف حماية البيئة البحرية.
3. اتفاقية بازل لعام 1989: تنص هذه الاتفاقية على ضرورة إخضاع التجارة الدولية في النفايات الخطرة للموافقة المسبقة أو الرفض من قبل الدول المتلقية، مما يضمن حماية البيئة والصحة العامة من المخاطر المحتملة الناتجة عن هذه النفايات.
4. اتفاقية بشأن تقييم التأثير البيئي في سياق عابر للقارات (اتفاقية أسبو): تضم الاتفاقية (45) طرفًا متعاقدًا، وتُلزم الأطراف بتقييم الآثار البيئية لأنشطتها العابرة للحدود خلال المراحل الأولى من تخطيط المشروع. ويخضع مشروع هذه التقنية لمقتضيات الاتفاقية إذا تم تنفيذها داخل أراضي الأطراف المتعاقدة أو من خلالهم.[11]

[9] A. Behfar, M. M. , Optimizing energy performance of a neighborhood via IMM® methodology: Case Study of Barcelona. NTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT., 2013, p174.

[10] Carter, A. K. , Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. University of Manchester, 2010,p85.

[11] Carter, A. K. , Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. University of Manchester, 2010,52.

5. اتفاقية بشأن الوصول إلى المعلومات والمشاركة العامة في اتخاذ القرار والوصول إلى العدالة في الأمور البيئية (اتفاقية آرهوس): تضم هذه الاتفاقية (48) طرفًا متعاقدًا، وتُلزم الدول الأطراف بالامتثال لمتطلبات المشاركة العامة فيما يتعلق بالأنشطة التي قد يكون لها تأثير كبير على البيئة، مما يضمن شفافية أكبر ويعزز مشاركة المجتمع في اتخاذ القرارات البيئية.
6. اتفاقية باريس: تم إقرار اتفاقية باريس في عام 2015، وهي تُعد واحدة من أهم الاتفاقيات الدولية لمكافحة التغير المناخي على مستوى العالم. وقد شملت الاتفاقية مطالبة الدول الأطراف بخفض الانبعاثات المسببة لارتفاع درجات حرارة الأرض. وتنص على أن المتوسط العالمي لدرجات الحرارة يجب أن يبقى "أقل بكثير" من درجتين مئويتين فوق مستويات ما قبل الصناعة، مع التزام الدول بمواصلة جهودها للحد من ارتفاع درجات الحرارة إلى 1.5 درجة مئوية. كما تهدف الاتفاقية إلى تحقيق ما يُعرف بـ "الحياد الكربوني" أو "صافي صفر انبعاثات" في النصف الثاني من القرن الحالي، مما يعني توازن كميات الغازات الدفيئة المنبعثة مع تلك التي تمت إزالتها من الغلاف الجوي.
7. وتتضمن الاتفاقية أيضًا إلزام الدول بتقييم تقدمها كل خمس سنوات في ما يتعلق بتنفيذ أهداف الاتفاقية من خلال عملية تُعرف بـ "التقييم العالمي". كما توفر المادة (6) إرشادات أساسية لنقل تخفيض الانبعاثات بين الدول وتشجع القطاع الخاص على الاستثمار في الحلول البيئية المستدامة. وتقدم هذه المادة إطارًا جديدًا للتعاون عبر الحدود قائمًا على السوق، يتضمن آلية إئتمان مركزية جديدة تشبه آلية التنمية النظيفة.[12]

4. إصدار إستراتيجيات وتشريعات

من الضروري أن تقوم الجهات الحكومية بإصدار إستراتيجيات واضحة تحدد الخطوات التي تنوي الدولة اتخاذها لتطوير تقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه. ويجب أيضًا إصدار التشريعات واللوائح المنظمة لهذه التقنيات، بالإضافة إلى تحفيز تطبيقاتها من خلال سياسات تدعم الابتكار والاستثمار في هذا المجال.

ثانيًا. إقرار الأطر المالية والاقتصادية

يتعين على الدولة تشجيع تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه من خلال اتخاذ التدابير الآتية :

1. فرض ضريبة على الكربون

في إطار مكافحة الانبعاثات الدفيئة، وخاصة ثاني أكسيد الكربون، يجب على الدولة فرض ضريبة على الانبعاثات الكربونية وفقًا لحجمها وتأثيرها البيئي. وتهدف هذه الضريبة إلى تحفيز الشركات على الاستثمار في التقنيات منخفضة الكربون وتبني ممارسات أكثر استدامة. ففي عام 2012، أصدرت اليابان ضريبة على الكربون، بينما فرضت سنغافورة أيضًا ضريبة على الكربون في عام 2019، تبدأ من 5 دولارات للطن من مكافئات ثاني أكسيد الكربون، مع زيادة تدريجية تصل إلى 50-80 دولارًا للطن بحلول عام 2030.

في عام 2023، فرض الاتحاد الأوروبي ضريبة الكربون على المنتجات المستوردة ذات الانبعاثات الكربونية العالية، والمعروفة باسم **آلية تعديل حدود الكربون**. وتشمل هذه الضريبة منتجات مثل الحديد والصلب، والأسمنت، والأسمدة، والألومنيوم، والكهرباء، والهيدروجين، بهدف تقليل التأثير البيئي للمنتجات المستوردة إلى الاتحاد الأوروبي وتشجيع الصناعات العالمية على تبني ممارسات أكثر استدامة.

2. الإعفاءات الضريبية على الاستثمار والإعفاءات الضريبية على الإنتاج

في إطار تشجيع اعتماد تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، تقوم الدولة بمنح إعفاءات ضريبية للشركات المتخصصة في هذا المجال. ففي كندا، على سبيل المثال، تم الإعلان في تشرين الثاني/نوفمبر 2023، عن برنامج للإعفاء الضريبي على الاستثمارات في **CCUS** (التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه)، حيث تم تحديد الإعفاء الضريبي بنسبة 50% للاستثمارات في هذه التكنولوجيا، وبنسبة 37.5% للمعدات المستخدمة في نقل وتخزين الكربون.[13]

وفي الولايات المتحدة الأمريكية، يُعد **الإعفاء الضريبي الموسع 45 Q** الذي تم تقديمه في عام 2018، من الحوافز المهمة لتشجيع تخزين ثاني أكسيد الكربون. كما قدم **قانون الحد من التضخم الأمريكي** لعام 2022، إعفاءً ضريبيًا قدره 50 دولارًا لكل طن متري من ثاني أكسيد الكربون يتم التقاطه باستخدام تقنيات التقاط واستخدام وتخزين الكربون، مما يعزز من تبني هذه التكنولوجيا على نطاق واسع.

3. تحديد نظام التجارة بالانبعاثات

يحدد هذا النظام الحد الأقصى لحجم الانبعاثات المسموح بها من خلال تخصيص حصص انبعاثات يتم التعبير عنها كبدلات. على سبيل المثال، نص **نظام تداول الانبعاثات** للاتحاد الأوروبي على تحديد حد أقصى إجمالي للانبعاثات المسموح بها، حيث يتعين على الجهات المصدرة للانبعاثات دفع بدلات تبادل الانبعاثات الخاصة بها. وإذا كانت الانبعاثات أقل من المسموح به، يتيح هذا النظام للباعثين إمكانية تداول الكميات الزائدة إلى بواعث أخرى. كما تقوم الدولة بشراء المنتجات الكربونية المنخفضة من محطات التقاط الكربون وتخزينه، دعمًا لهذه التكنولوجيا.

[12] Capture Utilisation and Storage CCUS dans la transition énergétique, Association Evenement Ose,Presse des Mines, le role du carbon ,2022,p75.

[13] Carter, A. K. , Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. University of Manchester, 2010 ,p53.

4. تحفيز البحث والتطوير والنشر

من بين الوسائل التي تساهم في تحفيز نشر تكنولوجيا التقاط الكربون وتخزينه، تقوم الدولة بتشجيع أنشطة البحث والتطوير والنشر العلمي. وقد عمل العديد من الدول مثل الولايات المتحدة، وأوروبا، وكندا، وأستراليا، واليابان، على توفير برامج بحث وتطوير تهدف إلى تسريع نشر هذه التكنولوجيا وتعزيز استخدامها في مختلف القطاعات، مما يسهم في تطوير حلول مبتكرة للتحديات البيئية المرتبطة بتغير المناخ.[14]

5. إنشاء بنوك التنمية متعددة الأطراف

تقوم بنوك التنمية متعددة الأطراف، مثل **بنك التنمية الآسيوي ومجموعة البنك الدولي**، بتوفير موارد متنوعة للبلدان النامية بهدف تطوير البنية التحتية لتقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه. تشمل هذه الموارد منحًا لدعم دراسات الجدوى وصياغة السياسات ذات الصلة، بالإضافة إلى إنشاء منشورات لتبادل المعرفة، وتقديم قروض ميسرة، وإنشاء صناديق خاصة لجذب تمويل الكربون.

6. مبادرات التعويض الكربوني

تهدف هذه المبادرات إلى تعويض الانبعاثات الكربونية من خلال استثمار الأموال في مشروعات تهدف إلى تقليل الانبعاثات وإزالة ثاني أكسيد الكربون، مثل زراعة الأشجار، واستخدام الطاقة المتجددة، وتطوير تقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه.

7. منح القروض والضمانات المالية

تساعد هذه المبادرات في توفير التمويل اللازم لمشروعات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، وهي شائعة في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث يُعد **مكتب القروض** التابع لوزارة الطاقة أحد الأمثلة البارزة. يوفر هذا المكتب دعمًا ماليًا من خلال **قانون تمويل وابتكار البنية التحتية لوسائل نقل ثاني أكسيد الكربون**، ويعمل بالتعاون مع إدارة الطاقة الأحفورية والكربون، بالإضافة إلى **مكتب برامج القروض** التابع لوزارة البيئة. وفي آسيا، تم إنشاء صناديق ذات صلة بتغير المناخ، مثل **صندوق تحفيز العمل المناخي** التابع لبنك التنمية الآسيوي و**صندوق اليابان** التابع للحكومة اليابانية، والتي تدعم الاستثمار في تطوير مشاريع التقاط الكربون وتخزينه.[15] تم إنشاء العديد من **البنوك الخضراء**، وهي مؤسسات مالية متخصصة تهدف إلى تسريع الانتقال نحو اقتصاد منخفض الكربون. تقدم هذه البنوك قروضًا، وضمانات، وأنواعًا أخرى من التعزيزات الائتمانية لدعم وتطوير مشروعات الطاقة المتجددة، ومشروعات خفض الاحتباس الحراري، مثل تقنيات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه. ومن خلال هذا الدور، تساهم البنوك الخضراء في تطوير سوق الطاقة النظيفة والتكنولوجيا المستدامة، كما تشجع على الابتكار والتطوير في هذا المجال.

8. نشاء أسواق المنتجات منخفضة الكربون

إن إنشاء أسواق للمنتجات منخفضة الكربون يُعد خطوة حيوية في تسريع تطوير تكنولوجيا التقاط وتخزين الكربون. تشمل هذه المنتجات الإسمنت منخفض الكربون، والصلب، والمواد الكيميائية، وغيرها من المنتجات الصناعية التي يمكن أن تساهم في تقليل الانبعاثات الكربونية، مما يعزز من تبني تقنيات أكثر استدامة في مختلف القطاعات.

9. الكشف والإبلاغ عن الكربون

يتعين على الشركات أن تتحلى بالشفافية في الكشف عن انبعاثات غازات الدفيئة والإبلاغ عنها. على سبيل المثال، تفرض سويسرا على الشركات ذات الانبعاثات العالية مثل مصانع الإسمنت، والمواد الكيميائية، ومحطات الطاقة، المشاركة في **نظام تداول الانبعاثات** التابع للاتحاد الأوروبي. تحصل هذه الشركات على نقاط عندما تلتزم بمستويات محددة لانخفاض الانبعاثات، وتقوم بتداول هذه النقاط فيما بينها، مما يساهم في إنشاء سوق للانبعاثات. كما يُسمح للشركات متوسطة الحجم بالمشاركة طواعية في هذا النظام. في الهند، يُطلب من أكثر من 1000 شركة مدرجة في البورصة تقديم تقارير مفصلة عن انبعاثاتها.[16]

10. إنشاء أسواق الكربون

توفر **أسواق الكربون** نظامًا لتداول الانبعاثات عبر تصاريح أو شهادات تُعرف باسم **أرصدة الكربون**. يعادل كل رصيد كربون طناً واحداً من ثاني أكسيد الكربون أو ما يعادله من مكافئات ثاني أكسيد الكربون من غازات الدفيئة المختلفة التي تم تقليصها أو إزالتها أو تجنبها. تعمل هذه الأسواق وفقاً لمبدأ العرض والطلب، حيث يزداد الطلب على أرصدة الكربون من قبل الشركات والأفراد الذين يسعون طواعية لتعويض انبعاثات غازات الدفيئة عبر شراء الأرصدة. وتقوم جهات حكومية ومستقلة بإصدار هذه الأرصدة والتحقق من صحتها، مثل **فيرا، غولد ستاندرد، كلايمت أكشن ريسيرف، وسجل الكربون الأمريكي**.

---

[14] Yoro KO, Daramola MO. Chapter 1—CO_2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: Rahimpour MR, Farsi M, Makarem MA, editors. Advances in carbon capture. Cambridge: Woodhead Publishing; 2020. p. 3–28.

[15] الحديثي، أنمارصلاح عبد الرحمن، الالتزام الدولي بحماية المناخ، منشورات الحلبي الحقوقية، الطبعة الأولى، 2016، ص76.

[16] J.L. Fan, S. Shen, M. Xu, Y. Yang, L. Yang, X. Zhang, Cost-benefit comparison of carbon capture, utilization, and storage retrofitted to different thermal power plants in China based on real options approach, Adv Clim Chang Res, 11 (4) (2020), pp. 415-428.

المبحث الثاني: جدوى تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه وآفاقه في بلدان مجلس التعاون الخليجي

تتطلب تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه دراسة جدواها (المطلب الأول)، وآفاقها في دول مجلس التعاون الخليجي (المطلب الثاني).

المطلب الأول: جدوى تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه

تُوفر تكنولوجيا استخدام الكربون وتخزينه العديد من المزايا (الفرع الأول)، إلا أنها تواجه بعض العقبات التي تعيق تطبيقها على نطاق واسع (الفرع الثاني).

الفرع الأول: مزايا استخدام الكربون وتخزينه

تتمثل مزايا هذه التكنولوجيا في فوائد بيئية (أولًا)، وفوائد اقتصادية (ثانيًا).

أولًا.الفوائد البيئية

تساهم تكنولوجيا التقاط الكربون وتخزينه في تقليص انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري والبصمة الكربونية. حيث تقوم هذه التكنولوجيا بحجز كميات ضخمة من ثاني أكسيد الكربون على مر الزمن، مما يساهم في تقليل الانبعاثات الضارة. علاوة على ذلك، فإن حقن ثاني أكسيد الكربون في خزانات النفط يتيح تخزين الكربون الذي كان يمكن أن يُطلق في الغلاف الجوي.[17]

في حال الانتشار الواسع لمشروعات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، يمكن تقليص الانبعاثات السنوية بمقدار 20 مليار طن بحلول عام 2050، وهو ما يعادل أكثر من نصف الانبعاثات العالمية الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري في الوقت الحالي.[18]

ثانيًا. الفوائد الاقتصادية

وتتمثل في:

1. الاستخلاص المعزز للنفط

تعتمد هذه التقنية على حقن ثاني أكسيد الكربون في خزانات النفط تحت الأرض لزيادة الضغط وتقليل لزوجة الزيت، مما يسهل عملية استخراجه. يساعد استخدام ثاني أكسيد الكربون في الاستخلاص المعزز للنفط على تحسين كفاءة استخراج النفط وزيادة القدرة على استخراج كميات إضافية كانت قد تبقى غير مستغلة، مما يساهم في رفع إجمالي الإنتاج. وقد أظهرت تقنيات الاستخلاص المعزز باستخدام ثاني أكسيد الكربون قدرتها على زيادة معدل الاسترداد بنسبة تتراوح بين 20-40% مقارنة بالطرق التقليدية، مما يجعلها تقنية مطلوبة في صناعة النفط والغاز. تركز الشركات على تطبيق هذه التقنية لزيادة الإنتاج في الحقول إلى أقصى حد، مما يعزز أرباحها. على سبيل المثال، حقل ويبورن ميدال في كندا يمثل مثالًا ناجحًا في تطبيق هذه التقنية، حيث شهد الحقل انخفاضًا كبيرًا في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مع زيادة في الإنتاج بنسبة تراوحت بين 10-15%.

تسهم هذه التقنية في إطالة العمر الاقتصادي لحقول النفط، بالإضافة إلى دورها في احتجاز ثاني أكسيد الكربون داخل التكوينات الصخرية تحت الأرض، مما يساعد على تقليل انبعاثاته إلى الغلاف الجوي.

من المبادرات البارزة في هذا المجال، مشروع الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون الذي نفذته شركة نفط الكويت في حقل المناقيش غرب الكويت، والذي أسهم في زيادة عامل الاستخلاص للنفط بنسبة 10%. كما قامت شركة أرامكو السعودية بتطبيق تكنولوجيا التقاط واستخدام الكربون وتخزينه في توليد الطاقة المحلية وفي قطاعات أخرى، حيث استخلصت نحو 99% من إجمالي الغاز المنتج وقلصت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بأكثر من 98 مليون طن متري سنويًا. بالإضافة إلى ذلك، قامت قطر بإنشاء أكبر مرفق لاحتجاز الكربون وتخزينه في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.

2. استخراج الغاز بأساليب متطورة

يتم ذلك عن طريق حقن ثاني أكسيد الكربون في أسفل مكمن الغاز المستفد، مما يساهم في دفع الغاز الطبيعي نحو آبار الإنتاج، ما يعزز من كفاءة استخراج الغاز.

3. استخلاص الميثان المحسن من طبقات الفحم الحجري

يتم ذلك عن طريق ضخ ثاني أكسيد الكربون في طبقات الفحم الحجري، حيث يقوم بإزاحة أي غاز متبقٍ في هذه الطبقات، مما يسهل استخراج الميثان. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن تكنولوجيا استخدام الكربون وتخزينه في مجالات الاستخلاص المعزز للنفط أو الغاز لا تفيد سوى صناعة الوقود الأحفوري، مما يعود بالضرر على المجتمع بشكل عام من خلال استمرار الاعتماد على مصادر الطاقة الملوثة.[19]

4. تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى منتجات أخرى

يمكن استخدام ثاني أكسيد الكربون في تصنيع منتجات متنوعة مثل مواد البناء والخرسانة، بالإضافة إلى أسود الكربون، ألياف الكربون، والبلاستيك. كما يُستخدم في عملية التخمير في مصانع الجعة لإنتاج المشروبات، وكذلك في إنتاج الكربونات مثل بيكربونات الصوديوم التي تُستخدم في صناعة الأدوية والأغذية. يمكن أيضًا الاستفادة من ثاني أكسيد الكربون في استخراج الميثانول لاستخدامه كوقود للطائرات أو تحويله إلى مكونات وقود أخرى، أو في الصناعات الكيميائية. يُستخدم الجرافيت المصنوع من الكربون في تصنيع المحركات الكهربائية، أجهزة التنفس الاصطناعي، وقلم الرصاص. كما تُستخدم ألياف الكربون خفيفة الوزن في صناعة الطائرات،

[17] طواهرية، منى، التغيرات المناخية ورهانات السياسة البيئية الدولية، مجلة اقتصاديات شمال إفريقيا، 2020، ص77.

[18] عبد الهادي نجار، احتجاز الكربون واستخدامه... سوق تدر مئات المليارات وتخفض الانبعاثات، صحيفة الشرق الأوسط، 9 أكتوبر 2022.

[19] المدهون، إبراهيم رباح ، محاسبة الكربون ومخاطر التغيرات المناخية، ص33.

الصواريخ، السكك الحديدية، والأدوات الرياضية. بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم الكربون في صناعة الصفائح الجرافيتية الرقيقة داخل الأجهزة الإلكترونية، وصناعة الدهانات، الحبر، البطاريات، والإطارات المطاطية.

5. معالجة وتحلية المياه

يمكن استخدام ثاني أكسيد الكربون في معالجة وتحلية المياه لجعلها صالحة للاستهلاك البشري. في هذه العملية، يتم استخدام الكربون المنشط الحبيبي لإزالة الملوثات والشوائب عبر الامتصاص الكيميائي. تقوم آلية عمل الفحم المنشط الحبيبي على امتصاص المواد مثل الكلور، مركبات الرائحة، المبيدات الحشرية، الأعشاب الضارة، وغيرها من الملوثات العضوية. أظهرت الدراسات أنه عند معالجة المياه الجوفية باستخدام الكربون المنشط الحبيبي، تصبح المياه صافية تمامًا، حيث يمكن إزالة ما يصل إلى 3.60 و2.55 ملغ من الحديد والمنغنيز لكل غرام من الكربون. وقد تم تطبيق هذه التقنية في عدة دول كجزء من برامج لتحلية المياه، مثل جزر الأنتيل الهولندية، حيث توفر هذه التقنية 50% من مياه الجزيرة.

6. التدفئة والتبريد

يمكن استخدام ثاني أكسيد الكربون في أنظمة التدفئة والتبريد للمنازل بدلاً من المياه. وقد تم تنفيذ أول نموذج تجريبي في العالم لشبكة حرارية تستخدم ثاني أكسيد الكربون في مركب "إنرجي بوليس" بمدينة سيون في سويسرا.

الفرع الثاني: عقبات قائمة

تواجه تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه عدة عقبات، تتمثل في ارتفاع التكلفة والصعوبات التقنية (أولاً)، بالإضافة إلى الأضرار البيئية المحتملة (ثانياً).

أولًا. تكاليف مرتفعة وصعوبات تقنية

1. تكاليف مرتفعة

تُعد تكنولوجيا التقاط الكربون وتخزينه من التقنيات المكلفة، حيث تتطلب استثمارات ضخمة في إنشاء مرافق الالتقاط وتطوير البنية التحتية اللازمة لنقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون. إضافة إلى ذلك، تحتاج هذه التقنية إلى كميات كبيرة من الطاقة. وفي العديد من القطاعات، خاصة قطاع الكهرباء. تُعد الطاقة المتجددة أكثر اقتصادية من الوقود الأحفوري. لذا، من الأفضل تخصيص الميزانيات الكبيرة لدعم مشروعات إنتاج الطاقة النظيفة. وفقًا لوكالة الطاقة الدولية، تتراوح تكلفة التقاط وتخزين الكربون بين 20 و 150 دولارًا أمريكيًا لكل طن متري. في بعض الدول مثل كندا والنرويج، تم تعليق بعض المشروعات المتعلقة بتكنولوجيا التقاط الكربون بسبب الصعوبات المالية.[20]

في الولايات المتحدة الأمريكية، تم إغلاق مشروع بقيمة مليار دولار يهدف إلى استغلال انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في مصنع فحم بولاية تكساس بسبب مشاكل ميكانيكية. ومع ذلك، من المتوقع أن تنخفض تكاليف هذه التقنية مع بدء تشغيل المزيد من المشروعات ، وتحسن التكنولوجيا، وتراجع تكاليف التمويل. ذلك يتم من خلال البحث والتطوير بهدف تقليل التكاليف وجعل هذه التقنية أكثر كفاءة من الناحية الاقتصادية.[21]

2. صعوبات تقنية

تواجه هذه التكنولوجيا تحديات تقنية كبيرة، إذ إن تصميمها معقد ويتطلب دمج العديد من المكونات المتنوعة المخصصة لتطبيقات معينة. فعملية التقاط الكربون من حقل نفط تختلف بشكل كامل عن تلك المخصصة لالتقاط الكربون وتخزينه في مصانع إنتاج الإسمنت، مما يتطلب تكييف تقنيات وطرق مختلفة لكل حالة على حدة.

ثانيًا. أضرار بيئية محتملة

تنتج التأثيرات البيئية المتعلقة بتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه أثناء عمليات التقاط ثاني أكسيد الكربون، نقله، وتخزينه. قد يحدث تسرب للغاز بتركيزات مرتفعة، مما يسبب آثارًا صحية وبيئية خطيرة. ورغم أن هذه التكنولوجيا تهدف إلى تقليل انبعاثات الكربون، إلا أنها قد تسهم في زيادة استهلاك الوقود الأحفوري إذا لم تتم إدارتها بشكل صحيح.

من الجدير بالذكر أن العديد من الشركات التي تعتمد على الوقود الأحفوري تستخدم تقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه لتعزيز قدرتها الإنتاجية، وهو ما يتناقض مع الأهداف العالمية لمكافحة تغير المناخ. إذ إن هذه التقنية قد تساهم في استمرارية استخدام الوقود الأحفوري بدلًا من التوجه نحو مصادر طاقة أكثر استدامة. تُثار أيضًا مخاوف بشأن مدى أمان وفعالية تقنية استخدام الكربون وتخزينه تحت الأرض، خاصة فيما يتعلق بتسربه إلى الغلاف الجوي. إذ يوجد خطر في أن تتعرض أنابيب نقل الكربون للتلف، مما يؤدي إلى تسربه. على سبيل المثال، تم إلغاء مشروع خط أنابيب لالتقاط وتخزين الكربون في الولايات المتحدة الأمريكية، الذي كان يهدف إلى نقل الكربون من مصانع الإيثانول في وسط البلاد إلى مواقع التخزين المناسبة، وذلك بسبب المخاوف التي أبدتها المجتمعات المحلية بشأن احتمال تسرب الكربون.[22]

[20] الحديثي، أنمار صلاح عبد الرحمن، الالتزام الدولي بحماية المناخ، منشورات الحلبي الحقوقية، الطبعة الأولى، 2016، ص79.

[21] S. Kim, H. Shi, J.Y. Lee , CO_2 absorption mechanism in amine solvents and enhancement of CO_2 capture capability in blended amine solvent,Int J Greenh Gas Control, 45 (2016), pp. 181-188.

[22] طواهرية، منى، التغيرات المناخية ورهانات السياسة البيئية الدولية، ص44.

المطلب الثاني: آفاق تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه في دول مجلس التعاون الخليجي

للمساهمة في الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، قامت عدة دول في المنطقة بتطوير قوانين بيئية. ففي البحرين، تم إصدار القانون رقم 7 لسنة 2007، بشأن البيئة في 25 آذار/مارس 2022. بينما تبنت دولة الإمارات العربية المتحدة قانونًا اتحاديًا لحماية البيئة وتنميتها في عام 1999. أما سلطنة عُمان فقد اعتمدت قانون حماية البيئة ومقاومة التلوث في عام 2001. وفي الكويت، تم إقرار قانون حماية البيئة في عام 2014. كما أصدرت المملكة العربية السعودية قانون نظام البيئة في عام 2019، في حين قامت قطر بإقرار قانون حماية البيئة في عام 2002.

قامت دول مجلس التعاون الخليجي بإدراج تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه بشكل صريح ضمن سجل المساهمات المحددة وطنياً بموجب اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية لتغير المناخ، حيث تعهدت البحرين بتخفيض الانبعاثات بنسبة 30% بحلول عام 2035. وأعلنت المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة وسلطنة عُمان عن أهدافها لتحقيق صافي انبعاثات صفري في أعوام 2050 و2060 على التوالي. أما قطر فقد تعهدت بتخفيض الانبعاثات بنسبة 25% بحلول عام 2030. وتسعى الكويت إلى خفض انبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة تصل إلى 80% بحلول عام 2040. كما تطمح سلطنة عُمان إلى تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة 7% بحلول عام 2030 والوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2050. وحتى آذار/مارس 2024، بلغ إجمالي عدد مشروعات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه المخططة في دول مجلس التعاون الخليجي 13 مشروعًا.

تم إنشاء العديد من مشروعات التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه في دول مجلس التعاون الخليجي. ففي قطر، تقوم شركة "قطر غاز" باحتجاز 2.2 مليون طن سنويًا من غاز ثاني أكسيد الكربون من محطة تسييل الغاز في رأس لفان، وتسعى الشركة لرفع هذا المعدل إلى 5 ملايين طن سنويًا بحلول عام 2025. كما تحتجز شركة "قطر للوقود" 0.2 مليون طن سنويًا من غاز الكربون في مصفاة الميثانول. وفي المملكة العربية السعودية، تحتجز شركة "أرامكو" 0.8 مليون طن سنويًا من غاز الكربون في معمل غاز الحوية، حيث يُستخدم الغاز في الاستخلاص المعزز للنفط في حقل نفط العثمانية. أما الشركة السعودية للصناعات الأساسية، فـ تحتجز 0.5 مليون طن سنويًا من الكربون في منشأة الإثيلين في الجبيل لاستخدامه في إنتاج الميثانول واليوريا. وفي الإمارات، تقوم شركة بترول أبو ظبي الوطنية (أدنوك) باحتجاز 0.8 مليون طن سنويًا من ثاني أكسيد الكربون في مصنع الإمارات للحديد في أبو ظبي، وذلك ضمن المرحلة الأولى من مشروع التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه، ومن المتوقع أن تحقق المرحلتين الثانية والثالثة احتجاز 5 ملايين طن سنويًا من غاز الكربون قبل عام 2030.

أنشأت سلطنة عُمان في إطار المبادرات المتعلقة بتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه مشروع "الأفق الأزرق"، الذي يُنفذ بالتعاون بين شركة شل عُمان وشركة أكيو. يهدف المشروع إلى تعزيز جهود سلطنة عُمان في الحد من انبعاثات الكربون ودعم المبادرات البيئية المستدامة في المنطقة.

في الكويت، تم إطلاق عدة مبادرات متعلقة بتقنية التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه. من أبرز هذه المشروعات ، المشروع الذي أنشأته شركة نفط الكويت، والمتعلق بالاستخلاص المعزز للنفط باستخدام ثاني أكسيد الكربون في حقل المناقيش غرب الكويت. هذا المشروع يهدف إلى زيادة عامل الاستخلاص بنسبة تصل إلى 10%. كما أطلقت شركة نفط الكويت مشروعًا مشتركًا مع كل من شركة البترول الوطنية الكويتية وشركة كيبيك، يهدف إلى التقاط أكثر من 100 طن متري من غاز ثاني أكسيد الكربون لاستخدامه على مدى 25 عامًا.

في البحرين، تم استكمال دراسة الجدوى الخاصة بمشروع احتجاز الكربون وتخزينه، الذي يهدف إلى تحقيق 10% من هدف خفض انبعاثات الكربون المحدد للدولة. هذا المشروع يمثل خطوة مهمة نحو تحقيق أهداف البحرين في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة والحد من تأثيراتها البيئية 2035.[23]

فيما يتعلق بأسواق الكربون، ما يزال الطلب والعرض على أرصدة الكربون في دول مجلس التعاون الخليجي في مراحله الأولى. فقد أبدت البحرين اهتمامًا بالتعامل مع آليات السوق والآليات غير السوقية للمشاركة في تعويض الانبعاثات. لتحقيق هذا الهدف، تسعى البحرين إلى إنشاء مخزون الكربون الأزرق في خليج توبلي وزراعة أشجار المانغروف. كما أطلق صندوق الثروة السيادية البحريني منصة "صفاء" الطوعية لتعويض انبعاثات الكربون، وهي مبادرة تهدف إلى تعزيز الجهود الوطنية في مجال مكافحة تغير المناخ.

وفي الكويت، دعم بيت التمويل الكويتي إنشاء أول منصة لتعويض الكربون، بهدف الحد من انبعاثات الكربون من خلال زيادة زراعة أشجار المانغروف وإطلاق مشاريع بيئية جديدة. أما سلطنة عُمان، فقد انتهت من إعداد المسودة النهائية لإطار السياسة العامة لأسواق الكربون، وذلك في إطار سعيها لتنظيم وتنشيط سوق الكربون ودعم الجهود البيئية المستدامة في البلاد.[24]

وسعت قطر إلى العمل كمنسق بين الجهات الفاعلة في الجنوب العالمي في سوق الكربون، حيث استضافت المجلس العالمي للبصمة الكربونية، الذي يُعد أول برنامج طوعي معتمد لتعويض انبعاثات الكربون في المنطقة. هذا البرنامج يعكس التزام قطر بتعزيز ممارسات الاستدامة البيئية والمشاركة الفاعلة في المبادرات العالمية لمكافحة تغير المناخ.

[23] Mari Luomi, Thomas Bosse, and Zlata Sergeeva. Lessons from Gulf Cooperation Council Countries' Participation in the Clean Development Mechanism (Riyadh, Saudi Arabia: King Abdullah Petroleum Studies and Research Center, 2023), Doi: 10.30573/KS–2023-DP04, page 25.

[24] Violet George, "Oman Finalizes General Policy Framework for Carbon Markets," *Carbon Herald*, August 30, 2024, https://carbonherald.com/oman-finalizes-general-policy-framework-for-carbon-marke.

وأنشأت المملكة العربية السعودية صندوق الاستثمارات العامة، وشركة مجموعة تداول السعودية القابضة شركة "الكربون الطوعية الإقليمية"، التي تُعرف اليوم بسوق الكربون الطوعية. وفي المزاد الطوعي الأول الذي نظمته شركة سوق الكربون الطوعية الإقليمية في تشرين الأول/أكتوبر 2022، تم بيع أرصدة تعادل 1.4 مليون طن من الكربون. كما نظمت الشركة مزادها الطوعي الثاني في نيروبي في تموز/يوليو 2023، حيث تم بيع أكثر من 2.2 مليون طن متري من الكربون، مما يعكس التزام المملكة بتطوير أسواق الكربون وتعزيز المبادرات البيئية المستدامة.

في عام 2021، أسست الإمارات العربية المتحدة سجلًا وطنيًا ونظامًا لتداول أرصدة الكربون، بالإضافة إلى بورصة وغرفة مقاصة لتداول أرصدة الكربون، والتي تم إنشاؤها بواسطة شركة "أبركاربون للتداول" ضمن سوق أبو ظبي العالمية. هذه المبادرة تهدف إلى تعزيز مشاركة الإمارات في أسواق الكربون العالمية وتسهيل تداول أرصدة الكربون لدعم الجهود الوطنية لتحقيق أهداف الاستدامة البيئية.

الخاتمة

يتضح من خلال دراسة موضوع تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه كأحد الخيارات للحد من تغير المناخ، أنها تمثل خيارًا مجديًا وعمليًا وواعدًا في مكافحة تغير المناخ وتحقيق مستقبل منخفض الكربون. إلا أنها، رغم فوائدها، ليست الحل الأفضل أو الأسرع لتجنب كارثة الاحتباس الحراري، بل هي جزء من مجموعة من الحلول التي يجب أن تُعتمد بالتوازي مع إستراتيجيات أخرى لتحقيق الأهداف البيئية العالمية.

النتائج

1. تُعد تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه من التقنيات الواعدة في مجال تقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.
2. يتم استخدام ثاني أكسيد الكربون الملتقط في العديد من التطبيقات الاقتصادية والطبية والغذائية، مثل الاستخلاص المعزز للنفط والغاز، وصناعة منتجات أخرى مثل الوقود السائل، بالإضافة إلى تصنيع سلع استهلاكية مثل البلاستيك . تقتضي تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه تعاونًا بين عدة جهات، وتوفر مجموعة من الأطر التشريعية والاقتصادية والسياسية لضمان نجاحها.
3. تُعد تكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه ذات تكلفة عالية من حيث البنية التحتية، ما كان يشكل عائقًا أمام انتشار وتعميم هذه التكنولوجيا على نطاق واسع في العالم.
4. تبنت دول مجلس التعاون الخليجي إستراتيجية للحد من الانبعاثات الدفيئة، من خلال إنشاء عدة مشروعات خاصة بتكنولوجيا التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه.

التوصيات

1. **تحديد دور التقاط الكربون وتخزينه في الاستجابة للإستراتيجيات والخطط المناخية الوطنية**:

يجب أن تساهم تقنيات التقاط الكربون وتخزينه بشكل فعّال في تحقيق الأهداف المناخية الوطنية وتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، مع تحديد دورها في تحقيق أهداف الاتفاقات البيئية الدولية . **وضع أطر تشريعية وتنظيمية لتكنولوجيا استخدام الكربون وتخزينه**: يجب أن تتوفر أطر حوكمة صارمة وتشريعات تنظيمية، مع إنشاء سجلات وطنية مرتبطة بسجل مركزي تابع للهيئة الإشرافية على أسواق الكربون بمنظمة الأمم المتحدة لضمان الشفافية والمساءلة.

2. **تطبيق معايير انبعاثات العادم الصارمة لوسائل النقل**:

من خلال فرض معايير صارمة على السيارات والشاحنات والحافلات، يمكن تقليل التلوث الهوائي وتحسين جودة الهواء، وهو ما يساعد في تعزيز فعالية جهود الحد من التغير المناخي.

3. **تشجيع الاستثمار في مشاريع التقاط ونقل وتخزين الكربون**:

يجب توفير المنح والقروض الميسرة، والإعفاءات الضريبية، وفرض سياسات تسعير الكربون التي تُدرج تكلفة الانبعاثات الكربونية في أسعار السلع والخدمات، مما يساهم في تحفيز الشركات والمستهلكين على اتخاذ قرارات بيئية أكثر استدامة.

4. **تعزيز التعاون الدولي والإقليمي**:

من خلال تبادل المعلومات وبناء القدرات وإقامة شراكات مع مختلف أصحاب المصلحة بما في ذلك الأفراد والمنظمات الحكومية والخاصة والمجتمعات المحلية، يمكن تحقيق تقدم سريع وفعال في مشروعات التقاط الكربون.

5. **دعم وتطوير البحوث في مجال التقاط الكربون**:

يتطلب الأمر تمويلًا كبيرًا للبحث والتطوير في مجال التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه بهدف تحسين التكنولوجيا وجعلها أكثر كفاءة.

6. **خلق قيمة عالية طويلة الأجل لتخزين ثاني أكسيد الكربون**:

ينبغي تطوير إستراتيجيات تضمن أن تكون مشروعات تخزين ثاني أكسيد الكربون مستدامة وذات فائدة اقتصادية وبيئية على المدى الطويل.

7. **العمل على زيادة وعي وتثقيف المجتمع حول تكنولوجيا استخدام الكربون وتخزينه**:

يجب أن تتبنى الحكومات والمنظمات حملات توعية مستمرة لتعريف الجمهور بفوائد هذه التكنولوجيا وكيفية تأثيرها على مكافحة تغير المناخ.

8. **تخفيف إجراءات الحصول على التراخيص**:

تسهيل إجراءات الحصول على التراخيص لمشروعات استخدام وتخزين الكربون، يمكن أن يعزز من سرعة تنفيذ هذهالمشروعات .

9. **إنشاء وتعزيز أسواق الكربون:**

من خلال تعزيز التواصل مع أسواق الكربون العالمية كمشترٍ للأرصدة وفتح أسواق جديدة، يمكن زيادة فعالية هذه الأسواق ودعم الاقتصاد الكربوني العالمي.

10. **إنشاء أنظمة رصد وتحقيق صارمة:**

من المهم تطوير أنظمة دقيقة لرصد انبعاثات الكربون، مع تعزيز قياس البيانات وإعداد التقارير وبناء القدرات المحلية في أسواق الكربون لضمان فعالية التنفيذ.

11. **اعتماد الحلول القائمة على الطبيعة:**

يشمل ذلك حماية واستعادة الغابات الطبيعية، وزراعة الطحالب، وزيادة أشجار المانغروف، واستصلاح الأراضي، بالإضافة إلى استخدام تقنيات جديدة في مجال الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح والطاقة الكهرومائية، واعتماد المركبات الكهربائية. هذا سيسهم في الحد من التغير المناخي وتعزيز قدرة البيئة على امتصاص الكربون.

Conflict of Interest

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Data Availability

No data was used for the research described in the article.

المراجع

أولًا. باللغة العربية

1. الكتب

1. الحديثي، أنمار صلاح عبد الرحمن، الالتزام الدولي بحماية المناخ، منشورات الحلبي الحقوقية، الطبعة الأولى، 2016.
2. المعهد العالمي حول احتجاز الكربون وتخزينه، تقرير حول الحالة العالمية لاحتجاز الكربون وتخزينه، لعام 2022.
3. فيكرام فيشال، أتسوماسا ساكاي، بريا براساد، خوسيه بينيتيز توريس إنجفيلد اومبادزتفيدف، ريتشارد إسبوزيتو، جورج كوبرنا، باميال تومسكي ميسر بوك سبرينتس باربرا رولينج، أنا روكساس، التقاط الكربون واسخدامه وتخزينه، كتيب لواضعي السياسات، 2004.
4. حسن، خالد السيد، التغيرات المناخية والأهداف العالمية للتنمية المستدامة، القاهرة، مكتبة جزيرة الورد، 2021.

2. بحوث ومقالات

1. المدهون، إبراهيم رباح، محاسبة الكربون ومخاطر التغيرات المناخية، مجلة المحاسب الفلسطيني، ديوان الرقابة الإدارية والمالية، 2023، ص24.
2. بنزايد، سارة، تأثير السياسة الطاقوية على تغير المناخ في إطار التنمية المستدامة، مجلة الريادة لاقتصاديات الأعمال، 2016، ص46.
3. بوغاري، ليلى، التغيرات المناخية، مجلة الحقوق والحريات كلية الحقوق العلوم السياسية، القاهرة، 2021.
4. نجار، عبد الهادي، احتجاز الكربون واستخدامه... سوق تدر مئات المليارات وتخفض الانبعاثات، صحيفة الشرق الأوسط، 9 أكتوبر 2022.
5. مروى، سيبوبة حامد، ومحمد صابر، ولاء، آليات التعامل مع ظاهرة زيادة انبعاثات غازات الدفيئة، المجلة المصرية للتنمية والتخطيط، 2021، ص52.
6. سالم، مصطفى، العدالة المناخية في ضوء اتفاقية باريس لتغير المناخ، مجلة العلوم القانونية، 2023، ص44.
7. طواهرية، منى، التغيرات المناخية ورهانات السياسة البيئية الدولية، مجلة اقتصاديات شمال إفريقيا، 2020، ص36.

ثانيًا. باللغة الأجنبية

1. Behfar, A., Alam, M. R., Shahmoradi, R., Tadi, M., & Vahabzadeh, S. (2013). Optimizing energy performance of a neighborhood via IMM® methodology: Case Study of Barcelona. *J. Energy*, *7*, 74-85.
2. Kazmierczak, A., & Carter, J. (2010). Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies.
3. Capture Utilisation and Storage CCUS dans la transition énergétique, Association Evenement Ose,Presse des Mines, le role du carbon ,2022.
4. Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in carbon capture* (pp. 3-28). Woodhead Publishing.

5. Fan, J. L., Shen, S., Xu, M., Yang, Y., Yang, L., & Zhang, X. (2020). Cost-benefit comparison of carbon capture, utilization, and storage retrofitted to different thermal power plants in China based on real options approach. *Advances in Climate Change Research*, *11*(4), 415-428.
6. Kim, S., Shi, H., & Lee, J. Y. (2016). CO2 absorption mechanism in amine solvents and enhancement of CO2 capture capability in blended amine solvent. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *45*, 181-188.
7. Luomi, M., Bosse, T., & Sergeeva, Z. (2025). Lessons from Gulf Cooperation Council countries' participation in the Clean Development Mechanism. *Climate Policy*, 1-16.
8. Violet George, "Oman Finalizes General Policy Framework for Carbon Markets," *Carbon Herald*, August 30, 2024, https://carbonherald.com/oman-finalizes-general-policy-framework-for-carbon-marke.