



منظمة الاقطار العربية المصدرة للبترول
أوابك

النفط والتعاون العربي

المجلد الثاني والخمسون 2025 - العدد 195

عدد خاص
بجائزة أوابك
العلمية لعام
2024

البحث الفائز بالجائزة الأولى لمنظمة أوابك للبحث العلمي (مقدم باللغة الانجليزية)

تحويل الغازات الدفيئة عبر الإيثانول إلى وقود طيران مستدام
باستخدام «محفزات لاتا بيروفسكيت عالية النشاط»

الدكتورة/ داليا رضوان عبد الحافظ محمد

البحث الفائز بالجائزة الثانية لمنظمة أوابك للبحث العلمي (مقدم باللغة العربية)

آفاق دمج تقنيات الطاقة المتجددة، والتقنيات المعتمدة على
مصادرها، في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة بدول أوابك

الدكتور/ مصطفى محمد عرفة مرسي إبراهيم





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 للبترول

النفط والتعاون العربي



رئيس التحرير

م. جمال عيسى اللوغاني
الأمين العام لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

مدير التحرير

السيد/عبد الفتاح دندي
مدير الإدارة الإقتصادية والمشرف على إدارة الاعلام والمكتبة
منظمة أوابك

هيئة التحرير

م. عماد مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية
منظمة أوابك

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
موقع الأوابك على الانترنت www.oapecorg.org

المحتويات

الابحاث

البحث الفائز بالجائزة الأولى لمنظمة أوابك للبحث العلمي (مقدم باللغة الانجليزية)

**تحويل الغازات الدفيئة عبر الإيثانول إلى وقود طيران
مستدام باستخدام «محفزات لاتا بيروفسكيت عالية النشاط»**

9-E _____ الدكتورة/ داليا رضوان عبد الحافظ محمد

البحث الفائز بالجائزة الثانية لمنظمة أوابك للبحث العلمي (مقدم باللغة العربية)

**آفاق دمج تقنيات الطاقة المتجددة، والتقنيات المعتمدة على مصادرها،
في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة بدول أوابك**

7-A _____ الدكتور/ مصطفى محمد عرفة مرسي إبراهيم

البحث الفائق بالجائزة الثانية لمنظمة أوابك للبحث العلمي (مقدم باللغة العربية)

آفاق دمج تقنيات الطاقة المتجددة، والتقنيات المعتمدة على مصادرها، في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة بدول أوابك

الدكتور/ مصطفى محمد عرفة مرسى إبراهيم *



قائمة المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
10	مقدمة
20	ملخص تنفيذي
23	الفصل الأول: تطور الطلب على الطاقة والانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك: خط الأساس وسيناريو الأعمال كالمعتاد (2020-2050)
36	الفصل الثاني: سيناريوهات تبني التقنيات النظيفة وأثرها الكمي على الانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك
53	الفصل الثالث: تحليل الجدوى الاقتصادية والاجتماعية لتقنيات خفض الانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك
69	الفصل الرابع: الأثر الاقتصادي والاجتماعي لتسعير الكربون في دول الأوابك
86	الفصل الخامس: التأثيرات الصحية والبيئية والاجتماعية غير السوقية الناتجة من استخدام التقنيات المتجددة والقابلة للاعتماد علي الطاقة المتجددة لدول أوابك
103	الاستنتاجات والتوصيات
106	ملخص باللغة الإنجليزية Abstract
107	قائمة الأشكال
110	قائمة الجداول
111	المراجع

مقدمة

أهمية موضوع البحث

تُمثل مسألة التحول في أنظمة الطاقة أحد أعقد التحديات التي تواجه دول العالم عمومًا، والدول العربية الأعضاء في منظمة أوبك خصوصًا، في ظل الحاجة الملحة لتحقيق توازن بين الأمن الطاقوي، والتنمية الاقتصادية، والحفاظ على البيئة. ومع التغيرات الجذرية في أسواق الطاقة العالمية، واشتداد الضغوط المناخية والسياسية والاقتصادية، أصبح من الضروري إعادة التفكير في بنية استهلاك الطاقة في القطاعات المختلفة، وبالأخص في القطاعات غير الكهربائية، والتي تشكل النسبة الأكبر من استهلاك الطاقة النهائي في الدول النامية.

تكتسب القطاعات الثلاثة المدروسة في هذا البحث — النقل، التدفئة، والتبريد — أهمية خاصة لعدة أسباب. أولاً، لأنها تعتمد اعتماداً شديداً كلياً على مصادر الوقود الأحفوري، خاصة المشتقات النفطية، ما يجعلها من أكبر مصادر الانبعاثات الكربونية. ثانياً، لأنها تشهد معدلات نمو مرتفعة في الطلب، مدفوعة بالزيادة السكانية، والتحضر، وارتفاع مستويات المعيشة، وتغير أنماط الاستهلاك. وثالثاً، لأن التحول فيها نحو مصادر طاقة نظيفة يواجه تحديات فنية واقتصادية وسلوكية أكبر بكثير من قطاع الكهرباء.

تشير التقديرات إلى أن الطلب على الطاقة في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة بدول أوبك سيزداد بنسبة تقارب 91% بحلول عام 2050 مقارنةً بمستويات عام 2025، مما يجعل هذه القطاعات من بين الأسرع نمواً في استهلاك الطاقة، ويُسلط الضوء على أهميتها الاستراتيجية في جهود التحول نحو مصادر طاقة أنظف وأكثر استدامة.

ورغم تصاعد الاهتمام العالمي بسياسات التحول الطاقوي، إلا أن معظم الدراسات الإقليمية والعربية لا تزال تركز على قطاع الكهرباء كمجال رئيسي لدمج الطاقة المتجددة، بينما تُهمش القطاعات غير الكهربائية من حيث التحليل والتخطيط والاستثمار. وهذا يُمثل فجوة حقيقية في الأدبيات والسياسات، خاصة أن فرص تقليل الانبعاثات وتحقيق الكفاءة الاقتصادية تكون أحياناً أكبر في هذه القطاعات إذا ما توفرت تقنيات مناسبة وسياسات داعمة.

وبالتالي، تأتي أهمية هذا البحث من كونه يسد فجوة معرفية واستراتيجية على مستوى المنطقة العربية، عبر تقديم تحليل منهجي موسع ومتكامل لفرص وتحديات دمج تقنيات الطاقة المتجددة، والتقنيات القابلة للاعتماد على مصادرها، في أهم ثلاث قطاعات غير كهربائية، مع ربط ذلك بالتحويلات المتوقعة في الطلب، والانبعاثات، والتكاليف، والعوائد الاقتصادية والبيئية والصحية.

وصف موجز لموضوع البحث وأهدافه

يرتكز هذا البحث على دراسة تحليلية كمية تُغطي 11 دولة عربية عضو في منظمة أوبك، وتركز على فهم تأثير دمج ست تقنيات نظيفة في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد، على مدى الفترة من 2025 حتى 2050، من خلال بناء ثلاثة سيناريوهات متكاملة:

- سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU) يعكس استمرار السياسات الحالية دون تدخل كبير
- سيناريو معتدل (Moderate) يعتمد تبني تدريجي للتقنيات
- سيناريو طموح (Aggressive) يعتمد تسريع وتوسيع نطاق التبني

ويغطي البحث القطاعات التالية:

النقل: ويشمل المركبات الخاصة والعامة، باستخدام تقنيات مثل المركبات الكهربائية وشاحنات الهيدروجين

التدفئة: باستخدام مضخات حرارية والتسخين الشمسي

التبريد: باستخدام نظم تبريد جماعي أو وحدات فردية تعمل بالطاقة الشمسية أو الكهرباء منخفضة الكربون

ويُحلل البحث أثر هذه التقنيات على:

- الطلب المستقبلي على الطاقة النهائية في هذه القطاعات

- الانبعاثات الكربونية الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري
- تكاليف النظام بما في ذلك الاستثمار والتشغيل والصيانة
- الوفورات المحققة في استهلاك الوقود، وانخفاض العبء المالي الناتج عن دعم الطاقة
- الفوائد الصحية والاجتماعية الناتجة عن خفض تلوث الهواء وتحسين جودة الحياة
- أثر السياسات المالية مثل تسعير الكربون، والإيرادات الممكنة تحقيقها من خلال فرض سعر على الانبعاثات

وتكمن أهداف البحث في ما يلي:

- قياس وتقدير الطلب المستقبلي على الطاقة في القطاعات الثلاثة محل الدراسة ضمن مختلف السيناريوهات
- تقدير الانبعاثات الكربونية المتوقعة في كل قطاع ودولة
- تقييم جدوى دمج كل تقنية من منظور التكلفة والعائد
- حساب العوائد الاقتصادية والاجتماعية والصحية المرتبطة بكل سيناريو
- اقتراح سياسات فعالة لتسريع تبني التقنيات في هذه القطاعات
- استكشاف دور تسعير الكربون في تحفيز التحول وتقليل الانبعاثات وخلق مصادر تمويل مستدامة

يمثل هذا النهج المتكامل أداة تحليلية لدعم صناع القرار في الدول العربية لفهم الخيارات المتاحة، ووزن مزاياها وتكاليفها، وتحديد السياسات ذات الأولوية في ظل السياقات الاقتصادية المختلفة لكل دولة.

خلفية عامة عن المشكلة البحثية والمنهجية المعتمدة

تُعد القطاعات غير الكهربائية — وبشكل خاص النقل، التدفئة، والتبريد — من بين أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة النهائية على مستوى دول أوبك، ومع ذلك فهي الأقل شمولاً في سياسات التحول الطاقوي، والتمويل المناخي، والأطر التنظيمية. وعلى الرغم من أن النقاشات العالمية حول التحول إلى الطاقة النظيفة غالباً ما تُركز على الكهرباء (الطاقة الشمسية والرياح وربط الشبكات)، فإن

الواقع في كثير من الدول النامية، خاصة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، يُبين أن العبء الأكبر للطلب على الطاقة والانبعاثات الكربونية يقع في هذه القطاعات غير الكهربائية.

في قطاع النقل، لا يزال الوقود الأحفوري هو المصدر الرئيسي للطاقة، وخاصة البنزين والديزل. وتعتمد الغالبية العظمى من وسائل النقل في دول أوابك على المركبات الخاصة منخفضة الكفاءة، وسط غياب للبنية التحتية الداعمة للمركبات الكهربائية أو للنقل الجماعي المستدام. أما في قطاع التدفئة، فتتفاوت الظروف بين دول أوابك، إلا أن غالبية أنظمة التدفئة تستخدم وقوداً تقليدياً (مثل الغاز أو الديزل) مع كفاءة منخفضة. ويُعد قطاع التبريد، خصوصاً في الدول الخليجية والدول ذات المناخ الحار، أحد أكثر القطاعات نمواً في استهلاك الكهرباء، مع اعتماد كبير على مكيفات فردية رديئة الكفاءة.

ورغم تنوع هذه التحديات، فإن العنصر المشترك بينها جميعاً هو محدودية وجود استراتيجيات واضحة ومتكاملة لدمج تقنيات الطاقة النظيفة في هذه القطاعات. فغياب السياسات، وارتفاع التكاليف الأولية، وعدم كفاية الوعي المجتمعي، كلها عوامل تقيد تبني حلول مثل المركبات الكهربائية، المضخات الحرارية، التبريد الجماعي، والطاقة الشمسية الحرارية.

ولتجاوز هذا النقص في التحليل، تبنى هذا البحث منهجاً كمياً متكاملًا يجمع بين:

- تحليل الطلب على الطاقة حسب القطاع والدولة والسيناريو الزمني (2025-2050)
- تقدير الانبعاثات باستخدام معاملات مخصصة لكل نوع وقود في كل دولة
- حساب تأثير تبني كل تقنية على الانبعاثات وتكاليف النظام
- ربط النتائج بالتأثيرات البيئية والصحية من خلال مؤشرات مثل تركيز PM2.5 ومعدلات الوفيات الناتجة عن الحرارة الشديدة
- دمج أثر السياسات مثل تسعير الكربون في حساب الإيرادات المحتملة وتقليل الكلفة الصافية للنظام

واعتمدت الدراسة على مصادر موثوقة مثل:

- وكالة الطاقة الدولية: (IEA) لاستخلاص سيناريوهات الطلب على الطاقة والانبعاثات
- الوكالة الدولية للطاقة المتجددة: (IRENA) لتحديد فعالية وجدوى التقنيات المختلفة
- تقارير البنك الدولي وصندوق النقد الدولي: لتقدير الآثار المالية والاجتماعية للسياسات
- بيانات وطنية محدثة من الدول الأعضاء: للحصول على معايير الاستهلاك المحلي والتكلفة والانبعاثات
- أبحاث علمية محكمة من مجلات مثل Nature Energy و Joule و Applied Energy لدعم المؤشرات الصحية والاجتماعية

هذا النموذج التحليلي الرباعي (بلد - قطاع - تقنية - سنة) يُتيح تحليلاً ديناميكياً ومرناً يمكن تعديله لأي دولة، مما يُعزز من قابلية تطبيق النتائج على صعيد السياسات الوطنية والإقليمية.

موجز عن مضمون كل فصل من فصول البحث

يتكون هذا البحث من خمسة فصول مترابطة، تم بناؤها بطريقة تصاعدية تبدأ بوصف الواقع الراهن وينتهي بالتوصيات والسياسات المستقبلية. وفيما يلي موجز لكل فصل:

الفصل الأول: تحليل الوضع القائم في القطاعات غير الكهربائية

يُقدم هذا الفصل تقييماً تفصيلياً لبنية الطاقة الحالية في قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد في الدول الأعضاء بمنظمة أوابك. ويتضمن الفصل:

- خصائص الطلب على الطاقة حسب القطاع والدولة
- نوعية الوقود المستخدم ومدى كفاءته
- مستويات الانبعاثات الكربونية المرتبطة بكل قطاع
- الخصائص الديموغرافية والاجتماعية المؤثرة على الطلب

الفصل الثاني: بناء سيناريوهات التحول في الطلب والانبعاثات حتى 2050

يستعرض هذا الفصل السيناريوهات الثلاثة المعتمدة في الدراسة (سيناريو الأعمال المعتاد- معتدل - طموح)، ويُقدّم:

- توقعات الطلب على الطاقة في كل سيناريو حسب القطاع والدولة
- توقعات الانبعاثات الكربونية المرتبطة بكل مسار
- توزيع الانبعاثات حسب الدول والقطاعات، وتحديد أهم الدول (التي تشكل 80% من الانبعاثات)
- الأثر النسبي لكل تقنية على إجمالي الانبعاثات

الفصل الثالث: تحليل الجدوى الاقتصادية وتكلفة النظام

يركز هذا الفصل على تحليل شامل للتكاليف والعوائد، من خلال:

- حساب تكاليف الاستثمار والتشغيل لكل تقنية
- احتساب الوفورات في استهلاك الوقود التقليدي
- تقدير العوائد الصحية من خفض تلوث الهواء
- استخراج "الكلفة الصافية للنظام (Net System Cost)" لكل دولة وسيناريو

الفصل الرابع: أثر تسعير الكربون في تسريع التحول

يتناول هذا الفصل دور أدوات السياسات المالية، وخاصة تسعير الكربون، من خلال:

- تقدير الإيرادات المحتملة من فرض سعر على الانبعاثات
- تحليل تأثير الكربون على تكلفة النظام وتبني التقنيات
- عرض نماذج لتوزيع الإيرادات بشكل عادل لتحفيز التحول وحماية الفئات الضعيفة

الفصل الخامس: الفوائد غير السوقية (الصحية والبيئية والاجتماعية)

يتوسع هذا الفصل في تحليل الفوائد التي لا تُحتسب عادة في التقييمات المالية التقليدية، ومنها:

- انخفاض الجسيمات الدقيقة (PM2.5) وتأثيرها على الصحة
- خفض الوفيات الناتجة عن الحرارة الشديدة بسبب تحسين أنظمة التبريد
- التأثيرات طويلة المدى على جودة الحياة، وخفض التكاليف الصحية

التوصيات العامة والاستنتاجات السياسية

يُعد هذا الجزء من البحث خلاصة شاملة للنتائج، ويُقدم توصيات سياسية وتقنية موجهة للدول الأعضاء، مع مراعاة:

- الواقع الاقتصادي والسياسي لكل دولة
- إمكانيات التمويل المتاحة
- أهمية التعاون الإقليمي لنقل المعرفة والخبرات

صلة البحث بقطاع النفط والغاز والطاقة في الدول الأعضاء بمنظمة أوبك

تتبوأ الدول الأعضاء في منظمة أوبك مكانة استراتيجية ضمن النظام الطاقوي العالمي، إذ تمتلك احتياطات ضخمة من النفط والغاز الطبيعي، وتُعد من كبار المصدرين للوقود الأحفوري. وقد ساهمت هذه الثروات في دعم النمو الاقتصادي لعقود طويلة، لكن التحولات الجيوسياسية والتكنولوجية والمناخية المتسارعة باتت تُهدد استقرار هذه المنظومة، وتفرض ضغوطاً غير مسبوقة على الاقتصادات الريفية المعتمدة على العائدات النفطية.

ضمن هذا السياق، يُعد موضوع هذا البحث شديد الصلة بالواقع الراهن والمستقبلي لقطاع الطاقة في دول أوبك لعدة أسباب:

أولاً: تغير بنية الطلب العالمي على الطاقة

تشير توقعات المؤسسات الدولية إلى تراجع تدريجي في الطلب العالمي على النفط والغاز في القطاعات النهائية، خاصة مع تزايد الاعتماد على الكهرباء النظيفة والمركبات الكهربائية والمضخات الحرارية. ويؤدي هذا التحول إلى تقليص دور الوقود الأحفوري في العديد من الأسواق، مما ينعكس سلباً على صادرات دول أوبك. وبما أن القطاعات غير الكهربائية لا تزال تُشكّل مجالاً قوياً لاستهلاك الوقود الأحفوري، فإن دراسة مستقبل هذه القطاعات تُعد ضرورية لتوقع تأثيرات التحول العالمي على أسواق النفط والغاز.

ثانياً: الضغط الداخلي المتصاعد على استهلاك الطاقة

تواجه دول أوبك تحديات داخلية متزايدة تتعلق بارتفاع الطلب المحلي على الطاقة، وتوسّع الدعم الحكومي، وازدياد الهدر الطاقوي، لا سيما في قطاعات النقل والتبريد. ويؤثر هذا الوضع سلباً على التصدير ويزيد من الضغط على الميزانيات العامة. لذلك فإن تبني تقنيات نظيفة في هذه القطاعات قد يساهم في تقليل الطلب الداخلي على النفط والغاز، وتحرير كميات للتصدير أو تقليل الدعم.

ثالثاً: مواهمة التحول مع استراتيجيات تنويع الاقتصاد

تسعى غالبية دول أوبك إلى تنويع اقتصاداتها وتعزيز الابتكار المحلي، مما يتطلب تحفيز قطاعات جديدة تُوفر وظائف، وتقلل من الاعتماد على الإيرادات النفطية. ويُعد التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون، قائم على تقنيات حديثة في النقل والتبريد والتدفئة، رافعة مهمة لتنويع القاعدة الاقتصادية وتحفيز الصناعات المرتبطة بالطاقة النظيفة.

رابعاً: التزامات المناخ والمسؤولية الدولية

مع التوقيع على اتفاق باريس واتفاقيات المناخ الإقليمية، باتت دول أوبك مطالبة بوضع استراتيجيات واضحة لخفض الانبعاثات. ورغم تمسك بعض الدول بحصصها العادلة في الانبعاثات، فإن الضغوط تتزايد من الأسواق والممولين والمؤسسات المالية، لربط الاستثمار بمستوى التقدم في التحول المناخي. وبالتالي، فإن هذا البحث يُساهم في وضع خارطة طريق قابلة للتنفيذ لخفض الانبعاثات من قطاعات لم تكن محور التركيز سابقاً.

وبالجملة، فإن تحليل مستقبل القطاعات غير الكهربائية من منظور الطاقة المتجددة والتسعير الكربوني يُعد مكوناً محورياً في تحديد مكانة دول أوبك المستقبلية ضمن النظام الطاقوي العالمي، وفي تعظيم العائد من مواردها، وتحقيق انتقال متوازن لا يهدد أمنها الاقتصادي.

النتائج المتوقعة والتوصيات العامة

يعتمد هذا البحث على تحليل سيناريوهات متعددة لفهم أثر تبني تقنيات الطاقة المتجددة والمعتمدة على مصادرها في ثلاثة قطاعات حيوية. ومن خلال الحسابات التي تم إجراؤها، ووفقاً للبيانات المستقاة من دول أوبك، يتوقع البحث الوصول إلى مجموعة من النتائج الرئيسية التي يمكن تلخيصها على النحو التالي:

النتائج المتوقعة:

- خفض انبعاثات الكربون بنسبة تصل إلى 33% في القطاعات الثلاثة بحلول عام 2050 في السيناريو الطموح، مقارنة بالمسار المرجعي (BAU).
- تحقيق وفورات كبيرة في الوقود الأحفوري نتيجة استخدام التقنيات النظيفة، تصل إلى مليارات الدولارات سنوياً.
- تحقيق فوائد صحية وبيئية مباشرة مثل انخفاض تركيز الجسيمات الدقيقة PM2.5 وانخفاض معدلات الوفيات المرتبطة بالحرارة.
- إمكانية توليد إيرادات جديدة عبر تسعير الكربون، تُستخدم لدعم التحول أو لحماية الشرائح السكانية الضعيفة.
- ارتفاع في تكاليف النظام الأولية (CAPEX) و(OPEX)، لكن يقابلها انخفاض تدريجي في التكلفة الصافية بفضل الوفورات المحققة والعوائد الصحية.
- الاختلاف بين الدول في القدرة على التطبيق بسبب التفاوت في الموارد والبيئة التنظيمية والبنية التحتية.

التوصيات العامة:

- وضع استراتيجيات وطنية شاملة لتحويل القطاعات الثلاثة نحو تقنيات الطاقة النظيفة، مع تحديد أهداف كمية قابلة للقياس.
- تحفيز القطاع الخاص للمشاركة في التحول عبر الحوافز المالية والتشريعات الداعمة.
- الاستثمار في البنية التحتية اللازمة لنجاح التقنيات الجديدة، خصوصاً شبكات شحن المركبات الكهربائية والتبريد الجماعي.

- تطبيق تدريجي لتسعير الكربون، مع إعادة تدوير العوائد بطريقة عادلة اجتماعيًا.
- تعزيز البحث والتطوير المحلي لتقنيات التبريد والتدفئة والنقل المستدامة، بما يتناسب مع مناخ واقتصاد دول أوابك.
- تعميق التعاون الإقليمي بين دول أوابك لتبادل التجارب، وتطوير نماذج إقليمية للتمويل وتوطين التكنولوجيا.

ملخص تنفيذي

تمثل القطاعات غير الكهربائية (النقل، التدفئة، والتبريد) تحديًا متصاعدًا أمام جهود التحول الطاقوي في الدول الأعضاء بمنظمة أوبك. فرغم التقدم المحرز في نشر الطاقة المتجددة في قطاع الكهرباء، تظل هذه القطاعات مسؤولة عن نسبة كبيرة من الانبعاثات وتستهلك حصة متنامية من الطاقة النهائية.

كما أن معظم هذه القطاعات لا تزال تعتمد اعتمادًا كبيرًا على الوقود الأحفوري في ظل غياب سياسات واضحة للتوسع في الحلول المستدامة أو تسعير الكربون. من هنا، تبرز أهمية دراسة الخيارات التقنية المتاحة، وجدواها الاقتصادية، وقدرتها على تحقيق أهداف خفض الانبعاثات مع مراعاة العدالة الاجتماعية والاعتبارات التنموية الخاصة بكل دولة.

وتكمن أهداف البحث في ما يلي:

- قياس وتقدير الطلب المستقبلي على الطاقة في القطاعات الثلاثة محل الدراسة ضمن مختلف السيناريوهات
- تقدير الانبعاثات الكربونية المتوقعة في كل قطاع ودولة
- تقييم جدوى دمج كل تقنية من منظور التكلفة والعائد
- حساب العوائد الاقتصادية والاجتماعية والصحية المرتبطة بكل سيناريو
- اقتراح سياسات فعالة لتسريع تبني التقنيات في هذه القطاعات
- استكشاف دور تسعير الكربون في تحفيز التحول وتقليل الانبعاثات وخلق مصادر تمويل مستدامة

يمثل هذا النهج المتكامل أداة تحليلية لدعم صناع القرار في الدول العربية لفهم الخيارات المتاحة، ووزن مزاياها وتكاليفها، وتحديد السياسات ذات الأولوية في ظل السياقات الاقتصادية المختلفة لكل دولة.

منهجية البحث

يعتمد البحث على تحليل مستقبلي يشمل 11 دولة عربية عضو في أوابك، ويستخدم بيانات الطلب القطاعي على الطاقة حتى عام 2050 لبناء ثلاث سيناريوهات رئيسية:

- المرجعي (BAU)
- المعتدل
- الطموح

تم في كل سيناريو تقدير أثر اعتماد ست تقنيات نظيفة: المركبات الكهربائية، شاحنات الهيدروجين، مضخات الحرارة، الطاقة الشمسية الحرارية، التبريد الجماعي، والخلايا الكهروضوئية.

يشمل التقييم حساب الانبعاثات السنوية والمترجمة باستخدام نموذج الانبعاثات المتبقية (persistent emissions) الذي يراعي العمر الافتراضي للتقنية، والتدهور السنوي في الأداء.

كما تم تقدير الآثار الاقتصادية عبر حساب التكاليف الرأسمالية (CAPEX)، والتشغيلية (OPEX)، ومدخرات الوقود الأحفوري، بالإضافة إلى منافع صحية واجتماعية مثل تجنب الوفيات الناتجة عن تلوث الهواء والحرارة، بناءً على علاقات كمية مدعومة من الأدبيات العلمية.

وقد خُصص فصل مستقل لتحليل أثر تطبيق تسعير الكربون في القطاعات الثلاثة، مع تقييم الإيرادات المحتملة واستخداماتها البديلة.

أهم النتائج

- في السيناريو الطموح، يمكن خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 33% في القطاعات الثلاثة بحلول عام 2050 مقارنة بالسيناريو المرجعي.
- من المتوقع توفير أكثر من 500 مليون جيجا جول من استهلاك الوقود الأحفوري حتى 2050، مما يساهم في تعزيز أمن الطاقة وتقليل التبعية للدعم الحكومي.
- دمج الفوائد الصحية يُظهر أن حوالي 60 ألف حالة وفاة مبكرة يمكن تجنبها نتيجة لتحسن جودة الهواء وتبريد المساكن بوسائل فعالة.

- رغم ارتفاع التكاليف الاستثمارية، فإن صافي تكلفة النظام يكون سلبياً في بعض الدول، مما يعكس جدوى الاستثمار في هذه التقنيات إذا أخذت الفوائد الصحية والبيئية بالحسبان.
- يُمكن لتسعير الكربون عند مستويات معتدلة (30-60 دولارًا للطن) أن يغير موازين الجدوى الاقتصادية لصالح التقنيات النظيفة، ويولد مصادر تمويل جديدة قابلة لإعادة التوزيع بعدالة.

أبرز التوصيات

- صياغة استراتيجيات وطنية لخفض الانبعاثات في القطاعات غير الكهربائية، تتكامل مع جهود كهربة القطاعات الأخرى.
- تحديد أولويات استثمارية تركز على تقنيات منخفضة التكلفة الحديدية (MAC)، ولها منافع غير سوقية مثبتة.
- إدماج تسعير الكربون بشكل تدريجي مع آليات تعويضية للشرائح الضعيفة ومخصصات للتحويل التكنولوجي المحلي.
- تحفيز التعاون الإقليمي في مجال نقل التكنولوجيا، وتنسيق شبكات التبريد الجماعي، وربط مراكز البحث العربية ذات الصلة.
- تحسين قاعدة البيانات الإحصائية للطاقة والانبعاثات في القطاعات غير الكهربائية، بما يتيح تحسين النماذج ودقة السيناريوهات.

الفصل الأول

**تطور الطلب على الطاقة والانبعثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد
بدول أوابك: خط الأساس وسيناريو الأعمال كالمعتاد (2020-2050)**

1-1: مقدمة

يشكل هذا الفصل القاعدة التحليلية الأساسية للدراسة، حيث يتناول تقدير الطلب على الطاقة والانبعثات المرتبطة بثلاثة من أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة في دول أوابك: النقل، والتبريد، والتدفئة. وبالاعتماد على بيانات مرجعية لسنة 2020، يتم بناء سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU) حتى عام 2050، باستخدام منهجية موحدة تربط بين الكثافة السكانية، وأنماط الاستهلاك، ومزيج الطاقة في كل دولة.

يهدف هذا الفصل إلى تحديد النقاط الحرجة في هيكل الطلب المستقبلي والانبعثات، مما يُمهّد لفهم الحاجة المُلحّة للتحوّل إلى تقنيات طاقة نظيفة في هذه القطاعات. كما يوضح الفصل التباينات القطاعية والقطرية، ويستنتج العلاقة الحاسمة بين نوعية الطاقة والانبعثات الناتجة، وليس فقط كميتها.

2-1: توقعات طلب الطاقة في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة في دول أوابك

الإطار المنهجي

لتقدير الطلب على الطاقة في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد عبر دول الأوابك (11 دولة)، تم استخدام منهج موحد يعتمد على البيانات المرجعية والتوقعات السكانية. بدأت العملية بتحديد الطلب على الطاقة في كل قطاع خلال سنة 2020، والتي استخدمت كسنة أساس للتوقعات المستقبلية.

تقدير الطلب في سنة الأساس

بالنسبة لقطاعي التدفئة والتبريد، تم الحصول على بيانات استهلاك الطاقة النهائي (Final Energy Consumption - FEC) لعام 2020 من قاعدة بيانات *Enerdata Global* (Enerdata, 2022) *Energy & CO₂ Data*، ثم تم تخصيص نسب مئوية من FEC لكل قطاع بناءً على النسب المذكورة في المراجع الخاصة بموازنات الطاقة الوطنية لكل دولة. فعلى سبيل المثال، شكل التبريد 25% من استهلاك الطاقة في السعودية، في حين شكلت التدفئة 15% من

استهلاك الطاقة في مصر. أما بالنسبة لقطاع النقل، فقد تم جمع بيانات الطلب من مصادر متخصصة مثل (IEA World Energy Outlook 2022 (IEA, 2022) وبعض الإحصاءات الوطنية.

حساب الطلب للفرد والتوقعات المستقبلية:

تم حساب استهلاك الطاقة للفرد لكل قطاع من خلال قسمة إجمالي الطلب على عدد السكان في عام 2020. ثم تم إسقاط هذه القيم للفترة 2025-2050 من خلال ضربها في التوقعات السكانية حتى عام 2050 من (World Bank population projections (World Bank, 2024)، مع افتراض أن كثافة استهلاك الطاقة للفرد تظل ثابتة (أي عدم وجود تحسن تكنولوجي في كفاءة الاستخدام في سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU)).

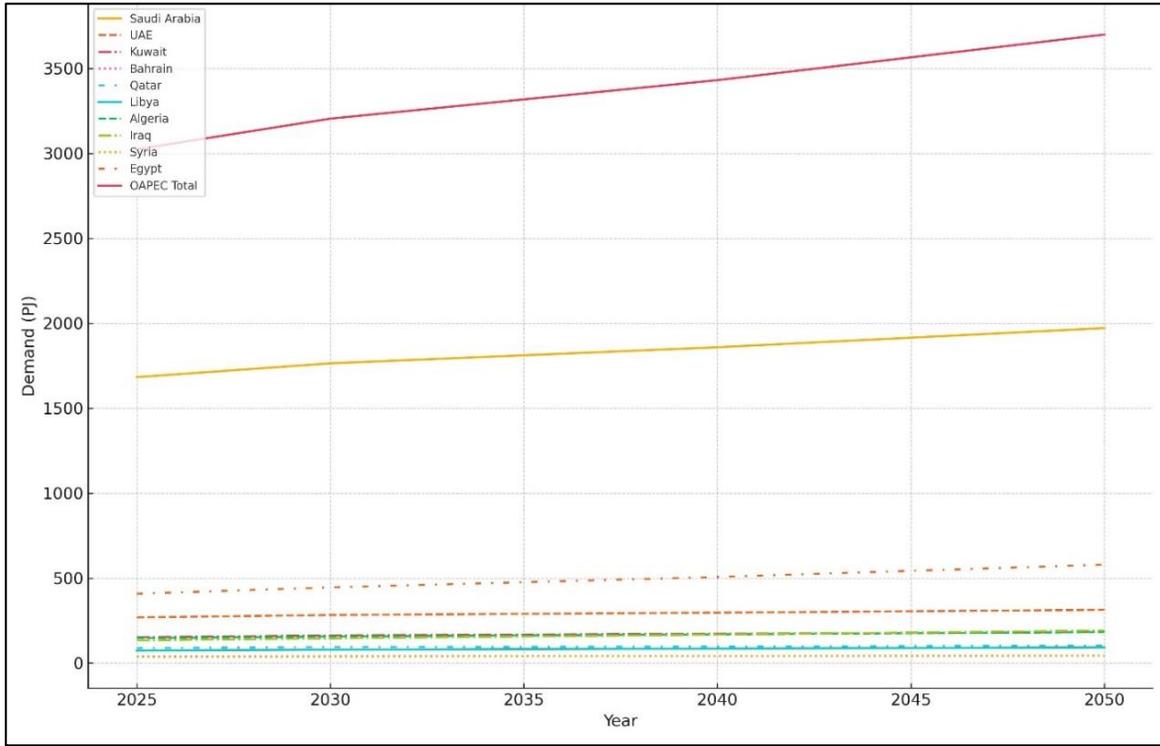
الاتجاهات القطاعية للطلب على الطاقة

توضح الأشكال من الشكل (1-1) إلى الشكل (3-1) أنه في عام 2020، بلغ مجموع استهلاك الطاقة في القطاعات الثلاثة (النقل، التدفئة، التبريد) عبر دول الأوبك 7,000 بيتاجول (PJ) وبحلول عام 2050، من المتوقع أن يرتفع هذا الرقم إلى أكثر من 13,400 PJ. أي أن دول الأوبك ستشهد نموًا إجماليًا يقارب 91% خلال ثلاثين عامًا، مما يشكل تحديًا مباشرًا لاستدامة الإمدادات وكفاءة استخدام الطاقة.

أولاً: قطاع النقل:

يوضح الشكل (1-1) أنه يُتوقع أن يرتفع الطلب في قطاع النقل بشكل مستمر في جميع دول الأوبك. وتظهر الزيادة الأوضح في مصر والسعودية، مدفوعة بشكل أساسي بالنمو السكاني الكبير. وبحلول عام 2050، يُتوقع أن تتجاوز مصر باقي الدول في إجمالي الطلب على النقل نتيجة للزيادة السكانية، رغم أن استهلاكها للفرد في 2020 كان أقل من دول الخليج. في المقابل، تُظهر دول صغيرة مثل البحرين وقطر اتجاهًا ثابتًا نسبيًا بسبب محدودية عدد السكان، رغم ارتفاع استهلاك الفرد.

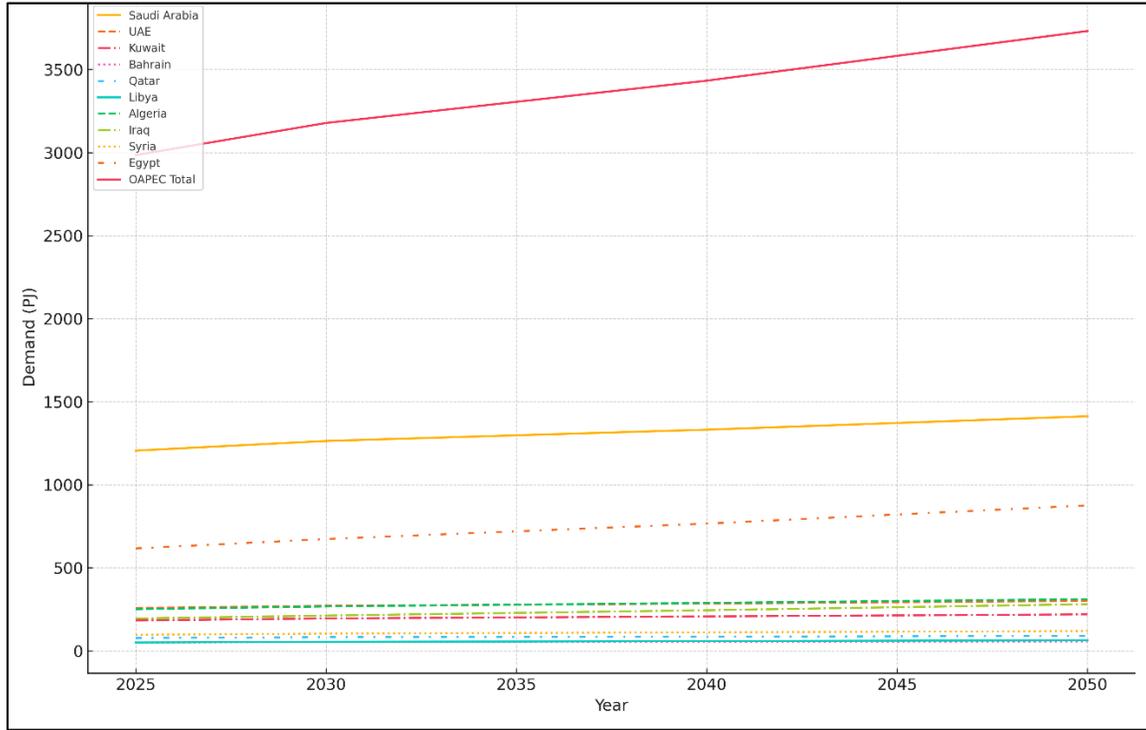
الشكل (1-1): الطلب المستقبلي علي الطاقة لقطاع النقل في دول أوبك 2025-2050



ثانياً: قطاع التدفئة:

يُظهر الشكل (2-1) تبايناً كبيراً في أنماط الطلب على التدفئة. فقد بلغ الطلب الكلي في 2020 حوالي PJ 1,400، ومن المتوقع أن يرتفع إلى PJ 2,600 بحلول 2050، أي بزيادة قدرها 85%. وتُعد الجزائر ومصر والعراق من أكبر المساهمين في نسبة زيادة استهلاك التدفئة، نتيجة للمناخ الشتوي البارد والكثافة السكانية. بينما تبقى دول الخليج ذات زيادة أقل، بسبب طبيعة المناخ الصحراوي. أظهرت تونس مستويات متوسطة من الطلب على التدفئة، بما يتماشى مع مناخ شمال أفريقيا.

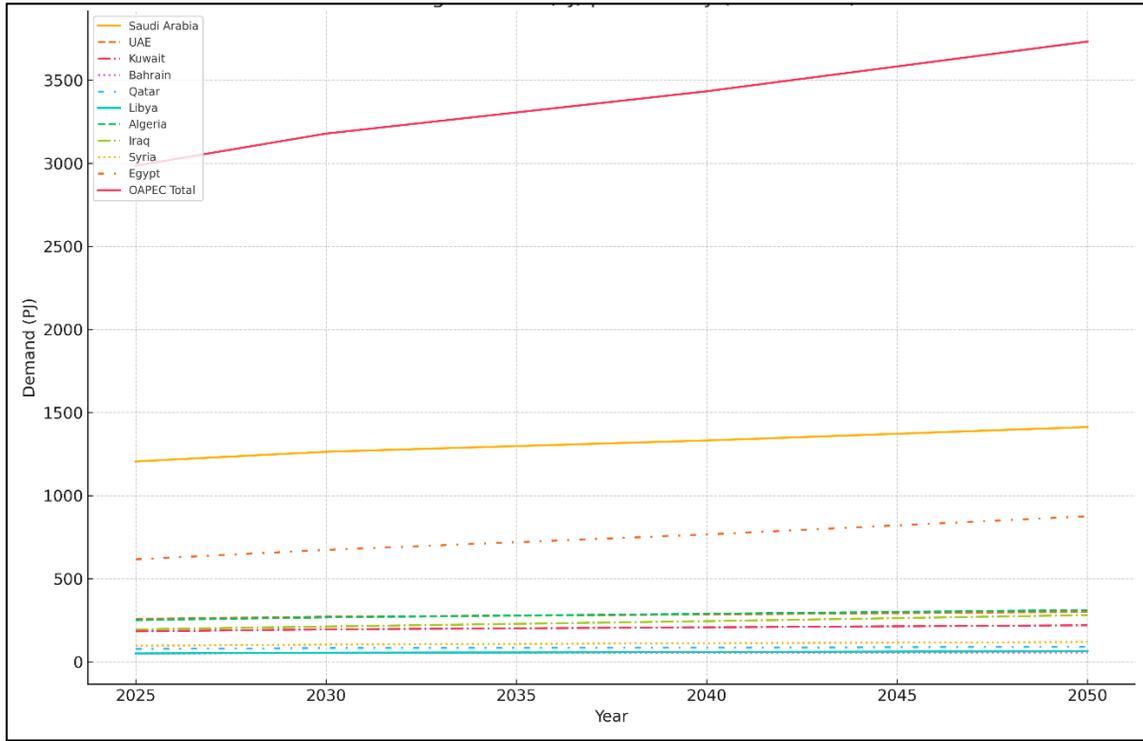
الشكل (1-2): الطلب المستقبلي علي الطاقة لقطاع التبريد في دول أوابك 2025- 2050



ثالثاً: قطاع التبريد:

يُظهر الشكل (3-1) نمواً سريعاً في الطلب على التبريد، حيث ارتفع الطلب من نحو PJ 1,300 في 2020 إلى ما يقدر بـ PJ 2,900 في 2050، أي بزيادة تقارب 123%، وهو أعلى معدل نمو بين القطاعات الثلاثة. وتظهر الزيادة خاصة في دول الخليج حيث تؤدي درجات الحرارة المرتفعة والنمو السكاني إلى زيادة الاستهلاك. تحافظ السعودية خاصة على أعلى مستويات الطلب المطلق نتيجة لارتفاع استهلاك الفرد في التبريد وزيادة معقولة في عدد السكان. فعلى سبيل المثال، يشكل التبريد 25% من استهلاك الطاقة النهائي في السعودية في عام 2020. كما تظهر مصر والعراق زيادات واضحة في الطلب على التبريد، ولكن من قاعدة منخفضة، ما يعكس هذا الاتجاه آثار تغير المناخ، وارتفاع درجات الحرارة، وانتشار أجهزة التكييف، خاصة في المناطق الحضرية. وتتبعهم الإمارات محافظة علي الطلب المستمر علي التبريد مع زيادات معقولة في عدد السكان.

الشكل (3-1): الطلب المستقبلي على الطاقة لقطاع التبريد في دول أوابك 2025-2050



المخلص والدلالات:

تعكس هذه التوقعات في الطلب على الطاقة الأثر التراكمي لأنماط الاستهلاك الأساسية والنمو السكاني المتوقع. ففي سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU) مع بقاء كثافة الاستهلاك ثابتة:

- يرتفع إجمالي الطلب على الطاقة في القطاعات الثلاثة بشكل كبير في معظم دول الأوابك.

- ويظهر حجم السكان كعامل حاسم، خاصة في قطاعي النقل والتدفئة.
- بينما يظل المناخ محددًا رئيسياً للتوزيع بين الطلب على التدفئة والتبريد.

وتبرز هذه التحليلات ضرورة دمج الخصائص المناخية والتحديات الديموغرافية في أي استراتيجية انتقال طاقي إقليمي فعالة. كما تشكل هذه النتائج نقطة الأساس التي يُقارن بها أثر تطبيق سيناريوهات خفض الانبعاثات في الأجزاء اللاحقة من الدراسة.

3-1: تقدير وتحليل الانبعاثات للقطاعات الثلاث بسيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU)

منهجية حساب الانبعاثات

تم تقدير انبعاثات غازات الدفيئة (GHG) الناتجة عن قطاعات النقل والتدفئة والتبريد في دول الأوابك ضمن سيناريو الأعمال كالمعتاد من خلال ربط الطلب المتوقع على الطاقة بعوامل انبعاثات مخصصة لكل قطاع ولكل دولة. بخلاف الطلب، الذي تحكمه عوامل ديموغرافية وسلوكية، تعتمد الانبعاثات بشكل حاسم على نوع الوقود أو مصدر الكهرباء المستخدم ودرجة كثافة الكربون فيه.

المعادلة المستخدمة:

$$Emissions (MtCO_2) = Demand (PJ) \times Emission\ factor \left(\frac{kgCo2}{PJ} \right) \times 10^{-6}$$

حيث:

- يتم الحصول على الطلب على الطاقة لكل قطاع (Energy demand) بوحدة بيتاجول (PJ) من التوقعات الموضحة في القسم السابق؛
- يتم تحديد عامل الانبعاث (Emission factor) بوحدة (kgCO₂/PJ) بناءً على أنواع مصادر الطاقة المستخدمة في كل قطاع ودولة؛
- ويُستخدم عامل التحويل (Conversion factor) 10^{-6} لتحويل الناتج من كيلوجرام إلى مليون طن مكافئ CO₂.

تم تخصيص عامل انبعاث فريد لكل دولة وقطاع باستخدام بيانات تفصيلية من مزيج الوقود الوطني والخصائص القطاعية، وليس بناءً على متوسطات وطنية مبسطة.

كيفية تحديد عوامل الانبعاث حسب الدولة والقطاع

أ. قطاع النقل:

تمثل عوامل الانبعاث في قطاع النقل كثافة الكربون في مزيج الوقود المستخدم على الطرق (بنزين، ديزل). تختلف القيم حسب نوعية الوقود المستخدم ونسبته في الأسطول المحلي، وتتراوح القيم عمومًا بين 69,000 و75,000 كجم CO₂ لكل PJ. (IEA, 2024)

أمثلة:

- السعودية: 74,000 (بسبب الانتشار الكبير لأسطول النقل الثقيل الذي يعمل بالديزل)
- مصر: 69,500 (اعتماد أكبر على البنزين والنقل العام)
- قطر: 75,000 (نسبة مرتفعة من المركبات عالية الأداء وعدم استخدام بدائل وقود)

ب. قطاع التدفئة:

تعكس عوامل الانبعاث في هذا القطاع نوع الوقود الحراري المستخدم. ففي شمال أفريقيا، مثل الجزائر وليبيا، يُستخدم الغاز الطبيعي وزيت الوقود، مما يولد عوامل انبعاث تتراوح بين 51,000 و 53,000 كجم CO₂ لكل PJ. أما في دول الخليج، فتُستخدم التدفئة الكهربائية أو المركزية، مما قد يؤدي إلى قيم أعلى، مثل 56,000 كجم CO₂/PJ في الإمارات و 51,000 كجم CO₂/PJ في سوريا. تم تحديد هذه القيم استنادًا إلى IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy مع تعديلات بسيطة وفق بيانات الوقود المحلي لكل دولة (IPCC, 2019).

ت. قطاع التبريد:

يعتمد التبريد على الكهرباء بشكل شبه كامل، لذا فإن عامل الانبعاث يعتمد على كثافة الكربون في شبكة الكهرباء الوطنية. في الدول التي تعتمد على توليد كهرباء من الوقود الأحفوري مثل السعودية وقطر نجد القيم 50,000 كجم CO₂ لكل PJ. وفي الدول التي شبكتها أقل كثافة كربونية مثل مصر وسوريا نجد القيم 44,000 - 45,000 كجم CO₂ لكل PJ. (IEA, 2024)

أمثلة:

- السعودية: 50,000
- الإمارات: 49,000
- مصر: 45,000
- سوريا: 44,000

تحليل النتائج:

أ. الانبعاثات ليست انعكاسًا مباشرًا لحجم الطلب

لا يمكن افتراض أن الدول ذات الطلب الأعلى على الطاقة هي أيضًا الأعلى في الانبعاثات. فمستوى الانبعاثات يتأثر بشكل كبير بعامل الانبعاث، أي كمية الكربون الناتجة عن كل وحدة طاقة.

على سبيل المثال، رغم أن مصر تُظهر طلبًا مرتفعًا على الطاقة في قطاع النقل كما موضحاً **بالشكل (4-1)**، فإن انبعاثاتها تنمو بوتيرة أبطأ من السعودية، نتيجة اعتماد مصر بشكل أكبر على وسائل نقل عام ووقود أقل كثافة كربونية مثل البنزين، مقابل اعتماد السعودية على الديزل الثقيل. بالمثل، العراق ينتج انبعاثات مرتفعة في قطاع التبريد **بالشكل (6-1)** رغم أن الطلب لديه ليس الأعلى، بسبب اعتماده على شبكة كهرباء ذات كثافة كربونية مرتفعة.

هذا يعني أن الانبعاثات تتأثر بنوعية الطاقة المستخدمة، لا بكميتها فقط.

ب. الفروقات الكربونية بين القطاعات داخل الدولة الواحدة

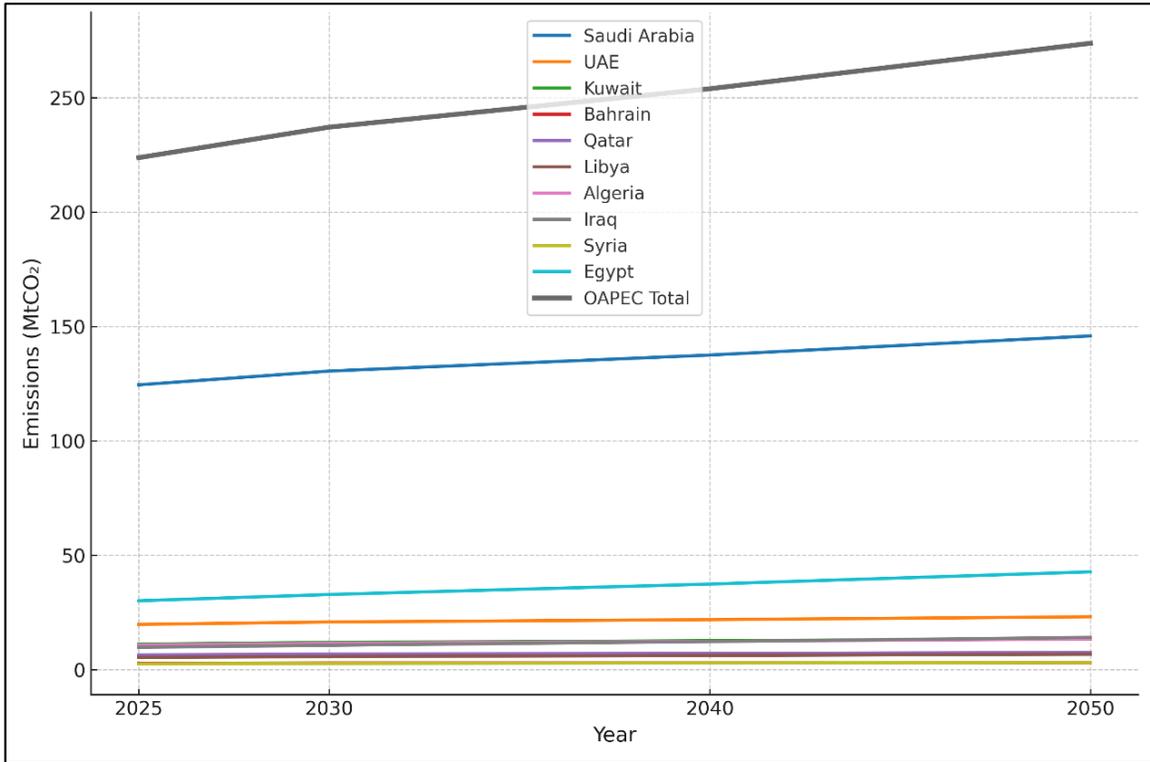
حتى داخل نفس الدولة، تختلف الانبعاثات بين القطاعات رغم تساوي أو تقارب الطلب، وذلك بسبب تباين نوع الوقود أو مصدر الطاقة بين قطاع وآخر.

على سبيل المثال، في قطاع التدفئة، تُسجّل الجزائر والعراق انبعاثات أعلى من مصر رغم تقارب الطلب، نتيجة استخدام وقود أثقل وأكثر إطلاقًا للكربون مثل زيت الوقود، مقارنة باستخدام الغاز الطبيعي في مصر. **الشكل (5-1)**

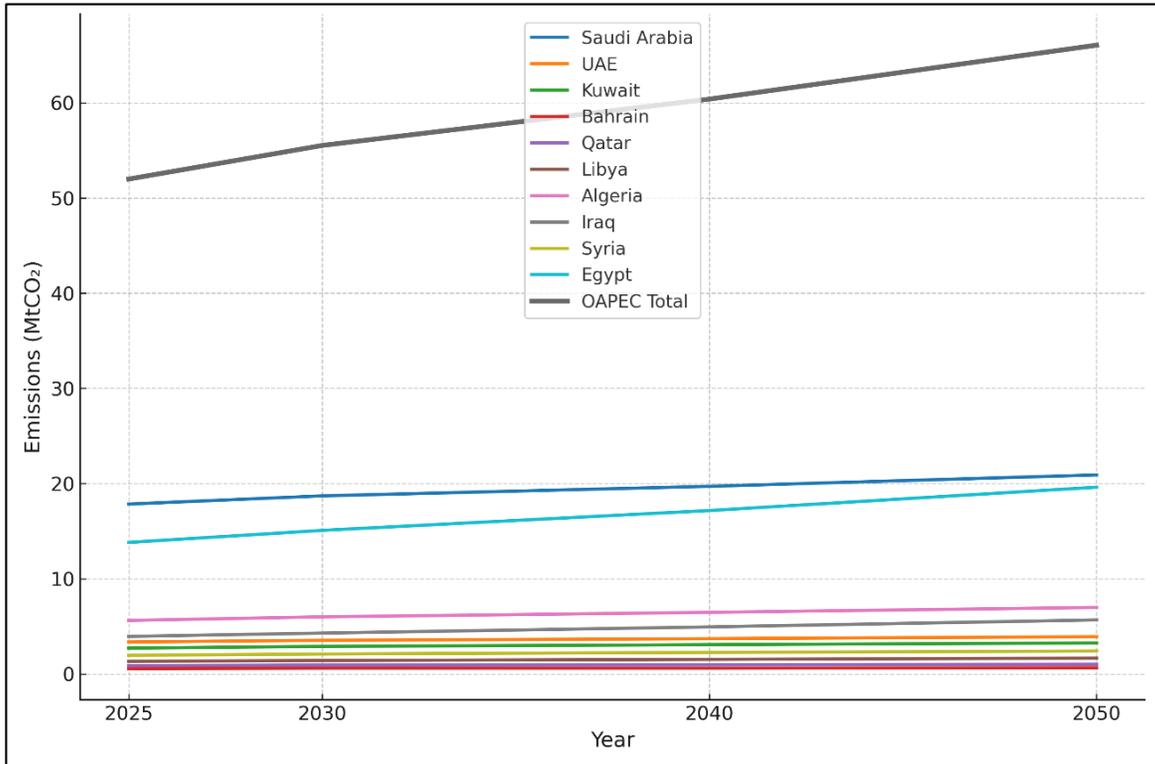
وفي قطاع التبريد، تُظهر دول الخليج زيادة حادة في الانبعاثات حتى عند نمو الطلب بنسبة بسيطة، لأن الكهرباء المستخدمة للتبريد في هذه الدول تُنتج من مصادر غير نظيفة تعتمد بشكل أساسي على الوقود الأحفوري. **الشكل (6-1)**

هذا يؤكد أن بصمة الكربون للقطاع تعتمد على تقنية التشغيل والطاقة المستخدمة، وليس على حجم الطلب فقط.

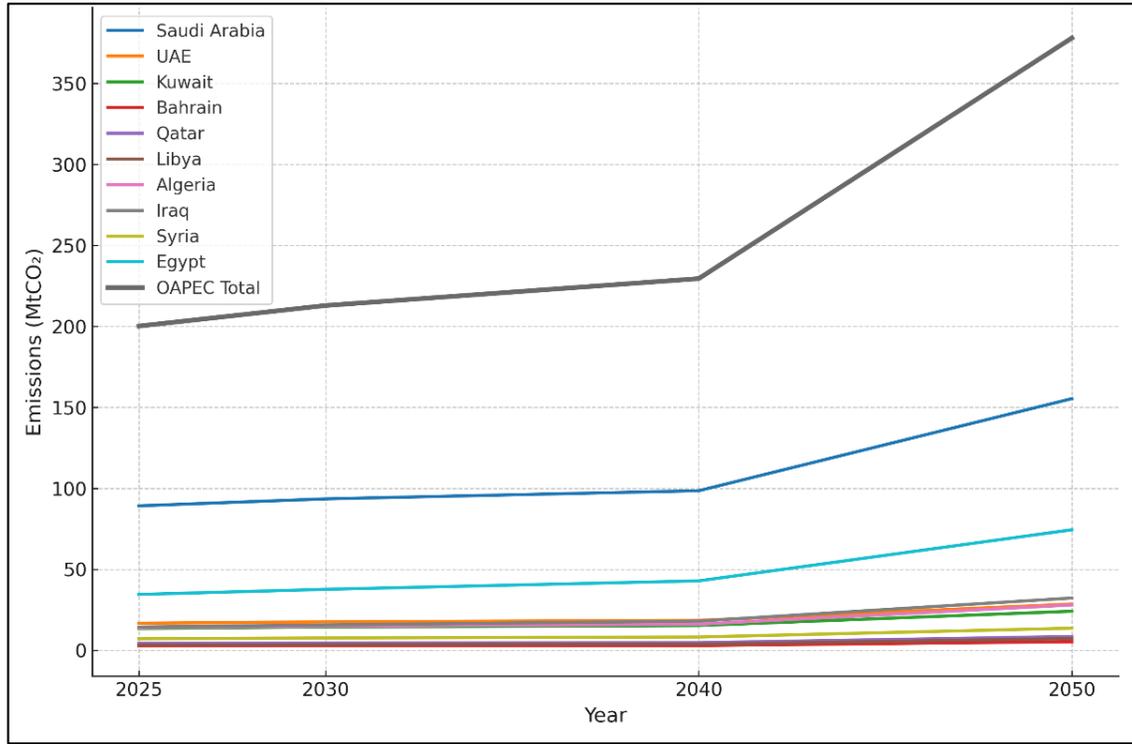
الشكل (4-1): الانبعاثات المستقبلية لقطاع النقل في دول أوابك 2025- 2050



الشكل (5-1): الانبعاثات المستقبلية لقطاع التدفئة في دول أوابك 2025- 2050



الشكل (6-1): الانبعاثات المستقبلية لقطاع التبريد في دول أوابك 2025-2050



ج. إجمالي الانبعاثات ونقاط التركيز:

من المتوقع أن ترتفع الانبعاثات الكلية في القطاعات الثلاثة من حوالي 450 MtCO₂ في 2020 إلى 860 MtCO₂ في 2050 — أي بزيادة تقارب 91% (الأشكال 4-1 الي 6-1).

النمو الأكبر يتركز في:

- النقل في مصر والعراق والجزائر
- التبريد في السعودية والإمارات
- التدفئة في الجزائر وتونس

دلالات للتحويل الطاقوي

تُظهر هذه النتائج أن سياسات كفاءة الطاقة وحدها لن تكون كافية. فحتى في حال ثبات أو انخفاض الطلب، ستظل الانبعاثات مرتفعة ما لم يتم:

- التحول إلى وقود نظيف في النقل.
- إزالة الكربون من شبكات الكهرباء.
- استخدام بدائل تدفئة نظيفة في دول المناخ البارد.

توضح هذه التحليلات أن نوع الوقود، وليس كمية الطاقة فقط، هو العامل الحاسم في مسار الانبعاثات المستقبلية.

4-1 من دلالات الانبعاثات إلى مبررات التحول التكنولوجي القائم على الطاقة

النظيفة

تكشف النتائج التحليلية للانبعاثات أن جذور الانبعاثات في دول الأوبك لا تعود فقط إلى معدلات استهلاك الطاقة، بل إلى الاعتماد المكثف على مصادر طاقة عالية الكربون، خصوصًا في شبكات الكهرباء، وسائل النقل، والتدفئة التقليدية. وعليه، فإن إجراءات الكفاءة، رغم أهميتها، لن تكون كافية في غياب تحول بنيوي نحو طاقة أنظف.

إن المعطى الحاسم في ديناميكيات الانبعاثات ليس كمية الطاقة وحدها، بل كثافة الكربون في مصدر هذه الطاقة. وحتى في حال ثبات الطلب، فإن استمرار استخدام وقود عالي الانبعاث يعني استمرار ارتفاع الكربون.

وهنا تظهر أهمية الطاقة الجديدة والمتجددة، ليس فقط كمصدر بديل، بل كشرط أساسي لتحقيق خفض جذري في الانبعاثات. فبخلاف الوقود التقليدي، تتيح مصادر الطاقة المتجددة (مثل الشمس والرياح والهيدروجين الأخضر) توليد طاقة صفرية الانبعاثات التشغيلية، وهو ما يجعلها مكونًا غير قابل للاستبدال في أي مسار جاد لإزالة الكربون.

استنادًا إلى هذا المنطق، تم اختيار ست تكنولوجيات محددة تعالج مكامن الانبعاث الأعلى في كل قطاع، وتعتمد بشكل مباشر أو غير مباشر على الطاقة المتجددة أو الجديدة منخفضة الكربون، وهي:

المركبات الكهربائية (EVs) : حيث تُعد الكهرباء المدعومة بشبكات نظيفة إحدى أكثر الوسائل فعالية لإزالة الكربون من النقل الخفيف، خصوصًا في الدول القادرة على إدماج الطاقة الشمسية أو الرياح في شبكتها.

- شاحنات الهيدروجين (Hydrogen Trucks): تمثل خيارًا واعدًا للنقل الثقيل، مع إمكانية إنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء المتجددة (الهيدروجين الأخضر)، ما يحقق إزالة كاملة لانبعاثات العادم.
- مضخات الحرارة (Heat Pumps): تتيح استبدال التدفئة الوقودية بحلول كهربائية عالية الكفاءة، وعند ربطها بشبكة كهرباء نظيفة، تُحدث خفضًا جذريًا في انبعاثات قطاع التدفئة.
- أنظمة التسخين الشمسي للمياه (Solar Thermal For Heating): تعتمد على الطاقة الشمسية الحرارية مباشرة، ما يجعلها تقنية متجددة بالكامل، مثالية في المناخات الباردة لتقليل الحاجة للوقود الأحفوري.
- أنظمة التبريد المركزي عالية الكفاءة (District Cooling): تسهم في تقليل الحمل الكهربائي، وتصبح تأثيراتها المناخية مضاعفة عند تشغيلها باستخدام كهرباء متجددة.
- الطاقة الشمسية الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة (Grid-connected PV): تُعد المصدر الأساسي الذي يمكن من كهربة القطاعات الأخرى دون زيادة في الانبعاثات، وتوفر قاعدة صلبة لانتقال شامل نحو الطاقة النظيفة.

وباختيار هذه التكنولوجيات، لا تستهدف الدراسة فقط خفض الانبعاثات الكمية، بل تفكيك البنية الكربونية لأنظمة الطاقة القائمة، وبناء مسار انتقال حقيقي مدفوع بالطاقة المتجددة والجديدة، يتواءم مع الواقع المناخي، والتقني، والاقتصادي لدول الأوبك.

الفصل الثاني

سيناريوهات تبني التقنيات النظيفة وأثرها الكمي على الانبعاثات في
قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك

1-2: المقدمة

أوضحت نتائج الفصل الأول أن ارتفاع الانبعاثات في دول الأوبك لا يعود فقط إلى النمو في استهلاك الطاقة، بل بالأساس إلى الاعتماد على مصادر طاقة كثيفة الكربون، لا سيما في النقل، وشبكات الكهرباء، وأنظمة التدفئة التقليدية. وبالتالي، فإن التحول الطاقوي الفعال يتطلب أكثر من تحسين الكفاءة، بل يستدعي تفكيك البنية الكربونية من جذورها، عبر دمج مصادر نظيفة ومتجددة. استناداً إلى هذا التحليل، فبشكل مبدئي تم اختيار ست تكنولوجيات انتقالية، لا فقط لأنها قادرة على تقليل الانبعاثات، بل لأنها طاقة متجددة بالفعل أو تعتمد بشكل كلي أو جزئي على الطاقة المتجددة. ويبيّن الجدول التالي (الجدول 1-2) هذه التقنيات ومستوى جاهزيتها، وقطاع التطبيق المستهدف، لتوضيح مدى ارتباطها المباشر بمسار إزالة الكربون في دول الأوبك. باقي مبررات اختيار هذه التكنولوجيات دون غيرها توجد بالمسارات المرجعية المعتمدة لهذه التكنولوجيات المشروحا لاحقاً بهذا الفصل.

الجدول 1-2: التكنولوجيات المختارة للتحول الطاقوي بدول الأوبك في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد وعلاقتها بالطاقة المتجددة

القطاع	التكنولوجيات المختارة	اعتماد أو جاهزية التكنولوجيا للاعتماد على طاقة المتجددة
النقل	المركبات الكهربائية (EV)	جاهزة للاعتماد على الطاقة المتجددة
	شاحنات الهيدروجين (Hydrogen Trucks)	جاهزة للاعتماد على الطاقة المتجددة
التدفئة	مضخات الحرارة (Heat Pumps)	جزئية الاعتماد مع جاهزية الاعتماد الكلي على الطاقة المتجددة
	التسخين الشمسي للمياه	طاقة متجددة بالفعل
التبريد	التبريد المركزي عالي الكفاءة (District cooling)	جاهزة للاعتماد على الطاقة المتجددة
	الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Grid-connected PV)	طاقة متجددة بالفعل

2-2: المنهجية الخاصة بمسارات تبني التقنيات النظيفة

تعريف عام

يعتمد هذا التحليل على تحديد ثلاث مسارات مختلفة لتبني التقنيات النظيفة. وقد تم اعتماد قيم مرجعية لعامي 2025 و2050 بناءً على تقارير دولية صادرة عن وكالة الطاقة الدولي (IEA) ، والوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) ، وهيئة المناخ العالمي (IPCC) مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص الاقتصادية والمؤسسية لدول أوبك. ولتقدير نسب التبني في السنوات البيئية بين 2025 و2050، تم استخدام معادلة استيفاء خطي تفترض نمواً تدريجياً ثابتاً دون قفزات مفاجئة، ما يعكس مقاربة واقعية تراعي السياقات المحلية، دون الإخلال بالطموح التقني المطلوب لتحقيق أهداف خفض الانبعاثات.

سيناريوهات التبني

بنيت التحليلات على ثلاثة سيناريوهات مختلفة:

- سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU Scenario): يُفترض فيه استمرار السياسات الحالية دون تسارع إضافي في نشر التقنيات.
- السيناريو المعتدل (Moderate Scenario): يعتمد على تسارع واقعي مستند إلى تحسين السياسات، وزيادة التمويل، والتوسع التدريجي للبنية التحتية.
- السيناريو الطموح (Aggressive Scenario) : يواكب متطلبات مسارات صافي الانبعاثات الصفرية العالمية، ويستند إلى تبني سريع وشامل مدفوع بتحولات تنظيمية وتكنولوجية وسلوكية.

تم تصميم السيناريوهين المعتدل والطموح ليعكسا مستويين مختلفين جذرياً من التدخل في منظومة الطاقة:

السيناريو المعتدل (Moderate Scenario)

يعكس هذا السيناريو تسارعاً مدفوعاً بالسياسات التحفيزية، مثل:

- الحوافز المالية للمستهلكين
- دعم البنية التحتية (محطات شحن، شبكات ذكية)
- حملات التوعية
- تحسن تدريجي في تكنولوجيا الكفاءة والتكلفة

وهو يعتمد على منطق "دفع السوق" نحو التغيير، مع الحفاظ على ترك مساحة كبيرة لقرارات المستهلك والشركات. لذلك يُعد مسارًا تدريجيًا واقعيًا، لكنه لا يحقق الحياد الكربوني الكامل بحلول 2050.

السيناريو الطموح (Aggressive Scenario)

يعتمد هذا السيناريو على منطق التحول الكامل نحو الحياد الكربوني، بما يتماشى مع سيناريوهات Net Zero العالمية مثل تلك الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة IEA والهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2018). (IEA, 2021; IPCC, 2018). يتطلب تطبيق هذا السيناريو:

- إلغاء تدريجي إلزامي للوقود الأحفوري في بعض القطاعات
- إلزام الشركات بحدود كربونية صارمة
- تسريع الابتكار بدعم حكومي مباشر
- تغييرات سلوكية ومجتمعية كبرى (كالتحول من ملكية السيارة إلى المشاركة)
- الطموح هنا لا يعني فقط رفع الأرقام، بل إعادة تعريف مسار السوق والطاقة بالكامل، ليصبح التبني الكامل للتكنولوجيا النظيفة هو القاعدة وليس الاستثناء.
- لذلك، فإن الوصول إلى نسب تبني مثل 100% للمركبات الكهربائية أو 70% للطاقة الشمسية الكهروضوئية في هذا السيناريو ليس فقط افتراضًا كميًا، بل انعكاس لاقتصاد جديد منخفض الكربون ومحوّل بالكامل.

معادلة الاستيفاء الخطي

تم استخدام المعادلة التالية لحساب نسب التبني لأي سنة للسنوات الوسيطة بين 2025 و2050:

$$Adoption(t) = A_{25} + ((t - 25) / (50 - 2025)) \times (A_{50} - A_{25})$$

حيث تمثل $Adoption(t)$ نسبة التبني في السنة t ، و $A25$ و $A50$ هما نسب التبني في عامي 2025 و 2050 على التوالي. المعادلة تفترض نموًا خطيًا (linear growth) دون تراجع بين السنتين، وتستخدم لحساب القيم الوسيطة في السيناريوهات.

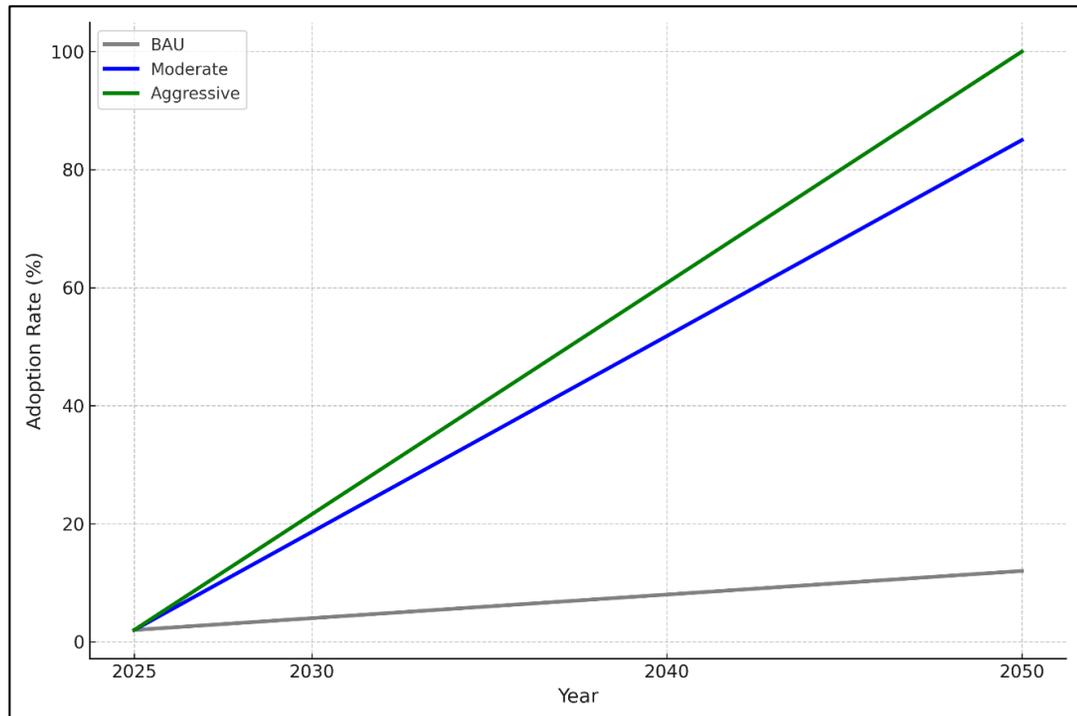
المسارات الخاصة بكل تقنية

المركبات الكهربائية (EVs) الشكل (1-2)

تشير نتائج السيناريوهات إلى أن حصة المركبات الكهربائية (EVs) من مبيعات السيارات الجديدة في دول أوبك تبلغ حوالي 2% في عام 2025. وبحلول عام 2050، يُتوقع أن ترتفع هذه الحصة إلى 85% في السيناريو المعتدل، وتصل إلى 100% في السيناريو الطموح.

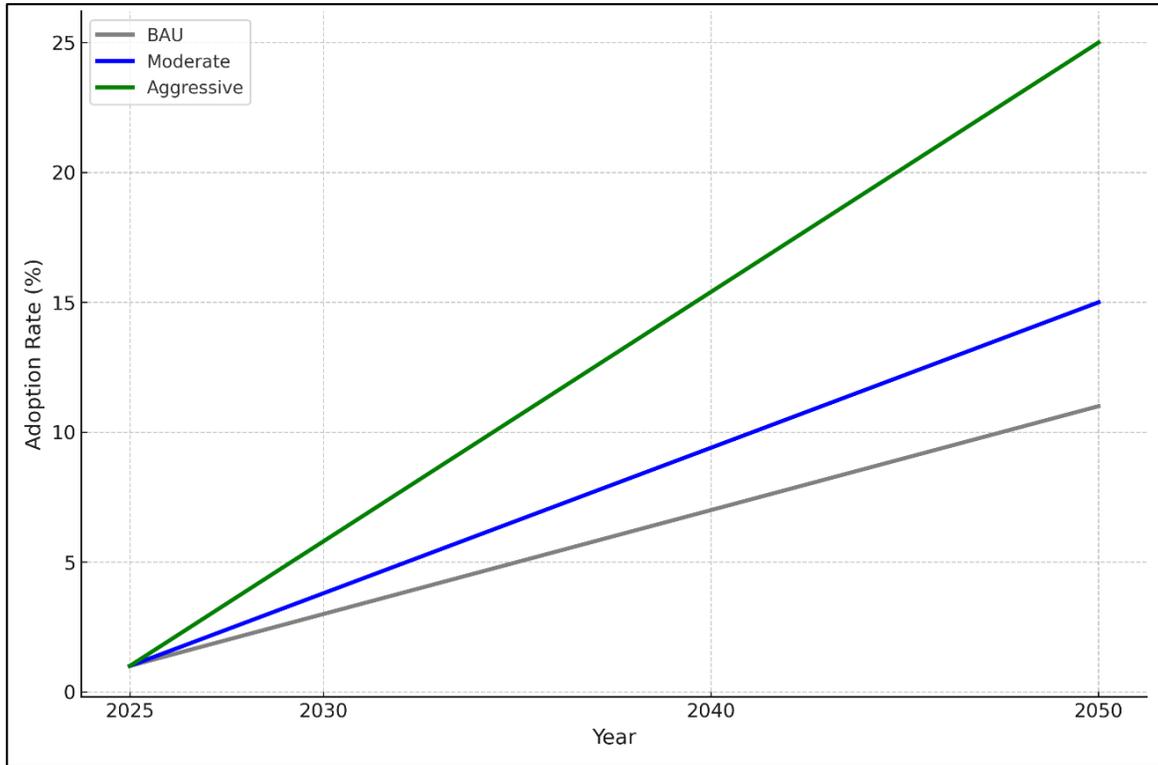
تستند هذه التقديرات إلى IEA Global EV Outlook 2023 و IPCC SR1.5، حيث تُظهر الأدلة أن تحقيق أهداف الحياد الكربوني يتطلب الاستبدال الكامل للمركبات التقليدية بمركبات كهربائية بحلول منتصف القرن، خاصةً في ظل الانخفاض المتسارع في تكلفة البطاريات وتوسّع البنية التحتية لمحطات الشحن. (IEA, 2023; IPCC, 2018)

الشكل (1-2) : نسب تبني المركبات الكهربائية في دول أوبك 2025-2050



شاحنات الهيدروجين للنقل الثقيل (Hydrogen Trucks) الشكل (2-2)

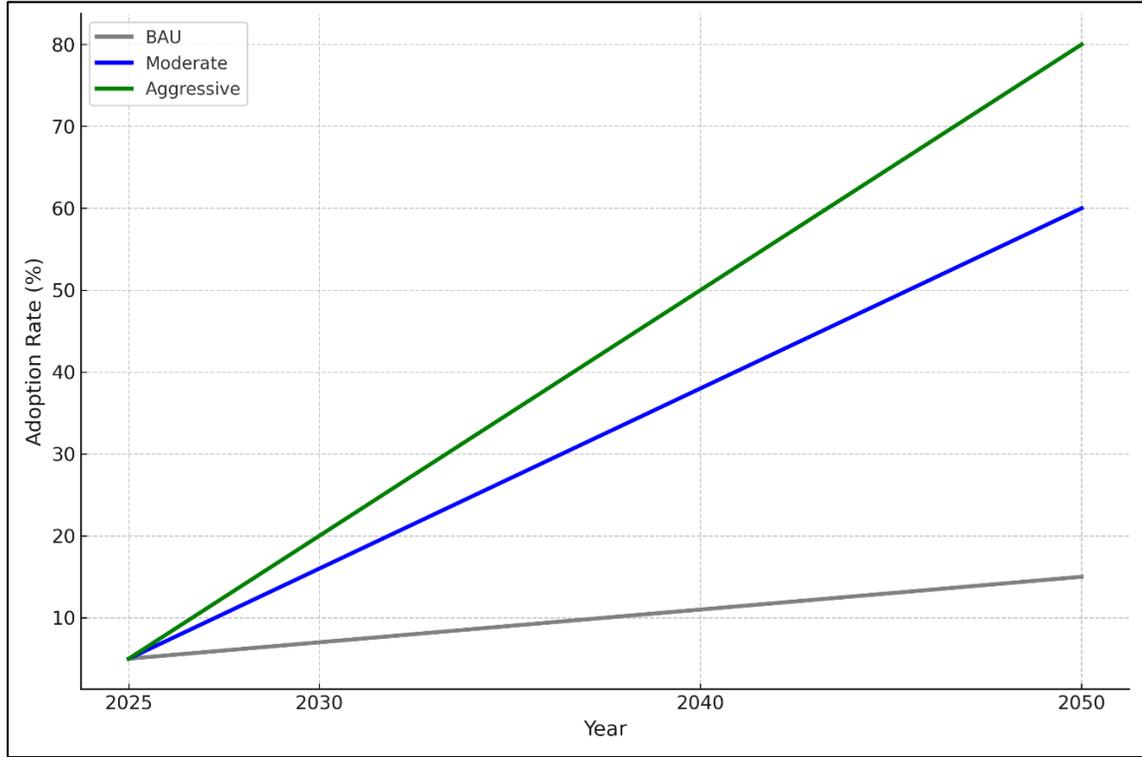
تشير النتائج إلى أنه بالرغم من أن نسبة التبني الحالية تكاد تكون معدومة، فإن التقديرات تشير إلى أن شاحنات خلايا الوقود الهيدروجينية قد تمثل نحو 15٪ من مبيعات الشاحنات الجديدة في السيناريو المعتدل، و25٪ في السيناريو الطموح بحلول عام 2050. تجدر الإشارة أن تحقيق أهداف الحياض الكربوني يتطلب تبنيًا واسعًا للشاحنات النظيفة، خاصة مع توسع البنية التحتية للهيدروجين وتراجع تكاليف وحدات التحليل الكهربائي (IEA, 2021). ويشار إلى أن هذه النسب تمثل حصة من المبيعات الجديدة، وبالتالي فإن تأثيرها الكامل على انبعاثات القطاع يتوقف أيضًا على سرعة استبدال الأسطول القائم.

الشكل (2-2): نسب تبني شاحنات الهيدروجين للنقل الثقيل في دول أوبك 2025-2050**المضخات الحرارية (Heat Pumps)**

تُعتبر المضخات الحرارية من أكثر التقنيات كفاءة في التدفئة والتبريد على حد سواء، ويُتوقع أن تصل نسبة استخدامها إلى 5٪ في 2025، ثم إلى 60٪ في السيناريو المعتدل و80٪ في السيناريو الطموح بحلول 2050. استند في هذا المسار إلى IEA Heat Pumps Technology Report

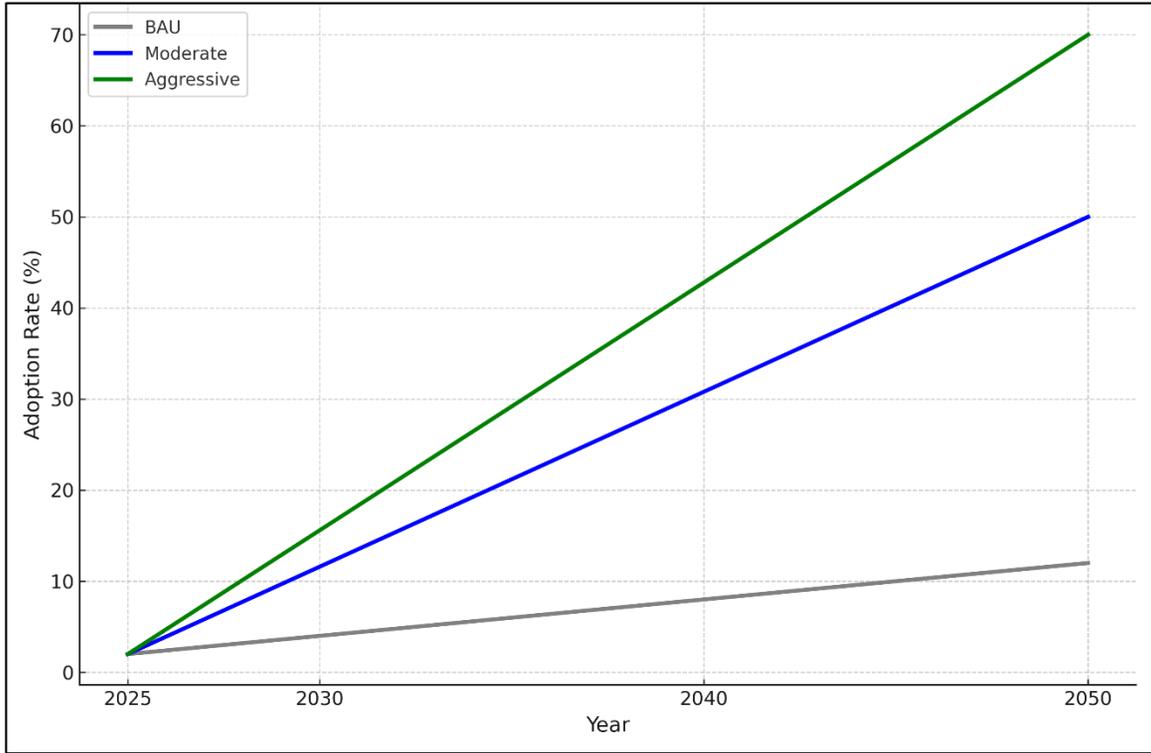
2022، يمكن أن تعتمد على المضخات الحرارية بحلول 2050 في ظل توفر دعم سياسات حكومية واسع النطاق (IEA, 2022)؛ انظر الشكل (3-2) لعرض المسار الخاص بكل سيناريو.

الشكل (3-2) نسب تبني المضخات الحرارية في دول أوابك 2025-2050

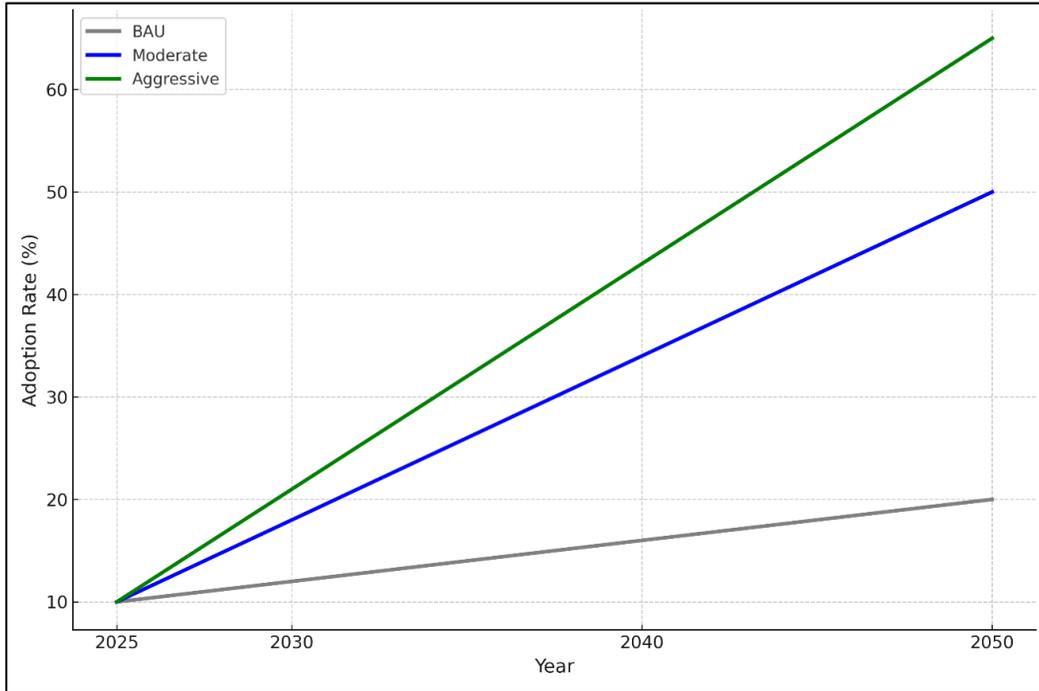


التسخين بالطاقة الشمسية (Solar Thermal Heating) الشكل (4-2)

تشير سيناريوهات التبني إلى أن أنظمة التسخين الشمسي (Solar Thermal) يمكن أن تغطي بين 50% (في السيناريو المعتدل) و70% (في السيناريو الطموح) من احتياجات المباني من التدفئة بحلول عام 2050، انطلاقاً من تقديرات أولية تقارب 3% في عام 2025. وتعتمد هذه التقديرات على مصادر دولية مثل IEA Renewables Report 2022 (IEA, 2022).

الشكل (4-2): نسب تبني التدفئة بالطاقة الشمسية في دول أوابك 2025-2050**التبريد المركزي (District Cooling) الشكل (5-2)**

تشكل نظم التبريد المركزي حلاً جماعياً فعالاً للأبنية الحضرية الكثيفة، خاصة في المناطق الحارة. تُظهر التوقعات إمكانية الوصول إلى 50% من تغطية الحمل التبريدي في السيناريو المعتدل، و65% في السيناريو الطموح بحلول 2050، مقارنةً بنسبة مرجعية تبلغ 20% في 2025، مع افتراض توسع مخططات المدن المستدامة.

الشكل (2-5): نسب تبني التبريد المركزي في دول أوابك 2025-2050**الشكل (2-6) الطاقة الشمسية الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة (Grid-Connected PV)**

تشير تقارير IRENA Renewable Energy Market Analysis 2023 إلى أن نظم الطاقة الشمسية المرتبطة بالشبكة يمكن أن تصل إلى 85% من حصة الكهرباء في المناطق المشمسة بحلول 2050 في السيناريو الطموح، مقارنة بـ 3% في 2025، و70% في السيناريو المعتدل. تعكس هذه الأرقام التحسن السريع في الكفاءة، والتراجع الحاد في التكاليف الرأسمالية، وانتشار السياسات التحفيزية.

تشير تحليلية الدراسة إلى أن نظم الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة بالشبكة (Grid-Connected PV systems) قد تصل إلى تغطية حوالي 3% من الحصة الكهربائية في عام 2025، وأنها قد ترتفع لتغطي حوالي 70% ضمن السيناريو المعتدل و85% في السيناريو الطموح بحلول عام 2050.

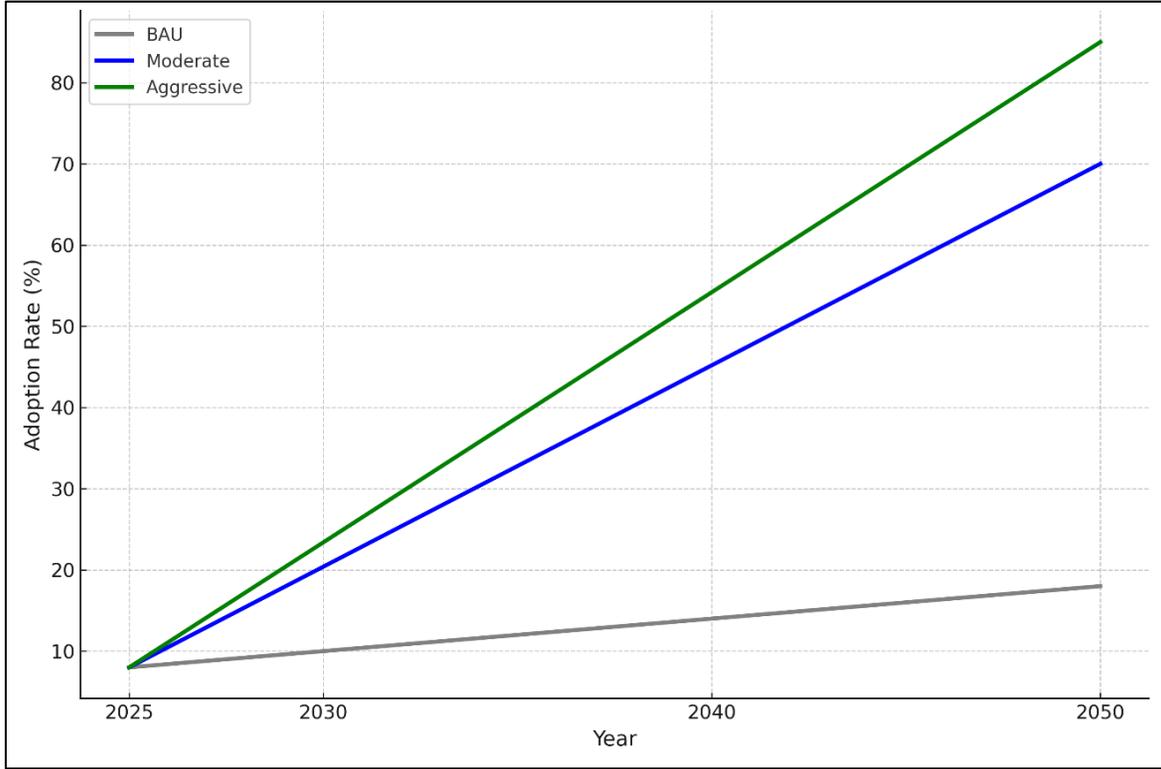
وتعتمد هذه التقديرات على اتجاهات عامة وردت في تقارير دولية مثل IRENA Renewable

Energy Market Analysis 2022، و IRENA World Energy Transitions، و Outlook 2024، إلى جانب ما ورد في تقرير IEA Renewables 2022 حول النمو المتوقع

للطاقة الشمسية في المناطق ذات الإشعاع المرتفع (IRENA, 2022; IRENA, 2024; IEA,

2022).

الشكل (2-6) : نسب تبني الطاقة الشمسية المرتبطة بالشبكة في دول أوابك 2025-2050



3-2: أثر التبني التقني الكمي علي الانبعاثات من دول أوابك

منهجية حساب الانبعاثات: من الحصر التفصيلي إلى التقدير التحفظي الكلي

تتعتمد هذه الدراسة على نهج كمي دقيق وتحفظي لتقدير الانبعاثات الناتجة عن القطاعات الثلاثة الرئيسية: النقل، التدفئة، والتبريد، وذلك ضمن سيناريوهات مختلفة لتبني التقنيات النظيفة في دول الأوابك. يقوم النموذج على هيكل بنائي يبدأ من كل دولة، ثم كل قطاع داخلها، ثم كل تقنية، وصولاً إلى تجميع النتائج زمنياً وقطاعياً لتكوين الصورة العامة للانبعاثات.

معادلات الحساب الأساسية

يعتمد النموذج على معادلتين مترابطتين:

1. حساب وفورات الانبعاثات لكل تقنية:

$$Emission\ Saving_{x,\gamma,z,t} = BAU\ Emissions_{x,\gamma,t} \times Share_{x,\gamma,z} \times Effectiveness_z \times Adoption_{z,t}$$

حيث:

- x = الدولة
- γ = القطاع (نقل / تدفئة / تبريد)
- z = التقنية
- t = السنة

تمثل هذه المعادلة وفورات الانبعاثات المتوقعة نتيجة استخدام تقنية معينة في قطاع معين داخل دولة محددة، خلال سنة معينة، اعتمادًا على:

- الانبعاثات المتوقعة في السيناريو المرجعي (BAU Emissions) بناءً على الطلب الطاقوي النهائي حسب الدولة والقطاع، والمتوفر في الأشكال من الشكل (4-1) إلى الشكل (6-1).

- يمثل Technology Share الحد الأقصى من القطاع الذي يمكن للتقنية أن تغطيه واقعيًا، تم تحديده من خلال مراجعة البنية التحتية والواقع التنظيمي في كل دولة.

- فعالية التقنية في تقليل الانبعاثات مقارنة بالتقنيات المستخدمة بالفعل

(Effectiveness)

- معدل التبني المتوقع للتقنية حسب السنة والسيناريو (Adoption) والممثل في الأشكال من 1-2 إلى 6-2، باستخدام معادلة الاستيفاء الخطي لحساب السنوات الوسيطة.

هذا التكامل بين مصادر البيانات يسمح ببناء نماذج دقيقة تأخذ في الاعتبار الخصائص الخاصة بكل دولة، وليس مجرد تعميمات إقليمية.

2. حساب الانبعاثات النهائية:

$$Final\ Emissions_{x, \gamma, t} = BAU\ Emissions_{x, \gamma, t} - \sum Emission\ Saving_{x, \gamma, z, t}$$

أي أن الانبعاثات النهائية تساوي الانبعاثات المرجعية مطروحًا منها مجموع الوفورات التي تحققها جميع التقنيات المطبقة على ذلك القطاع.

قاعدة الـ 80%: استهداف الأعلى تأثيرًا، بدون تجاهل الأقل

أحد أهم مكونات المنهجية باهذه الدراسة هو التركيز على الدول التي تمثل تقريبًا 80% من إجمالي الانبعاثات في كل قطاع مع اضافة الدول القريبة من أقل دولة في الانبعاثات تم تحديدها اذا كان الفارق ضئيل. تم تحديد هذه الدول استنادًا إلى إجمالي الانبعاثات في سنة الأساس (2020)، وتم إدراجها في الحسابات التفصيلية الخاصة بتطبيق التقنيات النظيفة. تشمل هذه الدول مثلًا:

- قطاع النقل: السعودية، مصر، العراق، الإمارات، الكويت.
- قطاع التدفئة: الجزائر، مصر، السعودية، العراق، تونس.
- قطاع التبريد: السعودية، الإمارات، الجزائر، مصر، العراق، الكويت.

أما الدول الأقل انبعاثًا في كل قطاع (تمثل تقريبًا الـ 20% المتبقية)، فقد تم افتراض استمرارها ضمن سيناريو الأعمال كالمعتاد (BAU) دون تغيير. هذا التمييز يسمح بإنتاج نتائج واقعية قابلة للتطبيق، دون استبعاد أي دولة من الاعتبار الكلي.

توزيع الحصص والفعالية: كيف حُددت قيم Effectiveness و Technology Share

تم الرجوع في ذلك إلى تقارير دولية رئيسية ، منها:

1. The Future of Cooling (IEA, 2018)
2. Solar Heat Worldwide 2021 (IEA SHC, 2021)
3. Global EV Outlook 2023 (IEA, 2023).

الجدول (2-2): بعض قيم Effectiveness و Technology Share للتقنيات المختلفة بدول أوابك المختلفة

الدولة	القطاع	التقنية	Technology Share (%)	Effectiveness (%)
السعودية	النقل	المركبات الكهربائية	35	78
مصر	النقل	شاحنات الهيدروجين	12	70
الجزائر	التدفئة	المضخات الحرارية	40	70
العراق	التدفئة	التسخين بالطاقة الشمسية	25	60
قطر	التبريد	التبريد المركزي	30	65
الإمارات	التبريد	الطاقة الشمسية الكهروضوئية	20	55

التحليل القطاعي لنتائج تبني التقنيات المختلفة بدول أوابك

تمثل الشكل (7-2) الي الشكل (10-2) الانعكاس الكمي لتطبيق التكنولوجيات المختارة على الانبعاثات الكلية، ويوضح الفروق الناتجة عن ثلاثة سيناريوهات: BAU (مرجعي)، معتدل، وطموح، حتى عام 2050.

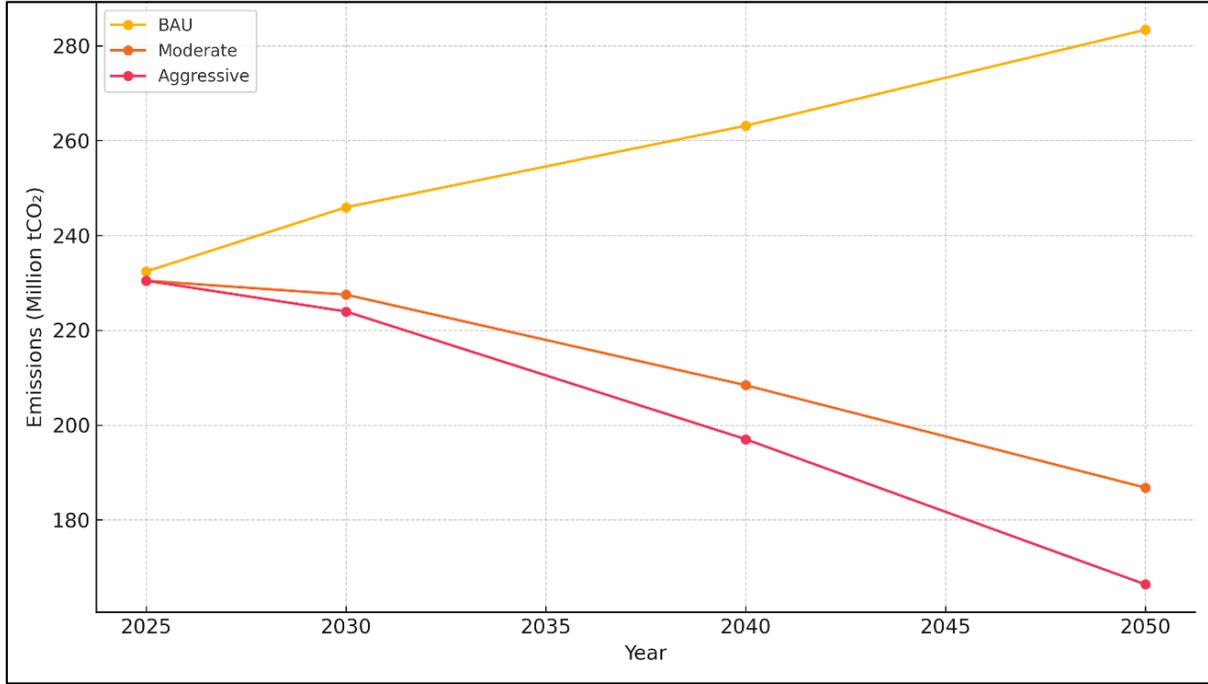
أ. قطاع النقل- المحرك الأسرع للتحويل: الشكل (7-2)

قطاع النقل هو هو قطاع كثيف الانبعاثات في دول الأوابك، لكنه أيضاً من أكثر القطاعات استجابةً لتقنيات التحويل، خاصة المركبات الكهربائية وشاحنات الهيدروجين. يُظهر الشكل (7-2) أن السيناريو الطموح يؤدي إلى خفض تدريجي يبدأ من 2030 ويتسارع بشكل واضح بعد 2040.

حيث تبلغ انبعاثات القطاع لدول أوابك في عام 2050:

- قرابة الـ 290 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في سيناريو الأعمال المعتاد (BAU).
- قرابة الـ 190 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو المعتدل بفارق 100 مليون طن ونسبة خفض 35%.
- قرابة الـ 170 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو الطموح بفارق 120 مليون طن ونسبة خفض 41%.

الشكل (7-2): تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات علي انبعاثات النقل في دول أوابك 2025-2050



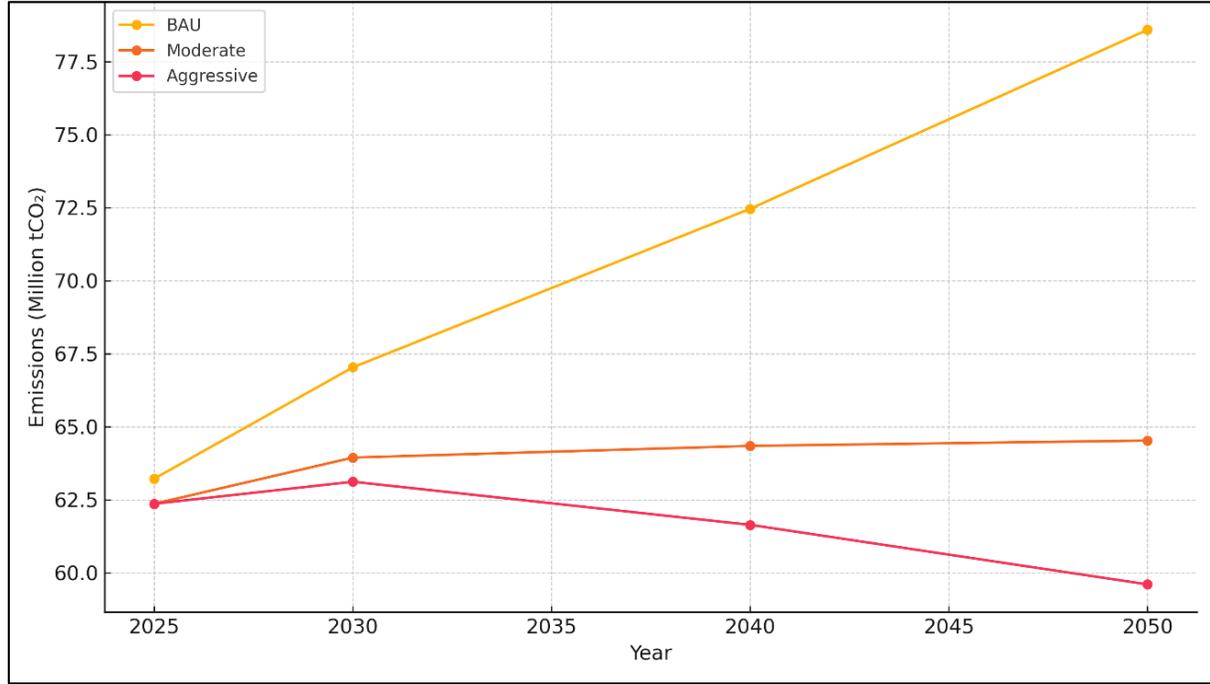
ب. قطاع التدفئة – الأثر غير المباشر للحرارة النظيفة

رغم أن الانبعاثات في قطاع التدفئة أقل من النقل، إلا أن الشكل (8-2) يكشف أن التقنيات الحرارية مثل المضخات الحرارية والتسخين الشمسي تؤدي إلى خفض فعال عند تبنيها على نطاق واسع. التحول يبدأ ببطء ثم يتسارع بعد 2035.

حيث تبلغ انبعاثات القطاع لدول أوابك في عام 2050:

- الـ 79 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في سيناريو الأعمال المعتاد (BAU).
- الـ 64 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو المعتدل بفارق 15 مليون طن ونسبة خفض 18%.
- الـ 59 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو الطموح بفارق 20 مليون طن ونسبة خفض 26%.

الشكل (8-2): تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات علي انبعاثات التدفئة في دول أوابك 2025-2050



ت. قطاع التبريد – النمو الخطر والفرصة الذهبية

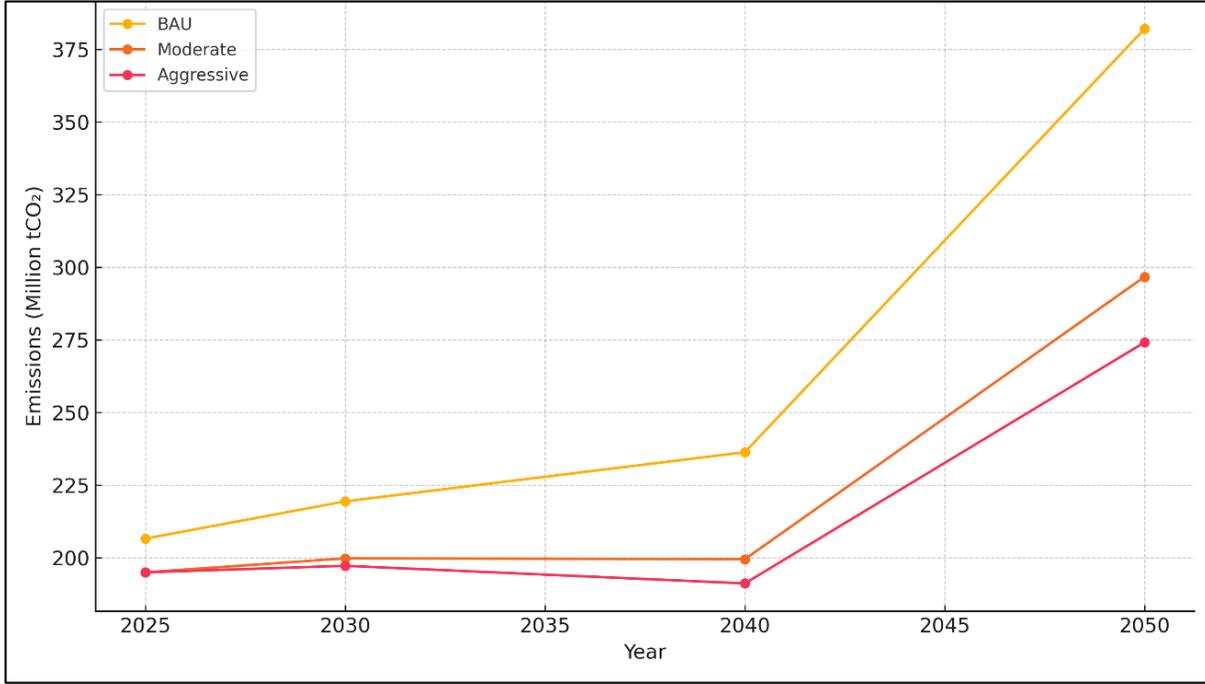
يمثل التبريد القطاع الأسرع نموًا من حيث الانبعاثات بسبب تغير المناخ وزيادة التكييف، لكن الشكل (9-2) يُظهر أن الدمج بين التبريد المركزي والطاقة الشمسية الكهروضوئية قادر على عكس هذا المسار في السيناريو الطموح.

حيث تبلغ انبعاثات القطاع لدول أوابك في عام 2050:

- الـ 382 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في سيناريو الأعمال المعتاد (BAU).
- الـ 296 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو المعتدل بفارق 86 مليون طن ونسبة خفض 23%.
- الـ 274 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو الطموح بفارق 108 مليون طن ونسبة خفض 28%.

الشكل (2-9) : تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات علي

انبعاثات التبريد في دول أوبك 2025- 2050



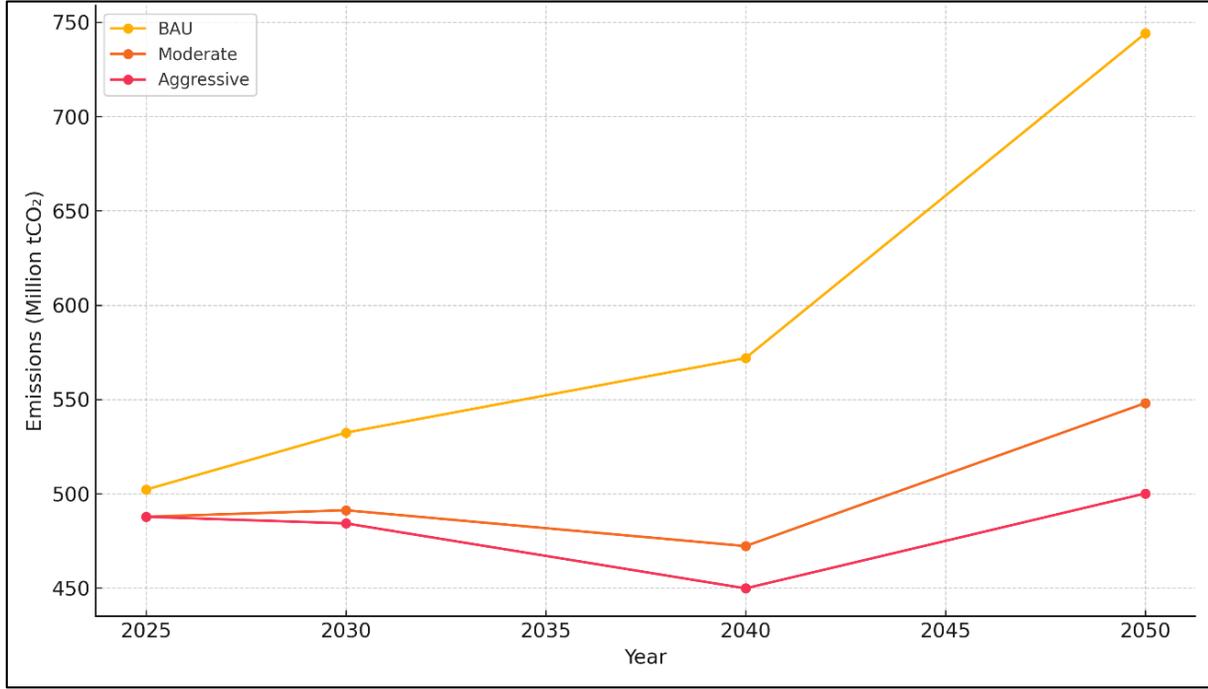
ث. إجمالي الانبعاثات – من النمو الخطي إلى الانحدار البنيوي الشكل (2-10)

يجمع هذا الجزء نتائج القطاعات الثلاثة، ويُظهر أن التأثير التراكمي لتطبيق التقنيات في السيناريو الطموح يؤدي إلى تحول جوهري في مسار الانبعاثات الكلية.

حيث تبلغ انبعاثات الثلاث قطاعات مجتمعة لدول أوبك في عام 2050:

- الـ 744 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في سيناريو الأعمال المعتاد (BAU).
 - الـ 548 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو المعتدل بفارق 196 مليون طن ونسبة خفض 26%.
 - الـ 500 مليون طن ثاني أكسيد الكربون في السيناريو الطموح بفارق 244 مليون طن ونسبة خفض 33%.
- ما يلفت النظر هو أن السيناريو المعتدل أيضاً يحقق خفضاً معتبراً، مما يعني أن تحقيق نتائج ملموسة لا يتطلب دائماً أقصى درجات التحول، بل تكامل السياسات والتمويل والتطبيق المتدرج.

الشكل (2-10): تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات علي انبعاثات الثلاث قطاعات في دول أوابك 2025-2050



استنتاج تحويلي: من تقنيات فردية إلى مسار تكاملي

لا تقتصر أهمية هذه النتائج على تخفيض الأرقام الكمية للانبعاثات، بل تكمن في ما تعكسه من تحول هيكلي محتمل في نظم الطاقة داخل دول الأوابك.

- التقنية وحدها لا تكفي — يجب أن تُدمج ضمن إطار مؤسسي وتنظيمي شامل.
 - ليست كل القطاعات متساوية في الاستجابة — لكن التنوع يُتيح المرونة في الاستراتيجية.
 - التبنّي المتدرج (كما في السيناريو المعتدل) يمكن أن يحقق نتائج فعالة دون صدمات اقتصادية.
 - الطاقة المتجددة ليست مجرد بديل تقني، بل قاعدة بنيوية لأي مسار ناجح لإزالة الكربون.
- وبالتالي، يُمكن القول إن نتائج الأشكال 2-7 الي 2-10 تقدم أساساً مرجعياً لبناء سياسات قطاعية تتسم بالترابط، والواقعية، والفعالية المناخية.

الفصل الثالث

**تحليل الجدوى الاقتصادية والاجتماعية لتقنيات خفض الانبعاثات في
قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك**

3-1: المقدمة

يمثل هذا الفصل استكمالاً مباشراً للفصل السابق، الذي تناول بصورة كمية وتحليلية أثر تبني التقنيات النظيفة على خفض الانبعاثات في قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد بدول الأوبك، من خلال الأشكال من 1-2 الي 10-2. بينما اقتصر ذلك الفصل على التأثيرات المناخية المباشرة للانتقال التقني، ينتقل هذا الفصل إلى تقدير التكاليف والاستثمارات المطلوبة لتطبيق التقنيات، مقابل الفوائد المترتبة مثل وفورات الوقود، تقليل العبء الصحي، والتكلفة الصافية على النظام، بالإضافة إلى حساب تكلفة الإزالة الحدية للطن الكربوني (MAC).

3-2 المنهجية التفصيلية لحساب الأشكال من الشكل (3-1) إلى الشكل (3-6)

تم بناء هذه الجزء من الدراسة استناداً إلى نتائج الشكل (2-10) المتعلق بالانبعاثات المتجنبة، وتم توظيف نهج الانبعاثات المستمرة (Persistent Emissions) لاحتساب التأثيرات السنوية المتراكمة، مع مراعاة عوامل التدهور التقني وعمر الخدمة. تشمل الحسابات عناصر الإنفاق الرأسمالي (CAPEX)، الإنفاق التشغيلي (OPEX)، وفورات الوقود، المكاسب الصحية، وصافي التكلفة النظامية، بالإضافة إلى تكلفة الإزالة الحدية للكربون (MAC).

منطق الانبعاثات المستمرة (Persistent Emissions)

ينطلق مفهوم "الانبعاثات المستمرة" من الفرضية الأساسية بأن أثر التكنولوجيا في خفض الانبعاثات لا يقتصر على سنة التطبيق فقط، بل يمتد لسنوات عديدة تبعاً للعمر التشغيلي لتلك التكنولوجيا. هذه الفرضية تعتبر أكثر واقعية مقارنة بالنهج الثابت الذي يحتسب الانبعاثات فقط في سنة التبني، لأنها تعكس الأثر التراكمي الحقيقي الناتج عن تقنيات الطاقة النظيفة.

وفقاً لهذا المنهج، يتم توزيع الانبعاثات المتجنبة على سنوات عمر التقنية باستخدام معامل تدهور (Degradation Factor) يعبر عن انخفاض الكفاءة سنوياً. فعلى سبيل المثال، إذا كانت وحدة تسخين حراري تساهم في تجنب 2 طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في السنة الأولى، فإن هذا الرقم سينخفض تدريجياً في السنوات التالية نتيجة للتدهور التقني الطبيعي. المعادلة المستخدمة لحساب الانبعاثات المتجنبة باستخدام هذا النهج هي:

$$Avoided_Emissions_{t,s,\gamma}$$

$$= Avoided_Emissions_{t,s,\gamma_0} \times (1 - d_t)^{(\gamma - \gamma_0)}$$

حيث:

- $Avoided_Emissions_{t,s,\gamma}$: الانبعاثات المتجنبة من التقنية t في القطاع s في السنة y
- $Avoided_Emissions_{t,s,\gamma_0}$: الانبعاثات المتجنبة في سنة الأساس γ_0
- d_t : معامل التدهور السنوي للتقنية
- $(\gamma - \gamma_0)$: عدد السنوات منذ سنة التبني

إن تطبيق هذا المنهج يتطلب ربطاً دقيقاً بين بيانات الانبعاثات المرجعية (Reference Emissions) على مستوى الدولة والقطاع والتقنية، وبين خصائص كل تقنية مثل العمر التشغيلي والكفاءة التراكمية. وفقاً لذلك، فإن الانبعاثات المتجنبة في عام معين (مثل 2030) لا تمثل فقط تأثير التقنيات التي تم تركيبها في تلك السنة، بل مجموع التأثيرات التراكمية للتقنيات التي تم تطبيقها منذ عام 2025 حتى ذلك العام، بعد احتساب التدهور السنوي في الكفاءة.

هذا النهج يتماشى مع النماذج المتكاملة العالمية مثل MESSAGE-GLOBIOM (IIASA, 2022) و GCAM (JGCRI, 2023)، ويوفر رؤية أكثر دقة لتقييم تأثير السياسات المبكرة مقارنة بالسياسات المتأخرة. حيث أظهرت الدراسات أن الدول التي بدأت تبني تقنيات نظيفة مبكراً تحقق وفورات تراكمية أكبر، حتى عندما تكون تكاليف التأسيس مبدئياً أعلى (Vinca et al., 2021; Way et al., 2022).

بالإضافة إلى ما سبق، يُمكن هذا النموذج من تقييم الأثر المتغير بين السيناريو المعتدل والطموح. ففي السيناريو المعتدل، حيث تكون نسب التبني أقل وأبطأ، تكون الانبعاثات المتجنبة في السنوات اللاحقة أقل بكثير من نظيرتها في السيناريو الطموح، بسبب التأخير في تبني التكنولوجيا وفقدان سنوات من خفض الانبعاثات المحتملة.

وبناءً عليه، يُعد منهج الانبعاثات المستمرة أحد الأعمدة المنهجية لهذا التحليل، ويمثل عنصراً فارقاً في تقييم الجدوى المناخية والاقتصادية للطاقة النظيفة في المنطقة.

3-3 طريقة حساب الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) ونتائجه

يُعد حساب الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) خطوة محورية في تقييم الجدوى المالية لبرامج التحول الطاقوي. بخلاف النهج التقليدي الذي يحتسب التكلفة التراكمية، يعتمد نموذجنا على نهج أكثر واقعية، إذ يُحسب CAPEX فقط على الوحدات الجديدة المُضافة سنويًا، مع خصم ما تم تركيبه بالفعل في السنة السابقة. هذا يُوفّر صورة دقيقة لتطور الإنفاق الرأسمالي بمرور الوقت.

معادلة الحساب:

$$CAPEX_{t,\gamma} = (Units_{t,\gamma} - Units_{t,\gamma-1}) \times UnitCost_{t,\gamma}$$

حيث:

- $CAPEX_{t,\gamma}$ = الإنفاق الرأسمالي للتقنية t في السنة γ
- $Units_{t,\gamma}$ = عدد الوحدات المركبة حتى السنة γ
- $Units_{t,\gamma-1}$ = عدد الوحدات في السنة السابقة
- $UnitCost_{t,\gamma}$ = تكلفة الوحدة في السنة γ

هذا النهج في احتساب CAPEX يعكس واقعية اقتصادية عالية، ويتماشى مع توصيات منظمات التمويل المناخي مثل البنك الدولي وصندوق المناخ الأخضر، والتي تشترط وضوحًا في توزيع الإنفاق الرأسمالي حسب الفترات الزمنية والتقنيات المستهدفة.

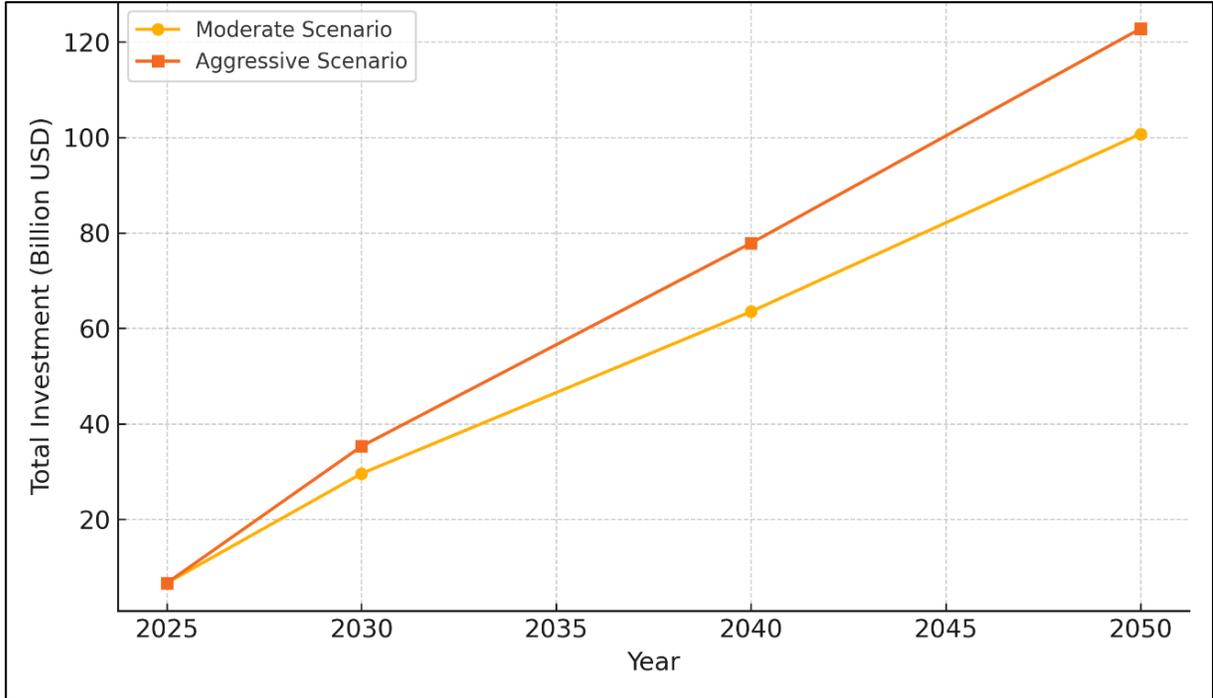
يشير الشكل (1-3) إلى أن الـ CAPEX من 2025 حتى 2050 في السيناريو الطموح بلغ أكثر من 120 مليار دولار للعام 2050، بينما بلغ في نفس العام في السيناريو المعتدل حوالي 100 مليار دولار.

بينما يُظهر الشكل (2-3) الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) موزعًا على القطاعات المختلفة في عام 2050 لكل سيناريو، فإن هذا العرض يوفر أداة مهمة لتقييم كفاءة الاستثمارات عبر القطاعات. ويُقصد بذلك مقارنة تكلفة الوحدة في كل قطاع مع حجم التبرني وانبعثاته المتجنبة، لتحديد أي القطاعات تحقق أعلى وفورات كربونية مقابل كل دولار مستثمر. يساعد هذا النوع من التحليل

صُنِّعَ القرار على توجيه التمويل إلى القطاعات التي تُحقق أفضل عائد مناخي واقتصادي ضمن سنة مفصلية كالعام 2050.

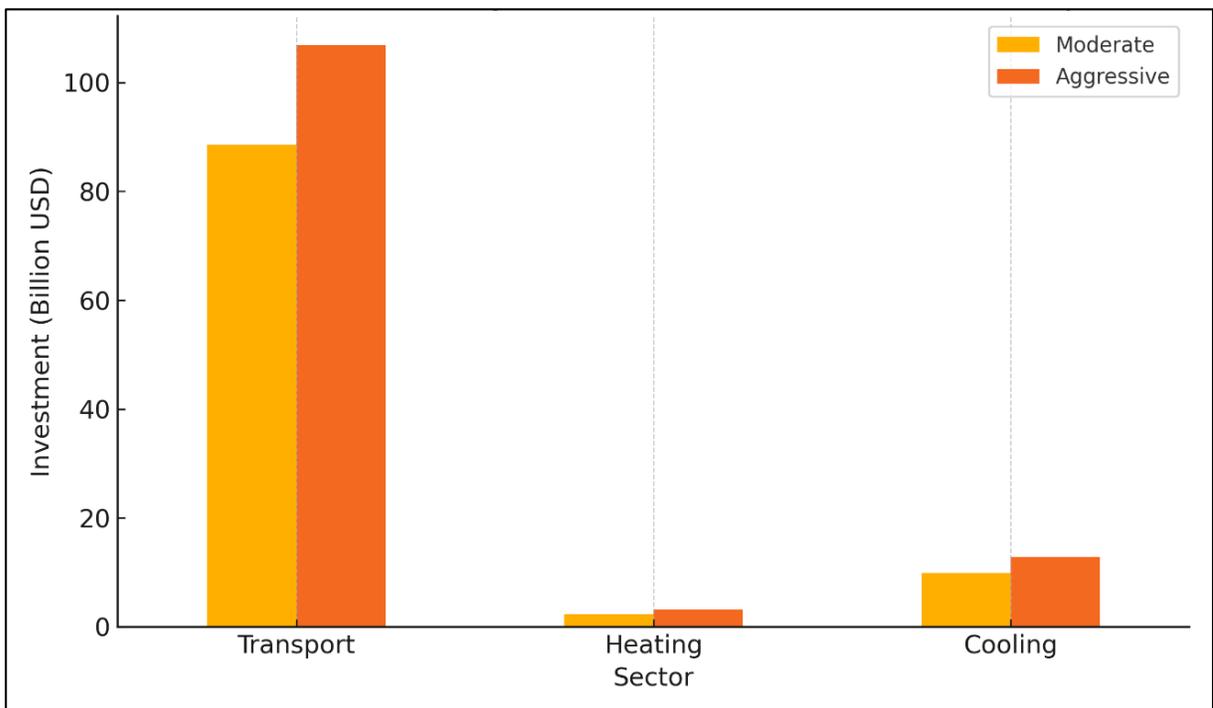
الشكل (1-3) : الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) لتبني التقنيات بالثلاث

قطاعات في دول أوابك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050



الشكل (2-3) : الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) لتبني التقنيات بكل قطاع علي حده

في دول أوابك في السيناريوهات المختلفة لعام 2050



4-3 طريقة حساب وفورات الوقود (Fuel Savings) الشكل (3-3)

تعكس وفورات الوقود أحد أبرز المنافع الاقتصادية المباشرة الناتجة عن اعتماد تقنيات الطاقة النظيفة، وهي تشكل عنصرًا حاسمًا في تقييم جدوى الاستثمار في البنية التحتية منخفضة الانبعاثات. في هذا التحليل، يتم تحويل الانبعاثات المتجنبة إلى وحدات طاقة (جيجا جول) باستخدام عوامل الانبعاث القياسية، ثم تُحسب القيمة النقدية لتلك الطاقة بناءً على أسعار الوقود المتوقعة لكل سنة.

المعادلة:

$$Fuel\ Savings_{t,s,\gamma} = (Avoided\ Emissions_{t,s,\gamma} / EF_t) \times P_\gamma$$

حيث:

- $Avoided\ Emissions_{t,s,\gamma}$: كمية الانبعاثات المتجنبة نتيجة التقنية t في القطاع s في السنة y ، مقدرة بالطن من CO_2
- EF_t : معامل الانبعاث الخاص بالتقنية، مقدّر بالطن CO_2 لكل جيجا جول (tCO_2/GJ)
- P_γ : سعر الوقود في السنة y ، بالدولار لكل جيجا جول (USD/GJ)

عوامل الانبعاث المعتمدة:

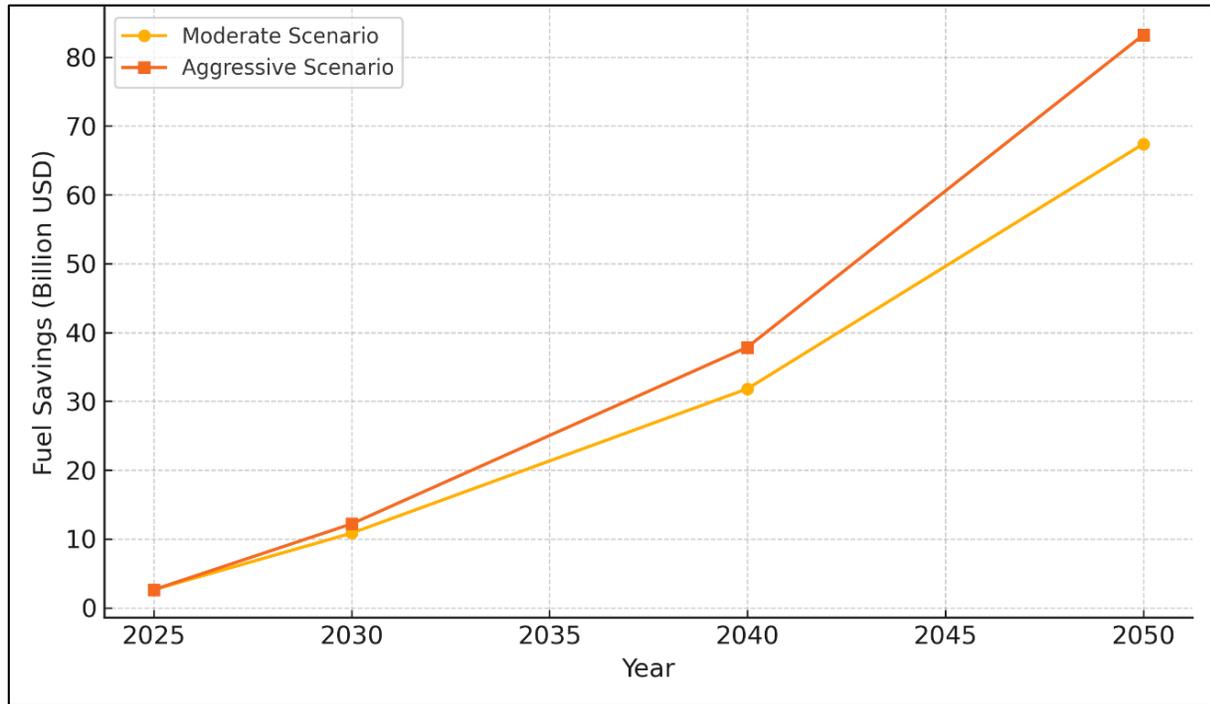
- البنزين والديزل: 0.074 طن CO_2 /جيجا جول
- الغاز الطبيعي: 0.056 طن CO_2 /جيجا جول

أما أسعار الوقود، فتم احتسابها بناءً على المتوسطات الإقليمية لأسعار النفط والغاز، مع افتراض تضخم سنوي معتدل بنسبة 2%، بدءًا من أسعار عام 2023.

تشير نتائج النماذج إلى أن وفورات الوقود التراكمية في السيناريو الطموح تصل إلى أكثر من 85 مليار دولار سنويًا بحلول عام 2050، في حين تصل إلى أكثر من 60 مليار دولار سنويًا لذات العام. من الناحية التحليلية، فإن وفورات الوقود توفر مبررًا اقتصاديًا قويًا لتسريع نشر التقنيات

النظيفة، خاصة في الدول التي تعاني من عجز مزمن في ميزان الطاقة، أو من دعم كبير لأسعار الوقود، مثل مصر والجزائر. علاوة على ذلك، فإن هذه الوفورات تمثل فرصة لإعادة تخصيص الموارد المالية نحو قطاعات أخرى مثل التعليم والرعاية الصحية، مما يعزز الأثر الاجتماعي للانتقال الطاقى مما يعني أن وفورات الوقود لا تقل أهمية عن خفض الانبعاثات عند تقييم أثر السياسات المناخية.

الشكل (3-3) : وفورات الوقود (Fuel Savings) نتيجة تبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوابك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050



5-3 طريقة حساب المكاسب الصحية الشكل (4-3)

تُعد الفوائد الصحية الناتجة عن خفض الانبعاثات إحدى المنافع غير المباشرة الأساسية في التحول نحو الطاقة النظيفة. تقليل استهلاك الوقود الأحفوري يقلل من تراكيز الملوثات الجوية مثل $PM_{2.5}$ وأكاسيد النيتروجين، مما يؤدي إلى خفض نسب الإصابة بأمراض التنفس والقلب والوفيات المبكرة.

في هذا التحليل تم استخدام رقم تقديري محافظ يبلغ 20 دولارًا لكل طن من CO₂ المتجنب، بناءً على النطاقات الأدنى التي توصي بها تقارير مثل البنك الدولي (Sánchez-Triana et al., 2023) ، رغم أن بعض التحليلات تشير إلى قيم أعلى بكثير، لكنه مفيد لتقدير أدنى حجم من التكاليف الصحية المتوقعة.

المعادلة:

$$Health\ Benefits_{t,s,\gamma} = Avoided\ Emissions_{t,s,\gamma} \times 20$$

حيث:

- Health Benefits_{t,s,γ}: تمثل الفوائد الصحية (بالدولار) الناتجة عن تقليل الانبعاثات لتقنية معينة t في قطاع معين s في سنة معينة γ.
- Avoided Emissions_{t,s,γ}: تعني كمية الانبعاثات المتجنبة (بالطن من CO₂) نتيجة تطبيق تلك التقنية في ذلك القطاع وتلك السنة.
- 20: هو معامل الفائدة الصحية (بالدولار لكل طن CO₂ متجنب)، ويعكس القيمة النقدية الدنيا المستندة إلى تقديرات البنك الدولي ومنظمة الصحة العالمية.

تشير نتائج السيناريو الطموح إلى أن الفوائد الصحية في عام 2050 تبلغ أكثر من 7 مليار دولار، بينما تقدر في السيناريو المعتدل بحوالي 6 مليار دولار لنفس العام. أعلى هذه المكاسب تظهر في الدول ذات الكثافة السكانية العالية مثل مصر والعراق، حيث يرتفع التعرض للتلوث الهوائي، وبالتالي فإن الأثر الصحي للتحويل الطاقوي يكون أكبر. ولا تقتصر أهمية هذه المكاسب على الجانب الاقتصادي، بل تشمل الجوانب الاجتماعية والتنمية، ومنها:

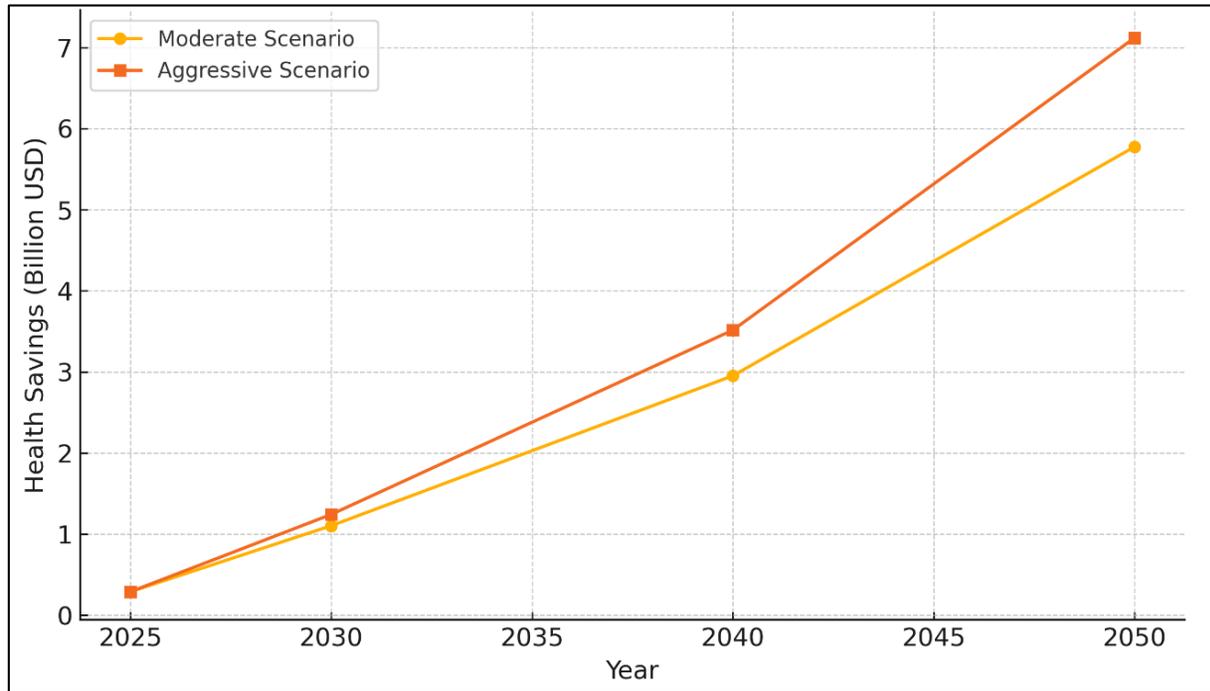
- تقليل العبء على نظم الرعاية الصحية العامة.
- تحسين جودة الحياة في المناطق الحضرية.
- تعزيز الإنتاجية نتيجة انخفاض أيام الغياب عن العمل بسبب الأمراض.

وفقًا لتقرير (The Lancet Countdown (2022) ، فإن التعرض لـ PM_{2.5} الناتج عن الوقود الأحفوري يسبب نحو 1.2 مليون وفاة سنوية عالمياً؛ (The Lancet Countdown, 2022; Romanello et al., 2022) ويمكن أن تُساهم السياسات المناخية الفعالة في خفض عدد الوفيات بما يصل إلى ملايين الحالات سنويًا. وبالتالي، فإن إدراج الفوائد الصحية ضمن التحليل الاقتصادي يعزز التبرير لاتخاذ قرارات سياسة أكثر شمولية وتأثيرًا. كما يوصي باستخدام تقديرات صحية تدريجية في التحليلات المستقبلية، تشمل:

- اعتماد قيم متفاوتة بحسب التركيب السكاني وكثافة التلوث
- نمذجة التأثيرات التراكمية طويلة الأمد
- دمج بيانات محددة لكل دولة من نظم الترصد البيئي والصحي

هذا سيساعد في تقديم تقديرات أكثر دقة، ويدعم تخصيص السياسات الصحية والبيئية على المستوى الوطني.

الشكل (3-4) : المكاسب الصحية الناتجة عن تقليل الانبعاثات نتيجة تبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050



6-3 طريقة حساب التكلفة الصافية للنظام (System Cost) ونتائج الشكل (5-3)

تُعد "التكلفة الصافية للنظام" من أهم المؤشرات التي تعكس التوازن بين التكاليف والفوائد الناتجة عن تبني تقنيات خفض الانبعاثات. فهي توضح ما إذا كانت السياسات المناخية مكلفة فعلاً، أم يمكن تبريرها اقتصادياً على المدى الطويل. ويُحسب هذا المؤشر من خلال الجمع بين التكاليف الرأسمالية (CAPEX) والتشغيلية (OPEX)، وخصم الفوائد الناتجة مثل وفورات الوقود والفوائد الصحية.

الصيغة المستخدمة لحساب التكلفة الصافية هي كما يلي:

$$\begin{aligned} \text{Net System Cost}_{t, s, \gamma} &= \text{CAPEX}_{t, s, \gamma} + \text{OPEX}_{t, s, \gamma} - \text{Fuel Savings}_{t, s, \gamma} \\ &\quad - \text{Health Benefits}_{t, s, \gamma} \end{aligned}$$

حيث:

- تمثل الرموز t, s, γ على التوالي كلاً من نوع التقنية، القطاع الاقتصادي، والسنة المرجعية محل التحليل.
- CAPEX : الإنفاق الرأسمالي على الوحدات الجديدة لكل تقنية وقطاع وسنة
- OPEX : المصروفات التشغيلية السنوية، وتُحسب كما يلي:

$$\text{OPEX}_t = \sum (\text{Active Units}_{i, t} \times \text{Annual OPEX per Unit}_i)$$

حيث:

- OPEX_t : التكلفة التشغيلية في السنة (t)
- $\text{Active Units}_{i, t}$: عدد الوحدات النشطة لكل تقنية (i) في السنة (t)
- $\text{Annual OPEX per Unit}_i$: تكلفة التشغيل السنوية لكل وحدة من التقنية (i)
- تُحتسب فقط للوحدات النشطة في تلك السنة (وفق العمر التشغيلي المحدد لكل تقنية: 15 سنة للسيارات الكهربائية، 20 للحرارة، 25 للشمسية الشبكية)

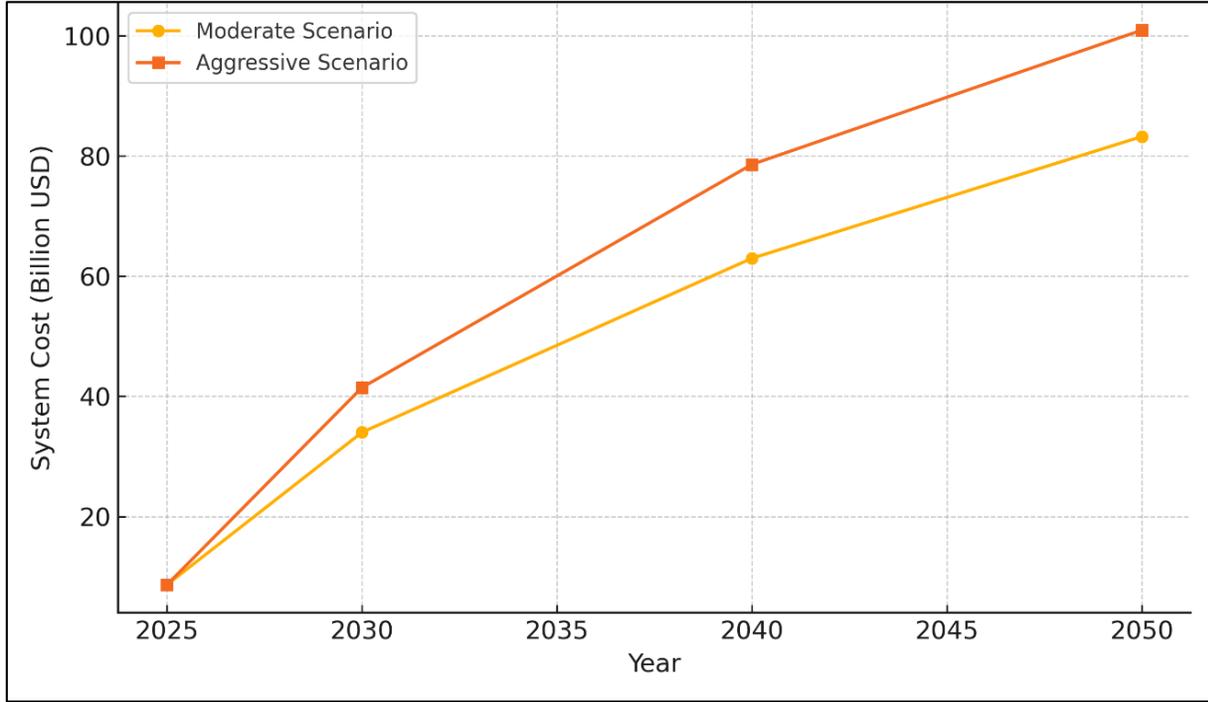
- لا تُحتسب الوحدات الخارجة من الخدمة أو المنتهية العمر
- لم يُؤخذ في الحسبان أي خفض للتكلفة بمرور الوقت (no learning curve)
- Fuel Savings : تم احتسابها في قسم السابق
- Health Benefits : تم احتسابها في القسم السابق

هذا المؤشر يمثل التكلفة الفعلية المتبقية على الاقتصاد بعد خصم المنافع الاقتصادية من التكاليف الرأسمالية والتشغيلية.

قد أظهرت النتائج أنه:

- ذأن التكلفة الصافية للنظام في عام 2050 فقط، وليست تراكمية، بلغت نحو 85 مليار دولار في السيناريو المعتدل، و100 مليار دولار في السيناريو الطموح. يعكس هذا الفارق زيادة الاستثمارات الرأسمالية في السيناريو الطموح نتيجة التوسع المبكر في اعتماد التقنيات النظيفة، يقابله تحقيق وفورات أعلى في السنوات التالية، دون أن تكفي لتعويض كامل التكاليف بحلول 2050.
- التكاليف تتركز في العقد الأول (2035-2025)، خاصة في السيناريو الطموح، حيث يتم تنفيذ الجزء الأكبر من CAPEX خلال هذه الفترة.
- المكاسب الاقتصادية، بما في ذلك وفورات الوقود والفوائد الصحية، تبدأ بالتزايد الفعلي بعد 2035، وتصبح أكثر وضوحًا بين 2040 و2050.
- ومع ذلك، لا تشير البيانات إلى حدوث توازن مالي فعلي بين التكاليف والمكاسب في نهاية الفترة، إذ تظل التكلفة الصافية موجبة حتى عام 2050، ما لم يتم إدخال أدوات سياسية داعمة.
- تعكس هذه النتائج حقيقة أن التحول الطاقوي منخفض الكربون دون أدوات تمويل أو دعم سياسي مباشر يبقى مكلفًا اقتصاديًا على المدى المتوسط.

الشكل (3-5) : التكلفة الكلية (Total System Cost) لتبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوابك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050



7-3 طريقة حساب تكلفة الازالة الحدية للكربون ونتاجه الشكل (3-6)

تُعد تكلفة الإزالة الحدية للكربون (Marginal Abatement Cost – MAC) من أهم المؤشرات الاقتصادية المستخدمة لتقييم كفاءة تقنيات خفض الانبعاثات. وهي تمثل الكلفة الإضافية لإزالة طن واحد من ثاني أكسيد الكربون باستخدام تقنية معينة، مقارنة بالسيناريو المرجعي (BAU). وتستخدم هذه القيمة بشكل واسع لتوجيه قرارات الاستثمار والسياسات العامة في مجالات الطاقة والمناخ.

تُعد تكلفة الإزالة الحدية للكربون (Marginal Abatement Cost – MAC) من أهم المؤشرات الاقتصادية المستخدمة لتقييم كفاءة تقنيات خفض الانبعاثات. وهي تمثل الكلفة الإضافية لإزالة طن واحد من ثاني أكسيد الكربون باستخدام تقنية معينة، مقارنة بالسيناريو المرجعي (BAU). وتستخدم هذه القيمة بشكل واسع لتوجيه قرارات الاستثمار والسياسات العامة في مجالات الطاقة والمناخ.

المعادلة المعتمدة:

$$MAC_t = (CAPEX_t + OPEX_t - FuelSavings_t - HealthBenefits_t) \div AvoidedEmissions_t$$

حيث تُحسب القيم التراكمية لكل تقنية t خلال الفترة من 2025 حتى 2050، من خلال جمع التكاليف والمكاسب السنوية وربطها بإجمالي الانبعاثات المتجنبة عبر تلك الفترة. ويتضمن ذلك:

- $CAPEX_t$: إجمالي الاستثمار الرأسمالي المرتبط بالتقنية
- $OPEX_t$: المصروفات التشغيلية على مدار فترة حياة التقنية
- $FuelSavings_t$: قيمة الوقود الذي تم توفيره نتيجة استخدام التقنية
- $HealthBenefits_t$: الفوائد الصحية الناتجة عن تقليل الانبعاثات
- $AvoidedEmissions_t$: إجمالي كمية الانبعاثات المتجنبة بفعل التقنية (بالأطنان)

تشير تقارير IPCC AR6 و Joule (2023) إلى أن تحقيق أهداف سيناريو 1.5 درجة مئوية يتطلب التركيز على تقنيات تقل فيها تكلفة الإزالة الحدية عن 100 دولار/طن بحلول عام 2030. وتُظهر نتائج هذا النموذج أن معظم التقنيات المدروسة تحقق هذه الشرط، بل إن العديد منها يسجل قيمًا أقل من 60 دولارًا للطن.

أظهرت النتائج أن أقل MAC تم تسجيله كان في تقنيات التدفئة والتبريد، نظرًا لانخفاض كلفة الاستثمار وسرعة الانتشار، بينما ظهرت أعلى التكاليف الحدية في تقنيات قطاع النقل، خاصة تلك التي تتطلب بنية تحتية كبيرة مثل الشاحنات الهيدروجينية.

تكمن أهمية مؤشر MAC في:

- تحديد أولويات الإنفاق الحكومي والمساعدات المالية
- تصميم سياسات تسعير الكربون مثل أنظمة تبادل الانبعاثات (ETS)

• توجيه الاستثمارات نحو التقنيات ذات الجدوى الاقتصادية الأعلى

وتُظهر النتائج أن العديد من تقنيات الطاقة النظيفة في دول الأوبك تمتلك تكلفة إزالة حدية منافسة على المستوى العالمي، بل إن بعض التقنيات تُظهر MAC سالبًا، ما يعني أن منافعها تفوق تكاليفها حتى بدون تسعير للكربون. وهذا يمثل فرصة استراتيجية لتسريع التحول دون عبء مالي كبير، خاصة في الدول ذات الموارد المحدودة.

وتُحسب القيم التراكمية لكل تقنية خلال الفترة 2025-2050، مع جمع التكاليف والمكاسب لكل سنة وربطها بإجمالي الانبعاثات المتجنبة عبر تلك الفترة.

حيث:

- CAPEX_t: الاستثمار الرأسمالي الخاص بالتقنية t

- OPEX_t: المصاريف التشغيلية على مدى عمر التقنية

- وفورات الوقود: القيمة الاقتصادية للطاقة غير المستهلكة

- الفوائد الصحية: كما تم شرحها سابقًا

- الانبعاثات المتجنبة: الكمية الكلية من CO₂ التي تم تجنبها بفعل استخدام التقنية

أظهرت النتائج أن معظم التقنيات تقع تحت سقف 60 دولار/طن. أقل MAC تم تسجيله في تقنيات قطاعي التبريد والتدفئة، بسبب انخفاض كلفة الاستثمار وسرعة الانتشار، في حين كانت أعلى القيم في تقنيات قطاع النقل.

يُعد MAC أداة مهمة في:

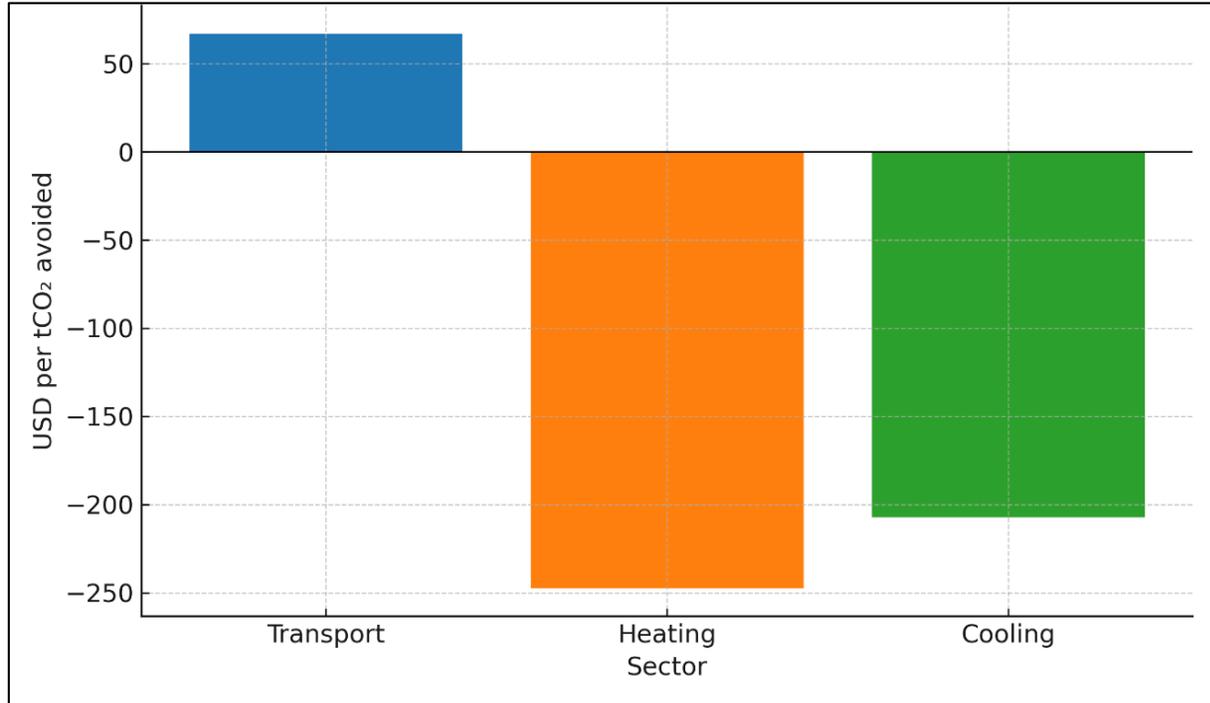
- تحديد أولويات الإنفاق العام

- تسعير الكربون ضمن أنظمة ETS (Emission Trading Systems)

- توجيه الدعم الحكومي نحو التقنيات الأكثر فعالية من حيث الكلفة

من هنا، فإن استخدام MAC كمعيار في تصميم السياسات المناخية يمنح صناع القرار أداة كمية لرسم مسارات الانتقال الطاقوي وتقييم جدوى كل خيار تقني على حدة. تُظهر النتائج أن العديد من تقنيات الطاقة النظيفة في دول الأوبك تملك MAC تنافسية عالمياً، بل في بعض الحالات تكون سالبة (أي ذات جدوى فورية حتى دون تسعير للكربون)، مما يفتح المجال لتسريع التحول دون عبء مالي كبير.

الشكل (3-6) : متوسط تكلفة الازالة الحدية للكربون بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050



8-3 الخاتمة العامة والنتائج التلخيصية

أوضح هذا الفصل أن التحول إلى تقنيات الطاقة النظيفة في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول الأوبك لا يحقق مكاسب بيئية فحسب، بل يحمل في طياته فرصاً اقتصادية ملموسة، حتى في غياب

أدوات تسعير الكربون. فقد أظهرت النتائج أن معظم التقنيات المدروسة تسجل تكاليف إزالة حدية منخفضة (MAC) لا تتجاوز 60 دولارًا للطن، وأن بعض التقنيات تمتلك جدوى مالية فورية (MAC سالبة)، مما يجعلها مجدية من منظور اقتصادي بحت.

رغم أن التكلفة الصافية للنظام (System Cost) لا تزال موجبة في عام 2050، فإن العوائد المتزايدة من وفورات الوقود والفوائد الصحية تشير إلى أن نقطة التوازن المالي قد تتحقق في العقود التالية، خاصة إذا تراكمت مع إصلاحات مالية داعمة. يعزز هذا من جدوى التعجيل في نشر تلك التقنيات، خصوصًا في الدول التي تعاني من عجز طاقي أو أعباء صحية ناتجة عن التلوث.

ولكن، لضمان استدامة هذا التحول وتسريع الوصول إلى الحياد الكربوني، تبرز الحاجة إلى سياسات مالية مكتملة، وفي مقدمتها تسعير الكربون. لذلك، ينتقل الفصل التالي إلى تحليل الأثر الاقتصادي والاجتماعي لتطبيق ضرائب الكربون أو أنظمة تبادل الانبعاثات في دول الأوبك، مع تقدير الإيرادات الممكنة، والخسائر في صادرات الوقود، وصافي التأثير على الناتج المحلي والعدالة الاجتماعية.

الفصل الرابع

الأثر الاقتصادي والاجتماعي لتسعير الكربون في دول الأوابك

1-4: مقدمة ومنهجية عامة لتحليل السياسات المالية المناخية

يركز هذا الفصل على تحليل الأثر الاقتصادي والاجتماعي لتطبيق سياسات تسعير الكربون في دول الأوبك، وذلك ضمن إطار الانتقال العادل نحو اقتصاد منخفض الانبعاثات. يكمل هذا الفصل ما تم تحليله في الفصل الثالث من حيث الأثر المالي والتقني المباشر لتبني تقنيات الطاقة النظيفة، ويتوسع في دراسة الآثار الكلية للسياسات القائمة على آلية "تسعير الكربون".

يتناول الفصل بالتفصيل الأشكال (1-4 الي 4-6) والتي تعرض سلسلة من المؤشرات المرتبطة بمسار تسعير الكربون، الإيرادات الناتجة عنه، الآثار السلبية على صادرات الوقود الأحفوري، وصافي التأثير على الناتج المحلي، الوظائف، وقدرة الأسر على تحمل تكلفة الطاقة.

تستند المنهجية المستخدمة في بناء هذه التحليلات إلى سلسلة مترابطة من الحسابات الديناميكية، حيث تم إدخال سيناريوهين رئيسيين لتسعير الكربون. وقد تم ربط هذه القيم بتقديرات الانبعاثات المتبقية بعد تطبيق تقنيات الطاقة النظيفة (من الفصل السابق)، لتقدير:

-الإيرادات السنوية والمترجمة

-الخسائر في الناتج الناتجة عن انخفاض صادرات الوقود

-مدى تعويض هذه الخسائر من خلال إعادة تدوير الإيرادات

-أثر تلك السياسات على العمالة والعدالة الاجتماعية

2-4: مسار تسعير الكربون (الشكل 1-4)

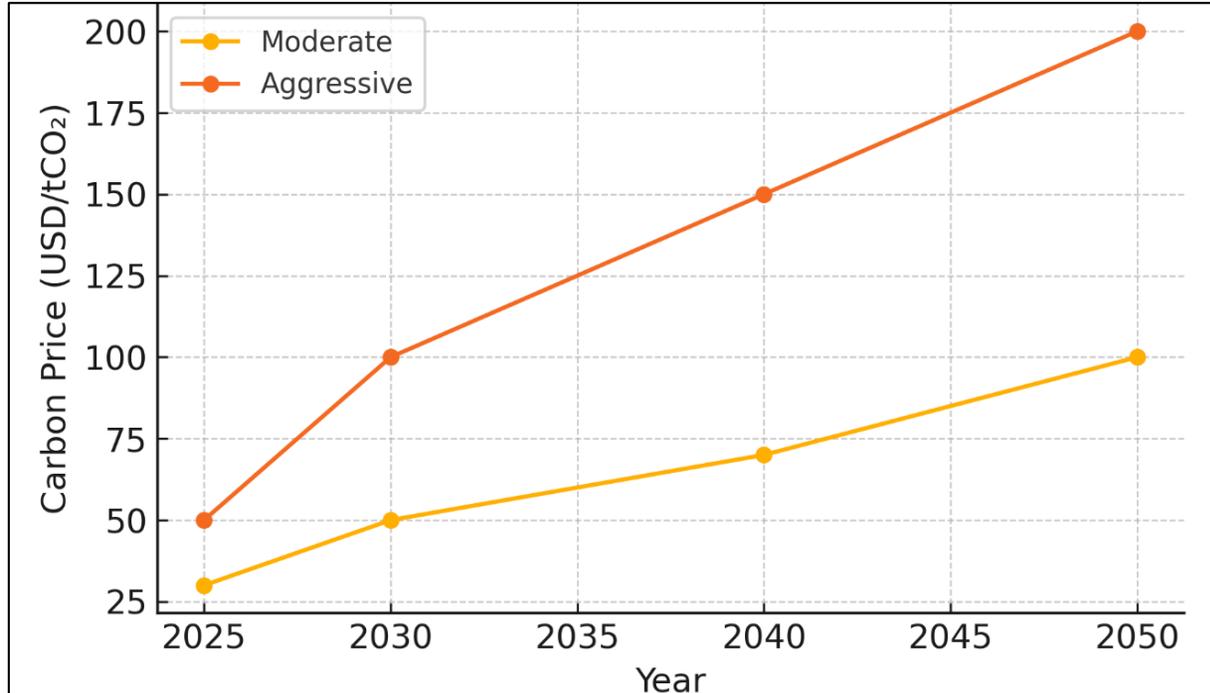
يعكس الشكل (1-4) مسارًا تصاعديًا لتسعير الكربون في كل من السيناريو المعتدل والطموح، حيث يبدأ السعر في السيناريو المعتدل من 15 دولارًا/طن CO₂ في عام 2025 ويصل تدريجيًا إلى 100 دولار/طن في عام 2050. أما في السيناريو الطموح، فيبدأ من 25 دولارًا/طن في 2025 ويبلغ 200 دولار/طن بحلول 2050، وهو ما يتماشى مع التوصيات الدولية مثل تلك الواردة في تقارير البنك الدولي، وصندوق النقد الدولي (IMF, 2023)، وتقرير وكالة الطاقة الدولية (IEA). (2023) تشير هذه المصادر إلى أن تحقيق أهداف اتفاق باريس للمناخ يتطلب تسعيرًا للكربون يتراوح بين 100 و200 دولار/طن CO₂ بحلول عام 2050، وذلك لضمان تغيير حقيقي في

الأنماط الاستثمارية وتقليل الانبعاثات بشكل جذري (High-Level Commission on Carbon Prices, 2017). في السيناريوهين، لا تتم الزيادة بشكل سنوي منتظم، بل على ثلاث دفعات رئيسية:

- الزيادة الأولى: بعد 5 سنوات (أي في عام 2030).
- الزيادة الثانية: بعد 10 سنوات من الزيادة الأولى (في عام 2040).
- الزيادة الثالثة: بعد 10 سنوات إضافية (في عام 2050).

وتساوي كل زيادة منها سعر الكربون لسنة الأساس في كل سيناريو. بذلك، يتم توزيع الزيادة الكلية بين السعر الابتدائي والسعر النهائي على ثلاث مراحل، تبدأ في 2030 ثم 2040 ثم 2050. هذا التسلسل الزمني يسمح بإعطاء وقت للأسواق للتكيف التدريجي، وتجنب الصدمات الاقتصادية الناتجة عن فرض ضرائب كربونية عالية دفعة واحدة.

**الشكل (1-4) : السيناريوهات المختلفة لتسعير الكربون
في دول أوبك خلال الفترة 2025-2050**



التفسير السياساتي:

تُظهر الدراسات الاقتصادية الحديثة أن استقرار مسار تسعير الكربون وشفافيته يُعدان من العوامل الحاسمة في تحفيز الاستثمارات طويلة الأجل في الطاقة النظيفة، وخاصةً في القطاعات كثيفة الانبعاثات. تشير الأدبيات إلى أن "الإشارة السعرية" الناتجة عن تسعير كربون واضح ومتصاعد تُعد أداة فعالة لدفع المنتجين والمستهلكين لتعديل سلوكهم تدريجيًا، بما يتيح تخفيض الانبعاثات بطريقة اقتصادية وفعالة. (Nature Communications, 2025).

وقد أكدت دراسة للبنك الدولي (World Bank, 2023) أن تصميم آلية تسعير تتدرج بمرونة مع الزمن، وتضمن القدرة على التنبؤ، يمثل شرطًا أساسيًا لاستقرار الأسواق وتقليل المخاطر الاستثمارية. كما أبرز تقرير High-Level Commission on Carbon Pricing and Competitiveness الصادر عن البنك الدولي أن تسعير الكربون لا يؤدي بالضرورة إلى تقويض القدرة التنافسية للدول، بل يمكن أن يعزز الابتكار الصناعي ويساعد على خلق وظائف جديدة خضراء، إذا ما صُمم بطريقة تدريجية ومتكاملة. (World Bank, 2020).

بالنسبة لدول الأوابك، فإن اعتماد مسار واضح لتسعير الكربون يمكن أن يوفر قاعدة مالية مهمة لإعادة تدوير الإيرادات نحو سياسات تعويضية للفئات الأكثر تضررًا، أو لتمويل مشاريع البنية التحتية منخفضة الكربون، مما يُمكن من تحقيق الأهداف المناخية دون فرض عبء مالي صريح على الميزانية العامة.

3-4: الإيرادات الكربونية الناتجة عن التسعير المعتدل الشكل (2-4)

يمثل هذا الشكل الإيرادات التراكمية التي كان يمكن تحقيقها في دول أوابك لو تم تطبيق سياسة تسعير للكربون على الانبعاثات التي تم تجنبها بفعل تبني التقنيات النظيفة في القطاعات الثلاثة (النقل، التبريد، التدفئة) خلال الفترة 2025-2050 في الفصول السابقة. ويعتمد هذا التقدير على مسار تسعير معتدل للكربون يبدأ من 25 دولارًا/طن CO₂ في 2025 ويصل تدريجيًا إلى 100 دولار/طن CO₂ في 2050، كما تم شرحه بالأعلى بهذا الفصل. استخدام هذا المسار المحافظ لسعر الكربون هنا يعكس اتساق التحليل عبر الفصول، ويضمن ألا تُحتسب الإيرادات على أساس

افتراضات مفرطة أو غير واقعية. تجدر الإشارة أيضا بأنه تم افتراض التزام الدول بتحصيل كامل هذه الإيرادات وعدم وجود إعفاءات واسعة.

الصيغة الحسابية المستخدمة:

$$\text{Carbon Revenue}_\gamma = \text{Avoided Emissions}_\gamma \times \text{Carbon Price}_\gamma$$

حيث:

- $\text{Carbon Revenue}_\gamma$ هي الإيرادات الكربونية في السنة γ ، وتقاس بمليار دولار أمريكي.
- $\text{Avoided Emissions}_\gamma$ وهي كمية الانبعاثات المتجنبة في السنة γ نتيجة تبني التقنيات النظيفة، وتقاس بمليون طن CO_2
- $\text{Carbon Price}_\gamma$ وهو سعر الكربون المفروض في السنة γ ، ويقاس بالدولار لكل طن CO_2 .

النتائج الرئيسية:

السيناريو المعتدل: (Moderate)

تُظهر النتائج أن الإيرادات الممكنة من تسعير الانبعاثات المتجنبة يمكن أن يصل الي نحو 50 مليار دولار أمريكي سنوياً بحلول عام 2050. يُظهر ذلك حجم المكاسب الممكنة حتى في حالة التنبؤ المحدود نسبياً للتقنيات.

السيناريو الطموح: (Aggressive)

نتيجة تسارع وتيرة تبني التقنيات منخفضة الكربون، ترتفع كمية الانبعاثات المتجنبة بشكل كبير، مما يرفع الإيرادات الكربونية المحتملة إلى حوالي 60 مليار دولار أمريكي في عام 2050.

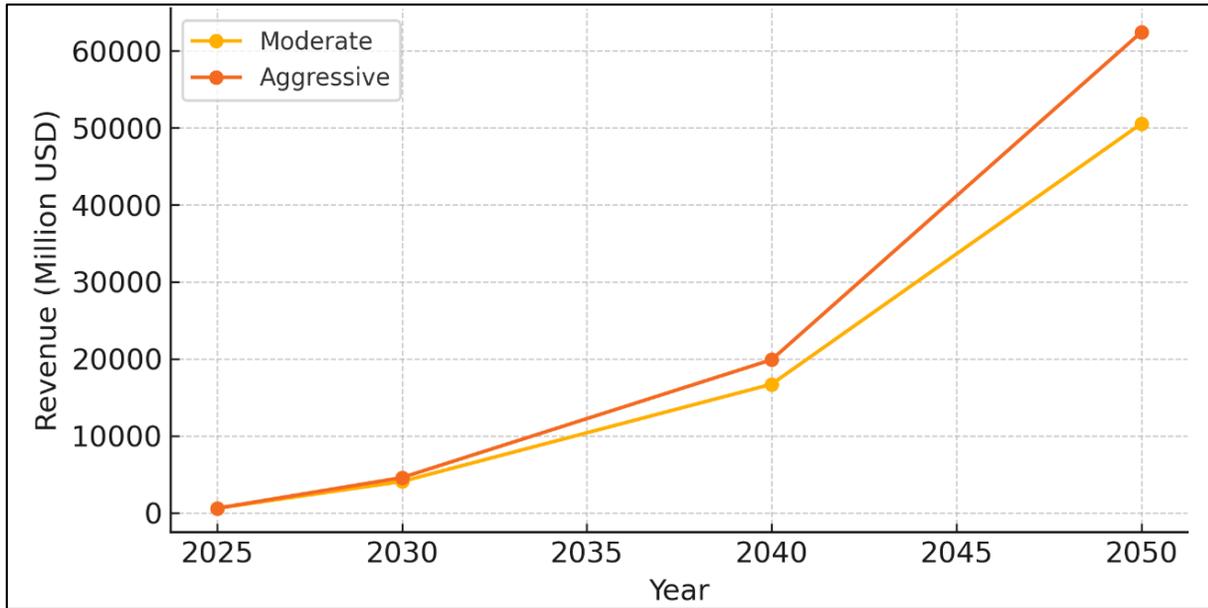
الأثر السياسي:

- ستستحوذ دول مثل السعودية والعراق ومصر على أغلب الإيرادات بسبب ارتفاع مستويات الانبعاثات. في حين أن الدول ذات الكثافة السكانية العالية (مثل الجزائر) تحقق إيرادات معتدلة ولكنها مؤثرة نسبياً كنسبة من الناتج المحلي.
- إعادة تدوير هذه الإيرادات (Revenue Recycling) يُعد عنصرًا حاسمًا لتقليل الآثار السلبية المحتملة لسياسات التسعير، ويمكن أن يُستخدم لتعزيز القبول السياسي والشعبي لهذه السياسات. في حالة دول الأوبك، يمكن أن تمثل الإيرادات الكربونية أداة للتحويل من "دولة ريعية" تعتمد على صادرات الوقود إلى "دولة مالية بيئية" تعيد هيكلة مواردها بشكل مستدام.

الشكل (2-4): الإيرادات الكربونية الناتجة عن التسعير المعتدل للكربون

نتيجة السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات بالثلاث

قطاعات في دول أوبك في 2025-2050



4-4 خسائر صادرات الوقود الأحفوري الناتجة عن التحول الشكل (3-4)

يعرض هذا الشكل الأثر المتوقع لتراجع صادرات الوقود الأحفوري على الناتج المحلي الإجمالي لدول أوبك، نتيجة انخفاض الطلب العالمي ضمن سيناريوهات التحول المناخي حتى عام 2050.

وباعتبار أن صادرات النفط والغاز تُشكل مصدرًا رئيسيًا للدخل القومي في معظم دول المنطقة، فإن أي تراجع في حجم أو قيمة هذه الصادرات ستكون له انعكاسات مباشرة على الأداء الاقتصادي.

المنهجية المستخدمة:

لحساب الأثر الاقتصادي الناتج عن انخفاض صادرات الوقود، تم اتباع الخطوات التالية:

1. تم استخراج وفورات الوقود الكلية الناتجة عن تطبيق السيناريوهين (Moderate و Aggressive) على قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد في دول الأوبك من 2025 حتى 2050.
2. تم افتراض أن 60% من هذه الوفورات كانت تُستخدم للتصدير، وهي نسبة محافظة مستندة إلى متوسط اعتماد دول الأوبك على تصدير منتجات الوقود.
3. تم تحويل خسائر التصدير إلى نسبة من الناتج المحلي الإجمالي.

المعادلات المستخدمة:

$$Export\ Loss_{\gamma} = 0.6 \times Fuel\ Savings_{\gamma}$$

$$GDP\ Loss\ (\%)_{\gamma} = (Export\ Loss_{\gamma} \div A-OPEC\ GDP_{\gamma}) \times 100$$

حيث:

- Fuel Savings_γ: الوفورات السنوية في استهلاك الوقود في السنة γ بالمليار دولار.
- Export Loss_γ: القيمة المقدرة لصادرات الوقود المفقودة نتيجة هذه الوفورات في السنة γ بالمليار دولار.
- A-OPEC GDP_γ: الناتج المحلي الإجمالي لدول أوبك في السنة γ بالمليار دولار.
- GDP Loss (%)_γ: نسبة انخفاض الناتج المحلي الإجمالي في السنة γ نتيجة انخفاض صادرات الوقود.

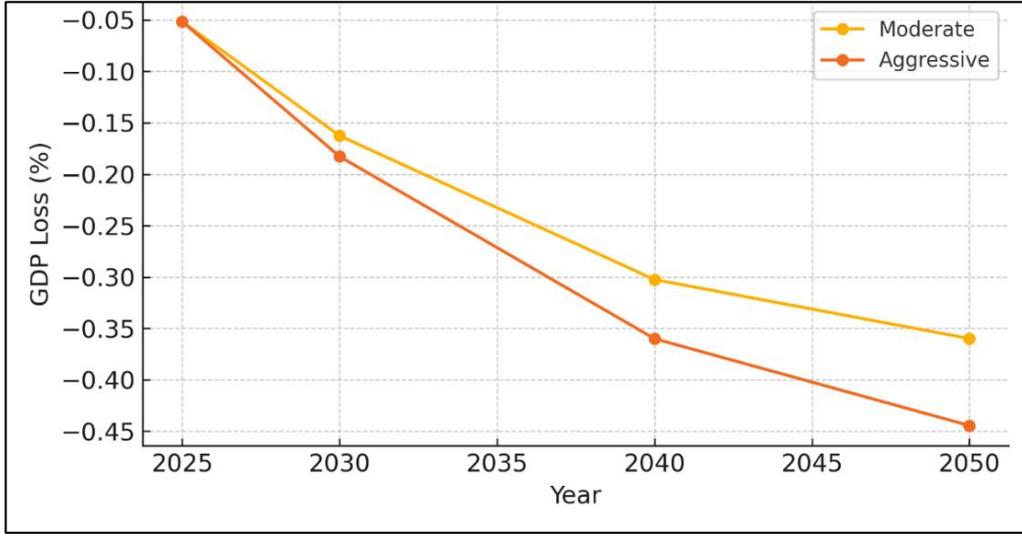
النتائج:

- في السيناريو المعتدل (Moderate) ، تشير التقديرات إلى أن الخسائر الناتجة عن انخفاض الصادرات تبلغ حوالي 0.35% من الناتج المحلي الإجمالي في عام 2050.
- في السيناريو الطموح (Aggressive) ، ترتفع الخسائر لتصل إلى حوالي 0.44% من الناتج المحلي لنفس العام، نتيجة لتسارع أكبر في استبدال الوقود الأحفوري محلياً.
- يُلاحظ أن كلا السيناريوهين ينطلقان من أثر ضعيف (حوالي 0.05% في عام 2025)، ثم يزداد تدريجياً مع تزايد تبني السياسات المناخية عالمياً.
- هذه الأرقام تمثل متوسطات لدول الأوبك مجتمعة، وتشمل دولاً أكثر تنوعاً اقتصادياً (مثل المغرب وتونس) وأخرى أكثر اعتماداً على الصادرات النفطية (مثل العراق والكويت وليبيا).

التحليل والدلالات:

رغم أن النسب المئوية تبدو منخفضة على مستوى المتوسط الإقليمي (أقل من 1%)، إلا أن الأثر النسبي على الدول الأكثر اعتماداً على التصدير سيكون أكبر بكثير، خاصة إذا تراكمت هذه الخسائر على مدار سنوات بدون وجود بدائل اقتصادية قوية. هذه النتائج تُبرز هشاشة نموذج الاقتصاد الريعي في ظل التحول الطاقوي العالمي، وتُظهر ضرورة اتخاذ تدابير لتقليل الاعتماد على الإيرادات النفطية. مقارنة بالخسائر، فإن عوائد تسعير الكربون (الشكل 4-2) قد تعوّض جزءاً كبيراً من هذا الأثر، إذا تم توجيهها بفعالية.

الشكل (4-3): خسائر صادرات الوقود الأحفوري الناتجة عن التحول بالثلاث قطاعات في دول أوبك في 2025-2050



4-5: صافي الأثر على الناتج المحلي الإجمالي الشكل (4-4)

يعرض الشكل (4-4) صافي الأثر الاقتصادي الناتج عن مزيج من الإيرادات المناخية (مثل تسعير الكربون) والخسائر الناتجة عن انخفاض صادرات الوقود الأحفوري، ويُعبر عنه كنسبة مئوية من الناتج المحلي الإجمالي لكل دولة، خلال الفترة من 2025 حتى 2050. هذا المؤشر يعكس صافي التدفقات المالية المتأثرة من التحول الطاقوي، ويُعد مقياسًا مركبًا لمقارنة الكلفة والفائدة الاقتصادية المباشرة لهذا التحول.

المنهجية المستخدمة:

1. تم تجميع المكونات التالية من ملف الحسابات: وفورات الوقود، والوفورات الصحية، وإيرادات الكربون، والتكاليف الاستثمارية (CAPEX)، والتكاليف التشغيلية (OPEX)، وخسائر صادرات الوقود.
2. تم حساب صافي الأثر السنوي حسب المعادلة:

$Net\ Impact_y$

$$= (Fuel\ Savings_y + Health\ Savings_y + Carbon\ Revenue_y) - (CAPEX_y + OPEX_y + Export\ Loss_y)$$

3. ثم تحويل الناتج إلى نسبة مئوية من الناتج المحلي الاجمالي لدول أوابك:

$$Net\ Impact\ (\%)_Y = (Net\ Impact_Y \div GDP_Y) \times 100$$

4. تم تطبيق الحساب على مجموع دول أوابك، وفي كل من السيناريو المعتدل والطموح.

النتائج :

في الفترة بين 2025 الي 2030:

يسجل الاقتصاد الكلي لدول أوابك أثرًا سلبيًا يتراوح بين 0.05 الي 0.25% و 0.1 الي 0.5% من الناتج المحلي الاجمالي للسيناريوهين المعتدل والطموح ، نتيجة زيادة الاستثمارات المناخية عامة وللسيناريو الطموح خاصة.

في الفترة بين 2030 الي 2040:

يقبل التأثير السلبي تدريجيا علي الاقتصاد الكلي لدول أوابك ليصل الي انخفاض حوالي 0.05% و 0.2% للسيناريوهين المعتدل والطموح،

بعد عام 2040

يبدأ الاقتصاد الكلي الاجمالي في الوصول إلى نقطة التعادل (0%)، ما يعكس بداية موازنة بين الإيرادات والخسائر.

بين 2045 الي 2050:

يحقق الاقتصاد الكلي الاجمالي لدول أوابك أثرًا إيجابيًا يتراوح بين +0.08% إلى +0.15% من الناتج المحلي للسيناريوهين المعتدل والطموح للعام 2045، ما يعكس تصاعد الإيرادات الناتجة عن تسعير الكربون واستقرار النفقات. و في 2050، في كلا السيناريوهين، تتقارب النتائج، وتُحقق الاقتصاد الاجمالي مكسب يصل إلى +0.4% من الناتج المحلي، ما يشير إلى نضج التأثير الإيجابي للتحول المناخي.

التحليل والدلالات:

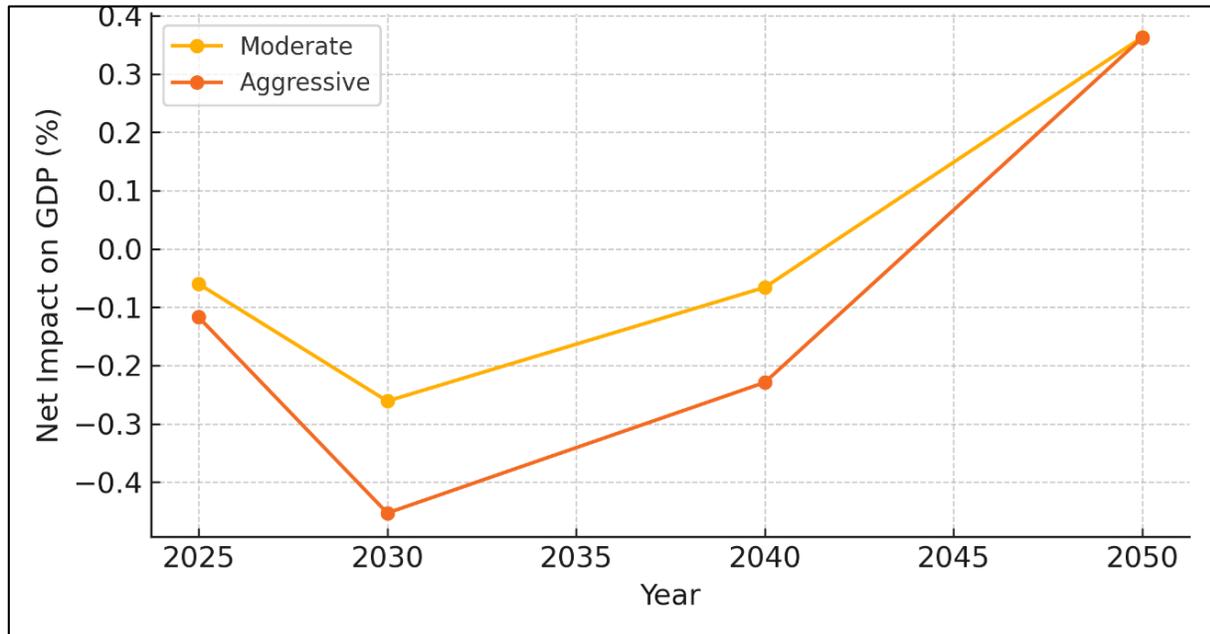
تشير النتائج إلى مسار زمني واضح: خسائر أولية في 2025، توازن تدريجي في 2040، ثم أرباح واضحة تبدأ في 2045 وتستقر بحلول 2050.

الفترة 2025-2030: خسائر متوقعة نتيجة صدمة انخفاض الصادرات، مع بداية صعود الإيرادات.

الفترة 2040-2050: التحول الكامل نحو أثر اقتصادي موجب صافي، نتيجة تعظيم العوائد وتقليص التكاليف.

كما يُلاحظ أن السيناريو الطموح، رغم تسارعه في البداية، يندمج مع السيناريو المعتدل بحلول 2050 من حيث صافي الأثر كنسبة مئوية، مما يشير إلى أن الفارق في الجدوى الاقتصادية بين المسارين يتضاءل بمرور الوقت.

الشكل (4-4): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الناتج المحلي الإجمالي لدول أوبك في 2025-2050



6-4: الأثر على التوظيف الشكل (4-5)

يعرض ل الشكل (4-5) صافي الأثر المتوقع على التوظيف في دول الأوبك نتيجة تطبيق سياسات تسعير الكربون خلال الفترة من 2025 إلى 2050. يُعبّر هذا الأثر عن الفرق بين الوظائف الجديدة الناتجة عن استثمار الإيرادات الكربونية، والخسائر الوظيفية الناجمة عن تراجع صادرات الوقود الأحفوري وانكماش قطاعه. ويُعد هذا المؤشر مقياساً مهماً لتقدير البعد الاجتماعي للتحوّل المناخي، خصوصاً في اقتصادات المنطقة التي ترتبط فيها مستويات التشغيل ارتباطاً وثيقاً بديناميكيات قطاع الطاقة.

المنهجية المستخدمة:

تم حساب صافي التغيير في التوظيف وفقاً للمعادلة التالية:

$Net\ Employment_{\gamma}$

$$= (Jobs_Created_Base_{\gamma} + Jobs_Created_Revenue_{\gamma}) \\ - (Jobs_Lost_Base_{\gamma} + Jobs_Lost_Export_{\gamma})$$

حيث:

$Net\ Employment_{\gamma}$

صافي عدد الوظائف المكتسبة أو المفقودة في السنة γ ، بعد احتساب جميع المكونات (بالآلاف).

1. $Jobs_Created_Base_{\gamma}$

الوظائف الناتجة عن الاستثمارات المباشرة في الطاقة المتجددة والنقل النظيف، باستخدام

معامل 10,000 وظيفة لكل مليار دولار مستثمر (IRENA, 2021)

2. $Jobs_Created_Revenue_{\gamma}$

الوظائف الناتجة عن إعادة استثمار 50% من الإيرادات الكربونية في قطاعات خدمية

عالية التوظيف، وفق معامل 7,000 وظيفة لكل مليار دولار (ILO, 2018).

3. Jobs_Lost_Base_y

الوظائف التي تُفقد نتيجة انخفاض النشاط المحلي في قطاعي النفط والغاز، باستخدام معامل 1,500 وظيفة لكل مليار دولار من الانكماش، تم اشتقاقه بشكل محافظ بناءً على بيانات قطاع الطاقة في دول المنطقة.

4. Jobs_Lost_Export_y

الوظائف التي تُفقد نتيجة انخفاض صادرات الوقود، باستخدام معامل تقديري يبلغ 3,000 وظيفة لكل مليار دولار من الانخفاض في القيمة التصديرية، اعتمادًا على نماذج ILO الخاصة بكثافة التوظيف في سلاسل القيمة التصديرية (ILO, 2018).

النتائج والتحليل:

تُظهر النتائج أن صافي التوظيف موجب في جميع دول الأوبك وفي كل السنوات، مما يؤكد أن سياسات تسعير الكربون قادرة على توليد فرص عمل تتجاوز الخسائر الناتجة عن تراجع دور الوقود الأحفوري.

في عام 2025، تبدأ الدول بتحقيق مكاسب توظيف متواضعة نسبيًا، تتراوح بين 60 و80 ألف وظيفة صافية، وهو ما يعكس المردود المبكر لتطبيق السياسات دون تراكم فعلي كبير للإيرادات بعد.

مع مرور الوقت وتوسع نطاق تطبيق السياسات، تتسارع هذه المكاسب. بحلول 2050، يصل صافي التوظيف في بعض السيناريوهات إلى أكثر من 1.5 مليون وظيفة صافية، وهو ما يعكس الأثر التراكمي طويل الأجل لإعادة تدوير الإيرادات الكربونية في قطاعات عالية التوظيف.

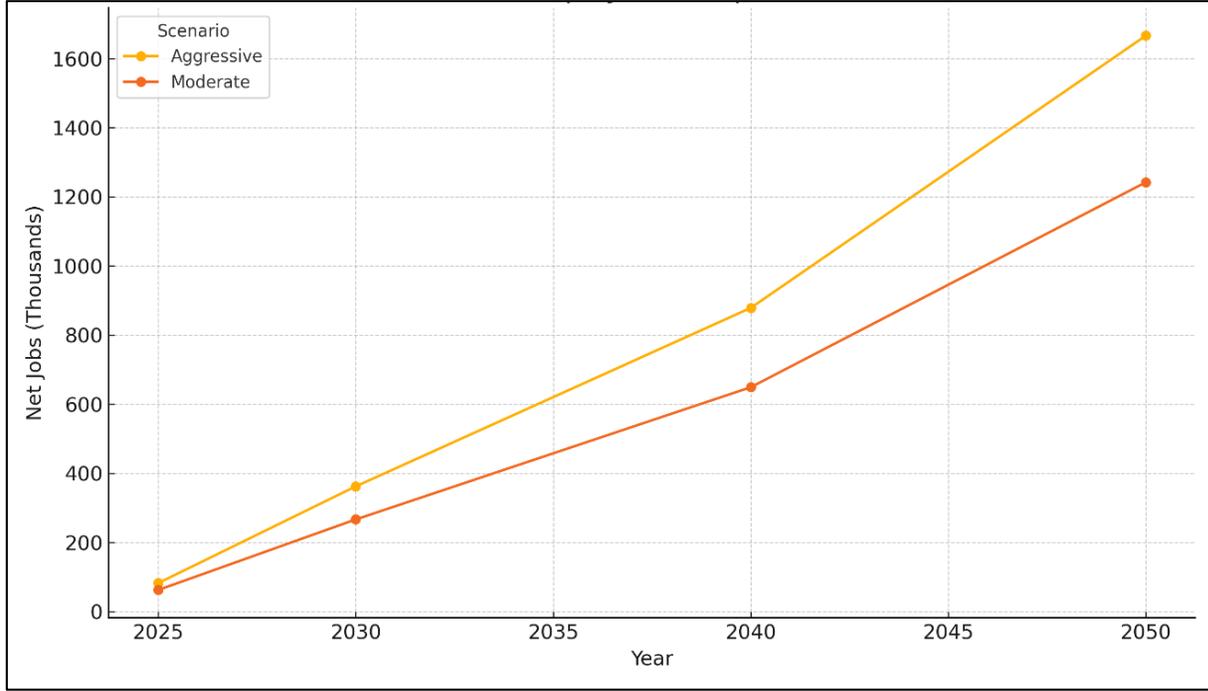
تستفيد الدول ذات الكثافة السكانية المرتفعة والبطالة الهيكلية، مثل مصر والجزائر، من هذه التحولات بشكل أكثر وضوحًا من حيث عدد الوظائف المقلية، في حين تحقق دول أخرى مكاسب نسبية قوية أيضًا على مستوى هيكل السوق المحلي.

ويُظهر هذا النمط أن تسعير الكربون، إذا ما تم تصميمه ضمن إطار مؤسسي داعم لإعادة الاستثمار الاجتماعي، يمكن أن يُصبح أحد أقوى أدوات الانتقال العادل، وليس فقط وسيلة للحد من الانبعاثات أو توليد الإيرادات.

كما تُظهر النتائج أن فعالية هذه السياسة لا تقتصر على الدول ذات الانبعاثات المرتفعة فقط، بل تمتد إلى الدول التي تملك قدرة على توجيه الإيرادات نحو قطاعات تنموية مناسبة، ما يمنح مرونة أكبر لتطبيق السياسة في أقاليم متنوعة اقتصاديًا واجتماعيًا.

الشكل (4-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات

على التوظيف بدول الأوبك في 2025-2050



4-7: مؤشر القدرة على تحمّل تكاليف الطاقة الشكل (4-6)

يعرض الشكل (4-6) تأثير تسعير الكربون على القدرة الشرائية للأسر من خلال "مؤشر القدرة على تحمّل تكاليف الطاقة (Energy Affordability Index)"، والذي يُعرّف على أنه نسبة الإنفاق السنوي على الطاقة من إجمالي دخل الأسرة. يمثل هذا المؤشر بُعدًا اجتماعيًا بالغ الحساسية في أي سياسة مناخية، ويُستخدم لتقييم مدى عدالة توزيع العبء المالي الناتج عن تسعير الكربون، خاصةً على الفئات منخفضة الدخل.

المنهجية الحسابية:

 $Affordability\ Index_{\gamma}$

$$= (Annual\ Energy\ Spending_{\gamma} \div Annual\ Household\ Income_{\gamma}) \times 100$$

حيث:

• $Affordability\ Index_{\gamma}$ هو نسبة ما تنفقه الأسرة على الطاقة في السنة γ مقارنة بدخلها الكلي (%)• $Annual\ Energy\ Spending_{\gamma}$

$$= Final\ Energy\ Price \times Annual\ Energy\ Demand$$

بما يعكس تكلفة استهلاك الأسرة من الطاقة

• $Annual\ Household\ Income_{\gamma}$

مشتق من الناتج المحلي الإجمالي للفرد في كل دولة \times نسبة دخل أفقر 40% \times عدد أفراد الأسرة (5 أفراد)

تم تطبيق هذه المعادلة على الشريحة الدنيا من السكان (أفقر 40%) عبر السنوات المرجعية 2025، 2030، 2040، و2050، وفي سيناريوهين: معتدل (Moderate) وطموح (Aggressive).

التحليل والدلالات:

تُظهر النتائج أن المؤشر يبدأ عند مستوى مرتفع نسبيًا في عام 2025 (19% في السيناريو المعتدل)، ما يعكس عبئًا ماليًا واضحًا على الأسر الفقيرة في حال غياب آليات حماية اجتماعية. ومع مرور الوقت، وتطبيق تقنيات كفاءة الطاقة، وارتفاع الدخل، وتنفيذ سياسات إعادة التوزيع، ينخفض المؤشر تدريجيًا ليصل في عام 2050 إلى 7% في السيناريو المعتدل، و5.5% في السيناريو الطموح. ورغم بقاء المؤشر فوق العتبة المثالية (>5%)، إلا أن هذا التحسن يُعد مؤشرًا إيجابيًا على فعالية السياسات المناخية إذا ما اقترنت بأدوات حماية عادلة. الدول التي تعتمد على

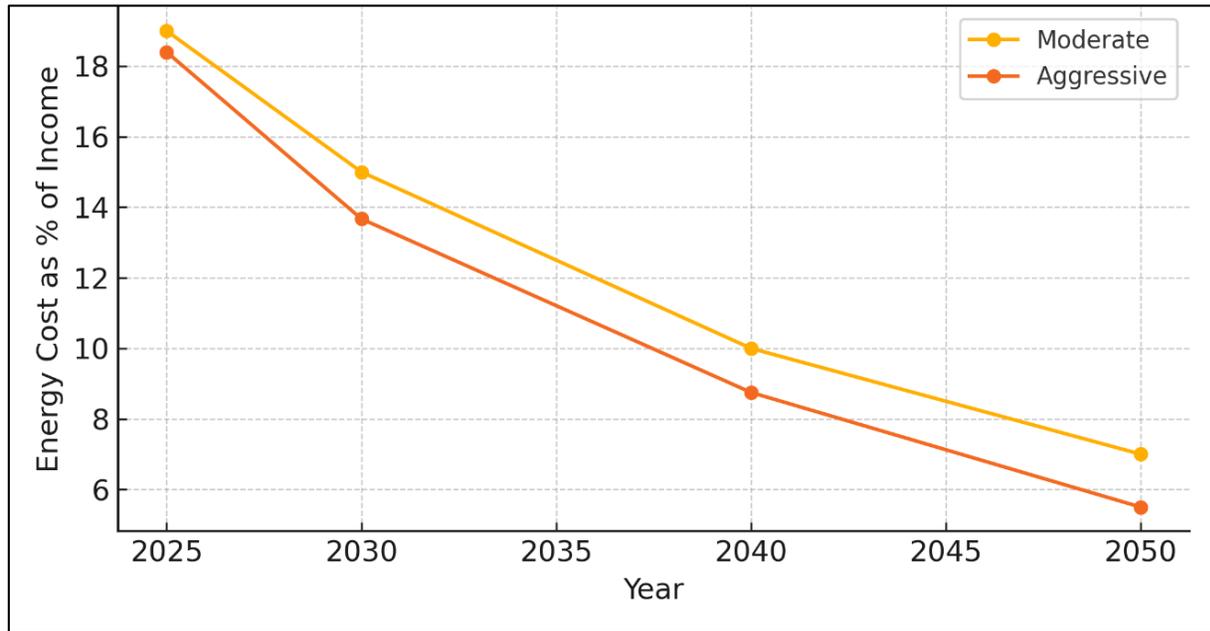
الدعم الطاقوي مثل مصر والسودان والمغرب قد تشهد تأثيرات أكثر حدة، بينما تقل حدة التأثير في دول ذات دخول مرتفعة نسبيًا مثل دول الخليج.

تشير هذه النتائج إلى أن السياسات المناخية بدون حماية اجتماعية قد تُفاقم عدم المساواة. وأن إعادة التوزيع النقدي المباشر للفئات الهشة يُعد الوسيلة الأكثر فعالية لضمان عدالة الطاقة وتحقيق قبول سياسي أوسع لبرامج تسعير الكربون.

بالمجمل، يمثل هذا المؤشر أداةً مركزية لتقييم عدالة التحول المناخي في دول الأوبك، ويعكس قدرة الحكومات على تحقيق توازن بين الأهداف البيئية والحماية الاجتماعية.

الشكل (4-6): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات

على مؤشر القدرة على تحمّل تكاليف الطاقة بدول الأوبك في 2025-2050



8-4 الخاتمة العامة والنتائج التلخيصية

يُبرز هذا الفصل كيف أن تسعير الكربون، إذا ما تم تصميمه وتنفيذه ضمن إطار مؤسسي مرن وشفاف، يمكن أن يشكل أداة فعّالة لتحقيق التوازن بين الأهداف المناخية والاعتبارات الاقتصادية والاجتماعية في دول الأوبك. فقد أظهرت التحليلات أن الإيرادات الكربونية الناتجة عن تسعير الانبعاثات المتجنبة يمكن أن تصل إلى عشرات المليارات سنويًا بحلول عام 2050، وهو ما يوفر مصدرًا ماليًا محتملاً لدعم التحول الطاقوي وتمويل شبكات الأمان الاجتماعي.

في المقابل، بين الفصل أن هذا التقدم لا يخلو من تحديات، وعلى رأسها الخسائر الناتجة عن تراجع صادرات الوقود، والتي قد تحدث آثارًا سلبية على الناتج المحلي الإجمالي لبعض الدول الريعية. غير أن المقارنة بين الإيرادات والخسائر يُظهر **الشكل (4-4)** أن العوائد الصافية تصبح إيجابية بحلول 2045، وهو ما يؤكد أن التأثير الكلي يمكن أن يكون موجبًا على المدى الطويل إذا ما أُعيد توظيف الموارد بذكاء.

أما على المستوى الاجتماعي، فقد بينت النتائج أن الأثر على التوظيف يمكن أن يكون موجبًا وثابتًا عبر جميع السنوات، خاصة إذا وُجّهت الإيرادات الكربونية نحو القطاعات الخدمية والمنتجة كثيفة العمالة. كما أثبت **الشكل (4-6)** "مؤشر القدرة على تحمّل تكاليف الطاقة" أنه أداة مركزية لتقييم عدالة السياسات، حيث تراجعت نسبة الإنفاق على الطاقة بشكل ملحوظ في السيناريو الطموح بفضل تحسين الكفاءة وارتفاع الدخل، رغم بقاء الحاجة إلى سياسات حماية اجتماعية مصاحبة.

بذلك، يرسم الفصل الرابع صورة متكاملة لدور تسعير الكربون في إعادة هيكلة الاقتصاد الطاقوي والمالي والاجتماعي في دول الأوبك، ويؤكد أن هذه السياسة، رغم تعقيداتها، تتيح فرصة استراتيجية لبناء نموذج إنمائي أكثر استدامة وإنصافًا.

تمهيدًا للفصل الخامس، من المهم التأكيد على أن الأرقام والنتائج الواردة هنا تُعبّر عن "فوائد سوقية" قابلة للقياس المالي، مثل الإيرادات والناتج والتوظيف. لكن هناك جوانب أخرى لا تقل أهمية، تُعرف باسم "الفوائد غير السوقية"، مثل الأرواح التي يمكن إنقاذها، والتحسّن في الصحة العامة، وتقليل الضغط على الموارد الطبيعية، والتي لا تُلتقط غالبًا في التحليلات الاقتصادية التقليدية.

وسينتقل الفصل التالي إلى معالجة هذه الأبعاد، من خلال دمج تقديرات الانبعاثات المتجنبة مع مؤشرات الصحة والبيئة، ما يسمح بتوسيع منظور التقييم ليشمل القيمة الحقيقية متعددة الأبعاد لسياسات التحول المناخي في المنطقة.

الفصل الخامس

التأثيرات الصحية والبيئية والاجتماعية غير السوقية الناتجة من
استخدام التقنيات المتجددة والقابلة للاعتماد علي الطاقة المتجددة لدول
أوابك

1-5: مقدمة

على عكس الفصول السابقة التي ركزت على الكلفة والعائد المالي والاجتماعي، فإن هذا الفصل يُبرز "الفوائد غير السوقية" والتي غالبًا ما تُهمّش في التحليل الاقتصادي التقليدي، رغم أنها تمثل مكاسب حقيقية على مستوى جودة الحياة وصحة الإنسان والبيئة.

تستند المنهجية إلى ربط الانبعاثات المتجنبة بتغيرات في مؤشرات بيئية-صحية كما تم استخدام العلاقات المعروفة بين PM2.5 والوفيات المبكرة، وبين درجات الحرارة وعدد الوفيات المرتبطة بالحر، وبين استخدامات الطاقة والتبريد والفجوة المائية.

2-5: تغير تركيز الجسيمات الدقيقة (PM 2.5) : الشكل (1-5)

يعرض الشكل (1-5) تطور متوسط تركيز الجسيمات الدقيقة (PM2.5) في دول أوابك خلال الفترة من 2025 إلى 2050، ضمن سيناريوهات BAU، المعتدل، والطموح. يُعتبر هذا المؤشر من أبرز مؤشرات جودة الهواء، حيث ترتبط مستويات PM2.5 بعدد كبير من الأمراض التنفسية والقلبية، وفقًا لدراسات (Global Burden of Disease (GBD, 2020).

المنهجية الحسابية:

تم بناء المسارات الحسابية عبر مرحلتين:

أولاً: حساب التركيز في سيناريو BAU

انطلقت الحسابات من تركيز سنة الأساس 2020، والذي يبلغ 48.1 ميكروغرام/م³، كمعدل سكاني موزون لدول أوابك، ثم تم تعديل هذا الرقم لكل سنة بناءً على نمو انبعاثات ثلاثة قطاعات فقط (النقل، التدفئة، التبريد) ضمن سيناريو BAU.

المعادلة: (1)

تركيز PM2.5 في سيناريو BAU لكل سنة:

$$PM2.5_{\gamma, BAU} = 48.1 \times (Emissions_{\gamma, BAU} \div Emissions_{2020})$$

حيث:

- 48.1 هو تركيز PM2.5 في سنة الأساس (2020)، مقدّر كمعدل سكاني موزون لدول أوابك.
- $Emissions_{\gamma, BAU}$ هي انبعاثات القطاعات الثلاثة والتي تشمل: النقل، التدفئة، والتبريد بدون أوابك بدون تدخل كل سنة γ .
- $Emissions_{2020}$ هي انبعاثات القطاعات الثلاثة لعام الأساس 2020.

ثانياً: حساب التركيز في كل سيناريو (معتدل وطموح)

بناءً على تركيز BAU في كل سنة، تم حساب التركيز الفعلي في كل سيناريو بعد تطبيق تقنيات إزالة الكربون، بناءً على حجم الانبعاثات المتبقية في القطاعات الثلاثة.

المعادلة: (2)

تركيز PM2.5 في كل سيناريو:

$$PM2.5_{\gamma, scenario} = PM2.5_{\gamma, BAU} \times (Emissions_{\gamma} \div Emissions_{\gamma, BAU})$$

حيث:

- $PM2.5_{\gamma, scenario}$ هو تركيز PM2.5 في السنة γ ، والسيناريو scenario .
- $PM2.5_{\gamma, BAU}$ هي انبعاثات القطاعات الثلاثة والتي تشمل: النقل، التدفئة، والتبريد بدون أوابك بدون تدخل كل سنة γ .
- $Emissions_{\gamma}$ هي انبعاثات القطاعات الثلاثة للعام γ .

النتائج:

- في سيناريو BAU ، يرتفع متوسط تركيز PM2.5 تدريجيًا ليصل إلى نحو 76 ميكروغرام/م³ بحلول 2050.
- في السيناريو المعتدل، تظل التركيزات الي 56 ميكروغرام/م³ في عام 2050، بانخفاض قدره 27% عن السيناريو المعتاد لنفس العام.
- أما في السيناريو الطموح، فتتراجع إلى نحو 51 ميكروغرام/م³ في عام 2050، بانخفاض قدره 33% عن السيناريو المعتاد لنفس العام.

كلا السيناريوهين يحافظان على تركيزات مستقرة نسبيًا مقارنة بعام 2025، ما يمثل نقطة إيجابية رغم عدم الوصول إلى المستويات المثالية.

مقارنة بالمعايير العالمية:

- منظمة الصحة العالمية: 15 ميكروغرام/م³ كحد سنوي مقبول (WHO, 2005).
- منظمة الصحة العالمية: 5 ميكروغرام/م³ كهدف طويل الأجل أكثر صرامة (WHO, 2021).

لا يحقق أي من السيناريوهين هذه الحدود، ما يعكس الحاجة إلى إجراءات إضافية لإزالة الكربون لتحسين جودة الهواء بجانب الاجراء

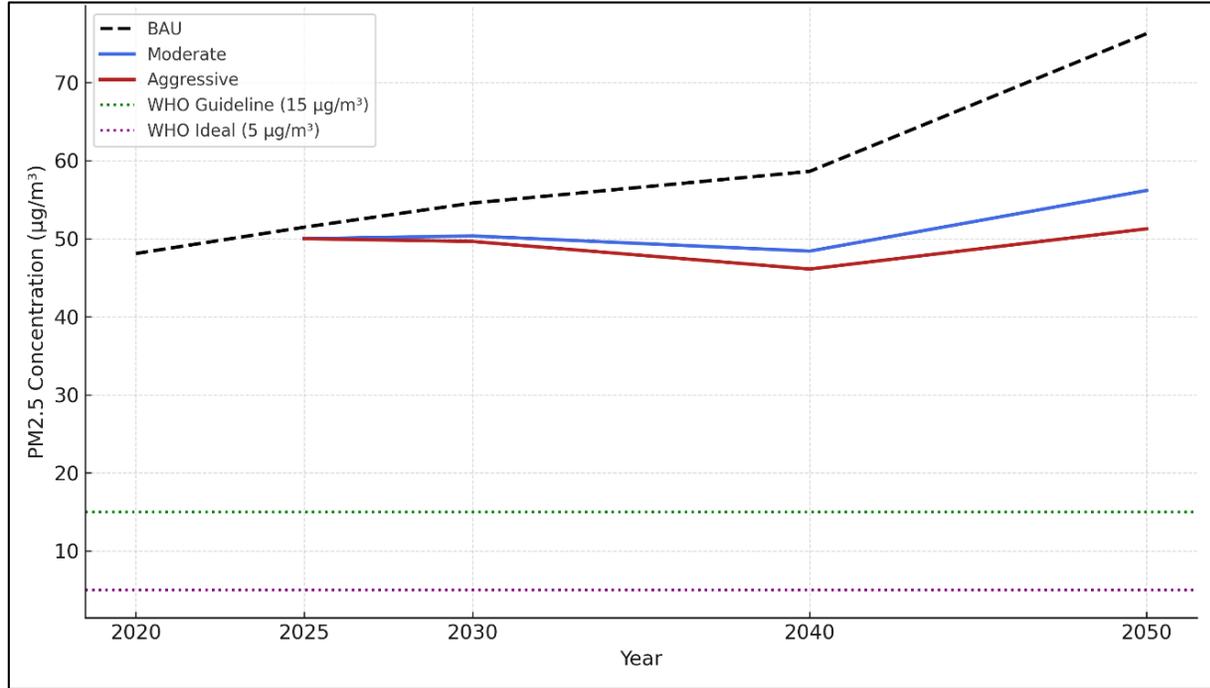
التفسير السياساتي:

يُظهر هذا التحليل أن تقنيات إزالة الكربون المستخدمة هنا وحدها غير كافية للوصول إلى المعايير الصحية المثلى، لكنها فعالة في منع تدهور جودة الهواء، والحفاظ على التركيزات عند مستويات

قريبة من 2025. وهذا يدعم دمج سياسات المناخ مع السياسات الصحية، لضمان مكاسب بيئية وصحية متوازنة وشاملة.

الشكل (1-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات

على مؤشر تركيز الجسيمات الدقيقة (PM 2.5) بدول الأوبك في 2025-2050



3-5: الوفيات المبكرة المُتفاداة نتيجة لتحسن جودة الهواء: الشكل (2-5)

يعرض الشكل (2-5) التقدير السنوي لعدد الوفيات المبكرة المتفاداة نتيجة انخفاض التعرض لتركيزات الجسيمات الدقيقة (PM2.5) في دول أوبك تحت سيناريو هَي التحول الطاقوي (المعتدل والطموح). يعتمد التحليل على المنهجية المعتمدة علي ربط بين تحسن جودة الهواء وتراجع معدلات الوفيات المبكرة الناتجة عن أمراض الجهاز التنفسي والقلب والأوعية الدموية. يمثل هذا المؤشر امتدادًا مباشرًا لتأثيرات تلوث الهواء على الصحة العامة، ويُعد من أكثر المؤشرات حساسية في تقييم المنافع الصحية للتحول الطاقوي.

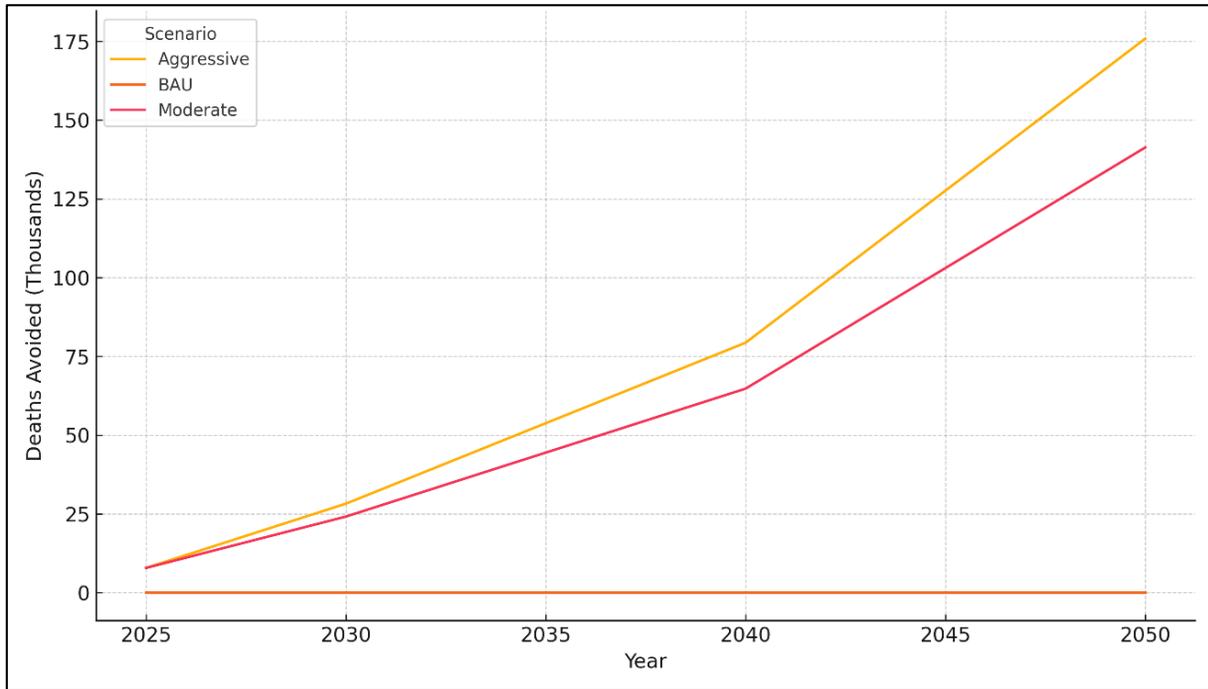
المنهجية الحسابية:

$$Avoided\ deaths_y = \Delta PM_{2.5y} \times \beta \times MR \times Pop$$

حيث:

- $\Delta PM_{2.5y}$ هو الفرق في تركيز $PM_{2.5}$ بين سيناريو BAU وسيناريو التحول في السنة y
- معامل الاستجابة $\beta = 0.0068$ ، يمثل النسبة المئوية لزيادة الخطر النسبي للوفاة مع كل زيادة قدرها 1 ميكروغرام/م³ في $PM_{2.5}$
- معدل الوفيات السنوي الإجمالي لكل فرد ($MR = 0.0065$).
- عدد السكان المعرضين (Pop)، وتم احتسابه كـ 40% من إجمالي سكان أوابك (يمثل السكان فوق سن 35 عامًا).

الشكل (2-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الوفيات المبكرة المتفاداة نتيجة لتحسن جودة الهواء بدول الأوابك في 2025-2050



النتائج:

- في السيناريو الطموح، يمكن تجنب ما 175 ألف حالة وفاة مبكرة سنوياً بحلول 2050.
- في السيناريو المعتدل، ينخفض الرقم إلى حوالي 150 حالة وفاة مبكرة سنوياً بحلول 2050.

التفسير السياساتي:

تشير النتائج إلى ضرورة تضمين الفوائد الصحية في تقييم الجدوى الاقتصادية للمسارات المناخية، واستخدامها كوسيلة ضغط لصالح الإسراع في تنفيذ مشاريع البنية التحتية المستدامة. وإلى أن سياسات إزالة الكربون ليست فقط وسيلة للتخفيف المناخي، بل أيضاً تدخل صحي عام واسع الأثر. يُمكن استخدام هذه التقديرات لتبرير استثمارات الصحة العامة، وتوجيه دعم مباشر نحو المناطق عالية التلوث، وتعزيز قبول المجتمع للتحول الطاقوي.

4-5: وفورات المياه الناتجة عن خفض استهلاك الوقود الأحفوري الشكل (3-5)

يعرض الشكل (3-5) تقديرات وفورات المياه الناتجة عن خفض استهلاك الوقود الأحفوري خلال الفترة 2025-2050، نتيجة اعتماد تقنيات الطاقة النظيفة في قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد. تُعدّ هذه الوفورات البيئية من الجوانب المهمة لإزالة الكربون، خاصة في الدول التي تعاني من ندرة المياه مثل معظم دول أوابك.

المنهجية الحسابية:

تم حساب كمية المياه التي يمكن توفيرها استناداً إلى كمية الطاقة الأحفورية المتجنبة باستخدام معامل تحويل موحد قدره 0.01 متر مكعب/جيجا جول، وذلك وفق المعادلة التالية:

$$Water Savings_{\gamma} \text{ (million } m^3) \\ = Avoided Fossil Energy_{\gamma} \text{ (GJ)} \times 0.01 \div 10^6$$

حيث:

- $Water Savings_y$ (million m^3): المياه التي تم توفيرها في السنة y ، بوحدة مليون متر مكعب.
- $Avoided Fossil Energy_y$ (GJ): كمية الطاقة التي تم تجنبها من مصادر الوقود الأحفوري في نفس السنة، بوحدة جيجا جول (GJ).
- 0.01: معامل الحد الأدنى لاستهلاك المياه لكل جيجا جول من الوقود الأحفوري (متر مكعب / GJ)، وهو أقل القيم الواردة في الأدبيات (لنوع الوقود الغازي).
- 10^6 : لتحويل الناتج من متر مكعب إلى مليون متر مكعب.

هذا المعامل يعكس الحد الأدنى الموثق لاستهلاك المياه لوحدة الطاقة في أنظمة التوليد الأحفوري، ويُستخدم هنا كقيمة تحفظية لتجنب المبالغة في التقدير. بحسب الدراسات البيئية، تتراوح معاملات استهلاك المياه حسب نوع الوقود المستخدم كالتالي:

- الغاز الطبيعي: 0.01 م³/جيجا جول
- النفط: 0.02 م³/جيجا جول
- الفحم: 0.03 م³/جيجا جول

ونظرًا لعدم توفر التوزيع التفصيلي لاستهلاك أنواع الوقود المختلفة في كل قطاع على مستوى الدولة، فقد تم استخدام أقل هذه القيم (0.01) كمؤشر محافظ يمثل أدنى تقدير ممكن لفوائد خفض الانبعاثات على أمن المياه، وبالتالي يعطي نتائج معتدلة غير متفائلة مفرطة.

النتائج:

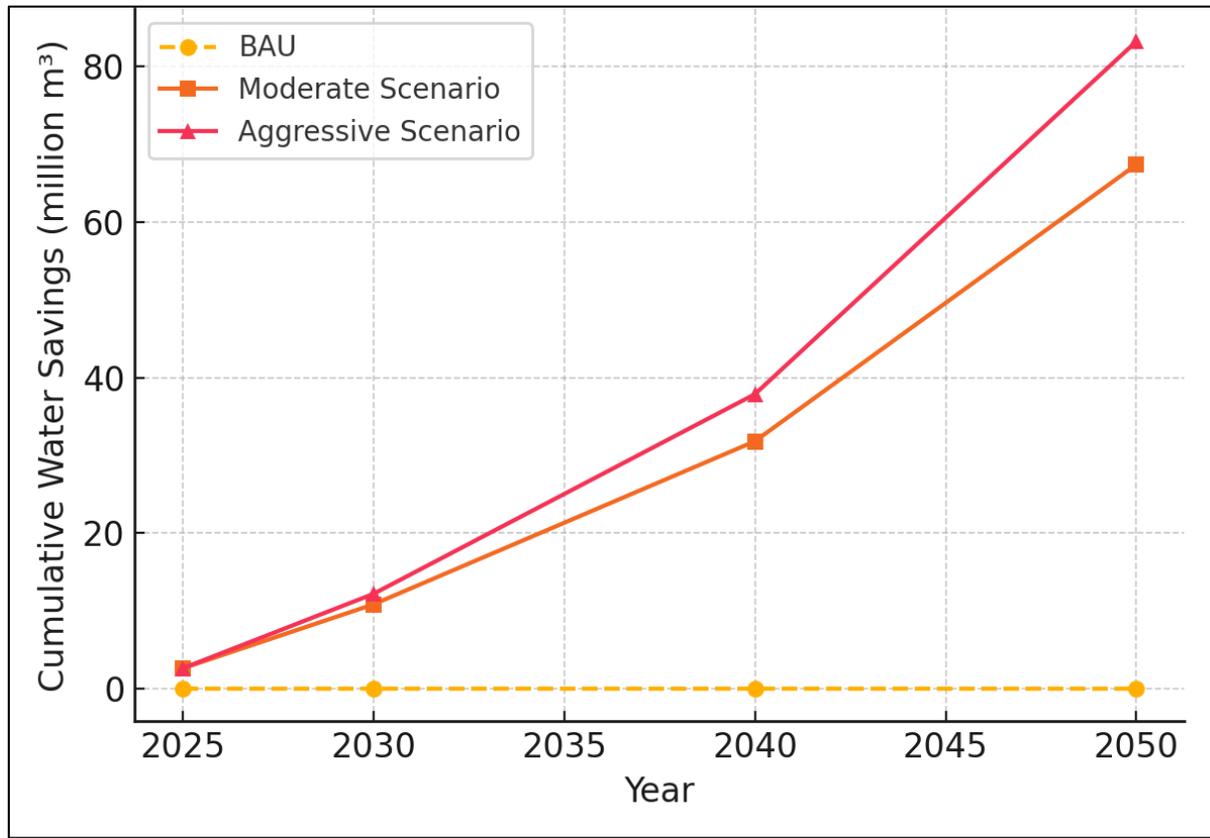
- في السيناريو المعتدل، بلغت وفورات المياه 66.9 مليون م³ سنوياً بحلول عام 2050.
- في السيناريو الطموح، بلغ التوفير 82.3 مليون م³ سنوياً بحلول عام 2050.

التفسير السياساتي:

تعكس هذه النتائج الفوائد البيئية المترتبة على التحول الطاقوي، ليس فقط في تقليل الانبعاثات، ولكن أيضاً في الحد من الضغط على الموارد المائية. وبما أن دول أوابك تُعد من أكثر المناطق جفافاً عالمياً، فإن دمج مؤشرات وفورات المياه في تقييم سياسات إزالة الكربون يوفر مدخلاً استراتيجياً لتعزيز الأمن المائي وتحقيق التكامل بين أهداف الطاقة والمياه ضمن أجندة التنمية المستدامة.

الشكل (3-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على وفورات المياه الناتجة

عن خفض استهلاك الوقود الأحفوري بدول الأوابك في 2025-2050



5-5: تحسين الوصول إلى خدمات التبريد الشكل (4-5)

يعرض الشكل (4-5) عدد الأفراد الذين يُتوقع حصولهم على تبريد أساسي لأول مرة نتيجة وفورات الطاقة الناتجة عن التحول في قطاع التبريد في دول أوابك، ضمن سيناريوهين معتدل وطموح خلال الفترة 2025-2050. ويُعد هذا المؤشر من أهم مقاييس العدالة المناخية، خصوصاً في المناطق الحارة التي يعاني فيها ملايين الأفراد من انعدام الحماية الحرارية.

المنهجية الحسابية:

تم تقدير عدد الأفراد الذين يمكنهم الوصول إلى تبريد أساسي بناءً على كمية الوقود الأحفوري التي تم توفيرها في قطاع التبريد، باستخدام المعادلة التالية:

$$Access_Cooling_{\gamma} = (Fuel_Saved_{\gamma} \times 0.2) \div 8.64$$

$$\gamma = (عدد\ الأفراد\ الذين\ يحصلون\ على\ تبريد\ أساسي \times 0.2) \div 8.64$$

حيث:

- $Access_Cooling_{\gamma}$: هو عدد عدد الأفراد الذين يحصلون على تبريد أساسي في سنة معينة (γ)
- $Fuel_Saved_{\gamma}$ (GJ): هو إجمالي الطاقة الأحفورية التي تم تجنبها في سنة معينة (γ) نتيجة اعتماد تقنيات نظيفة في التبريد.
- 0.2: نسبة محافظة تمثل الحصة الاجتماعية الموجهة للفئات المحرومة (20% فقط من الطاقة الموفرة).
- 8.64/GJ سنة: هو معدل الاستهلاك السنوي اللازم لتوفير تبريد أساسي للفرد، وهي قيمة محافظة لتناسب استهلاك الكهرباء للتبريد في المناطق الحارة الجافة (مثل الخليج والهند).

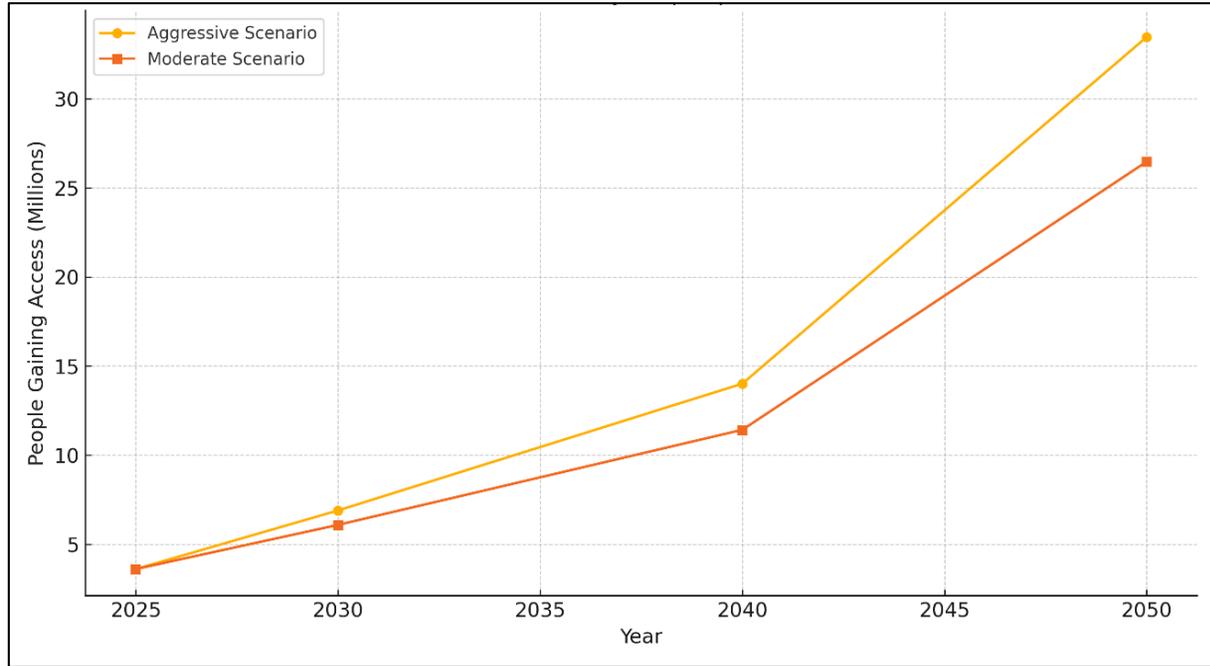
كما تم افتراض أن 65% من إجمالي السكان في دول أوبك محرومون حاليًا من التبريد المناسب، بناءً على تقديرات الفقر الطاقوي في الدول النامية ذات المناخ الحار.

النتائج:

- في عام 2025، يتيح السيناريو المعتدل والطموح تغطية حوالي 3.6 مليون فرد فقط.
- بحلول 2030، يرتفع العدد إلى 6-7 مليون.
- في 2040، يصل عدد المستفيدين إلى 14 مليون (طموح) و11.4 مليون (معتدل).

أما بحلول 2050، فتُظهر الحسابات أن عدد المستفيدين يصل إلى: 33.5 مليون شخص في السيناريو الطموح و26.5 مليون شخص في السيناريو المعتدل.

الشكل (4-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على تحسين الوصول إلى خدمات التبريد بدول الأوابك في 2025-2050



6-5: الانبعاثات المُتفاداة من مركبات HFC الشكل (5-5)

يعرض الشكل (5-5) تقديرًا للانبعاثات المتجنبة من مركبات الكربون الهيدروفلورية (HFC) نتيجة توسيع الوصول إلى خدمات التبريد الأساسية في دول أوابك، وذلك في إطار سيناريو هين للتحول الطاقى حتى عام 2050. تم التركيز على غاز HFC-134a باعتباره الأكثر استخدامًا في أجهزة التبريد المنزلية.

المنهجية الحسابية:

تم حساب الانبعاثات المتجنبة بناءً على عدد الأفراد الجدد الذين حصلوا على التبريد، باستخدام القيم الآتية:

- تسرب سنوي افتراضي: 0.12 كجم HFC-134a لكل مستخدم
- معامل الاحترار العالمي (GWP) لـ HFC-134a = 1300

- نسبة تقليل التسرب نتيجة استخدام تقنيات جديدة = 90%

بالتالي، فإن الكمية المتجنبة من مكافئ ثاني أكسيد الكربون تُحسب سنويًا وفق المعادلة:

$$\begin{aligned} \text{Avoided emissions}_\gamma (\text{MtCO}_2\text{eq}) \\ = \text{Number of new users}_\gamma \times 0.12 \times 1300 \times 0.9 \\ \div 10^6 \end{aligned}$$

حيث:

- $\text{Avoided emissions}_\gamma (\text{MtCO}_2\text{eq})$ هي كمية الانبعاثات المتجنبة من غاز HFC-134a مقدرة بالمليون طن مكافئ من CO_2 .
- $\text{Number of new users}_\gamma$ هو عدد الأفراد الجدد مقدراً بالمليون شخص
- 10^6 : لتحويل الناتج من كجم إلى مليون طن (Mt)

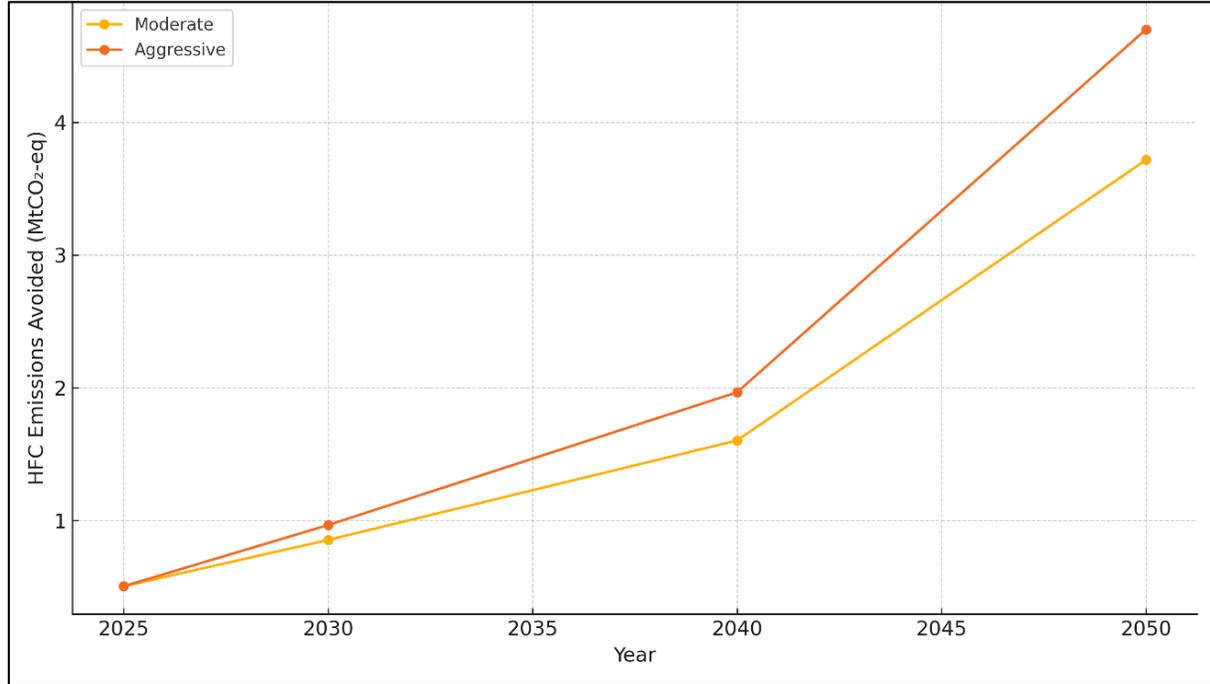
النتائج:

في السيناريو المعتدل، بلغت الانبعاثات المتجنبة 0.5 مليون طن مكافئ CO_2 في 2025، وارتفعت إلى 3.7 مليون طن في 2050. في السيناريو الطموح، كانت القيم أعلى نتيجة لتوسع التبني، حيث وصلت إلى نحو 4.7 مليون طن مكافئ CO_2 في 2050.

التفسير السياساتي:

تبرز هذه النتائج أحد الفوائد المناخية غير المباشرة لتوسيع خدمات التبريد في الدول الحارة، إذ لا يقتصر الأثر الإيجابي على تقليل استهلاك الوقود الأحفوري فقط، بل يشمل أيضاً تخفيض استخدام غازات عالية الاحترار. إدماج هذه الفوائد في تصميم السياسات المناخية يمكن أن يسهم في تعزيز دعم التمويل المناخي للمشروعات الاجتماعية مثل دعم التبريد للفئات المحرومة.

الشكل (5-5): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الانبعاثات المُتفاداة من مركبات HFC بدول الأوبك في 2025-2050



7-5: تقليل الوفيات المرتبطة بالحر الشكل (5-6)

تعرض لوحة الشكل (5-6) تقديرات عدد الوفيات التي يمكن تجنبها نتيجة تحسين الوصول إلى خدمات التبريد الأساسية، خاصة في ظل ارتفاع درجات الحرارة الناتج عن تغير المناخ. تشير الدراسات إلى أن التبريد لا يساهم فقط في الراحة الحرارية، بل يُعد أداة وقاية من الوفاة، خصوصاً بين الفئات الأكثر هشاشة ككبار السن والمصابين بالأمراض المزمنة وسكان المناطق الفقيرة.

المنهجية الحسابية:

تم حساب عدد الوفيات المتفاداة بناءً على:

- عدد الأفراد الجدد (New Users) الذين حصلوا على تبريد فعال في كل سنة من 2025 حتى 2050، وفقاً لسيناريو هين: معتدل (Moderate) وطموح (Aggressive).
- تم افتراض أن 20% من هؤلاء الأفراد ينتمون إلى الفئات الهشة (الأكثر عُرضة للمخاطر الصحية) وبناءً على مراجعات دراسات إقليمية فإن معدل الوفيات بسبب موجات الحر بين هذه الفئات يصل إلى 1,000 حالة لكل 100,000 شخص سنويًا، ما يعادل معامل خطر 0.01.

- وبالتالي، فإن المعادلة المستخدمة لحساب الوفيات المتفاداة هي:

$Avoided\ deaths_y$

$$= New\ users_y \times 0.2 \times (1,000 \div 100,000)$$

$$= New\ users_y \times 0.002$$

النتائج:

في السيناريو المعتدل

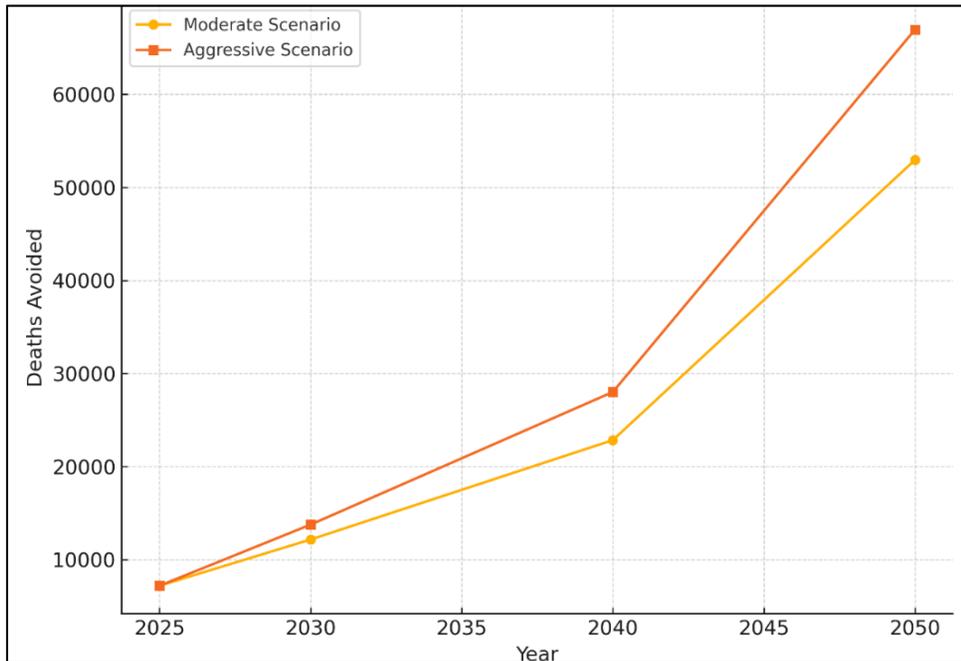
- سيتم تجنب نحو 7,200 حالة وفاة سنويًا بحلول عام 2025.
- ترتفع إلى 12,200 حالة في 2040، ثم تتجاوز 52,000 حالة بحلول 2050.

في السيناريو الطموح

- تبدأ الوفيات المتفاداة عند 7,200 حالة في 2025.
- وتصل إلى 66,956 حالة بحلول عام 2050، نتيجة تغطية عدد أكبر من السكان.

الشكل (5-6): صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على

تقليل الوفيات المرتبطة بالحر بدول الأوبك في 2025-2050



التفسير السياساتي:

تعكس هذه الأرقام التأثير الإنساني العميق للتوسع في خدمات التبريد، خصوصًا في الدول ذات المناخ الحار. توجيه الاستثمارات نحو التبريد المستدام يمكن أن ينقذ عشرات الآلاف من الأرواح سنويًا، ويقلل من العبء الصحي على الأنظمة الوطنية، خاصة في المناطق الحضرية المكتظة والفقيرة. كما تُبرز النتائج ضرورة إدماج مؤشرات الصحة العامة ضمن تقييم سياسات التكيف مع تغيّر المناخ في المنطقة.

8-5: الخلاصة والنتائج التلخيصية

يقدم هذا الفصل تحليلًا معمقًا للفوائد غير السوقية الناتجة عن إزالة الكربون في قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد في دول أوابك، وذلك ضمن سيناريوهين مختلفين (معتدل وطموح) حتى عام 2050. وعلى عكس الفصول السابقة التي ركزت على الجدوى الاقتصادية والعوائد المالية والاجتماعية، يركّز هذا الفصل على المكاسب البيئية والصحية والعدالة المناخية التي لا تنعكس مباشرة في مؤشرات السوق، لكنها تمثل تحسينات حقيقية في جودة الحياة.

يعتمد التحليل على منهجيات كمية تربط الانبعاثات المتجنبة بتغيرات في مؤشرات صحية وبيئية حساسة، مثل جودة الهواء، وفيات الحرارة، التبريد الأساسي، الفجوة المائية، والانبعاثات غير المباشرة لغازات HFC.

أبرز النتائج:

تحسن جودة الهواء:

شهدت تراكيزات الجسيمات الدقيقة (PM2.5) انخفاضًا بنسبة تصل إلى 33% في السيناريو الطموح بحلول عام 2050 مقارنة بسيناريو الأعمال المعتادة، ما يساعد في إبطاء تدهور جودة الهواء رغم عدم الوصول إلى المعايير المثالية لمنظمة الصحة العالمية.

وفيات الهواء المتفاداة:

قد يؤدي تقليل التعرض لتلوث الهواء إلى تجنب نحو 175,000 حالة وفاة مبكرة سنويًا بحلول عام 2050 في السيناريو الطموح، مما يعكس قيمة صحية كبرى لتقليل الانبعاثات.

وفورات المياه:

خفض استهلاك الوقود الأحفوري يُترجم إلى وفورات مائية تتجاوز 82 مليون متر مكعب سنويًا في السيناريو الطموح بحلول 2050، وهي ميزة مهمة في منطقة تعاني من ندرة المياه.

تحسين الوصول إلى التبريد:

أتاح التحول الطاقوي إمكانية وصول أكثر من 33 مليون فرد إلى خدمات التبريد الأساسية بحلول عام 2050 في السيناريو الطموح، ما يمثل تقدمًا في العدالة المناخية والصحة العامة.

انبعاثات HFC المتفاداة:

تم تجنب نحو 4.7 مليون طن مكافئ CO₂ من مركبات HFC في 2050 نتيجة تحسين كفاءة أجهزة التبريد وتقليل تسرب الغازات، مما يعزز الالتزام باتفاقية كيغالي.

الوفيات المرتبطة بالحر:

تم تقدير تجنب ما يزيد عن 66,000 حالة وفاة سنويًا بحلول 2050 في السيناريو الطموح، وذلك بفضل تحسين الوصول إلى التبريد في أوساط الفئات الهشة.

دلالات سياساتية:

تبرز نتائج هذا الفصل أهمية إدماج المؤشرات غير السوقية ضمن تقييمات سياسات إزالة الكربون، مثل جودة الهواء، العدالة المناخية، الأمن المائي، ومؤشرات الصحة العامة. هذه المؤشرات تُعدّ أدوات فعّالة لإقناع صناع القرار بتسريع مسارات التحول الطاقوي، كما تعزز من شرعية الاستثمارات في البنية التحتية النظيفة كمشروعات ذات أثر اجتماعي وإنساني مباشر.

يعكس الفصل أن إزالة الكربون لا تقتصر على خفض الانبعاثات فحسب، بل تحمل فوائد متكاملة تمس الحياة اليومية للناس، وخاصة في المناطق الحضرية والمجتمعات الأكثر هشاشة. ولهذا، فإن

تبنى منظور شامل يدمج الفوائد غير السوقية يعزز من فعالية السياسات المناخية ويسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة في دول أوابك.

التوصيات والاستنتاجات

الاستنتاجات العامة

- من المتوقع أن يرتفع الطلب على الطاقة في قطاعات النقل، التدفئة، والتبريد بدول أوابك بنسبة 91% خلال الفترة من 2020 إلى 2050، مما يجعل هذه القطاعات من أسرع القطاعات نموًا في الاستهلاك، وأحد أبرز مصادر الضغط على استدامة الإمدادات وخفض الانبعاثات.
- تُظهر النتائج أن الانبعاثات المرتفعة في هذه القطاعات لا تعود فقط إلى النمو في الطلب، بل بالأخص إلى الاعتماد البنيوي على مصادر طاقة أحفورية عالية الكربون.
- لا يمكن خفض هذه الانبعاثات بشكل فعال إلا من خلال إحلال تقنيات قائمة على الطاقة الجديدة والمتجددة، وليس فقط عبر تحسين الكفاءة أو التحول الجزئي.
- تقنيات مثل المركبات الكهربائية، شاحنات الهيدروجين، مضخات الحرارة، التسخين الشمسي، التبريد المركزي، والطاقة الشمسية الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة تمثل حلولاً عملية وقابلة للتطبيق في المنطقة، وتمتلك قابلية مباشرة للاعتماد على مصادر نظيفة ومتجددة.
- السيناريو الطموح الذي يعتمد على نشر واسع لهذه التقنيات يؤدي إلى خفض انبعاثات القطاعات الثلاثة بنسبة 33% بحلول عام 2050، بينما يُحقق السيناريو المعتدل خفضًا قدره 26%.
- تظهر النتائج أن الطاقة المتجددة ليست فقط بديلاً نظيفاً، بل مكوّنًا لا غنى عنه لتحقيق التحول الطاقوي في القطاعات غير الكهربائية، وأن اعتماد هذه التقنيات يحقق أيضًا وفورات اقتصادية وصحية ملموسة.

التوصيات السياساتية

أولاً: تكامل الطاقة المتجددة مع خطط التحول القطاعي

- ربط جميع الحلول الكهربائية مثل EVs و Heat Pumps بشبكات كهرباء متجددة، عبر توسيع الاستثمار في الطاقة الشمسية والرياح.
- وضع سياسات تلزم بدمج الطاقة الجديدة والمتجددة في أنظمة التبريد والتدفئة، خاصة في المشاريع الجديدة أو المخططات الحضرية الكبرى.

ثانياً: تصميم استراتيجيات وطنية للتحول في كل قطاع

- النقل: كهربة النقل الخفيف وتطوير بنية تحتية للهيدروجين للنقل الثقيل.
- التدفئة: نشر مضخات الحرارة في المناطق الحضرية، وتسخين شمسي في شمال أفريقيا.
- التبريد: تعميم نظم التبريد المركزي وربطها بال-PV، خاصة في دول الخليج.

ثالثاً: تطوير أدوات مالية داعمة

- اعتماد تسعير تدريجي للكربون لتمويل التحول، وتدوير الإيرادات لدعم التقنيات منخفضة الكربون.
- إطلاق برامج دعم موجهة للأسر والمنشآت الصغيرة لتسهيل الانتقال لتقنيات الطاقة المتجددة.

رابعاً: دعم التصنيع الإقليمي ونقل التكنولوجيا

- تعزيز التعاون بين دول أوبك لتوطين مكونات التقنيات النظيفة.

- إنشاء منصات إقليمية لتبادل الخبرات وأفضل الممارسات في استخدام الطاقة المتجددة بالقطاعات غير الكهربائية.

توصيات موجهة لمنظمة أوابك

- إطلاق استراتيجية عربية متكاملة للتحويل الطاقى في القطاعات غير الكهربائية، تركز على إدماج الطاقة المتجددة بشكل هيكلي.
- دعم الدول الأعضاء في تصميم مسارات تبين تدرجية للتقنيات مع مكونات تمويل واستثمار.
- إنشاء مرصد إقليمي لتتبع نسب التبنى والتحول في هذه القطاعات، وربطه بمستهدفات المناخ والتنمية.

توصيات للبحث المستقبلي

- توسيع نطاق التحليل ليشمل تأثير الطاقة الجديدة والمتجددة في قطاعات الصناعة والمياه.
- بناء نماذج تكاملية CGE أو TIMES تربط بين استخدام الطاقة المتجددة والنتائج الاقتصادية الكلية.
- دراسة جدوى استخدام الهيدروجين الأخضر في القطاعات الصناعية كثيفة الاستهلاك، كجزء من التكامل مع النقل والتدفئة.

Abstract

البحث الفائق بالجائزة الثانية لمنظمة أوابك للبحث العلمي

آفاق دمج تقنيات الطاقة المتجددة، والتقنيات المعتمدة على مصادرها، في قطاعات النقل والتبريد والتدفئة بدول أوابك

الدكتور/ مصطفى محمد عرفة مرسى إبراهيم

يتقضى هذا البحث إمكانية دمج تقنيات الطاقة المتجددة والأنظمة المتوافقة معها في ثلاثة قطاعات رئيسية غير كهربائية - النقل والتدفئة والتبريد - في الدول الأعضاء في منظمة أوابك. غالباً ما يتم إغفال هذه القطاعات في استراتيجيات خفض الانبعاثات الكربونية. ونظراً لاعتمادها على الوقود الأحفوري ومساهمتها المتزايدة في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، فإنها تشكل تحدياً كبيراً لتحقيق أمن الطاقة والاستدامة البيئية والعدالة الاجتماعية والاقتصادية في جميع أنحاء المنطقة العربية.

تطوّر الدراسة إطاراً تحليلياً مستقبلياً قائماً على توقعات الطلب على الطاقة للفترة 2025-2050 في 11 دولة عربية. وتستخدم الدراسة ثلاثة سيناريوهات ذات صلة بالسياسات: الوضع الراهن، والانتقال المعتدل، والانتقال السريع. تحاكي هذه السيناريوهات درجات متفاوتة من تبني ست تقنيات نظيفة، وهي: المركبات الكهربائية، والشاحنات التي تعمل بالهيدروجين، ومضخات الحرارة، وأنظمة الطاقة الشمسية الحرارية، وتبريد المناطق، وأنظمة الخلايا الكهروضوئية المتصلة بالشبكة. تم اختيار هذه التقنيات بناءً على نضجها، وتوافقها مع القطاعات المستهدفة، وإمكانية خفض الانبعاثات وتحسين التكاليف.

يتمثل الابتكار الرئيسي في الدراسة في استخدام نماذج الانبعاثات المستمرة بدلاً من مجرد حساب الانبعاثات السنوية المتجنبة، يدمج النموذج مخزون الانبعاثات طوال عمر كل تقنية مع مراعاة التدهور السنوي. وهذا يتيح تقديرًا أكثر واقعية للأثر البيئي لاعتماد التكنولوجيا. وتشمل الدراسة أيضاً مجموعة واسعة من الفوائد المشتركة - بما في ذلك تجنب الوفيات الناجمة عن الجسيمات الدقيقة (PM2.5) والحرارة الشديدة، وتوفير تكاليف الوقود، وتخفيضات نفقات التشغيل على مستوى النظام برمته.

تشير النتائج إلى أنه في ظل السيناريو السريع، يمكن أن يؤدي اعتماد هذه التقنيات إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التراكمية في القطاعات الثلاثة بنسبة تصل إلى 33% بحلول عام 2050 مقارنة بمسار الوضع الراهن. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي هذا التحول إلى توفير في الوقود الأحفوري يتجاوز 500 مليون طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون، مما يساهم بشكل مباشر في أهداف أمن الطاقة الوطنية ويقلل من الأعباء المالية المرتبطة بدعم الوقود.

من منظور الصحة والبيئة، وجدت الدراسة أنه يمكن تجنب ما يقرب من 60 ألف حالة وفاة مبكرة في جميع أنحاء المنطقة بحلول عام 2050، ويرجع ذلك أساساً إلى انخفاض التعرض لانبعاثات الجسيمات الدقيقة PM2.5 والإجهاد المرتبط بالحرارة. وتبرز هذه الفوائد بشكل خاص للفئات السكانية الضعيفة في المناطق الحضرية التي تعاني من محدودية الوصول إلى تقنيات التبريد. من خلال دمج هذه الفوائد غير المرتبطة بالسوق في تحليل تكلفة النظام، تصبح التكلفة الصافية للانتقال سلبية في العديد من البلدان، مما يعزز العقلانية الاقتصادية للاستثمار المبكر.

ولفحص مسارات السياسة، تقيّم الدراسة دور تسعير الكربون في تسريع تبني التقنيات النظيفة. يقوم هذا النموذج بمحاكاة مسارات أسعار الكربون التي تتراوح من 20 دولاراً إلى 60 دولاراً للطن من ثاني أكسيد الكربون، ويحلل أثارها على نشر التكنولوجيا ومسارات الانبعاثات والإيرادات المالية. تظهر النتائج أن تسعير الكربون حتى ولو بصورة معتدلة يمكن أن يجعل العديد من التقنيات مجدبة اقتصادياً مع توليد إيرادات عامة كبيرة يمكن إعادة استثمارها في البنية التحتية والحماية الاجتماعية والابتكار.

يختتم البحث بتوصيات رئيسية متعلقة بالسياسات أولاً، ينبغي أن تتضمن استراتيجيات الطاقة الوطنية بشكل صريح القطاعات غير الكهربائية ضمن أطرها الخاصة بآلية الكربون. ثانياً، ينبغي للدول أن تعطي الأولوية للاستثمار في تقنيات خفض التكاليف الحدية ذات التأثير العالي والتكلفة المنخفضة (MAC)، وخاصة تلك التي لها فوائد مشتركة مثبتة. ثالثاً، ينبغي تطبيق تسعير الكربون تدريجياً مع توفير ضمانات كافية للفئات ذات الدخل المنخفض والصناعات المحلية. رابعاً، ينبغي تعزيز التعاون الإقليمي في إطار منظمة أوابك لتسهيل نقل المعرفة والتمويل المشترك والمعايير المنسقة لنشر التكنولوجيا النظيفة.

باختصار، توفر هذه الدراسة قاعدة أدلة قوية لصناع السياسات وأصحاب المصلحة الذين يسعون إلى توسيع نطاق التحول في مجال الطاقة ليشمل قطاعات أخرى غير قطاع الكهرباء. يسلط هذا الضوء على كل من الإلحاح والفرصة في معالجة الانبعاثات الناتجة عن النقل والتدفئة والتبريد من خلال تقنيات قابلة للتطوير وبأسعار معقولة ومفيدة اجتماعياً. تؤكد النتائج أن اتباع نهج شامل - قائم على البيانات والمنطق الاقتصادي والتعاون الإقليمي - يمكن أن يساعد دول منظمة أوابك على تحقيق أهدافها في مجال التنمية المستدامة والمناخ دون المساس بإمكانية الحصول على الطاقة.

قائمة الأشكال

رقم الصفحة	الأشكال
27	الفصل الأول: تطور الطلب على الطاقة والانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوبك: خط الأساس وسيناريو الأعمال كالمعتاد (2020-2050)
30	الشكل 1-1: الطلب المستقبلي على الطاقة لقطاع النقل في دول أوبك 2025-2050
31	الشكل 2-1: الطلب المستقبلي على الطاقة لقطاع التبريد في دول أوبك 2025-2050
32	الشكل 3-1: الطلب المستقبلي على الطاقة لقطاع التبريد في دول أوبك 2025-2050
36	الشكل 4-1: الانبعاثات المستقبلية لقطاع النقل في دول أوبك 2025-2050
36	الشكل 5-1: الانبعاثات المستقبلية لقطاع التدفئة في دول أوبك 2025-2050
37	الشكل 6-1: الانبعاثات المستقبلية لقطاع التبريد في دول أوبك 2025-2050
40	الفصل الثاني: سيناريوهات تبني التقنيات النظيفة وأثرها الكمي على الانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوبك
44	الشكل 1-2: نسب تبني المركبات الكهربائية في دول أوبك 2025-2050
45	الشكل 2-2: نسب تبني شاحنات الهيدروجين للنقل الثقيل في دول أوبك 2025-2050
46	الشكل 3-2: نسب تبني المضخات الحرارية في دول أوبك 2025-2050
47	الشكل 4-2: نسب تبني التسخين بالطاقة الشمسية في دول أوبك 2025-2050
48	الشكل 5-2: نسب تبني التبريد المركزي في دول أوبك 2025-2050
49	الشكل 6-2: نسب تبني الطاقة الشمسية المرتبطة بالشبكة في دول أوبك 2025-2050
53	الشكل 7-2: تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات على انبعاثات النقل في دول أوبك 2025-2050
54	الشكل 8-2: تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات على انبعاثات التدفئة في دول أوبك 2025-2050
55	الشكل 9-2: تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات على انبعاثات التبريد في دول أوبك 2025-2050
56	الشكل 10-2: تأثير السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات على انبعاثات الثلاث قطاعات في دول أوبك 2025-2050
57	الفصل الثالث: تحليل الجدوى الاقتصادية والاجتماعية لتقنيات خفض الانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوبك
61	الشكل 1-3: الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) لتبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050

قائمة الأشكال

رقم الصفحة	الأشكال
61	الشكل 2-3: الإنفاق الرأسمالي (CAPEX) لتبني التقنيات بكل قطاع علي حده في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة لعام 2050
63	الشكل 3-3: وفورات الوقود (Fuel Savings) نتيجة تبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050
65	الشكل 3-4: المكاسب الصحية الناتجة عن تقليل الانبعاثات نتيجة تبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050
68	الشكل 3-5: التكلفة الكلية (Total System Cost) لتبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050
71	الشكل 3-6: متوسط تكلفة الازالة الحدية للكربون بالثلاث قطاعات في دول أوبك في السيناريوهات المختلفة 2025-2050
73	الفصل الرابع: الأثر الاقتصادي والاجتماعي لتسعير الكربون في دول الأوبك
75	الشكل 4-1: السيناريوهات المختلفة لتسعير الكربون في دول أوبك خلال الفترة 2025-2050
78	الشكل 4-2: الإيرادات الكربونية الناتجة عن التسعير المعتدل للكربون نتيجة السيناريوهات المختلفة لتبني التقنيات بالثلاث قطاعات في دول أوبك في 2025 - 2050
81	الشكل 4-3: خسائر صادرات الوقود الأحفوري الناتجة عن التحول بالثلاث قطاعات في دول أوبك في 2025-2050
83	الشكل 4-4: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الناتج المحلي الإجمالي لدول أوبك في 2025-2050
86	الشكل 4-5: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على التوظيف بدول الأوبك في 2025-2050
88	الشكل 4-6: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على مؤشر القدرة على تحمّل تكاليف الطاقة بدول الأوبك في 2025-2050
90	الفصل الخامس: التأثيرات الصحية والبيئية والاجتماعية غير السوقية الناتجة من استخدام التقنيات المتجددة والقابلة للاعتماد علي الطاقة المتجددة لدول أوبك
94	الشكل 5-1: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على مؤشر تركيز الجسيمات الدقيقة (PM 2.5) بدول الأوبك في 2025-2050

قائمة الأشكال

رقم الصفحة	الأشكال
95	الشكل 5-2: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الوفيات المبكرة المُتفاداة نتيجة لتحسن جودة الهواء بدول الأوابك في 2025-2050
98	الشكل 5-3: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على وفورات المياه الناتجة عن خفض استهلاك الوقود الأحفوري بدول الأوابك في 2025-2050
100	الشكل 5-4: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على تحسين الوصول إلى خدمات التبريد بدول الأوابك في 2025-2050
102	الشكل 5-5: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على الانبعاثات المُتفاداة من مركبات HFC بدول الأوابك في 2025-2050
103	الشكل 5-6: صافي الأثر الناتج عن التحول بالثلاث قطاعات على تقليل الوفيات المرتبطة بالحر بدول الأوابك في 2025-2050

قائمة الجداول

رقم الصفحة	الجدول
40	الفصل الثاني: سيناريوهات تبني التقنيات النظيفة وأثرها الكمي على الانبعاثات في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد بدول أوابك
41	الجدول 1-2: التكنولوجيات المختارة للتحويل الطاقوي بدول الأوابك في قطاعات النقل والتدفئة والتبريد وعلاقتها بالطاقة المتجددة
52	الجدول (2-2): بعض قيم Effectiveness و Technology Share للتقنيات المختلفة بدول أوابك المختلفة

المراجع

1. Enerdata (2022). Global Energy & CO₂ Data. Grenoble: Enerdata. Available at: <https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissions-database.html>.
2. Global Burden of Disease Collaborative Network (2020) Global Burden of Disease Study 2019 (GBD 2019) Results. Seattle, United States: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). Available at: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/>.
3. High-Level Commission on Carbon Prices (2017) *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Washington, DC: World Bank Group. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28588>.
4. IEA (2018). *The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>.
5. IEA (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
6. IEA (2022). *The Future of Heat Pumps*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>.
7. IEA (2022). World Energy Outlook 2022. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
8. IEA (2023) *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach, 2nd Edition*. Paris: International Energy Agency.

- Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
9. IEA (2023). Global EV Outlook 2023. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
 10. IEA (2024). Emission Factors 2024 (database). Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2024>.
 11. IEA SHC (2021). *Solar Heat Worldwide: Global Market Development, Trends and Statistics 2021*. IEA Solar Heating and Cooling Programme. Available at: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide-2021>.
 12. IIASA (2022). *MESSAGE-GLOBIOM Model Documentation*. Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC). Available at: https://www.iamcdocumentation.eu/index.php?title=Model_Documentation_-_MESSAGE-GLOBIOM.
 13. ILO (2018) World Employment and Social Outlook 2018: Greening with jobs. Geneva: International Labour Organization. Available at: https://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_628654/lang--en/index.htm.
 14. IMF (2023) *Fiscal Policies to Address Climate Change in Asia and the Pacific*. Washington, DC: International Monetary Fund. Available at: <https://www.elibrary.imf.org/display/book/9798400250286/9798400250286.xml>
 15. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.

16. IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>.
17. IEA (2022). *Renewables 2022: Analysis and Forecasts to 2027*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>.
18. IRENA (2021) Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2021>.
19. IRENA (2022). *Renewable Energy Market Analysis: Africa and Its Regions*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2022/Jan/Renewable-Energy-Market-Analysis-Africa>.
20. IRENA (2024). *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024>.
21. JGCRI (2023). *GCAM Documentation: Global Change Assessment Model*. Joint Global Change Research Institute, Pacific Northwest National Laboratory. Available at: <https://jgcri.github.io/gcam-doc/>.
22. Kikstra, J.S., Vinca, A., Lovat, F., Boza-Kiss, B., van Ruijven, B., Wilson, C., Rogelj, J., Zakeri, B., Fricko, O. & Riahi, K. (2021). *Climate mitigation scenarios with persistent COVID-19-related energy demand changes*. Nature Energy, 6(12), 1114–1123. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00904-8>.

23. Lancet Countdown (2022). *Air Pollution and Health: Indicators 3.2 and 3.3*. Available at: <https://lancetcountdown.org/air-pollution-and-health/>.
24. Peace, J., Besley, D.J., Rhoades, E.L., Rastogi, N.P. and Prasad, N. (2025) 'Carbon pricing drives critical transition to green growth', *Nature Communications*, 16, Article 945. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56540-3>.
25. Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., et al. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619–1654. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9).
26. Sánchez-Triana, E., Shindell, D., Mena, M. and Enriquez, S., 2023. *Integrating Air Quality Management and Climate Change Mitigation: Achieving Ambitious Climate Action by Cleaning the Air We Breathe*. Washington, DC: World Bank Group. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099033123181574723/pdf/P17078405f2576003080b0095b8cda440ee.pdf>.
27. Way, R., Ives, M.C., Mealy, P. & Farmer, J.D. (2022). *Empirically grounded technology forecasts and the energy transition*. *Joule*, 6(9), 2057–2082. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.005>.
28. World Bank (2020) *Report of the High-Level Commission on Carbon Pricing and Competitiveness*. Washington, DC: World Bank Group. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/715631581657071426>.
29. World Bank (2023) *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. Washington, DC: World Bank. Available at: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents->

- reports/documentdetail/344901682150418259/state-and-trends-of-carbon-pricing-2023.
30. World Bank (2024). Population Projections Dataset 2024. Washington, DC: World Bank. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>.
 31. World Health Organization (2005) Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide – Global update 2005. Geneva: WHO. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>.
 32. World Health Organization (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.



Abstract

البحث الفائق بالجائزة الأولى لمنظمة أوابك للبحث العلمي

تحويل الغازات الدفيئة عبر الإيثانول إلى وقود طيران مستدام
باستخدام «محفزات لاتا بيروفسكيت عالية النشاط»

الدكتورة/ داليا رضوان عبد الحافظ محمد

يهدف البحث الحالي إلى المساهمة في السباق العالمي لإيجاد حلول مستدامة ومتجددة للطاقة. يُعد التحويل المباشر لغازات الدفيئة إلى إيثانول، والذي يمكن استخدامه لتوليد وقود مستدام، حلاً واعداً للمشاركة في هذا السباق. علاوة على ذلك، فإن تحويل الإيثانول هو استراتيجية ناشئة لإنتاج وقود الطائرات (ATJ)، ولكنه لا يزال يواجه تحديات كبيرة. لذلك، يركز هذا البحث على استخدام المحفزات النشطة والانتقائية للغاية القائمة على بيروفسكيت $LaTaO_4$ واستبدالها A-/B- بواسطة Na/Pd على التوالي ($NaLaTa_2O_6$ و $LaPdTaO_6$) لترقية الإيثانول الحيوي إلى مادة أولية مستدامة لوقود الطائرات النفاثة (ATJ). تم تحضير المحفزات باستخدام طريقة التسخين بالميكروويف، ثم تم توصيفها باستخدام تقنيات تحليلية متنوعة: XRD، FTIR، SEM، PL، TPR، و NH_3 -TPD. تحدث عملية ATJ في نظام تدفق مستمر تحت الضغط الجوي في نطاق درجة حرارة يتراوح بين 100 و 400 درجة مئوية. أظهرت جميع المحفزات كفاءة عالية في تحويل الإيثانول، حيث بلغت نسبة التحويل 94.7% باستخدام محفز NLTO عند درجة حرارة 400 درجة مئوية، مع نسبة غازات منخفضة ($> 1\%$). وتشمل المنتجات السائلة الرئيسية: الأسيتالدهيد، والكروتونالدهيد، و n-/iso-C4-6-OH، و C_7 -OH. ويُظهر محفز LTO أعلى انتقائية لمركب iso-C4-6-OH (حوالي 61%). يُظهر محفز LPTO أعلى انتقائية لمركب iso-C4-6-OH (حوالي 3.2%). بينما يُظهر محفز NLTO أعلى انتقائية لمركبات C_7 -OH ($> 27\%$)، وهي نسبة كبيرة يمكن استخدامها مباشرة كعوامل مساعدة ذاتية SAFs بعد خطوة بسيطة لإزالة الأكسجين بالهيدروجين. يمكن أن تشير التحقيقات المنهجية إلى أن الأداء المتميز لمحفزات البيروفسكيت المحضرة نشأ بشكل رئيسي من التأثير التآزري للخصائص الإلكترونية والأكسدة والاختزال والحمض/القاعدة المضبوطة بدقة. تلك الخصائص المتأثرة باستبدال الموقع A-/B- تؤكد اختلاف انتقائية المحفزات. بشكل عام، يُعد استخدام غازات الاحتباس الحراري في إنتاج وقود النقل نهجاً واعداً للتخفيف من آثار تغير المناخ وخلق فرص مستدامة. يمكن أن يسهم هذا النهج في: خفض الانبعاثات، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتوفير مصادر طاقة مستدامة، وتعزيز اقتصاد الكربون الدائري، وتشجيع الابتكار والتقدم التكنولوجي.

- dimethylfuran (DMF) using carbon supported Ru catalysts” *Fuel Process Technol.*, 199, 106225.
- Ueda W., Ohshida T., Kuwabara T., Morikawa Y. (1992) “Condensation of alcohol over solid-base catalyst to form higher alcohols” *Catal. Lett.* 12, 97–104.
- Vasquez P.B., Tabanelli T., Monti E., Albonetti S., Bonincontro D., Dimitratos N., Cavani F. (2019) “Gas-phase catalytic transfer hydrogenation of methyl levulinate with ethanol over ZrO₂” *ACS Sustain. Chem. Eng.* 7, 8317–8330.
- Wyman C.E. “Novel Vertimass Catalyst for Conversion of Ethanol and Other Alcohols into Fungible Gasoline, Jet, and Diesel Fuel Blend Stocks” (2015) http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/wyman_bioenergy.pdf
- Wyman C.E., Hannon J.R., (2019) “Systems and methods for reducing energy consumption in production of ethanol fuel by conversion to hydrocarbon fuels” US10315965B2.
- Wyman C.E., Hannon J.R., (2020) “Systems for reducing resource consumption in production of alcohol fuel by conversion to hydrocarbon fuels”, US10815163B2.
- Wyman C.E., Hannon J.R., (2021) “Systems and methods for improving yields of hydrocarbon fuels from alcohols”, US11034891B2.
- Zhong Q., Liao J., Zhang Q., Qiu S., Meng Q., Wu X., Wang T. (2022) “Aqueous upgrading of ethanol to higher alcohol diesel blending and jet fuel precursors over Na-doped porous Ni@C nanocomposite” *Fuel* 324, 124507.
- Zhou X., Li G., Liu F., Li N. (2022) “Production of ethanol from corn straw based on chemical looping gasification: Economic analysis” *Bioresource Technology* 360, 127568.
- Zou Z., Zhang T., Cong Y., Li N. (2025) “Direct synthesis of jet fuel range alkanes with lignocellulosic ketones and/or alcohols over a single non-noble metal catalyst” *Journal of Energy Chemistry* 108, 101–108.

- Perez M.A., Bringue R., Iborra M., Tejero J., Cunill F., (2014) "Ion exchange resins as catalysts for the liquid-phase dehydration of 1-butanol to di-n-butyl ether, Appl. Catal. A-Gen. 482, 38–48.
- PNNL "Faster and Cheaper Ethanol-to-Jet-Fuel on the Horizon" accessed October 29, (2022).
- Ramaiyan K., Benavidez A., Garzon F. (2024) "Durable electrocatalysts based on barium niobates doped with Ca, Fe, and Y: Enhancing catalytic activity and selectivity for oxidative coupling of methane" Chemical Engineering Journal, 500, 156976.
- Ramasamy K.K., Gray M., Job H., Santosa D., Li X.S., Devaraj A., Karkamkar A., Wang Y. (2015) "Role of calcination temperature on the hydrotalcite derived MgO–Al₂O₃ in converting ethanol to butanol" Top. Catal., 59, 46–54.
- Ramasamy K.K., Guo M.F., Subramaniam S., Sanyal U., Brady C.O., (2022) "Processes for the conversion of mixed oxygenates feedstocks to hydrocarbon fuels", US11492303B2.
- Singh R., Dhir A., S.M. Kumar, Mahla S.K., (2020) "Dry reforming of methane using various catalysts in the process: review" Biom. Conv. Bioref. 10, 567-587.
- Spivey J.J., Egbebi A., (2007) "Heterogeneous catalytic synthesis of ethanol from biomass-derived syngas, Chem. Soc. Rev. 36, 1514-1528.
- Suszko T., Dobruchowska E., Gulbiński W., Greczynski G., Morgiel J., Kawczyński B., Załęski K., Dorywalski K. and Pogorzelski S. (2025) "NiMo-C Coatings Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering for Application as a Catalyst for the Hydrogen Evolution Reaction in an Acidic Environment" Energy, Environmental, and Catalysis Applications January 6, 17, 3344–3355
- Świątek M.Z., Sławik L. (2010) "Bioethanol - Production and Utilization" Archwum Combustions 30, 237-245.
- Teixeira A.T., da Silva A.C.M., Cavalcante R.M., Young A.F. (2024) "Process simulation and economic evaluation of the Alcohol-to-Jet production of sustainable aviation fuel in the Brazilian context": Energy Conversion and Management 319, 118947.
- Tzeng T-W, Lin C-Y, Pao C-W, Chen J-L, Nuguid RJG, Chung P-W. (2020) "Understanding catalytic hydrogenolysis of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) to 2, 5-

- Maillard P., Tessier F., Orhan E., Cheviré F., Marchand R., (2004) “Thermal Ammonolysis Study of the Rare-Earth Tantalates RTaO₄” *Chemistry of Materials*, 17, 1.
- Mansy A.E., Daniel S., Monguen C.K.F., Wang H., Osman A.I. and Tian Z.Y. (2025) “Catalytic production of aviation jet biofuels from biomass: a review” *Springer International Publishing*, 23, pages 419–461
- Margellou A.G., Vaimakis T.C., Pomonis P.J., Petrakis D.E. (2023) “Investigation of catalytic reduction of NO by CO over A- and B- site substituted La(Sr)Fe(Co)O₃ perovskites” *Applied Catalysis A: General*, 660, 119231.
- Mawhood R., Gazis E., Hoefnagels R., Jong S.D., (2015) “Technological and commercial maturity of aviation biofuels: Emerging options to produce jet from lignocellulosic biomass” *Conference: 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies: Sustainable Energy for a Resilient Future*, September, At: Nottingham UK, 10.
- Narula C.K., Davison B.H., Keller M., (2017) “Zeolitic catalytic conversion of alcohols to hydrocarbons” US9533921B2.
- Narula C.K., Li Z., Casbeer E.M., Geiger R.A., Moses-Debusk M., Keller M., Buchanan M.V., Davison B.H., (2015) “Heterobimetallic zeolite, InV-ZSM-5, enables efficient conversion of biomass derived ethanol to renewable hydrocarbons” *Sci. Rep.* 5, 16039.
- Nyholm F., Toppinen S., Saxen H. (2025) “Sustainable power-to-liquids aviation fuels: Modelling and comparison of two Fischer-Tropsch upgrading process concepts” *Energy Conversion and Management*, 342, 120153.
- OAPEC, (2024) “sustainable aviation fuel production in OAPEC member countries” Vol. 50 No. (10) October
- Okolie C., Belhseine Y.F., Lyu Y., Yung M.M., Engelhard M.H., Kovarik L., Stavitski E., Sievers C., (2019) “Conversion of methane to methanol and ethanol over nickel oxide on ceria-zirconia catalysts in a single reactor” *Angew. Chem.* 58, 10785-10785.
- Pechstein J, Neuling U, Gebauer J, Kaltschmitt M. (2017) “Alcohol-to-Jet (AtJ). Biokerosene: Status and Prospects. Berlin: Springer Berlin Heidelberg” 543–574.

- Li Z., Lepore A.W., Salazar M.F., Foo G.S., Davison B.H., Wu Z., Narula C.K., (2017) "Selective conversion of bio-derived ethanol to renewable BTX over Ga-ZSM-5", *Green. Chem.* **19**, 4344-4352.
- Liao J., Liu Z., Ling Y., Zhang Q., Qiu S., Gu J., Li J., Dong H., Song J., Wang T. (2023) "Electronic and surface engineering of Mo doped Ni@C nanocomposite boosting catalytic upgrading of aqueous bio-ethanol to bio-jet fuel precursors" *Chemical Engineering Journal* 461, 141888.
- Liao J., Zhong Q., Gu J., Qiu S., Meng Q., Zhang Q., Wang T. (2022) "New approach for bio-jet fuels production by hydrodeoxygenation of higher alcohols derived from C-C coupling of bio-ethanol" *Applied Energy* 324, 119843.
- Lilga M.A., Hallen R.T., Albrecht K.O., Cooper A.R., Frye J.G., Ramasamy K.K., (2017) "Systems and processes for conversion of ethylene feedstocks to hydrocarbon fuels", US 9663416 B2.
- Lin PP, Mi L, Morioka A, Yoshino K, Konishi S, Xu S, et al. (2015) "Consolidated bioprocessing of cellulose to isobutanol using *Clostridium thermocellum*" *Metab Eng*, 31, 44–52.
- Liu Q., Liu J, Yan A., Sun W., Liang C., Chen T., Wen Q., Chen Y., Ying H., Chen Y. (2025) "A novel immobilized bioreactor based on CFD simulation for fuel ethanol production from corn" *Journal of Biotechnology*, 405, 254-262.
- Lohne Ø.F., Gurauskis J., Phung T.N., Einarsrud M.A., Grande T., Bouwmeester H.J.M., Wiik K. (2012) "Effect of B-site substitution on the stability of $\text{La}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{Fe}_{0.8}\text{B}_{0.2}\text{O}_3$ -delta, B = Al, Ga, Cr, Ti, Ta, Nb" *Solid State Ionics*, 225, 186-189.
- Luo Y., He Y., Zhang R., Lou D.F., Zhu R., Zhu C., Li Q. (2023) "A novel integrated process for selective preparation of jet-range fuels from low carbon alcohols and ABE" *Fuel Processing Technology* 241, 107603.
- Ma Y., Geng L., Ji Z., Zhang Z., Sun F., Zhang W., Zhang P. (2024) "Spraying and combustion characteristics of Fischer-Tropsch diesel/ethanol/n-pentanol blends in constant volume combustion chamber" *Journal of the Energy Institute*, 116, 101735.

- IATA-International Air Transportation Association. (2024) “Energy and New Fuels Infrastructure Net Zero Roadmap” Accessed August 06, .
www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/energy-and-new-fuels-infrastructure-net-zero-roadmap.pdf.
- IEA (2024) “Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels SAF): Technologies and policies” IEA Bioenergy Task 39, January 2024, [ISBN# 979-12-80907-36-3](https://www.iea.org/publications/freemove/?q=progress+in+commercialization+of+biojet/sustainable+aviation+fuels+saf&f=0).
- Jiatong Z., Zhihao L., Ping Z., Jia Z., Xuanyu M., Jie X., Feng G., (2021) “Preparation and Thermal Properties of Rare Earth Tantalates (RETaO₄) High-Entropy Ceramics” *Journal of Inorganic Materials*, 36, 411-417.
- Jung K.N., Jung J.H., Im W.B., Yoon S., Shin K.H., Lee J.W. (2013) “Doped Lanthanum Nickelates with a Layered Perovskite Structure as Bifunctional Cathode Catalysts for Rechargeable Metal–Air Batteries” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 9902–9907.
- Karthikeyan K. Ramasamy, Michel Gray, Heather Job, Colin Smith, Yong Wang (2016) “Tunable catalytic properties of bi-functional mixed oxides in ethanol conversion to high value compounds” *Catalysis Today*, 269, 82–87.
- Kozlowski J.T., Davis R.J. (2013) “Heterogeneous catalysts for the Guerbet coupling of alcohols, *ACS Catal.*, 3, 1588–1600.
- LanzaTech, (2016) “Low Carbon Fuel Project Achieves Breakthrough as LanzaTech Produces Jet Fuel from Waste Gases for Virgin Atlantic”, <https://advancedbiofuelsusa.info/low-carbon-fuel-project-achieves-breakthrough-as-lanzatech-produces-jet-fuel-from-waste-gasesfor-virgin-atlantic/> 2016.
- Li M-R, Wang G-C. (2017) “Differentiation of the C-O and C-C bond scission mechanisms of 1-hexadecanol on Pt(111) and Ru(0001): a first principles analysis” *Catalysis. Science & Technology*, 7, 743–60.
- Li Z., Lepore A., Davison B.H., Narula C.K. (2016) “Catalytic conversion of biomass-derived ethanol to liquid hydrocarbon blendstock: effect of light gas recirculation, *Energy Fuels* 30. 10611–10617.

- Geleynse S., Brandt K., Garcia-Perez M., Wolcott M., and Zhang X. (2018) "The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation" *Chem. Sus. Chem.*, 11, 3728 – 3741.
- Griffin D.W., Schultz M.A., (2012) "Fuel and chemical products from biomass syngas: A comparison of gas fermentation to thermochemical conversion routes" *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 31, 219–224.
- Handler R.M., Shonnard D.R., Griffing E.M., Lai A., and Palou-Rivera I. (2015) "Life Cycle Assessments of Ethanol Production via Gas Fermentation: Anticipated Greenhouse Gas Emissions for Cellulosic and Waste Gas Feedstocks" *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55, 1-10.
- Harmon L., Hallen R., Lilga M., Heijstra B., Palou-Rivera I., Handler R. (2017) "A Hybrid Catalytic Route to Fuels from Biomass Syngas" LanzaTech, Inc. 8045 Lamon Ave, Suite 400 Skokie, IL 60077, Contract DE-EE0005356 Final Report.
- Higashide W, Li Y, Yang Y, Liao JC. (2011) "Metabolic engineering of *Clostridium cellulolyticum* for production of isobutanol from cellulose" *Appl Environ microb*, 77, 2727–33.
- Holmgren J., Chung A., Hashim D.A.R., Messina J., Rieschel G., Simpson S., Ryoso T., Wyse R., Gormly N., (2018) "LanzaTech Executive Summary, Making Sustainable Alternative Fuels Viable in Brazil June 19th.
- Hou X., Zhao P., Lin X., Gao Y., Chen H., Cai D., Qin P. (2025) "Current advances in distillation processes for fermentative acetone-butanol-ethanol purification" *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 79, 91-108.
- Huang Y., Liu H., Gan W., Zhu X., Xia A., Zhu X., Liao Q. (2025) "Continuous bioconversion of CO/CO₂ to ethanol through bacterial fermentation in a gas-liquid separation biofilm reactor" *Energy Conversion and Management*, 338, 119932.
- IATA, (2020) "International Air Transport Association "Carbon Offsetting Scheme for International Aviation (CORSIA)." Accessed April. <https://www.iata.org/en/policy/environment/corsia/>.
- IATA, (2022) "International Air Transportation Association. "Net zero 2050: sustainable aviation fuels Fact sheet" Accessed July 12. www.iata.org/flynetzero.

- Elsalamony R.A., Abd El-Hafiz D.R., Ebiad M.A., Mansour A.M., Mohamed L.S., (2013) "Enhancement of hydrogen production via hydrogen peroxide as an oxidant" RSC Adv., 3, 23791-23800.
- Essehaity A.M., Abd ElHafiz D.R., Aman D., Mikhail S. and Abdel-Monem Y.K. (2021) "Oxidative coupling of bio-alcohols mixture over hierarchically porous perovskite catalysts for sustainable acrolein production" RSC Adv., 11, 28961.
- Evans H.A. , Mao L. , Seshadri R. and Cheetham A.K. (2021) "Layered Double Perovskites" Annu. Rev. Mater. Res., 51, 351–80.
- Eyberg V., Dieterich V., Bastek S., Dossow M., Spliethoff H., Fendt S. (2024) "Techno-economic assessment and comparison of Fischer–Tropsch and Methanol-to-Jet processes to produce sustainable aviation fuel via Power-to-Liquid" Energy Conversion and Management, 315, 118728.
- Farooq U., Ahmed J., Alshehri S.M., Ahmad T. (2019) "High-Surface-Area Sodium Tantalate Nanoparticles with Enhanced Photocatalytic and Electrical Properties Prepared through Polymeric Citrate Precursor Route" ACS Omega, 4, 19408–19419.
- Gagliardi A., Balestra G., Maron J.D., Mazzoni R., Tabanelli T., Cavani F., (2024) "Ethanol to gasoline and sustainable aviation fuel precursors: an innovative cascade strategy over Zr-based multifunctional catalysts in the gas phase" Applied Catalysis B: Environment and Energy 349, 123865.
- Galadima A., Muraza O. (2015) "Zeolite catalysts in upgrading of bioethanol to fuels range hydrocarbons: A review" J. Ind. Eng. Chem. 31, 1–14.
- Gao F., Lewis R.A., Wang X.L., Dou S.X., (2002) "Far-infrared reflection and transmission of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ " Journal of Alloys and Compounds 347, 314-318.
- García-Rodríguez M., Flores-Lasluisa J.X., Cazorla-Amorós D., Morallón E. (2023) "Metal oxide Perovskite-Carbon composites as electrocatalysts for zincair batteries. Optimization of ball-milling mixing parameters" Journal of Colloid and Interface Science 630, 269–280.
- Gasparotto G., Nascimento N.M., Cebim M.A., Varela J.A., Zaghete M.A. (2011) "Effect of heat treatment on the generation of structural defects in LaTaO_4 ceramics and their correlation with photoluminescent properties" Journal of Alloys and Compounds 509, 9076– 9078.

- Bravo-Suárez J.J., Subramaniam B., Chaudhari R.V. (2013) "Vapor-phase methanol and ethanol coupling reactions on CuMgAl mixed metal oxides" *Appl. Catal. A: Gen.*, 455, 234–246
- Chen L., Mao R. (2024) "Lattice oxygen behaviors of Mn-based catalytic oxygen carriers and sustainable oxidative coupling of methane in chemical-looping scheme", *Fuel Part A*, 371, 131910.
- Chen X., Zheng Y., Zhang Q., Qiu S., Meng Q., Wu X., et al. (2021) "Controlling Transformation of Sorbitol into 1-Hexanol over Ru-MoO_x/Mo₂C Catalyst via Aqueous-Phase Hydrodeoxygenation" *ACS Sustain Chem. Eng*, 9, 9033–44.
- Chen Y., Wu Y., Tao L., Dai B., Yang M., Chen Z., Zhu X., (2010) "Dehydration reaction of bio-ethanol to ethylene over modified SAPO catalysts", *J. Ind. Eng. Chem.* 16, 717–722.
- Cheng F., Brewer C.E., (2017) "Producing jet fuel from biomass lignin: Potential pathways to alkyl-benzenes and cycloalkanes" *Renew. Sustain. Energy Rev.* 72, 673–722.
- Cordrey K.J., Stanczyk M., Dixon C.A.L., Knight K.S., Gardner J., Morrison F.D. and P. Lightfoot (2015) "Structural and dielectric studies of the phase behavior of the topological ferroelectric La_{1-x}Nd_xTaO₄." *Dalton Trans.*, 44, 10673-10680.
- Dagle V.L., Winkelman A.D., Jaegers N.R., Saavedra-Lopez J., Hu J., Engelhard M. H., Habas S.E., Akhade S.A., Kovarik L., Glezakou V.-A., R. Rousseau, Wang Y., Dagle R.A. (2020) "Single-step conversion of ethanol to n-butene over Ag-ZrO₂/ SiO₂ catalysts" *ACS Catal.* 10, 10602–10613.
- Del Monte D.M., Cruz P.L., Dufour J. (2022) "SAF production from came line oil hydro-treatment: A techno-economic assessment of alternative process configurations" *Fuel, Part B*, 324, 24602.
- Eagan NM, Moore BM, McClelland DJ, Wittrig AM, Canales E, Lanci MP, et al. (2019) "Catalytic synthesis of distillate-range ethers and olefins from ethanol through Guerbet coupling and etherification" *Green Chem*, 21, 3300–18.
- Ebiad M.A., Abd El-Hafiz D.R., Elsalamony R.A., Mohamed L.S., (2012) "Ni supported high surface area CeO₂-ZrO₂ catalysts for hydrogen production from ethanol steam reforming, *RSC Adv.* 2, 8145-8156

References

- AAF, (2016) a) Alaska Airlines Flies on Gevo's Renewable Alcohol to Jet Fuel, <http://www.prnewswire.com/news-releases/alaska-airlines-flies-on-gevos-renewable-alcohol-to-jet-fuel-300281122.html>, 2016; b) Forest-Powered Biofuel Flight Heads to Washington, D.C., <https://news.wsu.edu/2016/11/14/forest-powered-biofuel-flight/>, 2016.
- Abd El-Hafiz D.R., Ebiad M.A., (2015) "A study to develop nano-spray freeze dried Co/Ce-La catalyst for the production of hydrogen from bio-renewable feedstock" *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 27, 1158-1164.
- Abd El-Hafiz D.R., Ebiad M.A., Elsalamony R.A., Mohamed L.S., (2015) "Highly stable nano Ce-La catalyst for hydrogen production from bio-ethanol" *RSC Adv.*, 5, 4292-4303.
- Abd El-Hafiz D.R., Sakr A.A.-E., Ebiad M.A. (2021) "Methane Bi-reforming for direct ethanol production over smart Cu/Mn- ferrite catalysts" *Renewable Energy*, 167, 236-247.
- Aihara T., Aoki W., Kiyohara S., Kumagai Y., Kamata K., Hara M. (2023) "Nanosized Ti-Based Perovskite Oxides as Acid-Base Bifunctional Catalysts for Cyanosilylation of Carbonyl Compounds" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 17957-17968.
- Airlines for America. (2020). "Airlines Fly Green." Accessed April 2020. <https://www.airlines.org/airlines-fly-green/>
- ArcelorMittal & LanzaTech World (2023) [StQuote]s leading steel company, "announce first ethanol samples from commercial flagship carbon capture and utilization facility in Ghent, Belgium: Focus on Catalysts" 8, 6.
- Atmanli A, Yilmaz N. (2020) "An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C₃-C₅ alcohol blends in a diesel engine" *Fuel*, 260, 116357.
- Balestra G., De Maron J., Tabanelli T., Cavani F., Lopez J., (2023) "The selective ethanol Guerbet condensation over alkali metal-doped sepiolite" *Catal. Today*, 324, 114013.
- BP 2018, Statistical Review of World Energy, reports 67th edition.

Moreover, alter reaction conditions play a crucial role in the production efficiency, selectivity, and overall yield of higher hydrocarbon in SAF range.

4. GHG to SAF characterized by a simpler infrastructure compared to some other biofuel production pathways, as many of its components—such as reactors and hydrogen processing units—are similar to those already used in refining and gas industries. This technology can be integrated into current production lines in industries helps reduce construction costs and accelerates commercial deployment.
5. The syngas by-product generated from chemical looping step can serve as valuable feedstocks into established technologies such as Fischer-Tropsch to produce a wider range of liquid fuels. This flexibility allows the process to adapt to market needs and supports integration with other industrial systems, reducing waste and maximizing resource utilization. By utilizing these by-products, the sustainable greenhouse gas-to-fuel pathway aligns with the principles of the circular economy and enhances its adoption with existing industrial infrastructure.
6. The establishment of knowledge exchange on sustainable aviation fuels and the conduction of economic feasibility studies comparing this pathway with other SAF production technologies such as HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) and PTL (Power-to-Liquid) is crucial for large-scale deployment.

CONCLUSION AND RECOMMENDATION

The conversion of greenhouse gases into sustainable aviation fuel (GHG to SAF) using chemical looping bi-reforming of methane, followed by alcohol-to-jet (ATJ) technologies, as indicated by current research, presents a promising opportunity. GHG can be regarded as free feedstocks that support carbon cycle economy. This is particularly relevant given the high levels of carbon dioxide and methane emissions from various sources such as the energy sector (oil and gas extraction, electricity generation, and transportation), heavy industries (cement, steel, and petrochemicals), fertilizer use, landfills, and wastewater. Furthermore, with the major airports beginning to transition toward the use of SAFs, the GHG to SAF technology can be considered one of the multiple sources for producing this fuel that enhances the flexibility of the industrial energy system.

To implement this GHG-to-SAF project, it is recommended to:

1. establish pilot-scale units in high-emission economic zones, linking them to emission sources like cement factories, gas plants, and oil refineries to supply carbon CO₂/CH₄ as feedstock.
2. Integrating this system with other initiatives, such as clean hydrogen production, will further enhance its feasibility.
3. Although the current GHG to SAF cost is higher than that of conventional petroleum-based jet fuel, research and development in catalytic processes offer a promising path to cost reduction. Advances in catalyst design such the use of LaTaO₄ perovskite possesses multifunctional and engineered oxygen vacancies demonstrates potential for improved selectivity, conversion efficiency, and stability for enhancing process efficiency.

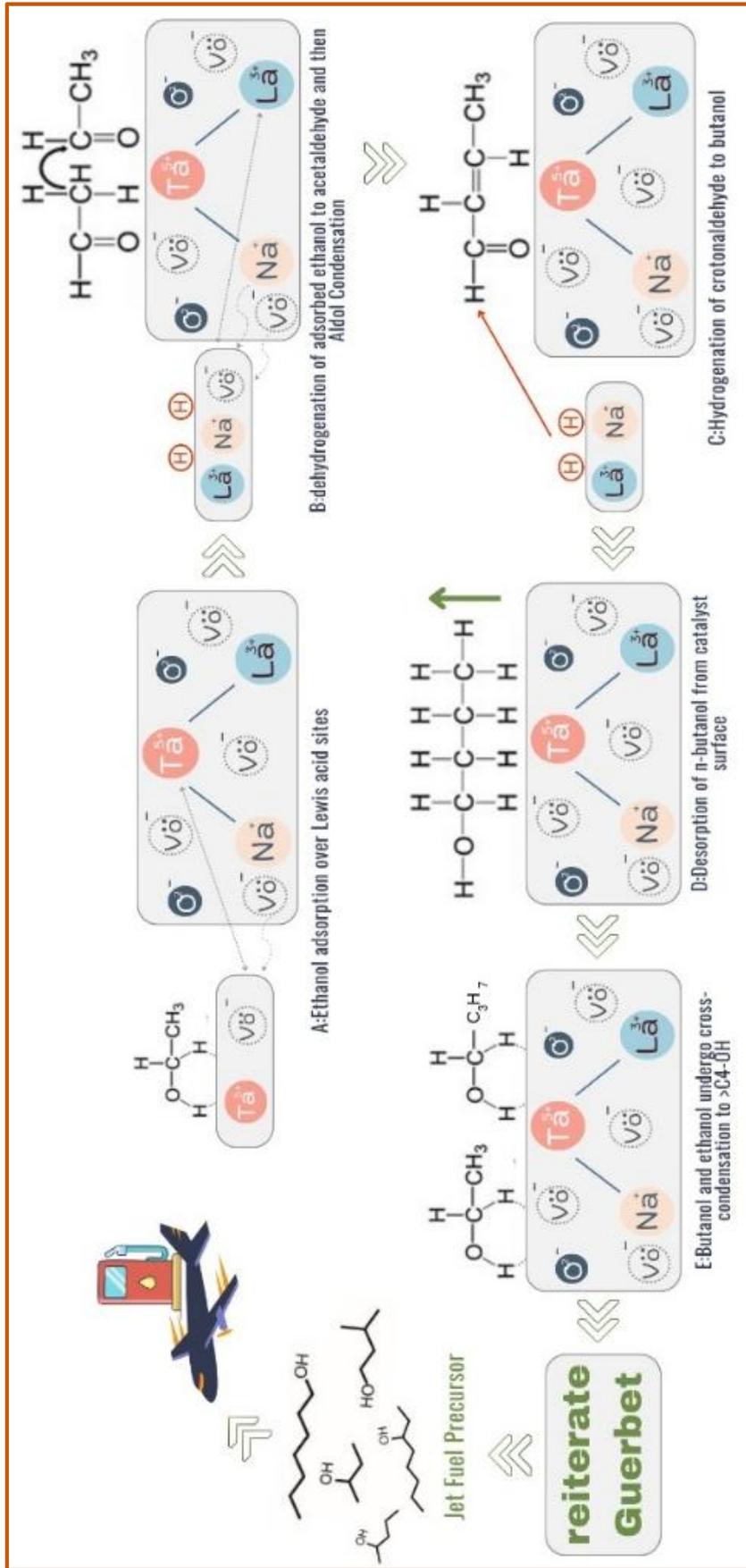


Fig. (3-14): the suggested reaction pathways of ethanol upgrading over the prepared perovskite catalysts

on acidic (B-site: Ta⁵⁺ and/or Pd²⁺) or defective sites, those active sites have ability to promote β -substitution over linear growth. The strength of acidic B-cation often influenced by A-site substitutions or framework distortions. The formation of branched isomers, enhancing fuel quality in terms of cold flow and combustion. Alternatively, when the skeletal rearrangement occur to the aldehyde intermediate via; carbocation formation over Bronsted acid site followed by methyl shifts to rearrange linear intermediates into branched structures over metal site. As a result of the above data in consequence with characterization data of the prepared LTO, NLTO and LPTO, it can be concluded that:

- 1) LTO catalyst shows moderate and mid-strong Lewis acid sites that stabilize n-C₄₋₆-OH formation than iso-alcohol and alcohol with >C₇ [Eagan et.al. 2019].
- 2) NLTO catalyst possesses higher basicity, high BET surface area and good electronic structure than LTO due to Na (that act as basic site) substitution in A-site, which contributes to enhance aldol condensation reaction, thus led to the low gaseous byproduct and high selectivity to higher alcohol (>C₇-OH), which favorable for SAFs production.
- 3) The LPTO catalyst with Pd substituted B-site showed superior selectivity to iso-C₄₋₆-OH among the other two catalysts, which can be attributed to the increase in its acidity due to B-substitution with higher acidic Pd²⁺ in addition to the appearance of Brønsted acidic [Zhong et.al. 2022].
- 4) Based on the catalyst active site and product distributions, proposed reaction pathways is illustrated in Fig. (3-14).

chemical nature to complete the complex network of reaction mechanism very efficiently [Karthikeyan et.al. 2016]. Herein, the prepared perovskite mixed oxide structure is a type of tandem catalysts with ordered structure that provided the required proximity between acidic/basic sites, redox sites, and electronic properties or oxygen vacancies ($V\ddot{O}^-$), which may be required for the cascade reactions to occur. First, let us understand the mechanism of each product formation facilitated by specific active sites within the perovskite catalyst surface. 1) The $n-C_{4-6}-OH$ produced due to cross condensation reaction via a sequence of complex reaction mechanisms [Karthikeyan et.al. 2016]. The process begins with ethanol adsorption over Lewis acid sites located on the B-cations (Ta^{5+} & Pd^{2+}) and oxygen vacancies ($V\ddot{O}^-$). Then the adjacent active site with efficient distance can facilitate aldehydes transfer to redox-active or basic sites to undergo dehydrogenation to form acetaldehyde [Tzeng et.al. 2020]. Acetaldehyde intermediates then enter C–C coupling via aldol condensation (aldolation to aldehyde & condensation to crotonaldehyde). Basic and oxygen vacancies facilitate this transformation by stabilizing reaction intermediates and enhancing bond formation. Crotonaldehyde hydrogenated to butanal then butanol [Kozlowski & Davis 2013; Ramasamy et.al. 2015; Bravo-Suárez et.al 2013]. Herein, the moderate acidity on the prepared LTO and two modified catalysts can play important role in enhancing Guerbet reaction by facilitating internal hydride transfer [Ueda et.al. 1992]. Sequentially, the product butanol with ethanol can undergo cross-condensation reaction to form higher alcohol ($>C_4$), a step need active basic site that can strongly enough to adsorb the lower alcohol produced and reiterate Guerbet before desorption to the bulk as products, this is the case with NLTO catalysts. During bioethanol upgrading over the herein catalyst, iso-alcohol was also an important products. Isomerization of n-alcohol occur

Notably, LTO catalyst gives the highest n-C₄₋₆-OH selectivity. LPTO catalyst shows the highest iso-C₄₋₆-OH selectivity (Fig. 3-12). While, NLTO catalyst shows highest > C₇-OH selectivity among other catalysts. Fig. (3-13) indicates that, the iso/n-OH ratio is higher over LPTO, lower over LTO and can enhance with the increase in reaction temperature and formation of higher alcohol carbon-chain. This can attributed to the substituting of A/B-site with Na⁺/Pd²⁺ cations, lead to change in texture properties via defect formation that alter the oxygen mobility in side oxygen vacancies of the catalysts, facilitating its role in the reaction. In addition to the change in acid/base character, that enhances active site responsible for dehydrogenation/hydrogenation reaction, as concluded from characterization data.

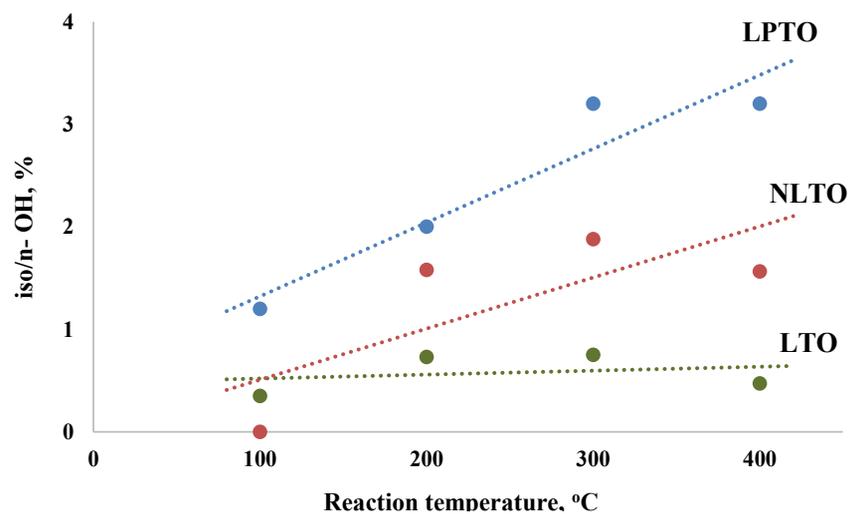


Figure 3-13: The ratio of iso-/n-OH produced from ethanol upgrading over perovskite catalysts at different reaction temperature

3-3: Reaction mechanism

The coupling chemistry play important role when use LaTaO₄ perovskites and its two substituted (A-site & B-site) in bioethanol upgrading to jet precursors (ATJ). The ATJ process is a type of cascade chemical reactions that tack place via concerted multifunctional pathway. Those pathways need catalysts with active sites that coexist in molecular distances, so the proximity between the active sites with different functionality and the

this catalyst, when B-site (Ta^{5+}) is substituted (with Pd^{2+}), the iso- C_{4-7} -OH become the primary product with selectivity 7.5-52.14% in liquid composition, followed by n- C_{4-7} -OH with selectivity reach 16.97% at 400°C, higher alcohol ($> C_7$ -OH) reach 6.06% at 400°C. This can be attributed to higher acidity, which activate isomerization reaction, as confirmed by NH_3 -TPD analysis. Moreover, the A-site substituted (with Na^+) perovskite structure (NLTO), shows ethanol conversion reaches 94.7% at 400°C with 99% of liquid products. All over the reaction temperatures, this conversion is the highest with respect to the other two catalysts (LTO & LPTO). The composition of liquid products over NLTO catalyst is mainly; iso- C_{4-6} -OH with selectivity 0.04-39%, n- C_{4-6} -OH of selectivity 8.45-24.75%, high amount of higher alcohol ($>C_7$ -OH) reach 27.12% of liquid composition at 400°C. The high selectivity to higher alcohols can be attributed to the presence of weak basic sites (Na^+ or La^{3+}) with small number of moderate and mid-strong acid site on catalyst surface.

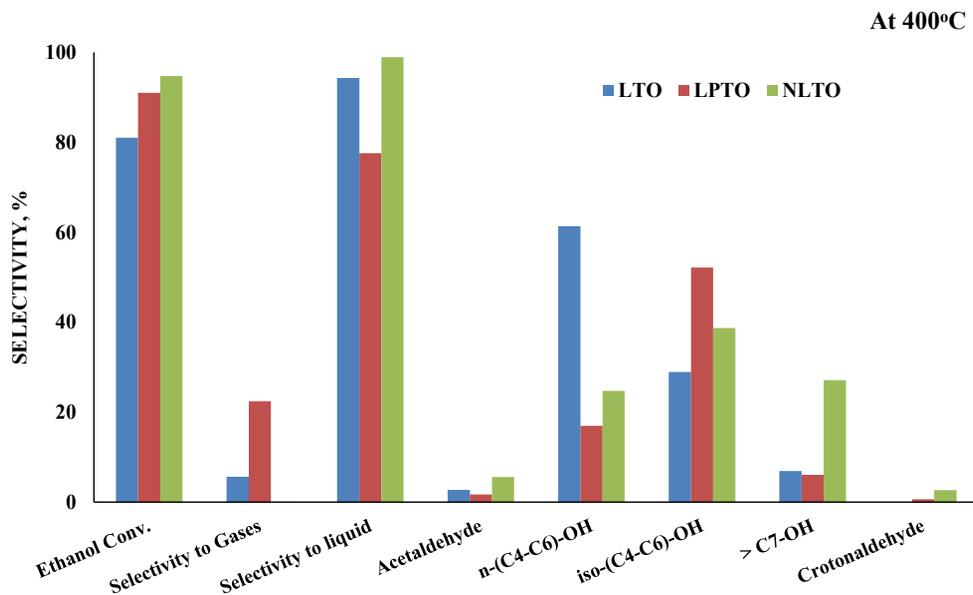


Figure 3-12: Effect of A/B-site substitution on liquid products distributions during bioethanol upgrading at 400°C

[Atmanli & Yilmaz 2020]. While, the $>C_7-OH$ (n- or iso-) can use directly as sustainable aviation fuels (SAFs) after hydrogenolysis step [Li & Wang 2017; Chen et.al. 2021]. Markedly, the C_{4-6} and $>C_7$ higher alcohol can easily separate via simple distillation method, which is important aspect from application point of view [Zhong et.al. 2022].

As represent in histograms in Fig. (3-11), the catalytic upgrading of bioethanol over parent LTO shows low ethanol conversion $\sim 8\%$ at $100^\circ C$ increased up to 81% when reaction temperature reach $400^\circ C$, with the formation of liquid product with selectivity that increase from 6.6% up to 94% as temperature increase from 100 to $400^\circ C$. At lower reaction temperature, ethylene (in gases) produce from dehydration reaction occur over catalyst active acid sites. Acetaldehyde, the main liquid product, is formed due to hydrogen transfer (dehydrogenation reaction) over the La^{3+}/Ta^{5+} basic acid sites [V'asquez et.al. 2019]. The selectivity of acetaldehyde decrease ($\sim 46\%$ at $100^\circ C$) with increase of reaction temperature to reach 2.7% at $400^\circ C$. In return, high increase in the selectivity to upgraded alcohol ($C_{4-6}-OH$); n-alcohol (n- $C_{4-6}-OH$) up to 61% and iso-alcohol (iso- $C_{4-6}-OH$) up to $\sim 29\%$ at $400^\circ C$, due to aldol condensation/dehydrogenation of acetaldehyde via Guerbet mechanism [Balestra et.al. 2023]. Higher alcohol with carbon number more than C_7 ($> C_7-OH$) was also appeared and reach $\sim 6.94\%$ selectivity at $400^\circ C$, through further Guerbet reactions for alcohols of the lower carbon (butanol + ethanol). The Guerbet pathway can confirmed by the presence of crotonaldehyde in liquid products. [Gagliardi et.al. 2024]. Upon substitution in A/B-site of LTO perovskite structure, the activity was boosted and selectivity was affected as follow; on using LPTO catalyst, the ethanol conversion reach 90.98% with liquid selectivity 78% at $400^\circ C$. However, over

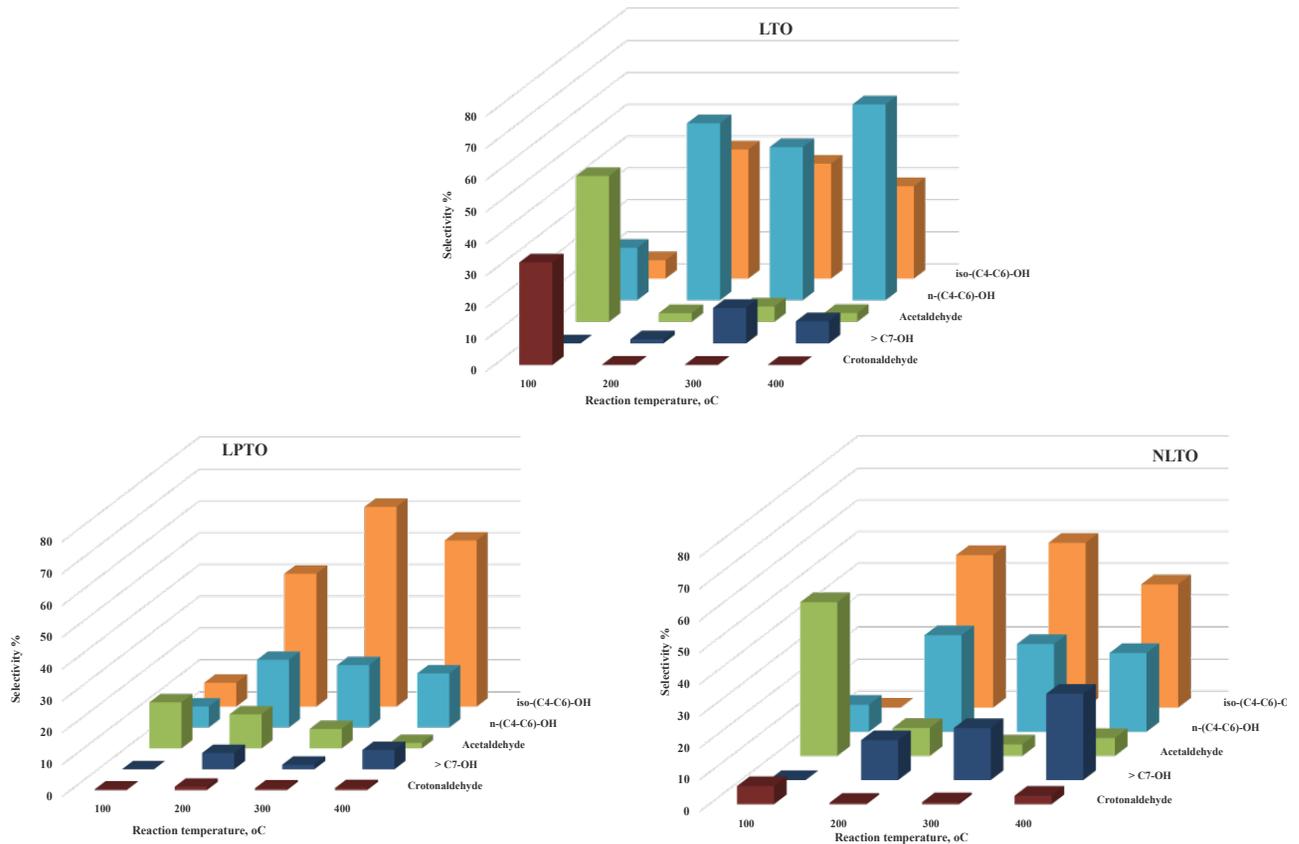


Figure 3-11 : Liquid products distributions during bioethanol upgrading over the prepared catalysts

Figure (3-11) summarizes the composition of liquid produced from bioethanol upgrading carried out on the three-perovskite catalysts prepared herein (LTO, NLTO & LPTO). Generally, the liquid products consists of; Acetaldehyde, n-butanol, iso-butanol, n-pentanol, iso-pentanol, n-hexanol, iso-hexanol, crotonaldehyde, higher alcohol (normal + isomer) and small fraction of aromatics (phenolic compounds). As the focus herein was on assessing the feasibility of achieving a medium to high molecular weight alcohol appropriate for jet fuel processing. Therefore, for simplicity, the liquid products were grouped into n-C₄₋₆-OH (n-butanol, n-pentanol, n-hexanol), iso-C₄₋₆-OH (iso-butanol, iso-pentanol, iso-hexanol) and higher alcohol (alcohol with carbon chain > C₇) as this category is capable of exhibiting the necessary blend properties. Where, n-C₄₋₆-OH and iso-C₄₋₆-OH can use as precursor for jet fuel production and/or directly use as diesel fuel alternative

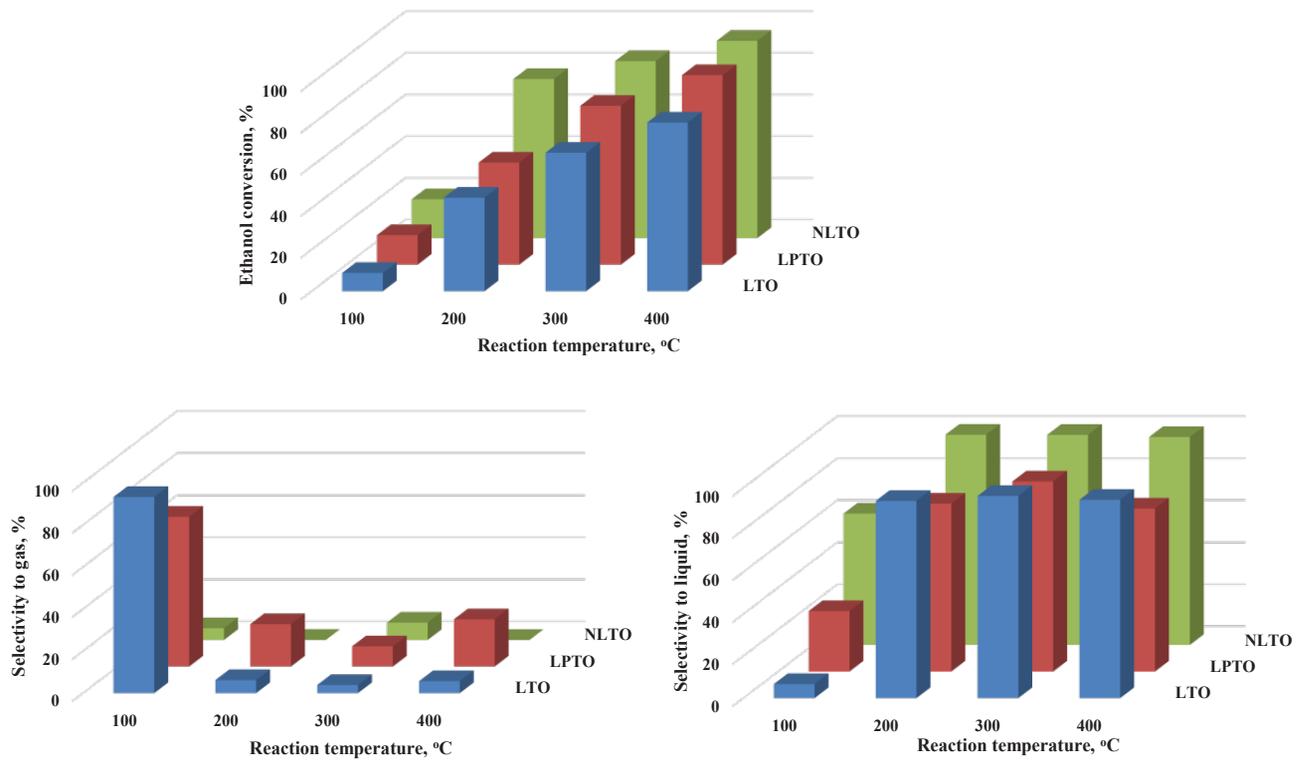


Figure 3-10: Ethanol conversion, liquid and gas selectivity during bioethanol upgrading over the prepared catalysts

Furthermore, both ethanol conversion and liquid selectivity increase with increase reaction temperature, while the selectivity to gaseous byproducts decreased with increase reaction temperature. The low selectivity to gases product, indicate that both cracking and intra/inter molecular dehydration reactions (ethylene & DEE) are unfavorable over those catalysts. NLTO catalyst play an important role in inhibition of gaseous byproducts formation, which attributed to the absence of very strong acid sites as confirmed by TPD analysis [Liao et.al. 2023], as confirmed by NH_3 -TPD data.

consumption and costs. Furthermore, the nature of the intermediates affects the environmental footprint, as cleaner products reduce hydrogen requirements and minimize CO₂ emissions during hydroprocessing. Ultimately, the performance, economic viability, and sustainability of the entire ATJ pathway depend heavily on the quality and suitability of the ethanol upgrading products, making this step a critical focus in process optimization.

The three perovskite catalysts used herein are LaTaO₄ (LTO), A-site substituted Na_{0.5}La_{0.5}Ta₂O₆ (NLTO) and B-site substituted LaPd_{0.5}Ta_{0.5}O₆ (LPTO). Generally, the catalytic activity results indicate that, all perovskite catalysts can use as an efficient catalyst for bioethanol upgrading to jet fuel precursors with small difference. Figure (3-10) illustrate the ethanol conversion, liquid and gas selectivity over the prepared catalysts, which indicate that, the catalytic activity increase in the order LTO < LPTO < NLTO. The NLTO catalyst shows higher selectivity to liquid products and lower selectivity to gas, while the reverse with LPTO catalyst. This can be attributed to the high surface area of NLTO than LPTO catalyst, in addition the stronger acidity of LPTO catalyst that can catalyze the cracking reaction.

viability, and sustainability of the entire ATJ pathway depend heavily on the quality and suitability of the ethanol upgrading products, making this step a critical focus in process optimization.

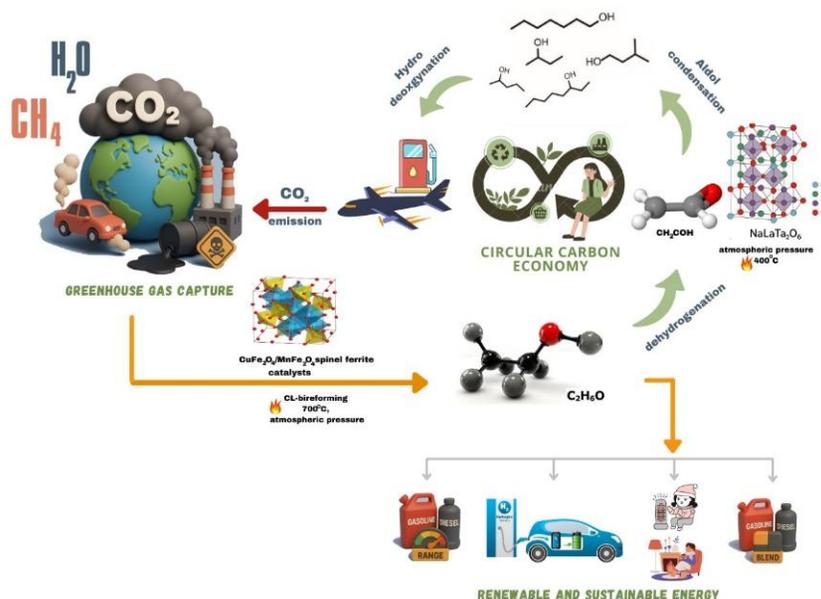


Figure 3-9: Circular carbon economy via GHG conversion into SAFs

The product obtained from this step plays a pivotal role in determining the efficiency and outcome of subsequent stages ATJ technology. The chemical composition and molecular weight distribution of the upgraded ethanol products (linear or branched alcohols, olefins, or oxygenates) significantly influence downstream processes such as oligomerization, hydrodeoxygenation, and hydrogenation in addition to catalysts and process conditions choice. Whereas, branched alcohols like iso-butanol are particularly desirable due to their favorable cold flow properties and higher energy density in the final jet fuel. Additionally, achieving a high yield of C₄–C₇ intermediates is essential, as these serve as key building blocks for forming jet fuel-range hydrocarbons (typically C₈–C₁₆). Consequently, the ethanol-upgrading step that yields a narrow carbon range or high oxygen content may necessitate more complex downstream processing, increasing energy

3-2: Catalytic activity test (ATJ)

In this part, the alcohol used for ATJ process is bioethanol that produced from catalytic conversion of GHG using Cu/Mn spinel ferrite catalysts, as discussed above. At first, the bioethanol upgrading reactions (2nd step of ATJ processes, Fig. (3-9)), were tested in continuous flow system working under atmospheric pressure at temperature range from 100-400°C in inert atmosphere. In this process, the catalyst active site plays a crucial role in converting ethanol to hydrocarbon jet fuel, where, the process (ATJ) typically involves several reactions: dehydration/dehydrogenation, cyclization (or conjugation), hydrogenation, and sometimes aromatization and/or isomerization [Pechstein et.al. 2017]. Where, the presence of acid sites (Brønsted and/or Lewis) can activate both ethanol dehydration (to ethylene) and/or ethylene oligomerization (C–C coupling, to higher hydrocarbon). While the main role of metal sites is olefins hydrogenation to paraffin, deoxygenation and isomerization. On the other hand, basic sites are less commonly concentrated than acidic or metallic sites, but they can play important supporting roles and can change the mechanism pathway of the reaction. Basic sites support aldol condensation pathway of carbonyl-containing intermediates (acetaldehyde) derived from ethanol, to form longer-chain oxygenates. Which can be subsequently hydrogenated/deoxygenated to hydrocarbons (jet fuel blend). Basic sites can also neutralize acidic coke precursors and remove carbonaceous species; extending catalyst life in tandem acid-base systems. Basic sites can modify product selectivity in conjunction with acidic or mineral sites. In this study, tandem catalyst based on LaTaO₄ perovskites structure with multifunction sites (acid/base, redox, and electronic sites) were examined aiming to enhance ethanol upgrading to higher alcohol as SAFs precursor. Where, the performance, economic

can adsorb over both Lewis (electron-deficient atom) and Brønsted (surface hydroxyl's proton transfer) acid sites. Nevertheless, the thermal stability of NH_3 molecules adsorbed on Lewis acid sites is higher than that of molecules connected to Brønsted acid sites, implying that the mid-strong acid sites are mostly Lewis acid sites. LTO perovskite sample shows two strong desorption bands one at $\sim 340^\circ\text{C}$ and another at $\sim 520^\circ\text{C}$, indicate moderate and mid-strong, respectively, Lewis acid sites. This indicate that, LTO sample lacks strong Brønsted acidity, but can exhibit moderate to mid-strong Lewis acidity, arises from surface-exposed Ta^{5+} (act as moderate Lewis acids) and possibly La^{3+} (act as basic & less effective as acid site) ions [Jung et.al. 2013]. Moreover, after A-site substitution, NLTO samples shows two very weak desorption bands at $\sim 360^\circ\text{C}$ (moderate Lewis acid sites) and 660°C (strong Lewis acid sites), show consistent results of low acidity due to the basic nature of Na^+ and the stability of Ta^{5+} -O bonds. Nevertheless, NH_3 -TPD of B-site substitution as in LPTO sample shows two broad bands, weak one at $\sim 170^\circ\text{C}$ assigned to Bronsted acidity related to surface OH^- . In addition to strong band maximized at $\sim 700^\circ\text{C}$ assigned to strong Lewis acid sites. Generally, B-site (Ta^{5+}) act as Lewis acid sites and the substitution in it can alters the oxidation state, coordination, and adding distort local environments, which changes how strongly NH_3 binds, so increase number of acidic sites [Farooq et.al. 2019; Aihara et.al. 2023]. Herein the Ta^{5+} substituted with more acidic Pd^{2+} cation result in higher desorption temperatures, reflecting stronger acidity.

The previous NH_3 -TPD indicate that the A/B-site substitution could change the acid/base character of LaTaO_4 -perovskite, which has important impact on the catalytic performance of the newly prepared catalysts, as will see in the activity section.

at $\sim 820\text{-}880^\circ\text{C}$ due to Ta-O reduction and/or oxygen vacancies formation. Moreover, the lower reduction temperature with high intensity of M-O reduction peak of NLTO sample, with respect to that in LTO sample, may be attributed to the high degree of defect formation. This defect arises from A-site substitution, enhances oxygen transfer and facilitates bulk lattice reduction ($\text{Ta}^{5+} \rightarrow \text{Ta}^{4+}$) [Margellou et.al. 2023; Lohne et.al. 2012]. On the other hand, the H_2 -TPR profile of LPTO (Pd substituted B-site) indicate that, the B-site substitution shift TPR peak (M-O reduction) to lower reduction temperature. This can be attributed to the partial substitution of Ta^{5+} (B-site) with more reducible cation Pd^{2+} can introduce charge imbalance and promote oxygen vacancies that enhance H_2 uptake.

G. Temperature Programmed Desorption of ammonia (NH_3 -TPD)

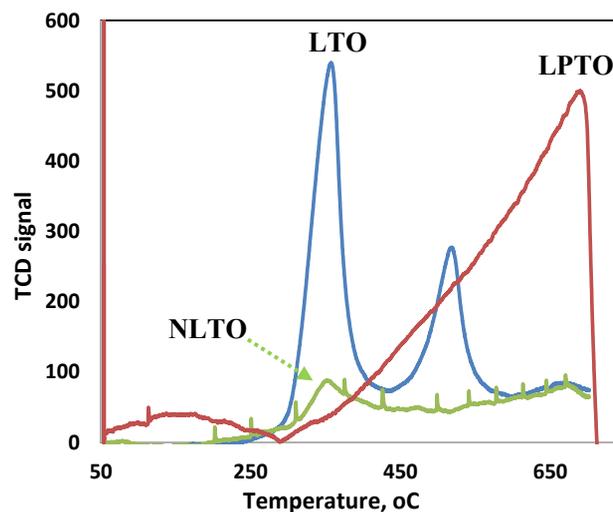


Figure (3-8): NH_3 -TPD of the prepared perovskite samples

Temperature programmed desorption of ammonia (NH_3 -TPD) provides an important information about its surface acidity, which plays a critical role in ethanol upgrading reactions (ATJ) such as dehydration, dehydrogenation, isomerization, oligomerization and hydrocarbon cracking. The data from NH_3 -TPD profile (Fig. 3-8) give clear insights about the acid site number, strength, and distribution over the prepared LTO-perovskites. Notably, NH_3

F. Temperature Programmed Reduction (TPR)

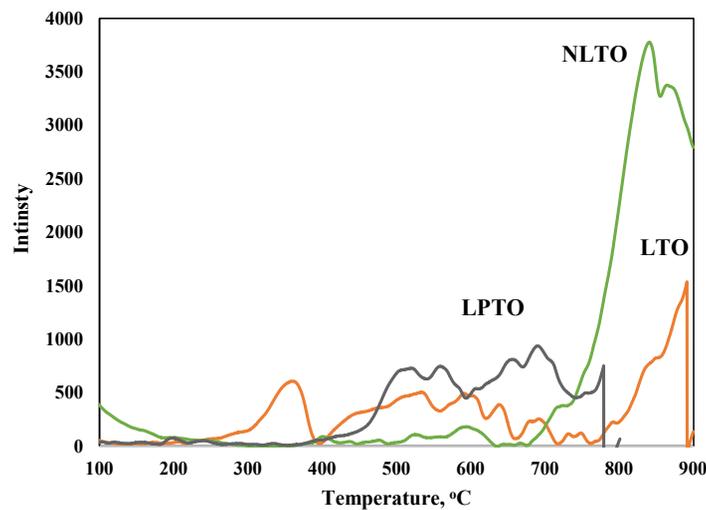


Figure 3-7: TPR of the prepared perovskite samples

Temperature-Programmed Reduction (TPR) is a key method to study the reducibility, which is important to understand the reaction mechanism over the catalyst active site. H₂-TPR profiles of the prepared perovskite samples are shown in Fig. (3-7), which indicate that, all LaTaO₄ based perovskite are thermally stable and not easily reduced below 600–700°C in the current H₂-TPR conditions. This can be attributed to the high oxidation state and strong Ta–O bonding [Jiatong et.al. 2021; Maillard et.al. 2004]. However, TPR curve of layered LTO catalyst shows two peaks; the first small one at ~ 370°C may be attributed to the reduction of the extra-framework or free metal oxides, while the second one is a minor reduction peak at ~ 890°C, corresponding to the stepwise partial reduction of TaO (Ta⁵⁺ to Ta³⁺ or Ta⁴⁺). This peak is accompanied with a shoulder at ~ 840°C due to the formation of oxygen vacancies or defect sites, after annealing. The high reduction temperature of LTO is responsible for its low reactivity with respect to the other two catalysts (will discuss later). The modification of LaTaO₄ perovskite via A-/B-site substitution can greatly affect its reducibility. H₂-TPR profile of NLTO sample (A-site substituted) shows little or no H₂ consumption below ~800 °C, indicating very slow reducibility. Only high intense peak is shown

perovskites decrease after A/B-site substitution due to the difference of metal ionic radius.

E. Photoluminescence spectroscopy

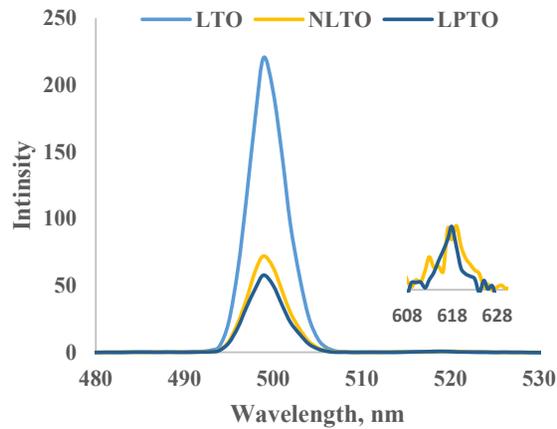


Figure 3-6: Photoluminescence spectra of the prepared perovskite samples

The photoluminescence technique is reveal the electronic properties appeared due to defects occur in any structural. The photoluminescence spectra of the three-perovskite samples (LTO, NLTO & LPTO) are shown in Fig. (3-6). The LTO profile has only one asymmetric broad band centered at $\sim 498\text{nm}$ due to charge transfer emission, associated to the tantalum sub-lattice [Gasparotto et.al. 2011]. After A/B-site substitution with Na or Pd, respectively, there is no shift in the lattice emission at $\lambda \sim 498\text{nm}$, but large decrease in its intensity occur, which may be related to the defect formation/oxygen vacancies creation as confirmed by XRD data. Moreover, a new band at $\lambda \sim 617\text{nm}$ was appear which associated to the emission from charged oxygen vacancies (VO^*), indicating the defect formation due to lattice metal substitution, as confirmed by XRD data. This vacancy can facilities the electron mobility and enhance catalyst activity.

The BET surface area of the three prepared perovskite samples are follow the order NLTO > LPTO > LTO as shown in Table (2). The increase of specific surface area of A/B-site substituted samples (NLTO & LPTO) than that of parent one (LTO), may be attributed to the different in atomic radius between metals in new perovskite structure, which cause defect formation that can increase the interapore network leading to increase in surface area.

Table 3-1: Textural properties of the prepared samples

	S_{BET} m^2/g	V_p cc/g	r_p \AA	$V_{Micropore}$ cc/g	$S_{Micropore}$ m^2/g	$S_{External}$ m^2/g
NaLaTaO₃	25.0	0.014	1.13	0.004	23.806	12.66
LaPdTaO_{3.5}	15.8	0.011	14.21	0.003	5.99	9.78
LaTaO₄	9.8	0.012	24.06	0.00	0.00	9.79

D. Scanning electron microscope

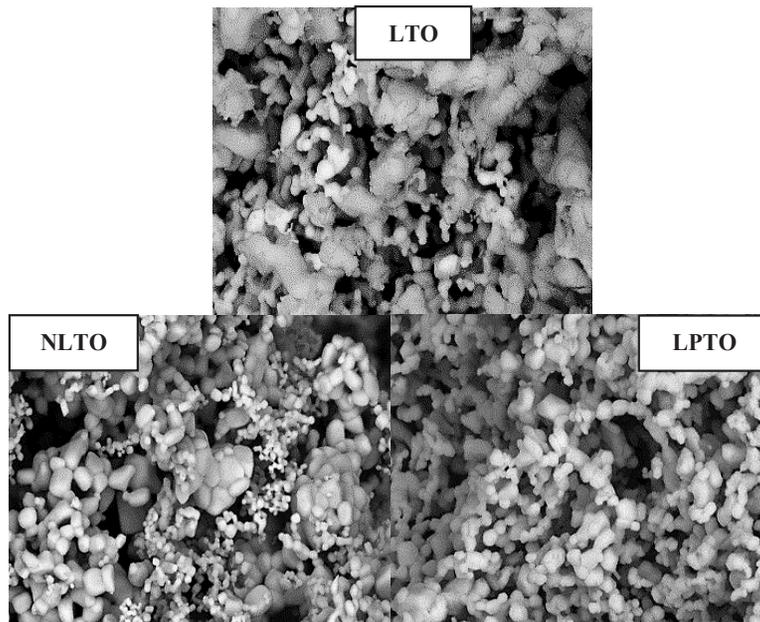


Figure 3-5: SEM of the prepared three-perovskite samples

Figure (3-5) shows the scanning electron microscopy (SEM) images of LTO, NLTO and LPTO perovskites. The three samples shows nanocrystallites as confirmed by XRD data. The particle size of the prepared

of two different particles (Ta and Na, La or Pd), or intera-particles that confirms the incorporation of metal species into Ta lattice causing the pore widening.

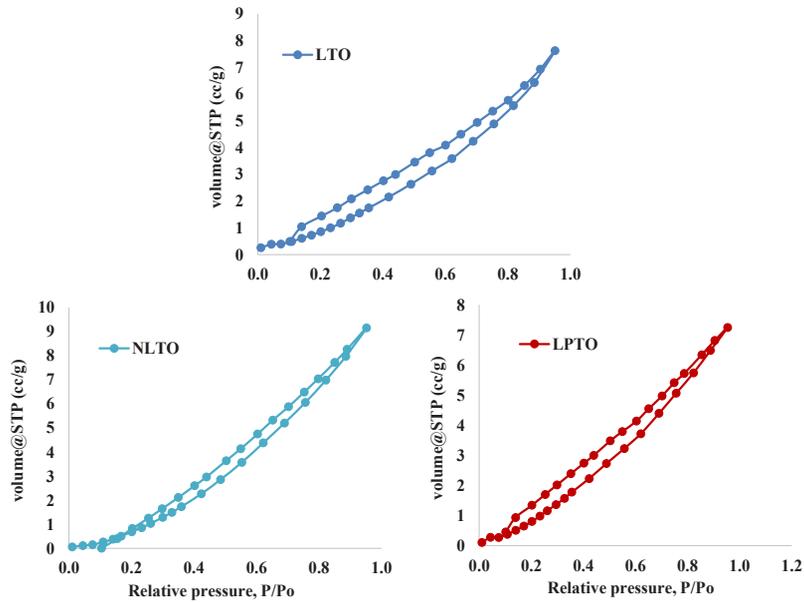


Figure 3-3: BET isotherm of the prepared LTO-perovskite catalysts

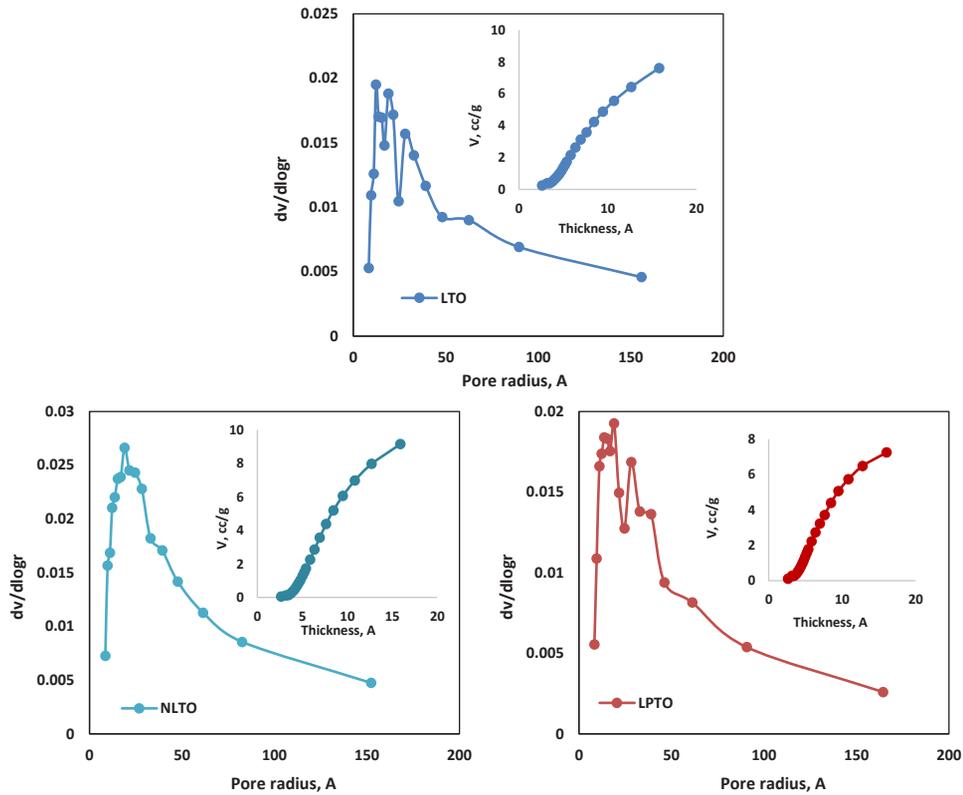


Figure 3-4: PSD distribution and $v-t$ plot of the prepared LTO-perovskite catalysts

structure. Bands at $\lambda \sim 700\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ associated to strong B–O stretching (especially in Ta–O bonds). The band at $\lambda \sim 1500\text{ cm}^{-1}$ can assigned to the H–O–H bending. Moreover, the main band at $\lambda \sim 900\text{ cm}^{-1}$ assigned to M–O stretching in perovskite, and affected by the change in M–O–M bond length of B-site. The presence of those bonds confirm the metal oxide framework (MO_6 octahedra) formation in perovskites structure [Cordrey et.al. 2015]. The peak at $\lambda \sim 1650\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ is due to bending of physically adsorbed water. Finally, the broadband at $\lambda \sim 3000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ assigned to stretching vibration of OH or H_2O , which have intramolecular hydrogen bond. The similarity of the FTIR spectra after either A-site or B-site substitution with that of parent LaTaO_4 indicate that this substitution still keep on the perovskite structure. [Gao et.al. 2002]. The presence of MO_x species in the three LaTaO_4 based perovskite catalysts can harmony there surface properties and -OH adsorbability, which responsible for the interaction of reactants with catalyst active sites [Suszko et.al. 2025].

C. Texture properties

Texture properties of the prepared LTO, NLTO, and LPTO perovskites are displayed in Fig. (3-3,4) and Table (3-1). All samples exhibited type III isotherm, indicating the formation of multilayer. The isotherm accompanied by H1 type hysteresis loop, as shown by parallel adsorption and desorption branches, produced by wedge shaped interconnected pores.

The pore size distribution of the prepared samples (Fig. 3-4) was determined by using BJH method applied to the desorption branch. The figure reveals that all samples exhibits multi-modal pore size distribution in the meso-range $20\text{--}50\text{Å}$, as confirmed by v-t plot (Fig. 3-4). The multi model PSD suggests the presence of either inter-particles, which resulted from the mixing

($\text{NaLaTa}_2\text{O}_6$) [Evans et.al. 2021]. This can be confirmed by 2θ shift and slightly increase in diffraction peak width in NLTO pattern (Fig. 3), in addition to the presence of new lines that confirm the replacement of La^{3+} with Na^+ forming the layered double perovskite structure with crystal size ~ 24 nm as calculated from Scherer's equation. On the other hand, the substitution of Ta^{5+} (0.146 nm) cation in B-site with Pd^{2+} (0.137 nm) lead to the formation of double perovskite structure great with some defect (LaPdTaO_6) and crystal size ~ 19 nm. This confirming by the increase in the diffraction line width and appearing of new phase [Essehaity et.al. 2021].

B. Infrared spectroscopic analysis:

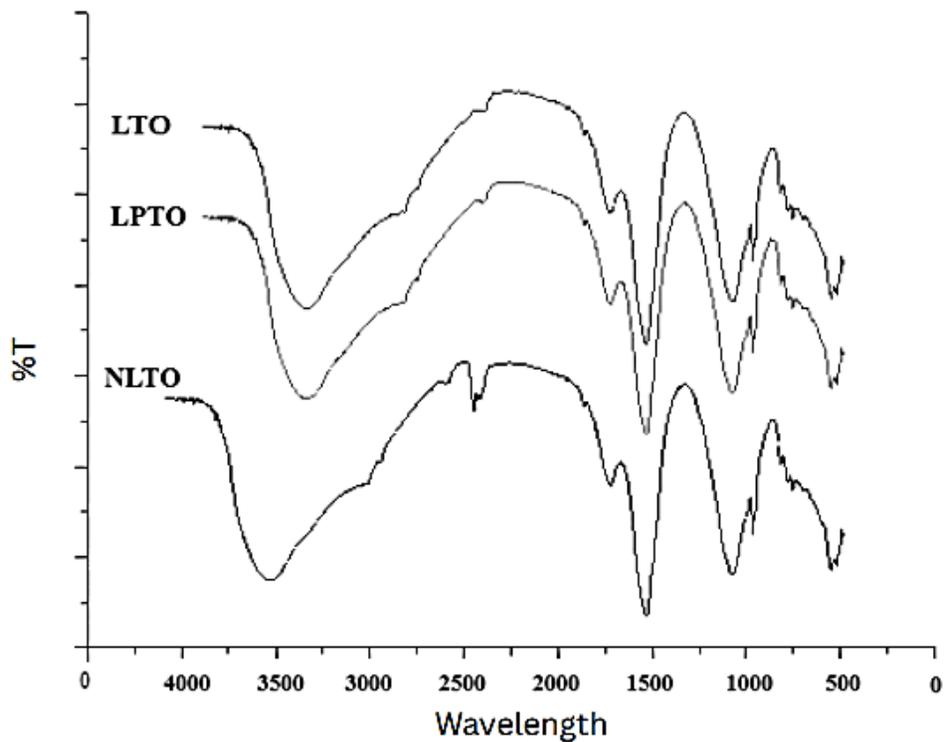


Figure (3-2): FTIR pattern of the prepared three-perovskite samples

Figure (3-2) shows FTIR spectra of the three synthesized perovskite samples. The three samples have similarly spectra with; bands at λ range 450–500 cm^{-1} assigned to the bond-bending mode, which is sensitive to change in the M-O-M bond angles. Bands at λ range 500–800 cm^{-1} assigned to stretching vibration of metal oxide (La-O, Ta-O, Pd-O & Na-O) bonds in perovskite

3. RESULT AND DISCUSSION

3-1: catalyst characterization

A. X-ray diffraction analysis:

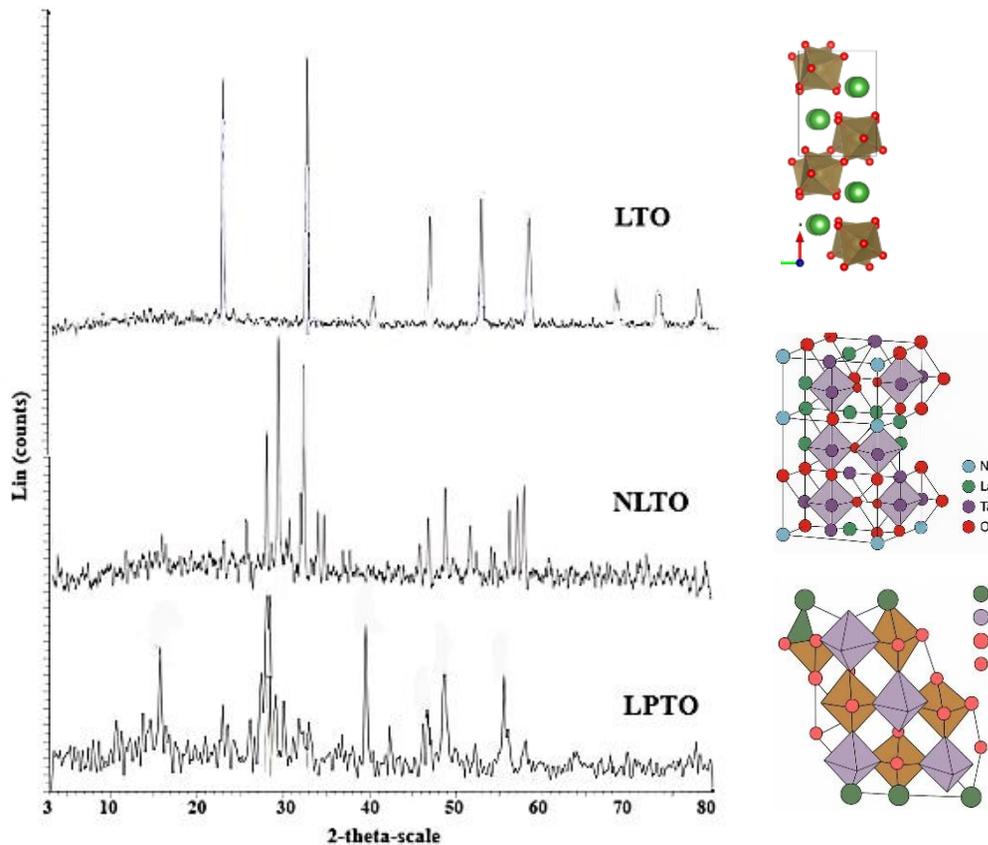


Figure 3-1: XRD profile of the prepared three-perovskite samples

The XRD pattern for the three perovskites (LTO, NLTO and LPTO) in Figure (3-1) represent well-determine sharp peaks, indicating the crystalline nature of all perovskite samples. The parent LTO exhibit a single-phase diffraction pattern can be indexed to perovskite LaTaO_4 , matched with the layered perovskite in JCPDS standard data (JCPDS file: 47-769) [Gasparotto et.al. 2011]. There is no other phases was observed, indicating high purity and high ordered structure.

The substitution of La^{3+} cation in A-site with Na^+ cation lead to structure construction and defect formation due to substitution of large La^{3+} with smaller Na^+ cation forming the so-called layered double perovskite

CHAPTER THREE

RESULT AND DISCUSSION

3-1: catalyst characterization

- A. X-ray diffraction analysis:
- B. Infrared spectroscopic analysis:
- C. Texture properties
- D. Scanning electron microscope
- E. Photoluminescence spectroscopy
- F. Temperature Programmed Reduction (TPR)
- G. NH₃-Temperature Programmed Desorption

3-2: catalytic activity test (ethanol upgrading)

3-3: reaction mechanism

products were analyzed using gas chromatography (Agilent 6890 plus HP) equipped with capillary column HP-30 connected to FID detector.

temperature (-196°C) using a NOVA2000 gas sorption analyzer (Quantachrome Corporation) system. All samples were degassed at 200°C for 2h in a nitrogen atmosphere prior to adsorption to ensure a dry clean surface. **Photoluminescence** (PL) spectra were recorded on Cary Eclipse Fluorescence Spectrometer (Agilent, USA) equipped with Xe lamp at excitation wavelength of 350 nm. **Temperature programmed reduction** (TPR) was performed using Quantachrome (Nova Win). 0.059 g of samples was loaded to a continuous tubular quartz micro-reactor and pretreated in N₂ (20 ml/min) at 200°C prior to run. Then tested in hydrogen/nitrogen (80 ml/min) up to 900°C (10°C/min). The outlet gas was monitor by thermal conductivity detector (TCD). **Temperature programmed desorption of ammonia (NH₃-TPD)** was conducted using Quantachrome (Nova Win), 0.059 g sample was loaded to a continuous tubular quartz microreactor controlled by a Eurotherm 2408 TRC. Pretreated in N₂ (20 ml/min) at 200°C prior to run. The composition of the outlet gas was detected using TCD.

2-3: Catalytic activity test

The catalytic conversion of ethanol was performed in a fixed-bed continuous flow system worked at atmospheric pressure. 0.5g catalyst diluted with the same amount of SiC was packed into a stainless steel reactor of 500 mm length and 8 mm internal diameter. The reactor was placed in a vertical furnace, where they were heated under a nitrogen stream (50 ml/min) at reaction temperature (100-400°C). Ethanol was continuously injected to the catalyst hot zone using syringe infusion micro pump. The liquid hour space velocity (LHSV) was set (F/W) ~ 0.2 mlmin⁻¹g⁻¹, where, F is flow rate (mol/h) and W is catalyst weight (g). The converted products and unreacted stream are condensed using a cooled trap (25°C) connected at the reactor bottom. The

2. EXPERIMENTAL METHODS

2-1: Catalyst preparation

Three perovskite structures were prepared in this work; layered LaTaO_4 perovskite (LTO) and two double perovskite; A-site substituted $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Ta}_2\text{O}_6$ (NLTO), and B-site substituted $\text{LaPd}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_6$ (LPTO). All structures are prepared via ecofriendly microwave-assisted method [García-Rodríguez et.al. 2023]. Microwave-assisted synthesis has gained attention for its safety, efficiency and speed. Firstly, the metal chloride precursors dissolved in deionized water and carefully mixed in appropriate stoichiometric ratios. Then, KOH drops were added to reach pH 14, and the solution was stirred for additional 6hrs. The mixture then transferred into the microwave reactor at 100W for 30 minutes. The solid products washed with deionized water and dried overnight at 100°C , and then calcined in air atmosphere at 400°C for 6hrs where the perovskite structures were obtained.

2-2: Catalysts characterizations

X-ray diffraction analysis (XRD) was carried out for crystallographic structure and chemical composition studies. Shimadzu XD-1 diffractometer was used for this analysis in 2θ between $20-80^\circ$ with Cu $K\alpha$ radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$). The average crystallite size (D) was calculated using the well-known Scherrer relation. *The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)* are presented to characterize functional groups, in frequency range $400-4000\text{cm}^{-1}$ with resolution 4cm^{-1} (Bruker Tensor-27, Germany). *Scanning electron microscopy analysis (SEM)* was performed on Carl Zeiss (Germany) to study surface morphology. Atomic elemental compositions (%) were estimated from SEM-EDS analysis. *Textural properties* were determined from N_2 adsorption–desorption isotherms measured at liquid nitrogen

CHAPTER TWO

EXPERIMENTAL METHODS

- 2-1: Catalyst preparation**
- 2-2: Catalysts characterizations**
- 2-3: Catalytic activity test**

fuels, supports circular carbon usage, and aligns with global efforts to decarbonize energy and transport sectors.

the field of SAFs technologies. *From an environmental perspective*, this process directly utilizes two of the most potent greenhouse gases (CH₄ & CO₂) as feedstocks for ethanol production, instead of releasing them into the atmosphere. This is significantly; affect the mitigation of overall carbon emissions from jet production process. Moreover, the use of CO₂ as soft oxidant is inherently cleaner than use of atmospheric air, thereby eliminating nitrogen-based pollutants such as NO_x. Additionally, the syngas (produced in this process as bi-product) is free of nitrogen dilution, making it purer and easier to process into downstream products, like ethanol, methanol, hydrogen, or synthetic fuels and also directly to SAFs, depending on market demand. *From economic perspective, greenhouse gases can consider as* low-cost and readily available feedstocks whether from natural gas or biogas. This reduces raw material costs compared to traditional ethanol production methods that rely on food-based biomass or sugars. The chemical looping configuration also enhances thermal efficiency by separating the oxidation and reforming steps, which minimizes energy loss and lowers overall energy consumption. Moreover, this process can be integrated directly with industrial facilities that emit greenhouse gases, reducing the need for complex gas transport systems and enabling companies to transform their waste emissions into a revenue-generating product. The technology also offers market flexibility. Finally, projects based on CL-SCMR are well-positioned to benefit from environmental regulations and global climate initiatives. They may qualify for carbon credits, government subsidiaries, or green financing, all of which improve the economic feasibility and attractiveness of the technology for large-scale deployment. In summary, CL-SCMR presents a compelling route to ethanol production for ATJ technology, by combining environmental sustainability with economic viability. It transforms harmful gases into clean

down for the steam activation (water splitting) step (0.5 h) aiming to; re-oxidize the previously reduced catalyst and remove carbon deposited during first step, so, avoid catalyst deactivation. 5) Smart nano-structured Cu/Mn spinel ferrite composite were used as oxygen carrier, which shows stable and effective catalytic properties in this reaction. The catalyst prepared via ultrasonic assistance technique as green preparation method. The characterization data indicate that, the prepared Cu/Mn spinel ferrite deviated from ideal spinel cluster, this causing good bulk oxygen migration to catalyst surface, so increase catalytic activity. 6) The reaction took place at moderate temperature ($\sim 700^{\circ}\text{C}$), Cu-Fe catalyst shows high metal synergetic effect, which lead to; high CH_4 conversion and ethanol selectivity reach to $\geq 50\%$ (Fig. iii). The bi-product during this reaction is syngas (H_2/CO) which can consider as value add product and/or feedstock in other reaction.

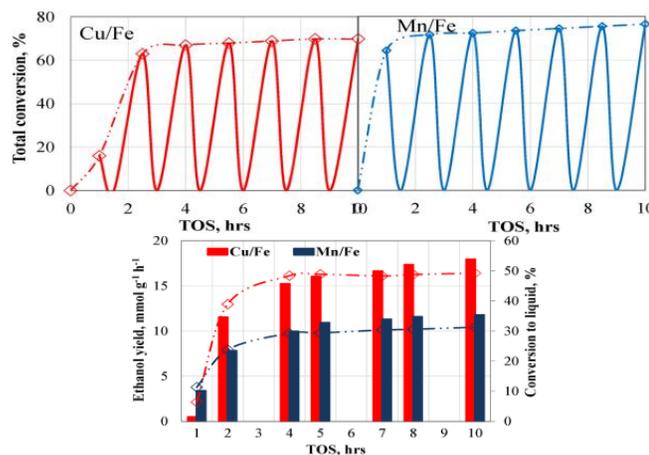


Fig. 1-1: Ethanol production via innovated CL-SCMR using Cu/Mn spinel ferrite catalysts

To the best of our knowledge, the use of the innovated CL-SCMR process for greenhouse gas conversion to ethanol can offers significant environmental and economic advantages, making it a promising approach in

NiO/CeO₂-ZrO₂ as catalyst. Nevertheless, the problem in this process is high energy consumption (working temperature ~ 900°C), often requiring fossil-based energy, in O₂ atmosphere methane can easily over-oxidize to CO₂, which reduces overall yield, moreover, the used catalysts often suffer from thermal instability or sintering at high temperatures.

Here it is necessary to focus on that, greenhouse gases utilization in ethanol production to use as intermediate in ATJ process offering a powerful tool in the fight against climate change. It merges carbon capture, renewable energy, and aviation innovation to create a truly sustainable flight path for the future.

On the basis of the above statement, our research group recently reported a novel approach for ethanol production directly from greenhouse gas (CH₄/CO₂) using cost effective Cu/Mn spinel metal ferrite catalyst [Abd El-Hafiz et.al. 2021]. The main propose of this research is direct conversion of greenhouse gasses into ethanol in a single catalytic reactor. The used process is methane bi-reforming via chemical looping (CL-SCMR) technology. The idea herein depends on; 1) Carbon dioxide conversion need hydrogen and methane conversion need oxygen, since two gases are presence together in different sources (natural gas, shale gas, biogas, and flared gas,), so, their conversion together as a combination of oxygenation/reduction is beneficial rather than the extra cost of their separation. 2) The use of CO₂ as soft oxidant avoid complete combustion of methane to CO₂/H₂O. 3) The use of water steam enhance the rate of ethanol release from catalyst surface before further reaction occur, aiming to ethanol production with high selectivity. 4) The chemical looping step (CL-SCMR) used to obtain ultra-stable SCMR reaction (Fig. 1-1). For this propose, the steam/carbon dioxide methane reforming reaction was turned on (1h) for novel ethanol production, then shut-

resulting bioethanol also affect the catalytic system efficiency of the conversion steps (dehydration, oligomerization and hydrogenation). Impurities in ethanol can poison the catalysts or reduce their yield, so reliable ethanol production ensures smooth conversion and high fuel quality. Without a reliable and sustainable supply of ethanol, its use in ATJ production becomes limited or uneconomical.

On the other hand, LanzaTech company utilizes a fermentation process to convert waste carbon gases (CO_2 , CO and CH_4) into ethanol using a specific strain of bacteria [ArcelorMittal & LanzaTech 2023; Handler et.al. 2015]. In which, the waste gases capture from industrial emissions (steel mills), then the captured gases fed into bioreactors using a proprietary strain of bacteria (like *Clostridium autoethanogenum*). The bacteria essentially eat the carbon-containing gases and produce ethanol as byproduct [Huang et.al. 2025]. Finally, the ethanol produced used directly as a fuel blender or further processed into jet fuel. Although, LanzaTech's process is innovative and environmentally promising, but faces challenges; i) the bacteria used in fermentation step are sensitive to impurities in the gas stream (sulfur compounds or heavy metals), ii) the biological processes is a slow reaction rates and get low volumetric product (i.e. low ethanol output per reactor size). Singh and co-worker indicate that [Singh et.al. 2020], ethanol can be synthesized from greenhouse gases via indirect method, in which, CO_2/CH_4 firstly convert to syngas (CO/H_2) via dry reforming reaction at high temperature ($>800^\circ\text{C}$); then syngas convert to ethanol by Fischer-Tropsch synthesis. Nevertheless, the high-hydrogen and high-energy consumption make the process of a great challenge. Other researcher tries to get ethanol directly from CH_4/CO_2 [Okolie et.al. 2019] using O_2 as oxidant and

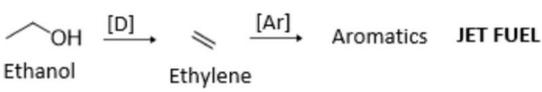
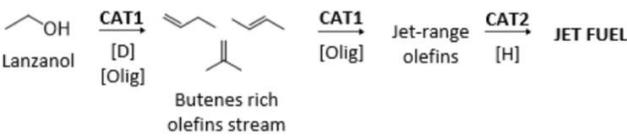
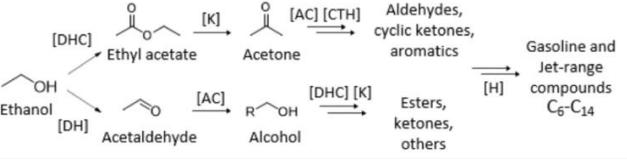
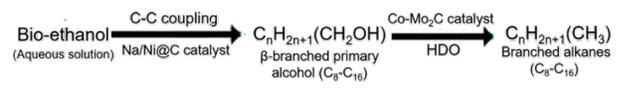
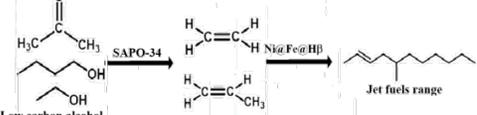
1-3. Production of bioethanol (from GHG) for ATJ technology

The production of high-energy SAFs requires major companies to carefully, study each stage of the fuel's lifecycle. These companies rely on low-carbon carbohydrates derived from renewable sources as feedstocks. They are also developing renewable electricity and renewable natural gas for use in the production process. This reduces costs and adds attractive properties to global markets, matching or sometimes surpassing existing products. Based on this approach, research and development of bioethanol production plays a critical role as one of bottlenecks steps that greatly affect the success of alcohol-to-jet (ATJ) technology. The availability, purity, and cost of ethanol determine the scalability and affordability of the final ATJ-SPK fuel. The cost of ethanol production, including feedstock costs, conversion efficiency, energy requirements, and separation/purification systems, all affects the overall cost of ATJ production.

Bioethanol can produce via different process such as; renewable biomass fermentation (e.g. Corn-based ethanol) [Liu et.al. 2025; Zhou et.al. 2022], catalytic oxidative coupling of methane (MOC) [Ramaiyan et.al. 2024; Chen & Mao 2024] or catalytic conversion of syngas (produced from either renewable or non-renewable source) via Fischer-Tropsch synthesis (FTS) [Ma et.al. 2024]. All of those processes has its own problem such as; biomass fermentation that pose a threat to food production/ecosystems, harm the environment and create deforestation. In addition to, high energy input system, low ethanol yield and complex/expensive purification system [Hou et.al. 2025]. Furthermore, the other two processes (FTS & MOC) are multistep processes and occur at high temperature reactions ($>800^{\circ}\text{C}$), which need high energy input, mostly oil and natural gas. The quality and composition of the

2%Ni@5%Fe@Hβ catalyst for olefins polymerization to jet fuel. This strategy yielded jet fuel with a high selectivity (80.1%). Gagliardi and coworker, [Gagliardi et.al. 2024], also developed a strategy for the catalytic upgrading of ethanol to blends with properties close to those suitable as SAFs, via one-pot approach, using copper nanoparticles supported by zirconium (and lanthanum) oxides. The reaction depend on promoting several successive reactions; i) catalytic transfer hydrogenation, ii) aldol condensation, iii) dehydrogenation, and ketonization. The products were a mixture of oxidized addition products (C₆-C₁₄) with properties suitable for use as jet fuel.

Table 1-1. Different catalyst used for ethanol to SAFs technology

	catalyst	system	reaction condition	Ref
 <p>Ethanol $\xrightarrow{[D]}$ Ethylene $\xrightarrow{[Ar]}$ Aromatics JET FUEL</p>	V-ZSM or In-ZSM-5	continuous gas flow	5-100v/v %EtOH in inert p = 1atm T: 275-350°C	[Li et.al. 2016] [Narula et.al. 2015] [Galadima & Muraza 2015] [Wyman 2015]
 <p>Lanzaol $\xrightarrow{[D] [Olig]}$ Butenes rich olefins stream $\xrightarrow{[Olig]}$ Jet-range olefins $\xrightarrow{[H]}$ JET FUEL</p>	polyfunctional catalysts Ni/beta Zeolite Pt/Al2O3		10-100 v/v %EtOH in inert p ₁ = 1atm p ₂ =13.6atm T1 =325°C T2 =260°C	[Lilga et.al. 2017] [Geleynse et.al. 2018] [Harmon et.al. 2017] [PNNL 2022]
 <p>Ethanol $\xrightarrow{[DHC]}$ Ethyl acetate $\xrightarrow{[K]}$ Acetone $\xrightarrow{[AC] [CTH]}$ Aldehydes, cyclic ketones, aromatics Ethanol $\xrightarrow{[DH]}$ Acetaldehyde $\xrightarrow{[AC]}$ Alcohol $\xrightarrow{[DHC] [K]}$ Esters, ketones, others Aldehydes, cyclic ketones, aromatics and Esters, ketones, others $\xrightarrow{[H]}$ Gasoline and Jet-range compounds C₆-C₁₄</p>	Cu impregnated Zr and Zr-La oxides		10 v/v % EtOH in inert p = 1atm T1 = 350-400oC	[Gagliardi et.al. 2024]
 <p>Bio-ethanol (Aqueous solution) $\xrightarrow{C-C \text{ coupling } Na/Ni@C \text{ catalyst}}$ C_nH_{2n+1}(CH₂OH) β-branched primary alcohol (C₈-C₁₆) $\xrightarrow{HDO \text{ Co-Mo}_2C \text{ catalyst}}$ C_nH_{2n+1}(CH₃) Branched alkanes (C₈-C₁₆)</p>	Na/Ni@C for C-C coupling And Co-Mo ₂ C for hydrodeoxygenation		H ₂ atmosphere T = 240oC 4.0 MPa 1.3 g catalyst	[Liao et.al. 2022]
 <p>Low carbon alcohol $\xrightarrow{SAPO-34}$ Light olefins $\xrightarrow{Ni@Fe@H\beta}$ Jet fuels range</p>	SAPO-34 for alcohol dehydration And Ni@Fe@Hβ for olefin polymerization		double bed reaction mode batch reactor	10 g alcohols Cat ₁ = 2.0 g Cat ₂ = 2.0 g T = 200°C P = 4MPa

ethanol conversion and product selectivity, which in turn affects the subsequent steps, the type and properties of the final jet fuel (Table 1-1). Vertimass Company is adopting a process to convert alcohols to aromatics and hydrocarbon mixtures ($\geq C_5$) for use as jet fuel, following a "hydrocarbon pool" pathway using catalysts such as V-ZSM-5 and Ga-ZSM-5 [Li et.al. 2017; Narula et.al. 2017]. While, PNNL laboratory announced in 2017 the selective conversion of ethanol to jet fuel hydrocarbons, carried out in two stages; i) dehydration process to form one- or two-pot oligomers catalyzed by acidic zeolites, followed by ii) the formation of oligomers using nickel catalysts supported by a combination of aluminosilicate and acidic silicates. These processes produce C_4 - C_{23} mixtures that are hydrogenated to produce saturated fuel [Lilga et.al 2017]. In another study, an Ag-ZrO₂/SiO₂ catalyst was used to convert ethanol into a butane-rich mixture, which can then be converted into longer hydrocarbons for use as jet fuel [Dagle et.al. 2020]. The so obtained blend fueled a new All Nippon Airways commercial passenger flight from Seattle to Tokyo, which tested, in 2019. A new approach was developed depends on direct C-C coupling of ethanol to higher alcohol using Na/Ni@C catalyst, then the high-carbon alcohols products separated to C_4 - C_7 and C_8 - C_{16} alcohols via convenient fractional distillation. After that, C_8 - C_{16} alcohols mainly consist of β -branched primary alcohol are subjected to hydrodeoxygenation using Co-Mo₂C catalyst. The produced Jet fuel hydrocarbons obtained from this approach is mainly C_8 - C_{16} branched alkanes, which is beneficial for the cold flow properties [Liao et.al. 2022]. For further developing ATJ as an efficient route for low-carbon jet fuel production, other study selectively converted ABE (acetone/butanol/ethanol) into jet fuel [Luo et.al. 2023]. This strategy was based on an integrated process in a double-bed reaction mode using a SAPO-34 catalyst for alcohols dehydration and

from gas-fermented ethanol [Holmgren et.al. 2018; Lanzatech 2016; Griffin & Schultz 2012]. As in literature, several alcohols currently derived from renewable feedstocks have been under consideration for use in ATJ conversion, including higher or lower alcohols. Higher alcohols give high ATJ upgrading yield, while low carbon alcohols have advantage of final product with more even distribution of carbon numbers, so more closely resembles conventional petroleum-based jet fuel, which is a complex mixture containing hundreds of hydrocarbons.[Luo et.al 2023; Zou et.al. 2025; Liao et.al. 2022].

The jet fuel blendstock produced via the ATJ pathway, known as ATJ-SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene), certified under ASTM D7566. Notably, the standard initially approved only isobutanol, then updated in 2018 to allow ethanol-based ATJ-SPK, of blend-ratio ~50% with conventional jet fuel. Nevertheless, isobutanol production process is much more complex than that of ethanol production also isobutanol yield is much lower than ethanol, resulting in limited availability of isobutanol compared to ethanol [Higashide et.al. 2011; Lin et.al. 2015]. That is why the author deal herein with ethanol as feedstock for ATJ process.

The ATJ process based on three main catalytic reactions; i) alcohol dehydration/dehydrogenation, ii) oligomerization, iii) hydrogenation followed by fractionation of the final paraffin products. Ethanol dehydration reaction is also a rate-determining step in ATJ process, where it has two pathways either intramolecular dehydration to ethylene or intermolecular dehydration to ethers, while ethers is unfavorable in olefin polymerization step [Chen et.al. 2010; Perez et.al. 2014]. The properties of the catalyst used in this reaction and the reaction conditions have a significant impact on the

1-2. Alcohol to jet technology

As stated above, the aviation industry requires "drop-in" biofuels that are compatible with existing turbines and fuel systems. Therefore, the aviation industry employs strict regulations for the deployment of new technologies, including those aimed at decarbonizing air travel, to maintain consistent and safe operation. In the US, bio-derived aviation fuels must meet ASTM D7566 standards. While some production pathways have been approved and demonstrated commercial success, further development is needed to reduce costs and increase availability through additional feedstocks [Geleynse et.al. 2018]. Alcohol to jet (ATJ) technology is a renewable, drop-in SAF pathway that converts bio- or waste-derived alcohols into jet-grade hydrocarbons. ATJ offers a versatile and scalable solution for decarbonizing aviation, especially when using non-food, waste-based feedstocks. The ATJ pathway is approved under ASTM D7566 and is considered a promising route due to its compatibility with existing feedstocks (like corn, sugarcane, or waste biomass) and drop-in fuel properties.

Companies like Gevo and LanzaTech are developing the ATJ process for commercialization. Gevo derived ATJ-fuel from corn sugar and cellulosic sugar, and conduct demonstration flights in collaboration with Alaska Airlines. Gevo employs a proprietary isobutanol fermentation technology that features a genetically engineered yeast strain along with an advanced separation system known as the Gevo Integrated Fermentation Technology (GIFT) [AAF 2016]. On the other hand, LanzaTech focused on converting gas feedstocks such as steel mill flue gases and gasified biomass into valuable fuels through fermentation. It also achieved successful production of SAFs

engines (jets and turboprops) that mainly composed of kerosene-based hydrocarbons (C_8 – C_{16} range), including paraffins, naphthenes, and small amounts of aromatics (e.g. Jet A, Jet A-1, and JP-8). ii) Aviation Gasoline (AvGas), used in piston-engine aircraft, and this contains iso-octane and other light alkanes, blended with aromatics and tetraethyllead (TEL) in leaded grades (AvGas 100LL).

1-1. Sustainable Aviation fuels (SAFs) Production

SAFs can derive from Fischer-Tropsch (FT) process (Power-to-Liquid) using syngas obtained from biomass gasification, as feedstock, produce good selectivity for jet fuel and in general can help reduce emissions [Eyberg et.al 2024]. Nevertheless, the resulting jet fuel from FT has low aromatic content and low energy density, which causes problems in its use such as leakage and low efficiency [Nyholm et. al. 2025]. Lignocellulosic also studied as feedstocks for renewable jet production, via hydro-processed depolymerized, hydro-deoxygenation and/or hydrogenation, but these processes give low fuel yield and consume high hydrogen during reaction time [Mawhood et.al 2015; Cheng & Brewer 2017]. Sustainable feedstocks like vegetable oils and animal fats are also important feedstocks for aviation fuel production in the literature and applied industrially [Del Monte et.al 2022]. However, the widespread utilization of these resources for aviation fuel production could drive up the costs of those raw materials, adversely affecting the oleo-chemical companies that use them in its manufacture (high-value chemicals, like bio-polymers, lubricants, and cosmetics).

1. Literature survey

Nowadays, with the global energy, demand rises alongside concerns about climate change, air pollution, and resource depletion, the renewable energy is considered as the key to sustainable development and reducing emissions. So, the investing in renewable and sustainable energy is essential to achieving a low-carbon future, meeting international climate targets such as the Paris Agreement (2015), and advancing the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially, the seventh goal, which is the affordable in clean Energy. Therefore, in recent decades, significant efforts have focused on developing a sustainable and economically viable process for producing clean transportation fuels. In particular, as global aviation transportation continues to grow, expected to double by 2050, so does its contribution to greenhouse gas (GHG) emissions, specially, when aviation fuel produced from petroleum-based resources, the aviation industry has recognized that sustainable aviation fuels (SAFs) are essential for reducing environmental impact, decreasing reliance on petroleum, and enhancing the sustainability of air transport. SAFs as a renewable alternative to fossil jet fuel; it can reduce life-cycle CO₂ emissions up to 80%, depending on the feedstock and production pathway. It classified as a "drop-in fuel", meaning it can be blended to fossil jet fuel (typically up to 50%) with full compatibility with existing aircraft engine and infrastructure. Moreover, SAFs also offers improved combustion efficiency, contributing to better engine performance. Therefore, by enabling a circular carbon economy, SAFs aligns with global goals for renewable energy, climate action, and sustainable development.

The main component of aviation fuel varies based on the type of aircraft and engine. There are two primary categories; i) Jet Fuel, used in turbine

CHAPTER ONE

LITERATURE SURVEY

1-1: Sustainable Aviation fuels (SAFs) Production

1-2: Alcohol to jet technology (ATJ)

1-3: Production of bioethanol (from GHG) for ATJ technology

GLOSSARY

ATJ	Conversion of alcohol to jet fuel
LTO	The prepared LaTaO ₄ perovskite
NLTO	A-site substituted Na _{0.5} La _{0.5} Ta ₂ O ₆
LPTO	B-site substituted LaPd _{0.5} Ta _{0.5} O ₆
SDGs	United Nations Sustainable Development Goals
GHG	greenhouse gas
SAFs	that sustainable aviation fuels
FTS	Fischer-Tropsch synthesis
GIFT	Gevo Integrated Fermentation Technology
ATJ-SPK	(Synthetic Paraffinic Kerosene
AvGas	Aviation Gasoline
JF	Jet Fuel
MOC	oxidative coupling of methane
CL-SCMR	methane bi-reforming via chemical looping technology
XRD	X-ray diffraction analysis
FTIR	The Fourier transform infrared spectroscopy
SEM	Scanning electron spectroscopy analysis
BET	Brunauer-Emmett-Teller method for Texture properties Measurements
PL	Photoluminescence spectroscopy
TPR	Temperature programmed reduction
NH₃-TPD	Temperature programmed desorption of ammonia
LHSV	liquid hour space velocity
FID	Flame ionization detector
JCPDS	standard data
DEE	Diethyl ether
n-C₄₋₆-OH	Normal-alcohol with carbon number range 4-6
iso-C₄₋₆-OH	Isomer-alcohol with carbon number range 4-6
>C₇-OH	Alcohol with carbon number more than 7
HEFA	Hydro-processed Esters and Fatty Acids
PTL	Power to liquid

variation of catalyst selectivity can attributed to the difference in BET surface area, electronic properties and Acid/Base ratio as confirmed by characterization data. Finally, the mechanism of ethanol upgrading over the prepared LaTaO₄ perovskite catalysts was suggested.

Part IV: Recommendations

- a. **Establish pilot units** in high-emission industrial zones and connect them to CO₂/CH₄ sources (such as cement plants and refineries).
- b. **Integrate the project with clean hydrogen production** to enhance technical and environmental feasibility.
- c. **Reduce costs** through the development of catalysts like LaTaO₄ and optimizing reaction conditions to improve conversion and selectivity.
- d. **Enable easy industrial integration** due to infrastructure similarities with existing industries (oil refining and gas processing).
- e. **Utilize by-products (e.g., syngas)** as feedstock for producing additional fuels through processes like Fischer–Tropsch, supporting circular economy principles.
- f. **Establish knowledge-sharing platforms** and conduct economic feasibility studies to compare this technology with other SAF pathways such as HEFA and PTL, facilitating industrial-scale deployment.

of layer perovskite. Effect of A/B-site substitution structure change and defect formation, forming the so-called layered double perovskite ($\text{NaLaTa}_2\text{O}_6$) and double perovskite (LaPdTaO_6). FTIR spectra confirms the metal oxide framework (MO_6 octahedral) formation in perovskites structure. 3) Texture properties indicate relatively high surface area perovskite samples, ordered as follow; $\text{NLTO} > \text{LPTO} > \text{LTO}$. Photoluminescence technique indicate that, A/B-site substituted samples revealed the oxygen vacancies ($\text{V}\ddot{\text{O}}^-$) formation, which facilities the electron mobility and can enhance catalyst activity. H_2 -TPR profiles shows high thermal stability of all samples, where, A-/B-site substitution can greatly affect structure reducibility, that enhances oxygen transfer and facilities bulk lattice reduction ($\text{Ta}^{5+} \rightarrow \text{Ta}^{4+}$). Moreover, NH_3 -TPD data indicate different surface acidic character of the prepared samples; LTO has Lewis acid sites of moderate to mid-strong sites, NLTO shows weak acidic character due to A-site substitution with Na of high basic nature. While, LPTO shows low number of Bronsted acidity in addition to large number of strong acid sites, which has important impact on the catalytic performance.

Part IV: Detailed discussion about the catalytic bioethanol upgrading product and mechanisms; i) all catalysts shows high bioethanol conversion reaches 94.7% over NLTO, with low gases product (20%) at 400°C. ii) The liquid products are mainly; acetaldehyde, crotonaldehyde, n-/iso- C_{4-6} -OH, and $>\text{C}_7$ -OH. iii) LTO catalyst shows the highest n- C_{4-6} -OH selectivity (61% of liquid product). LPTO catalyst shows the highest iso- C_{4-6} -OH selectivity (iso/n-OH \sim 3.2 at 400°C). While, NLTO catalyst shows highest $> \text{C}_7$ -OH selectivity (27% at 400°C), not a small ratio that can directly use as SAFs after simple hydro-deoxygenation step. iv) the

1. Renewable and sustainable energy demand and the 2050 goal as defined by the International Civil Aviation Organization (ICAO).
2. Insight into SAFs Challenges; i) future demand that require hundreds of millions of biomass tons annually matching current U.S. availability; ii) the costlier of SAF than conventional jet fuel, impacting airline operating costs and requiring further R&D investment; iii) Electrification is not feasible for large aircraft in the near term, making SAF the only scalable option for decarbonizing aviation.
3. SAFs Production Pathways and Limitations. 2) An overview of ATJ technology as a new route to jet fuel production that certified under ASTM D7566. 3) bioethanol production techniques and its challenge and finally the variety of catalysts that used to ATJ processes and their challenges

Part II: discuss the experimental methods;

1. Catalyst preparation, which take place via simple microwave-assisted method. Three tandem catalysts are prepared based on layered LaTO_4 perovskite (LTO), A-site substitutions by Na to form $\text{Na}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Ta}_2\text{O}_6$ (NLTO) and B-site substitutions by Pd, to form $\text{LaPd}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_6$ (LPTO).
2. Some insights about the instruments that used for catalysts characterizations such as; X-ray Diffraction analysis (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), photoluminescence spectroscopy (PL), NH_3 -Temperature Programmed Reduction (NH_3 -TPR) and scanning electron microscopy (SEM).
3. Detail description of catalytic ethanol upgrading process, continuous flow system used, reaction conditions and the product analysis method.

Part IV: Detailed discussion about catalysts characteristics and their influences on ethanol upgrading. XRD reveals the successes preparation

Executive Summary

Reliance on renewable and sustainable energy is essential to ensure long-term energy security, due to the limited availability of fossil fuels and their impact on climate change. Unlike fossil fuels, renewable one does not emit significant amounts of greenhouse gases, making it critical for achieving global carbon neutrality goals and protecting ecosystems. Therefore, the annually consumption of sustainable & renewable energy has increased worldwide; reaches ~50-27% in America, 35% in Asia-Pacific, 26% in African continent and 20% in Middle East. Whereas, the increase of nonrenewable energies consumption is maximum in Africa (only ~2.9%) and Middle East (only ~3.6%), according to the Statistical Review of World Energy reports in 2018 [BP 2018].

One of the most significant innovations in renewable and sustainable energy is the use of bioethanol, whether as a transportation fuel blend, hydrogen carrier, heating or power generation source [Świątek & Sławik 2010]. When bioethanol produced using renewable electricity or biological methods, it becomes an economical, carbon-neutral, or even carbon-negative fuel. Our team has important innovation system focused on direct bioethanol production from greenhouse gases (CO_2 , CH_4), via chemical looping bi-reforming process over spinel ferrite structure. Then convert it into hydrogen and/or value-added products through series of researches and projects. This process helps reduce harmful emissions and converts carbon waste into a usable form of energy. As an extension of this fruitful work, the current research focuses on catalytic upgrading of bioethanol to higher alcohols that can be directly use as sustainable aviation fuels (SAFs) precursor (ATJ technology).

Part I: of this research provides an introduction and literature survey about;

LIST OF FIGURES

	Title	Page no.
INTRODUCTION		
Figure 1:	processes of biomass conversion to jet fuel	
Figure 1:	Different published mechanism for ETOH to SAFs	
CHAPTER 1		
Figure 1-1:	Ethanol production via innovated CL-SCMR using Cu/Mn spinel ferrite catalysts	
CHAPTER 3		
Figure 3-1:	XRD profile of the prepared three-perovskite samples	
Figure 3-2:	FTIR pattern of the prepared three-perovskite samples	
Figure 3-3:	BET isotherm of the prepared LTO-perovskite catalysts	
Figure 3-4:	PSD distribution and v-t plot of the prepared LTO-perovskite catalysts	
Figure 3-5:	SEM of the prepared three-perovskite samples	
Figure 3-6:	Photoluminescence spectra of the prepared perovskite samples	
Figure 3-7:	Temperature programmed reduction of the prepared perovskite samples	
Figure 3-8:	NH ₃ -TPD of the prepared perovskite samples	
Figure 3-9:	Circular carbon economy via GHG conversion into SAFs	
Figure 3-10:	Ethanol conversion, liquid and gas selectivity during bioethanol upgrading over the prepared catalysts	
Figure 3-11:	Liquid products distributions during bioethanol upgrading over the prepared catalysts	
Figure 3-12:	Effect of A/B-site substitution on liquid products distributions during bioethanol upgrading at 400oC	
Figure 3-13:	The ratio of iso-/n-OH produced from ethanol upgrading over perovskite catalysts at different reaction temperature	
Figure 3-14:	The suggested reaction pathways of ethanol upgrading over the prepared perovskite catalysts	

LIST OF TABLES

	Title	Page no.
CHAPTER 1		
Table 1-1:	Different catalyst used for ethanol to SAFs technology	
CHAPTER 3		
Table 3-1:	Textural properties of the prepared samples	

LIST OF CONTENT

	Page no.
INTRODUCTION	
LIST OF CONTENT	
LIST OF FIGURES	
LIST OF TABLES	
Executive Summary	
Glossary	
Chapter One: literature survey	
1-1. Sustainable Aviation fuels (SAFs) Production	
1-2. Alcohol to jet technology (ATJ)	
1-3. Production of bioethanol (from GHG) for ATJ technology	
Chapter two: experimental methods	
2-1. Catalyst preparation	
2-2. Catalysts characterizations	
2-3. Catalytic activity test	
Chapter three: result and discussion	
3-1. catalyst characterization	
A. X-ray diffraction analysis:	
B. Infrared spectroscopic analysis:	
C. Texture properties	
D. Scanning electron microscope	
E. Photoluminescence spectroscopy	
F. Temperature Programmed Reduction (TPR)	
G. NH ₃ -Temperature Programmed Desorption	
3-2. catalytic activity test (ethanol upgrading)	
3-3. reaction mechanism	
Conclusion and recommendation	
References	
English abstract	

- iii) The catalyst give high ethanol conversion with high liquid selectivity. NLTO catalysts is highly selective toward higher alcohols (27% of >C7-OH), that can potentially use directly as jet fuel precursor after few steps (distillation and/or mild hydrogenation).

To implement the GHG-to-SAF project, it is recommended to establish pilot units in industrial zones with high CO₂/CH₄ emissions. Integrating the project with clean hydrogen production also enhances its feasibility. Although the current production cost is high, advancements in catalyst development such as LaTaO₄ perovskite and optimization of reaction conditions could reduce costs and improve efficiency and selectivity. The technology features a simple infrastructure and can be integrated into existing production lines, reducing capital costs and accelerating deployment. Secondary products like syngas can be used as feedstocks in other processes, such as Fischer–Tropsch synthesis, promoting industrial integration and aligning with circular economy principles. Finally, establishing platforms for knowledge exchange and conducting economic feasibility studies to compare this pathway with other SAF technologies like HEFA and PtL is essential for effective scale-up.

products are mainly; acetaldehyde, crotonaldehyde, n-/iso-C₄₋₆-OH, and >C₇-OH. LTO catalyst shows the highest n-C₄₋₆-OH selectivity (61% of liquid product). LPTO catalyst shows the highest iso-C₄₋₆-OH selectivity (iso-/n-OH ~ 3.2 at 400°C). While, NLTO catalyst shows highest >C₇-OH selectivity (27% at 400°C), not a small ratio that can directly use as SAFs after simple hydro-deoxygenation step. The different characteristics of those multifunctional catalytic systems (OSC, redox, acidity and basicity), are able to change the mechanism of ethanol conversion reaction to get different intermediates that affect the SAFs production and characteristics. This work can consider as an effective for ATJ sectors as:

- 1) The process of bioethanol production take place directly via chemical looping bi-reforming (CO₂/H₂O) of methane, which helps industries monetize their waste gases by converting them into valuable and marketable fuel. The process represents cost-effective, scalable solution that aligns with both climate and economic development goals. The bioethanol produced from this process is ultrapure aqueous ethanol that can directly use as feedstock in ATJ process, saving the purification economy.
- 2) On the other hand, the bioethanol upgrading to jet fuel (ATJ) precursor take place under mild conditions (atmospheric pressure and 400°C).
 - i) The used catalysts are relatively cheap and simple.
 - ii) The prepared tandem catalysts (LTO, NLTO & LPTO) shows good texture properties with multifunctional active sites (oxygen vacancies, metal and acid/base), so, they can promote the cascade series of reactions at mild conditions. However, the catalysts selectivity changes according to their characteristics, which would achieve multiple uses for the products.

unique geometric, electronic, or acid/base properties that favor certain types of reactions. The strong acidic sites might favor dehydration reactions leading to olefins intermediate, while strong hydrogenation sites might favor the conversion of these olefins to alkanes. Different intermediates lead to different hydrocarbon molecules (Fig. 2), which intern produce fuel with varying properties (boiling point, viscosity, and freezing point).

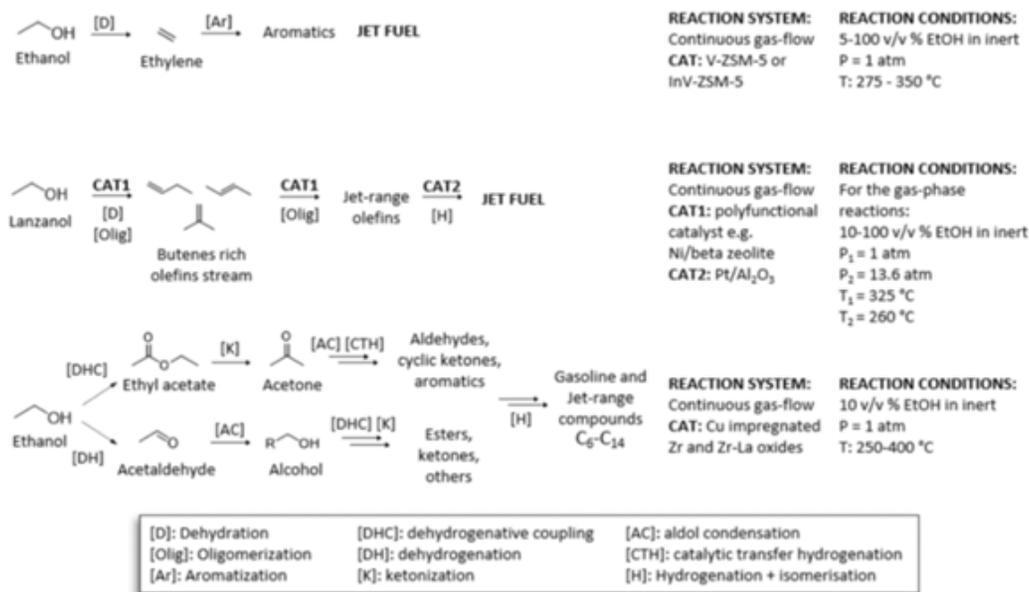


Figure 2: Different published mechanism for ETOH to SAFs
[Gagliardi et.al. 2024]

Based on the above considerations, this work report for the first time in literature, the use of relatively cheap and simple tandem catalyst based on LaTaO₄ perovskite (and two A/B-site substitutions by Na/Pd, respectively (NaLaTa₂O₆ & LaPdTaO₆)), as highly active/selective catalyst, to be use for ATJ process. The process occur in continuous flow system under mild conditions (atmospheric pressure and temperature from 100-400°C). The alcohol feedstock is ethanol that produced from catalytic CH₄ bi-reforming via chemical looping process. The catalyst prepared by microwave-assisted method. Then characterized via different analytical techniques; XRD, FTIR, PL, NH₃-TPD and SEM. All catalysts shows high ethanol conversion reaches 94.7% over NLTO, with low gases product (<20%) at 400°C. The liquid

sequentially use as ATJ feedstock is a promising approach to mitigate climate change, create sustainable opportunities, and promoting the circular economy [Abd El-Hafiz et.al. 2021]. This can get the process away from food security and sources, where the corn and sugarcane is the main source of ethanol in the already studied ATJ process, [Teixeira et.al 2024]. Moreover, the ethanol produced from such process (CO_2/CH_4 reforming) can obtained either as pure compounds or aqueous solution, while the other methods usually produce mixture of compounds, making the upgrading process more complex [Ramasamy, et.al. 2022]. Nowadays, ethanol has different application, as feedstock in chemicals industries [Spivey & Egbebi 2007], fuel additive increase the octane number of gasoline and reduce NO_x/CO_x emissions and ethanol considered as high hydrogen carrier that can reformed to a hydrogen-rich gas [Ebiad, et.al. 2012; R.A. Elsalamony et.al. 2013; Abd El-Hafiz et.al. 2015; Abd El-Hafiz & Ebiad 2015].

The substantial attention given for ethanol conversion to jet fuel (i.e. SPK-ATJ: synthesized paraffinic kerosene from Alcohol), is evident in the very recent patents and publications [Wyman & Hannon 2021; 2019; 2020; Dagle et.al. 2020]. The main synthetic strategies patented to date, depend on the synthesis of highly active/selective catalysts used for bioethanol upgrading to highly active intermediate (ethylene, acetaldehyde, butenes or ethylacetate) that can easily oligomerize to jet fuel range ($\text{C}_8\text{-C}_{16}$). Where, the jet fuel can produced from the bioethanol upgrading via four mechanisms (Fig. 2), which depending on the intermediate produced from bioethanol dehydration and/or dehydrogenation processes [Gagliardi et.al. 2024]. Significantly, the intermediates identity are indeed influenced by the active sites present on the catalyst, that dictate the types of chemical reactions may occur and in turn determines the specific intermediates may produce. These active sites have

a few place in the market [IEA 2024]. SAFs can be produce from waste oils, algae, agricultural residues, lignocellulosic materials and even municipal waste. [Mansy et.al. 2025], or other sustainable feedstocks as in Figure (1). SAFs can also derive from Fischer-Tropsch (FT) process of syngas obtained by biomass gasification. All those process can make SAFs a viable and low-carbon alternative to fossil fuels. Unfortunately, the cost of implementing those approaches is prohibitively expensive compared to petroleum based jet fuel, where the traditional fuel constitutes a well-established business model worldwide. Additionally, in some cases the produced fuel's characteristics, including low aromatic content and energy density, can lead to efficiency losses and leakage problems.

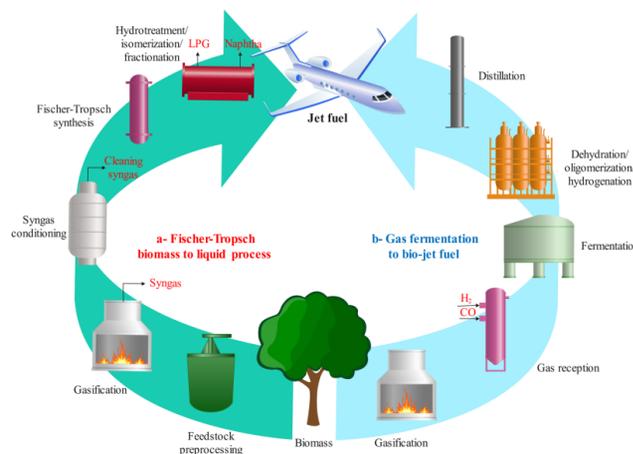


Figure 1: processes of biomass conversion to jet fuel [Mansy et.al. 2025]

Given these factors, alcohol to jet process (ATJ) is emerged as new alternative SAFs pathways. Commercially, bioethanol has a significant attention as ATJ feedstock due to its availability and present global production, which easily depend on renewable sources. Bioethanol produce from biological fermentation of waste crop, but this is expensive and energy inefficient due to low yield and high impurity, which greatly affect the sustainability of ATJ process. Nevertheless, the use of waste gas such as greenhouse gases (CH_3 , CO_2 & H_2O), from flow gas, to produce ethanol, that

INTRODUCTION

Renewable and sustainable energy demand is directly linked to transportation sectors, which in turn is influenced by economic growth and global events. Aviation industry is one of those sector that shifting towards sustainable aviation fuel (SAFs) to face many challenges, including economic fluctuations in fuel prices, energy security concerns due to dependence on fossil fuels, and environmental pressures resulting from greenhouse gas emissions. Arab countries have opportunities to lead in SAFs production and export due to their infrastructure and resources. Where, some countries like the UAE, Saudi Arabia, Bahrain, Qatar, Kuwait, Egypt and Oman are making progress in this field. The Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC) is promoting cooperation and knowledge sharing to develop the SAFs industry in the region [OAPEC, 2024].

In line with the International Air Transport Association (IATA), the aviation industry has adopted the sustainable aviation fuel (SAFs) in order to tackle carbon emissions and mitigate its ecological impact. IATA mandate a net-zero carbon emissions by 2050 and CO₂ capture capacity exceed 700 Mt/year, while ensuring energy resilience [IATA 2022; IATA, 2024]. Sustainable aviation fuels (SAFs) can reduce carbon emissions over jet fuel lifecycle by 80%, as well as can reduce particulate matter and other pollutants. To achieve these demands, the production of SAFs aim to increase 56 times by 2050 (449 billion liters, according to IATA) than its level in 2025 [Airlines for America 2020; IATA 2020].

Although crude oil distillation remains the dominant production pathway for jet fuel, innovative processes for obtaining SAFs from alternative and renewable sources are currently being researched worldwide. According to the International Energy Agency (IEA), those pathways have already found

First - Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2024 (Presented in English)

Sustainable Aviation Fuel from Greenhouse Gases through Ethanol, Using Highly Active LaTa-Perovskite Catalysts

Dr. Dalia Radwan Abdel Hafez Mohamed

Abstract

Prospects for integrating renewable energy technologies, and technologies based on their sources, into the transport, cooling and heating sectors in OAPEC countries

Dr. Mustafa Mohamed Arafa Morsi Ibrahim

This research investigates the potential for integrating renewable energy technologies and renewable-compatible systems into three key non-electric sectors—transport, heating, and cooling—in OAPEC member countries. These sectors are often overlooked in decarbonization strategies. Given their reliance on fossil fuels and their growing contribution to greenhouse gas (GHG) emissions, they pose a significant challenge to achieving energy security, environmental sustainability, and socioeconomic equity across the Arab region.

The study develops a future-oriented analytical framework based on energy demand projections for the period 2025–2050 across 11 Arab countries. It employs three policy-relevant scenarios: Business-As-Usual (BAU), Moderate Transition, and Aggressive Transition. These scenarios simulate the varying degrees of adoption of six clean technologies, namely: electric vehicles (EVs), hydrogen-powered trucks, heat pumps, solar thermal systems, district cooling, and grid-connected photovoltaic (PV) systems. These technologies were selected based on their maturity, compatibility with the targeted sectors, and potential for emission reduction and cost optimization.

A central innovation in the study is the use of persistent emissions modeling. Rather than simply accounting for annual avoided emissions, the model integrates the lifetime emissions savings of each technology while adjusting for annual degradation. This enables a more realistic estimation of the environmental impact of technology adoption. The study also incorporates a broad set of co-benefits—including avoided mortality due to fine particulate matter (PM_{2.5}) and extreme heat, fuel cost savings, and system-wide operating expenditure reductions.

Results indicate that, under the Aggressive scenario, the adoption of these technologies could reduce cumulative CO₂ emissions in the three sectors by up to 33% by 2050 compared to the BAU trajectory. In addition, the shift could result in fossil fuel savings exceeding 500 million tonnes of eq. CO₂, contributing directly to national energy security goals and reducing fiscal burdens associated with fuel subsidies.

From a health and environmental perspective, the study finds that nearly 60,000 premature deaths could be avoided across the region by 2050, primarily due to reduced exposure to PM_{2.5} emissions and heat-related stress. These benefits are particularly salient for vulnerable populations in urban areas with limited access to cooling technologies. By integrating these non-market benefits into the system cost analysis, the net cost of transition becomes negative in several countries, reinforcing the economic rationality of early investment.

To examine policy pathways, the study evaluates the role of carbon pricing in accelerating the uptake of clean technologies. It simulates carbon price trajectories ranging from \$20 to \$60 per ton of CO₂, analyzing their effects on technology deployment, emission trajectories, and fiscal revenues. The results demonstrate that even moderate carbon pricing can make several technologies economically viable while generating substantial public revenues that could be reinvested in infrastructure, social protection, and innovation.

The research concludes with key policy recommendations. First, national energy strategies should explicitly include non-electric sectors within their decarbonization frameworks. Second, countries should prioritize investment in high-impact, low-cost marginal abatement cost (MAC) technologies, especially those with proven co-benefits. Third, carbon pricing should be introduced gradually with adequate safeguards for low-income groups and domestic industries. Fourth, regional cooperation under the OAPEC framework should be enhanced to facilitate knowledge transfer, joint financing, and harmonized standards for clean technology deployment.

In sum, this study provides a robust evidence base for policymakers and stakeholders seeking to expand the energy transition beyond the electricity sector. It highlights both the urgency and the opportunity in addressing emissions from transport, heating, and cooling through scalable, affordable, and socially beneficial technologies. The findings reaffirm that a holistic approach—grounded in data, economic logic, and regional collaboration—can help OAPEC countries achieve their sustainable development and climate goals without compromising energy access.

Abstract

Sustainable Aviation Fuel from Greenhouse Gases through Ethanol, Using Highly Active LaTa-Perovskite Catalysts

Dr. Dalia Radwan Abdel Hafez Mohamed

The current research aims to contribute to the global race to find sustainable and renewable energy solutions. Direct conversion of greenhouse gases into ethanol, which can be used to generate sustainable fuels, is a promising solution to be part of this race. Further, the ethanol conversion is an emerging strategy for jet-fuel production (ATJ), but still faces significant challenges. Therefore, this research focuses on the use of highly active and selective catalysts based on LaTaO_4 perovskite and their two A-/B- substitutions by Na/Pd, respectively ($\text{NaLaTa}_2\text{O}_6$ and LaPdTaO_6) for bioethanol upgrading into sustainable jet fuel precursor (ATJ). The catalysts were prepared via microwave-assisted method and then characterized using various analytical techniques; XRD, FTIR, SEM, PL, TPR and NH_3 -TPD. The ATJ process occur in continuous flow system under atmospheric pressure in the temperature range of 100-400°C. All catalysts exhibit high ethanol conversion reaches 94.7% over NLTO at 400°C, with low gas fractions (< 1%). The liquid products are mainly; acetaldehyde, crotonaldehyde, n-/iso- C_{4-6} -OH, and $>\text{C}_7$ -OH. The LTO catalyst exhibits the highest selectivity for n- C_{4-6} -OH (~ 61%). The LPTO catalyst exhibits the highest selectivity for iso- C_{4-6} -OH (~ 3.2%). While, NLTO catalyst exhibits the highest selectivity for $>\text{C}_7$ -OH (~ 27%), a significant percentage that can be directly used as SAFs after a simple hydrodeoxygenation step. Systematic investigations can indicate that, the outstanding performance of the prepared perovskite catalysts originated mainly from the synergistic effect of the finely tuned electronic, redox and Acid/Base properties. Those properties affected by A-/B-site substitution confirming the variation of catalysts selectivity. Generally, the greenhouse gases utilization in transportation fuels production is a promising approach to mitigate climate change and create sustainable opportunities. This approach can contribute to; reducing emissions, reducing dependence on fossil fuels, providing sustainable energy sources, promoting the circular carbon economy, and encouraging innovation and technological progress.

Contents

First - Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2024 (Presented in English)

Sustainable Aviation Fuel from Greenhouse Gases through Ethanol, Using Highly Active LaTa-Perovskite Catalysts **9-E**

Dr. Dalia Radwan Abdel Hafez Mohamed **Abstract 7**

Second - Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2024 (Presented in Arabic)

Prospects for integrating renewable energy technologies, and technologies based on their sources, into the transport, cooling and heating sectors in OAPEC countries **7-A**

Dr. Mustafa Mohamed Arafa Morsi Ibrahim **Abstract 8**

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.

2. 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.
3. Figures, maps, and pictures should be sent in a separate additional file in JPEG format.
4. “Times New Roman” should be used with font size 12. Line spacing should be 1.5. Text alignment should be “justified”.
5. Information sources and references should be referred to/enlisted in a clear academic method.
6. 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.
7. It is preferred to write the foreign names of cities, research centres, companies, and universities in English not Arabic.
8. The researcher’s CV should be attached to the article if it was the first time he/she cooperates with the journal.
9. 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.
10. Authors of rejected articles will be informed of the decision without giving reasons.
11. 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 - 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

1. Publication of authentic research articles in Arabic which observe internationally recognized scientific research methodology.



OIL AND ARAB COOPERATION

Editor - in - Chief

Eng. Jamal Essa Al Loughani

Secretary General, Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)

Managing Editor

Mr. 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 52 - 2025 - Issue 195

First - Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2024 (Presented in English)

- **Sustainable Aviation Fuel from Greenhouse Gases through Ethanol, Using Highly Active LaTa-Perovskite Catalysts**

Dr. Dalia Radwan Abdel Hafez Mohamed

Second - Place Winning Research of OAPEC Scientific Award 2024 (Presented in Arabic)

- **Prospects for integrating renewable energy technologies, and technologies based on their sources, into the transport, cooling and heating sectors in OAPEC countries**

Dr. Mustafa Mohamed Arafa Morsi Ibrahim