منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول
أوابك

النفط والتعاون العربي

المجلد الحادي والخمسون 2024 - العدد 191

الابحاث

- وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون: التحديات والفرص
  م. عماد ناصيف مكي
- الواقع والآفاق المستقبلية للمعادن الحرجة ودور الدول العربية في تأمين سلاسل الإمدادات
  ماجد عامر
- معالجة مياه صرف المصافي النفطية بعمليات أكسدة متقدمة
  د. نوفا أحمد جمعة

تقارير

- ملخص تنفيذي لتقرير منظمة أوبك السنوي المعنون (World Oil Outlook 2050) (آفاق النفط العالمية 2050)
  ترجمة: عبد الفتاح دندي

عرض كتاب

- تحول الطاقة المستدامة : الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام للممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة
  ***عرض :*م. تركي حسن حمش**

النفط والتعاون العربي

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

الاشتراك السنوي : 4 أعداد (ويشمل أجور البريد)

البلـــدان العـربيـــة
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

جميـع حقـوق الطبـع محفوظـة ويجوز الاقتبـاس مع ذكر اسم المجلة.

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 مؤتمر 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 إلكترونيا 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 كاتبيها ولا تعبر بالضرورة عن وجهة نظر جهة الإصدار ويخضع ترتيب الأبحاث المنشورة وفقاً 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: 24959000 -00965 أو 24959779-00965
الفاكس: 24959755 - 00965
البريد الالكتروني oapec@oapecorg.org
موقع الأوابك على الانترنت www.oapecorg.org

المحتويات

الابحاث

وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون: التحديات والفرص
م. عماد ناصيف مكي 7

الواقع والآفاق المستقبلية للمعادن الحرجة ودور الدول العربية في تأمين سلاسل الإمدادات
ماجد عامر 77

معالجة مياه صرف المصافي النفطية بعمليات أكسدة متقدمة
د. نوفا أحمد جمعة 133

التقارير

ملخص تنفيذي لتقرير منظمة أوبك السنوي المعنون (World Oil Outlook 2050) (آفاق النفط العالمية 2050)
ترجمة: عبد الفتاح دندي 169

عرض كتاب

تحول الطاقة المستدامة : الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام للممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة
عرض :م. تركي حسن حمش 187

مجلة عربية تهتم بنشر المعرفة والثقافة البترولية وتلك المتعلقة بالطاقة وتعميمها والعمل على متابعة التطورات العلمية في مجال الصناعة البترولية

المقالات المنشورة في هذه المجلة تعكس آراء مؤلفيها ولا تعبر بالضرورة عن رأي منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول - أوابك

البحث الأول

وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون: التحديات والفرص

م. عماد ناصيف مكي *

* مدير إدارة الشؤون الفنية ، أوابك - الكويت

ملخص تنفيذي

يعتبر قطاع الطيران أحد القطاعات الرئيسية المستهلكة للوقود الأحفوري، وتواجه عملية نزع الكربون إلى الصفر في هذا القطاع بحلول عام 2050 تحديات عديدة من أهمها أن الجزء الأكبر من أسطول الطائرات الحالية سيبقى قيد التشغيل إلى ما بعد 2040-2050 مما يجعل تعديل محركات الطائرات غير ممكن خلال هذه الفترة، وبالتالي صعوبة تغيير نوع الوقود. (Royal Society, 2023)

تصنيف أنواع وقود الطيران

تصنف منظمة الطيران المدني الدولي ICAO أنواع وقود الطيران حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA إلى مجموعتين، الأولى مجموعة وقود الطيران التقليدي CAF ذي الأساس الأحفوري، وتتضمن الوقود المنتج من تكرير النفط، مثل الكيروسين وغازولين الطائرات، والثانية مجموعة وقود الطيران البديل ويتكون من وقود الطيران المستدام SAF، ووقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، والهيدروجين، والغاز الطبيعي المسال.

ينتج وقود الطيران النفطي من عملية تكرير النفط الخام في المصفاة ويسمى كيروسين الطيران وله أنواع عديدة حسب مجال الاستخدام والنوع الأكثر استخداماً هو وقود النفاثات Jet-A1.

يختلف وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF عن وقود الطيران المستدام SAF في أن الأول يساهم في خفض انبعاثات الكربون الناتجة عن عملية تصنيع الوقود، بينما الثاني يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن الحرق والاستهلاك.

يطلق على وقود الطيران المستدام عدة تسميات تحمل نفس المعنى، مثل وقود الطيران الحيوي Biojet، ووقود الطيران المتجدد Renewable Aviation Fuel، ووقود الطائرات النفاثة المتجدد Renewable Jet Fuel، ووقود الطيران البديل Alternative Aviation Fuel. (ATAG, 2017)

فوائد وقود الطيران المستدام

يتميز الوقود المستدام بأنه يطلق غازات دفيئة بنسبة أدنى بكثير من الوقود التقليدي، كما يمكن أن تنخفض انبعاثات CO_2 بنسبة 80% على أساس دورة حياة المنتج، وتحسين جودة الهواء الجوي، وبالتالي تحسين الالتزام بمتطلبات تشريعات خفض انبعاثات الكربون، وتعزيز أمن الطاقة من خلال تأمين مصدر إضافي لوقود الطائرات من المصادر المتجددة والبديلة، وخصوصاً بالنسبة للدول التي لا تمتلك

موارد بترولية حيث يساعدها على تخفيض اعتمادها على النفط والحصول على وقود من مواد خام مستدامة كزيوت الطهي المستعملة، والنفايات الزراعية، وهذا يساهم في دعم الاقتصاد الوطني، وتعظيم الاستفادة من البنية التحتية القائمة لإنتاج وتخزين وقود الطيران التقليدي.

تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

تصنف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام ضمن ثلاث مجموعات رئيسية، الأولى تعتمد على مبدأ تقنية فيشر- تروبش التي اعتمدت في عام 2009، تليها تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية Hydroprocessed Esters and Fatty Acids التي اعتمدت في عام 2011، وهي الأكثر انتشاراً في العالم، وتقنية تحويل الكحول إلى وقود طائرات ATJ التي اعتمدت في عام 2018. كافة هذه التقنيات تساهم في خفض الانبعاثات الممكن انطلاقها عبر دورة حياة وقود الطيران بنسب عالية تصل إلى 90% مقارنة بوقود الطيران النفطي. يبين الجدول التالي نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM. (Royal Society, 2023)

نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM

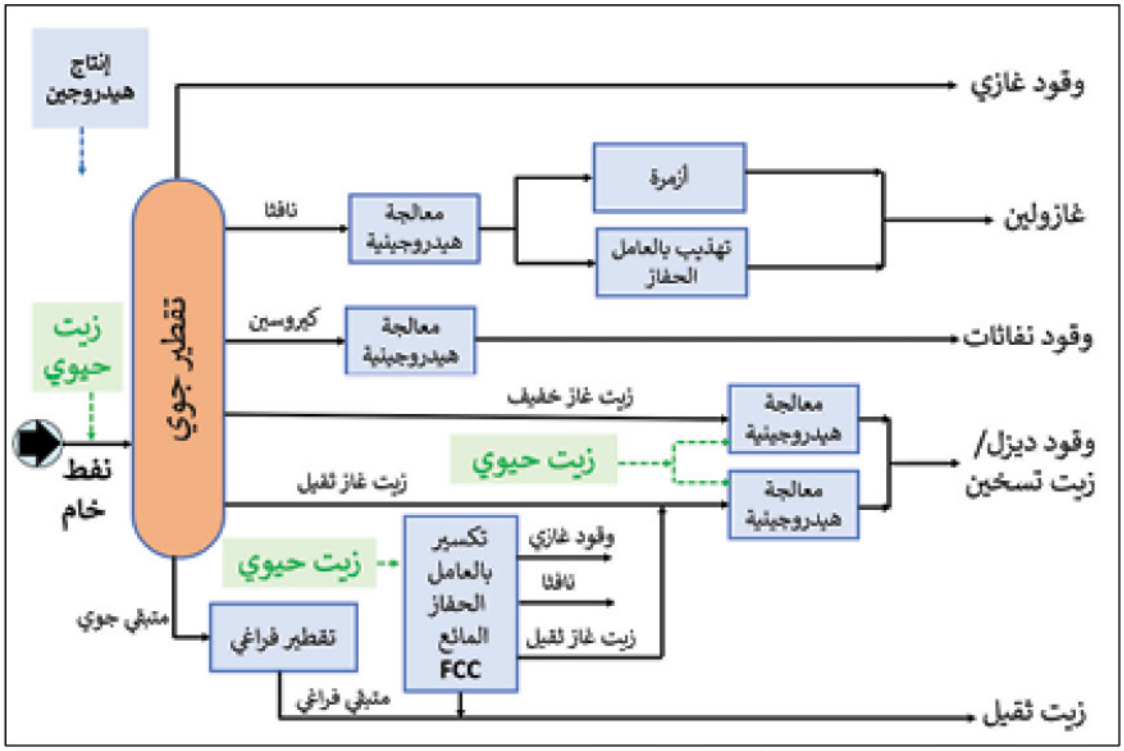
اسم العملية	خيارات اللقيم	الوصف	نسبة المزج %	مستوى نضوج التقنية
هدرجة الأحماض الدهنية واستيرات الأحماض الدهنية HEFA- KSP	أحماض دهنية وإستيرات الأحماض الدهنية، وبشكل عام الدهون المشتقة من النبات والحيوان، مثل زيت الطهي المستعمل، والشحوم الحيوانية.	معالجة هيدروجينية للأحماض والإستيرات الدهنية لإنتاج كيروسين بارافيني اصطناعي PSK	50	8
تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبشFT-SPK	الكتلة الحيوية (مخلفات الغابات- النفايات البلدية الصلبة)	تحويل الغاز الاصطناعي المنتج بطريقة FT إلى كيروسين بارافيني اصطناعي	50	6-5
إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي HFS-SIP	سكريات مستخرجة مباشرة من النباتات السكرية (الشمندر - وقصب السكر،..) أو من مصادر غير مباشرة (سكريات C5 و C6 مستخلصة من السيليلوز	معالجة هيدروجينية للسكريات الناتجة عن التخمر لتحويلها إلى إيزو- بارافينات اصطناعية.	10	8-7) السكريات العادية) 5) السكريات السليلوزية)
تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام ATJ-SPK	المخلفات الزراعية، مخلفات الغابات، نباتات الطاقة، حبوب الذرة	تحويل الكحولات (إيزو - بوتانول أو إيثانول) إلى كيروسين بارافيني.	50	6-5

المصدر: (Royal Society, 2023)

يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات

التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية، أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد خام متجددة فقط أو إنشاء مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها. وبالتالي يمكن خفض تكاليف الاستثمار لإنتاج الوقود الحيوي وكذلك تقليل المخاطر. وهناك تجارب عديدة ناجحة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

ونظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF). يبين الشكل التالي العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.



المصدر: (Wagner DA SILVA, M., 2022)

تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون

يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير،

ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع وحتى مرحلة الاستهلاك. ففي مرحلة حقول إنتاج النفط هي، (1) استخدام الطاقة المتجددة، (2) إدارة الحرق على الشعلة والحد من تسرب الغازات الهيدروكربونية الطيارة، و (3) واصطياد الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

وفي مرحلة تكرير النفط، يمكن اعتماد العديد من التقنيات، أهمها: (1) اصطياد الكربون واستعماله وتخزينه (CCUS)، (2) إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر، و (3) استخدام الحرارة والطاقة من مصادر الطاقة المتجددة في المصفاة، و (4) ترشيد استهلاك الطاقة تحسين كفاءة استخدامها، و(5) تكرير لقائم حيوية مستدامة، و(6) تكرير نفط خام منخفض الكربون.

تحديات إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تواجه عمليات إنتاج وقود الطيران المستدام صعوبات وتحديات عديدة، فعلى الرغم من الدعم الكبير الذي تقدمه الحكومات في العديد من دول العالم لم تتجاوز كمية إنتاج وقود الطيران المستدام 600 مليون ليتر أو ما يعادل 0.2% من إجمالي الطلب العالمي على وقود الطيران في عام 2023.

يمثل ارتفاع تكاليف الإنتاج العائق الأكبر لانتشار وقود الطيران المستدام، حيث تصل إلى 2.5-5 أضعاف تكلفة وقود الطيران التقليدي Jet A-1 (Barbara, L., & Galea, C., 2024)، إلا أنه من المتوقع أن تضيق الفجوة بين تكلفة النوعين بشكل تدريجي في المستقبل، وخصوصاً بعد تطبيق نظام تجارة الانبعاثات ETS. (Soone, J., 2020)

كما أن بعض التقنيات تتميز بارتفاع التكاليف الاستثمارية التي تمثل 50 إلى 70% من إجمالي تكاليف الإنتاج، مثل تقنية فيشر- تروبش، بينما تشكل تكاليف المواد الأولية ما نسبته 10- 35%. ويمكن تخفيض تكاليف الإنتاج في تقنية فيشر- تروبش من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم، إلا أن تشغيل هذه التقنية بطاقة إنتاجية عالية ينشأ عنه صعوبات تتعلق بنقل وتأمين المواد الأولية الكافية للمشروع.

من جهة أخرى يحتاج الوقود المتجدد إلى بنية تحتية باهظة التكاليف، إضافة إلى ارتفاع معدل استهلاك الطاقة، وصعوبة التخلص من النفايات الناتجة عن العملية. كما يتطلب إنتاج وقود الطيران المستدام عملية عالية الكفاءة لتحويل المواد الخام إلى وقود قابل للاستخدام، فضلاً عن أن عدم وجود إجماع عالمي حول معايير موحدة لمتطلبات الاستدامة يؤدي إلى تردد منتجي الوقود المستدام وعدم القدرة على اختيار تكنولوجيا التصنيع المناسبة، واختلاف الإطار العام لسياسة وخطط الاستدامة من

دولة لأخرى، كما تختلف فيما بينها من حيث طريقة ونسبة الحوافز التي تقدمها مما يؤدي إلى تراجع المستثمرين عن المغامرة في إنتاج وقود الطيران المستدام.

من التحديات الأخرى التي تواجه إنتاج وقود الطيران المستدام اضطراب أسعار المواد الخام اللازمة لتصنيع الوقود المستدام نتيجة المنافسة على شرائها، فضلاً عن الآثار البيئية التي تترافق مع استخدام الأراضي الزراعية التي كانت تستخدم لإنتاج الغذاء، وأضرار استخدام المبيدات الحشرية، وما يتبعها من تأثير على التنوع البيولوجي، وبالتالي ابتعاد المستثمرين عن الدخول في مشاريع غير مستقرة.

لتسهيل انتشار الوقود المستدام والمنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية، وتحفيز الطلب، وتمكين الربط بين العرض والطلب.

تتركز إجراءات خفض انبعاثات الكربون المتعلقة بتغيير نوع الوقود في أربعة مسارات، هي الهيدروجين والأمونيا والوقود الحيوي والوقود الكهربائي e-fuel.(Sustainable Aviation, 2022)

تطورات تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام في العالم والدول العربية

شهدت السنوات القليلة الماضية توجه العديد من الدول نحو تسريع إجراءات تطوير التشريعات والمعايير الخاصة بوقود الطيران المستدام بعد المطالبات التي صدرت من الهيئات المهتمة بشؤون البيئة لزيادة الاهتمام بوقود الطيران المستدام مقارنة بأنواع الوقود المتجدد الأخرى المستخدمة في وسائل النقل البري. وقد طورت صناعة الطيران عدة مبادرات خاصة بمكافحة تغير المناخ، بالتعاون والتنسيق مع منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO). يقود هذه المبادرات الاتحاد الدولي للنقل الجوي (IATA) ومجموعة عمل النقل الجوي (ATAG).

اعتمدت منظمة الطيران المدني الدولي ICAO خطة تتضمن عدة إجراءات لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر في قطاع الطيران بحلول عام 2050، أهمها تحسين تقنيات الطائرات، وتطوير عمليات التشغيل، واستخدام الوقود المستدام والمنخفض الكربون، إضافة إلى إجراءات تجارة الكربون. كما أصدر الاتحاد الأوروبي مجموعة من الإجراءات، ويعمل على إعداد العديد من التشريعات المتعلقة بنزع الكربون في قطاع الطيران. أما الولايات المتحدة فقد أعلنت عن إمكانية خفض انبعاثات الكربون بنسبة 20% بحلول عام 2030، وإلى الصفر بحلول عام 2050، من خلال نزع الكربون من الهواء الجوي في أماكن أخرى بالكميات الموازية للكميات الناتجة عن وقود الطيران. (Royal Society, 2023)

على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن لديها فرصاً ثمينة لتكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، والساليكورنيا Salicornia التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة. وقد شهدت بعض الدول العربية تطورات ملحوظة في مجال تشجيع إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام وعقدت شراكات واتفاقيات مع بعض الشركات العالمية المتخصصة. تتركز هذه التطورات في دولة الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والمملكة العربية السعودية، ودولة قطر، ودولة الكويت، وجمهورية مصر العربية، وسلطنة عمان.

ولتعظيم طاقة إنتاج الوقود المستدام والمنخفض الكربون تحتاج الدول العربية إلى تنفيذ بعض الإجراءات، من أهمها: تعزيز التعاون بين صناعة الطاقة وقطاع الطيران، وإصدار التشريعات والسياسات الداعمة، وتحسين الأداء التشغيلي لمصافي تكرير النفط لتمكينها من تطبيق تقنية المعالجة المشتركة التي تعتمد على تكرير مواد خام متجددة إلى جانب النفط الخام بهدف تخفيض البصمة الكربونية لمنتجات المصفاة وإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، حيث أن المعالجة المشتركة تعتبر حلاً فعالاً من حيث التكلفة وقريب الأمد لتوسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام في المنطقة. كما تمتلك الدول العربية فرصة واعدة لإنتاج الوقود الكهربائي وتصديره إلى الأسواق العالمية بأسعار منافسة نظراً لما تتمتع به من قدرة على إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة بتكاليف منخفضة، حيث تتوفر فترات طويلة من السطوع الشمسي والأراضي الواسعة، ما يمكنها من إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الكهربائية المولدة من مزارع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.

تجدر الإشارة إلى أن المنظمة العربية للطيران المدني ACAO قد أعلنت في عام 2024 عن سعيها لتبني مبادرة عربية لتشجيع تطوير وإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون ومصادر الطاقة الأخرى النظيفة لأغراض الطيران. تقوم هذه المبادرة على دراسة إنشاء فريق إقليمي عربي مشترك مع منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، لإعداد دراسات الجدوى الفنية حول إمكانات الدول العربية لتطوير وإنتاج أنواع وقود الطيران المستدام. (ACAO, 2024).

الفصل الأول

وقود الطيران ودوره في خطة تحول الطاقة

تقدر نسبة الانبعاثات الناتجة عن قطاع النقل الجوي بنحو 2-3% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون في العالم ومن المتوقع أن يرتفع الطلب على وقود الطيران بمعدل 50% بحلول عام 2050 مقارنة بمستوى عام 2019. (Barbarà, L., & Galea, C., 2024)

كما تحتوي انبعاثات قطاع الطيران غازات أخرى غير CO_2 هي أكاسيد النتروجين NOx، وبخار الماء، والجسيمات الدقيقة، وأول أوكسيد الكربون CO، وهيدروكربونات غير محترقة، وأكاسيد الكبريت. ولهذه الغازات تأثير في تغير المناخ يعادل 2-3 أضعاف تأثير غاز CO_2.

تشير الإحصاءات إلى أن عدد الطائرات في العالم قد بلغ في عام 2020 حوالي 28 ألف طائرة ويتوقع أن يصل العدد إلى 38 ألف بحلول عام 2032. كما بلغ معدل استهلاك وقود الطيران نحو 6.7 مليون برميل/اليوم، وتتوقع منظمة الطيران المدني الدولي ارتفاع معدل استهلاك وقود الطيران النفطي بمعدل 2.2 إلى 3.1 ضعف بحلول عام 2045 مقارنة بسنة الأساس 2015.* (Jing, L., et al., 2022)

على الرغم من عدم إدراج قطاع الطيران بشكل مباشر في اتفاقية باريس لتغير المناخ إلا أن القطاع قد وضع خطط لخفض الانبعاثات. فقد أعلن في عام 2009 عن ثلاثة أهداف لخفض غازات الدفيئة، الأول تحسين كفاءة الوقود بمعدل سنوي قدره 1.5 %، والثاني البدء بتطبيق نظام الحياد الكربوني اعتباراً من عام 2020، أما الثالث فهو خفض مستوى الانبعاثات إلى النصف بحلول عام 2050 مقارنة بمستوى عام 2005.

في أكتوبر عام 2022 أعلنت منظمة الطيران المدني الدولي "ICAO" عن مبادرة لخفض انبعاثات قطاع الطيران إلى الصفر بحلول عام 2050، وهي انعكاس لما أعلنته رابطة النقل الجوي الدولية IATA

---

* الإيكاو هي إحدى الوكالات المتخصصة التابعة للأمم المتحدة أنشئت عام 1944 تهتم بسلامة وكفاءة الطيران وحماية البيئة، وتوفر فرصاً للمشورة من خلال الشبكة العالمية التي أقامتها التي تتكون من مجموعات تابعة لقطاع الطيران والمنظمات غير الحكومية التابعة للمجتمع المدني وغيرها من الجهات المعنية بالنقل الجوي المعترف بها رسمياً.

في عام 2021. ولتحقيق هذا الهدف لابد من اتخاذ إجراءات تشمل تحسين كفاءة المطارات واختصار مسافات مسار الطائرات، وتطوير تقنيات محركات الطائرات، واستخدام الوقود المستدام والمنخفض الكربون، وتطبيق الإجراءات التجارية مثل تسعير وتجارة الكربون. (ICAO, 2023)

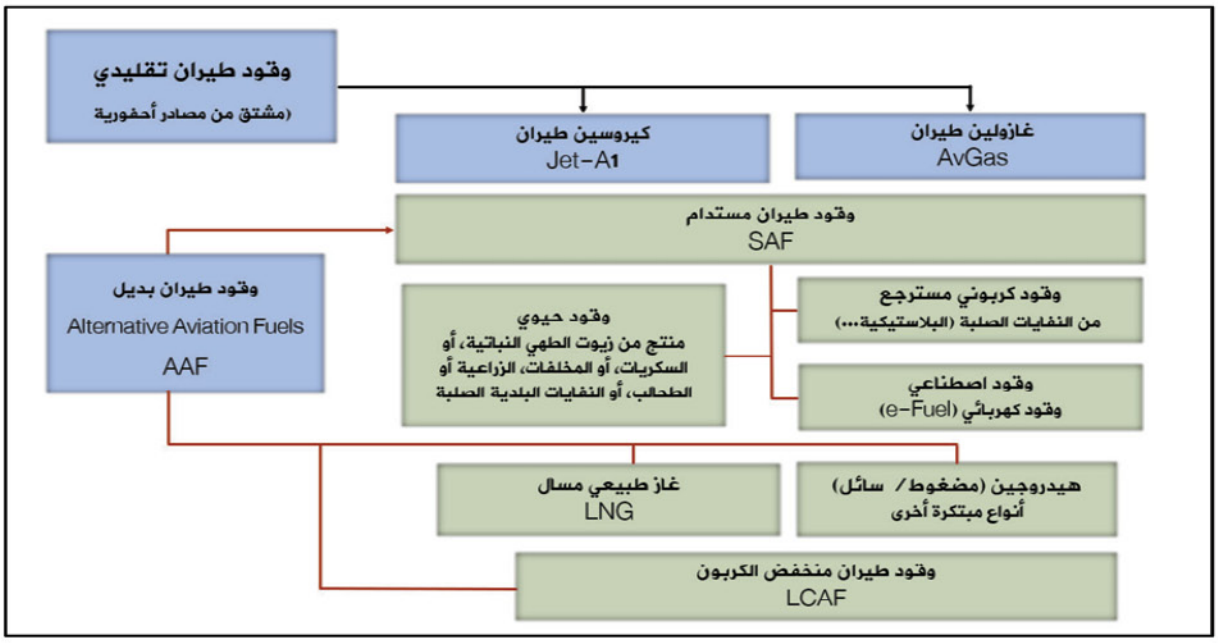
1-1: تصنيف أنواع وقود الطيران

تصنف منظمة الطيران المدني الدولي أنواع وقود الطيران حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA إلى مجموعتين، الأولى مجموعة وقود الطيران التقليدي CAF ذي الأساس الأحفوري، والثانية مجموعة وقود الطيران المعتمدة لخفض انبعاثات الكربون أو الوقود البديل، وذلك على النحو التالي: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- مجموعة وقود الطيران التقليدي Conventional Aviation Fuel- CAF، وهو الوقود المنتج من تكرير النفط، ويتكون من كيروسين الطائرات وغازولين الطائرات.
- مجموعة وقود الطيران البديل ويتكون من الأنواع التالية:
  - وقود الطيران المستدام SAF
  - وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF
  - الهيدروجين
  - الغاز الطبيعي المسال

يبين الشكل (1-1) تصنيف أنواع وقود الطيران حسب منظمة الطيران المدني الدولي ICAO في خطة تعويض وخفض الكربون للطيران الدولي CORSIA .

الشكل (1-1): تصنيف أنواع وقود الطيران حسب منظمة الطيران المدني الدولي ICAO

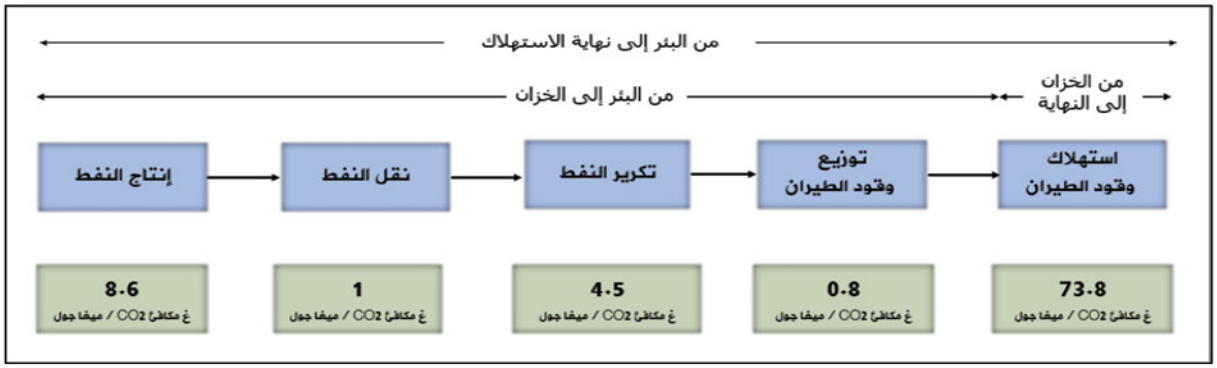


المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

كما ابتكرت منظمة الطيران المدني الدولي طريقة في تصنيفها لوقود الطيران وفقاً لكمية الانبعاثات التي تنتج عن الوقود خلال دورة حياته، ومقارنته مع كمية الانبعاثات التي يطلقها الوقود النفطي التقليدي والتي يطلق عليها اصطلاح "كثافة الكربون".

تعبر كثافة الكربون لوقود الطيران الأحفوري عن إجمالي كمية غازات الدفيئة المنبعثة خلال دورة حياة الوقود التي تقسم إلى عدة مراحل هي: إنتاج النفط ونقله إلى بوابة المصفاة Well to Refinery، ثم مرحلة التكرير ونقل وقود الطيران إلى مراكز الاستهلاك Refinery to Tank، وأخيراً مرحلة الاستهلاك في الطائرات Combustion. يبين الشكل (1-2) كثافة الكربون خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي.

الشكل (1-2): كثافة الكربون خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي

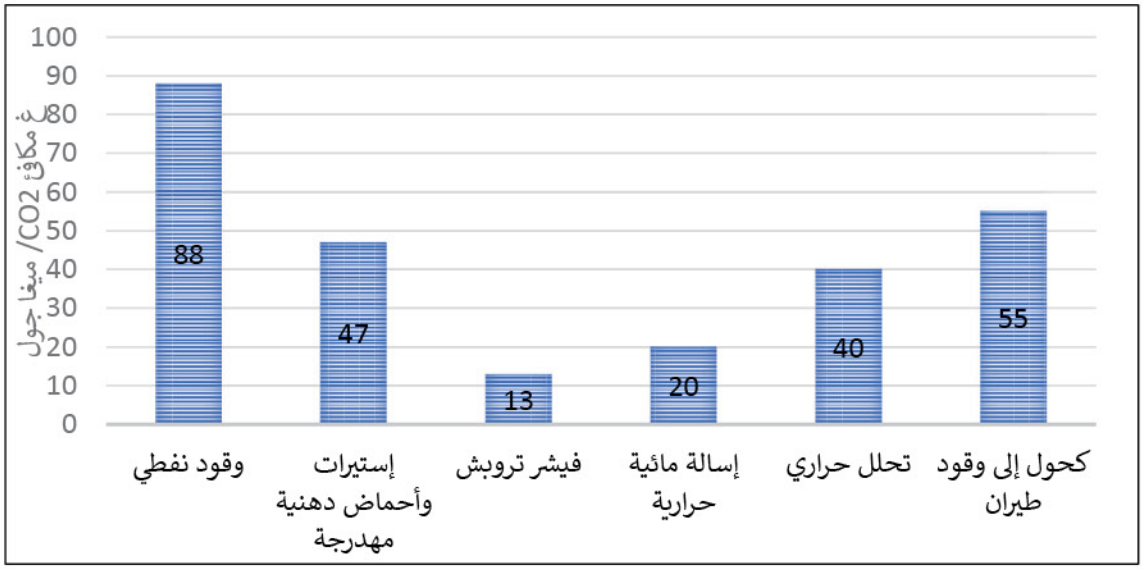


المصدر: (ICAO, 2023)

تختلف كثافة الكربون لكيروسين الطيران النفطي من منطقة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة، فعلى سبيل المثال، تتراوح كثافة الكربون الناتجة عن عملية نقل وتوزيع وقود الطيران من المصفاة إلى مركز الاستهلاك ضمن المجال 0.1 إلى 5.2 غ مكافئ CO_2 على مستوى الدول، بينما يبلغ المتوسط العالمي 0.8 غ مكافئ CO_2، وذلك حسب المسافة الفاصلة بين المصفاة وموقع المطارات في الدولة، حيث تصل إلى 2 غ مكافئ CO_2 في أستراليا وكندا والمكسيك بسبب بعد المسافة بين المصافي والمطارات بينما لا تتجاوز 1 غ مكافئ CO_2 في الدول التي يمكن نقل الوقود فيها عبر الأنابيب أو عندما تكون المسافة بينهما قريبة. وتزداد هذه القيمة عندما تستورد الدولة الوقود من الخارج. كما لنوع النفط الخام المكرر دور في خفض كثافة كربون وقود الطيران المنتج، حيث أن بعض أنواع النفط تتميز بانخفاض كثافة الكربون مقارنة بأنواع أخرى. (Jing, L., et al., 2022)

تتراوح كثافة الكربون لوقود الطيران حسب نوعه وعملية إنتاجه، فالوقود النفطي تتراوح كثافة الكربون فيه ضمن المجال من 81.1 إلى 94.8 غ مكافئ CO_2/ ميغا جول، بمتوسط قدره 88.7 غ مكافئ CO_2/ ميغا جول، حيث تتغير القيمة تبعاً لعوامل عديدة كنوع النفط الخام المكرر، وإجراءات خفض الكربون في مرحلة التكرير والنقل وغيرها، بينما تنخفض في الوقود المنتج بعملية فيشر- تروبش إلى نحو 13 غ مكافئ CO2/ ميغا جول. يبين الشكل (1-3) مقارنة كثافة الكربون لأنواع وقود الطيران النفطي والمتجدد.

الشكل (1-3): مقارنة كثافة الكربون لأنواع وقود الطيران النفطي والمتجدد



المصدر: (Jing, L., et al., 2022)

1-1-1: وقود الطيران التقليدي (النفطي)

ينتج وقود الطيران النفطي من عملية تكرير النفط الخام في المصفاة ويسمى كيروسين الطيران وله أنواع عديدة حسب مجال الاستخدام، والنوع الأكثر استخداماً هو وقود النفاثات Jet-A1.

إضافة إلى غاز CO_2 ينتج عن استخدام وقود الطيران النفطي انبعاثات لها تأثير على تغير المناخ منها: أكاسيد النتروجين NO_x التي تساهم في زيادة تركيز غازات الدفيئة، والأوزون والميثان في الغلاف الجوي، علاوة على بخار الماء وهباب الكربون SOOT التي تسبب تشكل الغيوم الضبابية خلف عادم محركات الطائرة. (Royal Society, 2023)

معظم انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون الناتجة خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي تنطلق في مرحلة الحرق في المحرك وتصل النسبة إلى 84% من إجمالي الانبعاثات، بينما تنتج النسبة الباقية 16% من مرحلة الإنتاج التي تبدأ من بئر النفط إلى خزان توزيع وقود الطيران.

1-1-2: وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون LCAF

يعرف وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون بأنه وقود منتج من النفط الخام في مصافي تكرير النفط مع تطبيق تقنيات اصطياد ثاني أوكسيد الكربون واستخدام الهيدروجين الأخضر في عمليات التكرير، ومصادر الطاقة المتجددة في إنتاج الكهرباء وعمليات التسخين، ومن التقنيات الأخرى الممكنة لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون في وحدات مصافي تكرير النفط باستخدام الزيوت النباتية. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

كما تعرف منظمة الطيران المدني الدولي وقود الطيران المنخفض الكربون، حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA بأنه وقود ذو أساس أحفوري ينتج عنه انبعاثات كربونية منخفضة مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي، ويتوافق مع متطلبات الاستدامة المحددة في خطة تعويض وتخفيض انبعاثات الكربون للطيران الدولي.* كما تحدد قانون الطاقة المتجددة الأوروبي الثاني RED II شرط اعتبار وقود الطيران منخفض الكربون بأن يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن كامل دورة حياته بنسبة 65 % كحد أدنى من معدل انبعاثات غازات الدفيئة المنبعثة من الوقود التقليدي

---

* خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي أعدتها منظمة الطيران المدني الدولي ICAO عام 2016 تهدف إلى معالجة وتخفيف انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن قطاع الطيران الدولي بمعدل 85% من مستوى عام 2019 وذلك خلال الفترة 2024 ولغاية 2035. (ICAO, 2-23)

والمقدر بحوالي (89 غ مكافئ CO_2 لكل ميغا جول) وهي القيمة التي ترمز إلى كثافة كربون الوقود Carbon Intensity CI. (POST, 2020)

كما تعتبر منظمة الطيران المدني الدولي ICAO أن وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون هو النوع الذي يمكن الاعتماد عليه في لعب دور أساسي في برنامج خفض انبعاثات قطاع النقل الجوي. وهذا يتوافق مع ما تم اعتماده خلال الاجتماع الثاني عشر للجنة حماية البيئة للطيران CAEP12 في فبراير 2022، حيث اعتبر وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون أحد الإجراءات المكملة لدور وقود الطيران المستدام في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن قطاع الطيران. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

يختلف وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF عن وقود الطيران المستدام SAF في أن الأول يساهم في خفض انبعاثات الكربون الناتجة عن عملية تصنيع الوقود، بينما الثاني يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن الحرق والاستهلاك. فعلى سبيل المثال تساهم كمية خمس مليارات لتر من وقود الطيران ذي كثافة كربون 80 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول بخفض كمية من انبعاثات غازات الدفيئة تعادل كمية مليار لتر فقط من الوقود المستدام ذي كثافة كربون 45 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول. كما يتميز وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون بسرعة دخوله إلى الأسواق وإمكانية تطويره نظراً لتوفر البنية التحتية لإنتاجه وتخزينه وتوزيعه.(Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

بما أن الوقود التقليدي يتم إنتاجه من تكرير النفط الخام، فإن تكوينه يختلف حسب نوع النفط المكرر، حيث يتكون من البارافينات والأيزوبارافينات والنافثينات والعطريات بنسب متقاربة نوعاً ما. أما الوقود الحيوي فيتم إنتاجه من مجموعة متنوعة من المواد الأولية، وبالتالي فإن التركيب والخصائص مختلفة، مما يجعل تلبية معايير ASTM عملية مكلفة.

1-1-3: وقود الطيران المستدام SAF

وقود الطيران المستدام هو الوقود المنتج من مصادر متجددة مثل الكتلة الحيوية، أو المصادر المشتقة من النفايات مثل الزيوت النباتية المستعملة، والمخلفات الزراعية، أو من تحويل الطاقة إلى سوائل، مثل الوقود الاصطناعي المنخفض الكربون الذي ينتج من غاز ثاني أوكسيد الكربون والهيدروجين الأخضر. ويشترط في هذه الأنواع أن تحقق الحد الأدنى من شروط الاستدامة التي وضعتها كورسيا CORSIA، ويمكن استخدامها مباشرة في الطائرات دون الحاجة إلى تغيير أو تعديل في محرك الطائرة، كما

يشترط ألا يكون مصدر المواد الحيوية المصنع منها الوقود منتجة في أراض ذات مخزون عال من الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

يطلق على وقود الطيران المستدام عدة تسميات تحمل نفس المعنى، مثل وقود الطيران الحيوي Biojet، ووقود الطيران المتجدد Renewable Aviation Fuel، ووقود الطائرات النفاثة المتجدد Renewable Jet fuel، ووقود الطيران البديل Alternative Aviation Fuel. (ATAG, 2017)

1-2: فوائد وقود الطيران المستدام

على الرغم من الصعوبات التي تواجه تصنيع وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، إلا أنه يتميز بفوائد عديدة مقارنة بالوقود التقليدي، من أهمها:

1-2-1: تخفيض انبعاثات الغازات الدفيئة

يتميز الوقود المستدام والمنخفض الكربون بأنه يطلق غازات دفيئة بنسبة أدنى بكثير من الوقود التقليدي، كما يمكن أن تنخفض انبعاثات CO_2 بنسبة 80% على أساس دورة حياة المنتج. وهذا يساهم في الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، وتمكين الدول من تحقيق الأهداف العالمية لخفض الانبعاثات المسببة لتغير المناخ.

1-2-2: تحسين جودة الهواء الجوي

ينتج عن استهلاك وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون انطلاق كمية أقل من الجسيمات الدقيقة مقارنة بالوقود التقليدي، وهذا يساهم في تحسين جودة الهواء في المناطق المجاورة للمطارات، وبالتالي تخفيض المخاطر الصحية الناتجة عن تلوث الهواء.

1-2-3: تعزيز أمن الطاقة

يساهم وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون في تأمين مصدر إضافي لوقود الطائرات من المصادر المتجددة والبديلة، وخصوصاً بالنسبة للدول التي لا تمتلك موارد بترولية حيث يساعدها على تخفيض اعتمادها على النفط والحصول على وقود من مواد خام مستدامة كزيوت الطهي المستعملة، والنفايات الزراعية، أو محاصيل الطاقة. وهذا بالتالي يعزز من أمن الطاقة واستقرار أسعار الوقود في الأسواق العالمية.

1-2-4: دعم الاقتصاد الوطني

يمكن لإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون أن يساهم في تعزيز الاقتصاد من خلال تطوير صناعات جديدة تفتح المجال لخلق فرص عمل جديدة، وذلك من خلال زراعة وتصنيع وتوزيع المواد الخام المستدامة، فضلاً عن إنشاء وتشغيل منشآت تصنيع الوقود المستدام. كما يمكن أن يدعم نمو الاقتصاد الأخضر وجذب الاستثمار في تقنيات وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.

1-2-5: تعظيم الاستفادة من البنية التحتية القائمة

إن قابلية مزج وقود الطيران المستدام مع الوقود التقليدي وإمكانية استخدام المزيج في محركات الطائرات دون الحاجة إلى أية تعديلات يساهم في تعزيز تكامل الوقود المستدام مع البنية التحتية لوقود الطائرات التقليدي وتعظيم كفاءة استخدامها ورفع معدل العائد على الاستثمار لهذه المعدات.

1-2-6: تحسين الالتزام بمتطلبات تشريعات خفض انبعاثات الكربون

إن تضافر جهود منشآت إنتاج الوقود ومحطات التوزيع والمطارات وخطوط الطيران في مجال تشجيع الوقود المستدام يظهر مدى اهتمام هذه الهيئات بخفض بصمتها الكربونية ويحسن صورتها لدى المجتمع وهيئات المحافظة على البيئة.

الفصل الثاني

تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

تتكون عملية إنتاج وقود الطيران المستدام المنتج من مصادر متجددة من ثلاث مراحل رئيسية، الأولى مرحلة المعالجة الأولية للمواد الخام المتجددة، ثم مرحلة التحويل والتصنيع، وأخيراً مرحلة التكرير. (Wormslev, E., et al., 2016)

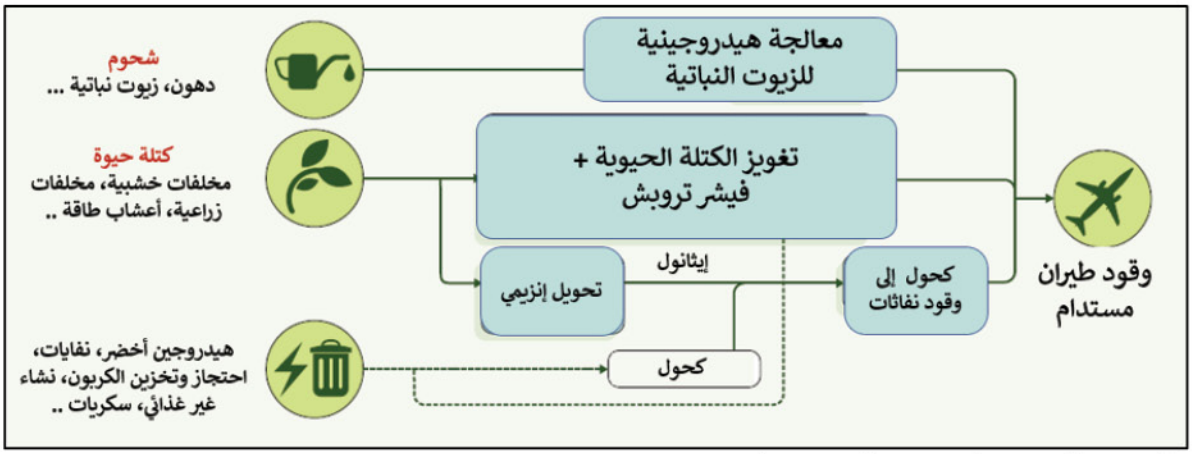
في **مرحلة المعالجة الأولية** يتم تحضير المواد الخام المتجددة لتصبح ملائمة لعملية تصنيع الوقود المستدام، وذلك من خلال عمليات التجفيف والتقطيع، أو أية إجراءات أخرى حسب نوع المواد ومصادرها، مثل كبس البذور النباتية لاستخراج الزيوت الدهنية منها. وقد تشتمل المعالجة الأولية على عملية التغويز إذا كان المطلوب تحويل المواد الخام المتجددة إلى الحالة الغازية.

في **المرحلة الثانية** يتم تحويل المواد الوسطية (مثل السكريات، والشحوم، والغازات) إلى هيدروكربونات. وقد تكون عملية التحويل من خلال التخمير لتحويل السكريات إلى كحولات، أو الهدرجة لتحسين خصائص الشحوم، أو تحويل الغازات إلى سوائل.

في **المرحلة الثالثة** يتم تكرير الهيدروكربونات الناتجة من المرحلة الثانية لفصل وقود الطيران المستدام عن المنتجات الأخرى الثانوية. كما يتم في هذه المرحلة فصل الشوائب عن الهيدروكربونات، إضافة إلى عملية تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة إلى سلاسل بالطول المناسب لإنتاج وقود الطيران المستدام.

يمكن تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام ضمن ثلاث مجموعات رئيسية، الأولى تعتمد على مبدأ تقنية فيشر- تروبش التي اعتمدت في عام 2009، تليها تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية Hydroprocessed Esters and Fatty Acids HEFA التي اعتمدت في عام 2011، وهي الأكثر انتشاراً في العالم، وتقنية تحويل الكحول إلى وقود طائرات ATJ التي اعتمدت في عام 2018. كافة هذه التقنيات تساهم في خفض الانبعاثات الممكن انطلاقها عبر دورة حياة وقود الطيران بنسب عالية تصل إلى 90% مقارنة بوقود الطيران النفط. يبين الشكل (2-1) تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (2-1): تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Bernard, Y., et al., 2023)

تتوفر حالياً عدة مسارات لإنتاج وقود الطيران المستدام معتمدة من الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM). يبين الجدول (2-1) نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM. (Royal Society, 2023)

الجدول (2-1): نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM

اسم العملية	خيارات اللقيم	الوصف	نسبة المزج %	مستوى نضوج التقنية
هدرجة الأحماض الدهنية وإستيرات الأحماض الدهنية HEFA- KSP	أحماض دهنية و إستيرات الأحماض الدهنية، وبشكل عام الدهون المشتقة من النبات والحيوان، مثل زيت الطهي المستعمل، والشحوم الحيوانية.	معالجة هيدروجينية للأحماض والإستيرات الدهنية لإنتاج كيروسين بارافيني اصطناعي PSK	50	8
تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبشFT-SPK	الكتلة الحيوية (مخلفات الغابات- النفايات البلدية الصلبة)	تحويل الغاز الاصطناعي المنتج بطريقة FT إلى كيروسين بارافيني اصطناعي	50	6-5
إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي HFS-SIP	سكريات مستخرجة مباشرة من النباتات السكرية (الشمندر - وقصب السكر،..) أو من مصادر غير مباشرة (سكريات C5 و C6 مستخلصة من السيليلوز	معالجة هيدروجينية للسكريات الناتجة عن التخمر لتحويلها إلى إيزو- بارافينات اصطناعية.	10	8-7) السكريات العادية) 5) السكريات السليلوزية)
تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام ATJ-SPK	المخلفات الزراعية، مخلفات الغابات، نباتات الطاقة، حبوب الذرة	تحويل الكحولات (إيزو - بوتانول أو إيثانول) إلى كيروسين بارافيني.	50	6-5

المصدر: (Royal Society, 2023)

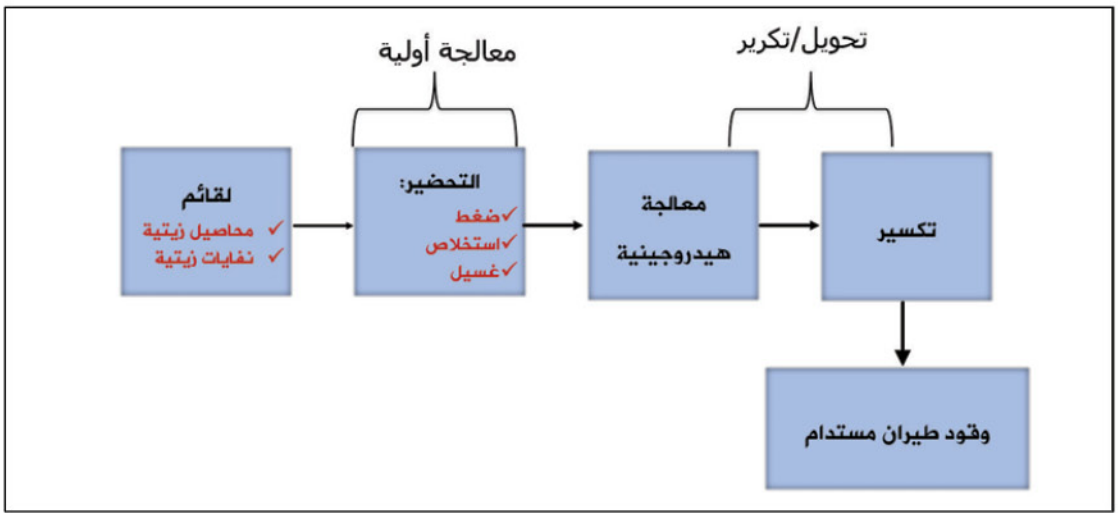
2-1: مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية HEFA

ينتج وقود الطيران الحيوي من التفاعل الكيميائي للغليسيريدات الموجودة في الزيوت النباتية، حيث يتم نزع الأوكسجين منها بالمعالجة الهيدروجينية بوجود عامل حفاز. لكن قبل إدخال الغليسيريدات إلى عملية المعالجة الهيدروجينية تخضع لمعالجة أولية لتخليصها من الشوائب التي تؤدي إلى تخريب فعالية العامل الحفاز. كما أن منتجات عملية المعالجة الهيدروجينية تحتاج إلى معالجة لتصبح جاهزة للاستعمال كوقود للطائرات. (Royal Society, 2023)

يتميز مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية بمرونة استخدام أنواع عديدة من المحاصيل الزيتية أو مخلفات الدهون الحيوانية كلقيم لتحويلها إلى وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي، وذلك من خلال المراحل الرئيسية التالية: (Starck, L., et al. 2016)

- **مرحلة المعالجة الأولية:** وتتكون من كبس المحاصيل الزيتية لاستخلاص الزيت، أو غسيل الشحوم الحيوانية لتخليصها من الشوائب بحيث تصبح صالحة لمرحلة الهدرجة.
- **مرحلة المعالجة الهيدروجينية** لتخليص الزيوت النباتية والشحوم من الأوكسجينات والشوائب بوجود الهيدروجين لإنتاج البارافينات الخطية. كما تتضمن هذه المرحلة عملية تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة، إضافة إلى عملية الأزمرة بوجود الهيدروجين Hydroisomerization لتحويل البارافينات الخطية إلى مقطرات وسطية حيوية قابلة للمزج مع المنتجات النفطية. ويمكن تعديل ظروف تشغيل هذه المرحلة بحيث تنتج وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي وبنسبة تتراوح من الصفر إلى المائة. يبين الشكل (2-2) مراحل عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية.

الشكل (2-2): مراحل عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية



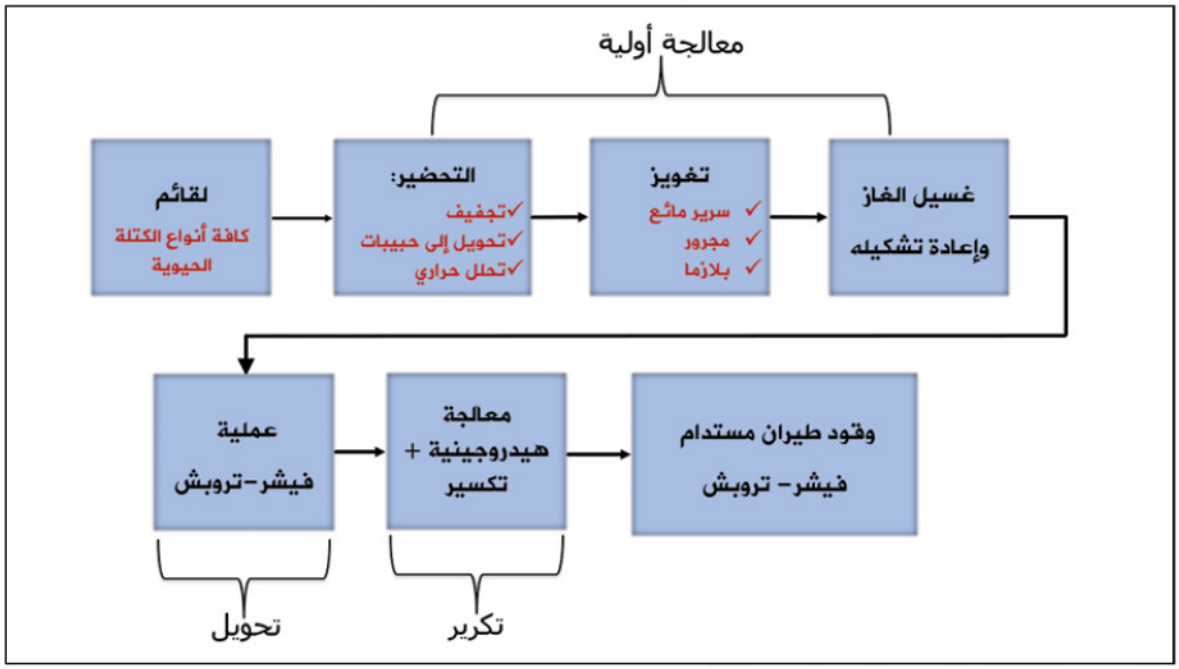
المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-2: مسار تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبش

يعتمد مبدأ مسار فيشر- تروبش على تحويل الغاز الاصطناعي Synthesis Gas الناتج من عملية تغويز طيف واسع من المواد الحيوية، ويتكون بشكل رئيسي من الهيدروجين وأول أوكسيد الكربون، ثم يحول الغاز إلى سوائل هيدروكربونية طويلة السلسلة، يمكن فصلها إلى أنواع مختلفة من الوقود السائل بما فيها وقود الطيران المستدام. وذلك حسب المراحل التالية:

- **مرحلة تنقية الغاز الاصطناعي،** وتهدف هذه المرحلة إلى التأكد من أن الغاز الاصطناعي خال من الشوائب الضارة بالعامل الحفاز المستخدم في عملية فيشر- تروبش، مثل الغازات الحامضية.
- **مرحلة تفاعلات فيشر- تروبش،** وتتم في مفاعل يحتوي على عامل حفاز لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل هيدروكربونية طويلة السلسلة.
- **مرحلة المعالجة الهيدروجينية لتحسين خصائص منتجات فيشر- تروبش،** حيث يتم تثبيت السوائل الخام، وهدرجة الأوليفينات والأوكسجينات، ثم تكسيرها بوجود الهيدروجين، ثم أزمرتها. بعد ذلك يتم فصل السوائل الناتجة إلى أشكال مختلفة من الإنتاج، مثل حالة إنتاج أقصى نسبة من الكيروسين البارافيني المستدام، أو أقصى نسبة من المقطرات الوسطى أو الديزل مع نسبة قليلة من النافثا.

الشكل (2-3): مسار تقنية فيشر- تروبش لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود طيران مستدام

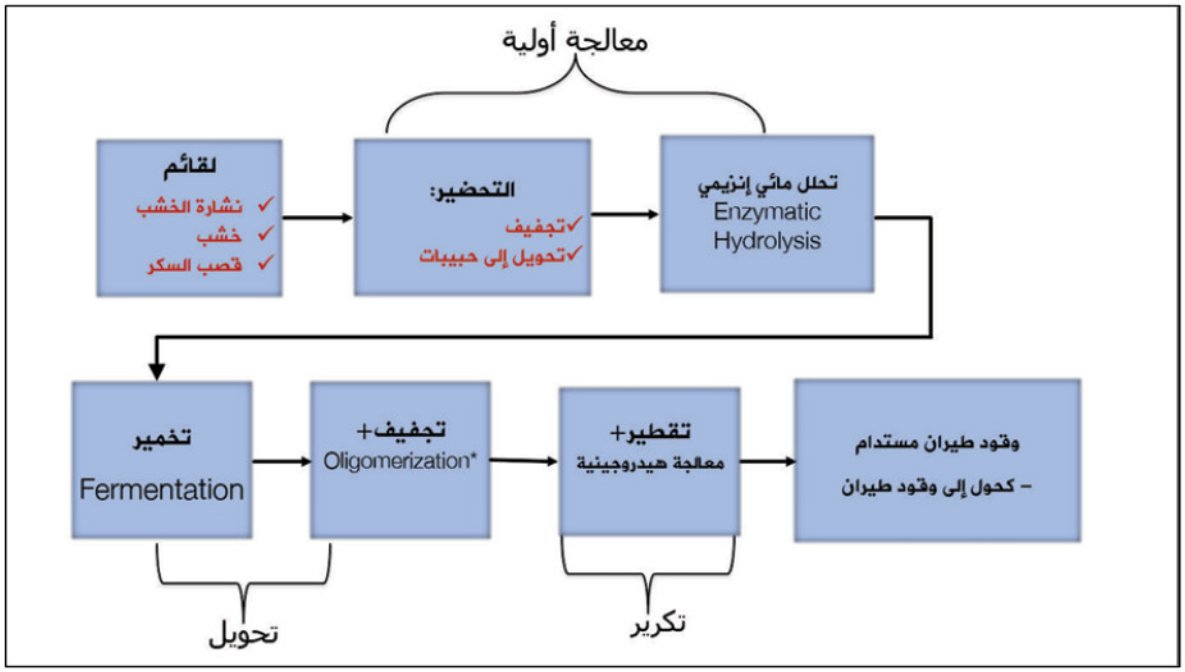


المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-3: مسار تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام

في هذا المسار يتم تحويل الكحول الحيوي المنتج من السكريات/النشاء، والمحاصيل السيليلوزية إلى هيدروكربونات. من أكثر الكحولات المستخدمة في هذه العملية هي الإيثانول الحيوي والبيوتانول الحيوي (بشكليه البيوتانول النظامي N-butanol والأيزو بوتانول Iso-butanol). تتكون عملية تحويل الكحول إلى وقود طائرات من عدة مراحل أولها مرحلة نزع الماء Dehydration بوجود عامل حفاز بدرجة حرارة ضمن المجال 300-500°م. بعد ذلك تمرر الهيدروكربونات الناتجة إلى عمليات التجفيف وتحويل المونوميرات إلى مركبات ذات جزيئات دقيقة Oligomerization، ثم التقطير لفصل وقود الطيران المستدام عن المنتجات الأخرى الثانوية. يبين الشكل (2-4) مخطط تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام.

الشكل (2-4): مخطط تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام



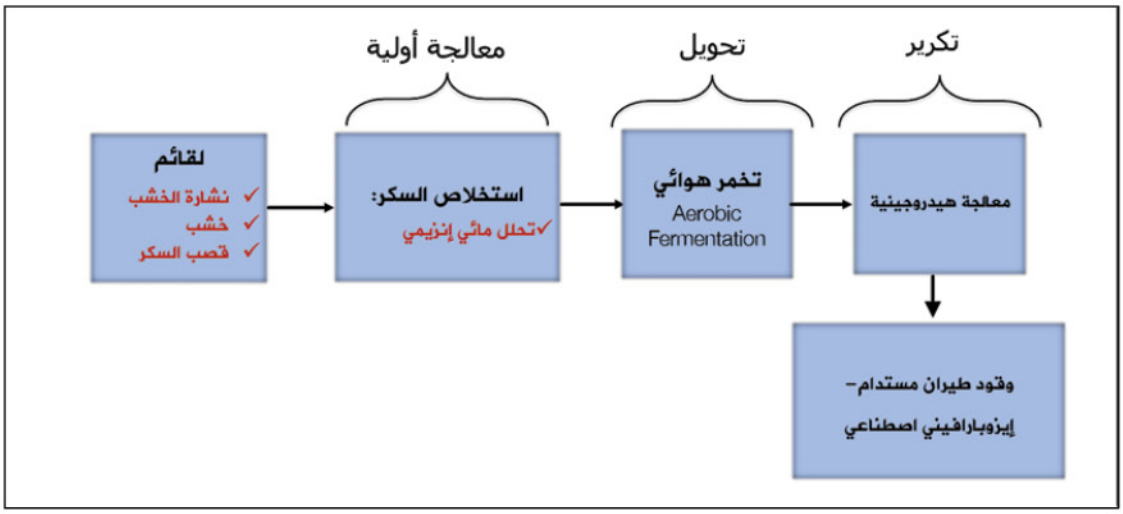
المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-4: مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي

يعرف مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي بمسار التحويل المباشر للسكر إلى هيدروكربونات، والذي اعتمد من قبل ASTM في عام 2014 بنسبة مزج مع الوقود التقليدي قدرها 10% كحد أقصى. يتوافق هذا المسار مع مسار تحويل الكحول إلى وقود طائرات من حيث عمليات المعالجة الأولية للسكر/النشاء مع وجود عملية تحلل مائي إنزيمي Enzymatic Hydrolysis

لاستخلاص جزيئات السكر. الفرق بين المسارين يكمن في أن السكريات تتحول بشكل مباشر إلى هيدروكربونات دون المرور في مرحلة وسطية للتحول إلى كحول. من أهم ميزات هذا المسار إمكانية التعديل الوراثي للإنزيمات لإنتاج وقود بمواصفات خاصة. أما مساوئ هذا المسار فتكمن في الحاجة إلى استمرار ضخ الأوكسجين باعتبار أن التفاعل هوائي مما يرفع من تكاليف الإنتاج. يبين الشكل (2-5) مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي

الشكل (2-5): مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-5: مسار الإسالة المائية الحرارية HTL

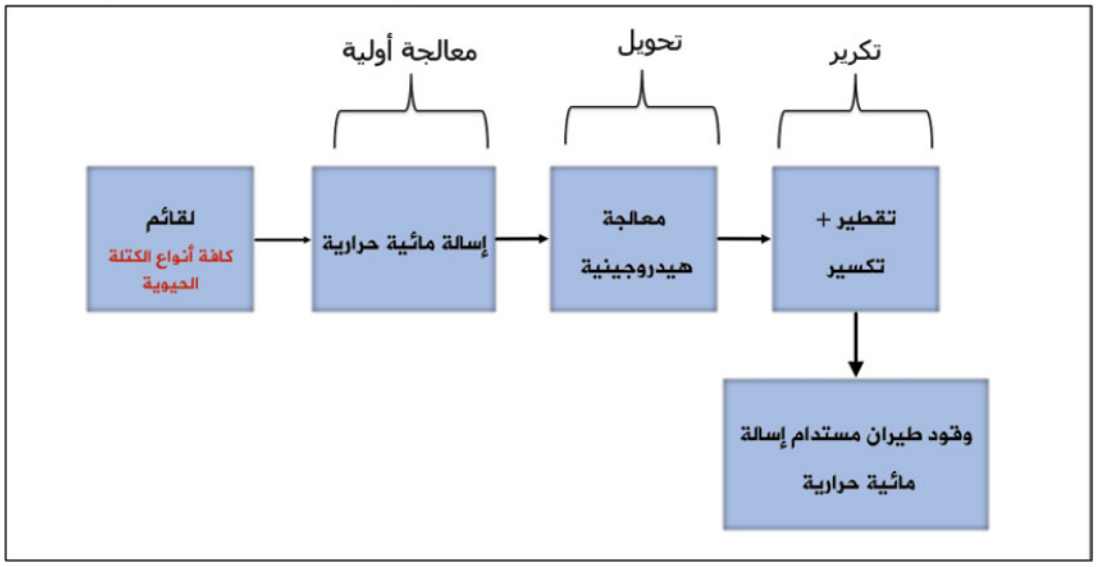
تعتمد طريقة الإسالة المائية الحرارية على تسخين الكتلة الحيوية الرطبة إلى درجة حرارة معتدلة، وتفاعل كيميائي حراري تحت ضغط مرتفع لإنتاج خام حيوي ذي محتوى منخفض من الأوكسجين مقارنة بالخام الحيوي المنتج بطريقة التحلل الحراري Pyrolysis، ومع ذلك يحتاج إلى عمليات معالجة لاحقة كالهدرجة والتقطير لإنتاج وقود الطيران. على عكس مسارات التحلل الحراري، يتميز مسار الإسالة المائية الحرارية بإمكانية استعمال طيف واسع من اللقائم بما في ذلك المحاصيل الليغنوسللوزية، والطحالب وبعض النفايات مثل روث الحيوانات وحمأة الصرف الصحي. يبين الشكل (2-6) مسار الإسالة المائية الحرارية لإنتاج وقود الطيران المستدام.

2-6: مسار التحلل الحراري

يعتمد مبدأ مسار التحلل الحراري على تحويل المحاصيل الليغنوسللوزية إلى فحم خشبي حيوي صلب وزيت حيوي سائل، وذلك على ثلاثة أنواع وبدرجات حرارة مختلفة. يسمى النوع الأول بالتحلل

الحراري السريع Fast pyrolysis ويتم في درجة حرارة 500 °م، لإنتاج أكبر كمية ممكنة من الزيت الذي يعالج لنزع الأوكسجين منه بوجود عامل حفاز حتى يصبح جاهز للاستهلاك والمزج مع الوقود النفطي.

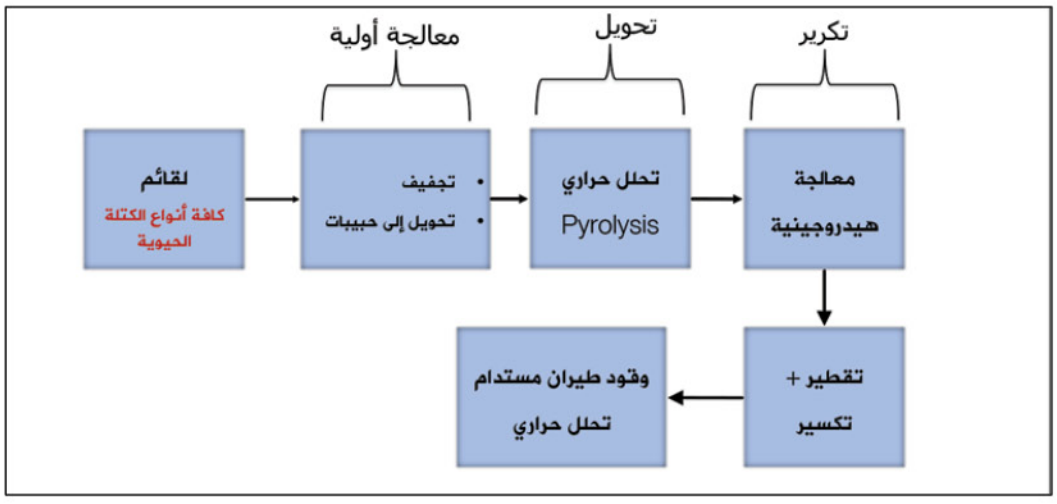
الشكل (2-6): مسار الإسالة المائية الحرارية لإنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

تتم عملية نزع الأوكسجين إما بإضافة الهيدروجين فقط أو مع تفاعلات التكسير. بعد ذلك يتم تقطير الزيت المعالج لإنتاج أنواع متعددة من الوقود الحيوي بما في ذلك وقود الطيران المستدام. يمكن دمج مرحلتي التحلل الحراري وتحسين خصائص الزيت بالمعالجة الهيدروجينية في عملية واحدة، إلا أن هذه التقنية مازالت في مرحلة التطوير. يبين الشكل (2-7) مسار التحلل الحراري لإنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (2-7): مراحل مسار التحلل الحراري لإنتاج وقود الطيران المستدام

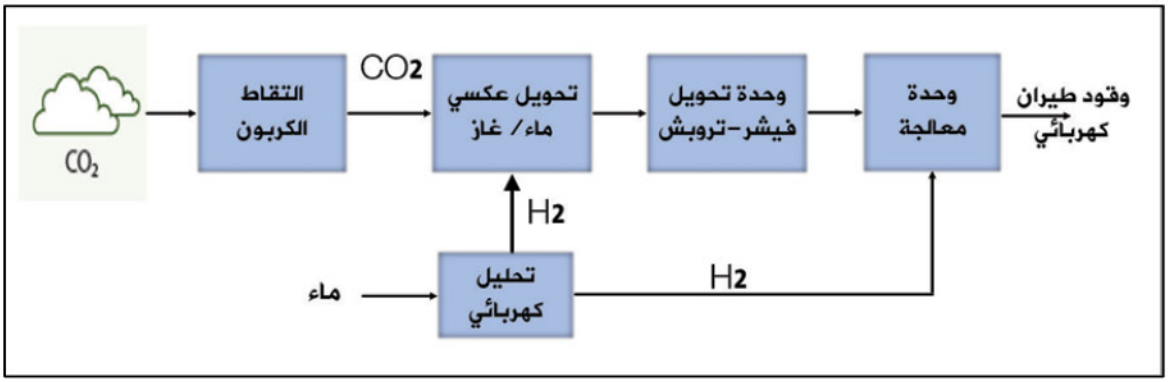


المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-7: مسار الوقود الكهربائي Electro-fuel

ينتج الوقود الكهربائي من تفاعل الهيدروجين وغاز ثاني أوكسيد الكربون الذي ينتج عنه أول أوكسيد الكربون وماء. وعندما يندمج أول أوكسيد الكربون بالهيدروجين يتكون غاز اصطناعي يعالج بتقنية فيشر- تروبش لتحويله إلى وقود يسمى الوقود الكهربائي e-Fuel. يبين الشكل (2-8) مسار إنتاج وقود الطيران الكهربائي.

الشكل (2-8): مسار إنتاج وقود الطيران الكهربائي



المصدر: (Bernard, Y., 2023)

من سلبيات عملية إنتاج وقود الطيران الكهربائي أنها تحتاج إلى كمية كبيرة من CO_2، وحيث أن عملية التقاطه من مداخن حرق الوقود مثل محطات إنتاج الطاقة الكهربائية أو من أفران مصافي تكرير النفط لا تتضمن التقاط غازات الدفيئة مما يؤدي إلى ارتفاع تركيزها في الهواء الجوي، لهذا يفضل أن يتم تأمين هذه الكمية من عملية التقاط غاز الكربون من الجو مباشرة Direct Air Capture، بحيث يمكن تعويض الزيادة في كمية CO_2 التي تنطلق من عملية أخرى يصعب التحكم بها مثل عمليات نقل المواد الزراعية واستخدام الأسمدة وغيرها. ومن المساوئ الأخرى لعملية إنتاج الوقود الكهربائي ارتفاع تكاليف إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون اللازم لإنتاج الوقود الكهربائي. (Fantuzzi, A., et al., 2023)

2-8: مسار المعالجة المشتركة

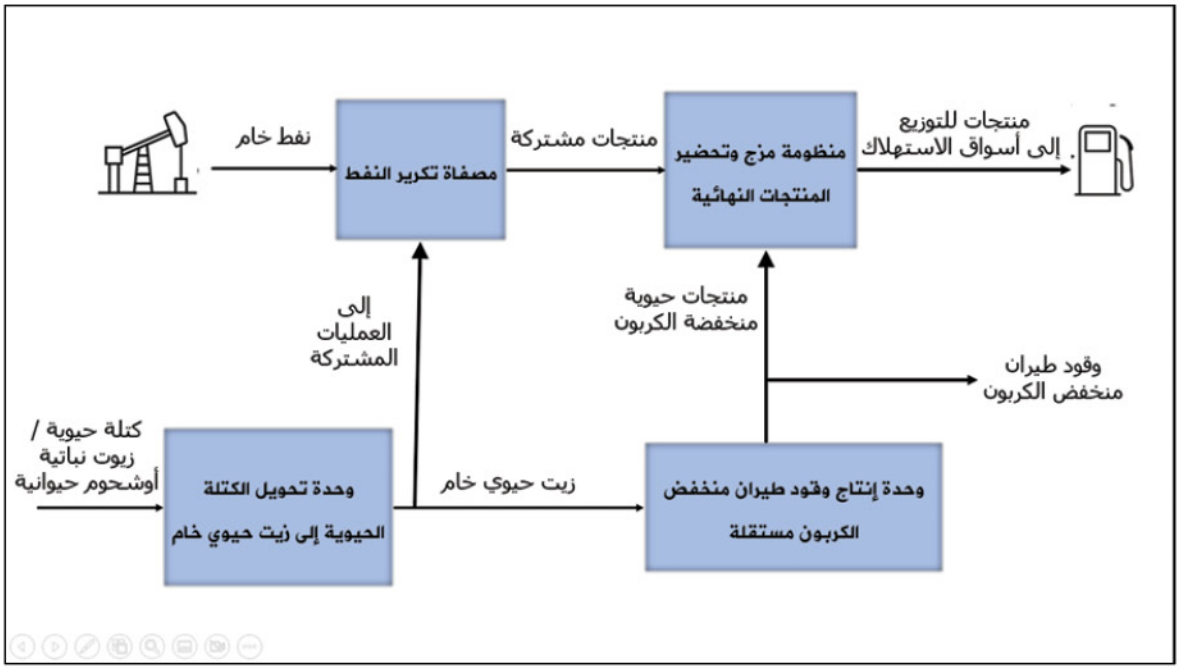
يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد خام متجددة فقط أو إنشاء

مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها. وبالتالي يمكن خفض تكاليف الاستثمار لإنتاج الوقود الحيوي وكذلك تقليل المخاطر. وهناك تجارب عديدة ناجحة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

أظهرت نتائج العديد من الدراسات أن وقود الطيران المستدام SAF هو النوع الأكثر قابلية للاستخدام على المدى القريب والمتوسط في إطار التوجه نحو نزع الكربون، ومع ذلك فإنه لايزال هناك العديد من التحديات التي تواجه إنتاج هذا النوع من الوقود، يأتي في مقدمتها ارتفاع تكاليف الإنتاج مقارنة بالكيروسين المنتج من النفط في مصافي التكرير، والثاني صعوبة الحصول على المواد الخام اللازمة لإنتاج الوقود المستدام.

ونظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون وإعلان العديد من شركات النفط الكبرى عن استراتيجياتها للحد من البصمة الكربونية لعملياتها ومنتجاتها بحلول عامي 2030 و2050 فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF). يبين الشكل (2-9) خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط.

الشكل (2-9): خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط



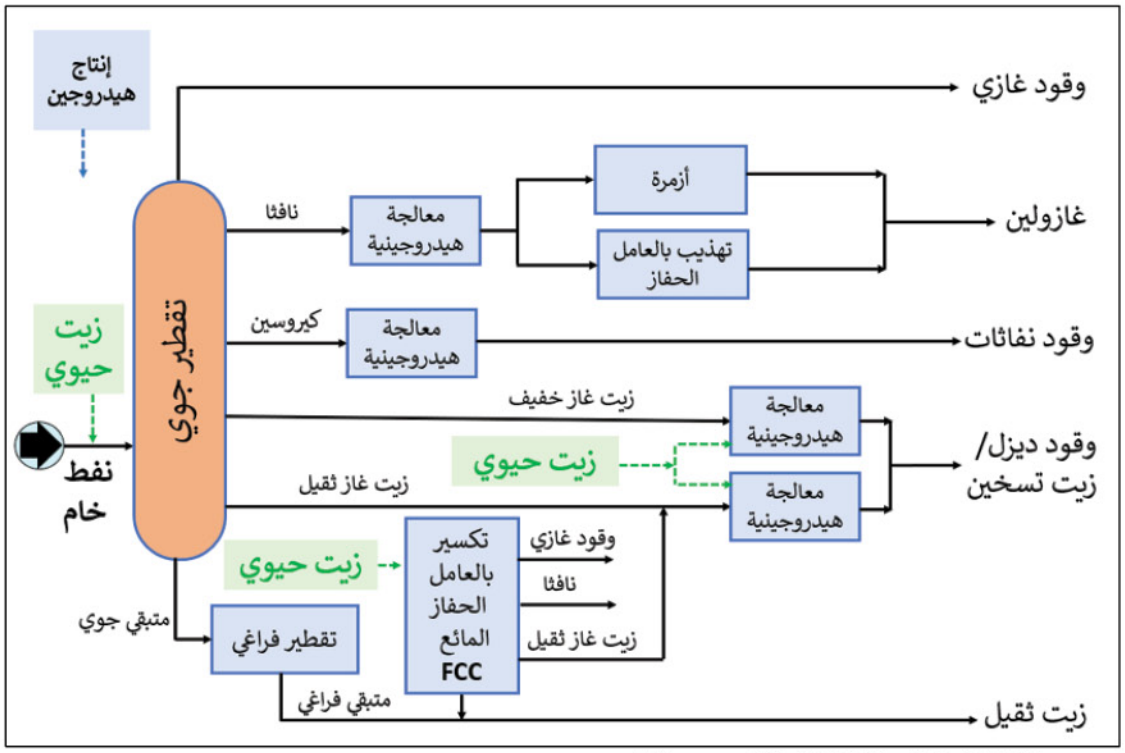
المصدر: (Sayles, S & Ohmes, R., 2021)

يعتمد قرار اختيار الطريقة الأمثل لتكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط على عدة عوامل، مثل توفر طاقة فائضة في وحدات المعالجة الهيدروجينية، وإمكانية تأمين الزيوت الخام الحيوية وخصائصها. فعلى سبيل المثال، يتميز مسار إنشاء وحدة معالجة هيدروجينية منفصلة بالاستفادة من الخدمات المتوفرة في المصفاة مثل الخزانات والأنابيب ووحدات إنتاج الهيدروجين ووحدات توليد بخار الماء والكهرباء، ووحدات معالجة المياه، ومنظومة الشعلة وغيرها.

يمكن أن تتم العمليات المشتركة لتكرير المواد المشتقة من المصادر الحيوية إلى جانب المواد النفطية في بعض وحدات المصفاة، مثل وحدات تقطير النفط الخام، وعملية التكسير الحراري، وعملية التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، وعمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني.

(Avery M., and Strohm, J., 2021) يبين الشكل (2-10) العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-10): العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Wagner DA SILVA, M., 2022)

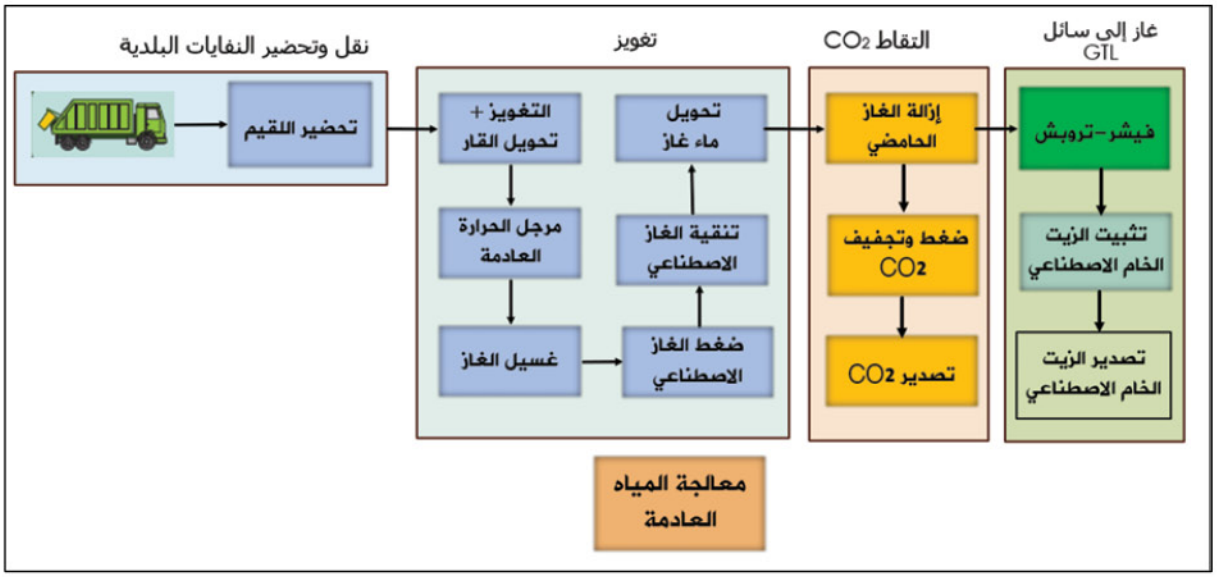
يمكن استخدام الزيت الخام الحيوي في العمليات المشتركة في مصفاة النفط، أو كلقيم في وحدة مستقلة لإنتاج الوقود المنخفض الكربون من الزيوت النباتية المستعملة، أو الشحوم الحيوانية أو النفايات البلدية.

تتكون عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي من أربعة مراحل رئيسية، وهي على النحو التالي:

- مرحلة تحضير النفايات وإزالة الشوائب.
- مرحلة التغويز، وغسيل الغاز الاصطناعي وضغطه.
- مرحلة تحويل الغاز إلى سائل باستخدام تقنية فيشر -تروبش
- مرحلة تثبيت الزيت الحيوي الخام.

كما تحتوي وحدة تحويل النفايات البلدية إلى زيت حيوي خام على مرافق خدمية كمنظومة التقاط غاز ثاني أوكسيد الكربون وتنقيته وتحضيره للتصدير، إضافة إلى وحدة معالجة مياه ملوثة. يبين الشكل (2-11) مخطط عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي.

الشكل (2-11): مخطط عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي



المصدر: Barbara, L., & Galea, C., 2024

2-9: تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون

يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير، ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع، وحتى مرحلة الاستهلاك. وفيما يلي أهم التقنيات الممكن تطبيقها في مراحل دورة حياة وقود الطيران المنخفض الكربون.

2-9-1: تقنيات خفض كثافة الكربون في مرحلة إنتاج النفط

أهم تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون في مرحلة حقول إنتاج النفط هي، (1) استخدام الطاقة المتجددة، (2) إدارة الحرق على الشعلة والحد من تسرب الغازات الهيدروكربونية الطيارة، و (3) واصطياد الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **استخدام الطاقة المتجددة**

إحدى الطرق الممكنة لاستخدام الطاقة المتجددة في حقول النفط هي استخدام منظومات الطاقة الشمسية لتوليد الحرارة أو بخار الماء اللازم لعمليات الاستخلاص المحسن للنفط (EOR) بدلاً من حرق الغاز الطبيعي أو الوقود الأحفوري.

من الطرق الأخرى لتطبيق الطاقة المتجددة في مرحلة إنتاج النفط استخدام الخلايا الكهروضوئية وتوربينات الرياح لتوليد الكهرباء اللازمة لتشغيل الضواغط ومضخات نقل النفط والغاز من خزانات التجميع إلى محطات المعالجة، عمليات الإنتاج الأخرى، أو لاستخدامها في التجمعات السكنية القريبة من الحقول.

وعلى الرغم من أن هذه التقنيات لا تساهم بتخفيض نسبة مهمة من إجمالي انبعاثات عمليات إنتاج النفط إلا أن الدراسات أشارت إلى أن استخدام الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية في حقول النفط لتغطية الطلب على الكهرباء للمنشأة، يمكن أن يؤدي إلى تخفيض في كثافة كربون وقود الطيران بنحو 0.36 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول. وتقدر التكاليف المرتبطة باستخدام الطاقة المتجددة في نطاق 1.91-4.13 دولار أمريكي/طن مكافئ نفط. أو ما يعادل 132-290 دولار أمريكي/ طن مكافئ ثاني أوكسيد الكربون يتم تخفيضه في عملية إنتاج النفط. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **إدارة حرق الغاز على الشعلة وتنفيس وتسرب الغازات**

تعتبر عمليات حرق الغاز على الشعلة والانبعاثات المتسربة من المصادر المهمة لانبعاثات غازات الدفيئة من عمليات إنتاج النفط، وبالتالي فإن تطبيق برامج المراقبة والكشف المبكر عن التسربات يمكن أن يساهم في خفض كثافة الكربون للنفط المنتج بمعدل يصل إلى 10.3 غرام مكافئ ثاني أوكسيد الكربون/ ميجا جول من إجمالي كثافة الكربون الناتجة عن مرحلة إنتاج النفط. إلا أن هذه الكمية تتغير من حقل لآخر بتأثير عدة عوامل مثل نسبة الغاز المحروق إلى النفط المنتج، حسب تقنيات الإنتاج المستخدمة، فقد تتراوح من منخفضة إلى متوسطة أو مرتفعة. كما أن كمية الغازات المتسربة تتأثر بمدى تطبيق برامج

الصيانة الوقائية والدورية للمعدات ونظم الكشف عن التسربات وإصلاحها. يبين الجدول (2-2) تكاليف تقنيات خفض كثافة الكربون في حقول إنتاج النفط. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الجدول (2- 2): تكاليف تقنيات خفض كثافة الكربون في حقول إنتاج النفط

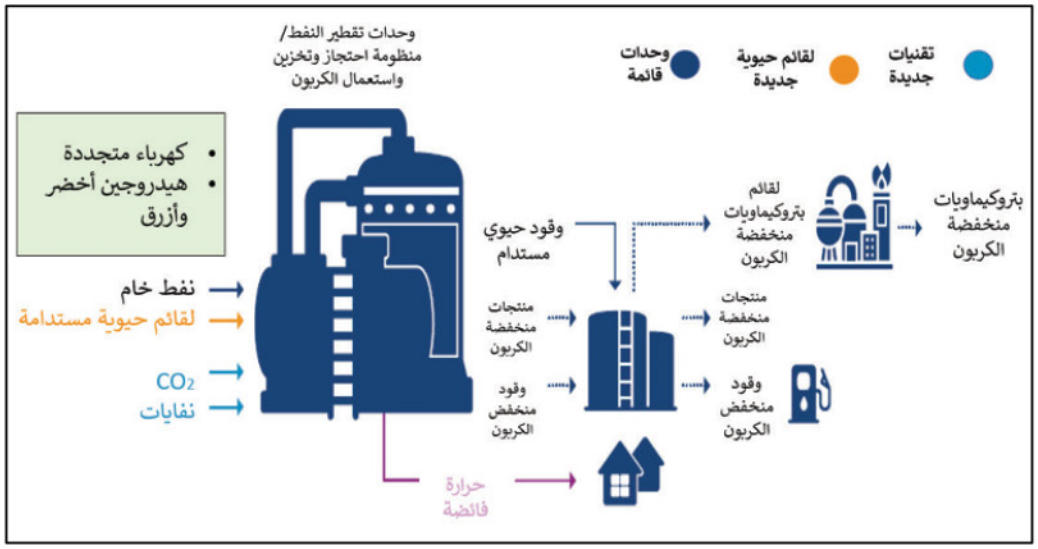
تقنيات تخفيض انبعاثات وقود الطيران في مرحلة إنتاج النفط	مقدار خفض كثافة الكربون (CO_2غ مكافئ/ميغا جول)	تغير كلفة إنتاج النفط	تكلفة التخفيض CO_2 دولار/طن مكافئ
استخدام الطاقة المتجددة في حقل النفط	0.36 – 0.35	4.13- 1.91	290-132
سياسة معتدلة لخفض الحرق على الشعلة	1.5	10^{-4} * 2.32	3.23
سياسة صارمة لخفض الحرق على الشعلة	1.9	10^{-4} * 2.93	4.1
خفض الانبعاثات والتسربات الهاربة	2.3	0.57	15.91

المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

2-9-2: تقنيات تخفيض كثافة الكربون في مرحلة تكرير النفط

فيما يتعلق بإمكانية تخفيض كثافة الكربون لوقود الطيران وتحويله إلى منتج بكثافة كربون منخفضة LCAF في مرحلة تكرير النفط، يمكن اعتماد العديد من التقنيات، أهمها: (1) اصطياد الكربون واستعماله وتخزينه (CCUS)، (2) إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر، و (3) استخدام الحرارة والطاقة من مصادر الطاقة المتجددة في المصفاة، و (4) ترشيد استهلاك الطاقة تحسين كفاءة استخدامها، و(5) تكرير لقائم حيوية مستدامة. يبين الشكل (2-12) تقنيات خفض كثافة الكربون في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-12): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **اصطياد وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون CCUS**

تعتبر تقنية اصطياد واستعمال وتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون من الحلول الناجعة لخفض الانبعاثات الناتجة عن مصافي تكرير النفط، حيث ينقل CO_2 المحتجز إلى أماكن مناسبة لحقنه في طبقات آبار النفط والغاز الناضبة أو طبقات المياه الجوفية المالحة.

تأتي انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في مصافي تكرير النفط من عدة مصادر منفصلة، أهمها (1) أفران التسخين في وحدات عمليات التكرير، (2) المرافق (توليد الكهرباء وبخار الماء)، (3) وحدة التكسير بالعمل الحفاز المائع (FCC)، (4) ووحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان SMR. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

تعتمد فعالية تقنية اصطياد الكربون على تركيز ثاني أوكسيد الكربون في غاز المداخن، فكلما زاد تركيز ثاني أوكسيد الكربون زادت الفعالية، وحيث أن نسبة مصادر انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في العمليات الرئيسية في مصفاة تكرير النفط تختلف من مصدر لآخر، نجد أن انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن وحدات إنتاج الهيدروجين تمثل نسبة 5-20% من إجمالي انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في المصفاة، وتمثل أفران التسخين في وحدات عمليات التكرير 30-60% من إجمالي ثاني أوكسيد الكربون (حسب نوع الوقود المستخدم) ، والمرافق (توليد الكهرباء وبخار الماء) 20-50% ، ولوحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC 20-50%.

تصنف طرق اصطياد غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 في مصافي تكرير النفط ضمن ثلاثة أنواع على النحو التالي:(Jha, A., et al., 2021p. 31-37)

- طريقة اصطياد بعد الاحتراق Post-combustion، التي تتضمن فصل CO_2 من غازات احتراق الوقود الخارجة من مدخنة الفرن.
- طريقة اصطياد قبل الاحتراق Pre-combustion، التي تعتمد على تحويل الوقود الثقيل إلى وقود غازي يمكن فصل CO_2 منه بالامتصاص قبل استخدامه كوقود في الأفران.
- طريقة حرق الوقود باستخدام الأوكسجين النقي بدلاً من الهواء الجوي Oxyfuel process، وتسمى أيضاً بطريقة الأكسدة الجزئية Partial Oxidation ، وذلك بهدف الحصول على غازات احتراق الوقود على شكل غاز CO_2 نقي. (أوابك، 2023)

- **خفض انبعاثات وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC**

تهدف عملية التكسير بالعامل الحفاز المائع إلى تحويل المخلفات البترولية الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة مثل الغازولين والبروبان والبيوتان وزيت الوقود، وذلك من خلال تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة إلى سلاسل أقصر باستخدام الحرارة وعامل حفاز مصنوع من الزيوليت.

أثناء عملية التكسير تتجمع الجزيئات الكربونية داخل تجاويف حبيبات العامل الحفاز وتغلفها على شكل طبقة من فحم الكوك، وهذا يضعف من فعالية العامل الحفاز، مما يستدعي ضرورة حرق هذه الطبقة في وعاء التنشيط ليعاد استعماله في الوحدة. (BYRUM, Z., et al., 2021)

تحتوي غازات المدخنة الناتجة عن تنشيط العامل الحفاز على حوالي 10-20% وزناً من CO_2، كما تبلغ كمية CO_2 المنبعثة من وحدة تكسير بالعامل الحفاز المائع طاقتها الإنتاجية 25 ألف ب/ي حوالي 630 طن/اليوم (200 ألف طن/السنة) (Singh, R. B., 2022)

يوجد طريقتان لاحتجاز CO_2 المنبعث من وحدة FCC بعد الاحتراق، الأولى طريقة الاحتجاز بامتصاص CO_2 بالمذيب، والثانية طريقة الاحتراق بوجود الأوكسجين Oxy-combustion. أما طريقة الامتصاص بالمذيب فهي مماثلة من حيث المبدأ للمنظومة المستخدمة في أفران عمليات التكرير، ووحدة التهذيب البخاري للنافثا. الفرق الرئيسي بينهما هو الحاجة إلى معالجة غازات المدخنة قبل إدخالها إلى منظومة الامتصاص بالمذيب نظراً لاحتوائها على نسب من المركبات الأخرى التي تفوق الحد المسموح للتعامل مع محاليل الأمين، مثل الجسيمات الصلبة Particulates، وأكاسيد الكبريت SOx، وأكاسيد النتروجين NOx.

تبلغ تكلفة احتجاز CO_2 في وحدة التكسير بالعامل الحفاز بطريقة الامتصاص بالمذيب نحو 50 دولار أمريكي للطن، بينما تصل تكلفة احتجاز الطن الواحد من CO_2 مع عمليات الضغط والنقل والتخزين إلى نحو 70-120 دولار أمريكي. (BYRUM, Z., et al., 2021)

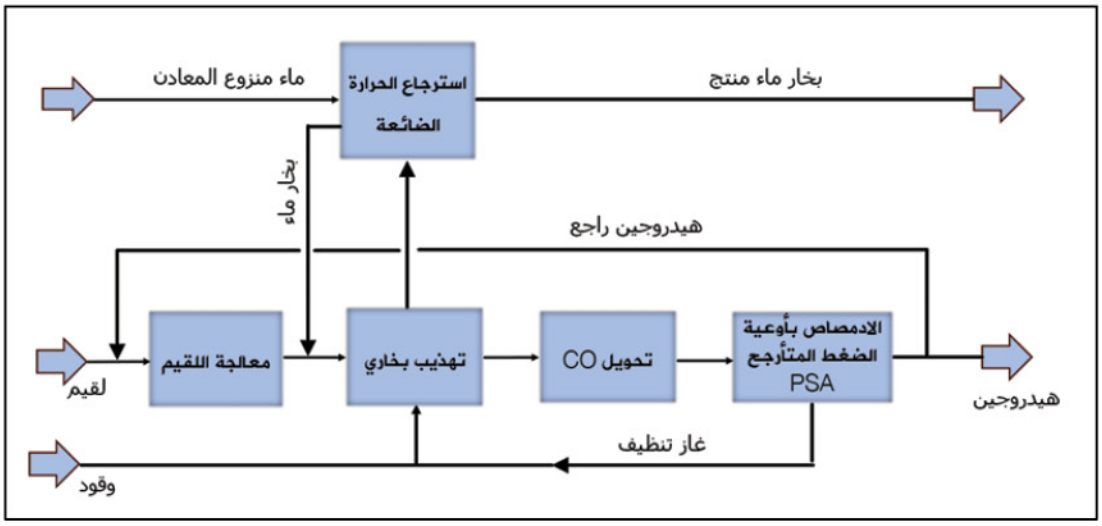
- **خفض انبعاثات وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان**

يستخدم الهيدروجين في مصافي تكرير النفط لمعالجة المنتجات البترولية وتخليصها من الكبريت والشوائب الأخرى بعملية تسمى المعالجة الهيدروجينية Hydrotreatment، ولتحسين خصائص بعض البواقي الثقيلة وتحويلها إلى منتجات خفيفة عالية القيمة من خلال تكسير السلاسل الكربونية

الطويلة ورفع نسبة الهيدروجين إلى الكربون في المنتجات بعملية تسمى التكسير الهيدروجيني Hydrocracking. (أوابك، 2024)

تتكون مراحل عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري من أربع مراحل رئيسية، يتم في المرحلة الأولى معالجة هيدروجينية أولية للقيم لتخليصه من المركبات الكبريتية، بعد ذلك يمزج الخارج من هذه المرحلة مع بخار الماء ليدخل إلى مفاعل التهذيب البخاري للميثان Steam Methane Reformer الذي يحتوي على عامل حفاز ضمن أنابيب داخل فرن للتسخين، لتعويض الحرارة اللازمة للتفاعل، حيث أن التفاعل ماص للحرارة Endothermal Reaction، وتؤخذ نواتج التفاعل التي تتكون من الهيدروجين وأكاسيد الكربون إلى وعاء لتحويل غاز أول أوكسيد الكربون CO إلى ثاني أوكسيد الكربون CO_2 مفاعل التحويل Shift reactor أما المرحلة الرابعة فهي مرحلة التنقية والتي تتكون من مفاعلات امتصاص لنزع أكاسيد الكربون المتبقية، تتبعها مرحلة تحويل الجزء المتبقي من أول وثاني أوكسيد الكربون إلى ميثان Methanation، وتصل فيها نقاوة الهيدروجين إلى 94-97%. وفي عقد الثمانينات من القرن الماضي ظهرت طريقة جديدة للتنقية باستخدام الادمصاص بأوعية الضغط المتأرجح Pressure Swing Adsorber-PSA، حيث تصل فيها نقاوة الهيدروجين المنتج إلى 99.9%. (Chlapik, et al., 2022) يبين الشكل (2-13) مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان.

الشكل (2-13): مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان



المصدر: (أوابك ، 2024)

ينتج CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان من ثلاثة مصادر هي: غازات مدخنة مفاعل التهذيب، والغاز العادم من وحدة التنقية بطريقة الادمصاص تحت الضغط المتأرجح، ومن عملية تحويل الغاز الاصطناعي Shifted syngas (Ko & SIVASUBRAMANIAN, 2022)

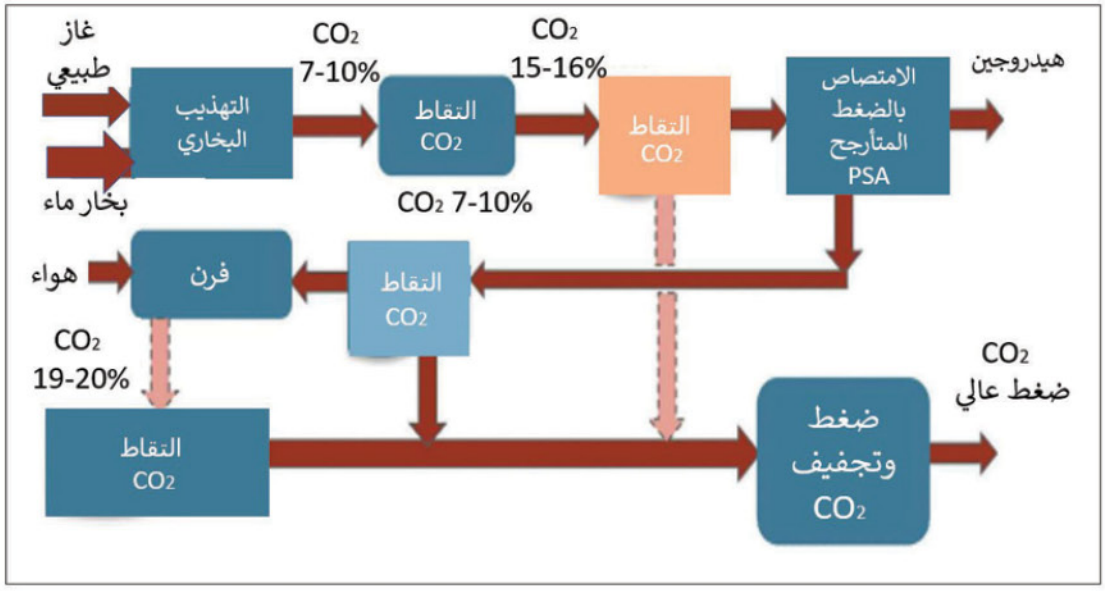
يبين الجدول (2-3) خصائص ومصادر التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR طاقتها 70 ألف م^3 قياسي/الساعة. كما يبين الشكل (2-14) خيارات التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR.

الجدول (2-3): خصائص ومصادر التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR

المصدر	الضغط، بار	درجة الحرارة، °م	CO_2، مول%	CO_2، طن/اليوم
مدخل التنقية PSA	26	35	16	870
الغاز العادم من PSA	1.3	30	50	870
غاز المدخنة	0	130	20	1450

المصدر: (Singh, R. B.,2022)

الشكل (2-14): خيارات التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR



المصدر: (Singh, R. B.,, 2022)

باستخدام نموذج البرمجة الخطية (LP) أظهرت النتائج أن التقاط ثاني أوكسيد الكربون وتخزينه في عمليات مصافي تكرير النفط يمكن أن يؤدي إلى توفير 3.86 غ مكافئ ثاني أوكسيد الكربون/ ميجا جول

من إجمالي كثافة الكربون لوقود الطيران النفطي، وأن التكلفة المقدرة لالتقاط وتخزين ثاني أوكسيد الكربون 0.09 دولار أمريكي/ غالون من النفط الخام المكرر، أو ما يعادل 171 دولار أمريكي/ طن مكافئ ثاني أوكسيد الكربون.

تجدر الإشارة إلى أن تكلفة اصطياد وتخزين CO_2 تختلف من مصفاة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة كنوع الوحدات الإنتاجية، والمرافق الموجودة في المصفاة وتركيز غاز ثاني أوكسيد الكربون في الغازات المراد تركيب منظومة الاصطياد عليها، ومسافة الموقع المحتمل لتخزين CO_2.

- **إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون واستعماله**

يعتبر الهيدروجين المنخفض الكربون أحد الحلول الناجعة لخفض انبعاثات الكربون في المنشآت الصناعية، وخصوصاً بالنسبة لمصافي تكرير النفط، وذلك من خلال تطبيق التقنيات التالية:

- تطبيق تقنية التقاط وخزن CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين الرمادي بطريقة التهذيب البخاري (تبلغ كمية CO_2 الملتقطة نحو 1.2-1.5 كغ مكافئ لكل كغ هيدروجين منتج، بكفاءة التقاط ضمن المجال 90-98%).
- استخدام لقائم حيوية لإنتاج الهيدروجين، حيث تبلغ كمية الانبعاثات (1-3.3 كغ مكافئ CO_2/كغ H_2)
- التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء من مصادر متجددة أو ما يسمى بتقنية إنتاج الهيدروجين الأخضر، وتبلغ كمية الانبعاثات (0.3-1 كغ مكافئ CO_2/ كغ H_2)

تشير الدراسات إلى أن استخدام الهيدروجين الأخضر، المنتج بطريقة التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتجددة، بدلاً من الهيدروجين المنتج بطريقة التهذيب البخاري للغاز الطبيعي أو النافثا SMR يمكن أن يؤدي إلى خفض انبعاثات الكربون بمقدار 0.54 غ مكافئ CO_2/ميغا جول، وأن الكلفة الإضافية لذلك تبلغ 4.45 دولار للطن من النفط الخام المكرر في المصفاة، أو ما يعادل 190 دولار للطن المكافئ لثاني أوكسيد الكربون. (Carter & Hickman, 2021)

كما يمكن استخدام أنواع عديدة من الطاقات المتجددة في مصافي النفط مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وغيرها تبعاً للموقع الجغرافي للمصفاة، بحيث يمكن أن يصل إجمالي تخفيض كثافة الكربون لوقود الطيران المنخفض الكربون في المصفاة إلى 4.4 غرام مكافئ CO_2/ ميغا جول. يبين الجدول (2-4) تقنيات خفض كثافة الكربون في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وتكاليفها (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الجدول (2-4): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وتكاليفها

تقنيات تخفيض انبعاثات وقود الطيران في مرحلة تكرير النفط	مقدار خفض كثافة الكربون (غ مكافئ CO2/ميغاجول)	تغير كلفة إنتاج النفط	تكلفة التخفيض دولار/طن مكافئ CO_2
التقاط الكربون في عمليات المصفاة	3.86	28.60	171
إنتاج الهيدروجين من مصادر متجددة	0.54	4.45	190

المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها**

تعتبر إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة من أفضل الوسائل الممكنة لتخفيض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 المنبعثة من حرق الوقود في أفران عمليات التكرير.

تقسم إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة التي تساهم في خفض انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط إلى إجراءات بدون تكاليف أو بتكاليف بسيطة، وإجراءات متوسطة أو مرتفعة التكاليف.

أهم الإجراءات التي لا تحتاج إلى تكاليف أو بتكاليف بسيطة، هي ما يلي:

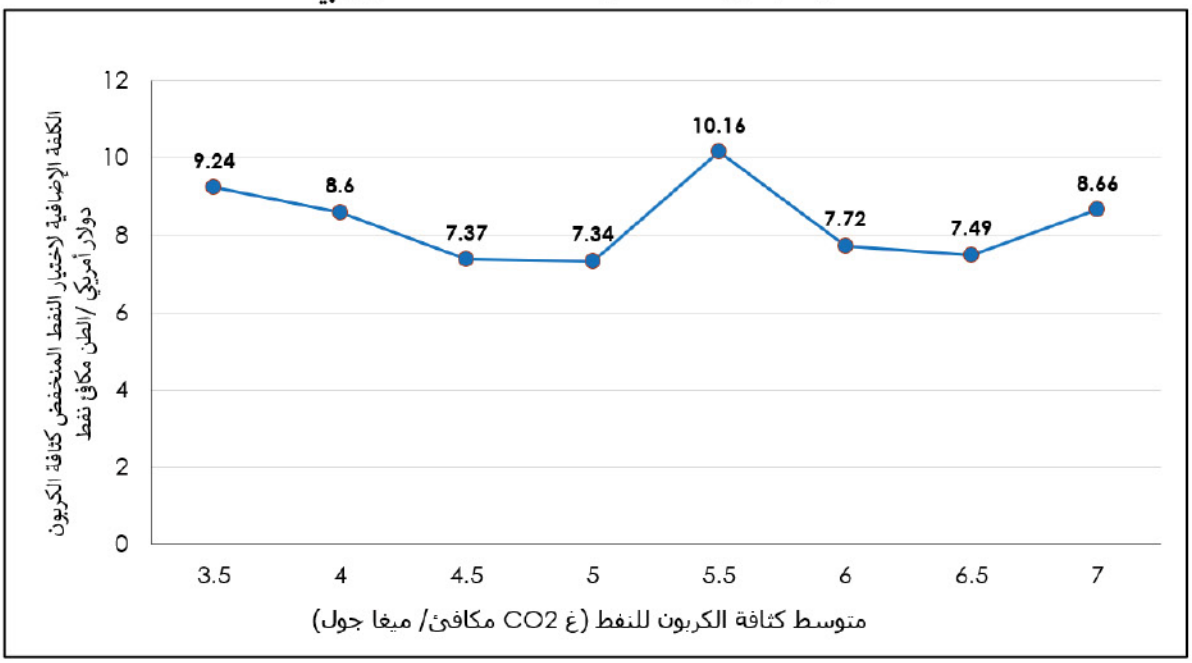
- **تنظيم ظروف تشغيل العمليات**، وذلك بهدف خفض استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى مع المحافظة على كفاءة العملية، مثل تخفيض نسبة الراجع إلى أبراج الفصل إلى الحد الأدنى.
- **تحسين عمليات الصيانة الدورية للمعدات** لتفادي الأعطال والتوقفات الطارئة التي ينتج عنها مخلفات ومنتجات خارجة عن المواصفات تحتاج إلى عمليات إعادة تكرير تستهلك طاقة إضافية.
- **تكرير نفط خام بمواصفات عالية الجودة** ذات كثافة خفيفة وغير حامضية وتحتوي على نسب منخفضة من الشوائب، حيث أن الأنواع الجيدة لا تحتاج إلى معالجة عميقة لنزع الشوائب منها وبالتالي يكون استهلاكها للطاقة أقل.
- **خفض غازات تنفيس المعدات والأوعية الناتجة عن** تنفيس محتويات الأوعية من الغازات الهيدروكربونية إلى الجو لتخفيض الضغط الزائد عن القيم التشغيلية النظامية، إضافة إلى الغازات التي تنطلق من خزانات النفط والمنتجات ومحطات تحميل وتفريغ المنتجات. وللحد من طرح هذه الغازات إلى الجو يمكن تركيب منظومة استرجاع حيث يتم تجميعها في خزان خاص ومعالجتها واستخدامها كوقود في الأفران

- **المحافظة على نظافة المبادلات الحرارية** وإزالة الرواسب المتراكمة على سطوح الأنابيب التي تمنع انتقال الحرارة وتسبب زيادة استهلاك الوقود في الفرن، أو ما تسمى بظاهرة الاتساخ، Fouling.
- **تحسين التكامل الحراري** بين الوحدات لتفادي التبريد المرحلي بين العمليات المتتالية.
- **صيانة مصائد البخار** والتأكد من سلامة عملها.
- **تحسين كفاءة حرق الوقود** من خلال ضبط نسبة الهواء الداخل إلى الحراقات، أو ما يطلق عليه بنسبة الهواء إلى الوقود، وبالتالي خفض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة.
- أما إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بتكاليف متوسطة فهي تركيب معدات جديدة أو تغيير المعدات القائمة بأخرى ذات كفاءة أعلى، أو ذات خصائص تساعد على تخفيض كمية الطاقة المستهلكة، من أهمها:
- **استبدال الأجزاء الداخلية لأبراج التقطير** والفصل بأنواع متطورة تساهم في تخفيض كمية الوقود المستهلكة في تسخين المادة الداخلة إلى البرج أو كمية الطاقة اللازمة لتبريد الراجع إلى البرج.
- **استبدال المبادلات الحرارية** بأنواع ذات كفاءة أعلى مصنوعة من معادن ذات خصائص تمكنها من نقل الحرارة بكفاءة أعلى.
- **استخدام عوامل حفازة متطورة** يمكنها الوصول إلى التفاعلات المطلوبة في المفاعل بدرجات حرارة وضغوط أخفض، وبالتالي يتم خفض كمية الطاقة اللازمة لتسخين المادة الداخلة إلى المفاعل.
- **الاستفادة من الحرارة الضائعة** من غازات المدخنة في عدة مجالات، كتسخين هواء الاحتراق الداخل إلى الحراقات، أو توليد بخار الماء، أو لتسخين الغازات الفائضة الداخلة إلى فرن الاتلاف لتوفير الوقود المستهلك.
- **استرجاع الهيدروجين من خطوط غازات المصفاة** التي تنتج في بعض عمليات التكرير كمنتج ثانوي، يحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين، حيث يمكن معالجتها ورفع ضغطها ثم إدخالها إلى عنفة غازية Gas Turbine لتوليد الطاقة الكهربائية بحيث تزود بمنظومة اصطياد غاز ثاني أوكسيد الكربون.

- **تكرير نفط خام منخفض كثافة الكربون**

توجد علاقة مباشرة بين كثافة الكربون للنفط الخام المكرر في المصفاة وكثافة الكربون للمنتجات النهائية ومنها كيروسين الطيران المنخفض الكربون. وحيث أن النفط الذي يتميز بكثافة كربون منخفضة يكون سعره أعلى من النفط ذي كثافة الكربون المرتفعة، فإن هذا الإجراء سيترتب عليه تكاليف إضافية عند حساب تكلفة إنتاج الكيروسين المنخفض الكربون. يبين الشكل (2-15) التكلفة الإضافية لاختيار أنواع مختلفة من النفط الخام تبعاً لكثافة الكربون مقارنة بمتوسط سعر خامات الاتحاد الأوروبي.

الشكل (2-15): التكلفة الإضافية لاختيار أنواع مختلفة من النفط الخام تبعاً لكثافة الكربون مقارنة بمتوسط سعر خامات الاتحاد الأوروبي



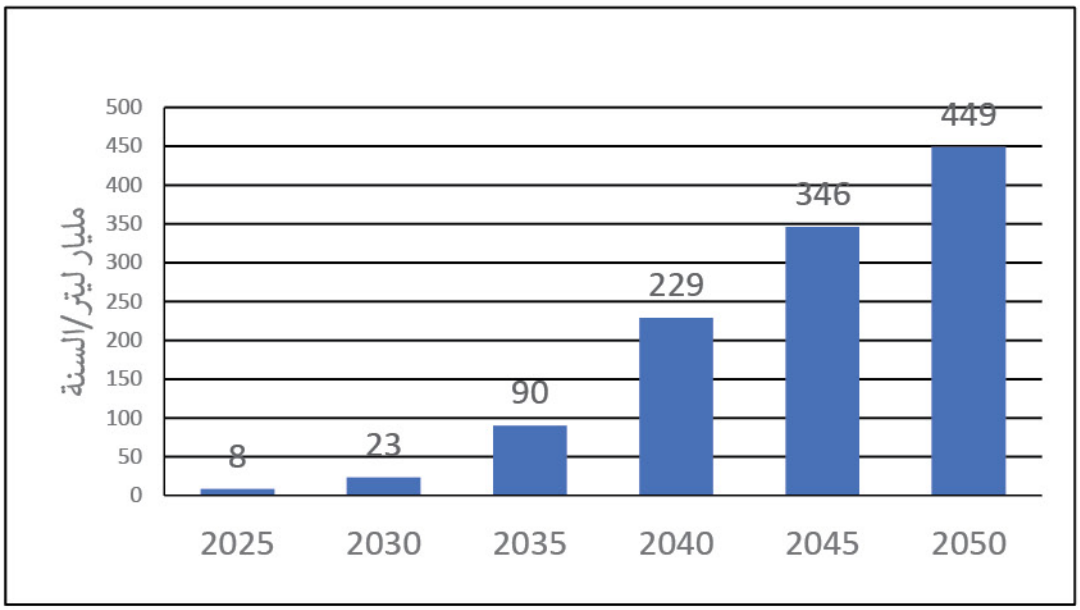
المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الفصل الثالث

تحديات إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تواجه عمليات إنتاج وقود الطيران المستدام صعوبات وتحديات عديدة لا يمكن حلها إلا من خلال دعم الحكومات للاستثمار وخلق أسواق مناسبة. فعلى الرغم من الدعم الكبير الذي تقدمه الحكومات في العديد من دول العالم لم تتجاوز كمية إنتاج وقود الطيران المستدام 600 مليون ليتر أو ما يعادل 0.2% من إجمالي الطلب العالمي على وقود الطيران في عام 2023. وحتى تتحقق خارطة طريق نزع الكربون في قطاع الطيران من المتوقع أن يصل الطلب على وقود الطيران المستدام إلى نحو 449 مليار ليتر/ السنة بحلول عام 2050. يبين الشكل (3-1) توقعات الطلب على وقود الطيران المستدام لتحقيق صفر انبعاثات بحلول عام 2050. (IATA, 2023)

الشكل (3-1): توقعات الطلب على وقود الطيران المستدام لتحقيق صفر انبعاثات في عام 2050



المصدر: (IATA, 2023)

من أهم الخصائص التي تساهم في انتشار استخدام وقود الطيران المنخفض الكربون المنتج من النفط أو الوقود الحيوي هي إمكانية مزجه مع الوقود النفطي التقليدي، وأن تتوافق خصائصه مع متطلبات المواصفات التي تحددها الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM 165521)، أو ما يعادلها

في معيار وزارة الدفاع البريطانية (Defence 91-9122)، إضافة إلى متطلبات الأداء التشغيلي والشروط التي تضمن سلامة محركات الطائرات الحالية دون الحاجة إلى إجراء أية تعديلات عليها. من هذه المواصفات القيمة الحراريةEnergy Content، ونقطة التجمدFreezing point، والثبات الحراري Thermal Stability، واللزوجة Viscosity، وخصائص الاحتراق Combustion Characteristics، وخاصية التزييت Lubricity، ومواصفات أخرى خاصة بوقود الطيران.

يعتمد تعزيز إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام على نطاق تجاري على عدة عوامل يرتبط معظمها بمواصفات المعايير الدولية، ومنح موافقات الإنتاج، وجاهزية التكنولوجيا، وفيما يلي شرح مبسط لهذه العوامل: (BOSCH, J., et al., 2017)

3-1: ارتفاع تكاليف الإنتاج

يمثل ارتفاع تكاليف الإنتاج العائق الأكبر لانتشار وقود الطيران المستدام، حيث تصل إلى 2.5-5 أضعاف تكلفة وقود الطيران التقليدي Jet A-1 (Barbara, L., & Galea, C., 2024)، إلا أنه من المتوقع أن تضيق الفجوة بين تكلفة النوعين بشكل تدريجي في المستقبل، وخصوصاً بعد تطبيق نظام تجارة الانبعاثات ETS. (Soone, J., 2020)

كما أن بعض التقنيات تتميز بارتفاع التكاليف الاستثمارية التي تمثل 50 إلى 70% من إجمالي تكاليف الإنتاج، مثل تقنية فيشر- تروبش بينما تشكل تكاليف المواد الأولية ما نسبته 10- 35%. ويمكن تخفيض تكاليف الإنتاج في تقنية فيشر- تروبش من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم، إلا أن تشغيل هذه التقنية بطاقة إنتاجية عالية ينشأ عنه صعوبات تتمثل في إمكانية نقل وتأمين المواد الأولية الكافية للمشروع.

أما تقنية الإستيرات والأحماض الدهنية المهدرجة HEFA فإن نسبة تكاليف المواد الأولية هي الأكبر من إجمالي تكاليف الإنتاج، حيث أنها تعتمد على الزيوت النباتية. كما أن استخدام الزيوت النباتية نشأ عنه مخاوف بيئية من استخدام الأراضي الزراعية لأغراض غير غذائية وتؤدي إلى ارتفاع أسعار المنتجات الزراعية الأخرى. وقد تمكنت بعض الدول الأوروبية من استخدام زيوت الطهي المستعملة التي يتم تجميعها من المطاعم لخفض تكاليف الإنتاج ووصلت نسبتها إلى حوالي 90% من إجمالي كمية الوقود الحيوي المنتج بهذه التقنية والبالغة حوالي مليون طن. ولتفادي مشكلة ارتفاع تكاليف نقل المواد الأولية هناك توجه نحو العمل على تصنيع أولي في موقع إنتاج الكتلة الحيوية ثم نقلها إلى وحدات إنتاج وقود الطيران المستدام. (Pavlenko, N., & Searle, S., 2021)

من جهة أخرى يحتاج الوقود المتجدد إلى بنية تحتية باهظة التكاليف، فعلى سبيل المثال، بدأت البرازيل بإنتاج الإيثانول الحيوي منذ عام 1970، وعلى الرغم من الدعم الحكومي الكبير فقد استغرقت مرحلة بناء سلسلة الإمداد أكثر من ثلاثين سنة إلى أن وصل معدل إنتاجها إلى مستوى يلبي حوالي 40% من إجمالي الطلب المحلي على وقود وسائل النقل، مما يدل على مدى تعقيد بناء سلسلة إمداد الوقود المتجدد.

3-2: انخفاض كفاءة عملية الإنتاج

يتطلب إنتاج وقود الطيران المستدام عملية عالية الكفاءة لتحويل المواد الخام إلى وقود قابل للاستهلاك، وذلك من حيث ارتفاع معدل استهلاك الطاقة، وصعوبة التخلص من النفايات الناتجة عن العملية.

3-3: غياب التوافق حول متطلبات الاستدامة

إن عدم وجود إجماع عالمي حول معايير موحدة لمتطلبات الاستدامة يؤدي إلى تردد منتجي الوقود المستدام وعدم القدرة على اختيار تكنولوجيا التصنيع المناسبة حيث من الممكن أن يسبب عدم التناسق الإقليمي حول معايير الاستدامة التي يجب على المنتجين الالتزام بها خلق بيئة تنافسية غير متكافئة وغير عادلة.

3-4: اختلاف السياسات بين الدول المتجاورة وتعقيد الإجراءات

يختلف الإطار العام لسياسة وخطط الاستدامة من دولة لأخرى، كما تختلف فيما بينها من حيث طريقة ونسبة الحوافز التي تقدمها مما يؤدي إلى تراجع المستثمرين عن المغامرة في إنتاج وقود الطيران المستدام

من جهة أخرى قد تستغرق إجراءات الموافقة على إدخال نوع جديد من الوقود للاستخدام في الطائرات عدة سنوات. فالموافقة لا تقتصر على هيئات اختبار مواصفات الوقود، إنما تتعلق أيضاً بمصنعي كل من محركات الطائرات وهياكلها. فعلى سبيل المثال استغرقت عملية الحصول على الموافقة لاستعمال وقود الطيران المنتج من مجمع "ساسول" لتحويل الفحم إلى سوائل بطريقة فيشر تروبش في جنوب أفريقيا فترة تزيد عن سبع سنوات، وبشرط عدم تجاوز نسبة مزجه مع الوقود النفطي عن 50%. علماً أنه إلى الآن لم تتم الموافقة على نسبة مزج تصل إلى 100% لأي نوع من أنواع الوقود الاصطناعي (BOSCH, J., et al., 2017)

3-5: صعوبة تأمين المواد الأولية اللازمة لإنتاج الوقود المستدام

تؤدي المنافسة على شراء المواد الخام اللازمة لتصنيع الوقود المستدام إلى اضطراب أسعارها وبالتالي ابتعاد المستثمرين عن الدخول في مشاريع غير مستقرة، وخصوصاً أن المواد الخام تشكل نسبة كبيرة من تكاليف التصنيع، وقد سجل العديد من حالات فشل الانتقال من وضع المشروع التجريبي إلى حالة الإنتاج التجاري بسبب ارتفاع تكاليف المواد الخام. أحد هذه المشاريع مشروع مصفاة Range Fuel الحيوية لإنتاج الإيثانول الحيوي في الولايات المتحدة الأمريكية طاقتها الإنتاجية 380 ألف لتر في السنة بتمويل من الحكومة ومستثمرين من القطاع الخاص، حيث استغرقت أعمال الإنشاء ثلاث سنوات، وبعد إنتاج أول كمية من الإيثانول في عام 2010 أعلن عن إفلاس المشروع بسبب ارتفاع تكاليف الحصول على الكميات المناسبة من المواد الخام.

3-6: الآثار البيئية السلبية لإنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تنجم الآثار البيئية الضارة لإنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام من انبعاثات غازات الدفيئة التي تتشكل خلال دورة حياة الوقود، بدءاً من إنتاج المواد الأولية، ثم عمليات الإنتاج وحتى الاستهلاك.

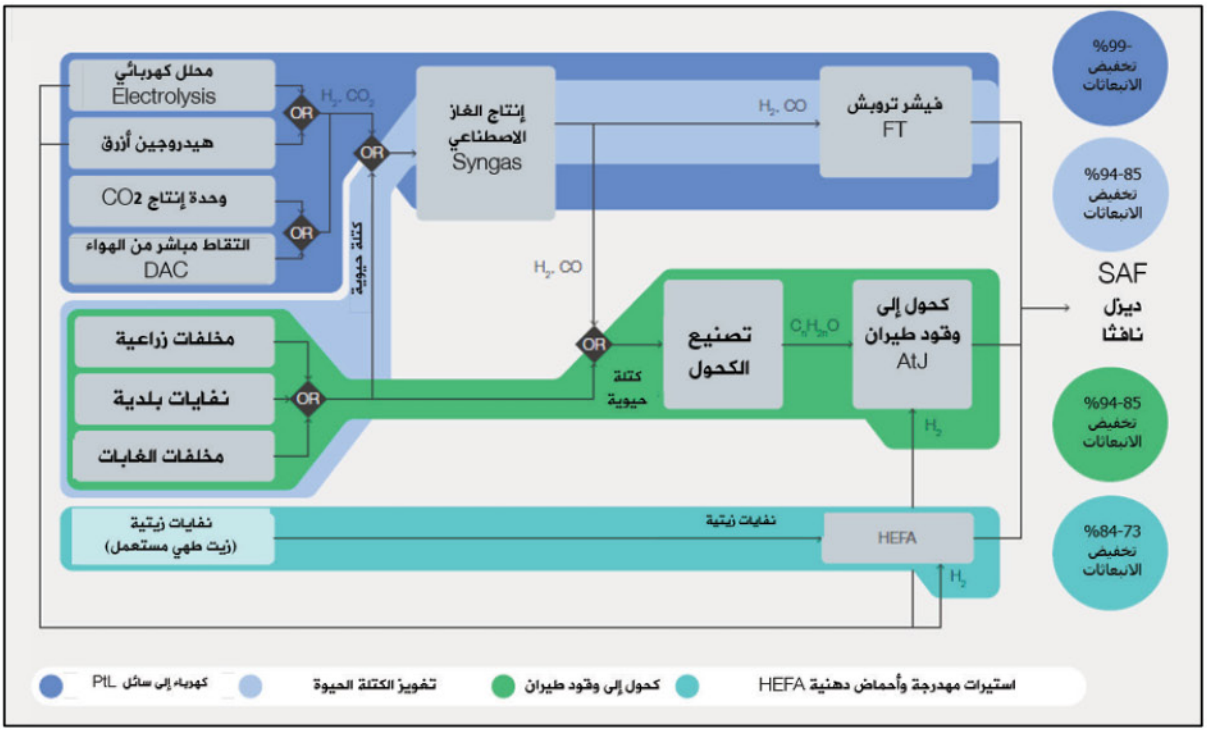
ففي مرحلة الإنتاج تختلف نسبة تخفيض انبعاثات حسب التقنية المتبعة في التصنيع ونوع الوقود المنتج، فعلى سبيل المثال تصل نسبة تخفيض الانبعاثات في تقنية تحويل الطاقة الكهربائية إلى سائل PtL حتى 99% بينما تتراوح نسبة التخفيض في تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية HEFA ضمن المجال (73-84%). يبين الشكل (3-2) نسبة تخفيض الانبعاثات لأهم تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام.

تكتسب انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن حرق وقود الطيران أهمية خاصة بالنسبة لتأثيرها على تغير المناخ، حيث أن الغازات التي تنطلق في المستويات العالية من طبقة الهواء الجوي يكون تأثيرها أكبر مقارنة بالغازات التي تنطلق على مستوى الأرض. كما يختلف تركيب غازات الاحتراق وشدة تأثيرها تبعاً لنوع الطائرة وكفاءة حرق الوقود. فبالإضافة إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون تتشكل أيضاً أكاسيد النتروجين التي تسبب تشكل غاز الأوزون في طبقات الجو المنخفضة.

من الانعكاسات الأخرى لإنتاج وقود الطيران المستدام هي الآثار البيئية التي تترافق مع استخدام الأراضي الزراعية التي كانت تستخدم لإنتاج الغذاء، فضلاً عن أضرار استخدام المبيدات الحشرية، وما

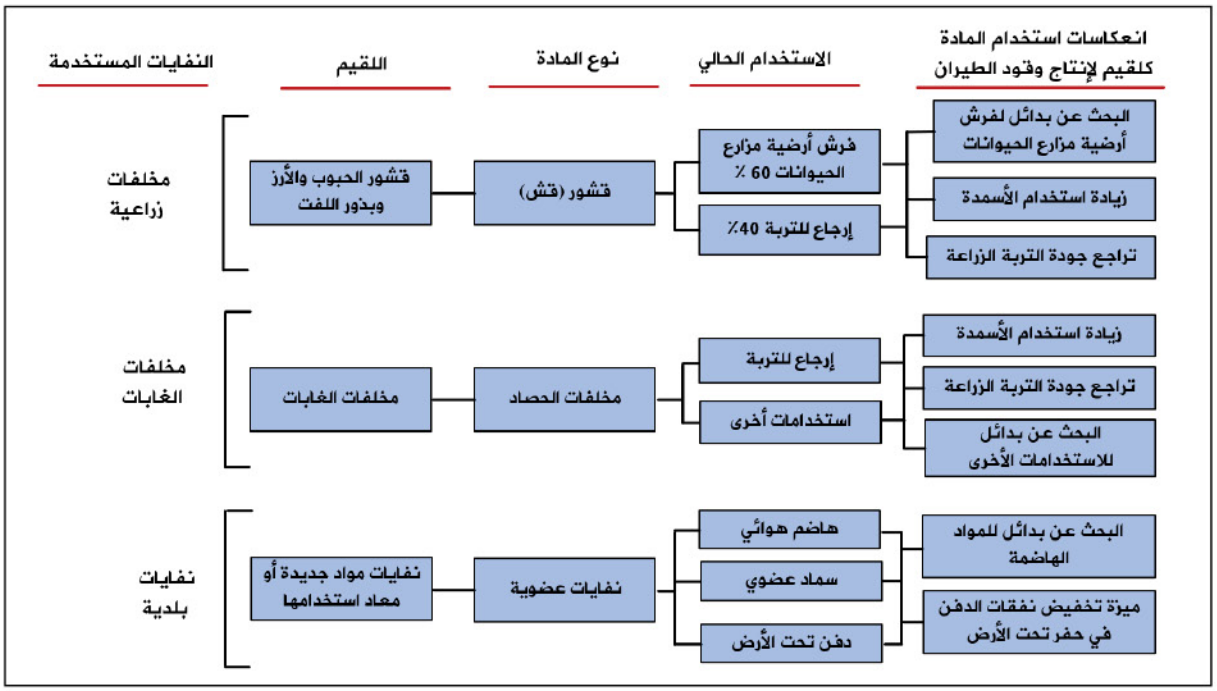
يتبعها من تأثير على التنوع البيولوجي. يبين الشكل (3-3) انعكاسات استخدام النفايات كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (3-2): نسبة تخفيض الانبعاثات لأهم تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: Barbara, L., & Galea, C., 2024

الشكل (3-3): انعكاسات استخدام النفايات كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Fantuzzi, A., et al., 2023)

وفيما يلي شرح لأهم انعكاسات استخدام المواد الزراعية المتجددة لإنتاج وقود الطيران المستدام.

3-6-1: انبعاثات غازات الدفيئة

يعتبر احتراق الوقود الحيوي محايداً لثاني أوكسيد الكربون، بافتراض أن الكمية المنبعثة مساوية لكمية ثاني أوكسيد الكربون التي أزالتها المادة الأولية (الكتلة الحيوية النباتية) من الغلاف الجوي أثناء عملية التمثيل الضوئي على مدار دورة حياتها. هذا صحيح بالنسبة للنباتات السنوية، حيث يتم امتصاص ثاني أوكسيد الكربون المنطلق من احتراق الوقود الحيوي بواسطة نبات جديد في العام التالي، أما الوقود الحيوي المنتج من مواد أولية مصنعة من النباتات المعمرة فإنه سيبقى في الغلاف الجوي لفترة أطول، حيث يستغرق النبات فترة زمنية أطول ليحل محل النبات المستهلك في تصنيع المواد الأولية. بالتالي، يساهم ثاني أوكسيد الكربون المنبعث في هذه الحالة بشكل أكبر في ظاهرة الاحتباس الحراري، حيث يظل في الغلاف الجوي لفترة أطول قبل أن تمتصه النباتات الجديدة. علاوة على ذلك، فإن عمليات الحصاد والمعالجة والنقل والعمليات الأخرى من سلسلة إمداد الوقود الحيوي تستهلك طاقة يمكن أن يؤدي إنتاجها إلى انبعاث غازات الدفيئة من خلال احتراق الوقود الأحفوري. فضلاً عن إمكانية تفاقم المشكلة نتيجة استخدام الهندسة الجينية للمواد الأولية.

3-6-2: الاستخدام المباشر وغير المباشر للأراضي الزراعية

عندما تزرع مساحة أرض لم تكن مزروعة سابقاً يحدث تغيير في مخزون الكربون في الغطاء النباتي للمنطقة. وعند تغيير استخدام الأراضي من الغطاء النباتي الغني بالكربون، مثل الغابات، إلى الغطاء النباتي الأقل ثراءً بالكربون، مثل الحقول، فإن ذلك يؤدي إلى تقليل كمية الكربون التي يمكن تخزينها في الأرض وبالتالي إلى زيادة انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون. لذلك يجب أن تؤخذ هذه التأثيرات في الاعتبار، عند اختيار المواد الأولية والمسارات التكنولوجية لإنتاج الوقود الحيوي المستدام.

يرمز مصطلح التغيير غير المباشر في استخدام الأراضي إلى تحويل المحاصيل الغذائية إلى مواد أولية لتصنيع الوقود الحيوي. على سبيل المثال، إذا تم تحويل محصول حقل الذرة، الذي كان يستخدم سابقاً لتلبية الطلب على الغذاء، لاستخدامه كمادة أولية، فيجب تلبية الطلب على الغذاء في مكان آخر. قد يؤدي هذا إلى نقل إنتاج الغذاء إلى مناطق أخرى من الأرض، والتي تخضع لعملية تغيير مخزون الكربون كما هو موضح أعلاه. من الناحية العملية، يصعب تحديد الانبعاثات الناتجة عن تغيير استخدام الأراضي غير المباشر لأنها تحدث في موقع مختلف عن الإنتاج الفعلي للمواد الأولية، مما يجعل تتبع

الانبعاثات أمراً صعباً. كما يجب عدم استخدام الأراضي المستخدمة لزراعة المحاصيل الغذائية لإنتاج المواد الخام للوقود الحيوي، لأن ذلك قد يؤدي إلى إزالة الغابات أو الأراضي الرطبة لخلق مساحة جديدة لإنتاج الغذاء أو لتعويض النقص في انخفاض إنتاج الغذاء.

3-6-3: تسرب العناصر الغذائية

توجد العناصر الغذائية بتركيزات عالية في العديد من الأسمدة، بما في ذلك روث الحيوانات. من أهمها الفوسفور (P) والنيتروجين (N). عند تسرب هذه العناصر من الحقول إلى البحيرات والجداول، قد يتسببان في زيادة نسبة المغذيات، مما قد يؤدي إلى استنفاد الأكسجين في الماء، والذي بدوره يمكن أن يتسبب في موت الحيوانات المائية. ومع ذلك فإن العناصر الغذائية (خاصة الفوسفور) هي أيضاً موارد قيمة لها العديد من الاستخدامات، فعلى سبيل المثال يستخدم الفوسفور في صناعة الأسمدة والتعدين (مثل إنتاج الفولاذ)، والمشروبات الغازية، وبالتالي فإن إعادة تدوير المغذيات أمر يجب أخذه في الاعتبار عند اختيار المواد الأولية والمسارات التكنولوجية لإنتاج وقود الطيران المستدام.

3-6-4: أضرار المبيدات الحشرية

تستخدم المبيدات لحماية المحاصيل من الآفات، مثل الأعشاب الضارة والفطريات والحشرات، بهدف تحسين غلة المحاصيل وجودتها، إلا أن لهذه المبيدات آثاراً ضارة على البيئة وصحة الإنسان، وخصوصاً عندما تتسرب إلى مصادر المياه. ويمكن تخفيف استخدام المبيدات الحشرية بتغيير طريقة استخدام الأراضي، فالنباتات المعمرة تستهلك مبيدات أقل من النباتات الموسمية.

3-6-5: التأثير على التنوع البيولوجي

يقصد بالتنوع البيولوجي تنوع وتكاثر النباتات والحيوانات والكائنات الحية الأخرى في النظام البيئي. ولهذا التنوع فوائد عديدة للبشرية، حيث تعتمد عليه معظم القطاعات الصناعية والزراعية مثل الأخشاب والمياه، والألياف، والغذاء، والأعلاف. وقد يؤدي تغيير استخدام بعض الأراضي، مثل الغابات، لزراعة مواد أولية لتصنيع الوقود الحيوي، إلى الإضرار بالتنوع البيولوجي لهذه المناطق. لهذا يجب التخطيط عند إنتاج الكتلة الحيوية بحيث لا تؤثر على التنوع البيولوجي.

3-6-6: استخدام المياه

تستهلك زراعة المواد الأولية كمية كبيرة من المياه التي أصبحت مصادرها شحيحة في العديد من مناطق العالم، ومن المتوقع أن تزداد هذه المشكلة مستقبلاً.

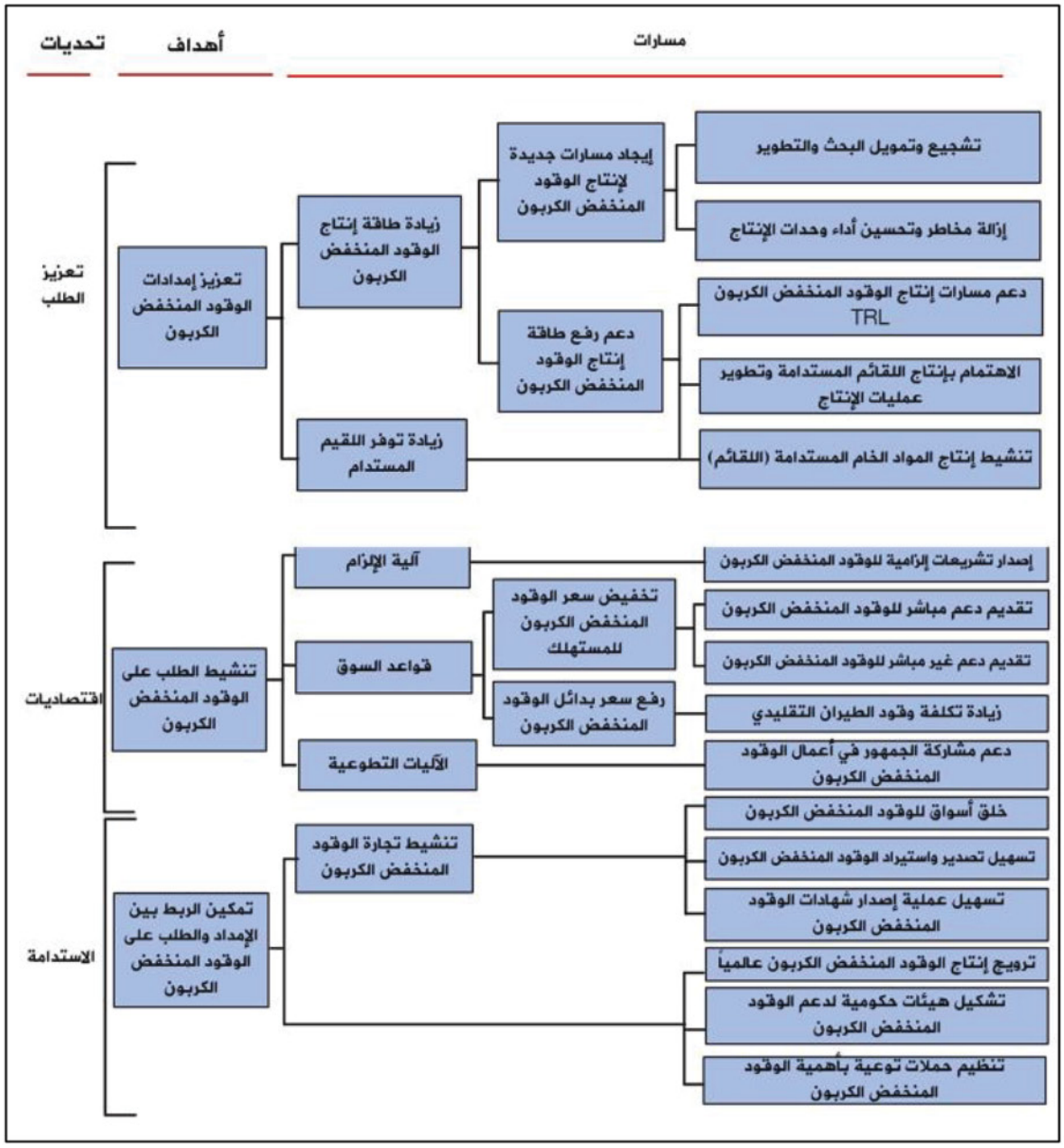
في الختام لا بد من مراعاة العديد من الجوانب عند إنتاج المواد الخام اللازمة لتصنيع وقود الطيران المستدام، أهمها:

- حاجة المواد الخام اللازمة لتصنيع وقود الطيران المستدام إلى توفر مساحات مناسبة من الأراضي وكميات كافية من المياه والمغذيات.
- وجود علاقة خطية بين أسعار الغذاء وإنتاج الوقود من مصادر حيوية.
- الأخذ بالاعتبار أن زراعة محاصيل البذور ينتج عنها كمية أكبر من ثاني أوكسيد الكربون مقارنة بالمحاصيل المعمرة، حيث أن عملية الحرث تؤدي إلى تشكل غاز ثاني أوكسيد الكربون نتيجة تأكسد الكربون المخزن في الحقل.
- تنفيذ تحليلات أكثر صرامة لدورة حياة الوقود المنخفض الكربون، وذلك من خلال الإجراءات التالية:
  - تضمين دراسة تقييم الآثار الثانوية لاختيارات استخدام اللقائم من مصادر متجددة مقارنة بالوقود الأحفوري الحالي.
  - مراعاة انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون من إنتاج الوقود وحتى احتراقه.
  - تضمين التأثيرات غير المتعلقة بثاني أوكسيد الكربون لكل من الإنتاج والاحتراق في تقييمات تأثير الوقود المنخفض الكربون.

3-7: تدابير تسهيل انتشار وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

لتسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية تساهم في زيادة إمدادات الوقود المنخفض الكربون، أو تحفيز الطلب، أو تمكين الربط بين العرض والطلب. يبين الشكل (3-4) مسارات تسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون.

الشكل (3-4): مسارات تسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون



المصدر: (Fantuzzi, A., et al., 2023)

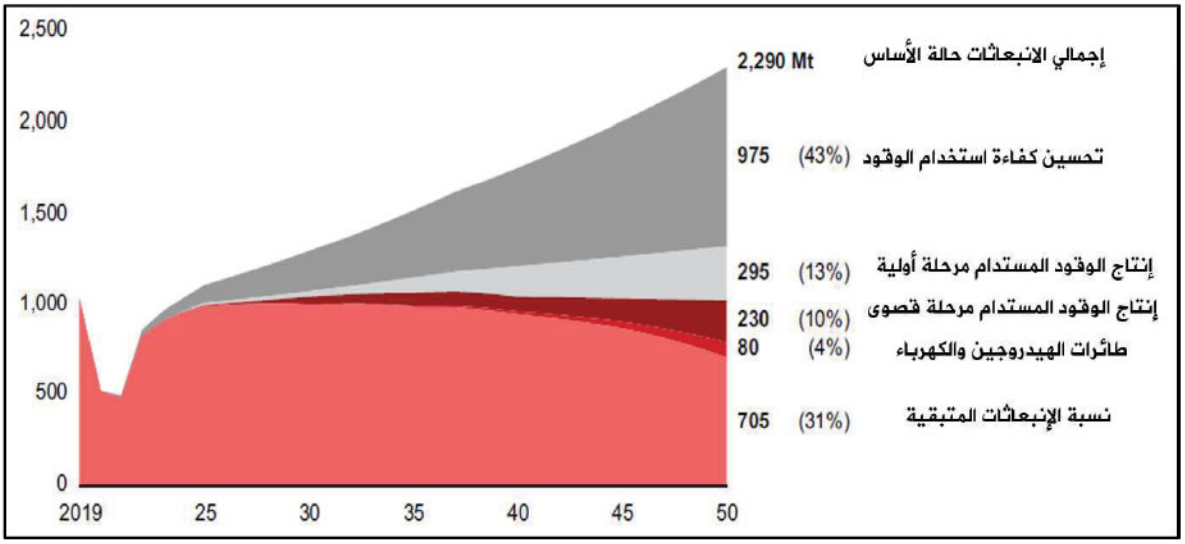
الفصل الرابع

مبادرات الحد من انبعاثات الكربون في قطاع الطيران

تشكل انبعاثات الكربون الناتجة من قطاع الطيران 2.5% من إجمالي الانبعاثات في العالم، حيث بلغت في عام 2023 نحو 670 مليون طن، وتشير التوقعات إلى أنها سترتفع بمعدل ثلاثة أضعاف بحلول عام 2050، أو ما يعادل 2.6 جيجا طن في السنة. (Bernard, Y., 2023)

على الرغم من تبني العديد من دول العالم رؤية واضحة لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر إلا أن أكثر السيناريوهات المتفائلة لا تتوقع خفض انبعاثات قطاع الطيران أكثر من 70% من إجمالي انبعاثات CO_2 بحلول عام 2050. يبين الشكل (4-1) التخفيض المتوقع لانبعاثات CO_2 في قطاع الطيران بتطبيق تقنيات التخفيض.

الشكل (4-1): التخفيض المتوقع لانبعاثات CO_2 في قطاع الطيران بتطبيق تقنيات التخفيض



المصدر: (Danicourt, J., et. 2022)

اعتمدت منظمة الطيران المدني الدولي ICAO خطة تتضمن عدة إجراءات لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر في قطاع بحلول عام 2050، أهمها تحسين تقنيات الطائرات، وتطوير عمليات التشغيل، واستخدام الوقود المستدام المنخفض الكربون، إضافة إلى إجراءات تجارة الكربون. كما أصدر

الاتحاد الأوروبي مجموعة من الإجراءات، ويعمل على إعداد العديد من التشريعات المتعلقة بنزع الكربون في قطاع الطيران. أما الولايات المتحدة فقد أعلنت عن إمكانية خفض انبعاثات الكربون بنسبة 20% بحلول عام 2030، وإلى الصفر بحلول عام 2050، من خلال نزع الكربون من الهواء الجوي في أماكن أخرى بالكميات الموازية للكميات الناتجة عن وقود الطيران. (Royal Society, 2023)

4-1: إجراءات تغيير نوع الوقود

تتركز إجراءات خفض انبعاثات الكربون المتعلقة بنوع الوقود في أربعة مسارات، هي الهيدروجين والأمونيا والوقود الحيوي والوقود الكهربائي e-fuel.(Sustainable Aviation, 2022)

4-1-1: استخدام الهيدروجين كوقود

يمكن استخدام الهيدروجين في الطائرات إما بالحرق في المحرك أو من خلال خلايا الوقود Fuel Cells لإنتاج الكهرباء اللازمة لتدوير المراوح. ويمكن تخزين الهيدروجين إما على شكل سائل في درجة حرارة (- 253 °م) أو على شكل غاز مضغوط إلى 350-700 بار.

ينتج الهيدروجين حالياً على مستوى تجاري بعملية التهذيب البخاري للميثان باستخدام الغاز الطبيعي كلقيم ويبلغ معدل إنتاجه في العالم حوالي 70 مليون طن/السنة. كما يمكن إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولدة بمصادر طاقة متجددة، ويسمى بالهيدروجين الأخضر، أو من خلال التهذيب البخاري للغاز الطبيعي مع تطبيق تقنية اصطياد وتخزين الكربون ويسمى بالهيدروجين الأزرق. (Royal Society, 2023)

يمكن أن يلعب الهيدروجين دوراً مهماً في مزيج وقود الطيران، إلا أن استخدامه لا يزال يواجه تحديات كبيرة، فعلى الرغم من أن الهيدروجين يتميز بعدم انطلاق غاز CO_2 عند استهلاكه، كما أن حجم محرك الطائرة يكون أصغر وبالتالي سينخفض الضجيج الناتج عن المحرك، إلا أن هناك صعوبات تتعلق بالحاجة إلى تعديل في تصميم محركات وهياكل الطائرات. كما أن زيادة الوزن اللازمة لتخزين الهيدروجين السائل وقصر المسافة التي يمكن أن تقطعها الطائرة تعتبر من أكبر المعيقات لاستخدامه كوقود للطائرات على الرغم من أن كثافة الطاقة للهيدروجين السائل تبلغ 2.8 ضعف وقود الطائرات النفاثة التقليدي. (Newsom, R., et al., 2023)

4-1-2: استخدام الأمونيا كوقود

الأمونيا غاز ينتج من تفاعل الهيدروجين (المنتج من التهذيب البخاري للغاز الطبيعي) مع النتروجين المنتج من الهواء. يمكن حرق غاز الأمونيا في المحركات للحصول على قوة الدفع أو استخدامه في خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء اللازمة لتدوير المراوح. كما يمكن تخزين الأمونيا على شكل سائل في درجة حرارة (- 30 °م) أو تحت الضغط 1 بار. وعندما يستخدم الهيدروجين الأخضر في عملية الإنتاج تسمى الأمونيا بالأمونيا الخضراء، كما تسمى بالأمونيا الزرقاء عند استخدام الهيدروجين الأزرق. (Royal Society, 2023)

4-1-3: استخدام وقود الطيران الحيوي Bio-Jet

يطلق على وقود الطيران الحيوي إسم وقود الطيران المستدام SAF وينتج حالياً من مواد حيوية على مستوى تجاري لكن بكميات محدودة جداً لا تتجاوز 4% من إجمالي استهلاك قطاع الطيران في العالم من الوقود. (حسب تقرير وكالة الطاقة الدولية IEA)، ويوصف بأنه زيت نباتي مهدرج (HVO)، أو إستيرات وأحماض دهنية معالجة بالهيدروجين (HEFA). من مساوئ استخدام هذا النوع من الوقود ارتفاع تكاليف إنتاجه، والحاجة إلى مزجه مع الوقود النفطي. (BOSCH, J., et al.,2017)

4-2: تطورات تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام

شهدت السنوات القليلة الماضية توجه العديد من الدول نحو تسريع إجراءات تطوير التشريعات والمعايير الخاصة بوقود الطيران المستدام بعد المطالبات التي صدرت من الهيئات المهتمة بشؤون البيئة لزيادة الاهتمام بوقود الطيران المستدام مقارنة بأنواع الوقود المتجدد الأخرى المستخدمة في وسائل النقل البري. وفيما يلي نبذة عن أهم التطورات الخاصة بوقود الطيران المستدام في بعض مناطق العالم. (Newsom, R., et al., 2023)

4-2-1: تطور وقود الطيران المستدام في الولايات المتحدة الأمريكية

انطلقت رحلة إصدار التشريعات الخاصة بوقود الطيران المستدام في عام 2005 في إطار قانون سياسة الطاقة في الولايات المتحدة الذي تضمن معايير الوقود المتجدد RFS، ثم تم تحديث القانون في عام 2007.

في عام 2021 تم وضع هدف طموح لإنتاج وقود الطيران المستدام بحيث يصل إلى ثلاثة ملايين طن في السنة بحلول عام 2030، وقد تم دعم هذا الهدف بمجموعة إجراءات كالإعفاءات الضريبية، وتخصيص مبلغ 175 مليون دولار لتمويل المشاريع البحثية وتطوير تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام، كما تم تخصيص استثمارات ومنح قروض وصلت قيمتها إلى 4.3 مليار دولار لتمويل مشاريع إنتاج وقود الطيران المستدام.

في عام 2022 صدر قانون تخفيض التضخم الذي تضمن منح حوافز لاستهلاك وقود الطيران المستدام بقيمة 1.75 دولار للغالون، إضافة إلى تمويل البنية التحتية للوقود بمبلغ 245 مليون دولار. وفي عام 2023 أصدرت الحكومة الفيدرالية خارطة طريق تهدف إلى تخفيض تكاليف إنتاج وقود الطيران المستدام، وتعزيز الاستدامة، ورفع الطاقة الإنتاجية المحلية إلى 3 مليار غالون في السنة، وذلك للوصول إلى تخفيض 50% من انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن استعمال وقود الطيران التقليدي بحلول عام 2030، على أن تصل إلى 35 مليار غالون في السنة بحلول عام 2050 لتغطي 100% من الطلب المحلي على وقود الطيران في الولايات المتحدة. (Goldner, w., et al., 2022)

وعلى مستوى الولايات أصدر المشرعون مؤخراً في ولاية كاليفورنيا قانوناً يلزم المنتجين بمزج نسبة 20% من الوقود المستدام مع وقود الطيران النفطي بحلول عام 2030.

4-2-2: تطور وقود الطيران المستدام في الاتحاد الأوروبي

على الرغم من التحديات التي تواجه إنتاج وقود الطيران المستدام في دول الاتحاد الأوروبي، كمحدودية الأراضي القابلة للزراعة، وارتفاع تكاليف الطاقة، وندرة توفر اللقائم الحيوية، إلا أنها نجحت في إصدار التشريعات والمبادرات التي يمكن أن تساهم في تشجيع عمليات الإنتاج والاستهلاك. (Barbara, L., & Galea, C., 2024)

بدأ الاتحاد الأوروبي العمل بمخطط تجارة الانبعاثات في 2005 وهو نظام للبدلات القابلة للتداول للشركات التي تغطي قطاعات صناعية مختارة (بما في ذلك توليد الطاقة الكهربائية والحرارية، والصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، والطيران). يعتمد النظام على مبدأ "الحد الأقصى والتجارة"، بحيث يتم تخفيض الحد الأقصى تدريجياً، بما يتماشى مع الأهداف الإجمالية لغازات الدفيئة للشركاء المشاركين، وأصبح منذ ذلك الحين حجر الزاوية في أدوات التخفيف من غازات الاحتباس الحراري، والتي تغطي اليوم نحو 45% من إجمالي انبعاثات الاتحاد الأوروبي.

تم تضمين انبعاثات قطاع الطيران في نظام مخطط تجارة الانبعاثات اعتباراً من عام 2012. ويشمل ذلك الانبعاثات من وإلى وضمن دول الاتحاد الأوروبي. أما الرحلات الخارجية فتم استثناؤها (Wormslev, E., et al., 2016 p.51)

ينص مخطط تجارة الانبعاثات على منح شركات الطيران تصاريح قابلة للتداول تغطي مستوى محدداً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من رحلاتها الجوية سنوياً. وعلى أن يبقى سقف الانبعاثات المسموح كما هو في كل عام خلال الفترة 2013-2020، بعد ذلك يتم تخفيضه بنسبة 5 % من متوسط المستوى السنوي لانبعاثات الطيران في الفترة 2004-2006. يتم تخصيص حوالي 82% من الانبعاثات على أنها تصريح مجاني لقطاع الطيران والنسبة 18٪ المتبقية (بالإضافة إلى الانبعاثات فوق الحد الأقصى) يجب تعويضها بشهادات الكربون.

في عام 2020 تبنى الاتحاد الأوروبي استراتيجية الاستدامة والتنقل الذكي التي تهدف إلى تشجيع إنتاج واستهلاك الوقود المستدام في قطاع الطيران.

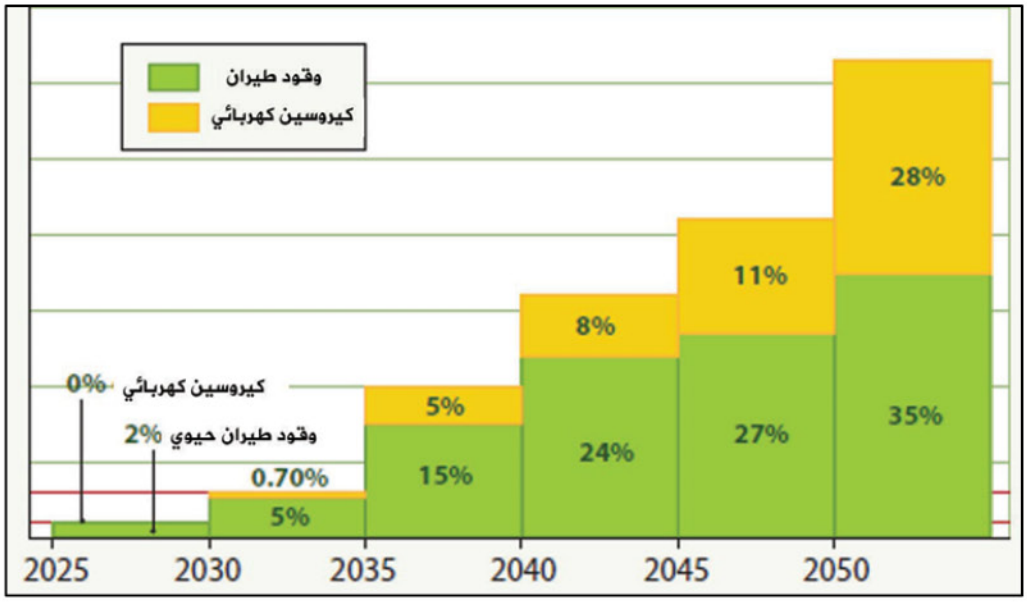
كما أطلق الإتحاد الأوروبي مؤخراً مبادرة الوقود المتجدد ReFuel EU التي تهدف إلى دعم أسواق وقود الطيران الأوروبية في الزيادة التدريجية لنسبة استخدام وقود الطيران المستدام بحيث تلتزم المطارات الأوروبية بنسبة مزج قدرها 5% بحلول عام 2030 كحد أدنى وعلى أن تصل إلى 63% بحلول عام 2050، إضافة إلى رفع نسبة مزج وقود الطيران الاصطناعي من 0.7% بحلول عام 2030 إلى 28% بحلول عام 2050. وتشترط المبادرة الأوروبية أن تكون كثافة الكربون لوقود الطيران المتجدد المستخدم أقل بنسبة 65% مقارنة بالوقود النفطي التقليدي. (Bauen, et al., 2022) في عام 2009 صدرت توجيهات الطاقة المتجددة التي تلزم دول الاتحاد الأوروبي بأن لا تقل نسبة وقود النقل من مصادر متجددة عن 10% بحلول عام 2020.

في عام 2016 صدرت أهداف الاتحاد الخاصة بالطاقة والمناخ وتضمنت تحديد هدف أن لا تقل نسبة الطاقة المتجددة عن 27% من إجمالي الطاقة المستهلكة بحلول عام 2030. كما أصدر الاتحاد في نفس العام مبادرة وقود الطيران المستدام المتضمنة إنشاء مشروع مشترك لإنتاج وقود الطيران المستدام بطاقة إنتاجية كبيرة.

كما تم إصدار قرار الوقود المتجدد ReFuel EU الذي بدأ العمل به في 1 يناير 2023 نتيجة مفاوضات انطلقت في بداية عام 2022، بين ثلاث مؤسسات تابعة للاتحاد الأوروبي، وهي المفوضية الأوروبية، والبرلمان الأوروبي، ومجلس الاتحاد الأوروبي. يتضمن القرار إعطاء مهلة عامين للشركات

المنتجة لوقود الطيران بحيث تبدأ بمزج الوقود المستدام والوقود الكهربائي e-fuel مع الوقود النفطي التقليدي اعتباراً من بداية عام 2025 بنسبة محدودة لا تتجاوز 2% على أن ترتفع بشكل تدريجي لتصل إلى 63% بحلول عام 2050. يبين الشكل (4-2) تطور الحد الأدنى لمزج وقود الطيران الحيوي والكهربائي في قرار الاتحاد الأوروبي للوقود المتجدد ReFuelEU

الشكل (4-2): تطور الحد الأدنى لمزج وقود الطيران الحيوي والكهربائي في قرار الاتحاد الأوروبي للوقود المتجدد ReFuelEU



المصدر: (Nelson, R., 2022)

وعلى مستوى الدول الأوروبية، أصدرت **ألمانيا** مبادرة في عام 2016 تتضمن هدف دعم إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام بحيث تصل نسبته إلى 10% من إجمالي وقود الطيران المستهلك بحلول عام 2025، وفي عام 2021 أصدرت **النرويج** قانوناً يلزم شركات الطيران باستخدام الوقود المستدام بنسبة 0.5% كمرحلة أولى على أن ترتفع بشكل تدريجي لتصل إلى 30% بحلول عام 2030، وبهذا تكون النرويج أول دولة في العالم تصدر قانوناً ملزماً لاستخدام وقود الطيران المستدام. كما أصدرت **السويد** قانوناً مماثلاً يلزم الطائرات بنسبة مزج الوقود المستدام إلى الوقود النفطي 1% على أن تصل إلى 30% بحلول عام 2030، ومن المتوقع أن تصدر كل من **فلندا وهولندا** قانوناً مماثلاً ثم تتبعها باقي دول الإتحاد الأوروبي. (Padt, A., 2021 p.70)

5-2-3: تطورات وقود الطيران المستدام في آسيا

تسعى الهند إلى مزج نسبة 1% من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2027، ثم إلى 2% في عام 2028، وسيتم تطبيق الخطة في البداية على الرحلات الدولية.

وأعلنت شركة النفط الهندية IOC. عن مشروع إنشاء وحدة لإنتاج وقود الطيران المستدام طاقتها الإنتاجية 80،000 طن متري سنويا مع LanzaJet في مصفاة Haryana، وذلك من خلال تحويل غاز النفايات إلى الإيثانول ووقود الطائرات.

أعلنت **سنغافورة** عن خطة لتزويد كافة الرحلات المغادرة من الدولة بوقود الطيران المستدام اعتباراً من بداية عام 2026 وذلك في إطار التزامها بالجهود الدولية للتحول إلى استخدام الوقود

أصدرت **ماليزيا** قراراً يلزم شركات الطيران بمزج الوقود المستدام بنسبة 1% اعتباراً من بداية عام 2026 وذلك في إطار خارطة الطريق الوطنية لانتقال الطاقة التي نشرتها في عام 2023 والتي تتضمن الوصول إلى نسبة مزج الوقود المستدام في قطاع الطيران إلى 47% بحلول عام 2050.

وفي أكتوبر 2023 وقعت شركة النفط الحكومية الماليزية "Petronas" وثاني أكبر شركة لتكرير النفط في اليابان .Idemitsu Kosan Co اتفاقية للتعاون في تطوير وتوزيع وقود الطيران المستدام. كما وقعت شركة "Petronas" اتفاقية مع مجلس زيت النخيل الماليزي "Malaysia's Palm Oil Board" للتعاون في إعداد دراسة حول إمكانية استخدام زيت الطهي ونفايات إنتاج زيت النخيل كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام. (Hydrocarbon Processing, 2024)

في عام 2017، قررت **الصين** تنفيذ مخطط وطني لتداول الانبعاثات بهدف الحد من انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون وذلك اعتباراً من بداية عام 2020، لتغطي محطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم والغاز كمرحلة أولى، ومن المقرر أن تتوسع لتشمل سبعة قطاعات أخرى منها قطاع الطيران، وستكون الأكبر في العالم حتى الآن، حيث ستغطي سُبع انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون العالمية الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري. (IEA, 2021)

كما أعلنت إدارة الطاقة الوطنية الصينية في نوفمبر 2023 أنها ستطلق مشاريع تجريبية لتحفيز الإنتاج والاستهلاك المحلي للوقود الحيوي، بما في ذلك وقود الطيران المستدام SAF والديزل الحيوي. ولم تقدم تفاصيل عن التمويل والتوقيت.

في ديسمبر 2023، أعلنت شركة استثمار الطاقة الحكومية الصينية عن خطة لإنتاج 400 ألف طن سنوياً من وقود الطيران المستدام SAF في مقاطعة Heilongjiang الشمالية. سيبدأ المصنع كمشروع تجريبي بطاقة قدرها 10 آلاف طن سنوياً. ومن المقرر أن تنتج الدفعة الأولى من الوقود في أواخر عام 2025، وستتوسع إلى 400 ألف طن/السنة بحلول عام 2030.

في أبريل 2023 وقعت شركة إيرباص ومجموعة الصين الوطنية لوقود الطيران (CNAF) مذكرة تفاهم لزيادة إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام. كما وقعت مجموعة شركات مكونة من شركة Honeywell الأمريكية، وشركة Oriental Energy Company Ltd ومقرها جنوب مقاطعة Guangdong، ومنطقة التجارة الحرة في Tianjin اتفاقيات لإنتاج وقود الطيران المستدام بشكل مشترك بطاقة إنتاجية قدرها 1 مليون طن سنوياً.

أما **اليابان** فقد أعلنت في عام 2023 عن خطة للبدء بمزج وقود الطيران المستدام بنسبة 10% في الرحلات الدولية بحلول عام 2030. كما وقعت مجموعة هيئات مكونة من مؤسسة Nippon للصناعات الورقية، ومؤسسة Sumitomo، ومعهد Green Earth، اتفاقية تعاون لبحث إمكانية إنتاج الإيثانول الحيوي من النفايات الخشبية المنتجة من صناعة الورق وذلك لاستخدامه كمادة خام لإنتاج وقود الطيران المستدام بحلول 2027.

يذكر أن العديد من الشركات العالمية الأخرى تبحث إمكانية إنتاج وقود الطيران المستدام في اليابان، منها شركة Mitsubishi، وشركة Boeing، وشركة TotalEnergies وشركة Eneos Holding.

في **الفليبين** وقعت شركة الخطوط الجوية اتفاقية شراكة استراتيجية طويلة الأمد مع شركة Shell Eastern Petroleum لتزويد أسطول الطائرات بوقود الطيران المستدام من خلال الشراء من أسواق آسيا الباسيفيك والشرق الأوسط بمعدل مبدئي قدره 25 ألف طن متري سنوياً كحد أدنى.

في **أستراليا**، أطلقت مجموعة Qantas تحالفاً لتطوير إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام سمي "تحالف وقود الطيران المستدام" يتكون من شركات نقل أسترالية، ومجموعة Macquarie لخدمات التمويل العالمية، ومجموعة Boston Consulting ومجموعة Woodside Energy . كما اتفقت Qantas مع شركة Airbus على استثمار مبلغ 1.34 مليون دولار أمريكي لمشروع إنتاج وقود الطيران المستدام من المخلفات الزراعية في المصفاة الجاري إنشاؤها في ولاية Queensland الأسترالية. ومن المتوقع أن تنتج المصفاة 100 مليون لتر من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2025.

يذكر أن أستراليا تخطط لمزج وقود الطيران المستدام بنسبة 10% بحلول عام 2023، وعلى أن تصل النسبة إلى 60% بحلول عام 2050.

في **نيوزيلاندا**، خصصت الحكومة، بالتعاون مع شركة الطيران النيوزيلاندية، مبلغ 1.34 مليون دولار أمريكي لدراسة إمكانية إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام.

4-3: مبادرات هيئات الطيران الدولية

طورت صناعة الطيران عدة مبادرات خاصة بمكافحة تغير المناخ، بالتعاون والتنسيق مع منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO). يقود هذه المبادرات الاتحاد الدولي للنقل الجوي (IATA) ومجموعة عمل النقل الجوي (ATAG).

4-3-1: مبادرة منظمة الطيران المدني الدولي

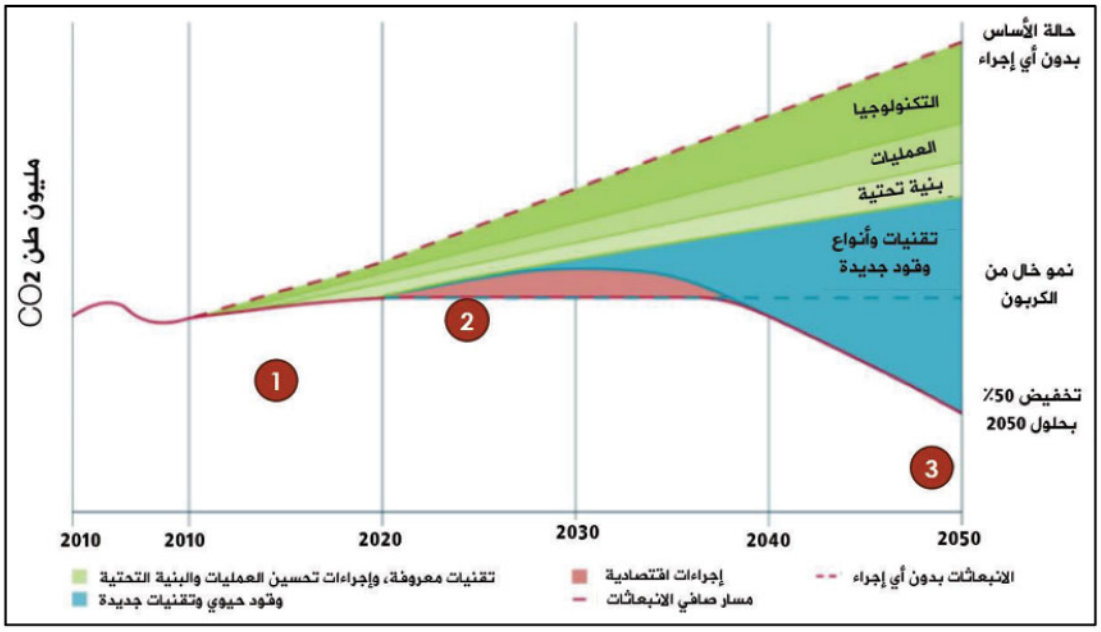
في عام 2007 أطلقت منظمة الطيران المدني الدولي استراتيجية تم تبنيها من قبل الصناعة بأكملها في عام 2008 أثناء انعقاد قمة الطيران والبيئة. ترتكز هذه الإستراتيجية على أربعة مجالات رئيسية لخفض انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في النقل الجوي، هي التقنيات، والعمليات، والبنية التحتية، والأدوات الاقتصادية. ولكن لم يتم تقديم سياسة واضحة للوقود الحيوي.

وفي عام 2016 تبنت منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO) آلية عالمية تعتمد على مبدأ السوق سميت بخطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي، تهدف إلى معالجة وتخفيف انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن قطاع الطيران الدولي بمعدل 85% من مستوى عام 2020 وذلك خلال الفترة 2024 ولغاية 2035. تتضمن الآلية التزام شركات الطيران بما يلي:(BOSCH, J. et al. 2017)

- تحسن سنوي قدره 1.5% في كفاءة الوقود من خلال الفترة 2009 إلى 2020
- نمو خالٍ من انبعاثات الكربون اعتباراً من عام 2020.
- تخفيض مطلق بنسبة 50٪ من انبعاثات الكربون بحلول عام 2050.

يعتمد تنفيذ هذه الإستراتيجية على أربعة مجالات رئيسية هي التكنولوجيا، والعمليات، والبنية التحتية، والوقود المتجدد. يبين الشكل (4-3) دور مجالات تنفيذ استراتيجية خفض انبعاثات الكربون في قطاع الطيران

الشكل (4-3): دور مجالات تنفيذ استراتيجية خفض انبعاثات الكربون في قطاع الطيران



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

4-3-2: مبادرة مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام

تأسست مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام SAFUG في عام 2008، بهدف تسريع تطوير وتسويق الوقود الحيوي المستدام القابل للمزج مع الوقود النفطي والاستخدام المباشر في الطائرات. تتكون المجموعة من شركات النقل الجوي ومنظمات صناعة الطيران الأخرى، وتستهلك حوالي 33 % من الطلب العالمي على وقود الطيران.

بالرغم من الاهتمام الواسع النطاق بإصدار التشريعات إلا أنها لم تتناول استعمال الوقود الحيوي المستدام بالشكل المناسب، باستثناء ما تمت مناقشته من خلال أنظمة تجارة وتداول انبعاثات الكربون مثل أنظمة تداول الانبعاثات، وبالتالي من غير المرجح أن تدعم شركات الطيران استخدام الوقود الحيوي على المدى القريب. (BOSCH, et al., 2017)

تشترط مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام SAFUG أن يحقق وقود الطيران الحيوي المستدام الشروط التالية: (Wormslev, E., et al., 2016)

- أن يكون تأثيره ضئيل على التنوع البيولوجي
- أن يلبي معايير الاستدامة فيما يتعلق باستخدام الأرض والمياه والطاقة
- لا يزيح أو ينافس المحاصيل الغذائية والأعلاف

- يساهم في تحسين الاقتصاد ورفع مستوى المعيشة للمجتمع
- لا يتطلب أي معدات خاصة للتعامل مع الوقود أو أنظمة التوزيع أو تغيير في تصميم محرك الطائرة.

4-4: تطورات إنتاج وقود الطيران المستدام في الدول العربية

على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن لديها فرصاً ثمينة لتكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، والساليكورنيا Salicornia التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة. ولتعظيم طاقة إنتاج الوقود المستدام والمنخفض الكربون تحتاج الدول العربية إلى تنفيذ بعض الإجراءات، من أهمها:

- **تعزيز التعاون بين صناعة الطاقة وقطاع الطيران**

حققت بعض الدول العربية تقدماً ملحوظاً في بناء مبادرات وعلاقات تكاملية وثيقة بين صناعتي الطاقة والطيران، بهدف تعزيز إمدادات الوقود المستدام، وتتركز هذه المبادرات في دول الخليج العربية نظراً لما تمتلكه من بنية تحتية واسعة، فضلاً عن موقعها الجغرافي القريب من الأسواق الأسيوية والأوروبية، إلا أن دور الحكومات في إصدار التشريعات المساندة لهذه المبادرات لا يزال غائباً.

- **إصدار التشريعات والسياسات الداعمة**

لا تزال عملية إصدار التشريعات الخاصة بإنتاج وقود الطيران المستدام في الدول العربية في مراحلها الأولية، باستثناء دولة الإمارات العربية المتحدة التي أعلنت عن خارطة طريق لدعم إنتاج وقود الطيران المستدام بمساندة المنتدى الاقتصادي الدولي (Barbara, L., & Galea, C., 2024).

تكتسب التشريعات والسياسات الحكومية دوراً مهماً في تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، وذلك نظراً لارتفاع تكاليف الإنتاج مقارنة بالوقود النفطي التقليدي، والحاجة إلى التعاون مع أطراف عديدة كمزودي التكنولوجيا، وشركات الإنتاج، والتسويق، والتوزيع. ولكي تكون السياسات الخاصة بوقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون فعّالة، يجب أن تتوفر فيها الخصائص التالية:

- أن تكون مستقرة وقابلة للتنفيذ حتى يكون القطاع الخاص على استعداد للمشاركة في الاستثمار.
- أن تكون صالحة لمدة كافية لتغطية الفترة الزمنية لتطوير المشروع (على سبيل المثال، 10 سنوات أو أكثر بحيث توفر درجة من القدرة على التنبؤ للمستثمرين.
- أن تكون محايدة من الناحية التكنولوجية لتمكين مسارات الإنتاج المتنوعة وسلاسل التوريد من التطور.
- ربط الحوافز بالأداء (على سبيل المثال، يجب تقدير الشركات التي تساهم بأداء أعلى في خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري).
- التعرف على احتياجات الشركات المتعثرة ومساندتها بالمنح والقروض.
- تحقيق آليات لتشجيع توسيع طاقة إنتاج الوقود المستدام، وتعزيز الابتكار التكنولوجي، ودفع الكفاءات لتوفير إمدادات كافية لتحقيق إزالة الكربون من قطاع الطيران.
- أن تكون مصممة بدعم سياسي من كافة الهيئات الحكومية المعنية.
- أن تكون مرنة وتحقق فوائد للمجتمع والبيئة.

- **تحسين الأداء التشغيلي لمصافي تكرير النفط**

يمكن لمصافي تكرير النفط القائمة في الدول العربية توسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة التي تعتمد على تكرير مواد خام متجددة إلى جانب النفط الخام بهدف تخفيض البصمة الكربونية لمنتجات المصفاة وإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، حيث أن المعالجة المشتركة تعتبر حلاً فعالاً من حيث التكلفة وقريب الأمد لتوسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام في المنطقة.

- **إنتاج وقود الطيران المستدام الكهربائي e-SAF**

تمتلك الدول العربية فرصة واعدة لإنتاج الوقود الكهربائي وتصديره إلى الأسواق العالمية بأسعار منافسة نظراً لما تتمتع به من قدرة على إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة بتكاليف منخفضة، حيث تتوفر فترات طويلة من السطوع الشمسي والأراضي الواسعة، ما يمكنها من إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الكهربائية المولدة من مزارع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، إلا أن إنتاج الوقود الكهربائي يواجه حالياً صعوبة تتعلق بالجدوى الاقتصادية لاستخدام الهيدروجين الأخضر حيث يلجأ

المستثمرون إلى استخدامه في عمليات إنتاج الأمونيا الخضراء أو الميثانول، باعتبارها صناعة ناضجة وتكلفتها أقل من تكلفة إنتاج الوقود الكهربائي.

تجدر الإشارة إلى أن المنظمة العربية للطيران المدني ACAO قد أعلنت في عام 2024 عن سعيها لتبني مبادرة عربية لتشجيع تطوير وإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون ومصادر الطاقة الأخرى النظيفة لأغراض الطيران. تقوم هذه المبادرة على دراسة إنشاء فريق إقليمي عربي مشترك مع منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، والتنسيق مع مؤسسات التمويل لتمويل دراسات الجدوى الفنية حول إمكانات الدول العربية لتطوير وإنتاج أنواع وقود الطيران المستدام. وتشير المنظمة إلى أن نسبة مشاركة وقود الطيران المستدام حالياً لا تتجاوز 0.2% من إجمالي استهلاك وقود الطيران في الدول العربية، وأن تحقيق أهداف الحياد الكربوني لقطاع الطيران يستلزم رفع الإنتاج إلى 30 مليار لتر بحلول عام 2030، و450 مليار لتر بحلول 2050. (ACAO, 2024). وفيما يلي عرض لأهم تطورات وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون في الدول العربية.

4-4-1: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الإمارات العربية المتحدة

في عام 2014 انطلقت مبادرة أبو ظبي لوقود الطيران الحيوي Biojet Abu Dhabi، تهدف إلى بحث إمكانية إنشاء سلسلة إمداد لوقود الطيران الحيوي في دولة الإمارات العربية المتحدة، بالتعاون بين طيران الإتحاد، وشركة بوينغ، وشركة أبو ظبي لتكرير النفط "تكرير"، وشركة توتال الفرنسية، ومعهد "مصدر" للعلوم والتكنولوجيا. وفي عام 2015 أصدرت المجموعة خارطة طريق تتضمن بعض التوصيات المتعلقة بإمكانية إنتاج اللقائم الحيوية، وأنواع التقنيات التي يمكن استخدامها، والإجراءات الممكن تطبيقها لتأسيس سلسلة إمداد وقود الطيران المستدام.

تجدر الإشارة إلى أن دولة الإمارات العربية المتحدة قد أعلنت عن خارطة طريق وطنية لوقود الطيران المستدام، حددت من خلالها هدفاً لتحقيق إنتاج سنوي يصل إلى 700 مليون ليتر من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2030، مما سيساهم في خفض ما يصل إلى 4.8 مليون طن من غاز ثاني أوكسيد الكربون. كما أعلنت دولة الإمارات التزامها بالوصول إلى صفر انبعاثات كربونية بحلول عام 2050.

في 30 يناير/ كانون الثاني 2023 أجرت دولة الإمارات أول رحلة تجريبية من نوعها في الشرق الأوسط باستخدام وقود الطيران المستدام بنسبة 100% في أحد محركات طائرة بوينغ 777، انطلقت الرحلة التجريبية من مطار دبي الدولي، وحلقت لمدة ساعة في المنطقة الساحلية المجاورة لدبي. يتكون

المهدرجة والأحماض الدهنية والكيروسين البارافيني الاصطناعي HEFA-SPK، والثاني من إنتاج شركة Virent يتكون من الكيروسين العطري الاصطناعي المنزوع الأوكسجين بالهدرجة HDO-SAK.تكمن أهمية هذه التجربة في إثبات إمكانية استخدام الوقود المستدام بنسبة 100% بينما لم تصل نسبة مزج الوقود المستدام مع الوقود النفطي التقليدي في مناطق العالم إلى أكثر من 50%.

بتاريخ 24 أكتوبر 2023 نفذت دولة الإمارات أول رحلة طيران تجريبية انطلقت من مطار دبي الدولي إلى سيدني باستخدام وقود طيران مستدام قامت بإنتاجه شركة شل، وإرساله إلى شبكة وقود الطيران في مطار دبي الدولي، ويتكون من مزيج وقود طيران مستدام بنسبة 40% ووقود طائرات تقليدي Jet A-1 بنسبة 60%، وبلغت كميته 350 ألف غالون. (Hydrocarbon Processing, 2023)

كما حصلت شركة نفط أبو ظبي الوطنية في عام 2023 على إجازة من المنظومة الدولية لمنح شهادات استدامة الكربون * ISCC لإنتاج وقود طيران مستدام في مصفاة "الرويس" التي تبلغ طاقتها التكريرية 920 ألف ب/ي، وتعتبر دولة الإمارات العربية المتحدة أول دولة تحصل على مثل هذه الشهادة في منطقة الشرق الأوسط، وهذا سيمكنها من تزويد المطارات الدولية بوقود الطيران المنخفض الكربون والمستدام من الزيوت النباتية المستعملة.

في عام 2024 وقعت شركة أبو ظبي لطاقة المستقبل الإماراتية Masdar اتفاقية مع شركة Total Energies الفرنسية لبحث إمكانية إنتاج وقود الطيران المستدام والميثانول. يهدف المشروع إلى التقاط CO_2 من المصادر الصناعية كلقيم إضافة إلى الهيدروجين الأخضر المنتج من الطاقة المتجددة، اللذين سيستخدمان لإنتاج الميثانول الأخضر ووقود الطيران المستدام SAF.

يأتي هذه المشروع في إطار استراتيجية الهيدروجين الوطنية لدولة الإمارات العربية المتحدة وسياسة إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون، والتي تتضمن تزويد خطوط الطيران الوطنية في مطارات الدولة بوقود الطيران المستدام بنسبة 1% من إجمالي الوقود المستهلك بحلول عام 2031. ومن المتوقع أن يساهم المشروع في رفع إنتاج دولة الإمارات من الهيدروجين إلى 1.4 مليون طن في السنة بحلول عام 2031 (منها 1 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأخضر و0.4 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأزرق) ثم إلى 7.5 مليون طن/السنة بحلول عام 2040، ثم إلى 15 مليون طن/السنة بحلول عام 2050. (Kapoor, P., 2024)

---

* International Sustainability Carbon Certification

الأزرق) ثم إلى 7.5 مليون طن/السنة بحلول عام 2040، ثم إلى 15 مليون طن/السنة بحلول عام 2050. (Kapoor, P., 2024)

من جهة أخرى أنجزت دولة الإمارات العربية المتحدة خارطة طريق بالتعاون مع المنتدى الاقتصادي الدولي World Economic Forum لإنتاج وقود الطيران المستدام والهيدروجين المتجدد بتطبيق تقنية تحويل الكهرباء إلى سوائل Power to Liquid، بحيث يمكنها إنتاج نحو 15-73 % من استهلاكها لوقود الطيران من الوقود المستدام المنتج بتقنية تحويل الكهرباء إلى سائل.

كما وقعت كل من شركة بترول أبو ظبي الوطني "أدنوك" وشركة الطاقة المتجددة "مصدر" وشركة "بريتش بتروليوم" مذكرة تفاهم لإنجاز دراسة جدوى لمشروع إنتاج وقود الطيران المستدام من النفايات البلدية والهيدروجين.

5-4-2: تطورات وقود الطيران المستدام في مملكة البحرين

بدأت مملكة البحرين باستخدام وقود الطيران المستدام من خلال شركة طيران الخليج، الناقل الوطني لمملكة البحرين، حيث قامت بالتعاون مع الفورمولا 1 وشركة Boeing وشركة Rolls-Royce المنتجة لمحركات الطائرات، وشركة Neste المنتجة لوقود الطيران المستدام، بعرض جوي منخفض الانبعاثات في افتتاح موسم الفورمولا 1 لعام 2021 في حلبة البحرين الدولية في "الصخير". تأتي هذه المبادرة لتأكيد التزام المملكة بالمتطلبات الدولية لخفض الانبعاثات الكربونية لقطاع الطيران.

4-4-3: تطورات وقود الطيران المستدام في المملكة العربية السعودية

أعلنت شركتا "أرامكو" السعودية و"إيني" الإيطالية للنفط، عن توقيع اتفاق مع شركة "يونايتد إيرلاينز" الأميركية، أكبر شركة طيران في العالم، للانضمام إلى جهود شركة (OXCCU) البريطانية لبحث فرص خفض التكلفة الباهظة لوقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون بالتعاون مع شركة Energy Venture الأمريكية، وجامعة أوكسفورد البريطانية. (سكاي نيوز، 2023)

يأتي هذا المشروع في إطار جهود المملكة نحو تحقيق الاستدامة البيئية والتنمية المستدامة انطلاقاً من مستهدفات رؤية المملكة 2030 التي أولت حماية البيئة والموارد الطبيعية أهمية قصوى، من خلال الإعلان عن «مبادرة السعودية الخضراء»، و«مبادرة الشرق الأوسط الأخضر» اللتين سترسمان توجه المملكة والمنطقة في حماية الأرض والطبيعة ووضعها في خريطة طريق ذات معالم واضحة وطموحة، وستسهمان في تحقيق الأهداف العالمية الخاصة بتغير المناخ.

4-4-3: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة قطر

وقعت الخطوط الجوية القطرية اتفاقية مع شركة شل لتوريد 3000 طن متري من وقود الطائرات المستدام النقي في مطار شيفول بأمستردام. يهدف المشروع إلى تمكين الخطوط الجوية القطرية من مزج وقود الطائرات المستدام بنسبة 5% على الأقل خلال السنة المالية 2023-2024، كخطوة أولى من الهدف المحدد بنسبة 10% من إجمالي كمية الوقود المستهلك بحلول عام 2030. وبذلك تعتبر الخطوط الجوية القطرية هي أول شركة طيران في الشرق الأوسط وأفريقيا تقوم بشراء كمية كبيرة من الوقود المخصص للطائرات في أوروبا بما يتجاوز المتطلبات الحكومية.

كما وقعت الخطوط الجوية القطرية اتفاقية مع شركة Gevo. Inc، المنتجة لوقود الطيران المستدام ، تتضمن شراء 25 مليون جالون أمريكي من وقود الطائرات المستدام النقي على مدار خمس سنوات، ومن المتوقع أن تبدأ عمليات التسليم في عام 2028 في مطارات مختلفة في كاليفورنيا. وستقوم الخطوط الجوية القطرية بتوريد 5 ملايين جالون أمريكي من وقود الطائرات المستدام النقي كل عام وستمزجه مع إمداداتها الحالية من وقود الطائرات التقليدي.

4-4-4: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الكويت

عززت شركة البترول الكويتية العالمية المتفرعة من مؤسسة البترول الكويتية (KPC)، والتي تعمل تحت اسم Q8 في أوروبا، حضورها بشكل كبير في سوق وقود الطيران. واحتلت المؤسسة من خلال شركة Q8Aviation، موقعها كمورد رئيسي لوقود الطائرات في أوروبا، مستفيدة من تراجع صناعة تكرير النفط في هذه المنطقة، وتمكنت من إنشاء سلسلة إمداد عملاقة عبر مرافق الاستيراد التي أسستها في روتردام وسلوفينيا، فاستطاعت أن تستقطب أكثر من سبعين مطار دولي وإقليمي، ووصلت مبيعاتها السنوية من وقود الطيران إلى أكثر من 8 مليار لتر، لتزويد أكثر من 2000 طائرة تابعة لنحو 200 شركة طيران عالمية.

في إطار جهودها نحو الاستدامة، وقعت شركة Q8Aviation اتفاقيات تعاون وشراكات استراتيجية لتوفير وقود الطيران المستدام، منها على سبيل المثال، اتفاقية مع شركة EasyJet تقوم بموجبها تلبية متطلبات وقود الطيران المستدام للسنوات الخمس المقبلة، وذلك لمساعدة EasyJet لتحقيق هدفها للوصول إلى صافي انبعاثات كربونية صفرية بحلول عام 2050. (Q8Aviation, 2024)

4-4-5: تطورات وقود الطيران المستدام في جمهورية مصر العربية

وقعت كل من الشركة المصرية لتدوير النفايات الصلبة ECARU وشركة القلعة القابضة، وشركة Axens الفرنسية، اتفاقية لإعداد دراسات اقتصادية وفنية لمشروع إنتاج الإيثانول الحيوي، ووقود الطيران المستدام SAF. سوف تستغرق الدراسة سبعة أشهر. (Hydrocarbon processing, 2023)

4-4-6: تطورات وقود الطيران المستدام في سلطنة عمان

وقّعت هيئة الطيران المدني مذكرة تعاون مشتركة مع مجموعة "OQ" العمانية وشركة " Sky Energy"؛ لدراسة تطوير منشأة لتصنيع وقود الطيران المستدام في سلطنة عُمان، حيث ستقوم الأطراف الموقعة بتحديد الإمكانيات الأساسية اللازمة لإنشاء الوحدة، وبناء القدرات من خلال الاستفادة من الخبرات العالمية، كما تنص مذكرة التعاون على بحث التقنيات المستخدمة في تصنيع وقود الطيران المستدام.

يأتي هذا المشروع في إطار جهود تعزيز الوقود الأخضر في سلطنة عُمان، وتسخير إمكانياتها لدعم إنتاج وانتشار وقود الطيران المستدام عالمياً. (وجهات، 2023)

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

- إن العائق الرئيسي أمام إنتاج وقود الطيران المستدام هو التكلفة، حيث يتراوح السعر من نحو الضعف إلى ثمانية أضعاف سعر وقود الطيران التقليدي، وفقاً لتحليل أجرته المؤسسات الدولية.
- إن الاستثمار في وقود الطيران منخفض الكربون يدعم تحول الصناعة نحو الاستدامة ويدفع التقدم في التقنيات الخضراء الأخرى.
- إن تحفيز إنتاج وقود الطيران المستدام يتطلب حوافز سياسية كبيرة لسد الفجوة السعرية بين وقود الطيران التقليدي والوقود الحيوي.
- للوصول إلى هدف الانبعاثات الصفرية الصافية، يجب الاستفادة من جميع المسارات المتاحة لإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.
- يعد تمويل ودعم مؤسسات البحث والتطوير أمراً بالغ الأهمية لإيجاد التقنيات الحديثة لتحسين إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.
- من أهم الخصائص التي تساهم في انتشار استخدام وقود الطيران المنخفض الكربون المنتج من النفط أو الوقود الحيوي هي إمكانية مزجه مع الوقود النفطي التقليدي، وأن تتوافق خصائصه مع متطلبات المواصفات التي تحددها الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM 165521)، أو ما يعادلها في معيار وزارة الدفاع البريطانية (Defence 91-9122)، إضافة إلى متطلبات الأداء التشغيلي والشروط التي تضمن سلامة محركات الطائرات الحالية دون الحاجة إلى إجراء أية تعديلات عليها.
- يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد

خام متجددة فقط أو إنشاء مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها.

- تكتسب عملية تكرير الزيوت المشتقة من الكتلة الحيوية لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون في مصافي تكرير النفط اهتماماً متنامياً ضمن جهود السعي لتلبية متطلبات خفض الانبعاثات الكربونية الناتجة عن المنتجات النفطية في كافة مراحل دورة حياتها، بدءاً من عمليات الإنتاج وحتى الاستهلاك.
- أثبتت المعالجة المشتركة أنها مسار فعال لتعزيز إنتاج وقود الطيران منخفض الكربون.
- يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير، ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع وحتى مرحلة الاستهلاك.
- لتسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية تساهم في زيادة إمدادات الوقود المنخفض الكربون، أو تحفيز الطلب، أو تمكين الربط بين العرض والطلب.
- تتطلب عملية نزع الكربون من قطاع الطيران تضافر جهود كافة الهيئات والمؤسسات المعنية، والتنسيق والتكامل بين مزودي التكنولوجيا، والمؤسسات الحكومية، وهيئات حماية البيئة، وأسواق الطاقة، والمستثمرين، والمستهلكين.
- نظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون وإعلان العديد من شركات النفط الكبرى عن استراتيجياتها للحد من البصمة الكربونية لعملياتها ومنتجاتها بحلول عامي 2030 و2050 فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF)
- يجب على قطاع الطيران أن يبحث عن الفرص ويسعى لحل الصعوبات التي تواجه إنتاج واستهلاك الوقود المستدام، حتى يتمكن من خفض الانبعاثات الكربونية وضمان مستقبل مستدام.

- ينبغي لمنتجي الوقود المستدام والطاقة التركيز على نشر طاقات إنتاج الوقود المستدام الحالية وإظهار حالة اليقين في استمرار الطلب على المدى الطويل، بهدف تشجيع المستثمرين على تمويل المشاريع المستقبلية.
- يجب على الحكومات العمل على إصدار التشريعات التي تدعم إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام، وأن تسعى لإنشاء مشاريع إنتاج تعزز توفر الوقود في الأسواق.
- على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن العديد من هذه الدول تقود الطريق لتنويع مزيج الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون ولديها فرصاً ثمينة لأن تكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، وغيرها من النباتات التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة.
- شهدت بعض الدول العربية تطورات ملحوظة في مجال تشجيع إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام وعقدت شراكات واتفاقيات مع بعض الشركات العالمية المتخصصة. تتركز هذه التطورات في دولة الإمارات العربية المتحدة، والبحرين، والمملكة العربية السعودية، ودولة قطر، ودولة الكويت، وجمهورية مصر العربية، وسلطنة عمان.

قائمة المراجع

المراجع العربية

- أوابك، (2023) دراسة **"تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط"** منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول. متوفرة على موقع المنظمة www.oapecorg.org
- وجهات، (2023) **"توقيع مذكرة تعاون لتطوير وقود الطيران المستدام في سلطنة عُمان"** موقع إخباري: https://wejhatt.com/?p=80154
- سكاي نيوز، (2023) **"أرامكو تستثمر في مشروع لإنتاج وقود طائرات منخفض الكربون"** موقع سكاي نيوز عربية.
- أوابك، (2024) **"أساسيات صناعة تكرير النفط"** الملتقى الخامس والعشرون لأساسيات النفط والغاز، دولة الكويت، 23-25 أبريل/نيسان 2024.

المراجع الإنجليزية

- ACAO, (2024) "Arab Civil Aviation Organization" www.acao.org.ma
- ATAG, (2017) "**Beginner's Guide to Sustainable Fuels**" Air Transport Action Group.
- Avery M., and Strohm, J., (2021) **"FCC Pathways to Co-processing"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, (2023). pp.35-45. www.digitalrefining.com
- Barbarà, L., & Galea, C., (2024) **"Scaling Up Sustainable Aviation Fuel Supply: Overcoming Barriers in Europe, the US and the Middle East"** World Economic Forum.
- Bauen, et al., (2022) **"CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential"** Applied Sciences.
- BYRUM, Z., et al., (2021) **"Technological Pathways for Decarbonizing Petroleum Refining"** Working Paper, World Resources Institute. Washington, USA.
- Berger, R., (2020) **"Sustainable Aviation Fuels: The Best Solution to Large Sustainable Aircraft"** ROLAND BERGER LTD. London. UK.
- Bernard, Y., (2023) **"Decarbonisation of transport fuels to reduce emissions"** Decarbonization Technology Magazine, November 2023. p.7-11. www.decarbonisationtechnology.com
- Bernard, Y., et al., (2021) "**All Roads Leading to Sustainable Aviation Fuel**" Decarbonization Technology Magazine. May 2021. P.p. 35-41

- BOSCH, J., et al., (2017) **"Aviation biofuels: strategically important, technically achievable, tough to deliver"** Grantham Institute Briefing paper No 23. Imperial Collegue. www.imperial.ac.uk
- Carrington, C., & Navedkhan, M., (2023) "**Biofuels syncrude pathway for producing SAF from waste"** Decarbonization Technology Magazine, May 2023. p.29-33. www.decarbonisationtechnology.com
- Carter, E., & Hickman A., (2021) **"Ready-now Blue Hydrogen Leads The Way to Decarbonization"** H2 Tech Magazine, Setember 2021. pp.23-29 .
- Chiaramonti, D., et al., (2021) **"Can Lower Carbon Aviation Fuels (LCAF) Really Complement Sustainable Aviation Fuel (SAF) towards EU Aviation Decarbonization?"** MDPI, Energies, Switzerland. www.mdpi.com
- Chlapik, K., Winch, D. & Dierking, D., (2022) **"Achieving 95% Direct CO2 Reduction for Hydrogen Plants"** Digital Refining, Q2, pp. 20-26.
- Danicourt, J., et., (2022) **"A Realistic Path to Net-Zero Emissions for Commercial Aviation"** BAIN & COMPANY**.**
- Fantuzzi, A., et al., (2023) **"Low-carbon Fuels for Aviation"** Imperial College, Institute for Molecular Science and Engineering. UK www.imperial.ac.uk
- Goldner, w., et al., (2022) "**SAF Grand Challenge Roadmap-Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel"** www.biomassboard.gov
- Herbertson, J., & Wheeler, D., (2022) "**Lower Carbon Aviation Fuels: contributing to the energy transition"** Climate Change Mitigation: Sustainable Aviation Fuels, Chapter seven, ICAO.
- Hydrocarbon processing, (2024) **"Asia's SAF projects and agreements"** Hydrocarbon processing Magazine www.hydrocarbonprocessing.com
- Hydrocarbon processing, (2023) **"Emirates and Shell Aviation Sign Agreement for SAF Supply at airline's Dubai Hub"** Hydrocarbon processing Magazine www.hydrocarbonprocessing.com
- Hydrocarbon processing, 2 (2023) **"ECARU, Qalaa Holdings, and Axens to study second-gen biofuel and SAF Production Project"** Hydrocarbon processing Magazine, July.2023.

- ICAO, (2023) **"Guidance on Potential Policies and Coordinated Approaches for the Deployment of Sustainable Aviation Fuel"** ICAO Committee on Aviation Environment Protection.
- ICAO, 2 (2023) **"Lower Carbon Aviation Fuels Technology Update**" Presentation developed by experts from the ICAO Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP).
- IATA, (2023) **"Net zero 2050: sustainable aviation fuels"** Fact Sheet. The International Air Transport Association. www.iata.org
- IEA, (2021) **"China's Emissions Trading Designing efficient allowance allocation Scheme"** Fact Sheet**,** International Energy Agency. Website: www.iea.org
- Jha, A., et al., (2021) **"A critical Analysis of CO2 Capture Technologies"** Hydrocarbon Processing Magazine. June 2021 pp. 59-65.
- Jing, L., et al., (2022) **"Understanding Variability in Petroleum Jet Fuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions to Inform Aviation Decarbonization"** Nature Communications Publisher. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1
- Kapoor, P., (2024) **"UAE's Masdar and France's Total Energies explore Green Hydrogen to Methanol to SAF initiative**" O&GJ Middle east. August 2024.
- Ko, K., and Sivasubramanian, G., (2022) **"Hydrogen production with lower carbon Emissions"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2023. pp.55-63. Available at: www.digitalrefining.com
- Nelson, R., (2022) **"RefuelEU is the first step on the long road to decarbonize aviation and will have a significant impact on the evolution of demand for SAF in Europe" Decarbonization Technology Magazine, November 2022. p.7-11.** www.decarbonisationtechnology.com
- Newsom, R., et al., (2023) **"Sustainable aviation fuel (SAF) on the rise Sustainable development through a dynamic environment"** Ernst & Young LLP. www.ey.com
- Padt, A., (2021) **"Sustainable aviation fuel comes of age"** Neste. Decarbonization Technology Magazine, August 2021. www.decarbonisationtechnology.com
- Pavlenko, N., & Searle, S., (2021) **"Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels"** Working paper 2021-11, INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. www.theicct.org

- POST, (2020) **"Low Carbon Aviation Fuels"** POST, UK Parlument**,** POSTNOTE 616, February, 2020.
- Q8Aviation, (2024) "Q8 Latest News" www.q8aviation.com
- Repsol, (2021) "**Refining Transformation From the Traditional to the Low Carbon Refinery"** www.repsol.com
- Royal Society, (2023) **"Net Zero Aviation Fuel: Resoures Requirement and Environmental Impacts"** Policy Breifing.The Royal Society. https://royalsociety.org/news-resources/projects/low-carbon-energy-programme/net-zero-aviation-fuels/
- Sayles, S & Ohmes, R., (2021) **"Conversion to a green refinery. Assessing the Options, Risks, and Viability of the Biofuels Refinery of the future"** BECHT, Decarbonization Technology Magazine. pp.57-65 .
- Singh, R. B., (2022) **"Evaluate Options for Decarbonizing Petroleum Refineries"** Hydrocarbon Processing, Issue August 2022, pp. 29-34.
- Soone, J., (2020) **"Sustainable aviation fuels"** Breifing of European Parliamentary Research Service.
- Starck, L., et al. (2016) **"Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimization of Process Yield. Oil & Gas Science and Technology"** - Revue d'IFP Energies nouvelles, 2016.
- Sustainable Aviation, (2022) **"Decarbonisation Road-Map: A Path to Net Zero"** Sustainable Aviation, UK, Available at: www.sustainableaviation.co.uk
- Wagner DA SILVA, M., (2022) **"The role of biofuels in the energy transition" Petroleum Technology Quarterly Magazine,** Q1 2022, p.p.91-94. www.digitalrefining.com
- Wormslev, E., et al., (2016) **"Sustainable Jet Fuel for Aviation. Nordic Perpectives on the Use of Advanced Sustainable Jet Fuel for Aviation"** Nordic Council of Ministers. www.norden.org

البحث الثاني

الواقع والآفاق المستقبلية للمعادن الحرجة ودور الدول العربية في تأمين سلاسل الإمدادات

ماجد عامر *

* خبير اقتصادي - الإدارة الاقتصادية - منظمة أوابك - الكويت

المحور الأول

المعادن الحرجة: المفهوم والأهمية والتصنيفات والكارتلات والاستراتيجيات والمبادرات العالمية

أولاً: مفهوم المعادن الحرجة وأهميتها

المعادن الحرجة هي تلك المعادن التي تعتبر ضـــرورية للتنمية الاقتصـــادية والأمن القومي. وقد يؤدي عدم توفر هذه المعادن أو تركيز استخراجها أو معالجتها في عدد قليل من المواقع الجغرافية إلى نقاط ضـــعف في ســـلســـلة التوريد وحتى انقطاع الإمدادات. هذا ومن المتوقع أن يعتمد الاقتصـــاد العالمي المســـتقبلي على تقنيات تســـتخدم المعادن الحرجة مثل الليثيوم، والجرافيت، والكوبالت، والتيتانيوم، والعناصـر الأرضـية النادرة. وتُعد هذه المعادن ضـــرورية للنهوض بالعديد من القطاعات، بما في ذلك قطاع الإلكترونيات عالية التقنية وقطاع الاتصالات وقطاع النقل. كما أن المعادن الحرجة تُعد ضرورية لدعم التحول العالمي إلى اقتصـــاد منخفض الانبعاثات الكربونية، وتكنولوجيات الطاقة المتجددة المطلوبة للوفاء بالتزامات هدف صـــافي الانبعاثات الصـــفرية لعدد متزايد من الدول في جميع أنحاء العالم. فتلك المعادن تعتبر هي الأســاس الذي بنيت عليه التكنولوجيا الحديثة، من الألواح الشـمسـية إلى أشباه الموصلات، وتوربينات الرياح إلى البطاريات المتقدمة للتخزين والنقل.

وبشكل عام، تعتمد تحولات الطاقة بشكل كبير على المعادن الحرجة، وبالتالي أصبح من الضـروري تحديد وتطوير سـلاسـل القيمة المرتبطة بها والتي تعتبر بالغة الأهمية، كما أصـبحت أيضـاً مرونة سـلاسـل الإمدادات الخاصـة بها أولوية متزايدة بالنسـبة للاقتصـادات العالمية الكبرى.

وتجدُر الإشـارة إلى أن العديد من المعادن الحرجة في الوقت الحالي تعتبر أسـاسـية لقطاعات التكنولوجيا المتقدمة، وهي تشمل العناصر الأرضية النادرة والمعادن الأخرى مثل عناصر مجموعة الليثيوم والإنديوم والتيلوريوم والجاليوم والبلاتين.

ثانياً: تصنيفات المعادن الحرجة

تختلف منهجية التصـــنيف الخاص بالمعادن الحرجة ما بين دول العالم، اعتماداً على مســتوى التنمية الاقتصــادية، ومتطلبات الصــناعة، والمصــالح الوطنية والمخاوف الأمنية، والتكنولوجيا، وتغيرات السوق، وثروات الموارد الطبيعية. وعلى الرغم من ذلك فإن الأساس المنطقي للتصـنيف يظل متوافقاً بين معظم دول العالم، حيث يتم تحديد قائمة المعادن الحرجة من خلال عاملين رئيســيين وهما، **العامل الأول: الأهمية الاقتصــادية**، التي تبحث بشــكل تفصــيلي في تخصــيص المواد الخام والمعادن للاســتخدامات النهائية بناء على التطبيقات الصــناعية المختلفة، وتقيس التأثير المحتمل لعدم توافرها لدى الموردين. **والعامل الثاني: مخاطر الإمداد**، التي تسلط الضوء على تركيز الإنتاج العالمي للمواد الخام الأولية والمعادن على المستوى الجغرافي، وكيفية إدارة الدول المصدره لها – بما في ذلك الجوانب البيئية، مع تحديد البدائل المتاحة، ودرجة الاعتماد على الواردات، وكذلك القيود التجارية.

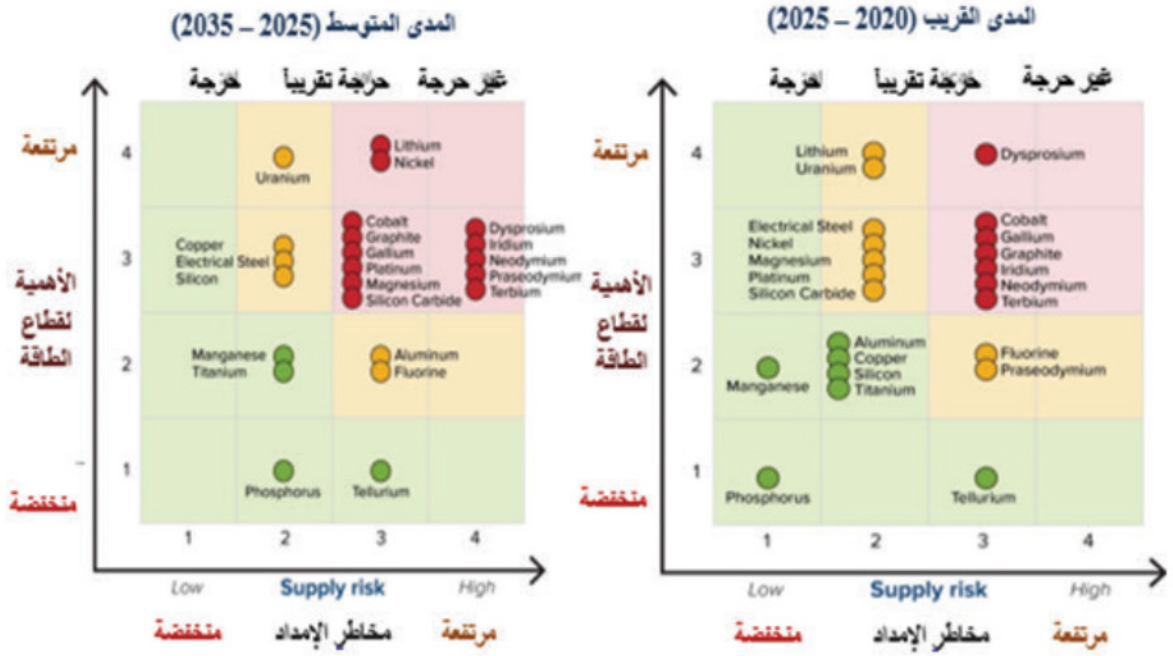
وفيما يلي استعراض لمنهجية تصنيف المعادن الحرجة في بعض دول العالم:

- **الولايات المتحدة الأمريكية:** اعتُمدت منهجية الفحص على مرحلتين لتحديد قائمة المعادن الحرجة، حيث يتم تقييم الأهمية المحتملة للمعدن في المرحلة الأولى باســتخدام ثلاثة مؤشرات أساسية هي: مخاطر الإمداد، ونمو الإنتاج، وديناميكيات السوق، وتعتمد بشكل رئيسي على بيانات هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. ويتبع ذلك تحليل متعمق لسلاسل الإمداد في المرحلة الثانية، من خلال إجراء تحليل مفصل للعوامل الأساسية التي أدت إلى تحديد مجموعة فرعية من المعادن على أنها حرجة خلال المرحلة الأولى. ووفقاً لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية، تشمل قائمة المعادن الحرجة على 50 معدن – من ضمنها سبعة معادن مرتبطة بقطاع الطاقة بشكل وثيق، وهي الديسبروسيوم، والنيوديميوم، والغاليوم، والجرافيت، والكوبالت، والتيربيوم، والإيريديوم، وتُستخدم هذه المعادن في تطبيقات مختلفة مثل البطاريات، ومصابيح LED، ومحلل الهيدروجين الكهربائي، وخلايا الوقود، وإلكترونيات الطاقة، وتصنف باعتبارها معادن حرجة على المدى القريب.

وتتغير أهمية ودرجات مخاطر الإمداد لبعض المعادن على المدى المتوسط، على وجه التحديد، النيكل والبلاتين والمغنيسيوم وكربيد السيليكون والبراسيوديميوم لتصنف ضمن قائمة المعادن الحرجة، ويرجع ذلك في المقام الأول إلى أهميتها في صناعة البطاريات. كما يصبح كل من الألمنيوم والنحاس والسيليكون ضمن المعادن الحرجة تقريباً على المدى المتوسط، على خلفية الطلب العالمي المتزايد على تقنيات الطاقة الشمسية والكهرباء، **كما يوضح الشكل (1)**.

الشكل (1)

تصنيف المعادن الحرجة المرتبطة بقطاع الطاقة في الولايات المتحدة



المصدر: U.S. Department of Energy.

- **المملكة المتحدة:** تم تصنيف المعادن الحرجة في المملكة المتحدة من حيث مخاطر الإمداد العالمية باستخدام ثلاثة مؤشرات، أولها تركيز الإنتاج، وثانيها الجزء المعدني المصاحب، وثالثها معدل إعادة التدوير. ومن حيث الأهمية الاقتصادية تم استخدام ستة مؤشرات، وهي: تطور الإنتاج، وتقلب الأسعار، وقابلية الاستبدال، وتركيز التجارة العالمية، والاعتماد على الواردات، ومساهمة القيمة المضافة الإجمالية. وبناء على ذلك، تم تحديد

ما مجموعه 18 معدن من المعادن الحرجة، باعتبارها ذات أهمية كبيرة لاقتصاد المملكة المتحدة.

- **المفوضية الأوروبية:** تُصدر المفوضية الأوروبية قائمة بالمعادن الحرجة منذ عام 2011، ويتم تحديثها كل ثلاث أعوام. أما فيما يخص المعايير الرئيسية المستخدمة لتحديد أهمية المعدن بالنسبة للاتحاد الأوروبي فهي الأهمية الاقتصادية – من حيث تطبيقات الاستخدام النهائي والقيمة المضافة لقطاعات التصنيع. وتعتبر مخاطر الإمداد هي المعيار الأخر، ويتم تحديدها بناء على درجة اعتماد الاتحاد الأوروبي على الاستيراد، والموردين والدول التي يستورد منها الاتحاد الأوروبي من هذه المعادن، وتم اعتبار عاملي الاستبدال وإعادة التدوير بمثابة تدابير للحد من مخاطر الإمداد. وبناء على ما تقدم، حددت المفوضية الأوروبية قائمة تضم 34 معدن من المعادن الحرجة في عام 2023.
- **الصين:** تُستخدم عدة معايير مختلفة، ولكنها متداخلة في بعض الأحيان لتصنيف المعادن الحرجة في الصين، من ضمنها: الأهمية الاقتصادية، ومخاطر الإمداد، والقابلية للاستبدال، والمعادن اللازمة لتطوير الصناعات الإستراتيجية الناشئة في الصين، والأمن القومي.
- **اليابان:** تم إعداد القائمة الأولى للمعادن الحرجة في عام 1984، وظلت هذه القائمة دون تغيير يذكر في العقود اللاحقة. وفي مارس 2020، أصدرت اليابان أحدث منظور لها حول كيفية تأمين سلاسل الإمداد الخاصة بها للمعادن والمواد الحرجة كجزء من استراتيجيتها بشأن الموارد العالمية الجديدة. وأكدت الاستراتيجية على الأهمية المتزايدة للمعادن الحرجة في صناعة المركبات الكهربائية ومعدات توليد الطاقة المتجددة المتوقع أن تساهم في تخفيف الانبعاثات الكربونية. وقد حددت اليابان قائمة تضم 31 معدن من المعادن الحرجة باعتبارها ذات أهمية حيوية لاقتصادها.
- **استراليا:** اصدرت في عام 2019، أول قائمة للمعادن الحرجة والاستراتيجية الوطنية المرتبطة بها. وتم تحديد 24 معدن من المعادن الحرجة ضمن تلك القائمة، وتمت إضافة عنصرين آخرين في أحدث استراتيجية أصدرتها أستراليا في عام 2022.

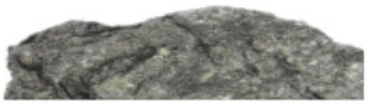
ويوضـــح الشـــكل (2) مقارنة بين قوائم المعادن الحرجة في الصـــين والاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الأمريكية.

الشكل (2)

مقارنة بين قوائم المعادن الحرجة في الصين والاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الأمريكية، عام 2023

	Overlapping		
	US	EU	China
Aluminium/bauxite	●	●	●
Antimony	●	●	●
Cobalt	●	●	●
Fluorspar	●	●	●
Graphite/natural graphite	●	●	●
Lithium	●	●	●
Nickel	●	●	●
Rare earth metals	●	●	●
Tungsten	●	●	●
Arsenic	●	●	
Baryte	●	●	
Beryllium	●	●	
Bismuth	●	●	
Germanium	●	●	
Hafnium	●	●	
Magnesium	●	●	
Manganese	●	●	
Niobium	●	●	
Platinum group metals	●	●	
Tantalum	●	●	
Titanium	●	●	
Vanadium	●	●	
Tin	●		●
Zirconium	●		●
Copper		●	●
Phosphorus		●	●

	Exclusive		
	US	EU	China
Cesium	●		
Chromium	●		
Indium	●		
Rubidium	●		
Samarium	●		
Tellurium	●		
Zinc	●		
Boron/borate		●	
Coking coal		●	
Feldspar		●	
Gallium		●	
Helium		●	
Phosphate rock		●	
Scandium		●	
Silicon		●	
Strontium		●	
Gold			●
Iron ore			●
Molybdenum			●
Potash			●
Uranium			●



المصدر: Geopolitics of the Energy Transition, IREA.

ومن خلال المقارنة، يلاحظ أنه هناك إتفاق بين كل من الولايات المتحدة الأمريكية والصين والاتحاد الأوروبي على 9 معادن كونها حرجة وهي أليومنيوم/البوكسيت (Aluminium/bauxite)، Antimony،كوبالت (Cobalt)، الجرافيت (Graphite Fluorspar) الجرافيت/الطبيعي (Graphite/natural)، الليثيوم (Lithium)، النيكل (Nickle)، التنغستين (Tungsten)، المعادن الأرضية النادرة (Rare earth metals)، كما يوضح الجدول أعلاه.

ثالثاً: كارتلات المعادن الحرجة

يثير التركيز العالي لإنتاج المعادن الحرجة مخاوف بشأن تشكيل كارتلات السلع، وهي مجموعات من المنتجين الرئيسيين الذين يعملون على تعظيم أرباحهم من خلال التعاون في إنتاج وتسعير و/أو توزيع السلع. وتاريخياً، قامت مجموعات المنتجين والحكومات بمحاولات مختلفة للتأثير على أسواق المعادن في أوائل القرن العشرين (البنك الدولي، 2022). وتم إنشاء عدد من الكارتلات في ثلاثينيات القرن العشرين استجابة للأسعار المنخفضة للغاية التي سادت خلال فترة الكساد الكبير. كما شهدت فترة الستينيات والسبعينيات من القرن الماضي موجة أخرى من التكتلات الاحتكارية، في أعقاب إنهاء الاستعمار وازدهار الاقتصاد العالمي، مع إنشاء العديد من التكتلات ونوادي المنتجين للتحكم في أسواق المعادن مثل البوكسيت والنحاس، وخام الحديد، والقصدير، واليورانيوم. ومع ذلك، فإن العديد من هذه المحاولات لم تدم طويلاً، لأنها واجهت قضايا مثل الخلافات الداخلية، وعدم مشاركة المنتجين الرئيسيين، واستبدال المعادن أو الابتكار في تقنيات العرض والطلب.

بالإضافة إلى كارتلات المنتجين، كانت هناك العديد من الاتفاقيات الدولية للسلع الأساسية التي تشمل المنتجين والمستهلكين على حد سواء. على سبيل المثال، اتفاقيات السلع الدولية لسوق القصدير من عام 1956 حتى عام 1985، التي هدفت إلى تحقيق الاستقرار في سوق القصدير من خلال إنشاء نظام مخزون احتياطي يسمح للمنتجين بتخزين الإمدادات الزائدة خلال فترات زيادة العرض والإفراج عنها خلال فترات النقص، مما عمل على إبقاء أسعار القصدير مرتفعة لعدة أعوام، (البنك الدولي، 2022). وخلال الأعوام الأخيرة، نظرت العديد من الدول المنتجة للمعادن مرة أخرى في فكرة التكتلات الاحتكارية، على الرغم من أن الخطط والمقترحات الخاصة بكارتلات المعادن الجديدة لا تستوف معايير إنشاء كارتلات السلع الأساسية.

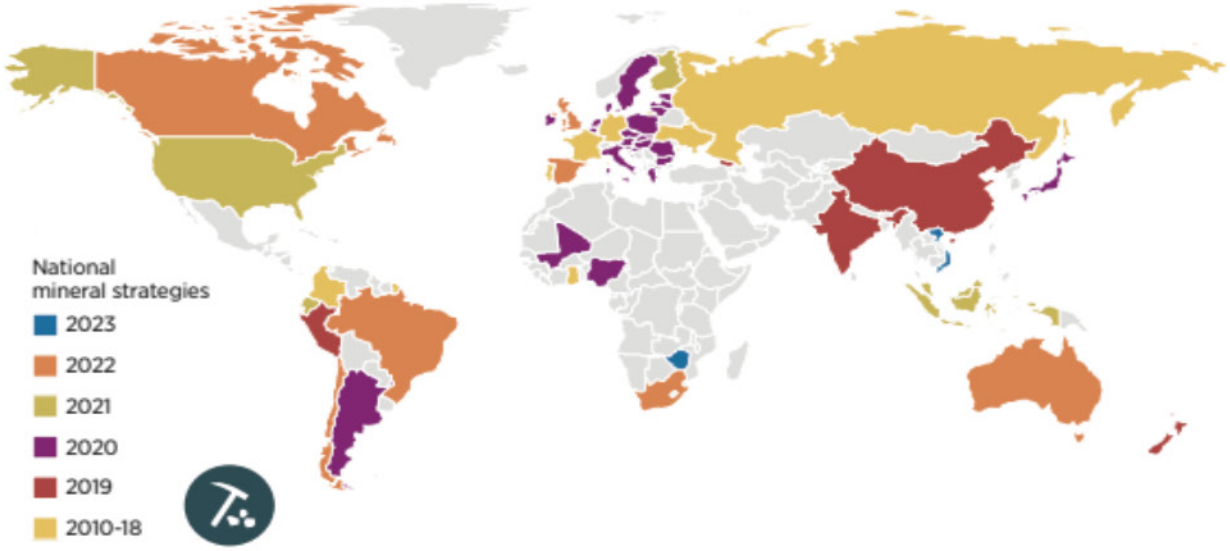
وقد قامت روسيا وجنوب أفريقيا بالتوقيع على مذكرة تفاهم بشأن معادن مجموعة البلاتين في قمة البريكس (البرازيل وروسيا والهند والصين وجنوب أفريقيا) في شهر مارس 2013. حيث تمتلك تلك الدولتين معاً حصة تقدر بأكثر من 80% من إمدادات البلاتين العالمية وأكثر من 96% من الاحتياطيات، مما يعيق دخول المنافسين المحتملين (هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية، 2022). وتدرس إندونيسيا، وهي أكبر دولة لتعدين النيكل في العالم، إمكانية إنشاء كارتل لبعض معادن البطاريات مثل النيكل والكوبالت (Dempsey and Ruehl, 2022)، غير أن كبار منتجي النيكل الأخرين مثل أستراليا وكندا والفلبين لا يدعموا مثل هذه الفكرة. كما تجري كل من الأرجنتين وبوليفيا وتشيلي محادثات لإنشاء "كارتل الليثيوم"، حيث تمتلك الدول الثلاث مجتمعة حوالي 65% من موارد الليثيوم عالمياً، وتستحوذ على ما يقرب من 30% من الإنتاج العالمي في عام 2020 (Gielen and Lyons, 2022b).

رابعاً: الاستراتيجيات والمبادرات العالمية لتطوير المعادن الحرجة

يدرك عدد متزايد من الدول الأهمية الاستراتيجية لسلاسل إمدادات المعادن، لذلك تقوم بإنشاء أو تحديث الاستراتيجيات الوطنية للمعادن الحرجة. وبالنسبة للدول التي تعتمد على الواردات، فإن الهدف الأساسي من هذه الاستراتيجيات والمبادرات هو توقع مخاطر الإمدادات المحتملة والتعويض عنها، بينما تسعى الدول الغنية بالمعادن الحرجة إلى تعزيز القدرة التنافسية لقطاعات التعدين لديها وجذب الاستثمارات، **كما يوضح الشكل (3)**.

الشكل (3)

الدول التي اعتمدت استراتيجيات وطنية للتعدين، خلال الفترة (2010-2023)



المصدر: Geopolitics of the Energy Transition, IREA.

وتجدُر الإشارة إلى أنه لا يمكن تحقيق موثوقية الإمدادات دون الاستثمار في إنشاء مخزونات استراتيجية من المعادن الحرجة، ولا يمكن لأي دولة بمفردها أن تلب طلبها على جميع المعادن الحرجة، الأمر الذي يتطلب بدوره تعزيز التعاون الدولي بين المنتجين والمستهلكين، جنباً إلى جنب مع تطوير وتنفيذ استراتيجيات تعاونية تعود بالنفع على كافة الأطراف. ونظراً للفترات الزمنية الطويلة اللازمة لإنشاء مناجم ومصانع معالجة جديدة، فمن المتوقع أن تستمر سلاسل الإمدادات المركزة في المستقبل القريب. وينبغي للدول أن تهدف إلى تطوير استراتيجيات مزدوجة لضمان التعاون للحفاظ على عمل الأسواق، مع العمل على تنويع سلاسل الإمداد على المدى الطويل. وتركز العديد من المبادرات الثنائية والإقليمية والصناعية على تحديات سلسلة الإمداد، والتي يمكن الاستفادة منها في اتخاذ إجراءات منسقة على مستوى السياسات.

وهناك العديد من المبادرات العالمية المتبناة لتطوير المعادن الحرجة، منها:

1. مبادرة الأمم المتحدة لتسخير المعادن الحرجة المرتبطة بتحولات الطاقة من أجل تحقيق التنمية المستدامة:

تعمل منظمة الأمم المتحدة من خلال هذه المبادرة مع الدول المنتجة والمستهلكة من أجل بناء الثقة والمرونة وتقاسم الفوائد في سلاسل توريد المعادن الحرجة، ودعم الدول المنتجة في تحويل سلاسل الإمداد لتسخير الفرص وتطوير قدراتها الإنتاجية والتجارية والتنظيمية من أجل التنمية المستدامة طويلة الأجل. وفي المرحلة الأولية من المبادرة، يقوم برنامج الأمم المتحدة للبيئة وعدد من وكالات الأمم المتحدة الأخرى والبنك الدولي، بالإضافة إلى المنتدى الحكومي الدولي للتعدين والمعادن والفلزات والتنمية المستدامة، بالمساعدة في تطوير إطار الأمم المتحدة بشأن الاستخدامات العادلة للمعادن الحرجة المرتبطة بتحولات الطاقة، والذي من المتوقع أن يتم مع نهاية عام 2024.

2. شراكة أمن المعادن

أُطلقت شراكة أمن المعادن في يونيو 2022 وهي عبارة عن تحالف يضم 11 دولة، هي أستراليا وكندا وفنلندا وفرنسا وألمانيا واليابان وكوريا الجنوبية والسويد والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية والمفوضية الأوروبية. وهناك إلتزام لهذا التحالف بشأن بناء سلاسل إمداد معدنية قوية ومسؤولة لدعم الرخاء الاقتصادي وأهداف المناخ.

3. الإطار التعاوني للمعادن الحرجة اللازمة لتحولات الطاقة

تم إطلاق الأطار التعاوني في مارس 2022 من قبل الوكالة الدولية للطاقة المتجددة لإنشاء منتدى مشترك لتعزيز الحوار وتنسيق الأنشطة حول مواضيع مختلفة وتعزيز التبادلات والتعاون وزيادة الشفافية وتطوير مجموعة من الأفكار حول الفجوات والحلول للتحولات في مجال الطاقة التي تعتمد على المعادن الحرجة.

4. مجموعة استشارات المعادن الحرجة وشراكة العمل من أجل الكوبالت (التحالف العالمي للبطاريات)

تم إطلاق التحالف العالمي للبطاريات في عام 2022، وذلك بناء على المبادرة الناجحة لأصحاب المصلحة المتعددين التي تم تنفيذها في الفترة (2020-2021) في إطار شراكة Cobalt Action. يعمل الأعضاء عبر سلسلة القيمة لضمان توفير الإمدادات الكافية

للسيارات الكهربائية وتخزين الطاقة، والحصول على المعادن الحرجة ومعالجتها ونقلها وتصنيعها وإعادة تدويرها بطريقة مسؤولة ومستدامة تقلل من الضرر البيئي وتخلق فوائد لأصحاب المصلحة على طول سلاسل الإمدادات.

5.مبادرة رسم خرائط المعادن الحرجة

قامت منظمات علوم الأرض التابعة لهيئة علوم الأرض الأسترالية وهيئة المسح الجيولوجي الكندية وهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية بإطلاق مبادرة رسم خرائط المعادن الحرجة في عام 2019، والتي توفر هيكلاً دولياً للتعاون بين هيئات المسوحات الجيولوجية الوطنية الثلاثة. وتتمثل أهداف المبادرة في تطوير فهم أفضل للموارد المعدنية الحرجة المعروفة، وتحديد الضوابط الجيولوجية على توزيع المعادن الحرجة للرواسب التي تنتج حالياً منتجات ثانوية، وتحديد مصادر جديدة للإمداد من خلال رسم خرائط لموارد المعادن الحرجة وتعزيز اكتشافها في الدول الثلاثة.

6.مبادرة حوكمة موارد الطاقة

بدأت مبادرة حوكمة موارد الطاقة التي تقودها الولايات المتحدة منذ عام 2019 مع أربع دول مؤسسة أخرى - أستراليا وبوتسوانا وكندا وبيرو - بهدف الحصول على أفضل الممارسات ونشرها عبر قطاع التعدين الدولي. ومن خلال الاتفاقية، ستشارك الولايات المتحدة خبرتها في مجال التعدين مع الدول الأعضاء للمساعدة في تطوير الموارد مثل الليثيوم والنحاس والكوبالت، فضلاً عن تقديم المشورة بشأن أطر الإدارة والحوكمة. ومن الدول الأخرى التي انضمت لاحقاً لهذه المبادرة الأرجنتين والبرازيل وجمهورية الكونغو الديموقراطية، وناميبيا، والفلبين، وزامبيا. وكوسيلة لنشر أفضل الممارسات، طورت الدول المؤسسة مجموعة أدوات لمشاركة وتعزيز أفضل الممارسات لتطوير قطاع التعدين.

المحور الثاني

المؤشرات الرئيسية المتعلقة بالمعادن الحرجة

أولاً: الاحتياطيات العالمية من المعادن الحرجة الرئيسية في نهاية عام 2023

1. الاحتياطيات العالمية من الكوبالت:

قُدرت الاحتياطيات العالمية من **الكوبالت** بنحو 10.6 مليون طن في نهاية عام 2023، استحوذت الدول الأفريقية على الحصة الأكبر من تلك الاحتياطيات بلغت حوالي 60.3% أو ما يعادل نحو 6.4 مليون طن (بلغت حصة جمهورية الكونغو الديموقراطية وحدها نحو 56.4%)، يليها استراليا بحصة 16% من الإجمالي العالمي، وأمريكا الشمالية بحصة 6.9%، وآسيا والمحيط الهادئ بحصة 4.7%، وأوروبا الشرقية بحصة 2.4%، وباقي دول العالم بحصة بلغت 9.7%.

2. الاحتياطيات العالمية من الليثيوم:

بلغت الاحتياطيات العالمية المقدرة من **الليثيوم** حوالي 26 مليون طن في نهاية عام 2023، تركزت بشكل رئيسي في دول أمريكا الجنوبية بحصة تصل إلى 51.1% أو ما يعادل حوالي 13.3 مليون طن (استحوذت تشيلي وحدها على 35.7% من الإجمالي العالمي)، يليها استراليا بحصة 23.8%، وآسيا والمحيط الهادئ بحصة 11.5%، وأمريكا الشمالية بحصة 4.2%، وأفريقيا بحصة بلغت 1.2%، وباقي دول العالم بحصة 8.2%.

3. الاحتياطيات العالمية من الجرافيت:

تُقدر الاحتياطيات العالمية من **الجرافيت** بنحو 364.4 مليون طن في نهاية عام 2023، استحوذت دول آسيا والمحيط الهادئ على نحو 24.2% من تلك الاحتياطيات أو ما يعادل حوالي 88.1 مليون طن (بلغت حصة الصين وحدها نحو 21.4%)، يليها أمريكا الجنوبية وتحديداً البرازيل بحصة 20.3%، وأوروبا الغربية بحصة 19.1%، وأفريقيا

بحصة 13.4% من الإجمالي العالمي، وأوروبا الشرقية بحصة 10.8%، وأمريكا الشمالية بحصة بلغت 2.4%، وباقي دول العالم بحصة 9.8%.

4. الاحتياطيات العالمية من النحاس:

قُدرت الاحتياطيات العالمية من **النحاس** في نهاية عام 2023 بنحو 1 مليار طن، تركزت معظمها في أمريكا الجنوبية بحصة بلغت نحو 31% (استحوذت كل من تشيلي وبيرو على 19% و 12% من الإجمالي العالمي على التوالي)، يليها استراليا بحصة 10%، وأفريقيا بالتحديد الكونغو الديموقراطية على حصة 8%، وآسيا والمحيط الهادئ بحصة 6.5%، وأمريكا الشمالية بالتحديد الولايات المتحدة بحصة 5%، وباقي دول العالم بحصة 39.5%.

5. الاحتياطيات العالمية من المعادن الأرضية النادرة:

بلغت الاحتياطات من **المعادن الأرضية النادرة** حوالي 115.6 مليون طن في نهاية عام 2023، استحوذت دول آسيا والمحيط الهادئ على الحصة الأكبر وهي حوالي 44% (بلغت حصة الصين وحدها نحو 38.1%)، يليها أمريكا الجنوبية وبالتحديد البرازيل بحصة نحو 18.2%، وروسيا بحصة 8.7%، وأستراليا بحصة 4.9%، والولايات المتحدة الأمريكية بحصة 1.6%، وباقي دول العالم بحصة 22.6% من إجمالي الاحتياطيات العالمية من المعادن الأرضية النادرة.

6. الاحتياطيات العالمية من البلاتنيوم:

قدرت الاحتياطيات العالمية من **البلاتنيوم** بنحو 71.6 مليون طن في نهاية عام 2023، تركزت بشكل رئيسي في أفريقيا بحصة 89.7% (منها 88% في جنوب أفريقيا و1.7% في زيمبابوي)، يليها روسيا بحصة 7.7%، وأمريكا الشمالية بحصة 1.6% (منها 1.1% في الولايات المتحدة الأمريكية و0.5% في كندا)، وباقي دول العالم بحصة تبلغ 1%.

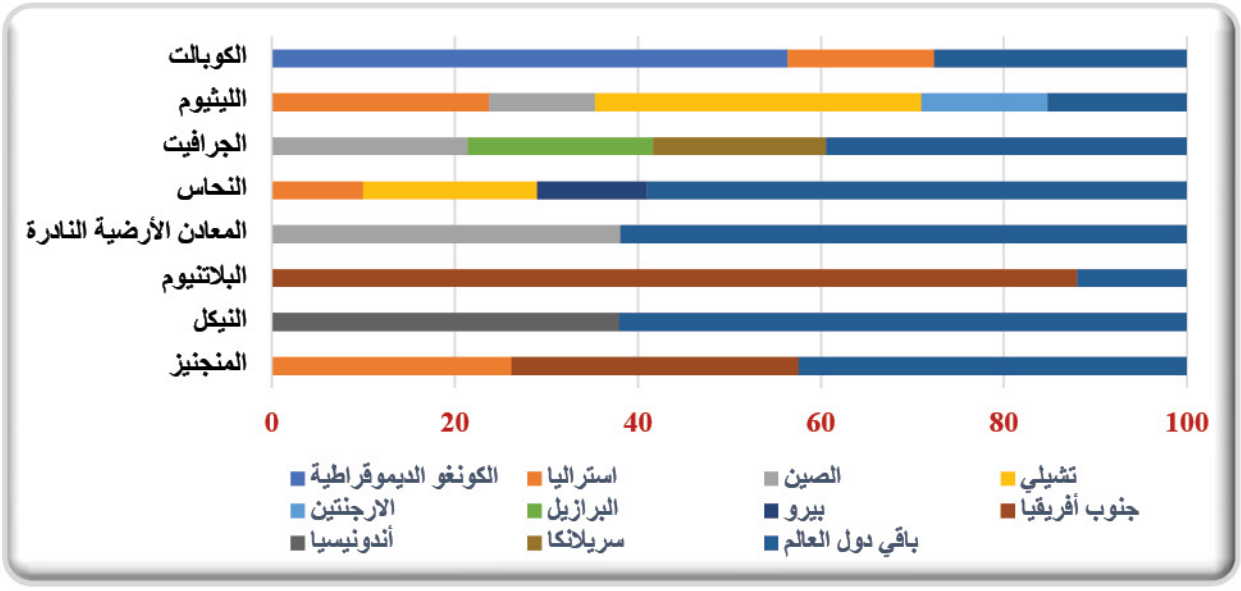
7. الاحتياطيات العالمية من النيكل:

بلغت الاحتياطيات العالمية من **النيكل** في نهاية عام 2023 نحو 144.9 مليون طن، استأثرت دول آسيا والمحيط الهادئ بالحصة الأكبر بلغت نحو 46.2% (منها اندونيسيا بحصة 38% وكاليدونيا الجديدة بحصة 4.9% والفلبين بحصة 3.3%)، يليها استراليا بحصة 16.6%، وروسيا بحصة 5.7%، وكندا بحصة 1.5%، وباقي دول العالم بحصة 30%.

8. الاحتياطيات العالمية من المنجنيز:

قُدرت الاحتياطيات العالمية من **المنجنيز** بنحو 1.9 مليون طن في نهاية عام 2023، تركزت في أفريقيا بحصة بلغت نحو 34.6% (منها جنوب أفريقيا وحدها بحصة 31.4%)، يليها استراليا بحصة 26.2% من الإجمالي العالمي، ودول آسيا والمحيط الهادئ بحصة 16.5% (منها 14.7% في الصين و1.8% في الهند)، وباقي دول العالم بحصة 22.7%، **كما يوضح الشكل (4) والجدول (1).**

الشكل (4)
التوزيع الجغرافي للاحتياطيات العالمية المُقدرة من المعادن الحرجة في نهاية عام 2023، (%)



المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

الجدول (1)

الاحتياطيات العالمية المُقدرة من المعادن الحرجة

في نهاية عام 2023، (ألف طن)

	الكوبالت	الليثيوم	الجرافيت	النحاس	المعادن الأرضية النادرة	البلاتنيوم	النيكل	المنجنيز
استراليا	1700	6200		100000	5700		24000	500
أمريكا الشمالية، منها:	**730**	**1100**	**8800**	**50000**	**1800**	**1130**	**2200**	**-**
الولايات المتحدة		1100		50000	1800	820		
كندا	230		5700			310	2200	
كوبا	500							
المكسيك			3100					
أوروبا الشرقية	**250**	**-**	**39395**	**-**	**10000**	**5500**	**8300**	**-**
روسيا	250		25645		10000	5500	8300	
أوكرانيا			13750					
أمريكا الجنوبية	**-**	**13290**	**74000**	**310000**	**21000**	**-**	**-**	**-**
تشيلي		9300		190000				
البرازيل		390	74000		21000			
بيرو				120000				
الارجنتين		3600						
أوروبا الغربية	**-**	**60**	**69600**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
النرويج			600					
البرتغال		60						
تركيا			69000					
آسيا والمحيط الهادئ	**505**	**3000**	**88100**	**65000**	**50900**	**-**	**66900**	**314**
الصين	140	3000	78000	41000	44000			280
الهند			8600		6900			34
اندونيسيا				24000			55000	

"تابع" الجدول (1)

الاحتياطيات العالمية المُقدرة من المعادن الحرجة

في نهاية عام 2023، (ألف طن)

	الكوبالت	الليثيوم	الجرافيت	النحاس	المعادن الأرضية النادرة	البلاتنيوم	النيكل	المنجنيز
الفلبين	260						4800	
سريلانكا			1500					
كاليدونيا الجديدة	56						7100	
بابوا غينيا الجديدة	49							
أفريقيا	**6420**	**310**	**49000**	**80000**	**162**	**64200**	**–**	**661**
الكونغو الديموقراطية	6000			80000				
زيمبابوي		310				1200		
زامبيا	270							
موزمبيق			25000					
مدغشقر	100		24000		162			
الجابون								61
جنوب أفريقيا	37					63000		600
المغرب	13							
باقي دول العالم	**1037**	**2068**	**35500**	**395600**	**26040**	**800**	**43470**	**433**
الإجمالي العالمي	**10642**	**26028**	**364395**	**1000600**	**115602**	**71630**	**144870**	**1908**

المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

ثانياً: تطور الإنتاج العالمي من المعادن الحرجة خلال الفترة (2013 – 2023)

1. الإنتاج العالمي من الكوبالت:

ارتفع الإنتاج العالمي من **الكوبالت** من 131.6 ألف طن في عام 2013 ليصل إلى 196.9 ألف طن في عام 2023، أي بمعدل زيادة بلغ حوالي 4.1% سنوياً. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، استحوذت أفريقيا على الحصة الأكبر من إنتاج **الكوبالت** شكلت نحو 74.4% (منها 71% في جمهورية الكونغو الديموقراطية) في عام 2023، يليها دول آسيا

والمحيط الهادئ بحصة 5.6%، ثم أوروبا الشرقية وبالتحديد روسيا بحصة 4.5%، وأمريكا الشمالية بحصة 2.7%، وأستراليا بحصة 2.3%، وباقي دول العالم بحصة بلغت 10.5%.

2. الإنتاج العالمي من الليثيوم:

بلغ الانتاج العالمي من **الليثيوم** نحو 198 ألف طن في عام 2023، وهو مستوى مرتفع مقارنة بنحو 30.4 ألف طن فقط في عام 2013، أي بمعدل نمو سنوي بلغ حوالي 20.6% خلال تلك الفترة. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، تركز إنتاج **الليثيوم** بشكل رئيسي في استراليا بحصة 43.4%، يليها أمريكا الجنوبية بحصة 35.9% (منها 28.5% في تشيلي)، ثم آسيا والمحيط الهادئ وبالتحديد الصين بحصة 16.7%، وباقي دول العالم بحصة بلغت 4.1%.

3. الإنتاج العالمي من الجرافيت:

ارتفع الانتاج العالمي من **الجرافيت** ليصل إلى نحو 1.7 مليون طن في عام 2023، مسجلاً معدل نمو سنوي بلغ 4% خلال الفترة (2013 – 2023). وفيما يخص التوزيع الجغرافي، استحوذت دول آسيا والمحيط الهادئ على الحصة الأكبر من إنتاج **الجرافيت** بلغت حوالي 78.8% (منها 73.7% في الصين وحدها)، يليها أفريقيا بحصة 8.9% من الإجمالي العالمي، ثم أمريكا الجنوبية وبالتحديد البرازيل بحصة 5.8%، وباقي دول العالم بحصة 6.5%.

4. الإنتاج العالمي من النحاس:

ارتفع الإنتاج العالمي من **النحاس** خلال الفترة (2013 – 2023) بمعدل سنوي بلغ نحو 1.7% ليصل إلى 21.5 مليون طن في عام 2023. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، استاثرت أمريكا الجنوبية على حصة 35.3% (منها 23.2% في تشيلي و12.1% في بيرو)، يليها آسيا والمحيط الهادئ بحصة 11.8% (منها 7.9% في الصين)، ثم أفريقيا وبالتحديد جمهورية الكونغو الديموقراطية بحصة بلغت 11.6%، والولايات المتحدة

الأمريكية بحصة 5.1%، وأستراليا بحصة 3.8%، وباقي دول العالم بحصة بلغت 32.4%.

5. الإنتاج العالمي من المعادن الأرضية النادرة:

بلغ الإنتاج العالمي من **المعادن الأرضية النادرة** نحو 353.7 ألف طن في عام 2023، أي ما يمثل أكثر من ثلاثة أضعاف المستوى المسجل في عام 2013 البالغ نحو 103 ألف طن. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، تركز إنتاج **المعادن الأرضية النادرة** بشكل رئيسي في دول آسيا والمحيط الهادئ بحصة نحو 70.6% (استحوذت الصين وحدها على حصة بلغت 67.9%)، يليها أمريكا الشمالية وبالتحديد الولايات المتحدة الأمريكية بحصة 12.2%، ثم أستراليا بحصة 4.8% من إجمالي الإنتاج العالمي، وأوروبا الشرقية وأفريقيا بحصة 0.7% لكلاً منهما، وباقي دول العالم بحصة 11%.

6. الإنتاج العالمي من النيكل:

حقق الإنتاج العالمي من **النيكل** نمواً بمعدل سنوي 3.6% خلال الفترة (2013 – 2023) ليصل إلى نحو 3.8 مليون طن. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، استحوذت آسيا والمحيط الهادئ على الحصة الأكبر من الإنتاج العالمي بلغت 63.8% (منها 47.3% في اندونيسيا، ونحو10.5% في الفلبين، و6% في كاليدونيا الجديدة)، يليها دول أوروبا الشرقية وبالتحديد روسيا بحصة 5.3%، ثم أمريكا الشمالية وبالتحديد كندا بحصة 4.7%، وأستراليا بحصة 4.2%، وباقي دول العالم بحصة بلغت 22%.

7. الإنتاج العالمي من المنجنيز:

قُدر الإنتاج العالمي من **المنجنيز** بنحو 19.8 ألف طن في عام 2023، مقارنة بنحو 17.7 ألف طن في عام 2013. وفيما يخص التوزيع الجغرافي، استحوذت أفريقيا على الحصة الأكبر من الإنتاج العالمي بلغت 63.6% (منها 36.4% في جنوب أفريقيا، و23.2% في الجابون، و4% في غانا)، يليها استراليا بحصة 15.1%، ثم دول آسيا

والمحيط الهادئ بحصـــة 7% (منها 3.5% في كلاً من الصـــين والهند)، وباقي دول العالم بحصة بلغت 13.6%.

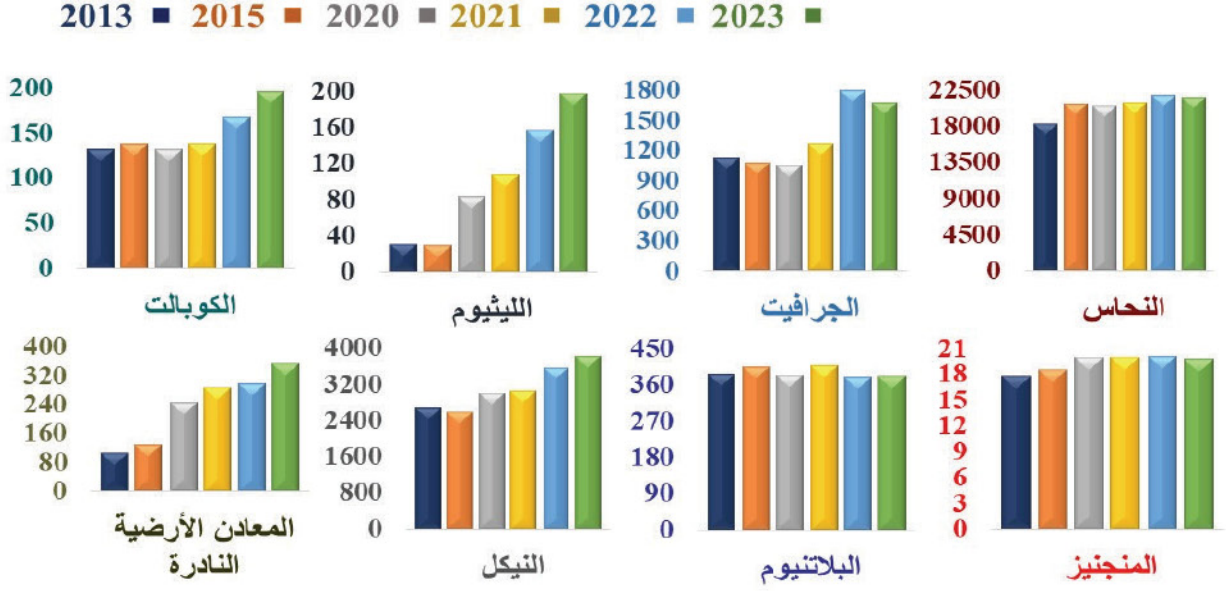
8. الإنتاج العالمي من البلاتنيوم:

سـجل الإنتاج العالمي من **البلاتنيوم** انخفاضـاً بمعدل سـنوي طفيف بلغ 0.1% خلال الفترة (2013 – 2023) ليصـــل إلى نحو 381.5 ألف طن في عام 2023. تركز إنتاج **البلاتنيوم** بشكل رئيسي في أفريقيا التي استأثرت بحصة بلغت نحو 59% (منها 50.1% في جنوب أفريقيا، و8.9% في زيمبابوي)، يليها دول أوروبا الشـرقية وبالتحديد روسـيا بحصـة 30.1%، ثم أمريكا الشـــمالية بحصـــة 9% (منها 5.6% في كندا، و3.4% في الولايات المتحدة الأمريكية)، وباقي دول العالم بحصـة بلغت حوالي 1.9%، **كما يوضـح الشـكل (5) والشكل (6) والجدول (2).**

الشكل (5)

تطور الإنتاج العالمي من المعادن الحرجة

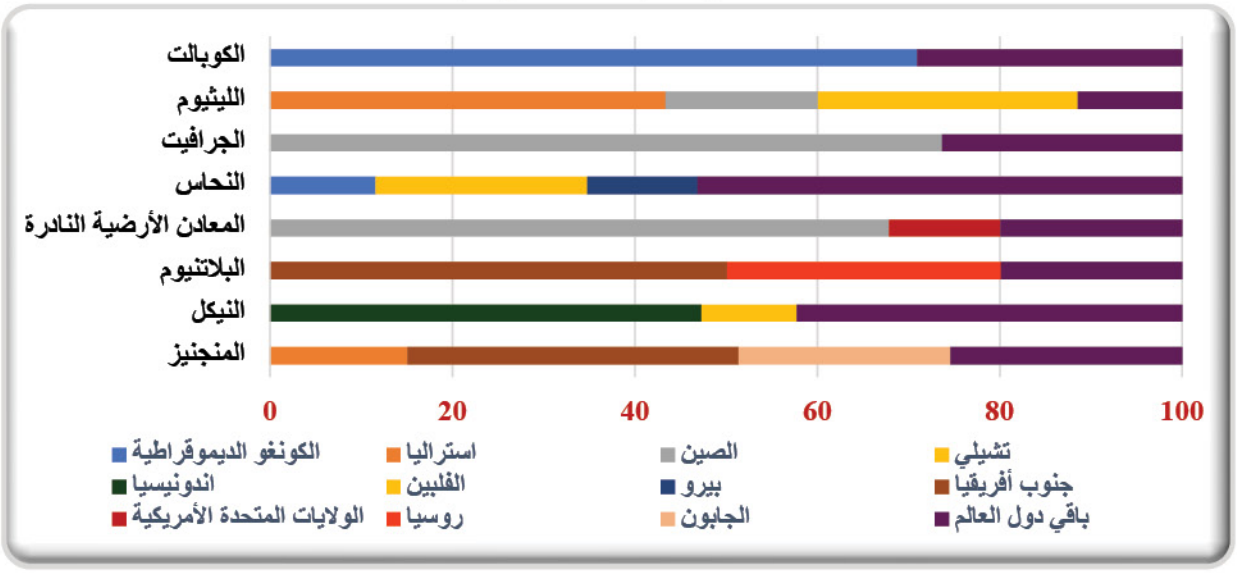
خلال الفترة 2013 – 2023، (ألف طن)



المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

الشكل (6)

التوزيع الجغرافي للإنتاج العالمي من المعادن الحرجة في عام 2023، (%)



المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

الجدول (2)

الإنتاج العالمي من المعادن الحرجة

في عام 2023، (ألف طن)

	الكوبالت	الليثيوم	الجرافيت	النحاس	المعادن الأرضية النادرة	البلاتنيوم	النيكل	المنجنيز
استراليا	4.6	86		810	16.8		160	3
أمريكا الشمالية	**5.3**	**0.6**	**5.5**	**1100**	**43**	**34.2**	**180**	**-**
الولايات المتحدة		0.6		1100	43	12.7		
كندا	2.1		3.5			21.5	180	
كوبا	3.2							
المكسيك			2.0					
أوروبا الشرقية	**8.8**	**-**	**18**	**-**	**2.6**	**115**	**200**	**-**
روسيا	8.8		16		2.6	115	200	
أوكرانيا			2					
أمريكا الجنوبية	**-**	**71.0**	**96**	**7600**	**0.1**	**-**	**-**	**-**
تشيلي		56.5		5000				
البرازيل		4.9	96		0.1			
بيرو				2600				
الارجنتين		9.6						
أوروبا الغربية	**-**	**0.4**	**34.2**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
النرويج			6.5					
البرتغال		0.4						
تركيا			27.7					
آسيا والمحيط الهادئ	**11**	**33**	**1314.6**	**2540**	**249.7**	**-**	**2430**	**1.4**
الصين	1.8	33	1230	1700	240			0.7
الهند			82.4		2.6			0.7
اندونيسيا				840			1800	

"تابع" الجدول (2)
الإنتاج العالمي من المعادن الحرجة
في عام 2023، (ألف طن)

	الكوبالت	الليثيوم	الجرافيت	النحاس	المعادن الأرضية النادرة	البلاتنيوم	النيكل	المنجنيز
الفلبين	4.5						400	
سريلانكا			2.2					
كاليدونيا الجديدة	1.8						230	
بابوا غينيا الجديدة	2.9							
تايلاند					7.1			
أفريقيا	**146.4**	**3.4**	**149.2**	**2500**	**2.6**	**225**	**-**	**12.6**
الكونغو الديموقراطية	139.8			2500				
زيمبابوي		3.4				34		
زامبيا	0.3							
موزمبيق			94					
مدغشقر	3.6		55.2		2.6			
الجابون								4.6
جنوب أفريقيا	1					191		7.2
المغرب	1.7							
غانا								0.8
باقي دول العالم	**20.8**	**3.6**	**50.8**	**7000**	**38.9**	**7.3**	**836.9**	**2.7**
الإجمالي العالمي	**196.9**	**198**	**1668.3**	**21550**	**353.7**	**381.5**	**3806.9**	**19.8**

المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

يذكر أن سلاسل الإمدادات العالمية من المعادن الحرجة معرضة للاضطرابات التي قد تكون ناجمة عن أحداث طبيعية، مثل الزلازل، أو يمكن أن تنجم عن التوترات الجيوسياسية والنزاعات التجارية أو انقطاع التيار الكهربائي. ففي الأعوام الأخيرة، على سبيل المثال، شهدت مؤخراً سلاسل الإمدادات إضطراباً بسبب الأزمة الروسية الأوكرانية وجائحة كوفيد-19 التي أدت إلى إغلاق اقتصادات بأكملها في عام 2020، مما تسبب في

انخفاض حاد في الطلب العالمي على المعادن. وفي الوقت نفسه، تعطلت الإمدادات بسبب إغلاق مئات المناجم، فعلى سبيل المثال، أغلقت بيرو، التي تمثل 12% من إمدادات النحاس العالمية، جميع مناجمها بين شهر مارس وأوائل شهر يونيو 2020 - وهي أطول فترة إغلاق للمناجم، كما أدى إغلاق منجم في جنوب أفريقيا لمدة 21 يوم إلى تعطل نحو 75% من إمدادات البلاتين العالمية.

وعلى الرغم من سرعة تعافي أسواق المعادن من انهيار الأسعار والطلب الأولي بسبب جائحة كوفيد-19، إلا أنها واجهت العديد من الاضطرابات الأخرى منذ ذلك الحين. فعلى سبيل المثال، تم إغلاق مصانع المغنيسيوم في الصين التي تستحوذ على حوالي 85% من الإنتاج العالم منه، ويعزى ذلك جزئياً إلى نقص الطاقة خلال النصف الثاني من عام 2021، وبالمثل، في جنوب أفريقيا، أدى انقطاع التيار الكهربائي المتكرر منذ عام 2022 إلى الحد من إنتاج معادن مجموعة البلاتين (Njini, 2023). وكانت الأزمة الروسية الأوكرانية بمثابة صدمة خارجية أخرى لبعض سلاسل إمدادات المعادن الحرجة، مثل النيكل والألمنيوم، والتي أدت إلى ارتفاع الأسعار. هذا وتجدر الإشارة إلى أن العقوبات المفروضة على روسيا والتي تحد من وصولها إلى واردات التكنولوجيا المتقدمة يمكن أن تعيق شركات التعدين والمعالجة لأنها تعتمد على تراخيص المعدات والبرمجيات من الشركات الأجنبية.

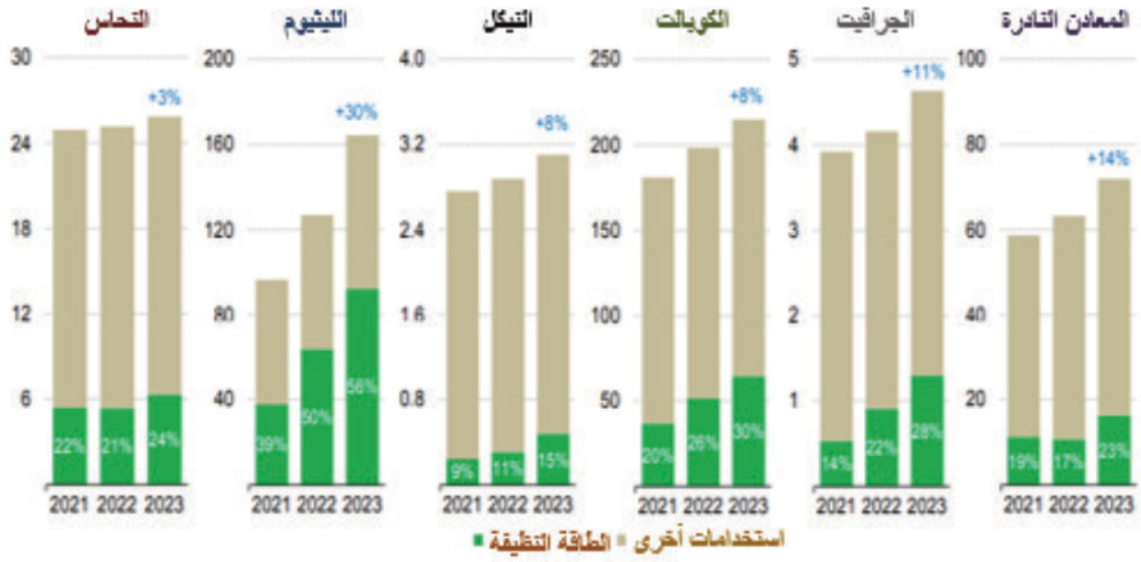
وتتعرض أجزاء أخرى من سلاسل الإمدادات العالمية من المعادن الحرجة أيضاً لآثار تغير المناخ، حيث يتم استخراج بعض المعادن، كالنيكل والكوبالت والمعادن النادرة، ومعالجتها في المناطق التي من المحتمل أن تكون أكثر عرضة لخطر هطول الأمطار الغزيرة والفيضانات. فعلى سبيل المثال، تسبب فيضان مقاطعة Sichuan بجنوب غرب الصين إلى إغلاق مصانع معالجة المعادن النادرة وإتلاف المخزون في عام 2020. ومن المرجح أن تتأثر أنشطة التعدين الأخرى بالجفاف وندرة المياه، لا سيما وأن ما يقرب من 50% من تعدين الليثيوم يقع في مناطق ذات إجهاد مائي مرتفع.

ثالثاً: الطلب العالمي على المعادن الحرجة خلال الفترة (2021 – 2023)

تشـــهد العديد من دول العالم في الوقت الحاضـــر ارتفاعاً ملحوظاً في الطلب على المعادن الحرجة، مع توقع بتزايد الطلب خلال الأعوام القادمة، مدفوعاً بشـــكل رئيســـي بالتحول إلى تقنيات الطاقة النظيفة – وخاصـــة توربينات الرياح والألواح الشـمسـية، وكذلك التوســـع الكبير في شـــبكات الكهرباء، وإنتاج المركبات الكهربائية التي تعتمد أيضـــاً على المعادن الحرجة.

فـقد تضاعـــف الطلـــب على الليثـيـــوم بحـوالي ثـلاث مـرات خـــلال الفتـــرة (2017 – 2022)، وارتفع الطلب على النيكل بنســـبة تبلغ حوالي 40%، وقفز الطلب على الكوبالت بنسبة تصل إلى 70%، وفقا لوكالة الطاقة الدولية التي أشـارت إلى أن نمو الطلب ظل قوياً خلال عام 2023، حيث ارتفع الطلب على الليثيوم بنســـبة 30%، في حين شـــهد الطلب على النيكل والكوبالت والجرافيت والعناصر الأرضية النادرة زيادات تتراوح ما بين 8% إلى 14%. **كما يوضح الشكل (7).**

الشكل (7)
الطلب العالمي على المعادن الحرجة الرئيسية، وفقاً للاستخدامات خلال الفترة 2021 - 2023، (مليون طن)



المصدر: Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA.

وتشـــير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة إلى أن الطلب على المواد الحرجة في عام 2022 تركز في الغالب بالاســتخدامات غير المتعلقة بالطاقة، باســتثناء الليثيوم. على ســبيل المثال، تم اســتخدام أكثر من 90% من النيكل في إنتاج الحديد والصــلب، وتم اســتخدام أكثر من 80% من الجرافيت في صــناعة الفولاذ والألومنيوم والسيراميك، وتم استخدام أكثر من 80% من المنجنيز في إنتاج الصلب والكيماويات وعمليات اللحام.

وبشـــكل عام، يواجه تلبية الطلب المتزايد على هذه المعادن عدة تحديات، من أهمها: **أولا**، تباطؤ عملية التعدين وتطوير الاحتياطيات بســـبب الســـياســـات الحكومية المعقدة. **ثانياً**، تواجه الصـــناعة تحديات تتعلق بالآثار البيئية والاجتماعية. **ثالثاً**، يمكن أن تؤدي العوامل الجيوسياسية إلى تعطيل سلسلة التوريد، حيث يتركز إنتاج ومعالجة هذه المعادن في عدد قليل من الدول (مثل جمهورية الكونغو الديموقراطية، وتشـــيلي، وبيرو، والصـــين، وروسـيا، وجنوب إفريقيا، وأسـتراليا) كما أوضـحنا سـالفاً، وهناك خطر من قيام تلك الدول باستخدام سيطرتها على هذه الموارد كأداة استراتيجية.

رابعاً: تطور أسعار المعادن الحرجة الرئيسية

شـــهدت أســـعـار المعـادن الحرجـة الرئيســـيـة تطورات متبـاينـة خلال الفترة (2000 – 2023)، حيث سـجلت أسـعار **الكوبالت** أقل مسـتوى لها وهو حوالي 15.23 ألف دولار لكل طن في عام 2002، بينما وصـــلت إلى أعلى مســـتوى لها وهو 81.17 ألف دولارلكل طن في عام 2018، وتراجعت في عام 2023 بنسبة 47.2% على أساس سنوي، لتصـل إلى 35.44 ألف دولارلكل طن. وعلى الرغم من انخفاض أسـعار **كربونات الليثيوم** في عام 2023 إلى 40.30 ألف دولارلكل طن، مقارنة بالمسـتوى القياسـي المسـجل في عام 2022 البالغ 59.43 ألف دولارلكل طن، إلا أنها ظلت أعلى بنحو 400% من مسـتويات ما قبل جائحة كورونا في عام 2019. وقد سـجلت أسـعار كربونات الليثيوم أدنى مسـتوياتها في عام 2005 وهو 1.46 ألف دولارلكل طن. وتراوحت أسعار **النحاس** ما بين أدنى مستوياتها البـالغـة 1.56 ألف دولارلكل طن في عـام 2002، وأعلى مســـتويـاتهـا البـالغـة 9.32 ألف

دولارلكل طن في عام 2021، وقد شـهدت هي الأخرى انخفاضـاً خلال عام 2023 لتصـل إلى 8.49 ألف دولارلكل طن.

وسـجلت أسـعار **الجرافيت** أقل مسـتوى لها ما بين المعادن الحرجة الرئيسـية، حيث تراوحت ما بين أدنى مسـتوياتها البالغة 0.53 ألف دولارلكل طن في عام 2020، وأعلى مسـتوياتها البالغة 1.43 ألف دولارلكل طن في عام 2012، وكان لتراجع معدلات التضـخم دوراً رئيسـياً في تراجع أسـعار الجرافيت من 0.76 ألف دولارلكل طن في عام 2022 إلى 0.65 ألف دولارلكل طن في عام 2023. كما انخفضـت أسـعار **كبريتات النيكل** من أعلى مسـتوياتها البالغة 27.11 ألف دولارلكل طن في عام 2022، لتصـل إلى 20.39 ألف دولارلكل طن في عام 2023، أي بنسـبة انخفاض بلغت 25% خلال تلك الفترة، علماً بأن أدنى مستوى مسجل لها بلغ 16.63 ألف دولارلكل طن في عام 2020.

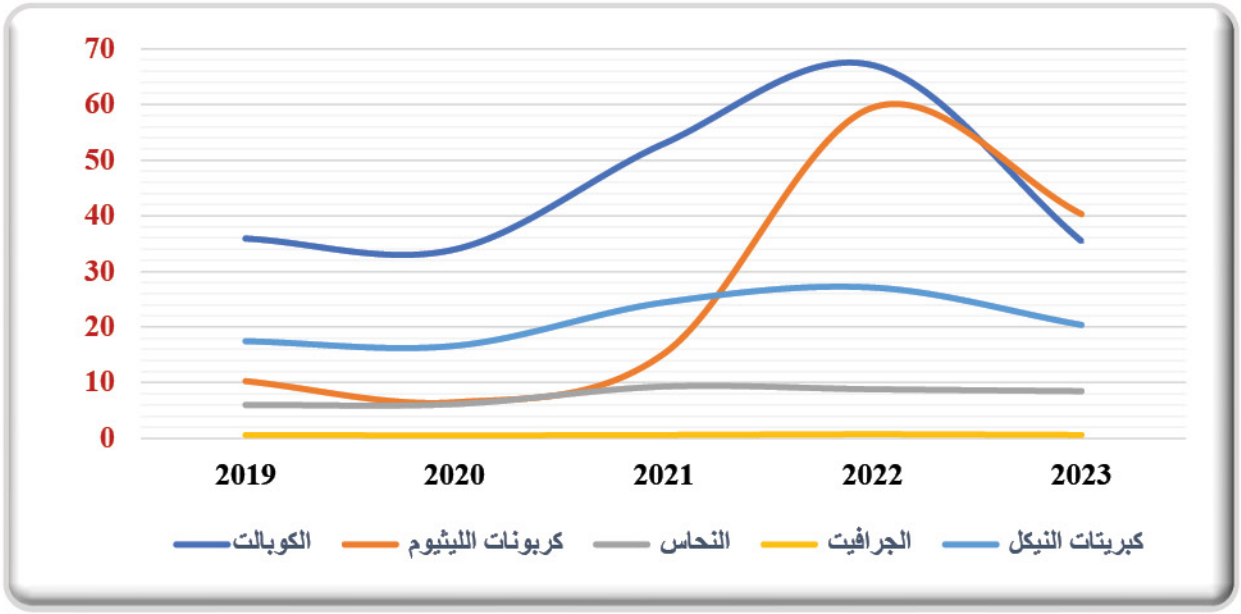
وكان السـبب الرئيسـي لانخفاض أسـعار المعادن الحرجة الرئيسـية في عام 2023، هو الزيادة الملحوظة في الإمدادات والمخزونات الوفيرة من التقنيات المصنوعة من المعادن الحرجة، لاسيما في كل من أفريقيا وإندونيسيا والصين التي تجاوزت فيها الإمدادات الجديدة من تلك المعادن نمو الطلب على مدى العامين الماضيين. **ويوضح الجدول (3) والشكل (8) تطور أسعار بعض المواد الحرجة الرئيسية خلال الفترة (2019 – 2023):**

الجدول (3)
أسعار بعض المعادن الحرجة الرئيسية
خلال الفترة 2019 - 2023، (ألف دولار/طن)

	الكوبالت	كربونات الليثيوم	النحاس	الجرافيت	كبريتات النيكل
2019	35.91	10.29	6.01	0.67	17.47
2020	33.95	6.49	6.17	0.53	16.63
2021	52.93	15.17	9.32	0.56	24.42
2022	67.06	59.43	8.83	0.76	27.11
2023	35.44	40.30	8.49	0.65	20.39

المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

الشكل (8)
تطور أسعار بعض المعادن الحرجة الرئيسية
خلال الفترة 2019 - 2023، (ألف دولار/طن)



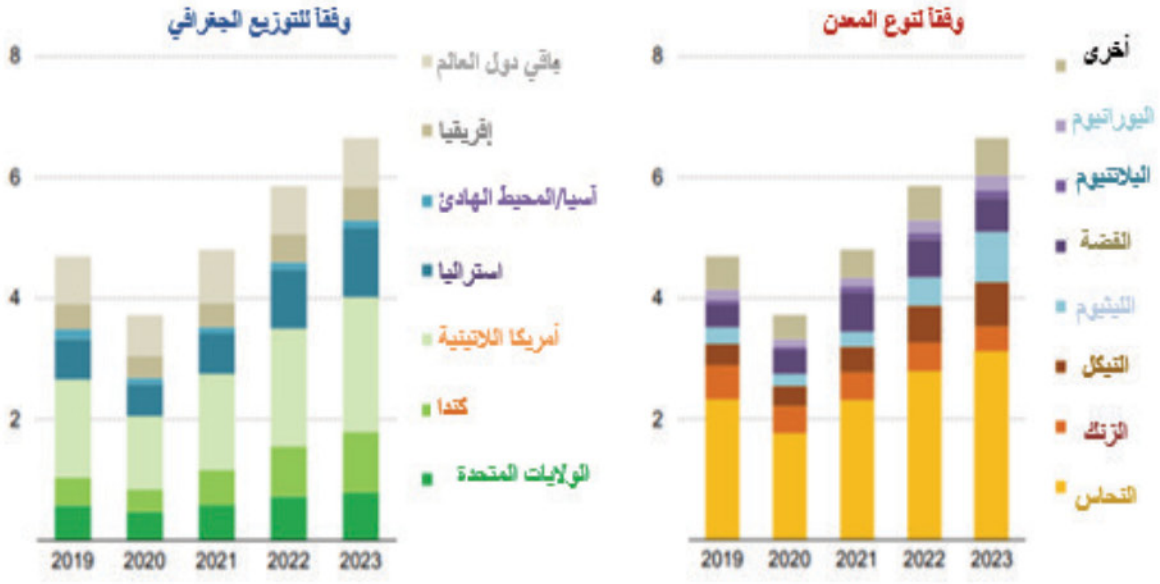
المصدر: Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.

المحور الثالث
الاستثمارات والتجارة العالمية في المعادن الحرجة

أولاً: الاستثمارات العالمية في المعادن الحرجة

أثر الانخفاض الأخير في أسعار المعادن الحرجة على حجم الاستثمارات، على الرغم من استمرار نموها. حيث ارتفعت الاستثمارات في انتاج تلك المعادن لتصل إلى أكثر من 50 مليار دولار في عام 2023، أي بمعدل نمو بلغ 10%، وهو أقل من المحقق في عام 2022. وعلى الرغم من انخفاض الأسعار، شهدت الاستثمارات في الليثيوم ارتفاعاً حاداً بنسبة 60%، كما ارتفع الإنفاق على الاستكشاف بنسبة بلغت 15% لتصل إلى حوالي 6.5 مليار دولا، بدعم رئيسي من كندا وأستراليا، **كما يوضح الشكل (9)**.

الشكل (9)
تطور الانفاق على استكشاف المعادن الحرجة
خلال الفترة 2019 - 2023، (مليار دولار)



المصدر: Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA.

وتشير وكالة الطاقة الدولية إلى أن الصين استثمرت ما بين عامي 2018 والنصف الأول من عام 2021، أكثر من 4 مليار دولار للحصول على أصول الليثيوم، وهو في الواقع ضعف المبلغ الذي استثمرته الولايات المتحدة وأستراليا وكندا خلال ذات الفترة نفسها، لذلك هناك الكثير من النشاط الذي تقوم به الصين لمحاولة إغلاق أسواقها الفرعية. ومن الواضح أنه هناك إمكانية لتأثير الجغرافيا السياسية على توريد المعادن الحرجة ودورها في التجارة الدولية وتحولات الطاقة، مما يؤكد على أهمية تنويع سلاسل التوريد وضمان إمدادات مستقرة وآمنة. هذا وقد قامت الصين بتنويع استثماراتها جغرافياً وتوسيع نفوذها الاقتصادي في الدول الغنية بالمعادن الحرجة. فخلال العقدين الماضيين، كانت دول من أفريقيا وأمريكا الجنوبية وآسيا الوسطى وجنوب شرق آسيا، وهي الأرجنتين والبرازيل وتشيلي وجمهورية الكونغو الديمقراطية وإندونيسيا وكازاخستان وجنوب أفريقيا وزامبيا وزيمبابوي، تتلقى تمويلات كبيرة من الصين في شكل قروض ومنح وائتمانات، وكانت الاستثمارات في قطاعات من ضمنها قطاع التعدين وقطاع الطاقة.

والجدير بالذكر أن هناك أجزاء كبيرة على المستوى العالمي، خاصة في الدول النامية، لا تزال غير مستكشفة. على سبيل المثال، لم تجتذب أفريقيا، التي تبلغ مساحتها 20% من مساحة اليابسة العالمية، سوى حوالي 14% من الاستثمار العالمي في مجال التنقيب عن المعادن. ومعالجة ذلك الوضع لا يتطلب زيادة الإنفاق العالمي على الاستكشاف فحسب، بل تتطلب أيضاً التبادل المستمر لبيانات الموارد المعدنية عبر القارات. ويتم في الوقت الحاضر، تنفيذ معظم العمل من قبل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، حيث أطلقت هيئة المسوحات الجيولوجية في استراليا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية بشكل مشترك مبادرة رسم خرائط المعادن الحرجة، والتي تغطي أكثر من 60 دولة.

ثانياً: التجارة العالمية في المعادن الحرجة

شكل ارتفاع الطلب على سلع التكنولوجيا النظيفة ضغطاً على سلاسل الإمداد للمعادن الحرجة. حيث تزايد الطلب على المعادن الحرجة بشكل خاص لإنتاج بطاريات السيارات

الكهربائية التي تتطلب الواحدة منها ما يصل إلى 200 كجم من المعادن الحرجة. هذا ويمثل قطاع البطاريات نحو 70% من الطلب العالمي على الكوبالت، كما يتطلب هذا القطاع المعادن الأخرى مثل الألومنيوم والنحاس والليثيوم والنيكل والأتربة النادرة. وتعتمد المحللات الكهربائية – اللازمة لإنتاج الهيدروجين الأخضر – على مجموعة متنوعة من المعادن الحرجة، بما في ذلك البلاتين والإيريديوم، وهما من أندر المعادن وأكثرها تكلفة في العالم. كما إن هناك حاجة إلى المعادن الأرضية النادرة بشكل خاص للمغناطيس، وهو عنصر حيوي في العديد من الآلات الكهربائية، وخاصة تلك الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة. وبناء على ما تقدم، ارتفعت التجارة العالمية في المعادن الحيوية المرتبطة بالطاقة على مدى الأعوام العشرين الماضية من حوالي 53 مليار دولار في عام 2002 إلى حوالي 378 مليار دولار في عام 2022، أي بمعدل نمو سنوي بلغ نحو 10%. وفي عام 2021، ارتفع معدل النمو بشكل ملحوظ بلغ نحو 37% تزامناً مع انتعاش التجارة العالمية عقب الركود الناجم عن جائحة كوفيد-19.

1. الواردات العالمية من المعادن الحرجة

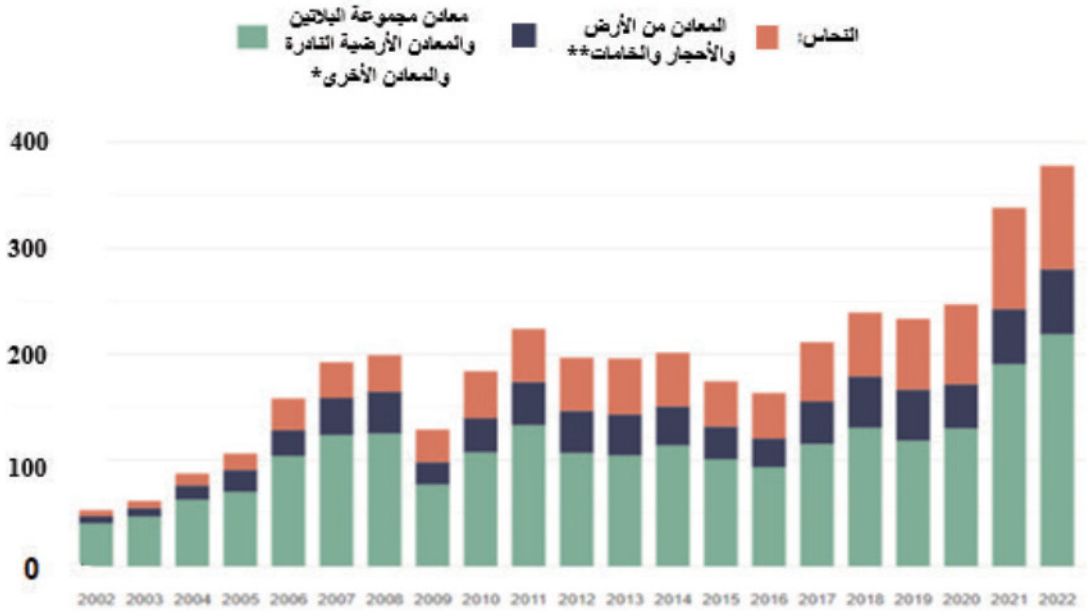
تضاعفت قيمة الواردات العالمية من المعادن الحرجة خلال الفترة (2017 – 2022)، حيث ارتفعت من 212 مليار دولار في عام 2017 إلى 378 مليار دولار في عام 2022، مع ارتفاع كبير في تجارة معادن مجموعة البلاتين، مثل الروديوم والإيريديوم والروثينيوم، والأوسيميوم، التي سجلت معدلات نمو سنوية تصل إلى نحو 72% منذ عام 2017. كما سجلت معادن الهيليوم والليثيوم معدلات نمو سنوية ملحوظة بلغت حوالي 53% خلال نفس الفترة.

كما شهدت قيمة الواردات من النحاس زيادة بمتوسط نمو سنوي بلغ 15% منذ عام 2002، مع زيادة بنسبة 12% خلال الأعوام الخمس الماضية فقط. ويعزى ذلك النمو بشكل رئيسي إلى ارتفاع أسعار السلع الأساسية وزيادة واردات الصين واليابان - أكبر المستوردين على المستوى العالمي. فقد ارتفعت واردات الصين بمعدل 24% منذ عام 2002، في حين

شـهدت واردات اليابان زيادة سـنوية بلغت نحو 10%، ليشـكلا معاً نحو 72% من إجمالي واردات النحاس العالمية، وتمثل الصين وحدها ما يقرب من 60% من الإجمالي العالمي.

وواصـلت واردات المعادن "الأرضـية والأحجار والخامات" مسـارها التصـاعدي، حيث ارتفعت بنسـبة بلغت حوالي 24% في عام 2021، وحوالي 18% في عام 2022. وبلغ متوسـط معدل النمو خلال الفترة (2017 – 2022) حوالي 9%، أي أكثر من ضـعف المعدل المسجل منذ عام 2016، **كما يوضح الشكل (10)**.

الشكل (10)
تطور الواردات من المعادن الحرجة
خلال الفترة 2002 - 2022، (مليار دولار)



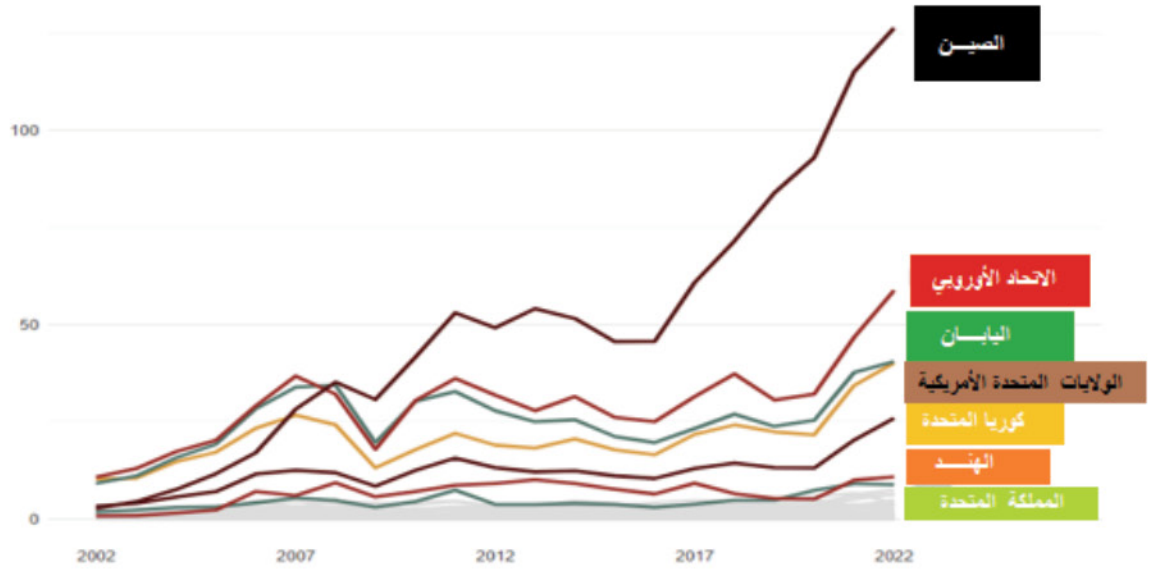
المصدر: World Trade Organization, Analytical Database.

* ألومنيوم خام، روديوم، البلاديوم، نحاس غير مكرر؛ أنودات النحاس للتكرير الكهربائي، النيكل الخام، البلاتين، الزنك الخام، السيليكون، القصدير الخام، الهيليوم، الليثيوم، الإيريديوم، الروثينيوم، الأوزميوم، السيزيوم، المغنيسيوم، الغاليوم، الجرمانيوم، الهافنيوم، الإنديوم، الرينيوم، الأرضية النادرة (السيريوم، الديسبروسيوم، الإربيوم، اليوروبيوم، الجادولينيوم، الهولميوم، اللانثانم، اللوتيتيوم، النيوديميوم، البراسيوديميوم، البروميثيوم، الروبيديوم، السماريوم، سكانديوم، التيربيوم، الثوليوم، الإيتربيوم، الإيتريوم)، التنتالوم، التيلوريوم، البورون، الفاناديوم، السترونتيوم، البزموت، الزركونيوم، الزرنيخ.

** الألومنيوم، الأنتيمون، الباريت، البريليوم، البورات، الكروم، الكوبالت، الفلورسبار، الجرافيت، المنغنيز، الموليبدينوم، النيكل، النيوبيوم، التنتالوم، الفاناديوم، الزركونيوم، القصدير، التيتانيوم، التنغستن، الزنك.

تجدُر الإشـــارة إلى أن الصـــين قد أصـــبحت أكبر مســـتورد للمعادن الحرجة في عام 2022، حيث استحوذت على نحو 33% من الإجمالي العالمي، يليها الاتحاد الأوروبي بنسبة 16%، ثم اليابان والولايات المتحدة الأمريكية بنسـبة 11% لكل منهما، **كما يوضـح الشـكل (11)**.

الشكل (11)
المستوردين الرئيسيين للمعادن الحرجة
خلال الفترة 2002 - 2022، (مليار دولار)



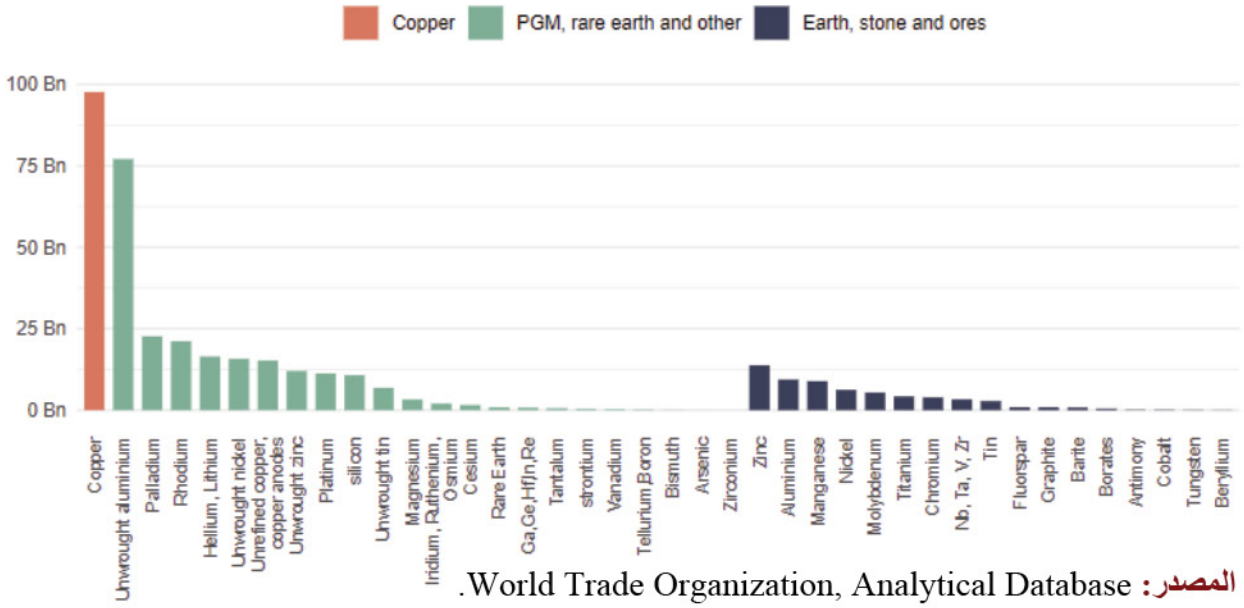
المصدر: World Trade Organization, Analytical Database.

إن المكانة الرائدة التي تحتلها الصـــين جديرة بالملاحظة، وبشـــكل خاص فيما يتعلق بالواردات من النحاس، حيث تتجاوز بشـكل ملحوظ واردات الاقتصـادات الأخرى مجتمعة. كما تُعد الصين أيضاً المستورد الرئيسي لمعظم المعادن الأرضية والأحجار والخامات.

وفي المقابل، يعد الاتحاد الأوروبي أكبر مسـتورد في العالم لمعادن مجموعة البلاتين والمعادن الأرضـــية النادرة والمعادن الأخرى، تليها الولايات المتحدة الأمريكية والصـــين واليابان.

ومن جانب آخر، يُعد المعدن الحرج الأكثر تداولاً في التجارة العالمية هو النحاس، الذي يمثل 26% من إجمالي واردات المعادن، يليه الألومنيوم الخام بنسبة 20%، اللذان تم استخدامهما منذ فترة طويلة في الصناعة التقليدية. وباستثناء هذين المعدنين، يبرز الروديوم والبلاديوم باعتبارهما المعادن الأكثر تداولاً خلال عامي 2021 و2022، حيث شكلا معاً نحو 30% من إجمالي الواردات العالمية. وقد ارتفعت قيمة واردات الروديوم والهيليوم والليثيوم بنحو ستة أضعاف بين عامي 2019 و2021، **ويوضح الشكل (12) قيمة الواردات من المعادن الحرجة خلال عام 2022.**

الشكل (12)
قيمة الواردات من المعادن الحرجة
خلال عام 2022، (مليار دولار)



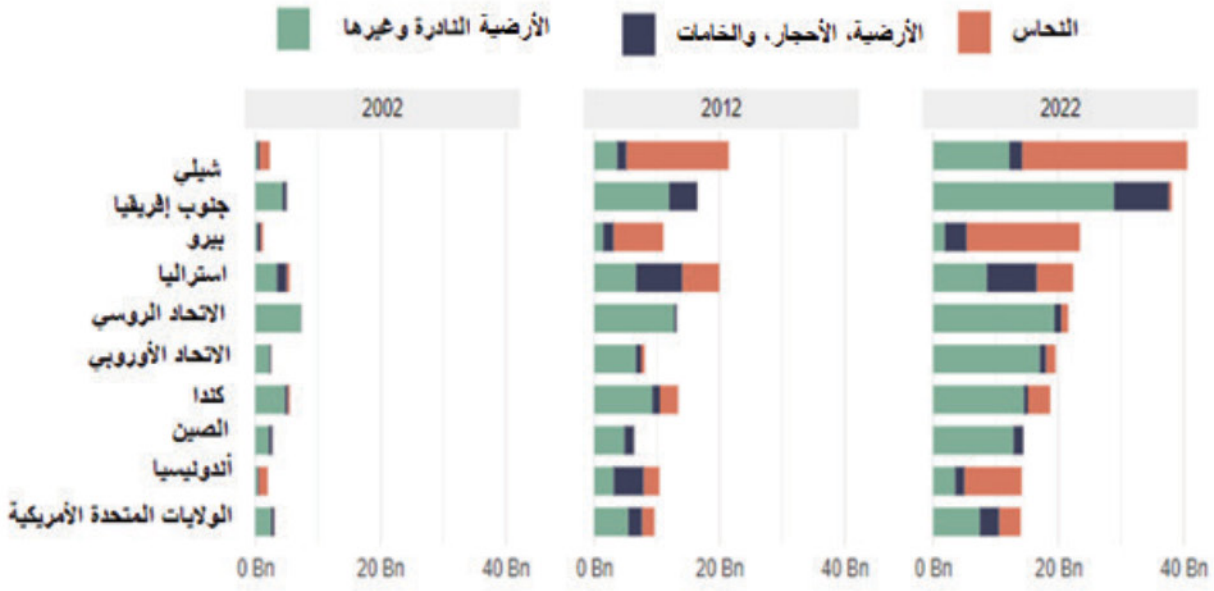
المصدر: World Trade Organization, Analytical Database.

2. الصادرات العالمية من المعادن الحرجة

تُعد تشيلي هي المصدر الرئيسي للمعادن الحرجة في العالم، حيث استحوذت على نحو 11% من إجمالي الصادرات العالمية في عام 2022، تليها جنوب أفريقيا بحصة 10%، ثم كل من أستراليا وبيرو وروسيا بحصة بلغت حوالي 6% لكل منها، **كما يوضح الشكل (13)**. وتجدُر الإشارة إلى إن جنوب أفريقيا هي أكبر مصدر على المستوى العالمي لمعادن مجموعة البلاتين والمعادن الأرضية النادرة والمعادن الأخرى، بحصة بلغت 13% في عام 2022. وبشكل عام، يتم استخراج معادن مجموعة البلاتين والمعادن الأرضية

النادرة والمعادن الأخرى بشكل رئيسي في كل من جنوب أفريقيا وروسيا والولايات المتحدة الأمريكية، في حين تتواجد العناصر الأرضية النادرة في الصين والولايات المتحدة، ويُعد الاتحاد الأوروبي منتجاً عالمياً رئيسياً لمعدن الباريت. وتُعد جنوب أفريقيا المُصدر الرئيسي للمعادن الأرضية والأحجار والخامات (لا سيما من الألومنيوم)، بحصة عالمية تبلغ 14.3%، يليها أستراليا بحصة 13.1%، ثم غينيا بحصة 9% من الصادرات العالمية. وتأتي بيرو في المرتبة الرابعة حيث تستخرج الزنك والقصدير والموليبدينوم. وتعد شيلي المصدر الرئيسي للنحاس، حيث تمثل أكثر من ربع الصادرات العالمية، تليها بيرو بحصة 19% وإندونيسيا بحصة 9% من الإجمالي العالمي، **كما يوضح الشكل (13)**.

الشكل (13)
المصدرين الرئيسيين للمعادن الحرجة
خلال الأعوام 2002، 2012، 2022، (مليار دولار)



المصدر: World Trade Organization, Analytical Database.

تجدُر الإشارة إلى أن المعادن الحرجة يمكن أن تخضع لقيود التصدير أو تعريفات التصدير، إلى جانب تعريفات الاستيراد، ومن المحتمل أن تؤثر هذه القيود على الإمدادات العالمية من المعادن الحيوية، مما يؤدي إلى ضغوط تصاعدية على الأسعار العالمية ومخاوف بشأن مدى تأمين توريد المواد الخام إلى الشركات المصنعة. وقد كشفت قاعدة بيانات منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بالفعل عن اتجاه تصاعدي للقيود المفروضة على

الصـادرات من المعادن الحرجة المرتبطة بقطاع الطاقة، حيث ارتفعت عدد قيود التصـدير، بما في ذلك التعريفات الجمركية على الصـادرات، من 396 إجراء في عام 2009 إلى 502 إجراء في عام 2021. وتشـير منظمة التعاون الاقتصـادي والتنمية إلى أن حوالي 10% من المعادن الحرجة واجهت إجراء واحد على الأقل لتقييد الصـادرات خلال الأعوام الأخيرة. وتتخذ قيود التصـدير أشـكالاً متعددة، بما في ذلك حصـص التصـدير، وضـرائب التصـدير، والحد الأدنى الإلزامي لأسعار التصدير، أو رسوم الترخيص.

فعلى سـبيل المثال، فرضـت الصـين في عام 2010، قيوداً على تصـدير المعادن الحرجة إلى اليابان بسـبب تصـاعد النزاعات الإقليمية بين الدولتين. وفي شـهر أغسـطس 2023، قامت الصـين أيضـاً بفرض قيود على تصـدير معدن الغاليوم الأرضـي النادر، المسـتخدم في تصـنيع أشـباه الموصـلات التي تلعب دوراً محورياً في التكنولوجيا العالمية، الأمر الذي أدى إلى ارتفاع أسـعاره بنسـبة تزيد على 50%، وجاءت هذه الخطوة كرد فعل على إدخال الولايات المتحدة الأمريكية قواعد شـاملة تهدف إلى منع الصـين من الحصـول على/ أو تصـنيع الرقائق والمكونات الرئيسـية لأجهزة الحاسـب الآلي العملاقة. كما حظرت زيمبابوي تصـدير الليثيوم في شـهر ديسـمبر 2022، وبالمثل حظرت إندونيسـيا تصـدير البوكسـيت وحظرت ناميبيا تصـدير الليثيوم والمواد الحيوية الأخرى في شـهر يونيو 2023. وتعكس هذه التدابير اتجاهاً متزايداً للدول لتشـجيع المعالجة المحلية وجذب الصـناعات التحويلية.

وقد أثار الاتجاه المتزايد لقيود التصدير على المعادن الحرجة سلسلة من الصراعات التجارية، والتي تتم معالجة بعضها من قبل منظمة التجارة العالمية. ولا يمكن ربط هذه القيود بعملية تحولات الطاقة فقط، حيث إن المعادن الحرجة لها تطبيقات أوسـع بكثير خارج قطاع الطاقة، مثل صناعة الصلب أو الصناعة الكيميائية.

يذكر أن القيود الكمية على الاستيراد والتصدير محظورة إلى حد كبير بموجب المادة الحادية عشـر من الاتفاقية العامة لمنظمة التجارة العالمية بشـأن التعريفات الجمركية والتجارة، مع وجود بعض الاستثناءات المحدودة، مثل الحفاظ على البيئة أو الأمن القومي أو

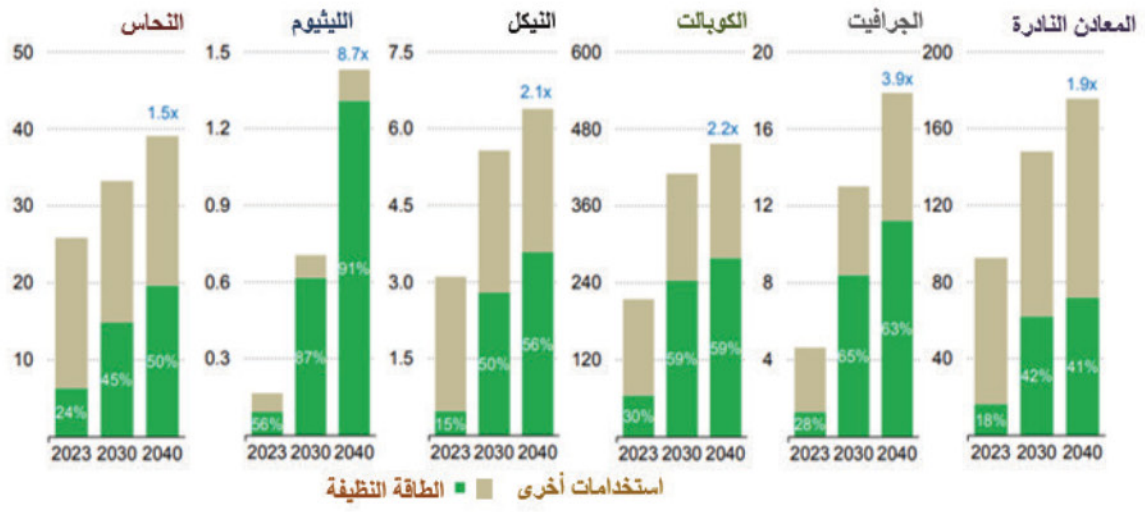
ضمان إمدادات المواد الخام. ويجب أن تستوفي هذه الاستثناءات شروطاً محددة، على سبيل المثال، عدم حماية الصناعات المحلية أو التمييز ضد الدول الأخرى.

بشكل عام، شهدت الأعوام الخمسة الماضية تسارعاً في قيمة التجارة في المعادن الحرجة. ومن المتوقع أن تساهم الالتزامات الأخيرة في مؤتمر تغير المناخ "COP28" بمضاعفة إنتاج الطاقة المتجددة ثلاث مرات والاتجاه نحو السيارات الكهربائية، في زيادة الطلب على المعادن الحرجة المرتبطة بالطاقة، حيث يستخدم النحاس والليثيوم والكوبالت في بطاريات تخزين السيارات الكهربائية. ويعتبر الليثيوم والكوبالت والنيكل والجرافيت ضرورية لأداء البطاريات وكثافة الطاقة وطول عمرها، كما تعتبر المعادن الأرضية النادرة مثل النيوديميوم حيوية لإنتاج مغناطيس توربينات الرياح، والنحاس والألومنيوم ضروريان لإنشاء شبكات الكهرباء، وستكون هناك حاجة إلى بذل جهود خاصة لتنويع توافر المعادن الحرجة في المستقبل من أجل الاستجابة لهذا الطلب المتزايد.

المحور الرابع
التوقعات المستقبلية للطلب على المعادن الحرجة

تشـــير توقعات منظمة الأمم المتحدة للتجارة والتنمية (الأونكتاد) إلى أنه بحلول عام 2050، ســـيرتفع الطلب العالمي على الليثيوم بنســـبة تزيد على 1500%، مع زيادات مماثلة في الطلب العالمي على النيكل والكوبالت والنحاس. غير أن الاســـتثمارات العالمية في المعادن الحرجة لا تواكب الطلب العالمي المتزايد، حيث تتراوح الاســـتثمارات المطلوبة خلال الفترة (2022 – 2030) ما بين 360 إلى 460 مليار دولار، مما يعني وجود فجوة اســـتثمارية تتراوح بين 180 إلى 270 مليار دولار. ويســـتحوذ النحاس والنيكل على نحو 36% و16% تواليا من إجمالي هذه الفجوة. كما تشـــير توقعات وكالة الطاقة الدولية إلى أن تحقيق هدف صـــافي انبعاثات صـــفرية، يتطلب زيادة الطلب العالمي على الليثيوم بنحو 8.7 ضـعفاً، الجرافيت بنحو 3.9 ضـعفاً، والكوبالت بنحو 2.2 ضـعفاً، والنيكل بنحو 2.1 ضـعفاً، وكل من المعادن النادرة والنحاس بنحو 1.9 و1.5 ضـعفاً على التوالي، **كما يوضـح الشـكل (14).**

الشكل (14)
الطلب العالمي المتوقع على المعادن الحرجة الرئيسية، اللازم لتحقيق صافي انبعاثات صفرية خلال الفترة 2023 - 2040، (مليون طن)



المصدر: Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA.

وتشير توقعات شركة "BP" إلى أن الطلب العالمي على المعادن الحرجة سيتزايد بشكل كبير على خلفية ارتفاع الطلب على الطاقة منخفضة الكربون، فضلاً عن التوسع الاقتصادي المتوقع. وفي هذا السياق، يتوقع ارتفاع الطلب على النحاس بنسبة تتراوح بين 75% إلى 100% بحلول عام 2050 وفقاً لسيناريو المسار الحالي وسيناريو صافي الانبعاثات الصفرية، ويتركز الجزء الأكبر من الارتفاع في الطلب في الطاقة منخفضة الكربون تزامناً مع توقع توسيع شبكات الكهرباء وبناء قدرات جديدة لطاقة الرياح والطاقة الشمسية.

وتجدُر الإشارة إلى أن **سيناريو المسار الحالي** لشركة "BP" يركز على سياسات المناخ المعمول بها بالفعل وعلى الأهداف والتعهدات العالمية لإزالة الكربون في المستقبل. وفي الوقت نفسه، يأخذ هذا السيناريو في الاعتبار التحديات العديدة المرتبطة بتحقيق هذه الأهداف. ومن المتوقع أن تبلغ انبعاثات مكافئ ثاني أكسيد الكربون (CO_2e) وفق سيناريو المسار الحالي ذروتها في منتصف عشرينيات القرن الحادي والعشرون، وبحلول عام 2050 ستكون أقل بنحو 25% مقارنة بمستويات عام 2022.

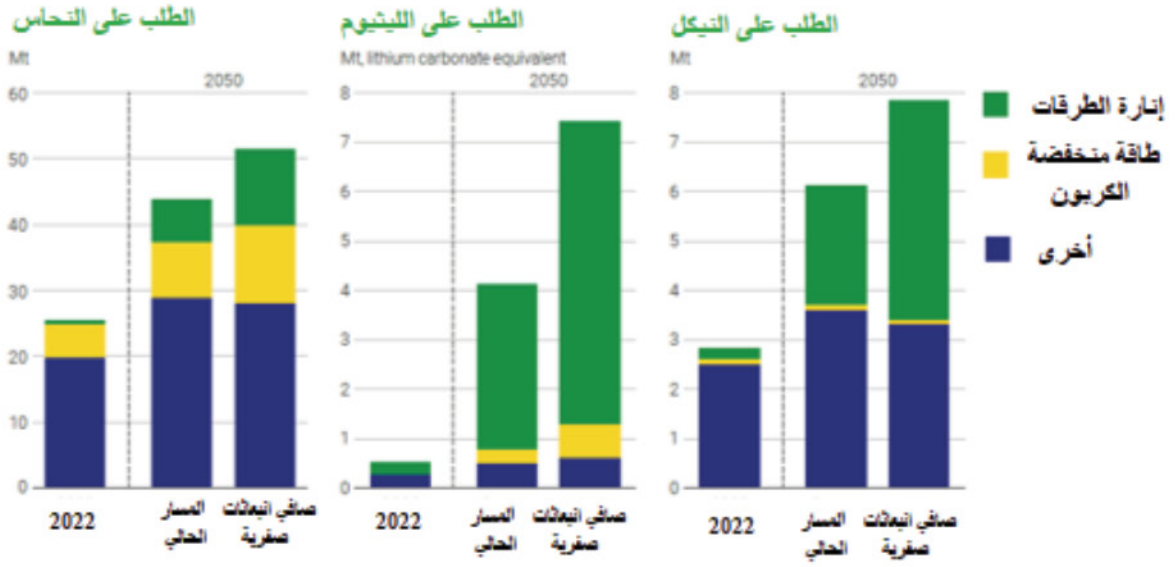
أما **سيناريو صافي الانبعاثات الصفرية** فيأخذ في الاعتبار كيف يمكن لعناصر مختلفة من نظام الطاقة أن تتغير لتحقيق خفض كبير في انبعاثات الكربون. وبهذا المعنى، يمكن النظر إلى سيناريو صافي الانبعاثات الصفرية باعتباره **سيناريو "ماذا لو؟"**: ما هي عناصر نظام الطاقة التي قد تتغير، وكيف يمكن للعالم أن يعمل بشكل جماعي على خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 95% بحلول عام 2050. ويفترض هذا السيناريو أيضاً وجود تشديد كبير في سياسات المناخ. كما يجسد التحولات في السلوكيات والتفضيلات المجتمعية التي تدعم بشكل أكبر المكاسب في كفاءة الطاقة وتبني استخدام الطاقة منخفضة الكربون.

كما يتوقع أن تؤدي الأهمية المتزايدة للبطاريات على مدى فترة التوقعات، وخاصة في المركبات الكهربائية، إلى زيادة كبيرة في الطلب العالمي على الليثيوم، ليرتفع الطلب على الليثيوم ما بين 8 و14 ضعفاً بحلول عام 2050. وسيمثل استخدام الليثيوم في المركبات

الكهربائية نحو 80% من إجمالي الطلب العالمي عليه عام 2050، مقارنة بنحو 40% عام 2022.

ومن المتوقع أن يتضاعف الطلب على النيكل بمقدار يتراوح ما بين ضعفين وثلاثة أضعاف بحلول عام 2050 في ظل كل من سيناريو المسار الحالي وسيناريو صافي الانبعاثات الصفرية على التوالي. ويرجع معظم هذا النمو (65-80%) إلى الاستخدام المتزايد لبطاريات الليثيوم أيون في المركبات الكهربائية، **كما يوضح الشكل (15)**.

الشكل (15)
توقعات الطلب على النحاس والليثيوم والنيكل وفقاً لسيناريو المسار الحالي وسيناريو صافي الانبعاثات الصفرية لشركة "BP"، (مليون طن)



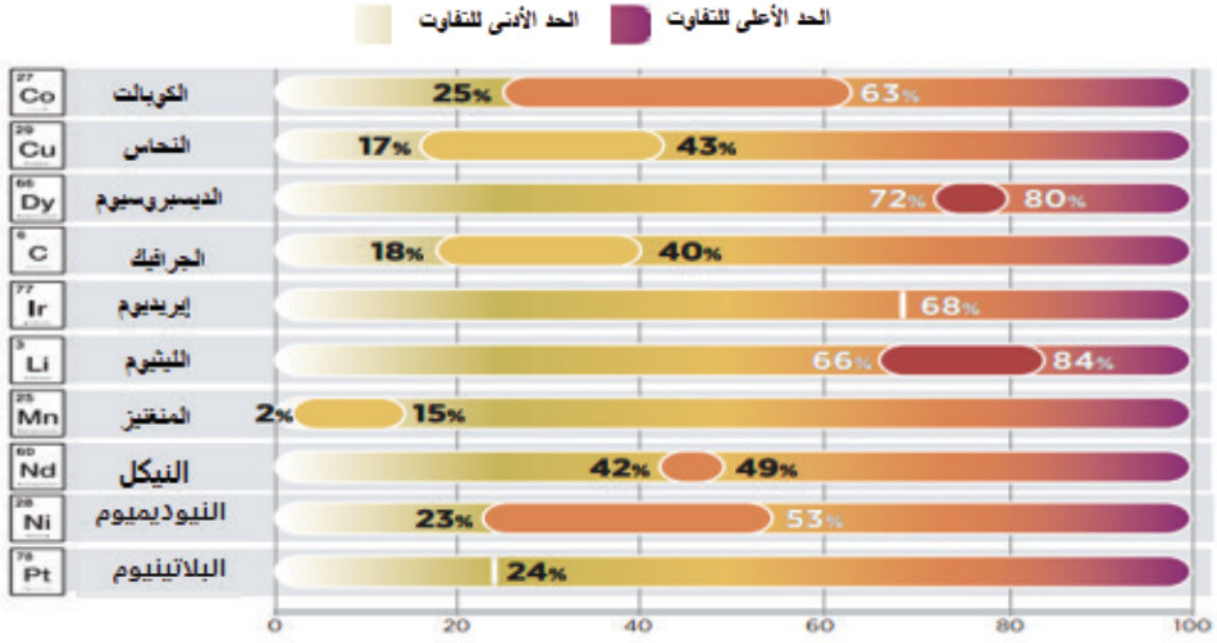
المصدر: Energy Outlook 2024, BP.

إن نقص الإمدادات المحتمل من المعادن الحرجة على المدى القصير إلى المتوسط هو نتيجة لنقص الاستثمار في أنشطة المنبع. ويرجع ذلك إلى عوامل عديدة، بما في ذلك الفترات الزمنية الطويلة لفتح مناجم جديدة ومصانع المعالجة، وعدم اليقين بشأن الطلب المستقبلي، وتقلبات الأسعار. علاوة على إن تعدين ومعالجة المعادن الحرجة يتركز في عدد قليل من الدول.

وتشير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة إلى وجود تفاوت بين الإمدادات الحالية والطلب المتوقع على بعض المعادن الحرجة. فعلى سبيل المثال، يتوقع أن يتراوح الطلب العالمي

على الكوبالت في عام 2030 ما بين 0.24 إلى 0.48 مليون طن، وعند المقارنة مع الإمدادات في عام 2022 البالغة نحو 0.18 مليون طن، يلاحظ أن أدنى نسبة تفاوت تبلغ نحو 25%، بينما تصل أعلى نسبة تفاوت إلى نحو 63%. كما يتوقع أن يتراوح الطلب العالمي على النحاس في عام 2030 ما بين 31 إلى 45 مليون طن، وعند المقارنة مع الإمدادات في عام 2022 البالغة نحو 25.7 مليون طن، يلاحظ أن أدنى نسبة تفاوت تبلغ نحو 17%، بينما تصل أعلى نسبة تفاوت إلى نحو 43%. ومن المتوقع أن يشهد الليثيوم أعلى نسبة تفاوت بين الإمدادات في عام 2022 والطلب المتوقع في عام 2030 تبلغ 84%، حيث بلغت الإمدادات في عام 2022 نحو 0.69 مليون طن، ويتوقع أن يصل أعلى مستوى للطلب إلى حوالي 4.4 مليون طن، **كما يوضح الشكل (16).**

الشكل (16)
التفاوت بين الإمدادات في عام 2022 والطلب المتوقع على بعض المعادن الحرجة في عام 2030، (%)



المصدر: Geopolitics of the Energy Transition - Critical Materials, IREA.

ولتجنب الفجوة بين الإمدادات الحالية والطلب العالمي المتوقع على المعادن الحرجة لا بد من زيادة قدرات التعدين والمعالجة وتحسين البحث والابتكار في تقنيات إعادة التدوير، فضلاً عن دعم وتشجيع الاكتشافات الجديدة، وهو ما يتطلب تعزيز الاستثمارات الحكومية في البنية التحتية، وتصميم أطر قانونية تمكينية.

أهم المعادن الحرجة اللازمة لعملية تحولات الطاقة

ومن الصعب تحديد أهم المعادن الحرجة اللازمة لعملية تحولات الطاقة بشكل نهائي، حيث إن أهميتها ستعتمد على مدى تطوير تقنيات وسلاسل توريد محددة. وبالنظر إلى استخدامها على نطاق واسع وتأثيرها على تكنولوجيات الطاقة النظيفة الأساسية، هناك أربعة معادن حرجة رئيسية قد يكون لها دور محوري بشكل خاص وهي: الليثيوم، والكوبالت، والنحاس، والنيكل. يُعد **الليثيوم** مكون أساسي في بطاريات الليثيوم أيون (Li-ion)، التي تعمل على تشغيل المركبات الكهربائية (EVs) وأنظمة تخزين طاقة البطارية. كما أن **الكوبالت** يُعد مكوناً رئيسياً آخر في بطاريات الليثيوم أيون (Li-ion)، حيث يدعم استقرارها وأدائها عن طريق منع ارتفاع درجة الحرارة وإطالة عمرها الافتراضي. ويُعد **النحاس** معدن آخر لا غنى عنه في عملية تحولات الطاقة، حيث يعتبر عنصراً حيوياً في الأنظمة الكهربائية الحديثة المستخدمة في توليد الطاقة والبنية التحتية للنقل والتوزيع، وكذلك في تقنيات الطاقة المتجددة مثل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح، ومع انتشار هذه التقنيات وتوسع الشبكات سيستمر الطلب العالمي على النحاس في الارتفاع لضمان كفاءة نقل الكهرباء وتخزينها. أما فيما يخص **النيكل**، فهو عنصر رئيسي آخر في بطاريات الليثيوم أيون، ويساهم في دعم كثافة طاقة أعلى وأداء أفضل للبطارية، مما يحسن نطاق ووظائف المركبات الكهربائية وفعالية أنظمة تخزين طاقة البطارية.

وعلى الرغم من النظر حالياً إلى كافة المعادن الحرجة على أنها ضرورية لتحولات الطاقة، إلا أن هذه التحولات تنطوي على تفاعل مُعقد ومتغير باستمرار بين مختلف المعادن والتقنيات وسلاسل التوريد. وقد يؤدي البحث والتطوير المستمر إلى تغييرات في أهمية بعض المعادن الحرجة أو ظهور بدائل جديدة لها مع مرور الوقت. وقد تختلف أسعار هذه المعادن الحرجة أيضاً بشكل كبير مع تغير ديناميكيات السوق. **ويوضح الجدول (4) درجة اعتماد تقنيات الطاقة النظيفة على المعادن الحرجة.**

الجدول (4)

درجة اعتماد تقنيات الطاقة النظيفة على المعادن الحرجة

نوع التكنولوجيا	نحاس	الكوبالت	النيكل	الليثيوم	العناصر الأرضية النادرة	الكروم	الزنك	معادن البلاتينية	ألومنيوم
الكهروضوئية	H	L	L	L	L	L	L	L	H
الرياح	H	L	M	L	H	M	H	L	M
الهايدرو	M	L	L	L	L	M	M	L	M
تركيز الطاقة الشمسية	M	L	M	L	L	H	M	L	H
الطاقة الحيوية	H	L	L	L	L	L	M	L	M
الطاقة الحرارية الأرضية	L	L	H	L	L	H	L	L	L
النووية	M	L	M	L	L	M	L	L	L
شبكات الكهرباء	H	L	L	L	L	L	L	L	H
المركبات الكهربائية وتخزين البطارية	H	H	H	H	H	L	L	L	H
الهيدروجين	L	L	H	L	M	L	L	H	M

H: High - مرتفعة، M: Medium - متوسطة، L: Low - منخفضة

المصدر: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA.

المحور الخامس
التأثيرات البيئية لاستخراج المعادن الحرجة

يمكن أن تشكل أنشطة التعدين تأثيرات بيئية كبيرة قد تتجاوز الانبعاثات من الغازات الدفيئة، حيث تسبب هذه الأنشطة في استنزاف المياه وتغير استخدام الأراضي والتلوث في فقدان التنوع البيولوجي وتؤثر سلباً على الموارد الطبيعية، وتنعكس هذه التأثيرات البيئية بدورها سلباً على رفاهية المجتمعات المحلية. وقد كان استخراج المعادن الحرجة ومعالجتها مسؤولاً عن نسبة تبلغ نحو 10 % من انبعاثات الغازات الدفيئة، منها نحو 7% بسبب إنتاج الصلب، ونحو 2 % بسبب إنتاج الألومنيوم، والباقي بسبب إنتاج المعادن الأخرى – مثل تعدين ومعالجة المواد الحيوية (KU Leuven, 2022)، وهي نسبة من المتوقع أن ترتفع بسبب زيادة الطلب (Azadi et al., 2020). بالإضافة إلى ذلك، فإن تداعيات هذه الأنشطة الاستخراجية مثيرة للقلق أيضاً، لا سيما التلوث الكيميائي، بما في ذلك تلوث المياه والتربة، (Balaram, 2019, Jiang et al., 2020, Marx et al., 2018).

وعلى الصعيد العالمي، تشير التقديرات إلى أن مساحة المناجم تصل إلى 100 ألف كم^2، في حين أن ما يقرب من 1 مليون كم^2 من الأراضي مغطاة بالنفايات المرتبطة بأنشطة التعدين. كما أظهرت تقديرات عام 2016، أن استخراج المعادن قد تسبب في أكثر من 70 مليار طن متري من النفايات الصخرية وأكثر من 8 مليار طن من المخلفات في ذلك العام. وتتعدى تلك الأنشطة بشكل متزايد على المناطق الغنية بالتنوع البيولوجي: حيث تتأثر ثلث الغابات في جميع أنحاء العالم تقريباً بشكل مباشر. كما أن جزء كبير من أنشطة التعدين كثيفة الاستخدام للمياه يتم في المناطق التي تعاني بالفعل من الإجهاد المائي، مثل أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى ومنطقة الأنديز في أمريكا الجنوبية. ومن ناحية أخرى، تعتمد بطاريات السيارات الكهربائية على النيكل، الذي من الممكن أن يكون قد تم استخراجه من منجم في الفلبين الذي يقوم بالتخلص بشكل قانوني من مخلفاته السامة في المحيطات.

ويمكن لمشروعات تعدين المعادن الحرجة أن تؤدي إلى تفاقم الإجهاد المائي. على سبيل المثال، يتركز نحو نصف الإنتاج العالمي من النحاس والليثيوم في المناطق التي تعاني

من إجهاد مائي مرتفع. وعلى الصعيد العالمي، تبرز سبع مناطق رئيسية للتعدين تعاني من إجهاد مائي، هي: آسيا الوسطى، ومنطقة الأنديز في أمريكا اللاتينية، وأستراليا، ومنطقة الشرق الأوسط، وجنوب أفريقيا، ومنطقة كبيرة في غرب أمريكا الشمالية.

وعمليات التعدين بطبيعتها عملية كثيفة الاستهلاك للطاقة، ولها تأثيرات واسعة النطاق على سطح الكرة الأرضية. وإلى جانب المناجم نفسها، تشمل مناطق التعدين أيضاً مقالب النفايات وبرك المياه ومرافق المعالجة الصناعية (Maus et al., 2020). وفي حين أن تحديث المناجم الحالية لأغراض الكهرباء هو أمر مكلف ومعقد من الناحية الفنية، إلا أنه ينبغي تصميم المناجم الجديدة مع الأخذ في الإعتبار الحياد الكربوني. وبطبيعة الحال، قد يكون ذلك صعباً بشكل خاص في الأماكن التي تواجه تحديات البنية التحتية، مثل خيارات الطاقة المتجددة المحدودة أو منخفضة الكربون.

وتختلف البصمة البيئية للمعادن الحرجة بشكل كبير اعتماداً على عدة عوامل، مثل نوع المعدن والطريقة المستخدمة لمعالجته. على سبيل المثال، تحتاج المعادن التي تأتي من خامات الأكسيد، مثل الألومنيوم والليثيوم إلى كميات كبيرة من المواد الكيميائية لاستخراجها. ومن ناحية أخرى، تتطلب المعادن المشتقة من خامات الكبريتيد، مثل النحاس والنيكل، الكثير من الطاقة، وغالباً ما تكون في شكل حرارة.

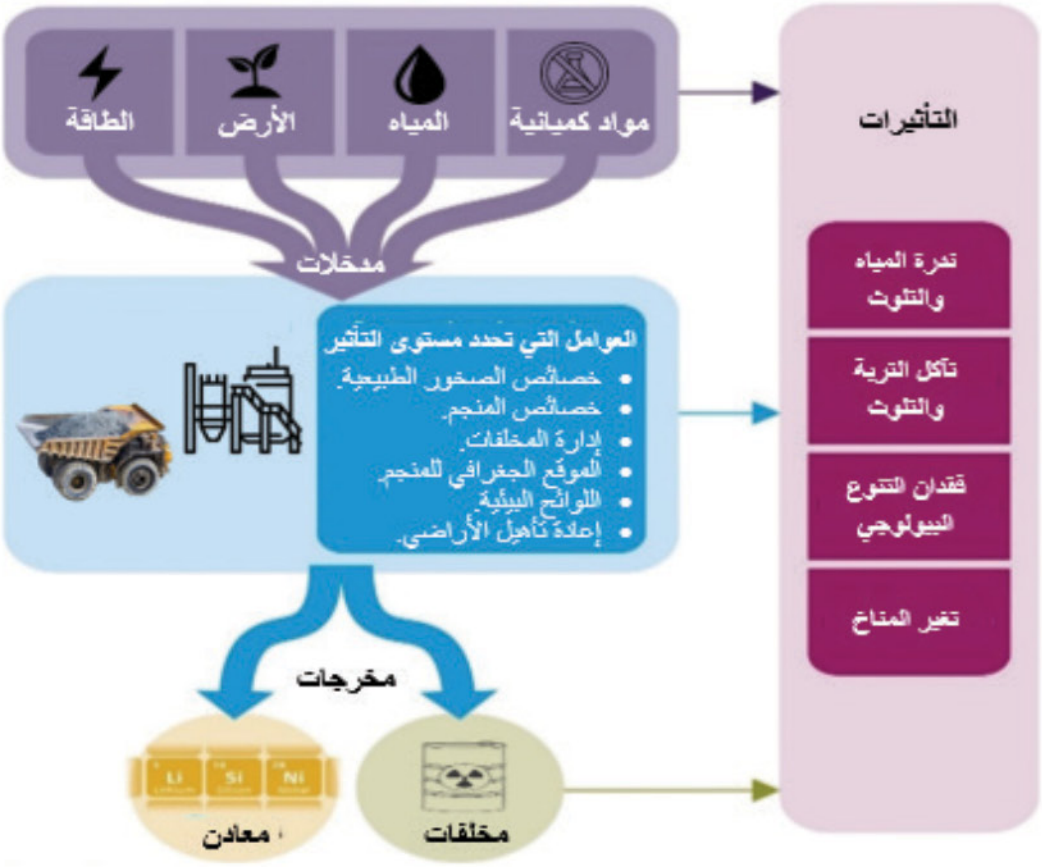
ويعتمد بناء تقنيات الطاقة النظيفة، مثل توربينات الرياح والمركبات الكهربائية (EV)، عموماً على كثافة معدنية أكبر من استخدام الوقود الأحفوري. حيث تتطلب السيارات الكهربائية معادن أكثر بستة أضعاف من السيارات التقليدية (بدون احتساب الفولاذ والألمنيوم)، وتتطلب محطة طاقة الرياح تسعة أضعاف الموارد المعدنية التي تحتاجها محطة تعمل بالغاز بنفس القدرة. ويتركز الطلب على الألومنيوم في قطاع الطاقة على استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية (87%) وطاقة الرياح (10%)، في حين يأتي الطلب على إنتاج الكوبالت والجرافيت والليثيوم والنيكل في المقام الأول من تقنيات تخزين الطاقة، ولا سيما البطاريات.

وبناء على ما تقدم، فإن تزايد الطلب المستقبلي المتوقع على المعادن الحرجة يعني المزيد من المناجم الأكبر حجما، الأمر الذي ينطوي على مخاطر حقيقية على البيئة والتنوع

البيولوجي. وفي حين يمثل النمو في إمدادات المعادن الحرجة دوراً حيوياً في تحولات الطاقة، فإن إنتاج ومعالجة هذه المعادن إذا تمت إدارتها بشكل سيئ يمكن أن يؤدي إلى الكثيرمن التداعيات السلبية، **كما يوضح الشكل (17)**.

يذكر أنه، لم يتم حتى الآن اعتماد المعايير البيئية الحالية إلا بدرجة محدودة من قبل الصناعات الاستخراجية، كما أنها تقتصر على معالجة الآثار البيئية غير المباشرة والتراكمية. وفي هذا السياق، تجدُر الإشارة إلى إن الإدارة المسؤولة للمعادن الحرجة ليست مجرد مسألة ذات أهمية اقتصادية، ولكنها مسؤولية جماعية تجاه البيئة والمجتمع والأجيال القادمة.

الشكل (17)
التأثيرات البيئية لأنشطة استخراج وتعدين المعادن الحرجة



وبينما يتسارع عدد من دول العالم نحو مستقبل الطاقة النظيفة، فإن العديد من الاقتصادات النامية سينتهي بها الأمر في نهاية المطاف إلى الإضرار ببيئتها. وهذا يثير التساؤل حول مدى استعداد العالم للتوجه نحو انتقال عادل ومنصف إلى مستقبل صافي

إنبعاثات صفرية. ولمواجهة هذه التحديات، من الضروري وجود سياسات وآليات حوكمة قوية. ويجب على أصحاب المصلحة في جميع أنحاء العالم التعاون لإنشاء أطر تنظيمية شفافة، وتعزيز ممارسات التعدين المسؤولة، وإنفاذ المعايير البيئية في جميع مراحل سلسلة القيمة. بالإضافة إلى ذلك، يُعد الدعم المالي والابتكارات التكنولوجية أمراً بالغ الأهمية لتعزيز استدامة وكفاءة إنتاج المعادن واستخدامها. ومن ثم، سيساهم تبني الممارسات المستدامة، وتعزيز التعاون، والاستفادة من التكنولوجيا لتحقيق الشفافية، في بناء سلسلة قيمة مرنة تدعم التحولات إلى الطاقة النظيفة، وتدفع النمو الاقتصادي.

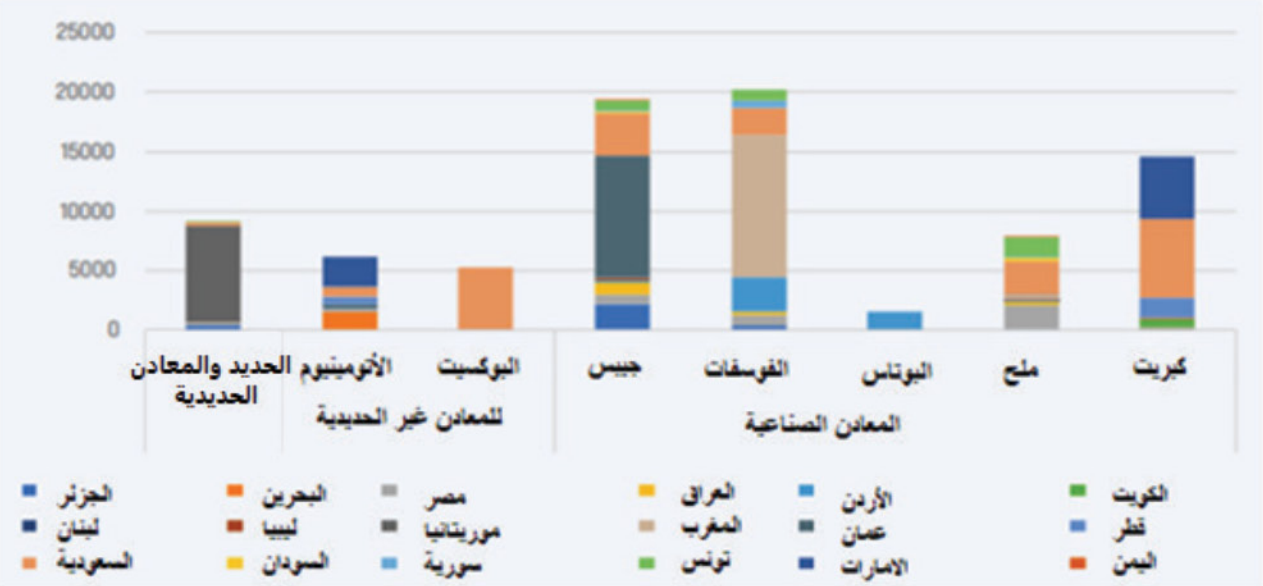
يذكر أن الأمين العام للأمم المتحدة قد أعلن خلال مؤتمر تغير المناخ (COP28) الذي عُقد بدولة الإمارات العربية المتحدة في نهاية عام 2023، عن خطة لإنشاء فريق معني بالمعادن الحرجة، يتألف من الحكومات والمنظمات الدولية والصناعة والمجتمع المدني لوضع مبادئ مشتركة وطوعية كعنصر أساسي في عملية تحولات الطاقة. وينبغي على الاقتصادات المتقدمة أن تدعم الحكومات في المجتمعات النامية التي تعتمد بشكل كبير على استخراج المعادن الحرجة.

المحور السادس

دور الدول العربية في تأمين سلاسل الإمدادات من المعادن الحرجة

كانت منطقة الشرق الأوسط ولاتزال مورد رئيسي موثوق به للإمدادات من النفط والغاز الطبيعي اللازمة لدعم نمو الاقتصاد العالمي، ويمكنها أن تلعب دوراً رئيسياً في ضمان توافر المعادن الحيوية اللازمة لعملية تحولات الطاقة، وتأمين سلاسل إمدادات مستدامة ومرنة. حيث تتمتع منطقة الشرق الأوسط بمزايا واضحة عندما يتعلق الأمر بإمكانية توريد المعادن الحيوية الضرورية لإزالة الكربون على مستوى العالم، لا سيما ثروة المعادن غير المستغلة، مما يقلل من الحاجة إلى قدرات استخراجية جديدة، فضلاً عن إمكانية الاستفادة من القدرات الحالية في قطاعات التعدين والمعالجة والخدمات اللوجستية التي تم تطويرها لتعزيز صناعة النفط والغاز. وتشير التقديرات إلى أن حصة الدول العربية من الإنتاج العالمي للمعادن تبلغ 10% من حيث الكمية و15% من حيث القيمة، ويساهم الوقود المعدني بأكبر حصة تليها المعادن الصناعية والمعادن غير الحديدية، **ويوضح الشكل (18) والشكل (19) إنتاج الدول العربية من المعادن وفقاً لأحدث البيانات المتاحة.**

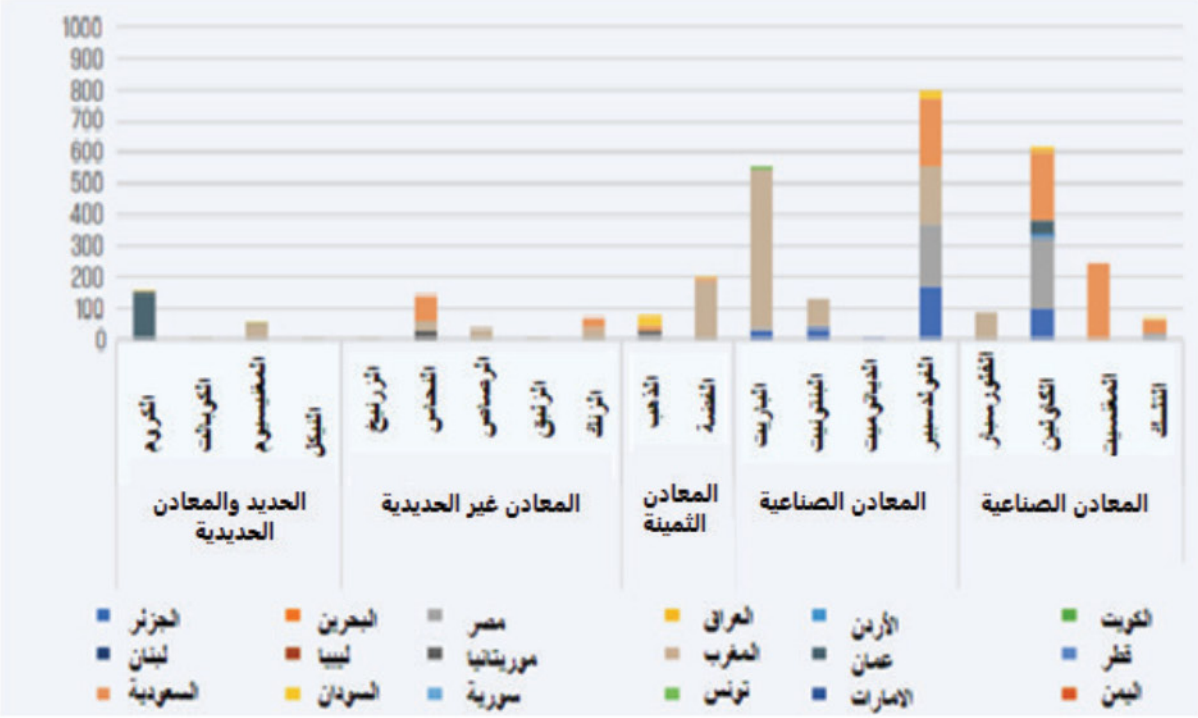
الشكل (18)
إنتاج الدول العربية من المعادن في عام 2020، (أعلى من ألف طن)



المصدر: The role of minerals and raw materials in supporting the energy transition in the Arab region, ESCWA.

الشكل (19)

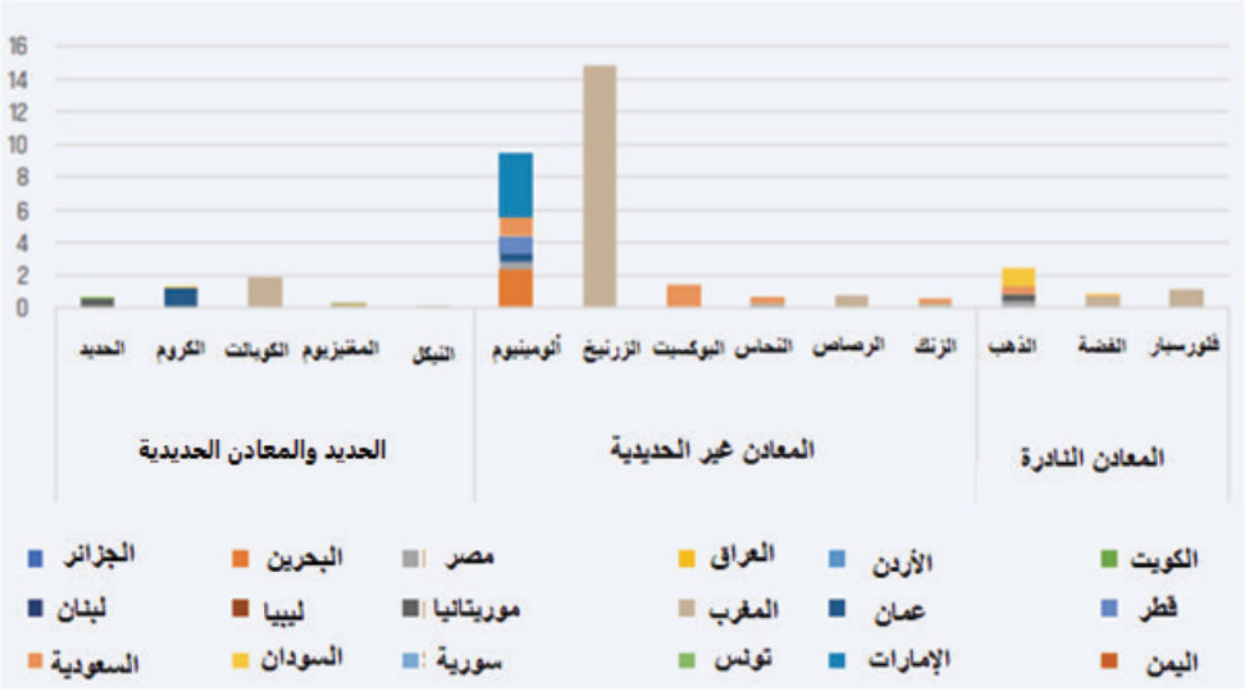
إنتاج الدول العربية من المعادن في عام 2020، (أقل من ألف طن)



المصدر: The role of minerals and raw materials in supporting the energy transition in the Arab region, ESCWA.

ومن بين 44 معدن تعتبر هامة لتحولات الطاقة، يتم إنتاج 14 معدن في الدول العربية، تستحوذ المعادن مثل الزرنيخ والألمنيوم على حصة كبيرة من الإنتاج العالمي، مقارنة بالمعادن الأخرى التي تصل حصتها إلى نحو 2% من الإنتاج العالمي، **كما يوضح الشكل (20)**.

الشكل (20)
حصة الدول العربية من المعادن المستخدمة في تحولات الطاقة على المستوى العالمي، (%)



المصدر: The role of minerals and raw materials in supporting the energy transition in the Arab region, ESCWA.

وعلى الرغم من ثراء العديد من الدول العربية بالموارد المعدنية، فهناك إمكانية كبيرة للعثور على احتياطيات معدنية إضافية بعد إجراء المسوحات الجيولوجية وتطوير خرائط الموارد المعدنية. وعلى سبيل المثال، تبرز المملكة العربية السعودية باحتياطياتها المعدنية الهامة وجهودها الحثيثة لتطوير تلك الاحتياطيات من خلال الشراكات الدولية، حيث تمتلك معادن ثمينة مثل الذهب والفضة، بالإضافة إلى معادن صناعية مثل الألمنيوم والحديد والنحاس والزنك والمنجنيز والكروم، وعناصر أرضية نادرة، مثل التنتالوم الذي تستحوذ على 25% من احتياطياته العالمية وله تطبيقات في الصناعات عالية التقنية مثل الإلكترونيات، والنيوبيوم الذي يستخدم في السبائك الصناعية وتطبيقاته مثل المحركات النفاثة.

يذكر أن المملكة العربية السعودية رفعت تقديراتها لمواردها المعدنية غير المستغلة بما في ذلك الفوسفات والذهب والمعادن النادرة إلى 2.5 تريليون دولار، مقارنة بتوقعات عام 2016 البالغة 1.3 تريليون دولار، وتأتي نسبة 10% من الزيادة في التقديرات من

إضافة معادن نادرة هامة لصناعة السيارات الكهربائية والمنتجات عالية التقنية. وقد أعطت المملكة العربية السعودية الأولوية لقطاع التعدين في خطة التنمية الاقتصادية لرؤية 2030 كوسيلة للحد من اعتمادها على النفط والغاز، حيث تهدف إلى تحفيز استثمارات القطاع الخاص في المناطق غير المستكشفة وأساليب الاستخراج الجديدة السليمة بيئياً، في ظل امتلاكها للقدرة على الوصول إلى التكنولوجيا وكذلك التمويل اللازم. وأنشأت المملكة العربية السعودية صندوق الاستثمار **"منارة للمعادن"** بهدف شراء أصول في الخارج أو الشراكة مع دول مختلفة.

كما تسعى دولة الإمارات العربية المتحدة إلى تعزيز الاستفادة من المعادن الحرجة، لا سيما وأنها تمتلك وفرة من المعادن الأساسية مثل الكروميت والألمنيوم والصلب الخام. حيث تركز استراتيجية دولة الإمارات على تأمين احتياجاتها من المعادن، وخاصة المعادن الاستراتيجية، من خلال تعزيز عمليات البحث والاستكشاف والاستخراج، فضلاً عن زيادة الاستثمارات الأجنبية من خلال إنشاء أطر قانونية وتنظيمية قوية في قطاع التعدين.

وأولت دولة الإمارات العربية المتحدة اهتماماً كبيراً بالمشاركة في صناعة المعادن الحرجة في أفريقيا، وهو ما يتوافق مع أهدافها بشأن توطين صناعة الطاقة المتجددة، ودعم الأهداف الطموحة للحد من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

كما تُعد جمهورية مصر العربية موطنًا للموارد المعدنية مثل الذهب والنحاس والفضة والزنك والبلاتين وعدد من المعادن الثمينة والأساسية الأخرى، وتمتلك أيضاً رواسب النحاس واليورانيوم، إلى جانب الجرانيت. هذا وقد تم إطلاق استراتيجية لتطوير قطاع الثروة المعدنية بجمهورية مصر العربية، لتحقيق أقصى استفادة اقتصادية، من خلال زيادة مساهمة قطاع التعدين في الناتج المحلي الإجمالي، وزيادة الاستثمار الأجنبي المباشر في قطاع التعدين.

وبشكل عام، تُعد الدول العربية غنية بالموارد وتنتج العديد من المعادن التي يمكن استخدامها للتحولات في الطاقة. ومع ذلك، فإن نقص البيانات الجيولوجية وخرائط الموارد المعدنية، وعدم توافر بيئة تشغيلية متسقة وموثوقة لجذب الاستثمارات الرأسمالية طويلة

الأجل، يعيق عملية التطوير. مما يستوجب ضرورة وجود استراتيجية واضحة ومتكاملة، بما في ذلك دعم الشراكة بين القطاعين العام والخاص على إمتداد سلسلة القيمة بأكملها لقطاع التعدين من خلال سياسات واضحة، وتقليل مخاطر الاستثمار، واستخدام نماذج أعمال مبتكرة تساهم في إنشاء سلاسل إمدادات للمعادن الحرجة، فضلاً عن تسهيل عملية منح التصاريح والتراخيص لعمليات التعدين، وتعزيز التعاون الإقليمي بهدف نشر أسرع تقنيات التعدين، مع تشجيع ودعم البحث والابتكار لتطوير تقنيات محسنة لتقليل التأثير البيئي والحصول على إنتاجية أعلى على إمتداد سلسلة قيمة قطاع التعدين بأكملها، واعتماد إطار الاقتصاد الدائري للكربون في قطاع التعدين من خلال تعزيز كفاءة الموارد وتوسيع نطاق إعادة التدوير واستخدام المواد البديلة في عمليات التعدين.

الخلاصة والاستنتاجات

تُعد المعادن الحرجة ضـــرورية للتنمية الاقتصـــادية، حيث تدخل في صـــناعات التكنولوجيا العالية والطاقة المتجددة مثل الألواح الشـمسـية، وتوربينات الرياح، والبطاريات المتطورة. ويعتمد الاقتصـاد العالمي المسـتقبلي بشـكل كبير على هذه المعادن، التي تشـمل الليثيوم، الجرافيت، الكوبالت، التيتانيوم، والعناصـــر الأرضـــية النادرة. وعلى وقع تلك المعطيات، تزايد الاهتمام العالمي بهذه المعادن وأصبح تأمين سلاسل إمدادات مستقرة منها أولوية عالمية.

ويختلف تصنيف المعادن الحرجة بين الدول، حيث تُحدد بناء على الأهمية الاقتصادية ومخاطر الإمدادات. فعلى سبيل المثال، تعتمد الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والصين معايير متعددة لتصـنيف المعادن، مع التركيز على مخاطر الإمدادات والأهمية الاقتصـادية. ويعكس الاتفاق بين هذه الدول على أهمية بعض المعادن مثل الألومنيوم والنيكل في الصناعات المختلفة.

وتواجه سـلاسـل إمدادات المعادن الحرجة تحديات كثيرة مثل الاحتكار، حيث يتحكم عدد قليل من الدول في إنتاج معادن معينة، مما يثير مخاوف من تشـكيل كارتلات تؤثر على الأســـعار وعلى توافر تلك المعادن. وتهدف المبادرات الدولية لتطوير المعادن الحرجة مثل شـــراكة أمن المعادن ومبادرة الأمم المتحدة لتســـخير المعادن الحرجة إلى تعزيز التعاون الدولي وتحسين سلاسل الإمدادات، مع التركيز على التنمية المستدامة.

وتُعد الدول العربية غنية بالموارد وتنتج العديد من المعادن ويمكن أن يكون لها دور في تأمين سـلاسـل الإمدادات من المعادن الحرجة التي يمكن اسـتخدامها في تحولات الطاقة. ومع ذلك، فإن نقص البيانات الجيولوجية وخرائط الموارد المعدنية، مع عدم توافر بيئة تشغيلية متسقة وموثوقة لجذب الاستثمارات، يعيق عملية التطوير.

ويمكن إبراز أهم الاستنتاجات التي توصلت إليها الدراسة في النقاط التالية:

- **أهمية المعادن الحرجة في التحول إلى اقتصاد منخفض الكربون**: تزايدت أهمية المعادن الحرجة في دعم تقنيات الطاقة المتجددة مثل البطاريات والمركبات الكهربائية. ولذلك، ينبغي تعزيز استراتيجيات وطنية وعالمية لتأمين إمدادات هذه المعادن وتطوير البنية التحتية اللازمة لاستغلالها.
- **المخاطر الجيوسياسية والاقتصادية**: تتركز إمدادات العديد من المعادن الحرجة في عدد محدود من الدول، مما يعرض سلاسل الإمدادات للمخاطر الجيوسياسية والتجارية. كما إن تشكيل كارتلات بين الدول المنتجة قد يؤدي إلى تقلبات كبيرة في الأسعار والإمدادات. وبناء على ذلك فالحاجة تدعو إلى تعزيز التعاون الدولي وتطوير سياسات تجارية أكثر مرونة لتقليل هذه المخاطر، وتحقيق استدامة سلسلة الإمدادات من المعادن الحرجة.
- **الطلب المتزايد والتوقعات المستقبلية:** تشير التوقعات إلى ارتفاع كبير في الطلب العالمي على المعادن الحرجة بحلول عام 2050، خاصة الليثيوم، النيكل، والكوبالت، بسبب الاعتماد المتزايد على تقنيات الطاقة النظيفة. ولتحقيق هذه المتطلبات، يجب على الدول تعزيز قدراتها في إنتاج ومعالجة هذه المعادن، مع التركيز على الاستدامة والتعاون الدولي لتأمين سلاسل الإمدادات.
- **الاستثمارات والتطوير المستدام**: لا تزال الاستثمارات في استخراج ومعالجة المعادن الحرجة متواضعة، على الرغم من النمو في الطلب. ومن ثم يجب زيادة الاستثمارات في البحث والتطوير لتحسين تقنيات إعادة التدوير واكتشاف مصادر جديدة. بالإضافة إلى ذلك، ينبغي وضع أطر قانونية تدعم الاكتشافات الجديدة وتشجع على الاستثمار في البنية التحتية.
- **التأثيرات البيئية**: لأنشطة استخراج المعادن الحرجة آثار بيئية سلبية، تشمل فقدان التنوع البيولوجي وتلوث المياه. ويتطلب الأمر تطوير معايير بيئية صارمة وتبني تقنيات صديقة للبيئة للحد من هذه الآثار. ويجب التركيز على استخدام تقنيات تقلل من الأثر البيئي لهذه الأنشطة، مثل إعادة التدوير واستخدام الموارد بشكل أكثر كفاءة.

- **دور الدول العربية في تأمين الإمدادات من المعادن الحرجة**: المطلوب من الدول العربية هو تعزيز قدراتها في تأمين إمدادات المعادن الحرجة، لتلبية أهدافها الطموحة، سواء من خلال زيادة الإنتاج المحلي أو من خلال تنويع مصادر الاستيراد. كما يجب دعم الشراكة بين القطاعين العام والخاص على إمتداد سلسلة القيمة بأكملها لقطاع التعدين من خلال سياسات واضحة، وتقليل مخاطر الاستثمار، واستخدام نماذج أعمال مبتكرة تساهم في إنشاء سلاسل إمدادات للمعادن الحرجة، فضلاً عن تسهيل عملية منح التصاريح والتراخيص لعمليات التعدين، مع تشجيع ودعم البحث والابتكار لتطوير تقنيات محسنة لتقليل التأثير البيئي والحصول على إنتاجية أعلى على كامل امتداد سلسلة قيمة قطاع التعدين بأكملها.

المراجع:

- Energy Outlook 2024, BP.
- Geopolitics of the Energy Transition- Critical Materials, IREA.
- Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA.
- Statistical Review of World Energy 2024, Energy Institute.
- The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA.
- The role of minerals and raw materials in supporting the energy transition in the Arab region, ESCWA.
- U.S. Department of Energy.
- World Trade Organization, Analytical Database.

البحث الثالث

معالجة مياه صرف المصافي النفطية بعمليات أكسدة متقدمة

د. نوفا أحمد جمعة *

* دكتوراه في الهندسة الكيميائية/اختصاص التلوث وحماية البيئة/
عضو هيئة تدريسية في جامعة الفرات وفي الجامعة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا

١- مقدمة [7,8]:

تطورت تقنيات وأساليب معالجة مياه الصرف الصناعية بشكل متسارع وخاصة في السنوات الأخيرة، ويتوقف نجاح عمليات المعالجة وإعادة استخدام مياه صرف المصافي النفطية على مجموعة من المعايير والضوابط البيئية التي ترتبط بطبيعة هذه المياه، والهدف النهائي من معالجتها وإعادة استخدامها، والذي يجب أن يجري في إطار يكفل حماية البيئة والأفراد مع الأخذ في الاعتبار النواحي الإقتصادية، وضرورة متابعة الآثار البيئية لإعادة استخدام هذه المياه مع مكونات المنظومة البيئية، وذلك من خلال وضع برامج متكاملة للرصد البيئي للملوثات وآثارها على البيئة المحيطة.

تعد المصافي النفطية من المصادر الهامة لتلوث المياه بالنفط وذلك بسبب استهلاكها كميات كبيرة من المياه التي يتم التخلص منها في البحار أو الأنهار، وتعد أيضاً فضلات مصافي النفط وعمليات الشحن والتفريغ وحوادث السفن النفطية، المصدر الرئيسي للنفط الداخل إلى البيئة المائية، وتؤدي إلى تلوث المياه الجوفية خاصةً عندما تكون التكوينات الصخرية شديدة النفاذية، مما يسهل تسرب المياه الملوثة إلى هذه التكوينات وخاصةً بمصاحبة مياه الأمطار.

كما أن صرف المياه الملوثة الناتجة عن المصافي النفطية في الأنهار أو البحار أو برك غير نظامية يسبب أضراراً كبيرة على البيئة وعلى صحة الإنسان، إذ تشكل طبقة عازلة على سطح الماء تمنع التبادل الغازي وتمنع وصول الضوء الكافي للكائنات النباتية مما يسبب خلل في السلسلة الغذائية، وهذا يؤدي بدوره إلى انخفاض حاد في الثروة السمكية.

تحتوي مياه صرف المصافي النفطية على مركبات هيدروكربونية بتراكيز عالية، وهذه المواد تعتبر من أخطر الملوثات الصناعية نظراً لضخامة كمياتها من جهة، وصعوبة تحللها حيويا من جهة أخرى، إضافة إلى كون الكثير منها مسرطناً. ويوجد في جميع مصافي تكرير النفط وحدات خاصة لمعالجة المياه الناتجة عنها، لكن الطرق الحالية المطبقة ينتج عنها كميات كبيرة من الحمأة نتيجة إضافة المخثرات الكيميائية، هذه الحمأة يحتاج التخلص منها تطبيق طرق خاصة أيضاً، كما أن طريقة المعالجة الحيوية المطبقة تحتاج مساحة واسعة من الأرض، ومراقبة دقيقة لمواصفاتها، بسبب التأثير السام للمركبات الفينولية فيها على عمل وكفاءة المعالجة في الأحواض البيولوجية، لذلك يجب التفكير باستخدام طرق أبسط وأكثر كفاءة في المعالجة، ومنها طرق التخثير الكهربائي والأكسدة بالماء الأكسجيني بوجود وسيط (تفاعل فنتون) والامتزاز، كبديل عن التخثير الكيميائي

والمعالجة الحيوية، حيث لايتطلب الأمر في هذه الحالة إضافة مواد مخثرة وبالتالي لاينتج عنها كميات كبيرة من الحمأة المترسبة والتي يشكل التخلص منها أو معالجتها عبئاً بيئياً لايمكن التغاضي عنه.

تقسم عملية معالجة المياه الخارجة من مصافي تكرير النفط إلى معالجة فيزيائية و معالجة كيميائية وأخرى حيوية، تستخدم طرق المعالجة الفيزيائية لفصل الزيوت والشحوم والمواد العالقة الأخرى، عبر استخدام كواشط ميكانيكية بعد تطويف هذه الملوثات في أحواض التطويف والتعويم، يلي ذلك استخدام المعالجة الكيميائية بالتخثير باستخدام مخثرات كيميائية تعمل على تشكيل الندف التي تمتز على سطحها الملوثات المعلقة، ثم تترسب بتأثير الجاذبية على شكل حمأة راسبة، يلي ذلك المعالجة الحيوية باستخدام الحمأة المنشطة والتي تحتاج إلى اتخاذ العديد من الاجراءات لضمان عملها بشكل جيد ومنها ضبط درجة حموضة المياه ودرجة حرارتها وعدم وجود مواد سامة للبكتريا بتراكيز عالية تؤدي إلى قتلها وتأمين الزمن اللازم للمعالجة وهو زمن طويل يمكن أن يمتد لأيام.

تستهلك عمليات تكرير النفط كميات كبيرة من الماء، إذ أن كل واحد طن من النفط المكرر يتطلب نحو 15 متر مكعب من المياه، فيما يكون حجم المياه المضافة المطروحة من مصفاة تكرير النفط بحدود 5-3.5 أمتار مكعبة.

٢- مصادر المياه الناتجة عن المصافي النفطية:

تضم مصفاة تكرير النفط في حمص عدداً من الوحدات الإنتاجية والوحدات المساعدة بهدف الحصول على أفضل مردود للمنتجات وفق المواصفات القياسية، نذكر من هذه الوحدات:

- وحدة التقطير الجوي ووحدة التقطير الفراغي.
- وحدة التفحيم.
- وحدة إنتاج الهيدروجين.
- وحدات الهدرجة.
- وحدات تحسين النفتا.
- وحدات التحلية.
- وحدات استرجاع الكبريت.

يوجد في الشركة وحدات أخرى مساعدة مهمتها تقديم المستلزمات اللازمة لعمل الوحدات الإنتاجية، نذكر منها وحدات إنتاج بخار الماء والكهرباء - وحدات انتاج الهيدروجين- وحدة الغاز الطبيعي- ووحدات لاحقة مثل وحدة إنتاج المذيبات - قسم المخابر ووحدة تخزين وتحضير المشتقات النفطية، إضافة إلى وحدات معالجة المياه الملوثة الخارجة من المصفاة.

يستخدم البخار على نطاق واسع في مصافي النفط و ذلك في أجهزة الفصل وأجهزة توليد الضغط المنخفض و أبراج التقطير و غيرها، يكثف هذا البخار بعد ذلك و يفصل عن المنتجات البترولية على شكل مياه و تبقى في هذه المياه نسبة معينة من المواد الهيدروكربونية والكبريتية. كما تستخدم أنواع مختلفة من المياه بكميات كبيرة جداً في مصافي النفط مثل مياه التبريد التي تستعمل في المكثفات و المبادلات الحرارية بالإضافة إلى المياه المالحة التي تفصل من النفط الخام سواء من خزانات النفط أو بطريقة نزع الأملاح بالطريقة الكهربائية.

نظراً لطول خطوط الأنابيب وتعدد الصمامات والوصلات يحدث تسرب لبعض المواد الهيدروكربونية التي تصل إلى مياه التبريد فتلوثها و يزداد تركيز هذه الملوثات باستمرار، لذلك فإن المياه المنصرفة سواء أكانت ناتجة عن تكثيف البخار أم من مياه التبريد أم من مياه العمليات فإنها تحتوي على نسب معينة من الملوثات التي يجب أن تعالج قبل طرحها إلى المصادر المائية، كما أن بعض هذه المياه يتصف بارتفاع درجة حرارته وهو الأمر الذي يتسبب في حدوث تلوثٍ آخر هو التلوث الحراري.

يمكن تصنيف المياه الناتجة عن الوحدات والأقسام في المصفاة (مياه صرف حسب المصدر وحسب نوعية الملوثات) إلى عدة أنواع هي [7]:

- **مياه صرف كبريتية:**

هي مياه صرف من عمليات التكرير، والتي تحوي إلى جانب الزيوت النفطية على NaHS، H_2S، Na_2S، المركبتانات والسيانيدات والفينولات. وهذه الملوثات بشكل عام تنتج عن مياه معالجة وغسيل المنتجات النفطية، ونزع الأملاح من النفط الخام.

- **مياه صرف زيتية:**

هي مياه عمليات التكرير، ومياه التبريد والمياه السطحية الملوثة بالمشتقات النفطية.

• **مياه التبريد:**

هي مياه الصرف الناتجة عن مضخات التبريد والضواغط (وهي مياه نظيفة نسبياً ويمكن طرحها أو إعادة استخدامها).

• **المنصرفات الكيميائية والرواسب :**

تتمثل هذه المنصرفات بتلك الحاوية على مركبات الصوديوم، كما نميز هنا أيضا حمض الكبريت المنصرف، و مياه الصرف من عمليات إعادة تنشيط المبادلات الشاردية .

تشكل المركبات الهيدروكربونية النسبة العظمى من الملوثات الموجودة في مياه الصرف الناتجة عن الصناعات البترولية، يضاف إليها بعض المركبات الأخرى منها المركبات العضوية (كحمض السلفونيك - و المركبات الكبريتية – وأملاح الصوديوم..).

يحدث التلوث بالمواد البترولية بسبب المخلفات الناتجة عن الصناعات البترولية أو نتيجة الحوادث المؤدية إلى تدفق كميات من النفط، ويمكن تجزئة مراحل الصناعات البترولية إلى الترتيب الآتي:

١. **مرحلة الإنتاج**: تستخدم المياه في هذه المرحلة بشكل كبير، كما أن النفط الخام يحوي على نسبة من المياه، وتنفصل تلك المياه بالترقيد مع التسخين عند درجة حرارة 50-90°C وتحوي المياه الناتجة على (0.5-2 g/l) من المواد الهيدروكربونية.
٢. **نقل النفط**: ينتج عن عملية نقل النفط بواسطة الناقلات كميات كبيرة من المياه الملوثة بالمركبات الهيدروكربونية، و تكون تلك المياه متواجدة داخل النفط المنقول، و تنفصل عنه أثناء عملية النقل، كما يتم تنظيف ناقلات النفط بعد تفريغها و يكون ماء التنظيف محملاً بالمواد المنظفة بالمحلات العضوية.
٣. **مياه صرف ناتجة عن مصافي النفط**: تحمل مياه الصرف الناتجة عن مصافي النفط العديد من المركبات النفطية المختلفة في النوعية و في الكمية.

يصل النفط الخام إلى مصافي التكرير محملاً بالكثير من الملوثات، كما تنتج ملوثات أخرى عن عمليات التكرير المختلفة التي يخضع لها النفط لتحويله إلى المنتجات والمشتقات النفطية المتنوعة. يمر النفط أولاً عبر نازع الأملاح /desalter/ فتنفصل عنه المياه المرافقة له وترسل

بدورها إلى محطة معالجة المياه الملوثة، يمكن أن تكون هذه المياه مصدراً أساسياً للسلفيدات و خاصةً عندما يكون النفط الخام كبريتياً (حاوياً على مركبات كبريتية)، كذلك يمكن أن تحتوي هذه المياه بشكل أساسي على كميات من الكلوريد والمركبتانات والفينولات والسيانيدات.

المصدر الثاني للملوثات في مياه الصرف هو أماكن أخذ عينات النفط، وهذا النفط يجب أن يكون قابلا للفصل، إلا أنه يمكن أن يشكل مستحلبات ثابتة في مياه الصرف.

المصدر الثالث للملوثات هو المستحلبات النفطية الثابتة غير القابلة للانحلال، والتي يمكن أن تتشكل في مكثفات المواد الخارجة من أعلى البرج المستخدمة لتوليد الفراغ في وحدات التقطير.

يخضع النفط لعدة عمليات أساسية لتكريره والحصول على المنتجات المختلفة له وهي:

- **التكسير الحراري Thermal Cracking:**

تتطلب وحدات التكسير الحراري مياهاً للتبريد وبخاراً لنزع المركبات الخفيفة من المنتجات الجانبية في أبراج التقطير، وهذا يستلزم وجود مكثفات عليا ونظام تجميع لفصل مياه الصرف الناتجة. تحتوي مياه الصرف الخارجة من هذه الوحدات كميات من النفط، كما يمكن أن تملك قيماً مرتفعة لمتغيرات PH وCOD وBOD وكذلك تركيز النشادر وتراكيز الفينولات والسلفيدات.

- **التكسير الوسيطي Catalytic Cracking:**

تعتبر هذه الوحدات أحد أكبر مصادر المياه الحمضية في المصفاة والقادمة من كاسحات البخار ومن مجمعات المنتجات النفطية العليا، وتتكون الملوثات الرئيسة الناتجة عن هذه العمليات من BOD (Biochemical Oxygen Demand) ويشير إلى الأكسجين البيوكيميائي المطلوب للأحياء الدقيقة لتتغذى على المواد العضوية الموجودة في ليتر من عينة مائية ويقاس بواحدة mg/l، والأجزاء النفطية والسلفيدات والفينولات والسيانيدات.

- **التحسين الوسيطي Catalytic Reforming:**

مياه الصرف الخارجة من الوحدة ذات محتوى صغير نسبيا من الملوثات.

- **الهدرجة Hydrotreating:**

تتم في هذه الوحدات هدرجة المركبات الهيدروكربونية لإزالة الكبريت والنتروجين والأكسجين والهالوجينات منها وتحويل الأوليفينات (المركبات الهيدروكربونية غير المشبعة) إلى هيدروكربونات مشبعة.

تأتي تيارات مياه الصرف الرئيسة من مجمعات المنتجات العليا في أعمدة التجزئة و من أوعية نزع المركبات الهيدروكربونية الخفيفة من المياه الحمضية بالبخار، و تكون الملوثات الأساسية في هذه المياه عبارة عن السلفيدات و الأمونيا و الفينولات. أما المياه القادمة من الأنظمة الأخرى كنظام تبريد المياه و أنظمة توليد البخار وغيرها فتعتبر مياهاً نظيفة نسبياً وخالية من الملوثات، لذلك فهي من المياه الجيدة بالنسبة لمحطة معالجة المياه الملوثة.

٣- الواقع الحالي لمحطة معالجة المياه في مصفاة حمص:

يعتمد اختيار إجراءات المعالجة على نوع التلوث المراد إزالته وعلى درجة الإزالة المرجوة، وهناك عوامل أخرى يجب أخذها بعين الاعتبار مثل كمية المياه المراد معالجتها، وتركيز الملوثات في الماء، والتغيرات التي تطرأ على كمية الماء و المناخ ...الخ

تعمل وحدة معالجة المياه الملوثة الموجودة في مصافي تكرير النفط على استرجاع الزيوت النفطية الموجودة في المياه بعدة أشكال:

- زيوت حرة غير مستحلبة، وزيوت مستحلبة و مستقرة وسط الماء، ومواد صلبة غير منحلة.

إن مبادئ فصل واسترجاع هذه الزيوت تتوقف على طبيعة وجودها، فالمواد الصلبة والزيوت غير المستحلبة تفصل بالطرق الفيزيائية، أما الزيوت المستحلبة فتفصل كيميائياً، وأخيراً يتم معالجة المستحلبات الصغيرة و المواد العضوية غير المنحلة والتي لم تعالج بالطرق السابقة بيولوجياً. تمر المياه الملوثة أثناء معالجتها بثلاث مراحل تبعاً لطريقة المعالجة وهي[7,8,9]:

1- مرحلة المعالجة الفيزيائية.

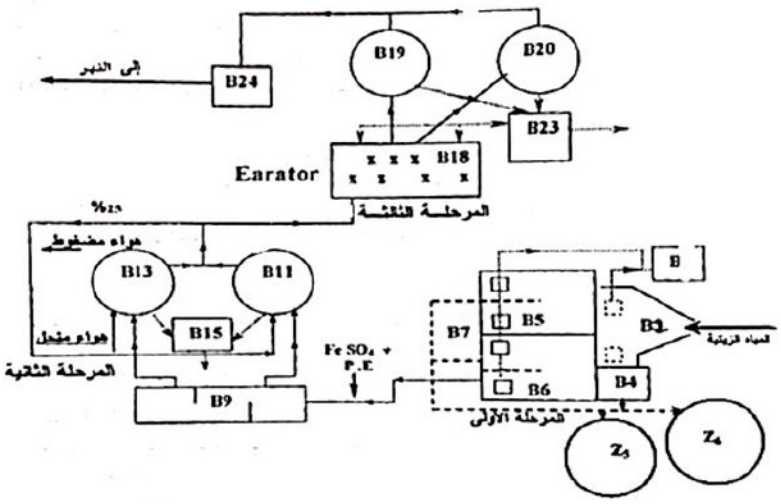
2- مرحلة المعالجة الكيميائية.

3- مرحلة المعالجة البيولوجية.

يبين الشكل رقم -1- المخطط المفصل لمحطة معالجة مياه صرف مصفاة حمص، حيث تدخل مياه صرف المصفاة المحملة بالزيوت إلى حوض الفصل الابتدائي (B2) وهي مرحلة المعالجة الفيزيائية، حيث تفصل الزيوت الطافية بواسطة كاشط إلى حوض خاص (B4) ومنه إلى خزانات الزيوت المفصولة (Z5 , Z6) لتعاد إلى خطوط الإنتاج من جديد، أما المواد الصلبة المترسبة في أسفل الحوض الإبتدائي فتؤخذ إلى حوض الحمأة (B3).

تذهب المياه بعد ذلك الى فواصل من نوع (API) وهي (B5 , B6) لفصل الزيوت عنها أيضاً وهي (B7) التي تؤخذ بدورها إلى الخزانات (Z5 , Z6) لفصل المياه عن المواد الصلبة، لتخرج بعدها المياه إلى مرحلة المعالجة الكيميائية، حيث تتم إضافة المادة المخثرة وهي كبريتات الحديدي $FeSO_4$ في الحوض (B9) لامتزاز الزيوت المستحلبة على سطحها، ومن ثم يتم ضخ هواء من أسفل أحواض التعويم (B11, B13) لتخفيض كثافة المواد الصلبة وفصل المعلقات المتشكلة الطافية، بينما تسحب حمأة التعويم (B15) من الأسفل.

في المرحلة الثالثة تدخل المياه إلى حوض المعالجة البيولوجية (B18) المزود بخلاطات لتأمين الهواء اللازم لنمو البكتريا لتقوم بأكسدة المواد العضوية وتحويلها إلى CO_2 وحمأة تتوضع في أسفل الأحواض (B19, B20) لتؤخذ بعدها إلى حوض الحمأة النهائي (B23)، بينما تذهب المياه المعالجة النهائية (B24) عبر مجرى خاص إلى نهر العاصي.



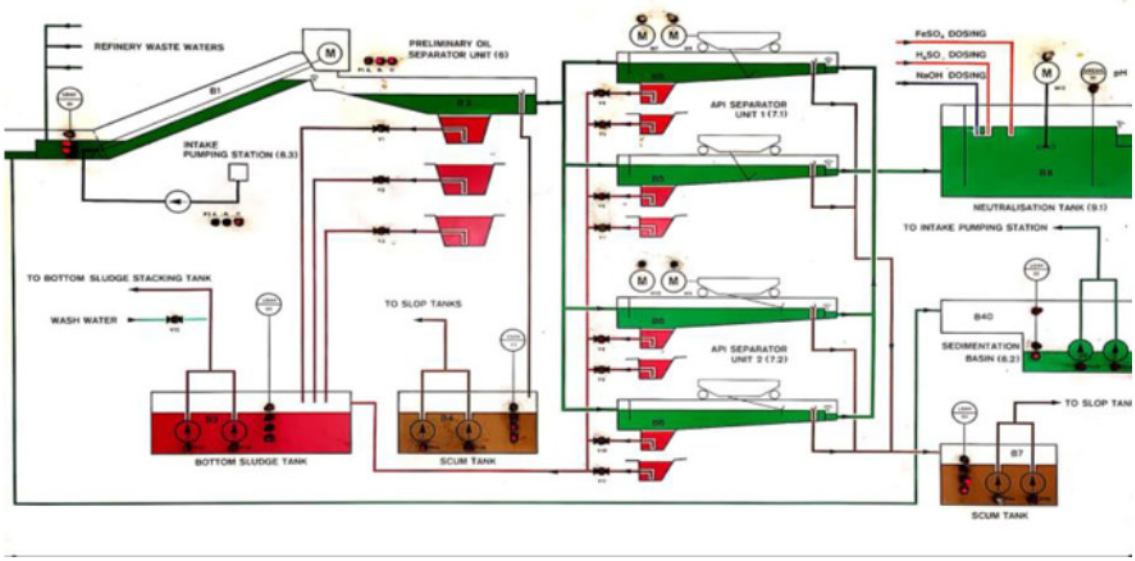
B2 حوض الفصل البدائي	B3 حوض الحمأة السفلي
B4 حوض الزيوت المفصولة	B5,B6 أحواض API
B7 الزيوت المفصولة	B9 التجانس والتلبيد
B11, B13 التعويم	B15 حمأة تعويم
B19, B20 حوضي الترسيب	B23 موزع الحمأة والتعويم
B24 المياه الخارجة من الترسيب إلى النهر	Z5, Z6 خزانات الزيوت المفصول
B18 حوض المعالجة الحيوية	X خلاطات الحوض البيولوجي

الشكل رقم -1- المخطط المفصل لمحطة معالجة مياه صرف مصفاة حمص

تتضمن محطة معالجة المياه في مصفاة حمص المراحل الآتية :

1-مرحلة المعالجة الفيزيائية Physical Treatment:

يتم فيها فصل المواد الصلبة والزيوت غير المستحلبة بالاعتماد على مبدأ الجاذبية، حيث تستخدم فواصل (API) ذات التصميم العائد لمعهد البترول الأمريكي American petroleum institute والتي يعتمد تصميمها على مبدأ الفرق في الكثافة بين طوري الماء والزيوت الحرة أو الصلبة، فتطفو الزيوت الحرة على سطح الماء وتؤخذ بواسطة كاشط معين إلى حفرة خاصة بالزيوت لتعاد بعد ترقيدها إلى خطوط الإنتاج من جديد، بينما تترسب المواد الصلبة في أسفل تلك الأحواض وتؤخذ عبر مآخذ خاصة على شكل حمأة إلى أماكن خاصة حيث تتم معالجتها والتخلص منها. يوضح الشكل رقم -2- هذه الوحدة.



الشكل رقم - 2 -المخطط التكنولوجي لمدخل ومرحلة المعالجة الفيزيائية

ويبين الشكل رقم -3- صورة للتيار المائي الناتج من الوحدات الرئيسية في المصفاة والأشكال الأخرى صور مأخوذة لوحدة المعالجة، حيث يظهر الشكل رقم -4- مدخل محطة المعالجة. أما الشكل رقم-5- يظهر الحالة النموذجية المبسطة لأحواض API علماً أن هناك بعض التعديلات التي يمكن إضافتها لهذا النموذج بقصد تحسين مردود عملية الفصل، كأن تضاف بعض الحواجز والصفائح المعدنية إلى منطقة عبور المياه حيث تلتصق قطرات الزيت على هذه الصفائح و تتجمع

عليها فتسمح بالتالي من ازدياد احتمالات تصادمها و تضخم حجمها، الأمر الذي يساهم في تحسين مردود فصلها وتعويمها.

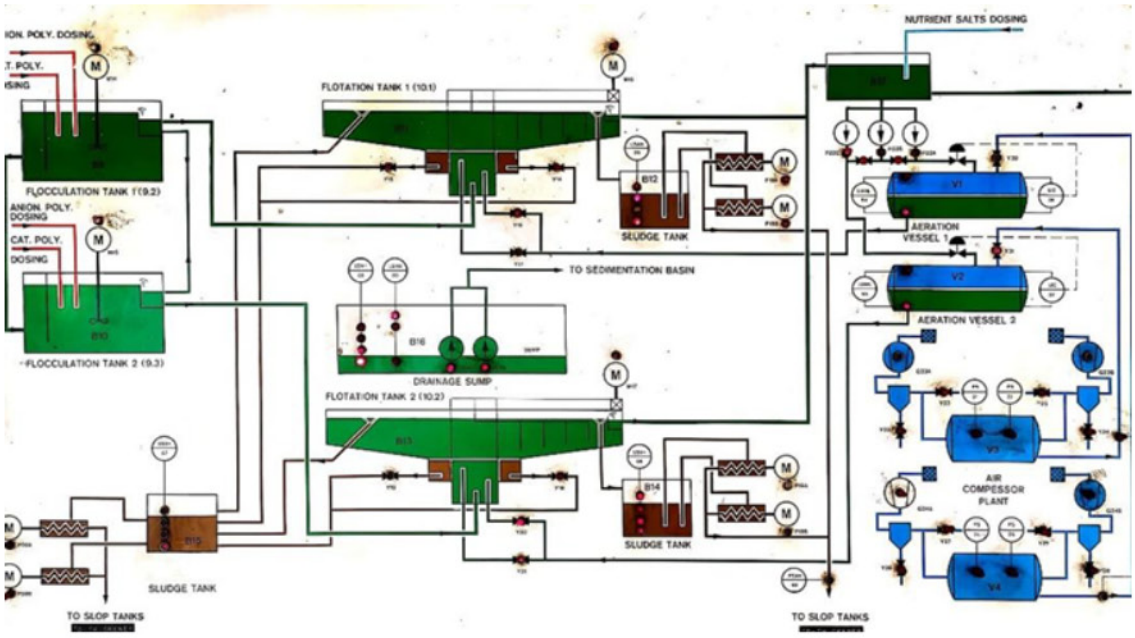
الشكل رقم (3): التيار المائي الناتج من الوحدات الرئيسية في مصفاة حمص

الشكل رقم (4): مدخل محطة المعالجة

الشكل رقم (5): حوض الفصل API

2- مرحلة المعالجة الكيميائية Chemical Treatment:

يبين الشـــكل رقم -6- المخطط التكنولوجي لعملية المعالجة الكيميائية للمياه الناتجة من مصـــفاة حمص.



الشكل رقم (6) المخطط التكنولوجي لمرحلة المعالجة الكيميائية

لا يمكن فصل الزيوت المستحلبة فيزيائياً، لذلك لا بد من اللجوء إلى طرق المعالجة الكيميائية و التي تسمح بإزالة حالة الاستحلاب والاستقرار الناشئة بين قطرات الزيت والوسط المائي المحيط بها، حيث تُعالج المياه الخارجة من أحواض API بإضافة بعض المواد المخثرة مثل كبريتات الحديدي باعتبارها أقل تكلفة من المواد المخثرة الأخرى، ولأنها في الحقيقة تقوم بوظيفتين هما: تشكل (بعد أكسدة شاردة Fe^{+2} إلى Fe^{+3} بواسطة الأكسجين المنحل) مركب هيدروكسيدالحديد ذي القوام و السطح الهلامي الذي يتمتع بقدرة امتزازية تساعد على امتزاز قطرات الزيت المستحلبة على سطحها و ذلك بمساعدة الهواء المنحل.

إن إضافة كبريتات الحديدي تساعد في التخلص من غاز H_2S المنحل والمركبتانات التي قد ترد مع المياه الزيتية ذات الأضرار البالغة على عمل المعالجة البيولوجية اللاحقة حيث أن وجود شاردة Fe^{+2} يشكل مع H_2S راسباً أسوداً وهو عبارة عن FeS.

بعد تشكيل المادة المازة الأولية $Fe(OH)_3$ يتم إضافة إحدى المركبات البوليميرية ذات الأوزان الجزيئية العالية و التي تحمل على سطحها شحنة كهربائية موجبة، تقوم بتجميع جزيئات هيدروكسيد الحديد على سطحها مشكلة بذلك أحجاماً و سطوحاً واسعة قادرة على العوم بمساعدة

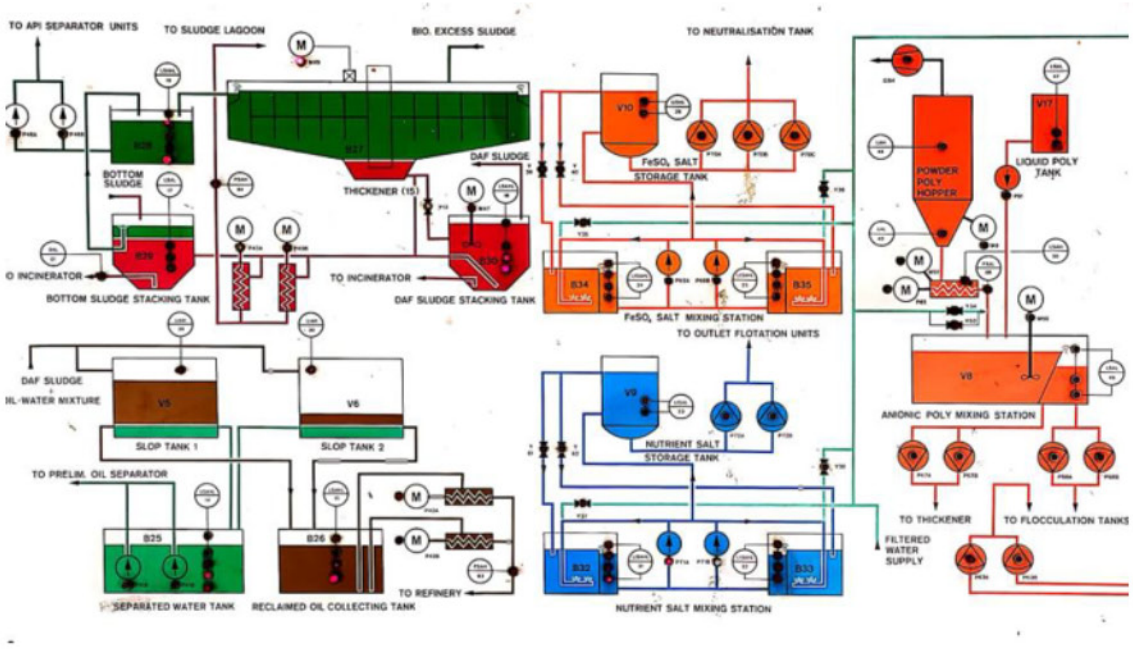
الهواء المنحل الذي سيحقن لاحقا . تستكمل مرحلة المعالجة الكيميائية بما يسمى بمرحلة التعويم (**Flotation**) و هي مرحلة هامة للغاية و حاسمة جداً في تحسين المواصفات النهائية للمياه المعالجة و يرمز لها اختصاراً بـ(Dissolved Air Flotation (DAF التعويم بالهواء المنحل. يعتمد مبدأ هذه الطريقة على تغيير كثافة المواد الصلبة المشكلة بإضافة المواد الكيميائية السابقة عن طريق انضمام فقاعات الهواء المحقونة بواسطة شبكة خاصة في أسفل الحوض إلى سطوح تلك المعلقات و مساهمته في اتساع سطوحها النسبية و بالتالي الإقلال من كثافتها الأمر الذي سيسمح بتعويمها . أي أن ما يقصد بالتعويم في الحقيقة هو التيار الصاعد من المواد المازة التي ستسهم في امتزاز قطرات الزيت المستحلبة، و في نفس الوقت أيضاً التقاط المعلقات الطبيعية الصلبة و تجميعها على سطح أحواض التعويم ، لتؤخذ بعد ذلك بواسطة كاشط خاص و تجمع في حفرة خاصة كحمأة تدعى بحمأة التعويم. ويبين الشكل رقم -7- حوض التعويم.

الشكل رقم (7): حوض التعويم

3- مرحلة المعالجة البيولوجية:

تدخل المياه الخارجة من مرحلة التعويم إلى أحواض المعالجة البيولوجية المزودة بخلاطات ميكانيكية تقوم بتأمين التهوية لهذه الأحواض و تزويدها بالأكسجين اللازم لعمليات الأكسدة،

حيث تعد هذه الطريقة من أكثر الطرق شيوعاً و نجاحاً في تحويل المواد العضوية سواءً أكانت منحلة أم ذات أحجام دقيقة استحال فصلها بالمراحل السابقة إلى مواد غير منحلة، و ذلك من خلال أكسدتها بفعل الأحياء الدقيقة (البكتريا التي تقوم بتحويلها إلى ثاني أكسيد الكربون و إلى أحياء دقيقة جديدة تدعى بالحمأة البكتيرية القابلة للتوضع في أسفل أحواض الترقيد الملحقة بالمفاعلات البيولوجية). يبين الشكل رقم -8- المخطط التكنولوجي لمرحلة المعالجة البيولوجية، أما الشكل رقم -9- يمثل حوض المعالجة البيولوجية.



الشكل رقم (8) المخطط التكنولوجي لمرحلة المعالجة البيولوجية

الشكل رقم (9) حوض المعالجة البيولوجية

إن العديد من الأحياء الدقيقة يمكن أن تتغذى على المواد العضوية المنحلة أو المعلقة وتفككها شريطة المحافظة على شروط حياتها المناسبة و بصورة خاصة احتياجاتها من الأكسجين.

يقاس محتوى المياه من المواد العضوية القابلة للتفكك بالبكتريا بما ندعوه الأكسجين المستهلك بيولوجياً Biochemical Oxygen Demand (BOD)، وتمثل هذه المواصفة كمية الأكسجين الذي تستهلكه البكتريا لتمثيل هذه المواد العضوية و يمكن تسميتها بالحمل العضوي للحوض البيولوجي، فعندما يكون هذا الحمل منخفضاً نسبياً و في حال توفرت مساحات كافية من الأرض، تصمم في هذه الحالة الأحواض البيولوجية على نظام الأحواض أو الحفر المفتوحة حيث تؤمن البكتريا فيها حاجتها من الأكسجين مباشرةً من الهواء الجوي.

أما إذا كان الحمل العضوي مرتفعاً فلا بد في هذه الحالة من إمداد تلك الأحواض بالأكسجين بالوسائل الميكانيكية التي تقوم بشكل دوري بتأمين التهوية المطلوبة لكامل الحوض. يبين الشكل رقم -10- حوض الترسيب والشكل رقم -11- مخرج المياه الناتجة عن محطة المعالجة والشكل رقم -12- لقطة جوية لمحطة المعالجة في مصفاة حمص.

الشكل رقم (10): حوض الترسيب

الشكل رقم (11): مخرج المياه الناتجة عن محطة المعالجة إلى نهر العاصي

الشكل رقم (12): لقطة جوية لمحطة معالجة المياه الملوثة في مصفاة حمص

٤- المعالجة الفيزيوكيميائية لمياه صرف مصفاة حمص الناتجة بعد أحواض فصل الزيوت وفق الخطة المقترحة بالتخثير الكهربائي [3, 4, 5]:

تعد طريقة التخثير الكهربائي إحدى الطرائق الكهرو كيميائية المهمة لمعالجة مياه صـــرف مصافي النفط الملوثة بالمواد الزيتية المستحلبة، الجسيمات الغروية، الجسيمات المعلقة، الشوارد اللاعضوية (كالفوسفات، السيانيد، الكرومات)، المعادن الثقيلة والمواد المسببة لعكارة المياه، كما يمكن أن يستفاد منها في التخلص من الملوثات العضوية.

تعتبر تقانة التخثير الكهربائي خياراً اقتصـــادياً وبيئياً بارزاً لموافقة المياه المعالجة بهذه الطريقة للمعايير القياسية العالمية.

٤-١- وصف عملية التخثير الكهربائي:

هي تقنية كهرو كيميائية معقدة تتضـــمن العديد من الظواهر الفيزيائية والكيميائية الناتجة عن استخدام مربطين قابلين للاستنفاد لتزويد المياه العادمة بالشوارد.

تنتج المواد المتخثرة عن تقنية التخثير الكهربائي بعملية تتضمن ثلاث مراحل متتابعة:

- تشكيل المخثر بواسطة الأكسدة الكهربائية للمصعد الذواب.
- كسـر قوى الاسـتحلاب وإزالة اسـتقرار الملوثات خصـوصـاً المعلقة منها، وذلك بتعديل شـحنتها السـالبة بواسـطة الشـوارد الناتجة عن الانحلال الكهرو كيميائي للمصـعد الذواب، التي تخفض من التنافر الكهربائي بين الجزيئين السـاكنين حتى يسمح بنشوء قوى تجاذب فاندرفالس (Van der Waals) بين الدقائق.
- تكتل الأطوار غير المستقرة لتشكيل التكتلات والندف.

يؤدي الكمون المطبق بين المسريين إلى حدوث تفاعلين منفصلين على معدن المصعد:

١. انحلال الألمنيوم أو الحديد لتوليد الشـوارد المعدنية الموافقة والتي تتحلمه بسـرعة بتفاعلات تلقائية لإنتاج الهيدروكسـيدات أو بولي الهيدروكسـيدات الموافقة التي تعتبر عوامل مخثرة ممتازة.

٢. تحلل المياه كهربائياً بتفاعل موازٍ منتجاً فقاعات صغيرة من غاز الأكسجين عند المصعد وأخرى من غاز الهيدروجين عند المهبط، تلتصق هذه الفقاعات بالندف لتطفو بها إلى السطح.

٤-٢- التفاعلات الجارية على الأقطاب:

$$Al_s \rightarrow Al^{+3} + 3e$$

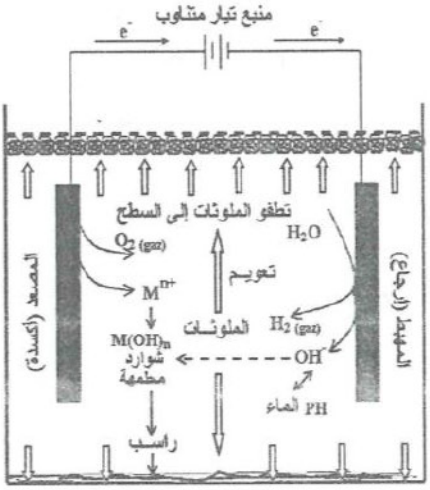
$$2\ H_2O_l \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e$$

$$Al^{+3} + 3e \rightarrow Al_s$$

$$2\ H_2O_l + 2\ e \rightarrow H_{2g} + 2\ OH^-$$

تســـاهم الشـــوارد المعدنية المنحلة في الماء (Al^{+3}/Fe^{+3}) الناتجة عن الأكســـدة الكهربائية للمصـــعد في تعديل الشـــحنات الســـطحية الســـالبة للدقائق الملوثة. تعد هيدروكســـيدات و بولي هيدروكسيدات المعدنية سطوح امتزاز فعّالة، تمتز على سطحها الملوثات الموجودة في المحلول. تلتصـــق فقاعات الأكســـجين والهيدروجين المتولدة عند المصـــعد والمهبط بالملوثات المتندفة، الدقائق المعلقة، الجسيمات الغروية والهيدروكربونات، وتحملها إلى سطح المحلول بعملية تدعى التعويم الكهربائي (Electroflotation).

يلعب الأكسجين المتولد عند المصعد دور مؤكسد يشجع انقسام الجزيئات العضوية ليسمح بإجراء معالجة بيولوجية لاحقة. يبين الشكل رقم 13، الظواهر الجارية أثناء التخثير الكهربائي.



الشكل رقم (13) الظواهر الجارية أثناء عملية التخثير الكهربائي

٤-٤- العوامل المؤثرة في عملية التخثير الكهربائي:

١- تأثير مادة المرابط:

يمكن أن يصـــنع المصـــعد الذواب والمهبط من نفس المادة أو من مادتين مختلفتين، ويعتبر الألمنيوم والحديد من أكثر المواد المستخدمة لتصنيع المصعد الذواب.

لا يكون اســـتخدام مربطين فقط، في أحيانٍ كثيرةٍ، مجدياً في معالجة مياه صـــرف المصـــافي النفطية نظرًا لمعدل انحلال المعدن الكبير، فيمكن اســـتخدام عدة مرابط أحادية أو ثنائية القطب موصولة على التسلسل أو على التفرع.

٢- تأثير المسافة بين المرابط:

تنقص فعالية المعالجة في التخثير الكهربائي بازدياد المسافة الفاصلة بين المصعد والمهبط، بينما ينخفض معدل استهلاك الطاقة الكهربائية بازدياد هذه المسافة.

٣- تأثير كثافة التيار الكهربائي:

من المعلوم أن التيار الكهربائي لا يحدد فقط معدل كمية المخثر المتولد، بل معدل إنتاج الفقاعات وحجمها، ومقدار نمو الندف أيضاً، فهو يؤثر بشدة في فعالية عملية التخثير الكهربائي.

يمكن أن يكون ارتفاع فعالية المعالجة بزيادة كثافة التيار الكهربائي عائداً إلى ازدياد كمية الألمنيوم أو الحديد المتأكسدة كهربائياً عند تطبيق تيار مرتفع، مؤدية لنسبة ترسيب أكبر تزيل معها مقداراً أكثر من الملوثات.

٤- تأثير ناقلية المياه:

وُجد أن لتغير الناقلية بتغير كمية كلوريد الصوديوم المضافة، تأثير قليل على فعالية المعالجة مهما كان تركيز الملح الموجود أصلاً في مياه صرف المصافي النفطية. يتناسب كمون التحليل الكهربائي ومعدل الطاقة المستهلكة خلاله عكساً مع الناقلية، فإذا ازدادت الناقلية سيتناقص الكمون بين المربطين بسرعة مع الحفاظ على نفس حمولة الشحنة في المحلول، مما يؤدي إلى خفض متطلبات الطاقة. إذاً حتى لو لم تساعد إضافة الملح إلى مياه صرف المصافي النفطية على زيادة فعالية إزالة الملوثات، فهي ستؤدي لتخفيض متطلبات الطاقة بشكل كبير، إضافة إلى الدور الذي يلعبه الملح في انضغاط الطبقة المضاعفة للشوارد في المحلول.

٥- تأثير الـ PH الابتدائي للمحلول:

يؤثر pH البدء تأثيراً كبيراً في فعالية التخثير الكهربائي، حيث تكون فعالية المعالجة قليلة جداً في (pH<2) و (pH>10) بسبب الخواص المذبذبة لهيدروكسيد الألمنيوم، فهو لا يرسب في الوسط الحمضي القوي وتبقى شوارد الألمنيوم في المحلول، بينما ينحل في الوسط القلوي القوي ليتشكل AlO_2^-.

٦- تأثير درجة الحرارة:

تزداد سـرعة التفاعلات الكهرو كيميائية، بازدياد درجة حرارة المحلول، وينتج عن ذلك زيادة فعالية المعالجة أيضـا ولكن حتى درجة حرارة معينة تبدأ بعدها الفعالية بالتناقص تدريجياً، نظراً للازدياد الكبير بحركة الشوارد الناتجة في المحلول مما يقلل فرص تكتلها وتشكيلها للندف.

٧- تأثير تركيز الملوثات الابتدائي:

يختلف هذا التأثير باختلاف نوعية الملوث، فيلاحظ انخفاض فعالية معالجة مياه صـرف المصـافي النفطية المحملة بتراكيز عالية من الزيوت والشـحوم إذ لايؤثر تركيز المواد العضـوية في خفض فعالية المعالجة بالتخثير الكهربائي مهما كان مرتفعاً.

٨- تأثير زمن التخثير الكهربائي:

يمكن أن يقسـم زمن التخثير الكهربائي إلى زمنين رئيسـيين، زمن التحليل الكهربائي وزمن التكتل. يؤثر زمن التكتل بفعالية المعالجة أكثر من زمن التحليل الكهربائي.

زمن التحليل الكهربائي:(Electrolysis time)

تزداد الفعالية خلال التحليل الكهربائي لأنها تتعلق مباشرةً بتركيز الشوارد الموجبة المتحررة عن أكسدة المصعد التي تعدل شحنة الدقائق وتساعد على التخثر، فيزداد تركيز هذه الشوارد في المحلول بزيادة فترة التحليل الكهربائي.

زمن التكتل وتشكل الندف:(Floculation time)

يؤثر زمن التكتل بشـدة في فعالية المعالجة بالتخثير الكهربائي بعد انتهاء عملية التحليل الكهربائي، فيؤدي المزج البطيء لمكونات المحلول لإعطاء فرصـة أكبر لاقتراب المخثر من الدقائق في المحلول وبالتالي تزيد فرصة تشكل الندف بازدياد زمن التكتل.

٤-٥- خيار عملية التخثير المتبعة (كيميائية / كهربائية):

تشـابه آلية التخثير الكهربائي مثيلتها في التخثير الكيميائي من حيث أن الكاتيونات هي المسؤولة عن تعديل الشـحنات السـطحية، ولكن تختلف صـفات الندف المتشـكلة، فتتميز الندف الكيميائية بحجمها الكبير ومحتواها الغني بالماء المرتبط مما يؤدي لصعوبة تخليصها منه، بعكس

ندف التخثير الكهربائي التي تكون أكثر جســاءةً وجاهزيةً للترشــيح وســهلة التخليص من الماء المرتبط لقلة محتواها منه.

يتميز التخثير الكهربائي بتجنب إضـــافة المواد الكيميائية مما ينفي احتمال تلوث ثانوي ناتج عن المواد الكيميائية المضــافة في التخثير الكيميائي. توفر الفقاعات الغازية المتولدة أثناء التخثير الكهربائي تعويم الملوثات والندف إلى سطح المحلول فيمكن جمعها وإزالتها بطريقة أسهل.

ويتميز التخثير الكهربائي بإزالة الدقائق شـــديدة الصـــغر، وبإنتاجه بعد المعالجة تياراً ذي محتوى أقل من المواد الصـــلبة المنحلة (TDS) بالمقارنة مع التخثير الكيميائي، بالإضـــافة إلى بســاطة التجهيزات المســتخدمة و ســهولة تشــغيلها والكلفة المعقولة الناتجة عن الطاقة الكهربائية اللازمة (تدرس الآن إمكانية استخدام ألواح للاستفادة من الطاقة الشمسية) واستبدال المرابط.

٤-٦- تطبيقات عملية التخثير الكهربائي:

- إزالة المعادن الثقيلة، النظائر المشـعة، الدقائق المعلقة والجسـيمات الغروية من مياه صرف المصافي النفطية.
- إزالة السيليكا في المياه، القساوة، المواد الصلبة المعلقة الكلية TSS.
- كسر قوى استحلاب المواد الزيتية، الدسمة، الدهنية والمواد العضـوية وإزالتها من مياه صرف المصافي النفطية.
- يســـتخدم في عدة صـــناعات منها إنتاج وتكرير النفط، التعدين، الأغذية، الأدوية، الورق، مواد التجميل، البطاريات والصناعات الكيميائية الأخرى.

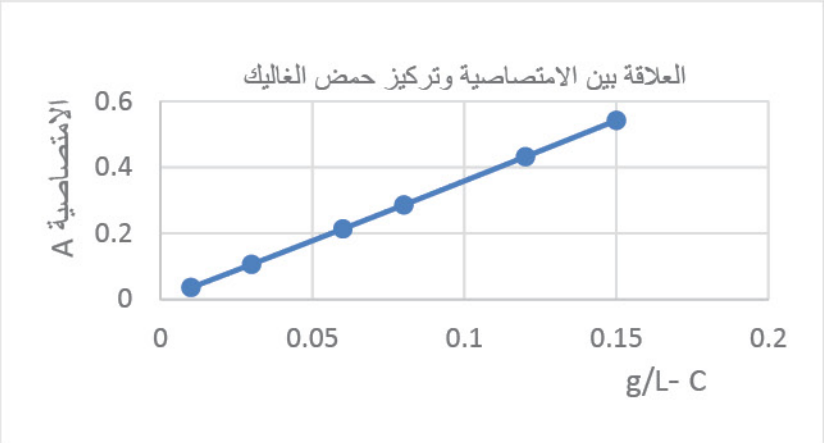
٥- الإجراء التجريبي:

٥-١- الأجهزة المستخدمة:

حاضنة قياس COD، جهاز التحليل الضوئي المرئي فوق البنفسجي سبكتروفوتومتر (Dr-5000)، حاضنة قياس BOD، جهاز PH، كاشف الفوسفات، كاشف النترات وكواشف الفينولات.

٥-٢- البارامترات المقاسة:

تم تحليل العديد من البارامترات على كل عينة من العينات المأخوذة مثل(PH، النترات، زيوت وشحوم، COD، BOD ، TDS، الفينولات). تم تقدير COD بطريقة الكرومات، وقدرت الفينولات باستخدام كاشف فولين سيو كالتيو، على أساس حمض الغاليك عند طول موجة 760 nm. يبين الشكل رقم-14- العلاقة بين التراكيز المتزايدة لحمض الغاليك والامتصاصية.



الشكل رقم -14- المنحني المعياري لحمض الغاليك

٥-٣- العينات المأخوذة من محطة معالجة المياه في مصفاة حمص:

تم أخذ ثلاث عينات للتحليل من محطة معالجة مياه صرف مصفاة حمص، الأولى من التيار الداخل لمحطة المعالجة للتعرف على مواصفات المياه الداخلة للمحطة، ومقارنتها بمواصفات المياه الناتجة بعد المعالجة لتحديد كفاءة المعالجة، والعينة الثانية من التيار الناتج عن أحواض فصل الزيوت (API) وهي العينة الأساسية التي ستتم عليها خطة المعالجة المقترحة، والعينة الثالثة من التيار الناتج من مخرج محطة المعالجة، وذلك لمقارنة نتائج المعالجة بالطريقة المطبقة في البحث مع نتيجة المعالجة التقليدية المطبقة في محطة المعالجة في المصفاة.

تم إجراء التحاليل اللازمة على العينة المائية المأخوذة من مدخل محطة المعالجة للتعرف على خصائصها وحساب كفاءة المعالجة النهائية، ونتائج التحليل موضحة في الجدول رقم -١-، كذلك تم تحليل العينة المائية المأخوذة بعد أحواض فصل الزيوت (كون هذه الخطوة مهمة جداً كخطوة معالجة مسبقة فيزيائية)، مهما كانت الطريقة المتبعة للمعالجة لاحقاً، بسبب التركيز العالي جدا للزيوت والشحوم في هذا النوع من المياه. وطبقت على هذه المياه خطوة المعالجة الفيزيوكيميائية المقترحة وهي التخثير الكهربائي باستخدام أقطاب من الألمنيوم.

وتبين الجداول رقم (1) و(2) نتائج تحليل العينات.

الجدول رقم (1) نتائج تحليل العينة المأخوذة من التيار الداخل لمحطة المعالجة

المؤشر	التركيز	واحدة القياس
PH	8.9	-
NO_3^-	90	ppm
Oil and greases	2300	ppm
COD	650	ppm
BOD	250	ppm
TDS	2400	ppm
Phenols	16	ppm
PO_4^{---}	79	ppm

الجدول رقم (2) نتائج تحليل العينة المأخوذة من التيار الناتج عن أحواض فصل الزيوت.

المؤشر	التركيز	الواحدة	نسبة التخفيض %
PH	8.1	-	8.9
NO_3^-	75	ppm	16.66
Oil and greases	700	ppm	69.56
COD	530	ppm	18.4
BOD	260	ppm	-----
TDS	2200	ppm	8.3
Phenols	15.4	ppm	3.75
PO_4^{---}	60	ppm	24

الجدول رقم (3) نتائج تحليل العينة المأخوذة من مخرج محطة المعالجة، مقارنة مع المواصفات القياسية العالمية للمياه المسموح بطرحها في المصبات المائية، وحساب كفاءة المعالجة مقارنة مع العينة الداخلة للمحطة.

المؤشر	التركيز	الواحدة	التخفيض %	التركيز حسب المواصفة القياسية العالمية /السورية
PH	7.8	-	3.7	6.5-8.5/6-9
NO_3^-	30	ppm	60	25/50
Oil and greases	30	ppm	98.7	10/10
COD	190	ppm	70.77	20/150
BOD	105	ppm	58	10/40
TDS	2700	ppm	-22.7	1000/1200
Phenols	8.9	ppm	44.4	0.05/0.02
PO_4^{---}	40	ppm	49.4	7/15

بمقارنة نتائج التحاليل التي حصلنا عليها للعينة الناتجة من مخرج محطة المعالجة، مع المواصفات القياسية العالمية والسورية للمياه الناتجة من محطة المعالجة، والمسموح بصرفها في المصبات المائية لُوحظ ما يلي:

المياه المصروفة إلى نهر العاصي لاتحقق الشروط المطلوبة حتى تكون صالحة للصرف في الأنهار، حيث أن معظم المؤشرات المحللة ذات قيم أعلى بكثير من القيم المسموح بها، باستثناء PH ضمن الحدود المسموحة، ولذلك تم التقصي عن جدوى استخدام طريقة أخرى لمعالجة هذه المياه تسمح بجعل هذه المؤشرات ضمن الحدود المسموح بصرفها في الأنهار أو استخدامها للري أو للصرف في الأرض [10].

٥-٤ طرق المعالجة المطبقة على مياه صرف المصفاة الناتجة من أحواض فصل الزيوت:

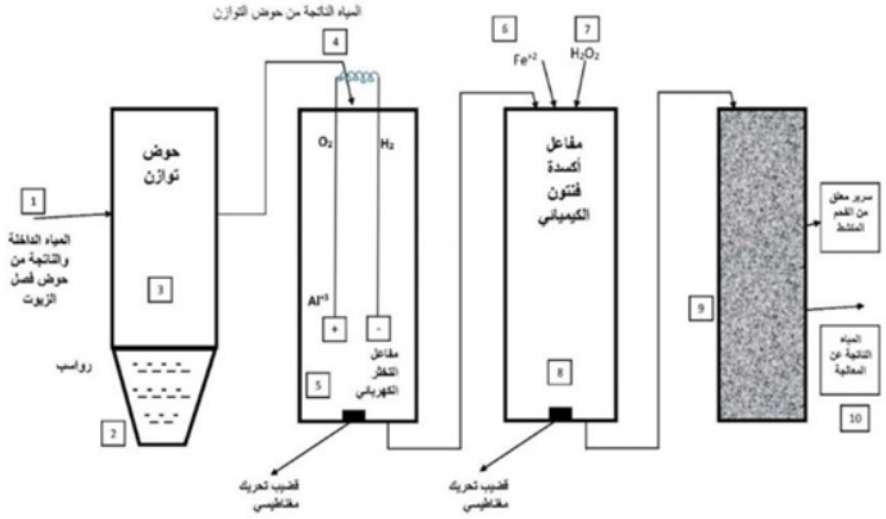
تضمنت المعالجة المقترحة ثلاث مراحل [1,9]:

١- معالجة فيزيوكيميائية باستخدام تقنية التخثير الكهربائي Electrocoagulation.

٢- معالجة متقدمة بطرق Advanced Oxidation Processes (AOPs) والطريقة المختارة هي طريقة تفاعل فنتون الكيميائي الذي يتضمن الأكسدة بالماء الأوكسجيني وبوجود حفاز من شوارد الحديدي Fe^{+2} .

٣- الامتزاز على الفحم المنشط التجاري انتاج شركة MERK.

ويبين الشكل رقم (15) المخطط التكنولوجي لعملية المعالجة المقترحة.



الشكل رقم (15) المخطط التكنولوجي لعملية المعالجة

٥-٤-١-المعالجة بطريقة التخثير الكهربائي[4,5]:

مفاعل التخثير الكهربائي المستخدم هو عبارة عن خلية تحليل كهروكيميائي زجاجية كما يبين الشكل رقم (16) أبعادها 10×10×25 Cm والأقطاب المستخدمة هي صفائح من الألمنيوم أبعادها 4×2×0.08 Cm، تم غمرها بالماء بشكل كامل طيلة فترة التجربة، وتم تحديد التركيب العنصري للصفائح باستخدام جهاز Spectro meter فكان:

(Al=98.2 %, Mg=0.4 %, Fe=0.7 %, Mn=0.4 %, Cu=0.1 %, Si=0.18 %)

تم تمرير تيار كهربائي مستمر DC بين القطبين بوساطة محولة تيار كهربائي مستمر وكانت شدة التيار المار I= 0.94 A. وفرق الكمون بين القطبين عند هذه الشدة للتيار (U= 12.1 V) عند مسافة بين القطبين قدرها D=2cm، تم اختيارها بحيث نحصل على أخفض كمون مطبق ممكن، والسطح الكلي للقطب $S=16\ cm^2$.

الشكل رقم (16): مفاعل التخثير الكهربائي EC المستخدم في البحث

الشكل رقم (17) محولة التيار الكهربائي المستمر المستخدمة

حسبت كثافة التيار المار بين القطبين من العلاقة:

$$i= I/S = 940/16 = 58.75 \text{ mA/cm}^2$$

حساب الاستهلاك النوعي للطاقة الكهربائية W_{SP}:

$$W_{SP}= Q\times U=q/V \times U = (I \times t)/V \times U$$

حيث:

Q : كمية الكهرباء المستهلكة (Ah/L)

I : شدة التيار المار بين القطبين (A)

q: كمية الكهرباء (Ah)

t: زمن التخثير الكهربائي (h)

U : فرق الكمون المطبق بين القطبين (Volt)

V: حجم العينة المعالجة (m^3)

$$W_{sp}=(0.94 \times 10^{(-3)} \times 30/60 \times 12.1)/(1 \times 10^{(-3)}) = 5.687\ kwh/m^3$$

$$W_{sp}/COD_{removed}= 5.687/((530 - 322) \times 10^{(-3)}) = 27.3\ kwh/kgCODremoved$$

يتضح من الحساب أن الاستهلاك النوعي للطاقة منخفض نسبياً، وبالتالي العملية اقتصادية وغير مُكلفة، وكفاءة المعالجة بهذه الطريقة جيدة.

ترافقت العملية مع ارتفاع بسيط في درجة حرارة المياه المعالجة بسبب تمرير التيار الكهربائي وتشكل فرق في الكمون بين القطبين، مما أدى إلى زيادة حركة الشوارد المتشكلة في الوسط المائي المعالج وزيادة عدد التصادمات فيما بينها وبين الملوثات، وبالتالي رفع درجة حرارة المياه، وكذلك امتزاز الملوثات العضوية والشوارد اللاعضوية على سطوح الندف المتشكلة نتيجة تحلل معدن القطب، وتم الحصول على نوعين من الحمأة:

لقد أدى التحلل الكهربائي للمياه المعالجة إلى تحرر غازات H_2, O_2 على كل من القطبين الموجب والسالب على الترتيب، وهذه الغازات تلعب دوراً مهماً في تعويم بعض الملوثات العضوية الخفيفة فترتفع إلى الأعلى محمولة بتيار الغازات على شكل رغوة يتم كشطها بسهولة بواسطة كاشطات ميكانيكية، وتدعى (حمأة طافية).

حساب الاستهلاك النوعي للقطب نظرياً وفقاً لقانون فارادي:

$m_{Al(th)}=(MAl \times I \times t \times 3600)/(Z \times F)$ واحدته (Kg/m^3)

حيث: M - الوزن الجزيي للالمنيوم (27)، I: شدة التيار A، t: زمن المعالجة h، Z: رقم الشحنة للالمنيوم، F: ثابت فارادي 96485.3

$m_{Al}=(27 \times 0.94 \times 10\text{^}(-3) \times 30/60 \times 3600)/(3 \times 96485.3 \times 10^{-3} = 0.157 \frac{kg}{m^3}$

حساب الاستهلاك النوعي للقطب عملياً:

تم وزن الصفيحة الواحدة (المصعد) قبل التخثير وبعده وحسب فرق الوزن (Kg/m^3).

وزن الصفيحة قبل التخثير 1.4 gr، ووزن الصفيحة بعد التخثير 1.148 gr، وبالتالي الوزن المفقود بالتخثير 0.252 g/l وهذا الوزن يعادل 18 % من وزن الصفيحة الواحدة الموصولة عند القطب الموجب، علماً أن الصفيحة الموصولة عند القطب السالب (المهبط) تآكلت ولكن بنسبة ضئيلة جداً لاتتجاوز 1%. لوحظ أن الاستهلاك العملي للقطب أكبر من الاستهلاك النظري وذلك لأسباب عديدة منها:

1- الكمون بين القطبين أدى إلى ارتفاع درجة حرارة المياه المعالجة، وبالتالي زيادة التآكل.

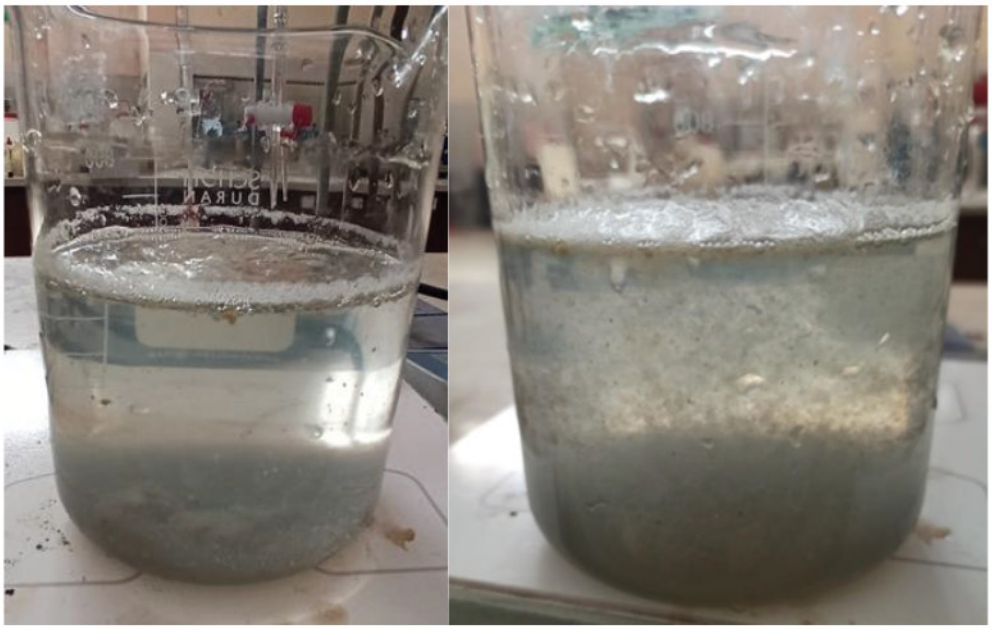
2- وجود شوائب في معدن الصفيحة نفسها.

يبين الجدول رقم (4) نتائج تحليل المياه الناتجة عن مرحلة التخثير الكهربائي لمياه صرف مصفاة حمص الناتجة من أحواض فصل الزيوت.

الجدول رقم (4) نتائج تحليل المياه الناتجة عن مرحلة التخثير الكهربائي

المؤشر	التركيز	الواحدة	كفاءة المعالجة %
PH	8.3	-	-
NO_3^-	30	ppm	60
Oil and greases	54	ppm	92
COD	322	ppm	39.24
BOD	188	ppm	27.70
TDS	2000	ppm	9.09
Phenols	9.1	ppm	40.9
PO_4^{-3}	35	ppm	41.7

يبين الشكل رقم (18) العينة المائية المخثرة كهربائياً بعد فصل الحمأة الطافية، لُوحظ ترسيب سريع جداً للندف المتشكلة في الوسط المائي خلال زمن قصير جداً 3-4 min، وتم الحصول على مياه رائقة خالية من الصلب المعلق.



الشكل رقم -18- المياه الناتجة عن التخثير الكهربائي والترقيد بالجاذبية

٥-٤-٢- الأكسدة بالماء الأوكسجيني وبوجود شوارد الحديدي (تفاعل فنتون): [1,2, 4]

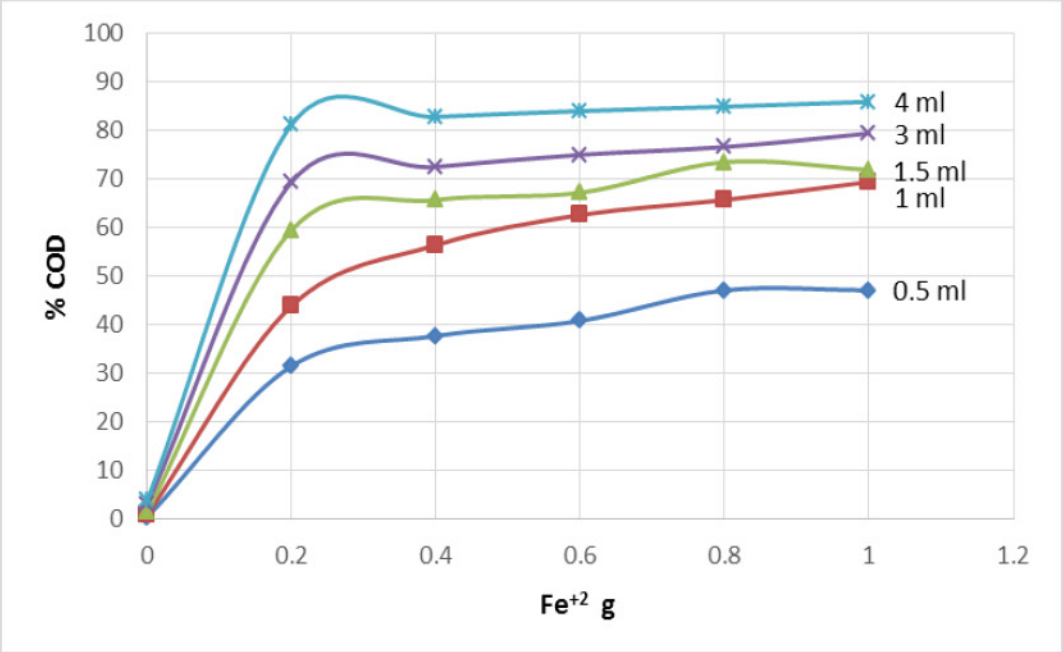
طبِق تفاعل فنتون (طريقة الأكسدة بالماء الأوكسجيني بوجود شوارد الحديديFe^{+2}، على مياه صرف مصفاة حمص الناتجة من أحواض فصل الزيوت، والمعالجة مسبقاً بالتخثير الكهربائي. أضيفت حجوم متزايدة من الماء الأوكسجيني ذو التركيز % 25 .

تم تعديل قيمة PH المياه إلى القيمة PH=4 تقريباً باستخدام محلول ممدد من حمض كلور الماء، وهذه القيمة المثلى لإجراء تفاعل فنتون مع المحافظة عليها طيلة مدة التفاعل (60 min).

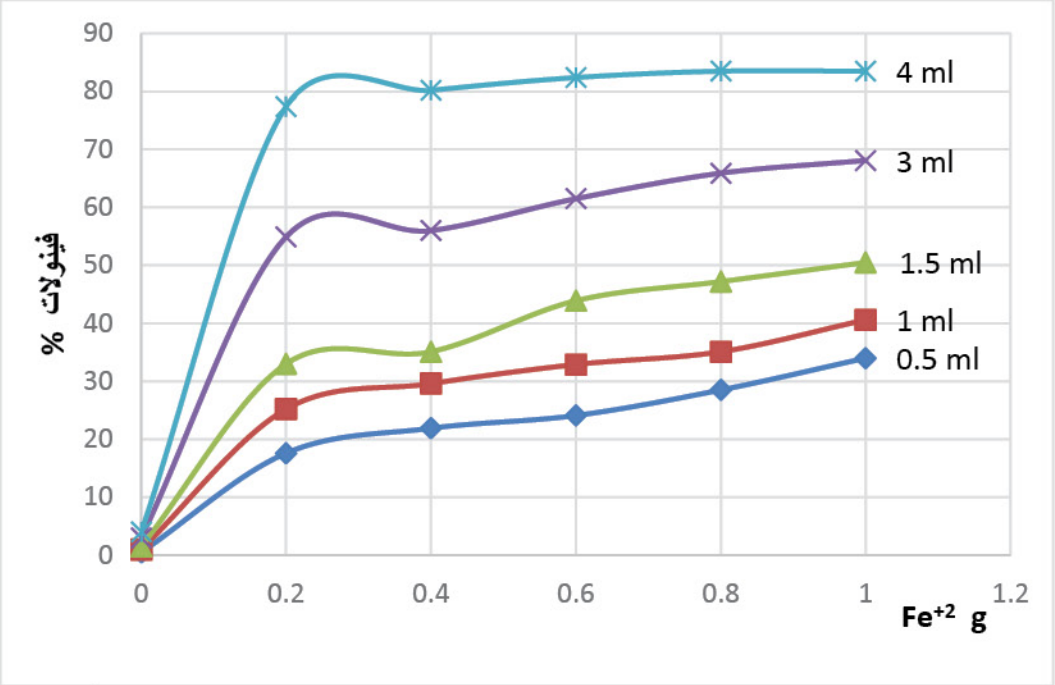
أجري تفاعل فنتون في كل مرة على عينة مائية حجمها 100 ml، وباستخدام حجوم متزايدة من الماء الأوكسجيني تراوحت في المجال: (0.5,1, 1.5, 3, 4 ml) بوجود ملح كبريتات الحديدي بجرعات g (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1)، وتمت مراقبة تغير تراكيز كل من COD والفينولات، وهما المؤشران الأكثر أهمية بين المؤشرات المحللة. توضح الأشكال التالية رقم -19- و -20- منحنيات تغير النسبة المئوية لتخفيض COD و الفينولات بتغير حجوم الماء الأكسجيني المضاف وتغير جرعة ملح الحديدي.

تم الحصول على أكبر تخفيض COD عند أعلى تركيز للماء الأكسجيني 10 g/L، وأخفض تركيز لملح الحديدي وكانت النسبة % 81.3، ولم ترتفع النسبة عند أعلى تركيز لملح الحديدي سوى % 5 تقريبا، لذلك يمكن القول أن 2 g/L من ملح الحديدي هو أفضل تركيز.

تم الحصول على أكبر تخفيض للفينولات % 77.4عند تركيز H_2O_2 10 g/L، 2 g/L ملح الحديدي، ولم ترتفع النسبة سوى % 6 تقريباً عند أكبر جرعة فأصبحت % 83.5، لذلك يمكن القول أن التراكيز المثلى للماء الأكسجيني والحديدي هي التراكيز الأخفض، وهذا يجعل العملية اقتصادية. الحسابات منسوبة إلى قيمة COD =322 ppm وفينولات 9.1 ppm .



الشكل رقم (19) تغير % COD مع تغير جرعة ملح الحديدي عند حجوم ثابتة للماء الأكسجيني.



الشكل (20) تخفيض Phenols % بتغير جرعة ملح الحديدي عند حجوم ثابتة للماء الأكسجيني.

لوحظ أن نسبة تخفيض الفينولات شبه ثابتة عند ثبات تركيز الماء الأكسجيني وتزايد تركيز ملح الحديدي، ولذلك الجرعة الأفضل هي أقل جرعة ممكنة (0.2 g)، ولا جدوى من إضافة جرعات كبيرة. بالمقابل فإن نسبة تخفيض الفينولات تزايدت بشكل كبير عند تراكيز متزايدة للماء الأوكسجيني، مع تثبيت تركيز شوارد الحديدي، ووصلت أعلى ما يمكن عند أعلى تركيز H_2O_2.

٥-٤-٣ الامتزاز على الفحم المنشط[8]:

أُجريت تجربة واحدة فقط للامتزاز على الفحم المنشط على العينة المعالجة عند الشروط المثلى التي تم استنتاجها من المنحنيات المرسومة، وهي (H_2O_2=4 ml, 0.2 g $FeSO_4$) وذلك باستخدام (1 g/l) من بودرة الفحم المنشط الموضح في الشكل (21).

الشكل (21) مسحوق من الفحم المنشط

السطح النوعي للفحم المستخدم تم قياسه باستخدام جهاز Bet فكان (483 m^2/g)، استخدم على شكل سرير معلق مع اجراء التحريك المغناطيسي باستخدام قضيب تحريك مغناطيسي عند سرعة تحريك لم تتجاوز 500 rpm لمدة 60 min تم الحصول على تخفيض كبير في COD والفينولات.

يبين الجدول رقم (5) نتائج تحليل Phenols و COD لعينة مياه صرف مصفاة حمص الناتجة من أحواض فصل الزيوت، والمخثرة كهربائيا، والمعالجة بتفاعل فنتون، ثم الامتزاز على الفحم المنشط. الحسابات منسوبة إلى قيم COD 60 mg/L والفينولات 2.05 mg/L. وهي قيم تم الحصول عليها لدى معالجة العينة المخثرة كهربائيا عند أعلى تركيز للمؤكسد وأخفض تركيز لملح الحديدي.

الجدول رقم (5) نتائج تحليل العينات بعد الامتزاز على الفحم المنشط

المؤشر	التركيز	الواحدة	كفاءة المعالجة %
COD	15	ppm	75
Phenols	0.002	ppm	99.9

لوحظ انخفاض قيمة COD من 60 ppm إلى 15 ppm، وأيضاً انخفاض تركيز Phenols من 2.05 ppm إلى 0.002 ppm بعد الامتزاز على الفحم المنشط، وهذه القيم ضمن المجال المحدد لمواصفات مياه صرف المصافي النفطية القياسية العالمية والسورية المسموح بطرحها في المصبات المائية، ويمكن أيضاً استخدامها في ري المزروعات والأشجار) [6,10].

بحساب كفاءة تخفيض COD مقارنة مع قيمتها لمياه صرف المصفاة الناتجة من أحواض فصل الزيوت تصبح النسبة % 97.2 وللفينولات تصبح % 99.98 وهذه النسب واعدة جداً.

٦- النتائج :

- تبين أن زيادة الماء الأكسجيني عند جرعات ثابتة لملح الحديدي تعطي نتائج أفضل من زيادة ملح الحديدي عند جرعات ثابتة للماء الأكسجيني، سواء لتخفيض المواد العضوية أو الفينولات خاصة. وهذا طبيعي لأن التأثير المهم للمؤكسد.
- أظهرت نتائج تطبيق آلية التخثير الكهربائي ومن ثم تفاعل فنتون على المياه الملوثة، أن تراكيز (COD=45 ppm, Phenols=1.5 ppm) التي تم الحصول عليها عند أعلى جرعة للمؤكسد وأعلى جرعة لملح الحديدي، أنها ضمن الحدود المسموح بصرفها في الأنهار وذلك حسب المواصفة القياسية السورية، بالتالي يمكن الاستغناء عن مرحلة الامتزاز على الفحم المنشط.
- أظهرت نتائج الامتزاز على الفحم المنشط (في المرحلة الأخيرة من مراحل المعالجة) أن تراكيز(COD=15 ppm, Phenols= 0.002 ppm) ضمن الحدود المسموح بصرفها في الأنهار وذلك حسب المواصفات القياسية العالمية والسورية.
- بحساب نسب تخفيض COD, Phenols للعينات الداخلة إلى التخثير الكهربائي والناتجة بعد الامتزاز على الفحم المنشط، تبيّن أن نسبة تخفيض (COD=97.2 %) ونسبة تخفيض

(Phenols= 99.9 %) وهذه النتائج مهمة جداً وواعدة في حال تم تطبيق هذه التقنيات الحديثة للمعالجة على مياه صرف المصافي النفطية. الحسابات منسوبة إلى تحليل العينة قبل التخثير الكهربائي.

٧- الاستنتاجات والتوصيات:

- إجراء تحاليل دورية مكثفة على مياه صرف المصفاة، لقياس تركيز الملوثات الموجودة فيها قبل طرحها في نهر العاصي.
- المعالجة بتفاعل فنتون الكيميائي أو بإحدى الطرق الأخرى من طرق الأكسدة المتقدمة، للوصول بالملوثات في مياه صرف المصفاة إلى الحدود المسموح بها، قبل أن تطرح في نهر العاصي، نظراً لسميتها العالية وخطورتها على الحياة البيئية.
- الاستفادة من النتائج التي تم الوصول، لتصميم وحدة لمعالجة الفينولات ملحقة بمحطة معالجة مياه صرف مصفاة حمص، وذلك قبل صب المياه في نهر العاصي لتخفيض التراكيز العالية للفينولات والمواد العضوية الأخرى والمساهمة في الحفاظ على سلامة مياه نهر العاصي والكائنات الحية فيه.

المراجع الأجنبية:

1. Original article, (2016), Evaluation of the solar photo-Fenton process to treat the petroleum waste water by response surface methodology (RSM). volume 75 article number (333).
2. Dr. Dheeaa Aldeen Atallah, Puganeshwary, H.B,(2017) Degradation of total organic carbon (TOC) and chemical oxygen Demand (COD) in petroleum waste water by solar photo_Fenton process. Global Nest Journal.

3. D.Bhagawn, Saritha Poodari, Shankaraiah Golla,(2014) Treatment of the petroleum refinery waste water using combined electrochemical methods. Pages 3387-3394.
4. Ali Reza. Amur Shbanloo, Yousef Poureshgh (2015) Degradation of phenol in Aqueous solations using Electro_Fenton process.Research Journal of Environment Sciences volume 9, Pages 3387-3394.
5. Dhorgham Ibrahim, Mohan Lathalakshmi, (2013), An alternative treatment process for upgrade of petroleum refinery waste water using Electrocoagulation. Springer Link volume 10, Pages 421-430.
6. Saudi Aramco project Development waste water Treatment facilities Jeddah refinery and marine area, December 2007.

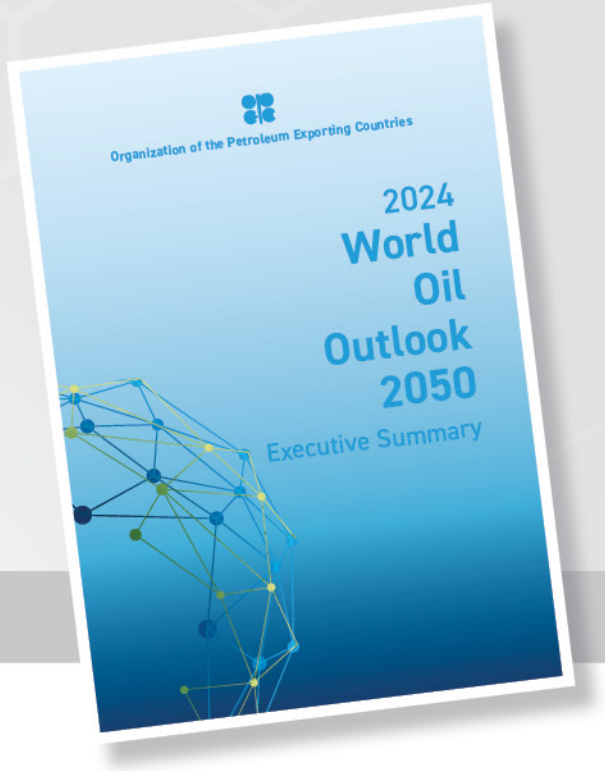
المراجع العربية

7 - م . رشيد الخولي، معالجة المياه الملوثة الحاوية على المشتقات النفطية، مجلة نقطة العلمية، 2009.

8 - د.م محمد وجيه عيسى، معالجة المياه، جامعة البعث_كلية الهندسة الكيميائية والبترولية 2014 .

9 - د.م. نوفا جمعة: معالجة مياه صرف معاصر الزيتون بعمليات أكسدة متقدمة، جامعة البعث، 2010 .

10- المواصفة القياسية السورية 2581 / 2112 لمياه الصرف الصناعي.



تقارير

ملخص تنفيذي لتقرير منظمة أوبك السنوي المعنون (World Oil Outlook 2050) (آفاق النفط العالمية 2050)

ترجمة: عبد الفتاح دندي *

* مدير الإدارة الإقتصادية والمشرف على إدارة الاعلام والمكتبة - منظمة أوابك.

يمكن إيجاز أهم مخرجات تقرير آفاق النفط العالمية (World Oil Outlook 2050) الصادر عن منظمة أوبك، والذي تم إطلاقه يوم 24 سبتمبر 2024 في البرازيل، على النحو التالي:

الأمن وتقليل الانبعاثات

تمتد فترة التوقعات في تقرير آفاق النفط العالمية لهذا العام (WOO) حتى عام 2050، ويسلط التقرير الضوء على الاتجاهات والتغيرات العالمية المحورية. يشمل ذلك النظر فيما يمكن أن تقدمه كل طاقة من حيث توفير أمن الطاقة وتوافرها وتقليل الانبعاثات، مع التركيز على الحاجة إلى مسارات طاقة مستقبلية عادلة وشاملة للجميع. كما يستعرض التقرير التطورات الاقتصادية والديموغرافية والسياسية والتكنولوجية لتقديم نظرة متوازنة وواقعية بناءً على بيانات دقيقة وحقيقة.

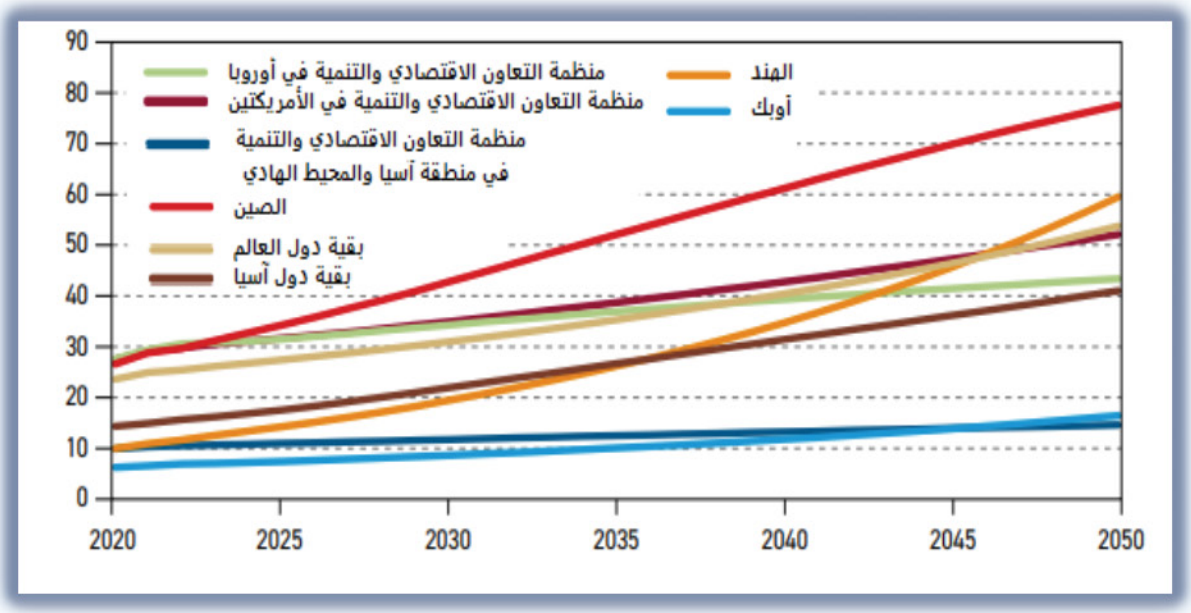
نمو السكان العالمي، اتجاهات التحضر، متطلبات الطلب على الطاقة

يؤكد التقرير على زيادة قوية في عدد سكان العالم، مع توقعات بارتفاعه إلى 9.7 مليار نسمة بحلول عام 2050 من مستوى يزيد قليلاً عن ثمانية مليارات اليوم. ويقود هذا النمو بشكل رئيسي زيادة ديموغرافية كبيرة في الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية(Non-OECD) . ومن المتوقع أن تتكثف اتجاهات التحضر، حيث من المتوقع أن يسكن ثلثي السكان، أي أكثر من 6.6 مليار شخص، في المراكز الحضرية بحلول نهاية فترة التوقعات. ومن المتوقع أن يتجاوز عدد القوى العاملة العالمية، التي تتألف من الشريحة العمرية 15 -64 عامًا، ستة مليارات بحلول عام 2050، مما يدمج فعليًا ما يقرب من 870 مليون وافد جديد إلى سوق العمل.

نمو اقتصادي عالمي متوسط بنسبة 2.9% سنويًا حتى عام 2050

من المتوقع أن ينمو الناتج المحلي الإجمالي العالمي بقوة، بزيادة سنوية متوسطة تبلغ 2.9% سنويًا بين عامي 2023 و2050. من المتوقع أن تقود الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية هذا النمو، بزيادة سنوية تبلغ 3.7%، بينما تشهد الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) نموًا سنويًا أكثر تواضعًا بنسبة 1.6 % نتيجة لذلك، ومن المتوقع أن يتضاعف حجم الاقتصاد العالمي من 165 تريليون دولار في عام 2023 إلى 358 تريليون دولار في عام 2050.

حجم الاقتصادات العالمية الرئيسية، 2020-2050
(تريليون دولار بأسعار عام 2021)



طموحات سياسة الطاقة تظل عالية، ولكن هناك مقاومة للأهداف الطموحة للغاية

شكل مؤتمر الأطراف 28 الذي عقد في دولة الإمارات العربية المتحدة، علامة فارقة حيث أجرى أول تقييم عالمي (GST) بموجب اتفاقية باريس. تم التأكيد على أهمية المساهمات الوطنية في تقليل الانبعاثات، ومع ذلك، أقر التقييم العالمي أيضًا بإمكانية حدوث اضطرابات بسبب مختلف الشكوك. بينما تظل طموحات سياسة الطاقة عالية، ويتوقع التقرير مزيدًا من التدقيق والمقاومة لبعض الأهداف السياسية الطموحة للغاية، سواء من قبل صانعي السياسات أو السكان. ومن الواضح أن أمن الطاقة لا يزال يشكل قلقًا بالغ الأهمية.

التكنولوجيا ستستمر في التأثير بشكل كبير على الطلب على الطاقة والعرض

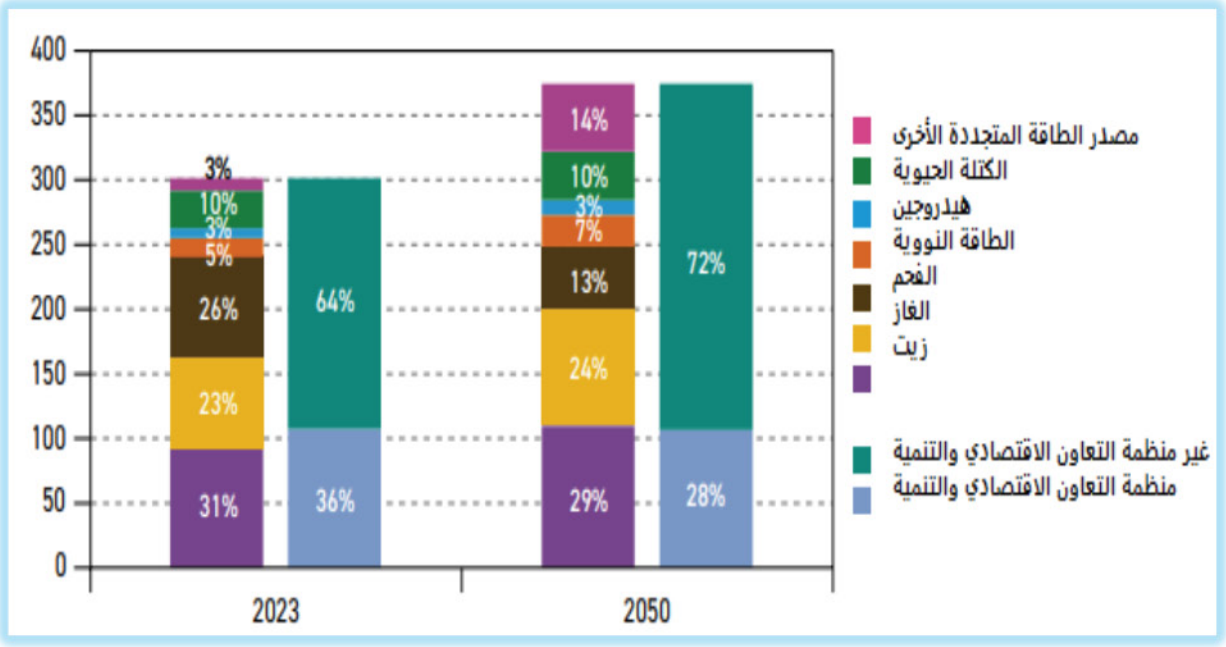
يقر تقرير آفاق النفط العالمية بالتقدم التكنولوجي التدريجي الذي يساعد على تحسين الكفاءة وتقليل التكاليف، ولكنه لا يفترض حدوث اختراقات تكنولوجية مفاجئة. ومن المتوقع أن تستمر المركبات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي (ICE) في الهيمنة على النقل البري. كما يتوقع أن تحصل المركبات الكهربائية (EVs) على حصة سوقية أكبر، ولكن لا تزال هناك عقبات تواجهها، مثل شبكات الكهرباء، وقدرة تصنيع البطاريات والوصول إلى المعادن الحيوية أو الحرجة. من جهة أخرى، يواجه قطاع الطيران تحديات إزالة الكربون، بينما يتبنى الشحن البحري الوقود البديل. ومن المتوقع أن يشهد توسع كبير في قدرة تقليل الكربون، وخاصة احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه(CCUS) .

من المتوقع أن يزيد الطلب العالمي على الطاقة الأولية بنسبة 24% حتى عام 2050، مدفوعًا بشكل رئيسي بطلب الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية(Non-OECD)

من المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على الطاقة الأولية من 301 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا (mboe/d)في عام 2023 إلى 374 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا في عام 2050، أي بنسبة ارتفاع قدرها 24% خلال فترة التوقعات. يقود قاطرة نمو الطلب على الطاقة طلب الدول النامية(Non-OECD) التي من المتوقع أن تشهد زيادة قدرها 73.5 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا. ويأتي حوالي 30% من هذا النمو من الهند وحدها. وفي الوقت نفسه، من المتوقع أن يشهد الطلب على الطاقة الأولية في الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) انخفاضا طفيفا. لترتفع بذلك حصة الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية(Non-OECD) من الطلب العالمي على الطاقة الأولية إلى 71.5% في عام 2050، بزيادة قدرها 7 % عن عام 2023.

الطلب على الطاقة الأولية بحسب المصد ووفق المنطقة، 2023 و2050

(مليون ب م ن يوميا)



ارتفاع الطلب على جميع مصادر الطاقة، باستثناء الفحم؛ ويتوقع أن تنمو طاقة الرياح والطاقة الشمسية بأسرع معدل

وفق السيناريو المرجعي، من المتوقع أن يرتفع الطلب على جميع مصادر الطاقة الاولية خلال فترة التوقعات، باستثناء الفحم. ومن المتوقع أن تأتي أكبر زيادة من مصادر الطاقة المتجددة الأخرى (خاصة الرياح والطاقة الشمسية)، بزيادة مطلقة تقارب من 43 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا، لترتفع من 9.6 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا في عام 2023 إلى 52.4 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا في عام 2050. ومن المتوقع أن تأتي ثاني أكبر زيادة من الغاز الطبيعي، بزيادة قدرها 20.5 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا حتى عام 2050. ومن المتوقع أيضا أن يشهد الطلب على النفط ارتفاعا بشكل كبير، أي بزيادة قدرها 16.7

مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا. ومن المتوقع أن تأتي الزيادات في الفترة من 2023 إلى 2050 من الطاقة النووية (9.6 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا) والكتلة الحيوية (8.2 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا)، وكذلك الطاقة الكهرومائية (4 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا). وبسبب السياسات الطاقوية الصارمة في معظم المناطق، من المتوقع أن ينخفض الطلب على الفحم بحوالي 29 مليون برميل من مكافئ النفط يوميًا بين عامي 2023 و2050.

إجمالي الطلب على الطاقة الأولية بحسب نوع الوقود، 2023-2050

	حجم الطلب مليون ب م ن ي						النمو مليون ب م ن ي	معدل النمو % سنويا	الحصة %	
	2023	2030	2035	2040	2045	2050	2050-2023	2050-2023	2023	2050
النفط	92.9	103.1	106.0	107.4	108.5	109.6	16.7	0.6	30.9	29.3
الفحم	78.0	71.6	66.1	60.0	54.4	49.1	(28.9)	(1.7)	25.9	13.1
الغاز	69.1	75.9	80.6	84.8	87.9	89.6	20.5	1.0	23.0	24.0
الطاقة النووية	14.8	17.0	18.9	20.9	22.7	24.3	9.6	1.9	4.9	6.5
الطاقة الكهرومائية	7.6	8.6	9.2	9.9	10.7	11.6	4.0	1.6	2.5	3.1
الكتلة الحيوية	29.1	32.1	34.0	35.5	36.5	37.4	8.2	0.9	9.7	10.0
طاقات متجددة أخرى	9.6	19.0	27.1	35.1	43.6	52.4	42.9	6.5	3.2	14.0
العالم	**301.1**	**327.3**	**341.9**	**353.6**	**364.3**	**374.0**	**72.9**	**0.8**	**100.0**	**100**

المصدر:
منظمة أوبك، تقرير آفاق النفط العالمية 2024.

تظل حصة النفط والغاز في مزيج الطاقة فوق 53% حتى عام 2050، مع احتفاظ النفط بأكبر حصة أي بأكثر من 29%

تشهد فترة التوقعات تغييرات كبيرة في مزيج الطاقة، ولكن من المتوقع أن يظل دور النفط والغاز حاسم لتوفير الطاقة حتى عام 2050. فمن المتوقع أن تظل حصتهما معا في مزيج الطاقة تزيد عن 53% طوال فترة التوقعات. ويحتفظ النفط بأكبر حصة أي بنسبة 29.3% في عام 2050، والغاز بحصة 24%.

يشهد الطلب على النفط نموًا قويًا في المدى المتوسط ويصل إلى أكثر من 120 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2050، مدفوعًا بطلب الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية(Non-OECD)

من المتوقع أن يصل الطلب العالمي على النفط إلى 112.3 مليون برميل يوميًا (mb/d) في عام 2029، مما يمثل زيادة قوية قدرها 10.1 مليون برميل يوميًا مقارنة بعام 2023. ومع ذلك، يظهر التحليل بحسب المناطق لهذا التوسع في المدى المتوسط صورة متناقضة بين استمرار نمو الطلب في الدول غير الأعضاء

في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية من جهة، وتباطؤ الطلب في الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية من جهة أخرى. حيث يتوقع أن يرتفع الطلب على النفط في الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بمقدار 9.6 مليون برميل يوميًا بين عامي 2023 و2029 ليصل إلى 66.2 مليون برميل يوميًا، بينما من المتوقع أن يظل الطلب في الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية يتأرجح حول مستوى 46 مليون برميل يوميًا خلال نفس الفترة.

وعلى المدى الطويل، من المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على النفط بمقدار 18 مليون برميل يوميًا تقريبًا، أي من 102.2 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى 120.1 مليون برميل يوميًا في عام 2050. بينما من المتوقع أن يزيد الطلب في الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بمقدار 28 مليون برميل يوميًا بين عامي 2023 و2050، مقابل أن يشهد الطلب في الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية انخفاضًا

إجمالي الطلب على النفط على المدى الطويل بحسب المناطق، 2023-2050
(مليون ب/ي)

	2023	2030	2035	2040	2045	2050	النمو للفترة 2023-2050
مجموعة الدول الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية:	**45.6**	**46.0**	**43.7**	**40.6**	**37.9**	**35.5**	**(10.1)**
الأمريكتين	25.0	25.6	24.9	23.5	22.2	21.1	(3.8)
أوروبا	13.4	13.1	12.1	11.0	10.0	9.2	(4.2)
أسيا الهادي	7.2	7.2	6.7	6.1	5.7	5.2	(2.0)
مجموعة الدول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية:	**56.6**	**66.0**	**71.0**	**75.4**	**81.2**	**84.6**	**28.0**
الصين	16.4	18.6	19.0	19.2	19.1	18.9	2.5
الهند	5.3	7.1	8.6	10.2	11.8	13.3	8.0
دول آسيوية أخرى	9.3	11.2	12.3	13.1	13.8	14.5	5.2
دول أمريكا اللاتينية	6.7	8.0	8.8	9.2	9.5	9.7	3.0
الشرق الأوسط	8.6	10.7	11.5	12.1	12.6	13.0	4.4
أفريقيا	4.5	5.4	6.2	7.0	7.9	8.9	4.4
روسيا	3.8	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	0.2
دول اوروآسيوية	1.2	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	0.4
دول أوروبية أخرى	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.1
العالم	**102.2**	**112.0**	**114.7**	**116.0**	**119.1**	**120.1**	**17.9**

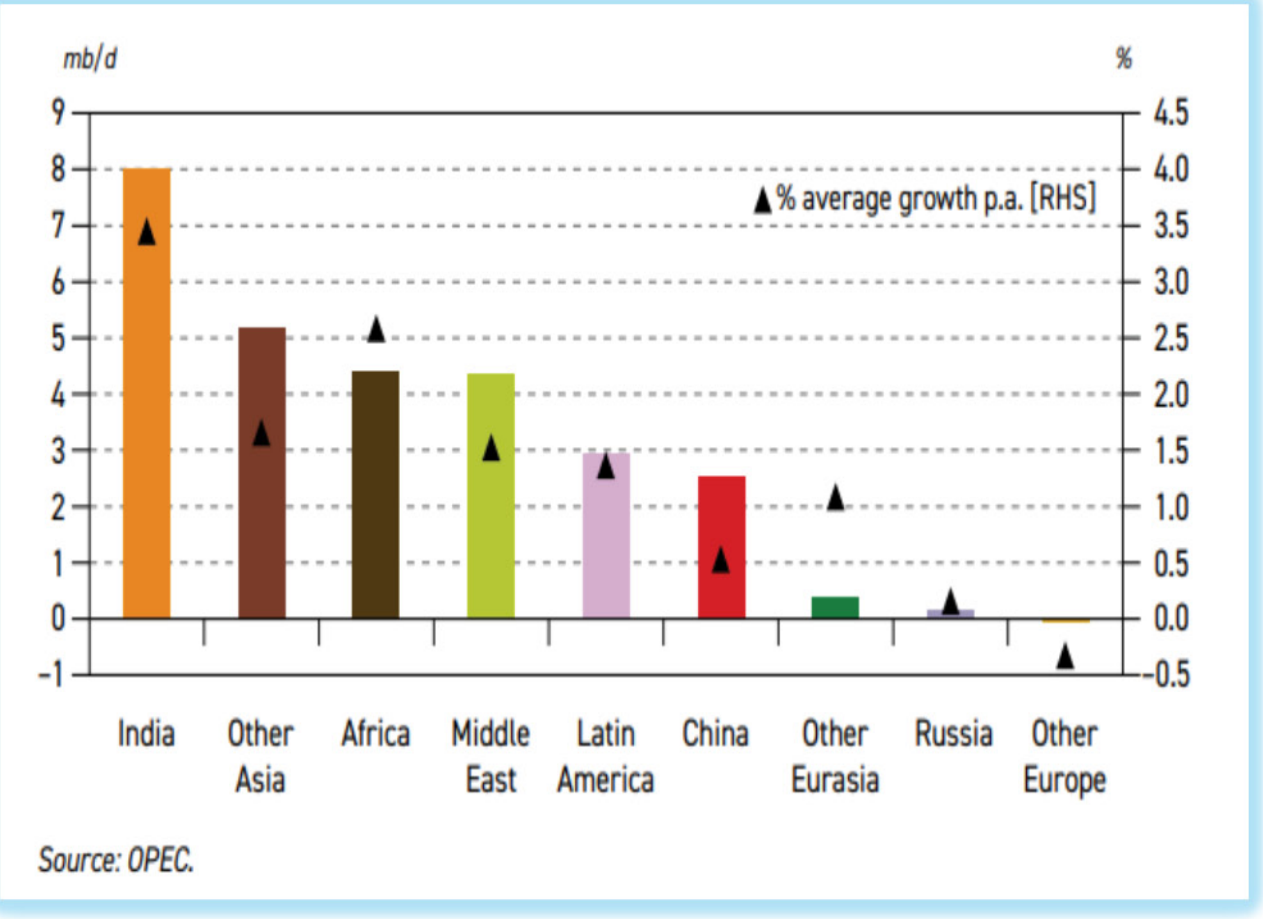
المصدر:
منظمة أوبك، تقرير آفاق النفط العالمي 2023.

الهند ستقود نمو الطلب على المدى الطويل

مع تمديد فترة التوقعات حتى عام 2050 ستظل الهند، ودول آسيا الأخرى، وأفريقيا والشرق الأوسط كمصادر رئيسية للطلب المتزايد في السنوات القادمة. فمن المتوقع أن يزيد الطلب الاجمالي في هذه المناطق الأربع بمقدار 22 مليون برميل يوميًا بين عامي 2023 و2050. ومن المتوقع أن تضيف الهند وحدها 8 مليون برميل يوميًا إلى طلبها على النفط خلال فترة التوقعات.

ومن المتوقع أيضا أن يزيد الطلب على النفط في الصين بمقدار 2.5 مليون برميل يوميًا.

نمو الطلب على النفط، مجموعة دول غير الأعضاء في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، 2023-2050

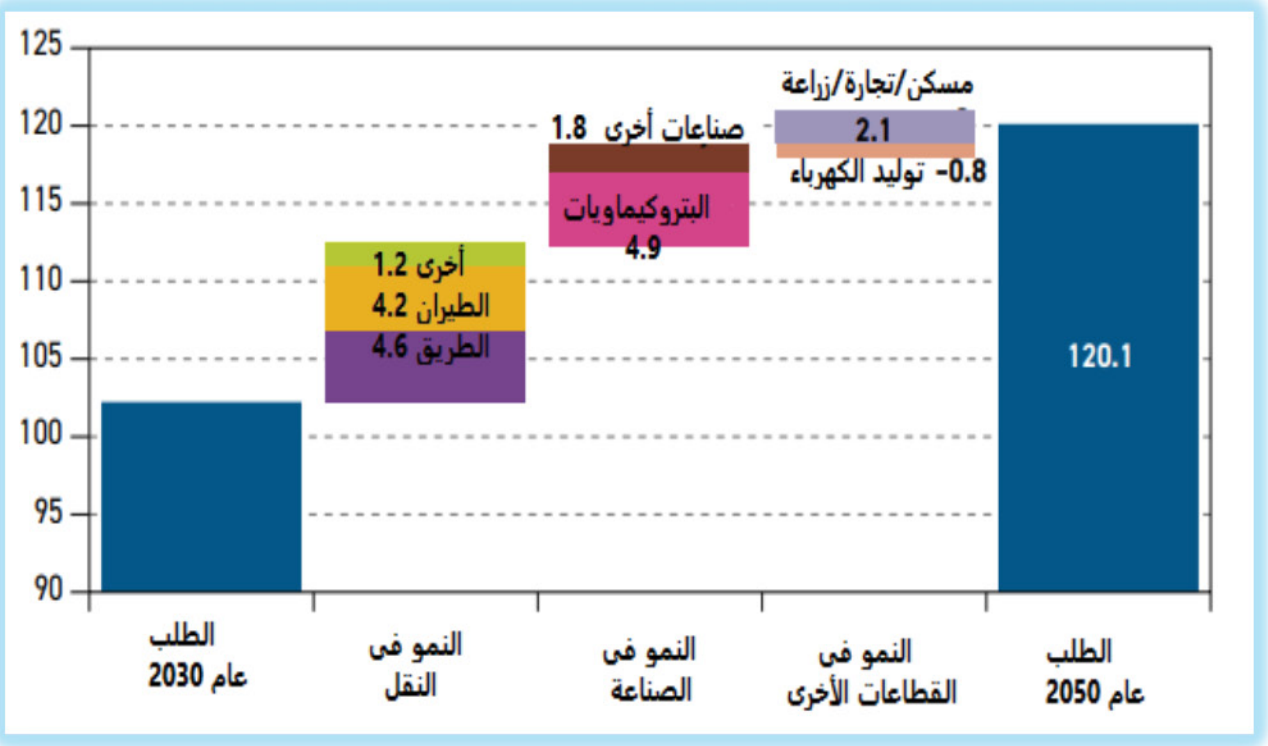


Source: OPEC.

البتروكيماويات، النقل البري والطيران هي حاسمة لنمو الطلب في المستقبل.

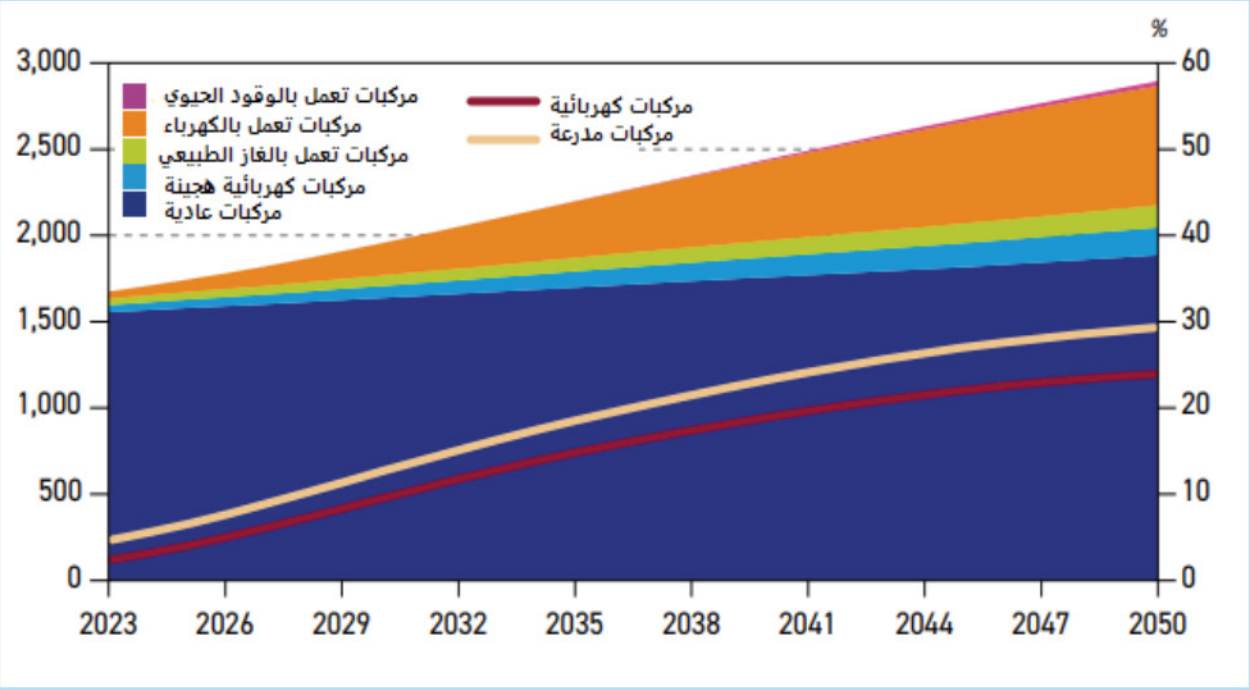
من المتوقع أن تشهد قطاعات البتروكيماويات والنقل البري والطيران أكبر زيادة في الطلب خلال فترة التوقعات، فمن المتوقع أن يزداد الطلب على النفط في هذه القطاعات على المدى الطويل بمقدار 4.9 مليون برميل يوميًا، 4.6 مليون برميل يوميًا و4.2 مليون برميل يوميًا على التوالي.

نمو الطلب على النفط، وفق القطاع، 2023-2050
(مليون ب/ي)



وتشير توقعات الطلب في قطاع النقل البري إلى حدوث نمو قوي خلال العقد الحالي قبل الاستقرار عند مستويات فوق 50 مليون برميل يوميًا لبقية فترة التوقعات. ومع حلول ذلك الوقت، من المتوقع أن يلعب انتشار السيارات الكهربائية دورًا متزايدًا. فمن المتوقع أن يزيد أسطول المركبات العالمي من 1.7 مليار مركبة في عام 2023 إلى 2.9 مليار مركبة في عام 2050 مع توقع نمو أسرع في قطاع السيارات الكهربائية. ومع ذلك، من المتوقع أن تستمر المركبات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي في الهيمنة على الأسطول العالمي لتستحوذ على أكثر من 70% في عام 2050.

التركيبة العالمية لأسطول السيارات، 2023-2050
(مليون مركبة /محور اليسار)



اتجاهات البتروكيماويات والنقل تحول قائمة المنتجات العالمية إلى البرميل الخفيف

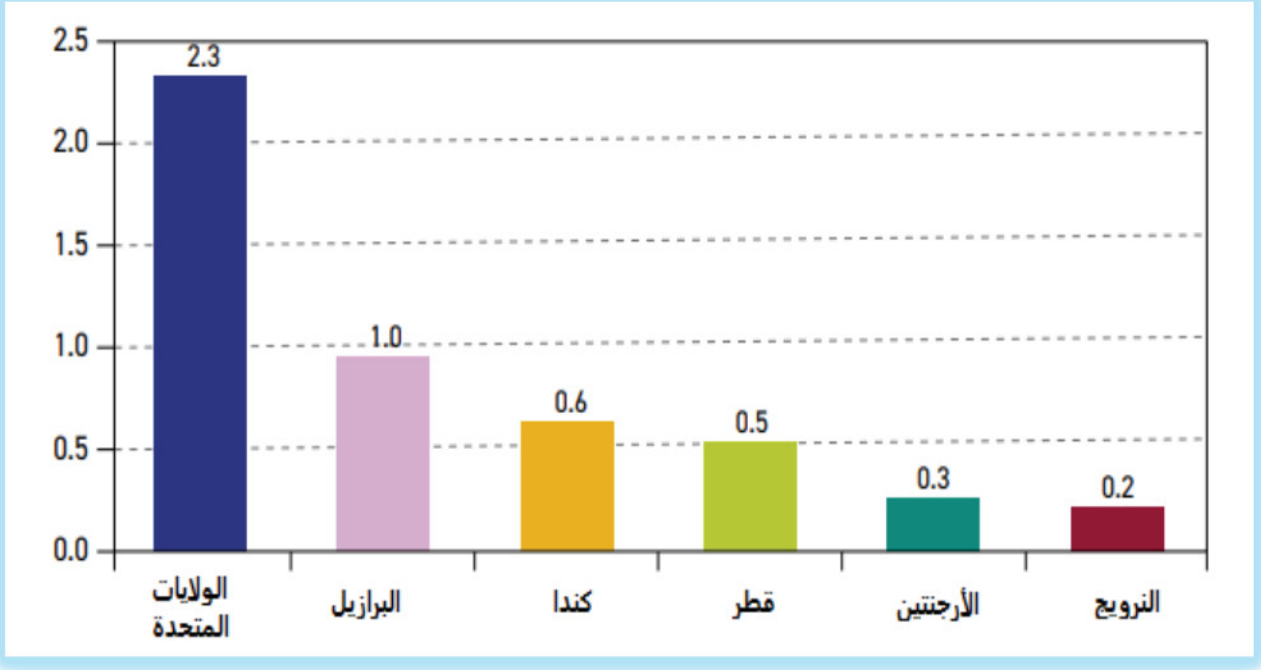
فيما يتعلق بالمنتجات المكررة، من المتوقع أن يكون هناك نمو قوي في الطلب على المدى الطويل على الإيثان/الغاز البترولي المسال (بارتفاع بنحو 4.2 مليون برميل يوميًا). ويرتبط الجزء الأكبر من هذا النمو في الطلب باستخدام الإيثان كمواد خام للبتروكيماويات، خاصة في الأمريكتين ومنطقة الشرق الأوسط. من المتوقع أن يؤدي النمو القوي المتوقع في الطلب في قطاع البتروكيماويات، خاصة في آسيا، إلى زيادة الطلب على النافتا (بزيادة 2.8 مليون برميل يوميًا) أيضًا. ومن المتوقع أن يشهد نمو الطلب في قطاع الطيران زيادة في وقود الطائرات/الكيروسين بمقدار 4 مليون برميل يوميًا بين عامي 2023 و2050، بينما يعد قطاع النقل البري القطاع الرئيسي لزيادة الطلب على الديزل/زيت الغاز (بارتفاع بحوالي 3.5 مليون برميل يوميًا) ، والبنزين (+2.5 مليون برميل يوميًا).

تقود الولايات المتحدة والبرازيل وكندا نمو إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون (non-Doc) على المدى المتوسط بمقدار 7.1 مليون برميل يوميًا.

يركز تقرير هذا العام على إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون(non-Doc). فعلى المدى المتوسط، من المتوقع أن تزداد إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون(non-Doc) من 51.7 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى 58.8 مليون برميل يوميًا في عام 2029، أو بمقدار 7.1 مليون برميل يوميًا. وتعد الولايات المتحدة أكبر مصدر لنمو إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان

التعاون(non-Doc) على المدى المتوسط، حيث من المتوقع أن يرتفع إجمالي الإنتاج بمقدار 2.3 مليون برميل يوميًا في الفترة من 2023 إلى 2029، أي من 20.9 مليون برميل يوميًا إلى 23.2 مليون برميل يوميًا. وتأتي زيادات الإمدادات الكبيرة الأخرى في هذا الإطار الزمني من البرازيل (1 مليون برميل يوميًا)، وكندا (0.6 مليون برميل يوميًا)، وقطر (0.5 مليون برميل يوميًا)، والأرجنتين (0.3 مليون برميل يوميًا)، والنرويج (0.2 مليون برميل يوميًا).

الدول المساهمة في التغير في إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون(non-Doc)، 2023-2029
(مليون ب/ي)



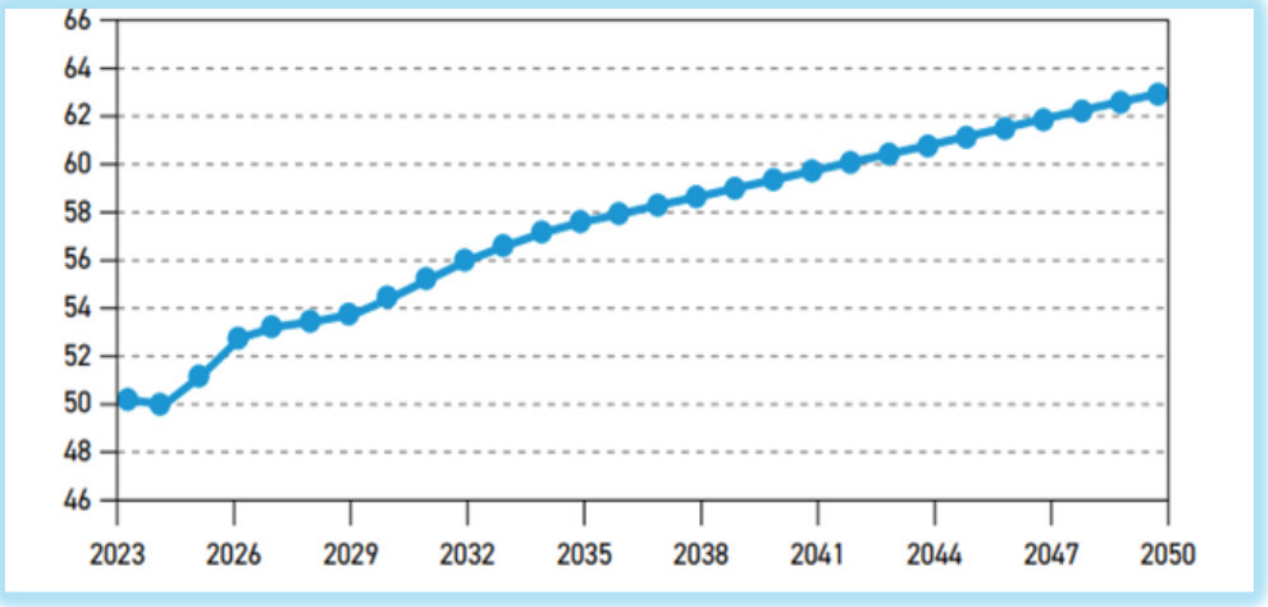
يتباطأ نمو إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون (non-Doc) على المدى الطويل، بعد أن تبلغ إمدادات الولايات المتحدة ذروتها في عام 2030.

من المتوقع ان ترتفع إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون(non-Doc) على المدى الطويل من 51.7 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى 57.3 مليون برميل يوميًا في عام 2050، أي بمقدار 5.5 مليون برميل يوميًا. وعلى الرغم من انخفاض الإنتاج في الولايات المتحدة خلال هذا الأفق الزمني، بعد أن تبلغ ذروتها حوالي عام 2030، الا أنه سيتم تعويض ذلك بزيادة الإنتاج في كل من أمريكا اللاتينية، كندا، الشرق الأوسط (غير التابعة لإعلان التعاونnon-Doc) وزيادات في معالجة المصافي العالمية. وفي المقابل، تشهد المناطق الأخرى تغييرات طفيفة فقط.

يتوقع نمو إمدادات السوائل من الدول التابعة لإعلان التعاون (Doc) بمقدار 12.7 مليون برميل يوميًا خلال الفترة 2023 -2050، مما يزيد من حصتها في السوق لتصل إلى 52%.

من المتوقع أن ترتفع إمدادات السوائل من الدول التابعة لإعلان التعاون (Doc) من 50.3 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى 53.8 مليون برميل يوميًا في عام 2029. بعد أن تبلغ إمدادات السوائل من الدول غير التابعة لإعلان التعاون**(non-Doc)** ذروتها في أوائل الثلاثينيات من القرن الحالي، ويتوقع أن تستمر إمدادات السوائل من الدول التابعة لإعلان التعاون (Doc) في النمو، حيث سترتفع إلى 62.9 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2050. مما يعني أن حصة الدول التابعة لإعلان التعاون (Doc) من إمدادات السوائل العالمية تزداد من 49% في عام 2023 إلى 52% في عام 2050.

إمدادات السوائل من الدول التابعة لإعلان التعاون (Doc)
(مليون ب/ي)



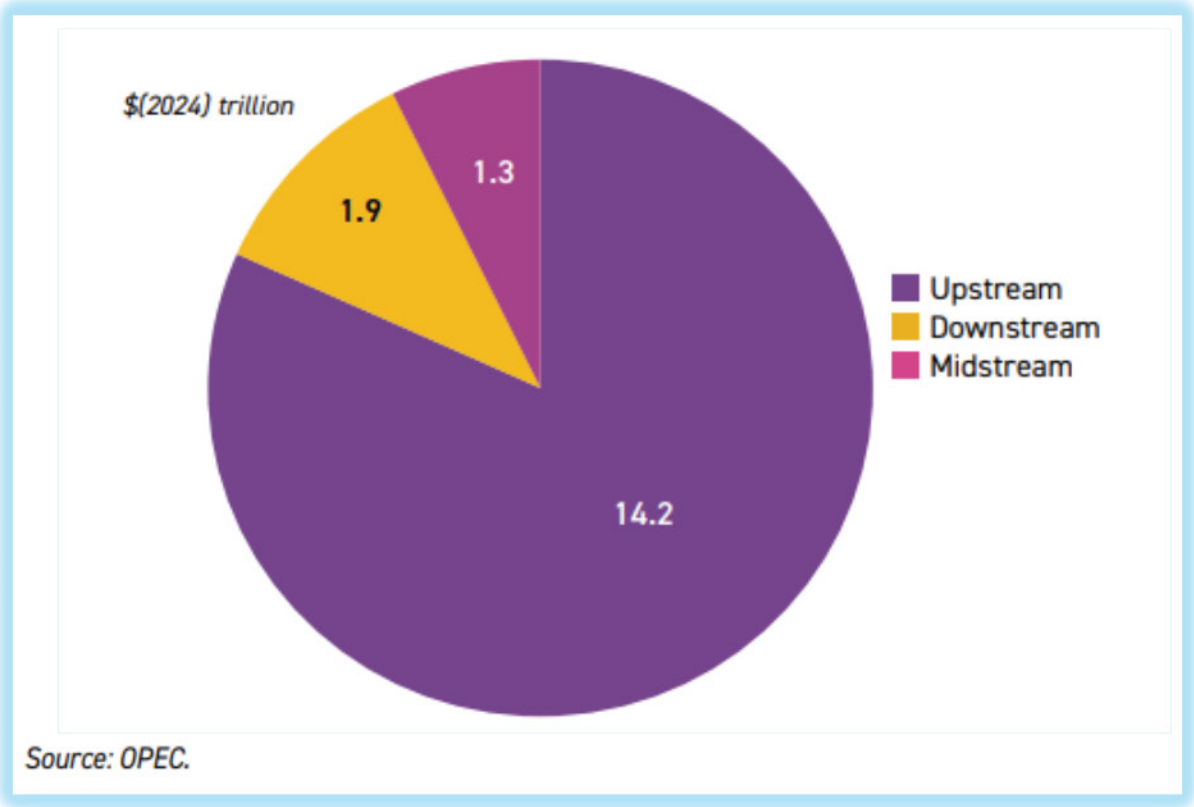
يتطلب قطاع النفط استثمارات تراكمية بقيمة 17.4 تريليون دولار بحلول عام 2050 لتلبية احتياجات الطلب المتزايد.

من أجل تلبية نمو الطلب المتوقع على النفط بشكل موثوق، فمن المتوقع أن تكون احتياجات الاستثمار في قطاع النفط كبيرة، حيث تقدر المتطلبات الاستثمارية التراكمية الإجمالية ما بين عامي 2024 و2050 بنحو 17.4 تريليون دولار، أي بمعدل 640 مليار دولار سنويًا (بالدولار الأمريكي لعام 2024).

والجزء الأكبر من حجم الاستثمارات المقدرة تتطلبها أنشطة المنبع أي الاستكشاف والإنتاج (upstream)، حيث تكون احتياجات هذه الانشطة 14.2 تريليون دولار، أو حوالي 525 مليار دولار سنويًا. ومن المتوقع

أن تكون احتياجات الاستثمار في أنشطة المصب (Downstream) والوسط (Midstream) خلال نفس الفترة 1.9 تريليون دولار و 1.3 تريليون دولار على التوالي.

متطلبات الاستثمار التراكمية المتعلقة بالنفط حسب القطاع، 2023-2045
(تريليون دولار بأسعار 2024)

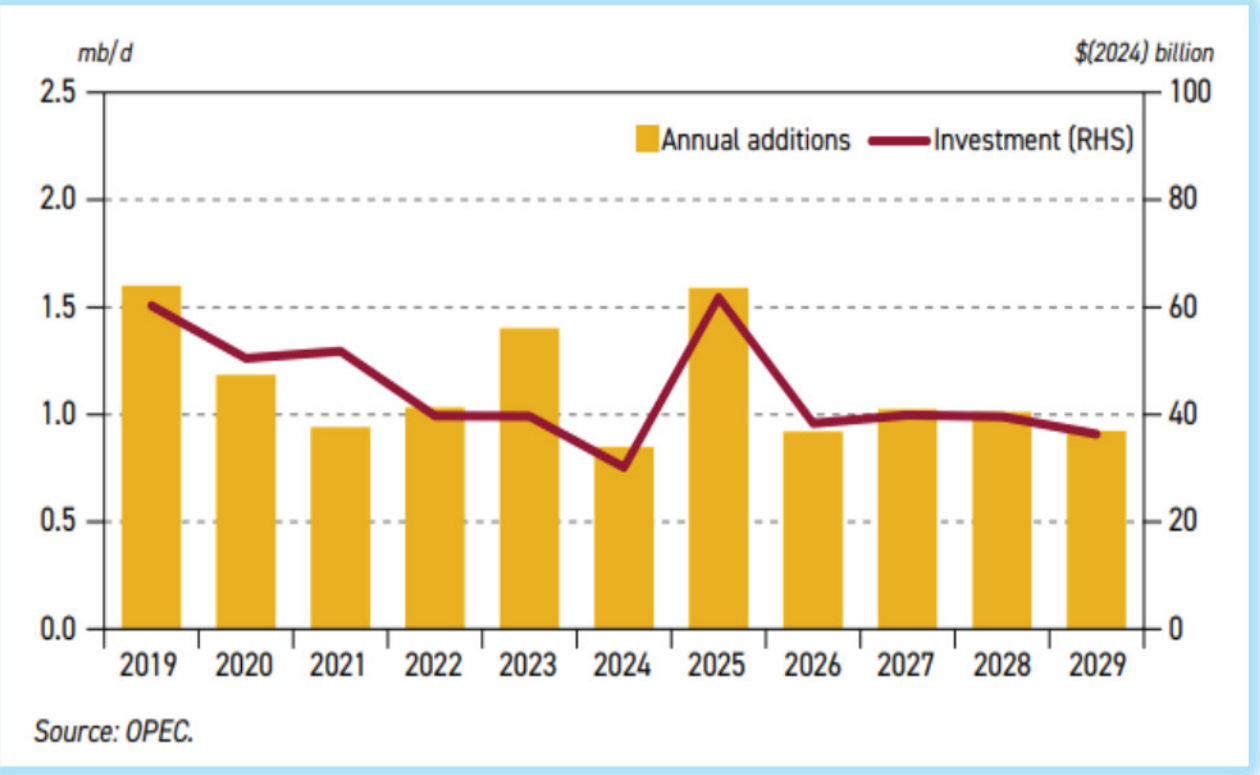


Source: OPEC.

الدول النامية ستقود التوسعات في مصافي التكرير على المدى المتوسط.

من المتوقع أن تضاف حوالي 6.3 مليون برميل يوميًا من طاقة التكرير على المستوى العالمي على المدى المتوسط. ومن المتوقع أن تكون غالبية السعة الجديدة قادمة من منطقة آسيا والمحيط الهادئ (3.2 مليون برميل يوميًا)، إفريقيا (1.4 مليون برميل يوميًا) والشرق الأوسط (1.2 مليون برميل يوميًا). ويقدر متوسط معدل الإضافات السنوية على المستوى العالمي للفترة من 2024-2029 بأكثر من 1 مليون برميل يوميًا بقليل.

الاضافات السنوية لطاقة التقطير (مليون ب/ي محور اليسار) واجمالي الاستثمار مليار دولار محور اليمين)، 2019 – 2029

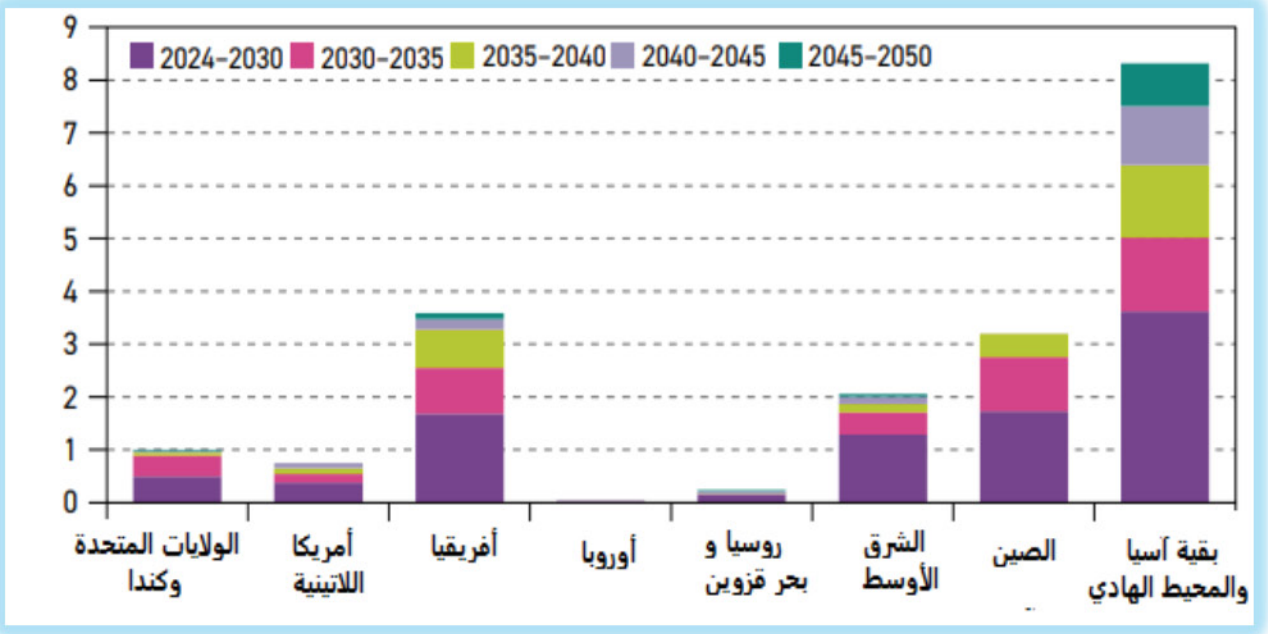


متطلبات السعة الجديدة لتقطير الخام تقدر بـ 19.2 مليون برميل يوميًا حتى عام 2050.

من المتوقع أن تكون الإضافات المطلوبة لطاقة التكرير على المستوى العالمي حتى عام 2050 حوالي 19.2 مليون برميل يوميًا. وعلى غرار نمو الطلب على النفط، تكون إضافات السعة التكريرية سريعة في البداية، مع تباطؤ في معدل الإضافات بعد عام 2040.

من المتوقع أن تكون حوالي 90% من السعة التكريرية الجديدة في منطقة آسيا والمحيط الهادئ، إفريقيا والشرق الأوسط. وهو ما يمثل استمرار للاتجاه التاريخي الذي يشير الى أن السعة التكريرية تنتقل من الدول المتقدمة إلى الدول النامية.

إضافات طاقة التقطير الخام، 2024 – 2050
(مليون ب/ي)



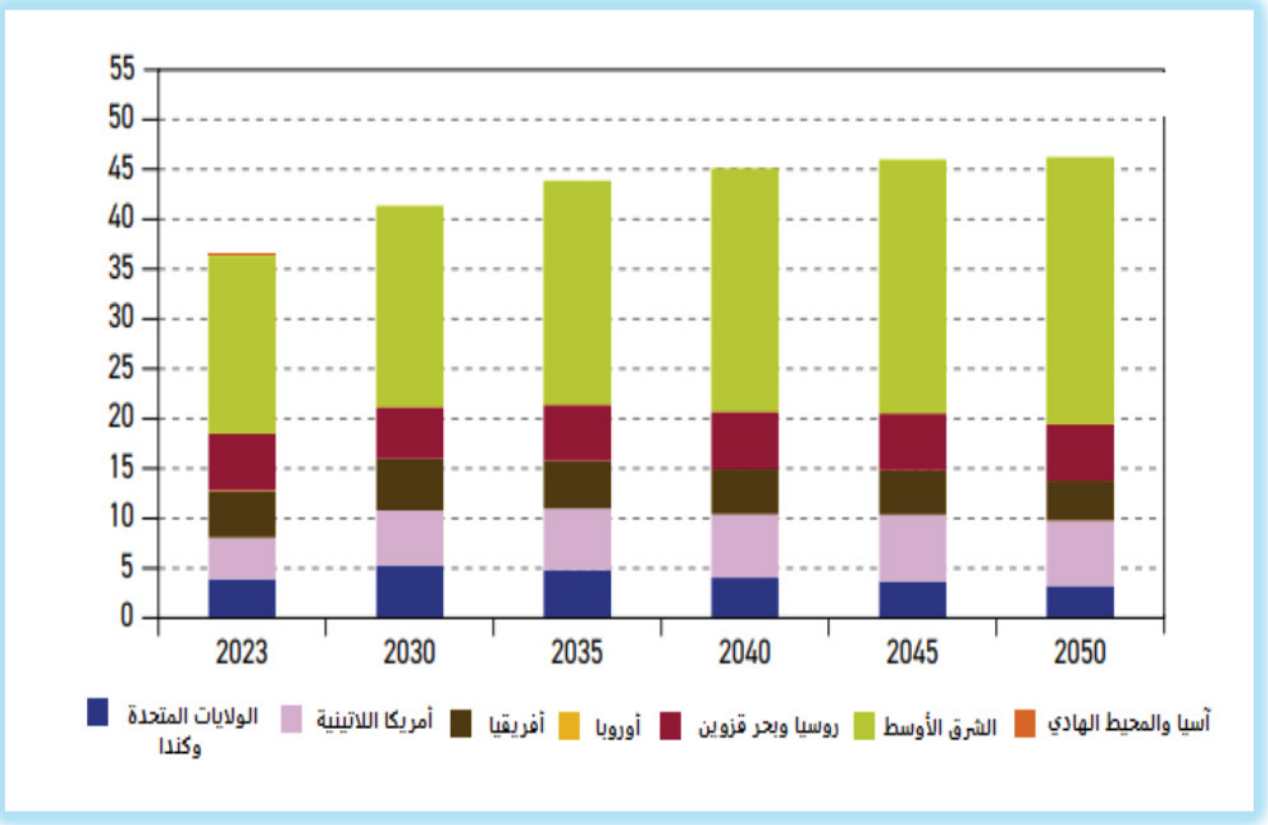
من المتوقع أن يكون هناك نمو قوي في تشغيل المصافي في الدول النامية.

من المتوقع أن تزيد عمليات تشغيل المصافي من 81.8 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى ما يقرب من 90 مليون برميل يوميًا في عام 2030. ويتوقع أن يكون النمو أبطأ في فترة ما بعد عام 2030 مع وصول عمليات تشغيل المصافي العالمية إلى 93 مليون برميل يوميًا في عام 2040 وما يقرب من 94 مليون برميل يوميًا في عام 2050. من المتوقع أن تنخفض عمليات تشغيل المصافي في الولايات المتحدة وكندا وأوروبا، وكذلك آسيا والمحيط الهادئ المتقدمة من عام 2030 فصاعدًا. ويتوقع أن يتم تعويض ذلك بزيادات قوية في المناطق النامية، مثل آسيا والمحيط الهادئ، الشرق الأوسط، إفريقيا وأمريكا اللاتينية.

من المتوقع أن ترتفع تدفقات التجارة العالمية للنفط الخام والمكثفات إلى 46.2 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2050.

من المتوقع أن تزيد حجم التجارة العالمية للنفط الخام والمكثفات من 36.5 مليون برميل يوميًا في عام 2023 إلى 41.2 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2030 على خلفية النمو القوي في الطلب على النفط. وبعد عام 2030، من المتوقع أن تستمر التجارة في الزيادة، لتصل إلى مستويات حوالي 46.2 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2050. ومن المتوقع أن تكون منطقة الشرق الأوسط وأمريكا اللاتينية المساهمين الرئيسيين في صادرات النفط الخام والمكثفات العالمية طوال فترة التوقعات.

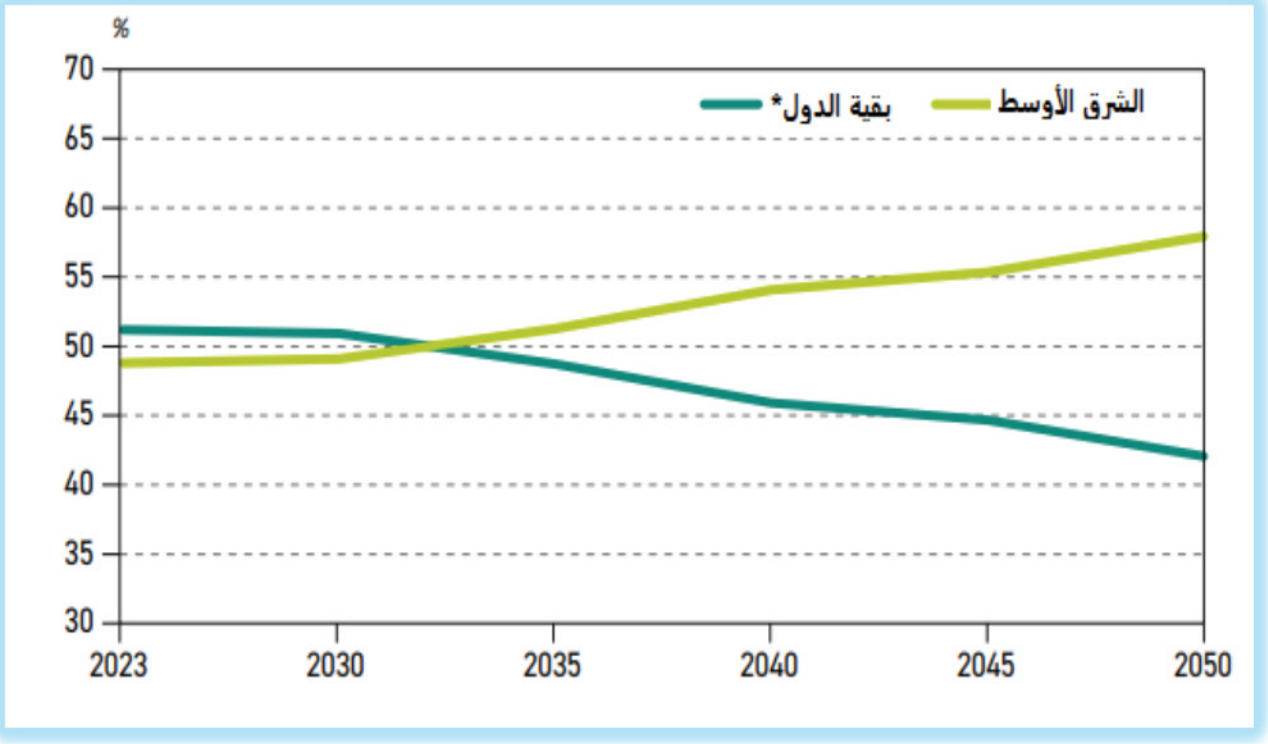
الصادرات العالمية من النفط الخام والمتكثفات وفق المناطق، 2023-2050
(مليون ب/ي)



من المتوقع أن تزيد منطقة الشرق الأوسط حصتها في التجارة العالمية للنفط الخام والمكثفات.

تهيمن منطقة الشرق الأوسط بشكل كبير على صادرات النفط الخام والمكثفات العالمية، حيث تبلغ حصتها حوالي 49٪ في عام 2023. ومن المتوقع أن تنخفض حصة الشرق الأوسط بشكل طفيف بحلول عام 2030 نتيجة الزيادة القوية المتوقعة في صادرات النفط الخام والمكثفات من أمريكا اللاتينية والولايات المتحدة وكندا. وخلال الفترة ما بعد 2030، من المتوقع أن تزيد حصة الشرق الأوسط في مزيج الصادرات الإجمالي إلى ما يقرب من 58٪ بحلول عام 2050.

حصة منطقة الشرق الأوسط من الصادرات العالمية من النفط الخام والمتكثفات، 2023-2050 (%)

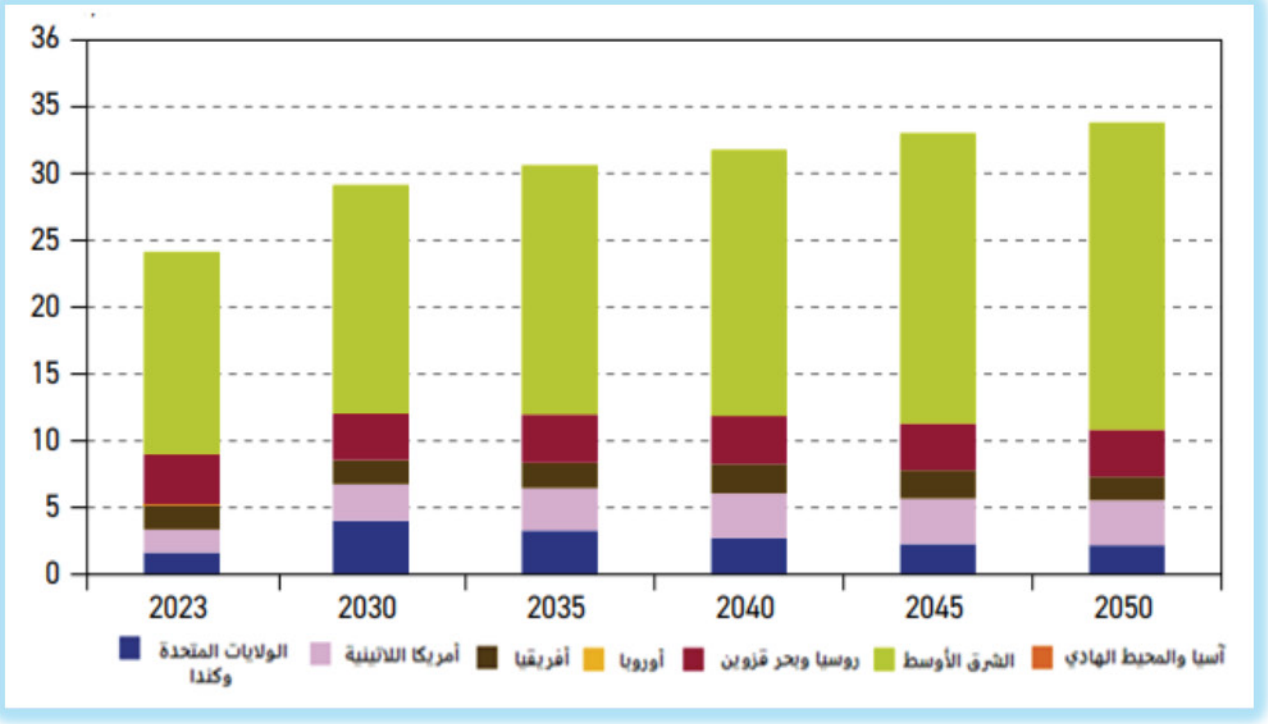


من المتوقع أن ترتفع واردات النفط الخام والمكثفات في منطقة آسيا والمحيط الهادئ بمقدار 10 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2050.

وصلت إجمالي واردات منطقة آسيا والمحيط الهادئ من النفط الخام والمكثفات إلى حوالي 24 مليون برميل يوميًا في عام 2023. ومن المتوقع أن ترتفع إلى أكثر من 29 مليون برميل يوميًا في عام 2030 وتزيد إلى حوالي 33.8 مليون برميل يوميًا في عام 2050. ويعزى ذلك الارتفاع بشكل رئيسي إلى زيادة الطلب على النفط في منطقة آسيا والمحيط الهادئ، وأيضًا بسبب انخفاض الإمدادات المحلية من حقول النفط القديمة.

واردات النفط الخام والمكثفات في منطقة آسيا والمحيط الهادئ بحسب الجهات المصدرة

(مليون ب/ي)



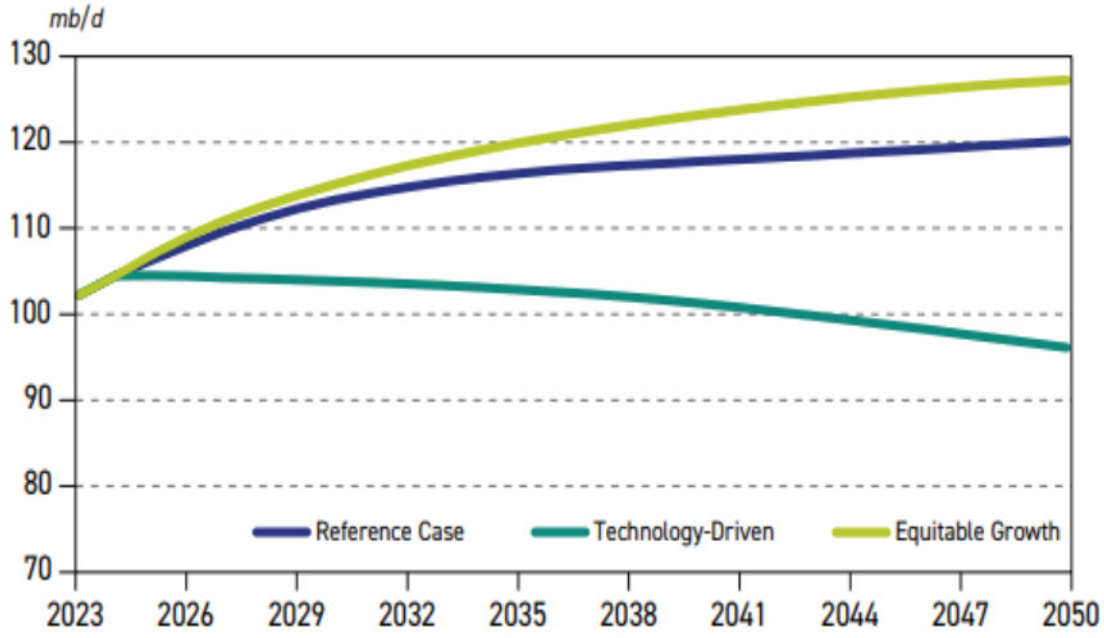
تؤكد السيناريوهات المختلفة حالات عدم اليقين، بشكل واسع، بشأن مستقبل الطاقة والطلب على النفط.

تقرير آفاق النفط العالمية لهذا العام تبنى سيناريوهين بديلين لسيناريو الحالة المرجعية. أولهما سيناريو "مدفوع بالتكنولوجيا" **(Technology -Driven)** الذي يوضح مسارًا مختلفًا للسرد السائد حول تقليل الانبعاثات؛ مسارًا يحقق هدف الحد من زيادة درجة الحرارة العالمية إلى أقل من 2 درجة مئوية، مع تجنب تأثير اقتصادي سلبي كبير على الاقتصادات النامية، خاصة تلك التي تصدر الطاقة، وفي نفس الوقت، يضمن درجة عالية من أمن الطاقة. وبحسب هذا السيناريو يتوقع أن يستقر الطلب العالمي على النفط عند مستوى أعلى من 100 مليون برميل يوميًا في الفترة حتى عام 2040، قبل أن يتباطأ بشكل معتدل إلى 96 مليون برميل يوميًا خلال السنوات العشر الأخيرة من فترة التوقع.

وعلى النقيض من ذلك، يوضح السيناريو الثاني البديل وهو **سيناريو "النمو العادل" (Equitable Growth)** مسارًا يتصور مستقبلًا اقتصاديًا أكثر عدالة وازدهارًا للدول النامية، مقترنًا بنهج مختلف لتحقيق أهداف تقليل الانبعاثات. ومن المتوقع أن يؤدي هذا السيناريو إلى زيادة الطلب على الطاقة على المدى الطويل، بشكل عام، وعلى النفط، بشكل خاص. حيث يتوقع أن يصل الطلب على النفط في هذا السيناريو إلى 115 مليون برميل يوميًا بحلول عام 2030 ويستمر في النمو إلى 127 مليون برميل يوميًا في عام 2050. وبالمقارنة بالحالة المرجعية، تكون نتائج السيناريو الثاني البديل أعلى بمقدار 2 مليون برميل يوميًا تقريبًا في عام 2030 وبمقدار 7.1 مليون برميل يوميًا في عام 2050.

الطلب العالمي على النفط المتوقع وفق السيناريوهات المختلفة، 2023-2050

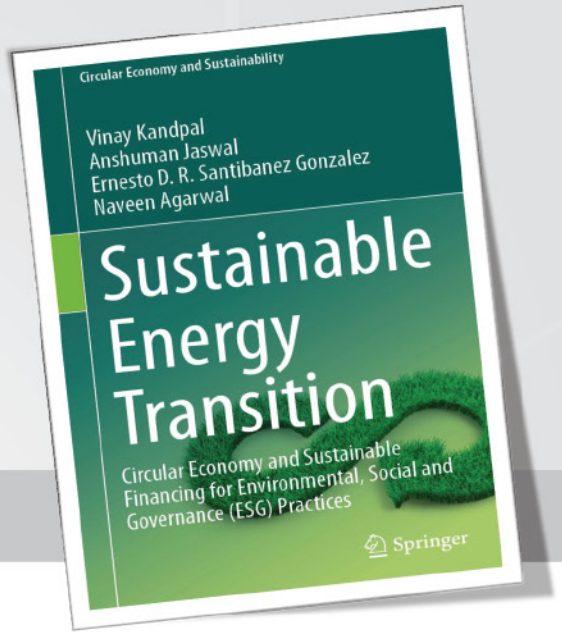
(مليون ب/ي)



Source: OPEC.

تواجه صناعة الطاقة والنفط تحديات وفرصًا.

تظل التوقعات على المدى الطويل لقطاع الطاقة غير مؤكدة. فالتحدي المتمثل في كيفية تحقيق توازن بين التنمية المستدامة والعادلة مع الحاجة الملحة إلى توفير الطاقة بأسعار معقولة وأمن الطاقة، وفي نفس الوقت معالجة القضايا المناخية، أدى إلى الكثير من النقاش والاستقطاب بين أصحاب المصلحة الرئيسيين. كما ناقش التقرير القضايا الحرجة، التحديات والفرص التي قد تواجهها صناعة الطاقة العالمية، بشكل عام، وصناعة النفط، بشكل خاص، في العقود القادمة، مع التركيز على عوامل مثل سياسة الطاقة والمفاوضات المناخية، والاستثمار ودور التقنيات الجديدة.



عرض كتاب

تحول الطاقة المستدامة : الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام للممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة

م. تركي حسن حمش *

* خبير أول بترول / استكشاف وانتاج - إدارة الشؤون الفنية ، منظمة أوابك - الكويت

مراجعة كتاب:

تحول الطاقة المستدامة: الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام للممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة

العنوان الأصلي للكتاب:

Sustainable Energy Transition: Circular Economy and Sustainable Financing for Environmental, Social, and Governance (ESG) Practices

المحررون:

Alexandros Stefanakis: Technical University of Crete, Chania, Greece
Ioannis Nikolaou: Democritus University of Thrace, Xanthi, Greece

هيئة التحرير:

Julian Kirchherr: Utrecht University, Utrecht, The Netherlands
Dimitrios Komilis: Democritus University of Thrace, Xanthi, Greece
Shu Yuan (Sean) Pan: National Taiwan University, Taipei, Taiwan
Roberta Salomone: University of Messina, Messina, Italy

الباحثون المساهمون في الكتاب:

Vinay Kandpal, Anshuman Jaswal, Ernesto D. R. Santibanez Gonzalez and Naveen Agarwal

تاريخ الصدور: 2024

الناشر: Springer, Nature Switzerland AG

مراجعة المهندس تركي حسن حمش- خبير بترول/ استكشاف وإنتاج

تهدف سلسلة الكتب التي تصدرها دار Springer للنشر في مجال التنمية المستدامة إلى استكشاف المجال المتسارع للاقتصاد الدائري (CE)، والذي يكتسب الاهتمام المتزايد من العلماء وصناع القرار والعاملين كنموذج اقتصادي عالمي لفصل النمو الاقتصادي والتنمية عن استهلاك الموارد الطبيعية المحدودة. يشير هذا المجال إلى أنه يمكن تحقيق الاستدامة العالمية من خلال اعتماد مجموعة من مبادئ واستراتيجيات الاقتصاد الدائري مثل التفكير في النظم، واعتماد النهج القائمة على الطبيعة، والتحول إلى الطاقة والمواد المتجددة، والاستصلاح لاستعادة صحة النظم الإيكولوجية، وإعادة الموارد البيولوجية إلى المحيط الحيوي، وإعادة تصنيع المنتجات أو المكونات.

لكن التعقيد المتزايد لتحديات الاستدامة جعل من الصعب تبني مثل هذه المبادئ والاستراتيجيات بنجاح، لذلك غالباً ما ينظر إلى مجال الاقتصاد الدائري على أنه تطور بسيط لمفهوم الاستدامة أو إعادة النظر في مناقشة قديمة حول إعادة تدوير وإعادة استخدام مواد النفايات، لكن الاقتصاد الدائري بالأحرى هو أداة لتحقيق الاستدامة ونهج جديد فعال بيئياً لتدوير النفايات والحفاظ عليها ضمن عمليات الإنتاج عن طريق إغلاق حلقة المواد المستخدمة.

ضمن هذا الإطار، يمكن اعتبار الاقتصاد الدائري والاستدامة مفهوماً متعدد الأبعاد يعتمد على مجموعة متنوعة من التخصصات العلمية (مثل الهندسة والاقتصاد والعلوم البيئية والعلوم الاجتماعية). ومع ذلك، نادراً ما تم تحقيق الترابط بين هذه التخصصات العلمية بعمق.

في معرض تقديمه للكتاب، علق الدكتور V.K. Saraswat عضو "المعهد القومي للتحول في الهند" مبيناً أنه في خضم الفترة السائدة من القضايا البيئية والاجتماعية والاقتصادية البارزة، أصبح الطلب على الحلول المستدامة ملحاً. ويرى أن الكتاب قيد المراجعة يعد مورداً لتوفير المعرفة والتوجيه ضمن منظور تحول جذري في كيفية إدراكنا وتعاملنا مع موارد الأرض والمنظمات المالية التي تشرف على تخصيصها. ويتابع بأن التحديات البيئية والاجتماعية والاقتصادية هي شبكة معقدة في العالم الحديث، إذ ترتبط قضايا تغير المناخ واستنزاف الموارد وعدم المساواة الاجتماعية والاقتصادية ارتباطاً وثيقاً في إطار المجتمع العالمي، مما يجعل الكتاب وثيق الصلة بالموضوع نظراً للاعتراف المتزايد بضرورة إجراء إصلاح شامل يشمل أنظمة الطاقة، والنماذج الاقتصادية، وهياكل الحوكمة.

يطرح المؤلفون في هذا الكتاب العلاقة المعقدة بين ممارسات الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري والتمويل الذي يعطي الأولوية للاعتبارات البيئية والاجتماعية والحوكمة. وعلى المستوى الفردي، يعد كل

من هذه المتغيرات أمراً بالغ الأهمية، ولكن عندما يتم دمجها، فإنها تمتلك القدرة على تحفيز تحول دائم ومفيد في المجتمع العالمي، ويقدم الكتاب تحليلاً شاملاً لهذه المجالات المترابطة، مما يمنح القراء فهما دقيقا لكل منها ويوضح كيف يمكن -عند دمجها- أن تدفع باتجاه مستقبل أكثر استدامة.

إنما من الضروري الإشارة إلى أن فصول الكتاب كلها درات حول نفس المضمون العام، وإن اختلف اتجاه المقاربة. كما يلاحظ من الكتاب أن الباحثين ينظرون للطاقة المستدامة من زاوية واحدة لا ترى في النفط والغاز إلا مشكلة يجب التخلص منها، والواقع أنه لطالما دار الجدل حول دور النفط والغاز في الحياة المعاصرة، فمن جهة، يُنظر إليهما على أنهما مصدران رئيسيان للتلوث البيئي والاحتباس الحراري، لكن من جهة أخرى، لا يمكن إنكار الدور المحوري الذي لعبه هذان المورد ان في دفع عجلة التنمية الصناعية والتطور الحضاري على مر العقود الماضية.

إن النظر إلى النفط والغاز بمنظور أحادي الجانب -كما هو عليه الحال في هذا الكتاب- وإلصاق صفة الشر بهما بشكل مطلق، هو أمرٌ مبالغ فيه وغير دقيق، ومن الخطأ تجاهل الإيجابيات الكبيرة التي جلبها هذان المورد ان للحضارة الإنسانية، إذ ساهما ويساهمان في تحسين مستوى المعيشة، وتوفير الطاقة اللازمة لتشغيل المصانع والمواصلات، وتطوير الصناعات الدوائية والبتروكيماوية. كما أن النفط والغاز يوفران فرص عمل لملايين الأشخاص حول العالم، ويدعمان اقتصادات العديد من الدول.

ومن المهم كذلك إدراك أن بعض الباحثين ينظرون إلى هذه القضية من زاوية ضيقة للغاية، حيث يركزون بشكل أساسي على الآثار السلبية للنفط والغاز على البيئة، متجاهلين الجوانب الإيجابية الأخرى، هذا النهج الأحادي الجانب لا يمكن أن يؤدي إلى حلول شاملة ومستدامة، فالحقيقة هي أن الانتقال إلى مصادر طاقة متجددة لا يعني أننا يجب أن نتخلى عن النفط والغاز، فالتحول إلى ما يسمى بالطاقة النظيفة يتطلب وقتاً وجهداً واستثمارات ضخمة. وسوف تبقى الحاجة إلى النفط والغاز قائمة لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة. كما أن النفط والغاز والوقود الأحفوري عموماً، تلعب دوراً حتى في المرحلة الانتقالية في مسيرة تطور الطاقة، وربما من الأجدى التفكير والعمل على تطوير التقنيات التي تساعد على استخراج النفط والغاز بطرق أكثر كفاءة وأقل ضرراً بالبيئة، بالتوازي مع الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة.

لقد فات المؤلفين لهذا الكتاب أن العالم في ضوء الطلب المتزايد على الطاقة -سواء بسبب النمو الاقتصادي والبشري، أو بسبب الطلب المتزايد من جهة الذكاء الاصطناعي - بحاجة إلى كل المصادر المتاحة، إذ قدرت أوبك مؤخراً أن الطلب العالمي على النفط سيصل إلى 374 مليون برميل مكافئ نفط في اليوم ، لن

تغطي الطاقات المتجددة أكثر من 24% منها تتضمن 10% من طاقة الكتلة الحيوية، مما يترك 14% فقط لطاقة الشمس والرياح وباقي المصادر المتجددة، بينما سوف تكون حصة النفط والغاز أكثر من 53.2% من مزيج الطاقة (مقابل 54% في عام 2023). لذلك، وعلى الرغم من أهمية التوجه نحو مصادر الطاقة المتجددة، إلا أن الاستثمار في قطاع النفط والغاز لا يزال ضرورياً جداً تحت مظلة مستدامة تراعي البيئة وتحميها، ولا شك أن هذه الاستثمارات سوف تساهم في ضمان استقرار أسعار الطاقة، كما أن توجيه جزء منها نحو تطوير تقنيات جديدة في مجال الإنتاج والتكرير سيساعد على زيادة الإنتاجية وخفض التكاليف، فمراكز البحث والتطوير تعمل بكل دأب على تطوير تقنيات أكثر كفاءة في الصناعة البترولية. ومن الهام هنا النظر إلى أن إيرادات النفط والغاز تعتبر مصدراً رئيسياً للدخل الحكومي في العديد من دول العالم، حيث تساهم هذه الإيرادات في تمويل المشاريع التنموية، وتحسين البنية التحتية، وتقديم الخدمات العامة، كما تساهم في خلق فرص العمل وتحفز النمو الاقتصادي من خلال خلق سلاسل قيمة جديدة، وتطوير الصناعات المرتبطة بها.

كما غض المؤلفون النظر عن حقيقة أن السعة المركبة من الطاقات المتجددة ليست موزعة حول العالم بما يضمن أن تشكل مساهمة فعالة في مزيج الطاقة في الحالات الطارئة، مثل الطقس شديد القسوة، أو مثل التغيرات الجيوسياسية غير المتوقعة كما هو الحال في الأزمة الروسية الأكرانية، والتي لم تُخفِ أي جهة بعدها انخفاض صوتها المطالب بخفض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، إذ تم تعديل الأولويات حيث بات تأمين مصادر بديلة للنفط والغاز الروسي أكثر أهمية من موضوع البيئة ليس في الوقت الراهن فحسب، بل على المدى الطويل حيث بدأت مساعي أوروبا في بناء محطات لاستقبال الغاز الطبيعي المسال كبديل محتمل للغاز الروسي، وعادت بعض المحطات العاملة على الفحم الحجري إلى العمل بعد أن تم إيقافها لأسباب بيئية بحتة.

لذلك فإن مراجعة هذا الكتاب لا تعني بالضرورة أن ما ورد فيه من آراء تمثل وجهة نظر المُراجع أو وجهة نظر منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول، بل هي استعراض يوضح كيف يفكر البعض في أمرٍ فائق الأهمية مثل تحول الطاقة.

تضمن الكتاب أحد عشر فصلاً تدور حول إعادة تقييم العلاقة بين الناس والكوكب، ويمكن بيان أهم نقاط هذه الفصول فيما يلي:

الفصل الأول: تحول الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري وممارسات الحوكمة البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات

في وقت يتسم بقضايا عالمية استثنائية، مثل تغير المناخ، والموارد المحدودة، والظلم الاجتماعي، وحوكمة الشركات، أصبحت ضرورة الممارسات المستدامة والمسؤولة واضحة بشكل متزايد. وقد أدت الحاجة الملحة لمواجهة هذه القضايا المعقدة إلى ظهور ثلاثة مفاهيم محورية أصبحت رمزا للمسعى المشترك لتحقيق مستقبل أكثر عدلا ومسؤولية بيئيا، وهي: انتقال الطاقة المستدامة، والاقتصاد الدائري، والممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة.

استكشف هذا الفصل الشبكة المعقدة التي شكلتها الركائز الثلاث المترابطة للاستدامة، وبحث في التفاعل بين صنع القرار في مجالات الطاقة وإدارة الموارد ومسؤولية الشركات وتأثيرها التراكمي على مسار مستقبل الكوكب. يتقاطع كل من هذه المبادئ لتشكيل منظور شامل لتعزيز مجتمع عالمي أكثر ازدهارا وانسجاما، ويبدأ الاستكشاف بفحص المجال الديناميكي لانتقال الطاقة المستدامة، وهي حركة تهدف إلى تحويل مشهد الطاقة، كما بحث هذا الفصل فيما رآه ضرورة الانتقال من الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة المستدامة والمتجددة، مشيراً إلى الانتشار المتزايد للألواح الشمسية وتوربينات الرياح، والأثر الكبير الذي قد تحدثه الطاقة المستدامة على معالجة تغير المناخ، وتحسين جودة الهواء، وتعزيز أمن الطاقة.

بعد ذلك، تعمق هذا الفصل في الشبكات المعقدة للاقتصاد الدائري، وهو إطار مفاهيمي يقدم نقطة مقابلة للنهج الخطي للإنتاج والاستهلاك المعروف باسم نموذج "خذ - اصنع - تخلص*"، بينما ينصب التركيز ضمن المجال الدائري على إنشاء سلع ذات عمر ممتد، واستصلاح المواد وإعادة استخدامها لاحقا، وتقليل توليد النفايات. تظهر المزايا الاقتصادية والبيئية والاجتماعية لاعتماد استراتيجية دائرية قدرتها على الحفاظ على الموارد وتحفيز الابتكار وتعزيز المرونة.

ورأى هذا الفصل أن معايير الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام والحوكمة، تعمل كإطار توجيهي للشركات لدعم تفانيها في الاستدامة البيئية والعدالة الاجتماعية والحوكمة الخاضعة للمساءلة. ويمكن من خلال

* نموذج اقتصادي للإنتاج والاستهلاك يعتمد على استخراج المصادر وتحويلها إلى منتجات ثم التخلص منها لاحقاً. (المُراجع).

تحليل شامل للمبادئ الأساسية والاستراتيجيات التشغيلية التي تعمل كأساس للأطر البيئية والاجتماعية والحوكمة، توضيح العمليات التي يمكن للشركات من خلالها مواءمة أهدافها المدفوعة بالربح بشكل فعال مع النهوض بالرفاه الاجتماعي والبيئي. وتم كذلك في هذا الفصل تسليط الضوء على الترابط بين الركائز الثلاث للاستدامة، إذ يحفز الانتقالُ نحو مصادر الطاقة المستدامة الآلياتِ الموفرة للموارد للاقتصاد الدائري، بينما تعزز الممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة السلوك الاقتصادي الأخلاقي والمسؤول. توفر هذه الموضوعات تصويرا شاملا لمجتمع يتوافق فيه الثراء الاقتصادي مع الاستدامة البيئية والرفاهية المجتمعية.

خلص هذا الفصل إلى ما يمكن إيجازه في النقاط التالية:

- يشكل تغير المناخ، الناجم بشكل أساسي عن انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري، تهديداً كبيراً لتحقيق التنمية المستدامة .
- يقدم الجمع بين التحول نحو الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري وممارسات الأطر البيئية والاجتماعية والحوكمة إطاراً هاماً لمواجهة تغير المناخ وتحقيق الاستدامة .
- يؤدي هذا النهج إلى تقليل التأثير البيئي، وتوفير التكاليف، وتعزيز العدالة الاجتماعية، وتحسين سمعة الشركات.
- يمكن للانتقال من الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح والهيدروكربونية أن يقلل من انبعاثات غازات الدفيئة، ويحسن أمن الطاقة، ويخلق فرص عمل، ويحسن الصحة العامة.
- من خلال إعادة استخدام وإصلاح وتجديد المواد والمنتجات، يقلل الاقتصاد الدائري من النفايات، يحافظ على الموارد، ويعزز الكفاءة الاقتصادية والابتكار.
- تشجع معايير الاقتصاد الدائري والتمويل المستدام والحوكمة الشركات على تبني ممارسات أخلاقية ومسؤولة اجتماعياً وبيئياً، مما يساهم في العمل المناخي والعدالة الاجتماعية، والحوكمة الرشيدة .
- تكامل هذه المبادئ يمكن أن يعالج فقر الطاقة، يحفز النمو الاقتصادي، ويعزز الشمولية، ويدعم هذا النهج تحقيق أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة، والتي توفر إطاراً شاملاً لمستقبل أكثر استدامة .
- يلعب الجمع بين التحول نحو الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري، وممارسات الاقتصاد

الدائري والتمويل المستدام والحوكمة، دوراً حاسماً في تحقيق أهداف الاستدامة العالمية. هذا النهج يشجع الحفاظ على البيئة، والنمو الاقتصادي، والعدالة الاجتماعية، مما يفيد الأجيال الحالية والمستقبلية.

الفصل الثاني: اقتصاديات انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري

حلل هذا الفصل المفاهيم والآثار الاقتصادية المرتبطة بالتحول نحو مصادر الطاقة المستدامة واعتماد نموذج الاقتصاد الدائري. ورأى أنه بالنظر إلى المخاوف العالمية الملحة المحيطة بتغير المناخ، وندرة الموارد، والتدهور البيئي، فهناك ضرورة متزايدة لإجراء إصلاح شامل لأنظمة الطاقة وممارسات الإنتاج والاستهلاك. وأكد الفصل كذلك على قدرة الاقتصاد الدائري على تعزيز كفاءة استخدام الموارد، وتقليل النفايات، وتحفيز الابتكار. بالإضافة إلى ذلك، أكد على إمكانات التحول المستدام للطاقة لتحفيز النمو الاقتصادي، وتوليد فرص العمل، والحد من آثار تغير المناخ، إذ يتمتع صانعو السياسات والمنظمات والأفراد بالقدرة على التنقل في مسار نحو اقتصاد عالمي أكثر استدامة بيئيا وقابلية للحياة اقتصاديا من خلال فهم الضرورات والفرص الاقتصادية المرتبطة بهذه الأساليب الثورية. ففي خضم وقت يتسم بزيادة المخاوف البيئية والحاجة الملحة للتقدم المستدام، أصبح التحول نحو مصادر الطاقة المستدامة واحتضان أفكار الاقتصاد الدائري أمرا بالغ الأهمية. وقد درس هذا الفصل الترابط المعقد بين هذين المجالين، وبحث في كيفية اتحادهما للتأثير على مستقبل مستدام بيئيا وقوي اقتصاديا، مبيناً أن التحول نحو الطاقة المستدامة هو الانتقال بعيدا عن الاعتماد على الوقود الأحفوري ونحو اعتماد مصادر الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية، ويلعب دورا حيويا في الجهود العالمية لمعالجة تغير المناخ، يعالج هذا التحول الآثار البيئية لتوليد الطاقة وله آثار كبيرة على الاقتصاد العالمي. وتتضمن عملية التحول إعادة تقييم تقنيات إنتاج الطاقة وتوزيعها واستخدامها، مع ضمان توافقها مع مثل الاستدامة.

يمثل الاقتصاد الدائري نقلة نوعية في الأيديولوجية الاقتصادية، مع التركيز على تحسين الموارد وتقليل النفايات واستعادة النظم الطبيعية، وبالتالي تعزيز هيكل اقتصادي أكثر استدامة. ويعد التقارب بين انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري أمرا بالغ الأهمية في السعي لتحقيق مستقبل أكثر استدامة، إذ يضمن تعزيز الابتكار، وخلق فرص العمل، وتعزيز الوصول إلى السوق، كل ذلك مع تقليل البصمة البيئية. كان الغرض من هذا الفصل توضيح الأبعاد الاقتصادية لتحول الطاقة، حيث سعى إلى دراسة الآليات الاقتصادية المعنية لتحقيق فهم شامل لكيفية الحفاظ على هذا التحول الحاسم وتسريعه، وبالتالي ضمان

مستقبل أكثر ثراء لكل من الكوكب وسكانه. ورأى أن العالم يمر حالياً بمنعطف حرج، يتصارع مع العديد من التحديات الناجمة عن تغير المناخ، واستنزاف الموارد، والتدهور البيئي. ولضمان مستقبل مستدام ومرن، لابد من تسريع الانتقال إلى مصادر طاقة أنظف ومتجددة. علاوة على ذلك، من الضروري اعتماد إطار عمل للاقتصاد الدائري يعالج بشكل فعال إدارة النفايات ويزيد من استهلاك الموارد. يتضمن انتقال الطاقة المستدامة استبدال مصادر الطاقة القائمة على الوقود الأحفوري ببدائل متجددة، وتتضمن العملية اعتماد تقنيات الطاقة المستدامة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية للحد من انبعاثات غازات الدفيئة والتخفيف من آثار تغير المناخ. ويمكن لاستخدام مصادر الطاقة المستدامة تمكين المجتمعات المحلية من تحقيق الاعتماد على الذات في مجال الطاقة وتعزيز التنمية المستدامة في المناطق الريفية. ويقدم مفهوم الاقتصاد الدائري نهجا رائدا لكل من التصنيع والاستهلاك، فالاقتصاد الدائري هو إطار اقتصادي يتميز بحلقات مغلقة، حيث يمكن الحافظ على جودة وقيمة المواد الخام والمكونات والسلع المكتملة لفترات طويلة. علاوة على ذلك، يستخدم هذا النظام مصادر الطاقة المتجددة لتشغيل أنشطته، وتستلزم العملية تنفيذ تقنيات إعادة التدوير وإعادة الاستخدام وإعادة التصنيع للحفاظ على الموارد والتخفيف من الآثار البيئية. لذلك يمكن أن يكون تنفيذ الاقتصاد الدائري بمثابة وسيلة قيمة للحصول على موارد منخفضة الكربون وتحقيق أهداف الاستدامة بشكل فعال، مدعوماً بالتحول نحو مصادر الطاقة المتجددة، التي لا تستنفد ضمن الأطر الزمنية المناسبة وتسهم في اقتصاد أكثر ملاءمة للبيئة. يوفر هذا المفهوم فوائد اقتصادية كبيرة، مثل خفض النفقات، وتحسين المرونة في سلسلة التوريد، وفرصة توليد أموال إضافية من خلال نماذج الأعمال الدائرية. يجب أن يلتزم إنتاج وإدارة تكنولوجيا الطاقة المتجددة بمبادئ الاستدامة البيئية والاقتصادية والاجتماعية، وفي مضمار تحقيق هذه الأهداف، يمكن لحلول الاقتصاد الدائري أن تقلل بشكل فعال من دورات الموارد وتبطئها وتقضي عليها في النهاية. كما يمكن للمجتمع العالمي تعزيز احتمالية منع تغير المناخ الخطير من خلال الانتقال إلى الاقتصاد الدائري، وبالتالي تمكين المجتمعات من تحقيق الأهداف المحددة في اتفاقية باريس بشأن العمل المناخي، خاصة وأن العديد من الدول أقرت بأهمية الاقتصاد الدائري في تحقيق حالة من الانبعاثات الصافية الصفرية.

رأى هذا الفصل أن أساليب الانتقال المستدام تشمل عادة ثلاثة تغييرات تكنولوجية رئيسية: توفير الطاقة (الطلب)، وكفاءة الإنتاج، واستبدال الوقود الأحفوري بمصادر الطاقة المتجددة المختلفة والطاقة النووية المنخفضة الكربون. وبين أهمية اتخاذ تدابير في مجال السياسة العامة لتوجيه التحول الكهربائي

العالمي نحو نظام مستدام للطاقة والكهرباء ليظل ممكنا ومفيدا من الناحيتين التقنية والاقتصادية، وعلى نطاق واسع، ينبغي -حسب رأي المؤلفين- أن يشمل استخدام الطاقة المتجددة مبادرات لزيادة كفاءة المصادر غير المتجددة والتي لا تزال تلعب دورا أساسيا في خفض التكاليف وتحقيق الاستقرار. وأكد الفصل على أهمية التركيز على قطاع الطاقة الكهربائية لأن هناك إمكانية لتوفير المزيد من الطاقة وتقليل انبعاثات غازات الدفيئة بشكل أكبر من خلال تقنيات الاستخدام النهائي في المباني والمركبات حيث يمكن استرداد كميات هائلة من الحرارة المهدرة. ويمكن التركيز بشكل استراتيجي على تحسين كفاءة الطاقة من خلال إنشاء اتفاق دولي حول هذه الكفاءة يتناول صراحة صناعة الطاقة الكهربائية.

توسع هذا الفصل في شرح النموذج الاقتصادي الخطي، مبيناً أن الثورة الصناعية هي المسؤولة عن ظهوره، حيث أدى تطوير الآلات والتكنولوجيا إلى ظهور التصنيع الشامل والتجارة العالمية، مما قاد إلى ارتفاع كبير في استخراج الموارد والتوسع السريع في السلع الاستهلاكية، ويمكن أن يعزى الارتفاع المفاجئ في الطلب الاستهلاكي إلى السياسات الاقتصادية، والعولمة، واستراتيجيات التسويق التي نشأت في أعقاب الحرب العالمية الثانية، حين تم ضخ كميات هائلة من المنتجات لتلبية الطلب العالمي على السلع، مما عزز تفوق النموذج الخطي.

خلص الفصل إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:

- يمكن تيسير استيعاب العوامل الخارجية من خلال تنفيذ آليات مثل تسعير الكربون، مما يزيد فعليا من التكاليف المرتبطة بالممارسات غير المستدامة.
- ضرورة تخصيص الموارد للبحث والتطوير لتسريع التقدم في التكنولوجيات المستدامة.
- ضرورة تعزيز التعليم والتدريب لتجهيز القوى العاملة بالمهارات اللازمة
- أهمية اتباع نهج تعاوني يضم أصحاب المصلحة من مختلف القطاعات لتطوير حلول شاملة.
- ترتبط اقتصاديات انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري ارتباطا وثيقا، ويمكن أن يساعد الاقتصاد الدائري في تقليل تكاليف انتقال الطاقة من خلال توفير مواد وموارد منخفضة الكربون. فعلى سبيل المثال، تقل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الألومنيوم المعاد تدويره عن 95% من تلك الناتجة عن استخراج الألمنيوم من خاماته الأولية، وبالتالي سوف يساعد إنشاء بنية تحتية لانتقال الطاقة من المواد المدوّرة على الانتقال إلى صافي الصفر.
- يمكن للشركات والحكومات دفع الانتقال نحو مستقبل أكثر استدامة ودائرية من خلال فهم

الفوائد الاقتصادية وآليات التمويل وحوافز السياسات، والنظر إلى إن دمج انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري ليس مجرد واجب أخلاقي ولكنه واجب اقتصادي. ومن خلال تسخير أوجه التآزر بين هذه النماذج، يمكن للمجتمعات أن تمهد الطريق لاقتصادات مرنة ومستدامة وشاملة تعود بالنفع على الكوكب وسكانه.

- في حين أن النموذج الاقتصادي الخطي كان له دور فعال في تشكيل المشهد الاقتصادي للعالم الحديث، فإن حدوده، خاصة فيما يتعلق بالاستدامة، أصبحت واضحة بشكل جلي. وفي خضم السعي العالمي لإيجاد حلول للمشاكل البيئية الملحة، هناك تركيز متزايد على النماذج الاقتصادية الشاملة والمستدامة التي يمكن أن تفيد كلاً من البشر والكوكب على المدى الطويل.
- هناك تحديات للانتقال من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري، وهذا يرجع إلى حقيقة أن الاقتصاد الخطي راسخ بقوة في نظامنا الاقتصادي الحالي. بالإضافة إلى ذلك، قد يتطلب تنفيذ الاقتصاد الدائري نفقات رأسمالية أولية، مما قد يمثل تحديا لبعض الشركات. إنما، وعلى الرغم من هذه التحديات، فإن الآفاق الاقتصادية للاقتصاد الدائري يمكن أن تكون مفيدة، فأسعار الطاقة المتجددة آخذة في الانخفاض، وأصبحت مزايا تقليل التلوث واستخدام الموارد واضحة بشكل متزايد. في المستقبل، من المرجح أن يكون للاقتصاد الدائري دور أكثر بروزا في الانتقال إلى الطاقة المستدامة.

الفصل الثالث: كفاءة الطاقة وتقنيات الطاقة المتجددة

درس هذا الفصل بدقة مجموعة من التقنيات والخطط التي يمكن استخدامها لتحسين كفاءة الطاقة وتشجيع اعتماد مصادر الطاقة المتجددة. وبدأ بدراسة مزايا كفاءة الطاقة، بما في ذلك انخفاض نفقات الطاقة، وتعزيز موثوقية الطاقة، وانخفاض انبعاثات غازات الدفيئة. ثم استكشف العديد من الأساليب لتحسين كفاءة الطاقة، بما في ذلك عمليات التدقيق، وقوانين وأنظمة البناء، وأنظمة إدارة الطاقة. ودرس الفصل تقنيات الطاقة المتجددة، وتحديدا استكشاف الفوائد الاقتصادية والبيئية للطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية وتكنولوجيا الطاقة الحرارية الأرضية. وتم استعراض العديد من أنواع تكنولوجيا الطاقة المتجددة، إلى جانب تقييم شامل لمزايا وعيوب مرتبطة بكل منها. واختتم الفصل بتحليل التحديات والإمكانات المرتبطة بالتبني الواسع النطاق لكفاءة الطاقة وتكنولوجيا الطاقة المتجددة، ويشمل ذلك الحاجة إلى أطر تنظيمية تقدم المساعدة، وسبل التمويل، والتعاون بين القطاعين العام والخاص لتشجيع

اعتماد التكنولوجيا.

بين هذا الفصل أن كفاءة الطاقة هي أفضل طريقة لاستخدام الطاقة لتقديم خدمة كان من الممكن تقديمها باستخدام طريقة أكثر تقليدية وأقل كفاءة، وهي تعني تقليل استهلاك الطاقة مع تحقيق نفس النشاط أو الناتج. وتشمل سياسة الطاقة الشاملة الاستراتيجيات التي تعزز كفاءة الطاقة من خلال استخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح أو الطاقة الكهرومائية، أو عن طريق تعديل متطلبات الطاقة بطريقة تقلل من الاستهلاك الكلي دون المساس بالإنتاج. يمكن أن يعزى تحقيق الاستخدام الفعال للطاقة إلى التطورات في التكنولوجيا، وتحسين تصميم النظم، والتعديلات في السلوك البشري. فعلى سبيل المثال، يتيح استخدام مواد العزل المناسبة في الأماكن الصحيحة للمبنى الحفاظ على درجة حرارة معقولة مع استهلاك طاقة أقل للتدفئة والتبريد. تشمل هذه الميزات إضاءة LED وأنظمة التدفئة والتبريد عالية الكفاءة، ويؤدي اتباع إجراءات كفاءة الطاقة الصحيحة إلى خفض تكلفة الطاقة للشركات، وبالتالي توفير المال للشركات وعملائها. بالإضافة إلى ذلك، فإن الفوائد بيئية أيضاً، حيث يتم تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتقل احتمالية هجمات التآكل البيئي على المعدات والمباني والهياكل، فالعزل المحسن والنوافذ الموفرة للطاقة والتصاميم المعمارية الذكية لديها القدرة على تقليل استخدام الطاقة بشكل كبير في الهياكل السكنية والتجارية. وتتمتع الصناعات بالقدرة على تنفيذ عمليات تصنيع أكثر بساطة، في حين يمكن لقطاع النقل الانتقال إلى استخدام مركبات وأنظمة نقل عام أكثر كفاءة في استهلاك الوقود.

وبحث هذا الفصل في تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الحرارة الجوفية الأرضية والطاقة الكهرومائية وطاقة الكتلة الحيوية، مبيناً أنواعها ومزاياها.

خلص هذا الفصل إلى ما يلي:

- الطريق نحو مستقبل الطاقة المستدامة صعبة لكنها ضرورية، ويشكل دمج كفاءة الطاقة وتكنولوجيا الطاقة المتجددة وسيلة فعالة لمعالجة القضايا البيئية في جميع أنحاء العالم، وتحديدا تغير المناخ واستنفاد الموارد.
- توفر كفاءة الطاقة، باعتبارها الأساس الأول لهذا المسعى، نهجا قابلا للتطبيق ماليا لتقليل استخدام الطاقة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وهو يشمل مجموعة من الأنشطة سواء البسيطة مثل استبدال المصابيح المتوهجة بمصابيح LED، إلى المساعي المعقدة مثل تحسين العمليات الصناعية. وقد يكون الأثر المشترك لهذه الخطوات كبيرا، ليس فقط من حيث البيئة ولكن أيضا من

حيث الوفورات الاقتصادية.

- إن استخدام تكنولوجيات الطاقة المتجددة يعيد تشكيل إطار الطاقة العالمي بسرعة. ويلعب استخدام مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية والكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الأرضية دورا حاسما في التحول بعيدا عن الوقود الأحفوري. تتقدم هذه التقنيات بسرعة، وتصبح أكثر فعالية، وتنافسية من حيث التكلفة بشكل متزايد. إن قدرتها على التوسع، بدءا من التطبيقات المتواضعة خارج الشبكة إلى التركيبات الكبيرة على نطاق المرافق، تسمح لها بأن تكون مرنة ومناسبة لمختلف السياقات والمتطلبات.
- إن دمج كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة ليس مجرد عقبة تقنية، وهو يتطلب استراتيجية متكاملة تشمل التشريعات والتمويل وتطوير السوق والمشاركة المجتمعية بحيث يكون لكل من الحكومات والمنظمات والأفراد مهام حاسمة، ويتعين على صناع السياسات أن يضعوا أطرا تنظيمية مواتية وأن يقدموا الدعم للبحث والتطوير.
- تلعب الابتكارات والنماذج المالية دورا حاسما في جمع الأموال اللازمة لتنفيذ المشاريع على نطاق واسع، ويمكن أن تؤدي زيادة الوعي العام والمشاركة النشطة إلى تسريع القبول وغرس عقلية مجتمعية تركز على الاستدامة.

الفصل الرابع: مبادئ الاقتصاد الدائري: التحول نحو الازدهار المستدام

عمل هذا الفصل على تقديم مفهوم الاقتصاد الدائري كاستراتيجية تحويلية تهدف إلى معالجة القضايا الملحة المتمثلة في استنزاف الموارد والتدهور البيئي وسلوكيات المستهلك غير المستدامة. وتعمق في المبادئ الأساسية للاقتصاد الدائري وقدرته على تسهيل التحول نحو مستقبل يتميز بالاستدامة والازدهار، حيث بدأ بإعادة تقييم مفهوم خلق القيمة، مع التركيز على أهمية تطوير المنتجات مثل المتانة وقابلية الإصلاح وقابلية إعادة التصنيع. واستكشف المبادئ الأساسية لكفاءة الموارد وتدوير المواد، مع التركيز على إعادة التدوير وإعادة التصنيع وتقليل النفايات. كما نظر في من الملكية إلى إمكانية الوصول بحيث يكون اقتصاد المشاركة ضمن مفهوم "المنتج كخدمة"، عنصرا حاسما من الاقتصاد الدائري.

تعمق هذا الفصل في بيان الحاجة إلى تحقيق نظام حلقة مغلقة للمواد عن طريق إعادة التدوير وإعادة الاستخدام، إلى جانب فحص إطار السياسة المعروف باسم مسؤولية المنتج الممتدة (Extended Producer Responsibility). وبحث كذلك في أهمية الرقمنة والتكنولوجيا في تسهيل تنفيذ ممارسات

الاقتصاد الدائري، مع التركيز على القدرات التحويلية لإنترنت الأشياء (IoT)، وتكنولوجيا سلسلة الكتل (Blockchain)، وتحليلات البيانات. ورأى أن تحقيق الازدهار المستدام يتطلب اعتماد نهج شامل يأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والاجتماعية والبيئية. كما قدم هذا الفصل تحليلا للمزايا الاقتصادية المرتبطة بالاقتصاد الدائري، فضلا عن آثاره الاجتماعية وشموليته. واستكشف أهمية الأطر التنظيمية والتعاون الدولي في هذا السياق.

بين هذا الفصل معنى اقتصاد المشاركة بأنه الذي يشار إليه غالبا باسم الاستهلاك التعاوني، ويعني ممارسة مشاركة الموارد أو السلع أو الخدمات بين الأفراد والمجتمعات بدلا من الاعتماد فقط على الملكية. يستفيد هذا النموذج من مبادئ الاقتصاد الدائري من خلال إطالة عمر المنتجات، وتحسين استخدام الموارد، وتقليل الاستهلاك المفرط. وأوضح أنه على الرغم من فوائده العديدة، يواجه اقتصاد المشاركة تحديات تتطلب دراسة متأنية مثل الثقة والخصوصية، كما يجب معالجة الأطر التنظيمية لضمان أمن وسلامة تقاسم المعاملات. وعلاوة على ذلك، ينبغي لاقتصاد المشاركة أن يكمل نماذج الأعمال القائمة لا أن يحل محلها، وينبغي بذل الجهود لضمان الشمولية وإمكانية الوصول لجميع أفراد المجتمع. وأكد أن اقتصاد المشاركة يعزز الاستخدام المشترك للموارد، مما يقلل من الطلب الإجمالي على المنتجات الجديدة، مشاركة السيارات والدراجات ومساحات العمل المشتركة، تعد أمثلة ممتازة على مبادرات الاقتصاد التشاركي. ويمكن للشركات من خلال تسهيل منصات تقاسم الموارد، تعزيز أنماط الاستهلاك المستدامة.

خلص هذا الفصل إلى ما يلي:

- إن تبني الاقتصاد التشاركي هو ممارسة تتوافق بشكل وثيق مع مبادئ الاقتصاد الدائري. ويشجع اقتصاد المشاركة الأفراد والشركات على مشاركة الموارد والمنتجات والخدمات، وبالتالي تعظيم الاستفادة من الأصول الحالية وتقليل الحاجة إلى الإنتاج المفرط.
- يقدم الاقتصاد الدائري مسارا قابلا للتطبيق ومستداما نحو مستقبل أكثر ازدهارا ومرونة. من خلال تبني الممارسات الدائرية على جميع مستويات المجتمع، من الأفراد إلى الشركات متعددة الجنسيات.
- تلعب الحكومات دورا حاسما في تعزيز الاقتصاد الدائري من خلال السياسات واللوائح الداعمة. ويمكن أن يؤدي توفير حوافز للممارسات الدائرية وتحديد أهداف إعادة التدوير وخلق بيئة أعمال مواتية إلى تسريع اعتماد المبادئ الدائرية عبر مختلف الصناعات.

الفصل الخامس: التمويل المستدام لممارسات الحوكمة البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات

شهد قطاع الشركات دمجا متزايدا للسياسات البيئية والاجتماعية والحوكمة (ESG) حيث أصبح المستثمرون والشركات والمستهلكون أكثر إدراكا لأهمية ممارسات الأعمال الأخلاقية والمستدامة. ومع ذلك، فإن تحقيق أهداف ESG يتطلب في كثير من الأحيان استثمارات مالية كبيرة وتفانيا دائما. بحث هذا الفصل في بدائل التمويل المستدام المتنوعة التي يمكن للمؤسسات استخدامها لتنفيذ ودمج معايير ESG في أنشطتها التجارية. وتم النظر في الطريقة التي يسهّل بها التمويل المستدام تنفيذ المبادرات البيئية والاجتماعية والحوكمة ويحقق نتائج إيجابية. وشمل هذا التحليل كلا من الأدوات المالية التقليدية وبدائل التمويل الجديدة.

بيّن هذا الفصل أن ممارسات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة تشمل دمج جوانب مختلفة من العمليات التجارية وقرارات الاستثمار واستراتيجيات الشركات. ويمتد تأثير هذه الممارسات إلى ما هو أبعد من أدائها الشركات المالي، ليشمل مساهماتها في المجتمع والبيئة والحوكمة الشاملة. وأوضح أهمية ممارسات الحوكمة البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات، من النواحي التالية:

1- ناحية تخفيف المخاطر: تساعد ممارسات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة الشركات في تحديد وإدارة المخاطر البيئية والاجتماعية المحتملة والتغييرات التنظيمية وأوجه القصور في الحوكمة، من خلال معالجة هذه المخاطر بشكل استباقي، حيث يمكن للشركات زيادة مرونتها على المدى الطويل وحماية قيمة المساهمين.

2- التنظيم المعزز: تتمتع الشركات التي لديها ممارسات عوامل بيئية واجتماعية وحوكمة قوية عادة بسمعة إيجابية مع المستهلكين والمستثمرين والموظفين. يمكن أن يؤدي ذلك إلى زيادة الولاء للعلامة التجارية، وجذب المستثمرين المسؤولين اجتماعيا، والمساعدة في توظيف المواهب والاحتفاظ بها.

3- الوصول إلى رأس المال: يأخذ المستثمرون في الاعتبار بشكل متزايد العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة عند اتخاذ قرارات الاستثمار. يزيد الأداء القوي للحوكمة البيئية والاجتماعية وحوكمة الشركات من احتمالية جذب الشركة لرأس المال من المستثمرين المسؤولين اجتماعيا والوصول إلى خيارات التمويل المستدامة.

4- ميزة تنافسية: يمكن أن يوفر اعتماد هذه الممارسات ميزة تنافسية للشركات في السوق، إذ يهتم

المستهلكون بشكل متزايد بشراء السلع والخدمات من الشركات المسؤولة اجتماعيا، وزيادة حصتها في السوق وولاء المستهلك.

5- خلق القيمة على المدى الطويل : تركز ممارسات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة على الأعمال المستدامة والمسؤولة، مما يؤدي إلى خلق قيمة طويلة الأجل للمساهمين والموظفين والمجتمع. كما تتوافق مع أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة، وهي مجموعة من سبعة عشر هدفا عالميا مصممة لحل التحديات البيئية والاجتماعية والاقتصادية الأكثر إلحاحا في العالم.

أوضح هذا الفصل إلى التحديات والعوائق التي تحول دون التعاون، حيث أشار إلى الأهداف والأولويات المختلفة للقطاعين العام والخاص، مما يؤدي إلى صراعات أو تحديات محتملة في إيجاد أرضية مشتركة. وقد تعطي الكيانات الحكومية الأولوية للمصلحة العامة والرعاية الاجتماعية، بينما تركز الشركات على تعظيم الأرباح وقيمة المساهمين. ومن هذه التحديات كذلك التعقيدات التنظيمية والقانونية عبر القطاعات المختلفة والتي غالبا ما تعمل في ظل أطر متمايزة، ويمكن أن يستغرق التغلب على هذه الحواجز القانونية وقتا طويلا ويتطلب موارد مكثفة. ومن التحديات كذلك توزيع المخاطر ومواءمة الحوافز، حيث تنطوي الشراكات بين القطاعين العام والخاص على ترتيبات لتقاسم المخاطر، تتطلب دراسة متأنية لتوزيع هذه المخاطر، وهنا يبرز تحقيق التوازن بين المخاطر والمكافآت لكلا القطاعين كأمر ضروري لضمان الالتزام المتبادل والنجاح في الشراكة. كما تعتبر الشفافية والمساءلة أمران حاسمان لنجاح التعاون بين القطاعين العام والخاص، فوجود اتصالات واضحة وآليات إبلاغ وهياكل حوكمة، تعتبر ضمانات أساسية للحفاظ على الثقة والشرعية لكل خطوة.

خلص الفصل الخامس إلى ما يلي:

- تطورت مبادئ ممارسات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة من مفهوم متخصص إلى ضرورة تجارية سائدة. برز دمج مبادئ هذه الممارسات في القرارات المالية كعامل تمكين رئيسي لممارسات الأعمال المسؤولة والمستدامة والتأثير على قرارات الاستثمار، وإعادة تشكيل المشهد المالي العالمي في المستقبل. ونتيجة لأوجه القصور في الممارسات المالية التقليدية في التقاط مجموعة كاملة من المخاطر والفرص المرتبطة بالاستدامة، تم التأكيد على الحاجة إلى حلول تمويل مستدامة لدعم مبادرات الحوكمة البيئية والاجتماعية والمؤسسية.
- درست الأدوات التقليدية مثل السندات الخضراء، والسندات الاجتماعية، والقروض المرتبطة

بالاستدامة والتي اكتسبت زخما مؤخرا، باعتبارها وسائل قابلة للتطبيق للتمويل المستدام. بالإضافة إلى ذلك، استكشف الفصل آليات التمويل المستدام المبتكرة، مثل تمويل التكنولوجيا الخضراء، وتمويل سلسلة التوريد المستدامة، والاستثمار المؤثر، مما يدل على إمكانات هذه الاتجاهات الناشئة لإحداث تغيير تحويلي في مختلف القطاعات.

- تعد الشراكات بين القطاعين العام والخاص ضرورية لتمويل مشاريع ممارسات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة واسعة النطاق، ومن المسلم به أن التعاون بين القطاعين العام والخاص محفز مهم لمبادرات التمويل المستدام.
- تم النظر في فعالية الحوافز الحكومية، بما في ذلك الإعفاءات الضريبية والمنح والإعانات، في تشجيع ممارسات الحكمة المستدامة والتأثير على بيئة التمويل المستدام بشكل عام. وتبين أن التمويل المستدام للأنشطة البيئية والاجتماعية والحوكمة ليس مجرد بدعة عابرة، بل هو حاجة لتحقيق مستقبل أكثر استدامة ومرونة.
- تتمتع الشركات والمستثمرون والحكومات بالقدرة على تعزيز مجتمع عادل ودائم وناجح بشكل تعاوني من خلال ضمان توافق القرارات المالية مع المبادئ البيئية والاجتماعية والحوكمة، ويوفر تطوير التمويل المستدام أداة قوية لخلق تأثير جيد وتوليد قيمة طويلة الأمد للبيئة والأجيال القادمة.

الفصل السادس: استراتيجيات الاستثمار المستدام لمشاريع الطاقة المتجددة والاقتصاد الدائري

استراتيجيات الاستثمار المستدام هي استراتيجيات تسعى إلى تحقيق عوائد مالية مع وجود تأثير إيجابي على المجتمع أو البيئة. يمكن استخدام هذه الاستراتيجيات لتمويل مشاريع الطاقة المتجددة والاقتصاد الدائري، والتي تعتبر ضرورية لمعالجة تغير المناخ والتحديات البيئية الأخرى.

يسعى الاستثمار المستدام، بشكل أساسي، إلى التطابق بين التأثيرات البيئية والاجتماعية والحوكمة الإيجابية والربحية المالية. حدد هذا الفصل مختلف مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية، مع التأكيد على سبل الاستثمار المرتبطة بها مثل الاستثمارات المباشرة والسندات الخضراء ورأس المال الاستثماري. وتم شرح الفروق الدقيقة في الاقتصاد الدائري، والتي تتميز بتقليل النفايات وكفاءة الموارد، مصحوبة باستراتيجيات الاستثمار ذات الصلة مثل صناديق الأسهم الخاصة والابتكار. تم تحليل العوامل المؤثرة مثل الأطر التنظيمية والتقدم التكنولوجي وضغوط أصحاب المصلحة والحوافز المالية، وجرى استعراض التحديات مثل التكاليف الأولية وعدم القدرة على التنبؤ بالسوق. افترض

الفصل حلولا ترتكز على التنويع والشراكات والتعلم المستمر. ومن خلال دراسات الحالة، وضع هذا الفصل الاستثمار المستدام كخيار أخلاقي واستراتيجية مالية محورية في عالم اليوم.

رأى الفصل أن الوعي المتزايد بالموارد المحدودة للأرض، والرغبة في تأمين رفاهية الأجيال القادمة، يعيدان تشكيل وجهات نظرنا بشأن النمو والقيمة والازدهار. ومن الأمور الأساسية في هذا التحول مفهوم الاستثمار المستدام، وهو نهج شامل يمزج بين الربحية والرفاه الأوسع للمجتمع والبيئة، ورأى أن الأيام التي كان فيها العائد النقدي هو المقياس الوحيد لنجاح الاستثمار، قد ولت إلى غير رجعة.

وبين أن سبل الاستثمار في مشاريع الاقتصاد الدائري تتمثل في الاستثمار مباشرة في الشركات التي تعمل على أساس مبادئ الاقتصاد الدائري أو في البنى التحتية التي تدعم النموذج الدائري. أو في تمويل الشركات الدائرية الناضجة أو الشركات الناشئة التي تدعم الحلول الدائرية المبتكرة. ومن بين سبل الاستثمار كذلك الأدوات المالية المخصصة لدعم مشاريع الاقتصاد الدائري، علاوة على صناديق الابتكار التي تم تصميمها للتقنيات والحلول المبتكرة التي تعزز التدوير، مثل تقنيات إعادة التدوير المتقدمة.

وأشار إلى أن العلاقات والديناميكيات التجارية يمكن أن تؤثر على توافر وتكلفة التقنيات أو الحلول المستدامة، وغالبا ما تكون البيئات السياسية المستقرة أكثر ملاءمة للاستثمارات المستدامة طويلة الأجل، في حين أن المناطق المتقلبة قد تشهد استثمارات قصيرة الأجل تتجنب المخاطر.

خلص هذا الفصل إلى ما يلي:

- لقد جلب القرن الحادي والعشرون معه إدراكا واضحاً بأن الأساليب التي غذت تقدمنا الصناعي والتكنولوجي السريع في القرن الماضي لا يمكن الدفاع عنها. فقد أدى الوقود الأحفوري، وعمليات التصنيع المسرفة، وثقافة المستهلك ذات الاستخدام الواحد إلى استنفاد موارد الكوكب وتعطيل توازنه البيئي الدقيق.
- لم يعد تغير المناخ والتلوث وفقدان التنوع البيولوجي تهديدات نظرية بل حقائق ملحة. وفي هذا السيناريو، فإن الاستثمار المستدام ليس مجرد استجابة؛ بل هو أيضا استجابة للاستثمار، وهو إعادة تقويم الأولويات العالمية نحو البقاء والازدهار على المدى الطويل.
- رغم تحديات التكاليف وعدم شفافية المعلومات وعدم اليقين وانخفاض العوائد، إلا أن هذه التحديات ليست مستعصية على الحل. وتتطلب معالجة كل منها تضافر جهود الشركات والحكومات والمستثمرين والمجتمع المدني.

- تبرر المكافآت المحتملة -سواء من حيث العوائد المالية أو التأثير المجتمعي الإيجابي- المسعى الجماعي للتغلب على هذه العقبات. ومن خلال العمل التعاوني، والتعلم المستمر، والإبداع، يستطيع المجتمع العالمي أن يضمن تحول الاستثمار المستدام إلى القاعدة وليس الاستثناء.
- يمكن تبيّن تحول ملحوظ في المشهد المالي العالمي. فالاستثمار المستدام الذي كان ينظر إليه ذات يوم على أنه اقتراح متخصص أو محفوف بالمخاطر، قد رسخ مكانه الصحيح في قلب استراتيجية الاستثمار العالمية.
- هناك أهمية متزايدة لتفهم آلية الاستثمار المستدام وآليات عمل الطاقة المتجددة ومشاريع الاقتصاد الدائري.

الفصل السابع: إطار السياسات لانتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري

تعمق هذا الفصل في إيضاح الترابط بين انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري في مجال صنع السياسات. فمع تزايد المخاوف البيئية، هناك دعوة ملحة لإطار سياسة ينسج هذين المفهومين في مخطط موحد لمستقبل أخضر. في البداية، أوضح الفصل بإيجاز انتقال الطاقة المستدامة، مع التركيز على التحول من الموارد غير المتجددة إلى الموارد المتجددة والاقتصاد الدائري، الذي يدعو إلى تحسين الموارد من خلال إعادة الاستخدام وإعادة التدوير والتجديد. وناقش العناصر الأساسية لإطار السياسات القابل للتطبيق، بدءا من وضع الرؤية وهياكل الحوافز إلى التشريعات والتعليم العام. علاوة على ذلك، حدد الفصل التحديات الاقتصادية والتكنولوجية والاجتماعية والثقافية المحتملة في مسار تنفيذ السياسات.

ومن خلال دراسات الحالة، حاول هذا الفصل إلقاء نظرة متفحصة للتطبيقات الواقعية لهذه السياسات، مبيناً ضرورة وجود إطار سياسي متكامل لسد الفجوة بين انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري.

وضرب أمثلة عن ريادة الدنمارك التي تتمتع بتاريخ طويل في دعم الطاقة المتجددة وقد وضعت أهدافا طموحة لاستخدام طاقة الرياح، وجهود اليابان الرائدة في الاقتصاد الدائري، والتي تتمتع بتاريخ طويل من كفاءة الموارد والحد من النفايات وقد عززت مؤخرا بنشاط الاقتصاد الدائري.

خلص هذا الفصل إلى ما يلي:

- إن إطار السياسة الموحد الذي يدمج انتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري ليس مفيدا فقط لمواجهة تحديات عصرنا، بل هو ضرورة يمكن للدول من خلاله أن تمهد الطريق لمستقبل أكثر

استدامة وكفاءة وتجديدا.

- يعد الانتقال إلى نظام طاقة مستدام واقتصاد دائري مسعى صعبا ومعقدا، لكنه ضروري إذا أردنا حل التحديات البيئية التي نواجهها اليوم. ويمكن أن يكون إطار السياسات حيويا في جعل هذا الانتقال حقيقة واقعة. ويجب أن يكون إطار السياسة العامة شاملا وطموحا، ويجب أن يعالج مجموعة واسعة من القضايا، مثل:
  - وضع معايير لكفاءة الطاقة والطاقة المتجددة وإدارة النفايات.
  - توفير حوافز للاستثمار في التكنولوجيات المستدامة وتعزيز البحث والتطوير في مجال التكنولوجيات الحديثة تثقيف الجمهور حول الممارسات المستدامة.
  - خلق بيئة تنظيمية داعمة ضمن إطار سياسة عامة مرن للتكيف مع الاحتياجات المتغيرة للمجتمع والاقتصاد.

الفصل الثامن: المسؤولية الاجتماعية للشركات (CSR) وتقارير الحوكمة الإلكترونية: إعادة تعريف الأعمال في القرن الحادي والعشرين

مع بداية القرن الحادي والعشرين، أعيد تقييم الأهداف التقليدية للشركات والتي تتمحور في المقام الأول حول تعظيم الأرباح. ويقر توافق الآراء الناشئ بضرورة قيام الشركات بدور بناء في معالجة بعض التحديات الملحة التي تواجه المجتمع والبيئة. هذا التحول مغلف في مفاهيم المسؤولية الاجتماعية للشركات، والممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة، ويشمل حالياً مجموعة واسعة من الممارسات الأخلاقية من العمل إلى الاعتبارات البيئية. تقدم مفاهيم المسؤولية الاجتماعية للشركات بمقاييسها القابلة للقياس الكمي، نهجا تجريبيا لتقييم أداء الشركة في هذه المجالات. ويمثل ظهور تقارير مفاهيم المسؤولية الاجتماعية للشركات تحولا نحو الشفافية، إنما تبقى هناك تحديات مثل الافتقار إلى التوحيد القياسي واستمرار ما يسمى بالغسل الأخضر*. وبالنظر إلى المستقبل، فإن التفويضات التنظيمية، والتكامل التكنولوجي، وتغيير توقعات أصحاب المصلحة، وخاصة من الأجيال الشابة، ستشكل مستقبل المسؤولية الاجتماعية للشركات خاصة

* الغسل الأخضر: خداع المستهلك باسم البيئة، وهو مصطلح يشير إلى قيام بعض شركات بتسويق منتجاتها أو خدماتها على أنها صديقة للبيئة أو مستدامة، في حين أن الواقع قد يختلف تماماً. هذه الشركات تستخدم لغة متحايلة وصوراً جذابة لخداع المستهلكين الذين يبحثون عن خيارات بيئية حقيقية. وهناك العديد من الطرق التي تستخدمها الشركات لممارسة الغسل الأخضر، من بينها: المزاعم المبهمة: كاستخدام عبارات عامة وغير محددة مثل "صديق للبيئة" أو "طبيعي" دون تقديم أدلة ملموسة. أو تسليط الضوء على ميزة بيئية واحدة في المنتج، مثل إعادة تدوير العبوة، وتجاهل الآثار البيئية الأخرى. أو استخدام صور طبيعية خلابة لإقناع المستهلكين بأن المنتج مرتبط بالبيئة. أو إنشاء شهادات بيئية غير معترف بها لإضفاء المصداقية على المنتج. أو مقارنة المنتج بمنتجات أخرى ذات آثار بيئية أسوأ، مما يجعله يبدو أكثر استدامة، أو بيع حصص الكربون، وغيرها. (المُراجع).

وأن الشركات قد برزت مؤخراً ككيانات عالمية مسؤولة، تمزج النجاح مع الرفاهية الاجتماعية.

يعرف الفصل المسؤولية الاجتماعية للشركات بأنها مجموعة واسعة من المبادرات، بما في ذلك العمل الخيري والمشاركة المجتمعية ورفاهية الموظفين والاستدامة البيئية. وهي نموذج أعمال يمكن الشركات من أن تكون مسؤولة اجتماعيا أمام نفسها وأصحاب المصلحة والجمهور. وهو يدل على تفاني الشركة في المساهمة في التنمية المستدامة من خلال توفير الفوائد الاقتصادية والاجتماعية والبيئية.

ضمن هذه الأطر، هناك مسؤوليات قانونية تشير إلى الالتزامات التي يجب أن تعمل بها الشركات ضمن المعايير التي تحددها القوانين واللوائح. تضمن هذه المسؤوليات أن تتصرف الشركات بطريقة تحترم الحقوق وتحمي المستهلكين وتحافظ على النظام الاجتماعي والاقتصادي الأوسع، وتشمل في أبسط مستوياتها الالتزام بالقوانين المحلية والوطنية والدولية التي تحكم العمليات التجارية.

تقوم التقارير بتقييم أداء الشركة بناء على العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة. وتشمل العوامل البيئية تغير المناخ واستخدام الموارد والتلوث. تتناول العوامل الاجتماعية ممارسات العمل وتنوع الموظفين والعلاقات المجتمعية، بينما تشمل عوامل الحوكمة قيادة الشركة وشفافيتها والتزامها بالممارسات التجارية الأخلاقية.

تنبع أهمية تقارير المسؤولية الاجتماعية للشركات وتقارير العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة من حقيقة تمكينها للشركات من التنبؤ بالمخاطر المحتملة، لا سيما في سلاسل التوريد أو المناطق التشغيلية. كما تساهم في معالجة قضايا مثل النزاعات العمالية أو الحوادث البيئية أو العلاقات المجتمعية بشكل استباقي، وبالتالي حماية العلامة التجارية وضمان استمرارية العمل والاستثمار.

خلص الفصل الثامن إلى النقاط التالية:

- يجب على الشركات تبني هذه الممارسات كتدابير امتثال وفرص لدفع النمو المستدام والتأثير بشكل إيجابي على المجتمع والبيئة. وإذ يشهد مشهد الأعمال في القرن الحادي والعشرين تحولا جذريا، فلم يعد بإمكان المنظمات رؤية النجاح حصريا من خلال عدسة المنفعة المالية، بل تشكل الربحية والتحسين المجتمعي والإشراف البيئي مقياس النجاح الحديث للشركات.
- تمثل تقارير المسؤولية الاجتماعية للشركات والعوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة، انعكاساً لمجتمع عالمي يتوقع المزيد من أعماله. يصوت المستثمرون والمستهلكون برؤوس أموالهم وقوتهم الشرائية، مما يضغط على الشركات لمواءمة استراتيجياتها مع القيم المجتمعية الأوسع. والشركات

التي تتبنى هذه النماذج ستكتسب سمعة وولاء للعلامة التجارية وتكتشف فرصا جديدة للتطوير والابتكار.

- تم تجهيز الشركات بالأدوات التي تعزز مبادرات المسؤولية الاجتماعية للشركات العوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة من خلال دمج التقنيات المتقدمة. تضمن هذه التقنيات الشفافية، وتسهل مشاركة أصحاب المصلحة المحسنة، وتسمح بزيادة استخدام الموارد. ومع ذلك، جنبا إلى جنب مع هذه التطورات تأتي العقبات. إن الغسل الأخضر والمقاييس الغامضة وإمكانية الامتثال السطحي تذكرنا بأهمية الالتزام الحقيقي والتدقيق المستمر. سيضمن الإبلاغ الموحد والمشاركة المستمرة لأصحاب المصلحة أن تحافظ الشركات على المساءلة.
- إن مشهد الأعمال في القرن الحادي والعشرين لا يتسم فقط بالابتكارات في مجال التكنولوجيا، أو ديناميكيات السوق العالمية، أو تفضيلات المستهلكين المتطورة، إنما تتم إعادة تعريفه من خلال الاعتراف العميق بأدوار الشركات كأصحاب مصلحة متكاملين في سياق مجتمعي وبيئي أكبر، ومن المتوقع أن تنظر الشركات اليوم إلى ما هو أبعد من الربحية كمقياس وحيد للنجاح. هذا التحول في روح العمل مدفوع بمجموعة من العوامل:
  - من خلال تمكين المعلومات والاتصال، يطالب أصحاب المصلحة - من المستهلكين إلى المستثمرين - بالشفافية والأخلاق والالتزام الحقيقي برفاهية المجتمع.
  - التحديات العالمية: قضايا مثل تغير المناخ وعدم المساواة.
  - يتطلب استغلال الموارد عملا جماعيا، حيث تلعب الشركات دورا محوريا.
  - على الرغم من أهميته، فإن الأداء المالي لا يمثل إلا أحد معايير نجاح الأعمال.
  - تدرك الشركات أن معالجة التحديات الاجتماعية والبيئية يضمن الاستدامة والمرونة على المدى الطويل.
- في حين أن الرحلة نحو الدمج الكامل لمبادئ تقارير المسؤولية الاجتماعية للشركات والعوامل البيئية والاجتماعية والحوكمة هي رحلة محفوفة بالتحديات من التنقل في اللوائح المعقدة إلى تحقيق التوازن بين مصالح أصحاب المصلحة، فإن الاتجاه واضح، إذ من المتوقع أن تكون الأعمال التجارية في القرن الحادي والعشرين أكثر من مجرد كيانات اقتصادية.

الفصل التاسع: تقييم الأثر البيئي وتحول الطاقة المستدامة

رأى هذا الفصل أن تقييم الأثر البيئي هو أداة قيمة لتقييم العواقب البيئية المرتبطة بكل من مبادرات الطاقة المتجددة، مثل مزارع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وتعهدات الطاقة غير المتجددة، مثل محطات الطاقة التي تعمل بالفحم الحجري، ويمكن لتقييم الأثر البيئي أيضا تقييم الآثار البيئية لسياسات الطاقة، مثل تسعير الكربون أو معايير كفاءة الطاقة. أما الهدف الرئيسي منه في سياق الاستدامة فهو التأكد من التداعيات البيئية المحتملة المرتبطة بالمشاريع والسياسات المقترحة وتقييمها.

ضرب هذا الفصل أمثلة عن تقييم الأثر البيئي في عدة مناطق من العالم، مثل الولايات المتحدة حيث ينص قانون السياسة البيئية الوطنية (NEPA) على تنفيذ تقييمات الأثر البيئي لجميع المشاريع الفيدرالية التي يحتمل أن تسبب عواقب بيئية كبيرة. وقد خفف هذا الإجراء بشكل فعال من الآثار البيئية المرتبطة بمشاريع الطاقة، بما في ذلك على سبيل المثال لا الحصر انسكابات النفط وتلوث الهواء. وفي الاتحاد الأوروبي، يفرض توجيه التقييم البيئي الاستراتيجي (SEA) تنفيذ تقييمات الأثر البيئي لأي خطط وبرامج جوهرية يحتمل أن تؤثر على البيئة. وفي الصين، يعد تنفيذ تقييم الأثر البيئي إلزاميا بالنسبة لجميع المبادرات الهامة المتعلقة بالطاقة. وقد خفف هذا الإجراء بشكل فعال من العواقب البيئية المرتبطة بتوليد الطاقة في الصين، خاصة وأنها المساهم الأول في انبعاثات غازات الدفيئة العالمية.

وضمن مفهوم تحول الطاقة، ذكر هذا الفصل أن تقييم الأثر البيئي لا غنى عنه، إذ بات المجتمع العالمي مترابطاً بشكل متزايد، ويوجد طلب مستمر متنامٍ على الطاقة مرتبط بنمو الاقتصادات، وزيادة عدد السكان. من جهة أخرى، هناك تداعيات عميقة لتغير المناخ، تقترن مع التدهور البيئي المتصاعد، وتؤكد الطبيعة الحتمية لحماية البيئة. لذلك يمكن اعتبار المهمة المعقدة المتمثلة في التوفيق بين الحاجة المتزايدة للطاقة وضرورة الحفاظ على البيئة واحدة من القضايا الحاسمة في العصر الحالي.

كما بين الفصل أن جهود البحث والتطوير المستمرة تساهم في تطوير تقنيات الطاقة المتجددة وحلول التخزين، وبالتالي تعزيز كفاءة توليد الطاقة وضمان اتساقها وموثوقيتها، لكن من الضروري الاعتراف بأنه حتى مصادر الطاقة المتجددة ليست معفاة من التسبب في عواقب بيئية. إذ تستلزم عملية تصنيع الألواح الشمسية استخدام مواد كيميائية تكون خطرة، وقد لوحظ أن توربينات الرياح تؤثر على مجموعات الطيور، والطاقة الكهرومائية لديها القدرة على خلق اضطراب في النظم الإيكولوجية المائية.

خلص الفصل التاسع إلى النقاط التالية:

- إن الحاجة إلى انتقال الطاقة المستدامة في جميع أنحاء العالم أمر في غاية الأهمية، لا سيما استجابة للقلق المتزايد بشأن تغير المناخ والضغط المتنامي على احتياطيات الوقود الأحفوري المحدودة.
- تمتلك تقييمات الأثر البيئي جوانب إيجابية وسلبية. وينطوي أحد المنظورات على إجراء تقييم نقدي للعواقب السلبية المحتملة المرتبطة بمشاريع الطاقة، مما يمكن صناع القرار من اتخاذ خيارات تتجاوز العوامل الاقتصادية البحتة. كما أنها توجد فرصا للإبداع من خلال تحديد المناطق التي تستلزم تدابير التخفيف، وبالتالي تحفيز الابتكارات في نشر الطاقة من المنظورين التكنولوجي والاستراتيجي. وتمنع هذه التحليلات الظهور غير المقصود لقضايا بيئية إضافية ناتجة عن تنفيذ تقنيات الطاقة المتجددة مثل الطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الحيوية وغيرها.
- مع تزايد أهمية التحول نحو الطاقة المتجددة، تزداد أهمية أنظمة تخزين الطاقة لتلعب دورا حاسما في الحفاظ على توفير طاقة متسق يمكن الاعتماد عليه، ويمتد إلى ما هو أبعد من وظيفته كمجرد ضمان ضد الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة.
- على الرغم من وجود العديد من العقبات التي يجب التغلب عليها في المستقبل، فإن استخدام تقييم الأثر البيئي يقدم خطة استراتيجية تدير بفعالية العلاقة المعقدة بين التنمية وبين الحفاظ على الموارد.

الفصل العاشر: الأبعاد الاجتماعية والحوكمة لانتقال الطاقة المستدام والاقتصاد الدائري

بحث هذا الفصل في الأدوار المهمة التي تلعبها العوامل الاجتماعية والحوكمة في تحقيق انتقال مستدام للطاقة وتبني الاقتصاد الدائري. قدم الفصل تعريفات دقيقة لانتقال الطاقة المستدام والاقتصاد الدائري، مع تسليط الضوء على أهميتهما الحاسمة في تحقيق كل من الاستدامة البيئية والتقدم الاقتصادي. ودرس الجوانب الاجتماعية، بما في ذلك تأثير مبادرات الطاقة المستدامة على خلق فرص العمل، ونوعية الحياة، وإمكانية الوصول إلى الطاقة، لا سيما في المجتمعات الفقيرة. واستكشف هذا الفصل الصعوبات المتعلقة بالحوكمة، وتحديدا في تقييم فعالية السياسات الحكومية والتعاون الدولي في تعزيز الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة. كما تم إجراء دراسة شاملة لفحص مبادئ التعميم الاقتصادي وأهميته في النهوض بالإدارة المستدامة

للموارد. وربما كان الهدف الأساسي من هذا الفصل هو إيضاح العلاقة بين ممارسات الاقتصاد الدائري والطاقة المستدامة. بالإضافة إلى ذلك، قيم الفصل التداعيات المجتمعية والهياكل التنظيمية اللازمة للحفاظ على الاقتصاد الدائري، وقدم دراسات حالة وعرض أفضل الممارسات لتجسيد التطبيقات العملية، وتحليل الجوانب الأساسية التي تساهم في فعاليتها.

عرف هذا الفصل الاقتصاد الدائري بأنه تحول من النموذج الخطي التقليدي "الاستخراج والإنتاج والتخلص" إلى نظام يقضي على النفايات ، ويعزز الاستخدام المستمر للمنتجات والمواد ، وينشط النظم البيئية الطبيعية، وذلك لإعادة استخدام وإصلاح وتجديد وإعادة تدوير المنتجات والمواد لبناء نظام الحلقة المغلقة بهدف تقليل استخدام الموارد وتقليل النفايات والتلوث وانبعاثات الكربون*. ثم بين أن الاقتصاد الدائري يقوم على ثلاثة مبادئ أساسية، هي:

1- تنفيذ استراتيجية للحد من النفايات والتلوث من خلال إعادة النظر في المنتجات والعمليات وإعادة تشكيلها إلى القضاء التام على النفايات بدلا من معالجتها فقط كأثر لاحق.
2- ضمان الاستخدام المستمر للمنتجات والموارد، حيث تبرز الحاجة لإنشاء تصاميم تعطي الأولوية للاستمرار طويل المدى، وإعادة الاستخدام ، وإعادة التصنيع ، وإعادة التدوير للحفاظ على تداول المواد داخل الاقتصاد.
3- تحسين النظم الطبيعية من خلال إعادة إدخال العناصر الغذائية الحيوية في البيئة واستخدام مصادر الطاقة المتجددة.

وبين الفصل كذلك أهمية الاقتصاد الدائري التي تتجلى من خلال العديد من المبادرات الدولية والمحلية، مما يسلط الضوء على إمكاناته الكبيرة. وتشمل هذه المبادرات مشاريع محلية تركز على تقليل النفايات واستخدام المواد المستدامة في المناطق الحضرية، فضلا عن الشراكات العالمية التي تهدف إلى التخفيف من التلوث البلاستيكي في البحر. وبالرغم من أن لكل من المبادرات العالمية والمحلية خصائص متميزة ولكنها متكاملة في تسهيل التحول نحو الطاقة المستدامة، ذلك أن هذه المبادرات العالمية تضع أهدافا شاملة وتعزز تبادل الموارد والمعلومات، ولكن المبادرات المحلية هي التي لا غنى عنها لتنفيذ الظروف الفريدة لمناطق محددة والتكيف معها.

---

* ورد هذا التعريف في فصول سابقة ضمن الكتاب.

خلص هذا الفصل إلى عدة نقاط من بينها:

- أهمية التعليم والتوعية العامة إذ يعد تعزيز التعليم وتنمية الوعي العام أمرا ضروريا لخلق بيئة اجتماعية تحتضن أفكار الاقتصاد الدائري. ويستلزم ذلك دمج هذه المبادئ في المناهج التعليمية وتنظيم حملات توعية عامة لتعزيز مزايا الاقتصاد الدائري.
- يعد دمج التطورات التكنولوجية أمرا بالغ الأهمية لتسهيل الاقتصاد الدائري. كما أن التقدم في مجالات علوم المواد والتكنولوجيا الرقمية وتصميم المنتجات مهم للغاية، ويبرز نفس القدر من الأهمية عند إنشاء البنية التحتية الأساسية لجمع المواد وإعادة تدويرها وإعادة تجميعها.
- من المتوقع أن يكون لمفهوم الاقتصاد الدائري تأثير حاسم على دفع عجلة التنمية المستدامة في المستقبل. وسيعتمد التنفيذ السليم لهذا النهج على التقدم في أطر الشركات، ومبادرات السياسات، والاختراقات التكنولوجية.
- يمثل الاقتصاد الدائري استراتيجية مبتكرة لتحسين استهلاك الموارد بما يتماشى مع أهداف التنمية المستدامة. من خلال تقييم وإعادة هيكلة أساليب التصنيع والاستخدام، ولدى المهتمين القدرة على إنشاء بيئة عالمية مستدامة بيئيا وقابلة للتكيف ومربحة ماليا.

الفصل الحادي عشر: التحديات والفرص لانتقال الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري

قدم هذا الفصل كذلك المفاهيم الأساسية لتحول الطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري، مبيناً الضرورات البيئية لهذين المفهومين، والضرورات الاجتماعية والاقتصادية لهما، ثم ربط ذلك بالمشهد الحالي لاستخدام الطاقة والطلب عليها في العالم، مبيناً التفاوتات الإقليمية في الاستهلاك العالمي ومؤكداً على أن تحليل استخدام الطاقة حسب القطاع يعطي تصوراً قيماً عن هذا التفاوت.

وقدم هذا الفصل نظرة مستقبلية مفادها أن تشير التوقعات تشير إلى زيادة مستمرة في استخدام مصادر الطاقة المستدامة، فمن المتوقع أن يزداد استخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل كبير بسبب التطورات في التكنولوجيا وانخفاض التكاليف. كما أنه من المحتمل أن يشهد المستقبل تقدما كبيرا في تكنولوجيا تخزين الطاقة ، ومن المتوقع كذلك أن يمتد استخدام أفكار الاقتصاد الدائري إلى ما وراء مجالات إعادة التدوير وإدارة النفايات ليشمل قطاعات أوسع من الاقتصاد ، مثل تصميم المنتجات ونماذج الأعمال وسلوك المستهلك. ويرى هذا الفصل أنه ستكون هناك حاجة متزايدة للتحول نحو الأساليب المستدامة مع

زيادة شدة آثار تغير المناخ، ويشمل ذلك زيادة تواتر وشدة الظواهر الجوية المتطرفة، وارتفاع مستويات سطح البحر، وانعكاساتها على التنوع البيولوجي والزراعة.

خلص هذا الفصل إلى ما يلي:

- أهمية الاعتراف بالقدرة الكبيرة للطاقة المستدامة والاقتصاد الدائري لإحداث تغييرات إيجابية لكل من كوكبنا ومجتمعاتنا، فالتحول نحو الطاقة المستدامة ليس التزاما إيكولوجيا فحسب ، بل هو أيضا ضرورة اجتماعية واقتصادية، وحتمية الانتقال إلى مصادر الطاقة المتجددة واعتماد تقنيات أكثر كفاءة ونظافة أمر بالغ الأهمية بسبب الخطر الوشيك لتغير المناخ ومحدودية توافر الوقود الأحفوري.
- هذا التحول مصحوب بصعوبات جمّة، بما في ذلك العقبات التكنولوجية، والقضايا الاقتصادية، والمعارضة الاجتماعية. ومع ذلك ، فإن هذه المشاكل تقدم أيضا آفاقا كبيرة.
- ينشأ مفهوم الاقتصاد الدائري كعلاج فعال لقيود النموذج الخطي السائد، ويقدم وسيلة لتحقيق مزايا بيئية كبيرة ومتانة اقتصادية ورفاهية مجتمعية من خلال إعادة التفكير في استخدام الموارد وإعادة استخدامها.
- التحول هو عملية مستمرة، أشبه برحلة أكثر من كونها نقطة أخيرة ، مما يستلزم تكتيكات مرنة ومساعي تعاونية. إن التحول نحو الطاقة المستدامة واعتماد الاقتصاد الدائري ليسا قرارين اختياريين، بل هما مطلبان أساسيان لضمان مستقبل مستدام.

Abstract

Treatment Oil Refineries Wastewater By Advanced Oxidation Processes

Nofa Ahmad Jomaa

The goal of this research is studying the oil refineries wastewater and finding new integrated solution to treat it in a safe, economical and practically applicable way.

The proposed treatment of the water coming out of the oil separation basins includes:

1- Electrocoagulation.

2- Oxidation with peroxide hydrogen and in the presence of a homogeneous medium of iron ions. Fe^{+2}

3- Adsorption on ctivated carbon.

The result shows that:

High reduction in (Phenols = 99.9 %) (COD = 97.2 %) with electrocoagulation and Fenton process before adsorption on activated carbon.

These results are very important and promising if these modern treatment techniques are applied to oil refinery wastewater.

*Gas Industries Expert, - Technical Affairs Department, OAPEC - Kuwait

Abstract

The Current Situation and Future Prospects of Critical Minerals, and the Role of Arab Countries in Securing Supply Chains

Maged Amer

Critical minerals, such as lithium, cobalt, and rare earth elements, have gained global attention due to their vital role in enabling energy transitions. These minerals are crucial for industries like renewable energy, electric vehicles, and advanced electronics. As technological advancements and the global shift to a low-carbon economy accelerate, demand for these minerals has surged. However, the geographical concentration of these resources raises concerns about supply chain disruptions and geopolitical risks. Furthermore, the environmental impact of mining and processing these minerals adds complexity to their management and sustainability.

This study examines the current situation and future prospects of critical minerals, focusing on reserves, production, demand, and their importance in energy transitions. It also evaluates the environmental consequences of mining these minerals and explores the potential role of Arab countries in fostering sustainable and resilient supply chains. The study is organized into six sections: the significance and classification of critical minerals, key indicators such as reserves and production, global investments and trade dynamics, future demand projections, environmental impacts of extraction, and the role of Arab countries in securing supply chains.

A key finding of the study is that the classification of critical minerals depends on factors such as national interests, technological needs, and market fluctuations. The global supply chains for these minerals are vulnerable to disruptions caused by natural events, geopolitical tensions, and climate change. The demand for critical minerals is expected to rise significantly, particularly with the growing need for low-carbon energy solutions. Geopolitical factors will likely influence the supply and trade of these minerals, making the diversification of supply chains crucial for stability.

The environmental impacts of mining, particularly water scarcity and greenhouse gas emissions, are significant concerns. The study stresses the importance of global collaboration to establish regulatory frameworks and promote responsible mining practices. It also highlights that attempts to form cartels for critical minerals have often failed due to internal conflicts and technological changes. To ensure supply reliability, investments in strategic reserves of critical minerals and strengthened international cooperation are essential.

Arab countries, with their mineral wealth, have the potential to contribute to global supply chains. However, challenges such as a lack of geological data and an unreliable investment climate hinder the development of these resources. The study recommends an integrated strategy, including public-private partnerships, clear policies to reduce investment risks, and the adoption of innovative business models. It also emphasizes the importance of regional cooperation, research, and the adoption of a circular carbon economy to promote sustainable mining operations and improve resource efficiency.

In conclusion, critical minerals are essential for energy transitions, but their extraction and supply come with challenges. Arab countries have the opportunity to play a significant role in securing a stable, resilient supply of these minerals, provided they address resource development challenges and adopt sustainable practices.

* Economic Expert, OAPEC, Kuwait.

Abstract

Sustainable and Low Carbon Avlation Fuel: Challenges and Opportunities

Eng. Imad Makki

Aviation sector is responsible for around 2.5% of global carbon dioxide emissions, and 3.5% of global non-CO2. It is widely seen as the hardest sector to decarbonize, whether it is looked at from a technological or an economic standpoint.

Low Carbon Aviation Fuel (LCAF) refers to a fossil fuel, which has been produced in a way that results in at least 10% lower lifecycle GHG emissions compared to a traditional fuel.

The study assesses to what extent the production and use of low carbon and sustainable aviation fuel may contribute to carbon reduction and mitigation.

This study shows that no one technology can reduce emissions to a sufficient level to meet the requirement of decarbonizing the aviation sector. Therefore, the deployment of multiple solutions is needed.

Petroleum refineries can play a significant role in producing low carbon aviation fuel through co-processing renewable feed, retrofitting units (such as hydrotreatment units) to handle only renewable feedstocks, or constructing full biorefineries integrated into the fossil refinery complex. Such concepts can utilize the existing infrastructure and distribution channels to airports and can reduce investment costs for biofuel production.

The study is divided into five main sections. The first describes the current background knowledge and policy framework for the development process of low carbon and sustainable aviation fuel. The second discusses the available technology and pathways for producing SAF and LCAF. The third section identifies the challenges facing the production of sustainable and low carbon aviation fuel and potential for initiating and scaling up its production in the world. The fourth section presents an overview of the development for the sustainable aviation fuel worldwide and in the Arab countries. The main conclusions and suggestions are summarized in section five.

A series of recommended actions are listed below to enhance the introduction of sustainable aviation fuel.

- The major barrier to production of sustainable aviation fuels is cost, with the price ranging from approximately two to eight times that of conventional aviation fuel, according to an analysis by the international institutions.
- Investing in low carbon aviation fuel supports the industry's shift towards sustainability and drives advancements in other green technologies.
- Stimulating sustainable aviation fuel production necessitates substantial policy incentives to bridge the price gap between traditional aviation fuel and biofuels.
- Promote the collaboration between public-private partnership, the aviation sector, jet fuel producers, universities and other public entities, to lower the risk in investing in sustainable fuel projects.
- Co-processing has proven to be an effective pathway to boost the production of low-carbon aviation fuel.
- To reach the target of net-zero emissions, all available pathways must be utilized.
- Financing and supporting research and development institutions is critical to find modern technologies to optimize the production of low carbon aviation fuel.
- While the Arab countries are known for its abundant reserves of oil and gas, many of these countries are leading the way to diversify its energy mix and reduce carbon emission.

* Senior Refining Expert, - Technical Affairs Department, OAPEC - Kuwait

Contents

Articles

Sustainable and Low Carbon Avlation Fuel: Challenges and Opportunities 7

Eng. Imad Makki Abstract 7

The Current Situation and Future Prospects of Critical Minerals, and the Role of Arab Countries in Securing Supply Chains 77

Maged Amer Abstract 8

Treatment Oil Refineries Wastewater By Advanced Oxidation Processes 133

Nofa Ahmad Jomaa Abstract 9

Reports

World Oil Outlook 2025 Executive Summary

Abdulfattah Dandi 169

Book Review

Sustainable Energy Transition: Circular Economy and Sustainable Financing for Environmental, Social, and Governance (ESG) Practices 187

Eng. Torki Hasan Hemsh

Oil and Arab Cooperation is an Arab journal aiming at spreading petroleum and energy knowledge while following up the latest scientific developments in the petroleum industry

Articles published in this journal reflect the opinions of their authors and not necessarily those of OAPEC.

- Articles should not exceed 40 pages (including text, tables, and figures) excluding the list of references. The full text of the article should be sent electronically as a Word document.
- Figures, maps, and pictures should be sent in a separate additional file in JPEG format.
- "Times New Roman" should be used with font size 12. Line spacing should be 1.5. Text alignment should be "justified".
- Information sources and references should be referred to/enlisted in a clear academic method.
- When citing information from any source (digital, specific vision, or analysis), plagiarism should be avoided. Such information should be rephrased by the researcher's own words while referring to the original source. For quotations, quotation marks ("…") should be used.
- It is preferred to write the foreign names of cities, research centres, companies, and universities in English not Arabic.
- The researcher's CV should be attached to the article if it was the first time he/she cooperates with the journal.
- Views published in the journal reflect those of the authors and do not necessarily represent the views of OAPEC. The arrangement of the published articles is conditioned by technical aspects.
- Authors of rejected articles will be informed of the decision without giving reasons.
- The author of any published article will be provided with 5 complementary copies of the issue containing his/her article.

Articles and reviews should be sent to:
The Editor-in-Chiref, 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

- 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

Refereed Journal Published Quarterly by the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)

ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES
OAPEC

OIL & ARAB COOPERATION

Volume 51 - 2024 - Issue 191

Articles

- Sustainable and Low Carbon Avlation Fuel: Challenges and Opportunities — **Eng. Imad Makki**
- The Current Situation and Future Prospects of Gritical Minerals, and the Role of Arab Countries in Securing Supply Chains — **Maged Amer**
- Treatment Oil Refineries Wastewater By Advanced Oxidation Processes — **Nofa Ahmad Jomaa**

Reports

- World Oil Outlook 2025 Executive Summary — **Abdulfattah Dandi**

Book Review

- Sustainable Energy Transition: Circular Economy and Sustainable Financing for Environmental, Social, and Governance (ESG) Practices — **Eng. Torki Hasan Hemsh**

Refereed Journal Published Quarterly by the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)