



منظمة الاقطار العربية المصدرة للبتترول
أوابك

النفط والتعاون العربي



المجلد الثالث والخمسون 2026 - العدد 196

الابحاث

- نظام المجمع الشمسي المسطح لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء
د. قوسم مهدي
- الطاقات المتجددة ودورها المحتمل في عملية التحول العالمي في مجال الطاقة
الطاهر عبد السلام الزيتوني
- تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة متجددة
د. نواف جمعة

تقارير

- متابعة فصلية حول مستجدات الطاقات الجديدة والمتجددة وقضايا تحولات الطاقة
ماجد إبراهيم عامر

عرض كتاب

- اقتصاديات أزمة الطاقة: البيئة، والسياسة، والأمن في شبه القارة الهندية
عرض :م. تركي حسن حمش





النفط

والتعاون العربي

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

النفط والتعاون العربي



م. خالد العتيبي

الأمين العام لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

رئيس التحرير

السيد/ عبد الفتاح دندي

مدير الإدارة الإقتصادية والمشرف على إدارة الاعلام والمكتبة
منظمة أوابك

مدير التحرير

م. عماد مكي

مدير إدارة الشؤون الفنية
منظمة أوابك

هيئة التحرير

د. داوود باهزاد

مدير إدارة العلوم والتكنولوجيا
معهد الكويت للأبحاث العلمية

قواعد النشر في المجلة

تعريف بالمجلة واهدافها

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

الأبحاث

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

مراجعة الأبحاث والكتب

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

التقارير

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

شروط البحث

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

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

ترسل المقالات والمراجعات باسم رئيس التحرير، مجلة النفط والتعاون العربي، أوابك،
على البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org
oapecmedia@oapecorg.org

موقع الأوابك على الانترنت www.oapecorg.org

المحتويات

الابحاث

نظام المجمع الشمسي المسطح لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء

7 د. قوسم مهدي

الطاقات المتجددة ودورها المحتمل في عملية التحول العالمي في مجال الطاقة

55 الطاهر عبد السلام الزيتوني

تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة متجددة

133 د. نواف جمعة

تقارير

متابعة فصلية حول مستجدات الطاقات الجديدة والمتجددة وقضايا تحولات الطاقة

255 ماجد إبراهيم عامر

عرض كتاب

اقتصاديات أزمة الطاقة: البيئة، والسياسة، والأمن في شبه القارة الهندية

313 عرض: م. تركي حسن حمش

البحث الأول

نظام المجمع الشمسي المسطح لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء

د. قوسم مهدي *



الفصل الأول

المقدمة

- 1.1: وصف موضوع البحث وأهدافه
- 2.1: أهداف البحث
- 3.1: الإشكالية التي يعالجها البحث
- 4.1: شرح موجز لمضمون فصول البحث
- 5.1: القيمة التي سيضيفها البحث إلى صناعة النفط والغاز والطاقة
- 6.1: أهم النتائج والتوصيات التي توصل إليها البحث

1.1 وصف موضوع البحث وأهدافه

في ظل الاعتماد الكبير لمحطات ضغط الغاز على استمرارية الإمداد الكهربائي لتشغيل مضخات التزيت والتبريد، تُشكل انقطاعات التيار الكهربائي تهديدًا جسيمًا لسلامة المعدات الميكانيكية، وخاصة أعمدة التوربينات التي قد تتعرض للتشوهات الحرارية أو الالتواءات عند التوقف المفاجئ بسبب تدهور طبقة الزيت الواقية بين المحامل. تُعدُّ هذه المشكلة حاسمة في المناطق النائية حيث تكون الشبكات الكهربائية غير مستقرة أو غير موجودة، مما يدفع المحطات إلى الاعتماد الكامل على المولدات الديزل الاحتياطية، التي تُعتبر مصدرًا مكلفًا اقتصاديًا وبيئيًا، حيث يُقدَّر أن تشغيلها لمدة 24 ساعة يتسبب في انبعاثات تصل إلى 2.4 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل ميغاواط ساعي (IEA, 2023). في هذا السياق، يهدف هذا البحث إلى تصميم نظام طاقة شمسية متكامل قادر على توفير الكهرباء خلال فترات الانقطاع، مع التركيز على تغذية مضخات التزيت التي تحافظ على تدفق الزيت إلى المحامل (مثل محامل الدفع "Butée Bearings")، وتشغيل أنظمة التدوير البطيء ("Hot Cranking") لإدارة العمود التوربيني بسرعة منخفضة (عادةً بين 10-20 دورة في الدقيقة)، مما يمنع تراكم الحرارة الموضعية ويُجنب التشققات الحرارية ("Thermal Cracking") في المكونات الحساسة مثل غلاف التوربين ("Casing")، وفقًا لتحليل أجرته (Saudi Arabia Ministry of Energy, 2023) على محطات حقن الغاز في حقل الغوار.

يعتمد النظام المقترح على استخدام مجمعات شمسية مسطحة متصلة ببنك بطاريات تخزين عالية السعة، مصممة لتغطية الأحمال الحرجة خلال فترات الانقطاع التي قد تمتد من بضع دقائق إلى عدة ساعات. وفقًا لدراسة (Al-Soud & Hrayshat, 2020)، تتطلب مضخات التزيت في التوربينات الكبيرة طاقةً تتراوح بين 50-100 كيلوواط، بينما يستهلك نظام التدوير البطيء ما يقارب 20-30 كيلوواط إضافية، مما يجعل القدرة الإجمالية المطلوبة للنظام الشمسي بين 70-130 كيلوواط، حسب حجم التوربين. يتميز هذا النظام بقدرته على العمل في الظروف الصحراوية القاسية، حيث تُسجل المناطق العربية مثل السعودية والإمارات مستويات إشعاع شمسي تصل إلى 2500 كيلوواط ساعي/م² سنويًا (IRENA, 2022)، وهي كافية لتوليد الطاقة حتى في الأيام الغائمة بنسبة 70%، وفقًا لنموذج أجريت باستخدام برنامج PVsyst. ومع ذلك، تواجه الأنظمة الشمسية تحديين رئيسيين في هذه البيئات: الأول هو تراكم الغبار على الألواح، الذي يُقلل كفاءتها بنسبة 0.5% يوميًا إذا تُركت دون تنظيف (Global Solar Council, 2022)، والثاني هو ارتفاع درجة حرارة الألواح فوق 45°م، مما يخفض كفاءة التحويل الكهروضوئي بنسبة 0.4% لكل درجة فوق 25°م (Khalid & Al-Ali, 2021). لمواجهة هذه التحديات، يقترح البحث استخدام تقنيات متطورة مثل الطلاءات النانوية المضادة للغبار، التي تُقلل التراكم بنسبة 40%، وأنظمة تبريد هوائية تعتمد على مراوح تُحسن التدفق حول الألواح، مما يخفض حرارتها بمقدار 8-10°م خلال ساعات الذروة.

من الناحية الاقتصادية، يُظهر التحليل المالي أن التكلفة الأولية للنظام الشمسي تبلغ حوالي 1.1 مليون دولار للقدرة القياسية (100 كيلوواط)، مقارنةً بـ 800,000 دولار لنظام الديزل التقليدي، لكن التوفير السنوي في تكاليف الوقود والصيانة يُقدَّر بـ 200,000 دولار، مما يعني أن فترة استرداد الاستثمار تبلغ 5.5 سنوات، وفقاً لبيانات من مشروع تجريبي في سلطنة عُمان (Al Garni & Awasthi, 2021) بالإضافة إلى ذلك، يُسهم النظام في خفض الانبعاثات الكربونية بمعدل 1.1 طن/ميغاواط ساعي، مما يدعم التزامات الدول الموقعة على اتفاقية باريس للمناخ. أما على الصعيد التقني، فيتطلب التكامل بين النظام الشمسي والبنية التحتية القائمة تعديلات في تصميم الدوائر الكهربائية، مثل تركيب عواكس متوافقة مع تردد 60 هرتز المستخدم في المضخات الصناعية، وتطوير أنظمة تحكم ذكية تُفَعِّل النظام الشمسي تلقائياً عند انقطاع التيار، مع ضمان عدم حدوث تداخل بين المصدرين.

لا يقتصر نجاح هذا النظام على الجدوى التقنية أو الاقتصادية فحسب، بل يعتمد أيضاً على السياسات الداعمة، مثل تشريعات تلزم الشركات النفطية بتخصيص نسبة من ميزانياتها للطاقة المتجددة، أو منح شهادات كربونية تُحفز تبني الحلول النظيفة. في الوقت نفسه، تُبرز الدراسة الدور المحوري للدول العربية في قيادة هذا التحول، نظراً لامتلاكها أكبر احتياطي إشعاعي شمسي في العالم، مما يُؤهلها لتكون رائدة في تصدير هذه التقنيات إلى الأسواق العالمية، مع الحفاظ على موقعها كمركز للطاقة، لكن هذه المرة بطريقة مستدامة تُوازن بين التنمية الصناعية وصحة الكوكب.

2.1 أهداف البحث

يركِّز هذا البحث على تصميم نظام طاقة شمسية متكامل قادر على تزويد محطات ضغط الغاز بالكهرباء أثناء انقطاع التيار، بهدف الحفاظ على التشغيل الآمن للمعدات الميكانيكية، وخاصةً أعمدة التوربينات، عبر توفير الطاقة اللازمة لتشغيل مضخات التزييت وأنظمة التدوير البطيء. تتبّع أهمية هذه الأهداف من المخاطر الجسيمة التي تتعرض لها المحطات عند التوقف المفاجئ، مثل التشوهات الحرارية في الأعمدة نتيجة فقدان طبقة الزيت الواقية بين المحامل، أو التشققات الحرارية في غلاف التوربين بسبب التبريد غير المتجانس، وفقاً لتقارير فنية من وزارة الطاقة السعودية (2023).

الهدف الأول: ضمان استمرارية تشغيل مضخات التزييت

تعتمد سلامة المحامل (مثل محامل الدفع "Butée Bearings") على تدفق مستمر للزيت لتقليل الاحتكاك ومنع ارتفاع الحرارة الموضعية. عند انقطاع التيار، تتوقف هذه المضخات فجأة، مما يعرّض الأجزاء الدوارة للتلف. لذلك، يهدف النظام الشمسي إلى توفير 50-100 كيلوواط من الطاقة (حسب حجم التوربين) لتشغيل المضخات، معتمداً على بنك بطاريات تخزين يُغطي فترة الانقطاع التي قد تمتد لساعات. تُظهر بيانات

من محطة تجريبية في عُمان أن استمرار التزبييت حتى 6 ساعات بعد الانقطاع يقلل معدل تآكل المحامل بنسبة 40% (Al-Soud & Hrayshat, 2020).

الهدف الثاني: تشغيل أنظمة التدوير البطيء (Hot Cranking)

يهدف هذا النظام إلى تدوير عمود التوربين بسرعة منخفضة (10-20 دورة/دقيقة) بعد التوقف، لتوزيع الحرارة المتبقية بشكل متساوٍ ومنع التشوهات الناتجة عن التمدد الحراري غير المتكافئ. يتطلب ذلك طاقة إضافية تتراوح بين 20-30 كيلوواط، وفقاً لمواصفات توربينات الغاز الحديثة. تُشير دراسة حالة في حقل الغوار إلى أن التدوير البطيء يخفض احتمالية حدوث التشققات الحرارية في غلاف التوربين من 35% إلى 5% (Saudi Arabia Ministry of Energy, 2023).

الهدف الثالث: التكيف مع الظروف البيئية القاسية

صُمم النظام ليعمل في المناطق الصحراوية ذات الإشعاع الشمسي العالي (حتى 2500 كيلوواط ساعي/م² سنوياً) وفقاً لبيانات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA, 2022). ومع ذلك، يواجه تحديات مثل:

• تراكم الغبار: الذي يخفض كفاءة الألواح بنسبة 0.5% يومياً إذا تُركت دون تنظيف (Global Solar Council, 2022).

• ارتفاع الحرارة: حيث تنخفض كفاءة الخلايا الكهروضوئية بنسبة 0.4% لكل درجة فوق 25°م (Khalid & Al-Ali, 2021).

لذا، يدمج النظام تقنيات مثل الطلاءات النانوية المضادة للغبار وأنظمة التبريد الهوائية، التي تخفض حرارة الألواح بمقدار 8-10°م.

الهدف الرابع: تحليل الجدوى الاقتصادية

يهدف البحث إلى مقارنة التكاليف التشغيلية بين النظام الشمسي والمولدات الديزل. وفقاً لدراسة أجراها

(Al Garni & Awasthi, 2021):

- التكلفة الأولية للنظام الشمسي (100 كيلوواط): 1.1 مليون دولار.
- التكلفة الأولية لنظام الديزل: 800,000 دولار.
- التوفير السنوي في الوقود والصيانة: 200,000 دولار.
- فترة استرداد الاستثمار: 5.5 سنوات.

الهدف الخامس: تقليل البصمة الكربونية

يسعى النظام إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمعدل 1.1 طن/ميغاواط ساعي، مقارنةً بالمولدات الديزل، مما يدعم التزامات الدول بموجب اتفاقية باريس للمناخ. في مشروع سعودي، أدى استخدام الطاقة الشمسية إلى تقليل الانبعاثات بما يعادل زراعة 5000 شجرة سنويًا.

الهدف السادس: تقديم توصيات سياساتية

يدعو البحث الحكومات إلى:

- إصدار تشريعات تلزم الشركات النفطية بتخصيص 10% من استثماراتها للطاقة المتجددة.
- تقديم إعفاءات ضريبية بنسبة 20% للمشاريع التي تعتمد على أنظمة شمسية.
- إنشاء منصات إقليمية لتبادل الخبرات في تقنيات الطاقة النظيفة.
- تمثل هذه الأهداف خارطة طريق لتحويل التحديات الطاقية في القطاع النفطي إلى فرص استثمارية مستدامة، حيث تُثبت الدراسة أن الطاقة الشمسية ليست فقط حلاً بيئيًا، بل ضرورةً تقنيةً واقتصاديةً لضمان استمرارية العمليات في عالم يتسم بتقلبات مناخية واقتصادية متسارعة.

3.1 الإشكالية التي يعالجها البحث

انقطاع التيار الكهربائي في محطات ضغط الغاز يُمثل تحديًا خطيرًا، إذ يؤدي إلى توقف مضخات التشحيم والتدوير، مما يُعرض أعمدة التوربينات لتدوير بطيء أو تام، وينتج عن ذلك تشوهات حرارية وميكانيكية تهدد كفاءة المحطة وعمرها الافتراضي. لحل هذه المشكلة، يُمكن استخدام نظام المجمع الشمسي المسطح كمصدر طاقة احتياطي، حيث يُصمم النظام باستخدام ألواح شمسية عالية الكفاءة مثل طراز LR5-72HTH-600M، والتي توفر قدرة إجمالية تصل إلى 328 كيلوواط تحت الظروف القياسية، مع عواكس متطورة مثل SOFAR 350KTX0 ذات تقنية MPPT متعددة المسارات لضمان استقرار الجهد والتيار حتى في حالات الظليل الجزئي. يُدمج النظام مع بطاريات تخزين من نوع ليثيوم أيون تُحسب سعتها بناءً على متطلبات الطاقة الحرجة للمضخات، مما يضمن تغطية فترات الانقطاع الليلي أو الأيام الغائمة.

لإدارة التحديات البيئية مثل الحرارة المرتفعة في المناطق الصحراوية، تُطبق أنظمة تبريد هوائية أو سائلة تعمل على خفض درجة حرارة الألواح بمقدار 10-15°م، مما يُقلل الخسائر الحرارية بنسبة 8-10%، بالإضافة إلى استخدام طلاءات نانوية مضادة للغبار تقلل تراكم الأتربة على الأسطح بنسبة 70%، مع الاعتماد على روبوتات تنظيف آلية تعمل بالطاقة الشمسية لضمان استمرارية الكفاءة. من الناحية التقنية، يُعالج اختلاف الترددات بين النظام الشمسي والمضخات عبر محولات تردد متخصصة، بينما تُستخدم منصات مراقبة ذكية

(SCADA) لجمع البيانات وتحليلها في الوقت الفعلي، مما يسهم في الكشف المبكر عن الأعطال وتحسين الصيانة الوقائية.

على الصعيد الاقتصادي، تبلغ التكلفة الأولية للنظام الشمسي حوالي 1.2 مليون دولار لنظام سعة 1 ميغاواط، مع توفير سنوي يُقدر بـ 160,000 دولار نتيجة خفض استهلاك الديزل وتكاليف الصيانة، مما يُقلل فترة استرداد الاستثمار إلى 6-7 سنوات، وهي فترة قد تُختصر إلى 4 سنوات في حال توفر دعم حكومي عبر إعفاءات ضريبية أو تمويل ميسر. بيئيًا، يسهم النظام في خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 480 طنًا سنويًا مقارنةً بالمولدات التقليدية، مع إمكانية تحويل الفائض الطاقوي إلى هيدروجين أخضر لتعزيز الاستدامة. رغم هذه المزايا، تبقى تحديات مثل ارتفاع تكاليف البطاريات والتعقيد التقني قائمة، إلا أن تبني استراتيجيات مبتكرة مثل عقود الأداء الطاقوي والتدريب الفني المتخصص يُمكن أن يُخفف من هذه العقبات، مما يجعل النظام الشمسي حلًا شاملًا يوازن بين الكفاءة التقنية والجودة الاقتصادية والالتزام البيئي.

4.1 شرح موجز لضمون فصول البحث

الفصل الأول: المقدمة

يستعرض هذا الفصل الخلفية البحثية وأهمية الدراسة في ظل التحديات المناخية المتزايدة واعتماد الصناعة النفطية على مصادر الطاقة التقليدية الهشة، والتي تُعرض محطات حقن الغاز لخطر الانقطاعات الكهربائية. تُحدد الإشكالية البحثية من خلال المشكلة المركزية (اعتماد المحطات على شبكات طاقة غير مستقرة) والتحديات الفرعية (تقنية، اقتصادية، بيئية). يهدف البحث إلى تقييم جدوى استخدام الأنظمة الشمسية كبديل مستدام، مع فرضيات تشمل تخفيض تكاليف التشغيل بنسبة 25% وتحسين كفاءة الألواح الشمسية بنسبة 7%.

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

يقدم هذا الفصل المفاهيم الأساسية مثل تحليل دورة الحياة (LCA) لقياس الأثر البيئي، والهندسة الحرارية لتحسين كفاءة الأنظمة. كما يناقش الدراسات السابقة، مثل أبحاث حول تأثير الطلاءات النانوية المضادة للغبار (Khalid & Al-Ali, 2021)، مع تحليل نقدي لفجوات المعرفة التي يسدها البحث الحالي. يُناقش أيضًا الجدوى التقنية والاقتصادية لأنظمة الطاقة الشمسية، بما في ذلك تكاليف التركيب، العوائد المالية، ودور السياسات الداعمة في تسريع التحول الطاقوي.

الفصل الثالث: منهجية البحث

يشرح هذا الفصل تصميم النظام الشمسي المستخدم في الدراسة، مع تفصيل مواصفات الألواح الشمسية (مثل طراز LR5-72HTH-600M) والعواكس (مثل SOFAR 350KTX0) وهياكل التثبيت المقاومة للعواصف الرملية. كما يوضح أدوات جمع البيانات، مثل أجهزة قياس الإشعاع الشمسي (Pyranometer)

ودرجات الحرارة (Data Loggers)، بالإضافة إلى نماذج المحاكاة الحاسوبية (PVsyst, 2023) لتقييم الخسائر الحرارية والكفاءة الإجمالية للنظام.

الفصل الرابع: نتائج البحث وتحليلها

يعرض هذا الفصل النتائج التفصيلية للأداء الشهري والسنوي للنظام الشمسي، مستنداً إلى بيانات الجداول (3-1) والأشكال (4-1). يشمل التحليل قياس الخسائر الطاقية، مثل الخسائر الحرارية (8.14%) وفقدان الكفاءة بسبب تراكم الغبار (20%)، مع مقارنة النتائج بالفرضيات المطروحة، مثل تحقيق نسبة أداء (PR) سنوية تبلغ 0.870، وتوفير مالي يُقدر بـ 1.8 مليون دولار سنوياً.

الفصل الخامس: المناقشة والاستنتاجات

يناقش هذا الفصل العلاقة بين الإشعاع الشمسي والإنتاجية (كما في الشكل 4)، وتأثير السياسات الحكومية في تعزيز تبني الأنظمة الشمسية. تُقدّم التوصيات العملية، مثل دعم تبني الطلاءات النانوية، وتطوير برامج تدريبية للكوادر الفنية، واعتماد نماذج تمويل مبتكرة. في الختام، تؤكد الدراسة على إمكانية تحقيق توازن بين الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية، مع الدعوة لمزيد من الأبحاث حول تكامل الهيدروجين الأخضر في المستقبل.

الخاتمة

نظام المجمع الشمسي المسطح يمثل حلاً استراتيجياً وفعالاً لمشكلة انقطاع التيار الكهربائي في محطات إعادة حقن الغاز، حيث يُسهم في منع التلف الميكانيكي الناتج عن توقف مضخات التشحيم، مثل التشوهات الحرارية والتواءات أعمدة التوربينات، من خلال توفير مصدر طاقة مستمر يعتمد على تقنيات متقدمة مثل الألواح الشمسية عالية الكفاءة (LR5-72HTH-600M) والعاكس الذكية (SOFAR 350KTX0) المدعومة بتقنية MPPT. كما يُثبت البحث أن دمج هذا النظام مع حلول تخزين الطاقة (البطاريات) يُعزز موثوقية المحطات بنسبة 30%، ويُخفض التكاليف التشغيلية بنحو 25% عبر تقليل الاعتماد على مولدات الديزل، مع خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 480 طنًا سنوياً، مما يُحقق توافقاً مع أهداف الاستدامة العالمية. رغم التحديات مثل ارتفاع تكاليف البطاريات والتعقيد التقني، تُظهر الدراسة أن الحلول الابتكارية (مثل الطلاءات النانوية المضادة للغبار وعقود الأداء الطاقوي) قادرة على تجاوز هذه العقبات. وتوصي الخاتمة بضرورة تبني سياسات داعمة من الحكومات والشركات، مثل الإعفاءات الضريبية وبرامج التدريب الفني، لتسريع التحول نحو الطاقة النظيفة في القطاع النفطي. أخيراً، تُبرز الخاتمة دور هذا البحث كحجر أساس لدراسات مستقبلية أوسع، مثل دمج الهيدروجين الأخضر أو تحسين تقنيات التبريد، مما يُعزز مكانة صناعة النفط كشريك فاعل في الاقتصاد الأخضر العالمي.

5.1 القيمة التي سيضيفها البحث إلى صناعة النفط والغاز والطاقة

تشكل صناعة النفط والغاز عصب الاقتصاد العالمي، حيث تُسهم في تلبية أكثر من 80% من احتياجات الطاقة الأولية، وتُمثل مصدرًا حيويًا للدخل القومي للعديد من الدول، خاصة في المنطقة العربية التي تحتضن أكبر احتياطات النفط الخام عالميًا. ومع ذلك، تواجه هذه الصناعة تحديات غير مسبوقه في ظل التحولات العالمية نحو الطاقة النظيفة وزيادة الضغوط البيئية للحد من الانبعاثات الكربونية، إلى جانب تقلبات أسعار النفط التي تُهدد استقرار الاستثمارات. في هذا السياق، يأتي البحث كحلقة وصل استراتيجية بين متطلبات الاستدامة والكفاءة التشغيلية، حيث يقدم نظام المجمع الشمسي المسطح نموذجًا عمليًا لدمج الطاقة المتجددة في البنية التحتية القائمة لمحطات النفط والغاز، وخاصة محطات إعادة حقن الغاز التي تعتمد بشكل كبير على الكهرباء التقليدية والمولدات الاحتياطية الملوثة. يُسهم هذا النظام في تعزيز موثوقية العمليات عبر توفير مصدر طاقة مستمر أثناء انقطاع التيار الكهربائي، مما يمنع توقف مضخات التشحيم والتدوير الذي يؤدي إلى أعطال ميكانيكية باهظة التكلفة، مثل التشوهات الحرارية أو الالتواءات في أعمدة التوربينات، والتي قد تتطلب إصلاحات تستغرق أسابيع وتكلف ملايين الدولارات. وبالإضافة إلى حماية البنية التحتية، يُقلل النظام الاعتماد على مولدات الديزل، مما يُخفض تكاليف التشغيل بنسبة تصل إلى 25% على المدى المتوسط، ويحد من الانبعاثات الكربونية بمعدل 480 طنًا سنويًا لكل ميغاواط مُنتج، وهو ما يتوافق مع أهداف اتفاقيات المناخ العالمية مثل باريس 2015، ويعزز سمعة الشركات ككيانات مسؤولة بيئيًا.

على صعيد الابتكار التكنولوجي، يفتح البحث آفاقًا جديدة لتصميم أنظمة هجينة تجمع بين الطاقة الشمسية وتخزين البطاريات، مما يُعزز مرونة محطات النفط في التعامل مع التحديات التشغيلية، مثل العواصف الرملية أو الارتفاعات الحادة في درجات الحرارة التي تُضعف كفاءة الألواح الشمسية التقليدية. فمن خلال استخدام مواد متطورة مثل الطلاءات النانوية المضادة للغبار وتقنيات التبريد الهوائي أو السائل، يُمكن الحفاظ على كفاءة النظام الشمسي حتى في الظروف القاسية، مما يضمن استمرارية الإمداد الطاقوي دون انقطاع. كما يُسهم البحث في تطوير أنظمة مراقبة ذكية قائمة على إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي، والتي تُتيح مراقبة أداء المضخات والألواح الشمسية في الوقت الفعلي، والتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، مما يُقلل فترات التوقف غير المخطط لها ويُحسن إدارة الصيانة الوقائية.

من الناحية الاقتصادية، يُقدم البحث حلًا مجديًا للتحدي المزدوج الذي تواجهه الشركات بين خفض التكاليف والالتزام بالمعايير البيئية. فبينما تبلغ التكلفة الأولية لنظام الطاقة الشمسية نحو 1.2 مليون دولار للميغاواط الواحد، فإن التوفير السنوي من تقليل استهلاك الديزل والصيانة يُقدر بحوالي 160,000 دولار، مع إمكانية تقليص فترة استرداد الاستثمار إلى 4-6 سنوات في حال توفر الدعم الحكومي عبر حوافز ضريبية أو قروض ميسرة. هذا التحول ليس مجرد توفير مالي، بل استثمار في السمعة العالمية للشركات التي تسعى إلى

تحقيق معايير الاستدامة مثل شهادة ISO 50001 أو LEED، مما يعزز قدرتها على المنافسة في الأسواق الدولية التي تفرض قيودًا متزايدة على البصمة الكربونية.

أما على مستوى السياسات العامة، فإن البحث يُقدم أدلةً عمليةً لدول تعتمد على النفط كركيزة اقتصادية، مثل السعودية والإمارات، لتسريع تحولها نحو اقتصاد متنوع قائم على الطاقة المتجددة، تماشيًا مع رؤى مثل رؤية 2030 أو مبادرة الإمارات للحياد المناخي 2050. فدمج الطاقة الشمسية في المنشآت النفطية لا يُقلل الانبعاثات فحسب، بل يُعزز الأمن الطاقى عبر تنويع مصادر الإمداد، ويخلق فرص عمل جديدة في مجالات الهندسة الخضراء وتقنيات الطاقة المتقدمة، مما يُسهم في بناء كوادر وطنية مؤهلة تقنيًا.

لا يقتصر دور هذا البحث على تقديم حل تقني لمشكلة انقطاع الكهرباء، بل يُشكل نقلة نوعية في ثقافة صناعة النفط والغاز، التي كانت تُعتبر تقليديًا من أكبر الملوثات العالمية. فمن خلال تبني أنظمة الطاقة الشمسية، تُصبح هذه الصناعة شريكًا فاعلاً في تحقيق أهداف التنمية المستدامة، وتُرسى أساسًا متينًا لمستقبل طاقي هجين يجمع بين الموثوقية والكفاءة والمسؤولية البيئية، مما يُعيد تعريف دورها من مُجرد مورد للوقود الأحفوري إلى رائد في التحول العالمي نحو اقتصاد أخضر مستدام.

6.1 أهم النتائج والتوصيات التي توصل إليها البحث

تظهر الدراسة أن التحول نحو أنظمة الطاقة الشمسية في القطاع النفطي لم يعد خيارًا ثانويًا مرتبطًا بالضغوط البيئية فحسب، بل تحوّل إلى ضرورة استراتيجية لضمان استمرارية العمليات في ظل التحديات الجيوسياسية وتغير المناخ، حيث أثبتت النتائج أن هذه الأنظمة قادرة على خفض التكاليف التشغيلية بنسب تصل إلى 25% على المدى الطويل، مع تقليل الانبعاثات الكربونية بمعدل 1.2 طن/ميغاواط ساعي. كما أكد البحث أن المنطقة العربية، التي تمتلك 60% من الإشعاع الشمسي العالمي، قادرة على قيادة هذا التحول عبر تبني سياسات داعمة مثل الإعفاءات الضريبية للشركات التي تستثمر في الطاقة النظيفة، وتطوير تشريعات تلزم المنشآت النفطية بتخصيص مساحات للطاقة الشمسية في تصميماتها الجديدة. ومن أبرز التوصيات العملية: تعزيز التعاون الإقليمي لإنشاء منصات تبادل معرفي حول التقنيات المتقدمة، ودمج أنظمة التخزين بالبطاريات عالية السعة لتعويض فترات الانقطاع الليلي، والاستثمار في برامج تدريبية لتأهيل الكوادر المحلية على إدارة الأنظمة الهجينة. كما شددت الدراسة على ضرورة تسريع وتيرة الابتكار التكنولوجي، مثل استخدام الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بفترات الانقطاع الكهربائي، وتطوير ألواح شمسية متخصصة تتحمل الظروف الصحراوية القاسية، مع التركيز على تحقيق التوازن بين النمو الصناعي والمسؤولية البيئية، مما يضمن مستقبلًا طاقيًا مرئيًا للأجيال القادمة.

الملخص التنفيذي

يقدّم هذا البحث دراسةً موسعةً ومتعددة الأبعاد حول استخدام نظام المجمع الشمسي المسطح كحلٍ مبتكرٍ ومستدامٍ لمعالجة مشكلة انقطاع التيار الكهربائي في محطات إعادة حقن الغاز، والتي تُعد من المنشآت الحيوية في صناعة النفط والغاز، حيث تعتمد هذه المحطات بشكلٍ رئيسي على مضخات التشحيم والتدوير التي تتطلب إمدادًا كهربائيًا مستمرًا لضمان عمل التوربينات دون أعطال. تتبع أهمية البحث من كونه يجمع بين الجوانب الهندسية والاقتصادية والبيئية في نموذج متكامل، حيث يهدف إلى تقييم إمكانية دمج الطاقة الشمسية في البنية التحتية القائمة لمحطات الغاز، وتحليل تأثير ذلك على خفض التكاليف التشغيلية، وتحسين الكفاءة، وتقليل البصمة الكربونية، وذلك في إطار التحول العالمي نحو الطاقة النظيفة الذي تُسرّع وتيرته اتفاقيات المناخ الدولية وضغوط المستثمرين لتبني معايير الاستدامة.

يبدأ البحث بتفصيل المشكلة الرئيسية المتمثلة في توقف مضخات التشحيم عند انقطاع الكهرباء، مما يؤدي إلى تباطؤ أو توقف كامل لعمود التوربين، وما يترتب على ذلك من تشوهات حرارية ناتجة عن الاحتكاك غير المُزيت، واختلالات ميكانيكية قد تتسبب في تلف المكونات الداخلية، وهو ما يزيد تكاليف الصيانة الطارئة ويُعطل الإنتاج لأسابيع. لمواجهة هذا التحدي، يطرح البحث نظامًا شمسيًا مسطحًا مُصممًا خصيصًا للبيئات الصناعية القاسية، مثل المناطق الصحراوية ذات الإشعاع الشمسي العالي والعواصف الرملية المتكررة، حيث يعتمد النظام على ألواح شمسية من نوع LR5-72HTH-600M عالية الكفاءة، قادرة على توليد 328 كيلوواط تحت الظروف القياسية، مع عواكس SOFAR 350KTX0 مزودة بتقنية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) متعددة المسارات، مما يسمح بإدارة مستقلة لكل سلسلة من الألواح الشمسية، وبالتالي تقليل الخسائر الناتجة عن التظليل الجزئي أو التلوث غير المتجانس.

لضمان استمرارية الإمداد الطاقوي، يُدمج النظام مع بطاريات تخزين من نوع ليثيوم أيون بسعة 500 كيلوواط ساعي، مصممة لتغطية فترات الذروة الليلية أو الأيام الغائمة، مع استخدام أنظمة تحكم ذكية تعمل على موازنة أحمال الطاقة وتجنب إجهاد البطاريات. أما لإدارة التحديات البيئية، فيشمل النظام حلولاً مبتكرةً مثل طلاءات نانوية مضادة للغبار تُطبق على سطح الألواح لتقليل تراكم الأتربة بنسبة 70%، وروبوتات تنظيف آلية تعمل بالطاقة الشمسية وتُنشط كل أسبوعين، بالإضافة إلى أنظمة تبريد هوائية وسائلة تعمل على خفض درجة حرارة الألواح بمقدار 10-15°م، مما يقلل الخسائر الحرارية بنسبة 8-10%، وهي نسبة حرجة في المناطق التي تتجاوز فيها درجات الحرارة 50°م صيفًا.

على الصعيد التقني، يتناول البحث بالتفصيل تحديات التكامل مع البنية التحتية الحالية، مثل اختلاف الترددات بين المضخات (60 هرتز) والعواكس الشمسية (50 هرتز)، والتي تُعالج عبر محولات تردد متخصصة، فضلًا عن دمج منصات مراقبة ذكية (SCADA) تعتمد على إنترنت الأشياء (IoT) لجمع البيانات

في الوقت الفعلي عن أداء النظام، مثل درجة الحرارة، والإشعاع الشمسي، والجهد الكهربائي، مع استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال المحتملة، مثل انخفاض كفاءة الألواح بسبب الغبار، وتوصية بجدول صيانة استباقية.

من الناحية الاقتصادية، يُظهر البحث أن التكلفة الأولية للنظام الشمسي تبلغ حوالي 1.2 مليون دولار لنظام سعة 1 ميغاواط، تشمل الألواح الشمسية، العواكس، البطاريات، والبنية التحتية المساندة، مع توفير سنوي يُقدر بـ 160,000 دولار نتيجة خفض استهلاك الديزل وتكاليف الصيانة غير المخطط لها، مما يخفض فترة استرداد الاستثمار إلى 6-7 سنوات، وهي فترة قد تُختصر إلى 4 سنوات في حال توفر دعم حكومي عبر إعفاءات ضريبية أو تمويل ميسر، كما هو الحال في برامج التحول الطاقوي بدول مثل السعودية والإمارات. أما بيئيًا، فيُساهم النظام في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 480 طنًا سنويًا لكل ميغاواط مُنتج، وهو ما يعادل تجنب حرق 1.2 مليون لتر من الديزل، مما يدعم التزام الشركات بأهداف التنمية المستدامة (SDGs)، خاصة الهدف السابع (طاقة نظيفة) والهدف الثالث عشر (العمل المناخي).

على الرغم من هذه النتائج الإيجابية، يسلط البحث الضوء على تحديات جوهرية تتطلب مزيدًا من الاهتمام، مثل ارتفاع التكاليف الأولية للبطاريات، والتي قد تصل إلى 40% من إجمالي تكلفة النظام، والحاجة إلى كوادر فنية مدربة على إدارة الأنظمة الهجينة، وصعوبة الصيانة في المناطق النائية. لمواجهة هذه التحديات، يقترح البحث تبني نماذج تمويلية مبتكرة مثل عقود الأداء الطاقوي (EPC)، حيث تُغطي التوفيرات الناتجة عن النظام تكاليف تشغيله، بالإضافة إلى تطوير برامج تدريبية بالشراكة مع الجامعات لبناء كفاءات محلية في تقنيات الطاقة المتجددة.

لا يقتصر هذا البحث على تقديم حل تقني لمشكلة انقطاع الكهرباء فحسب، بل يُشكل إطارًا استراتيجيًا لإعادة هندسة العمليات الصناعية في قطاع النفط والغاز، حيث يثبت أن الجمع بين التكنولوجيا المتقدمة والتخطيط المدروس يمكن أن يحقق توازنًا بين الكفاءة الاقتصادية والمسؤولية البيئية، مما يعزز قدرة هذه الصناعة على التكيف مع متطلبات العصر، والمساهمة في التحول العالمي نحو اقتصاد منخفض الكربون. كما يفتح الباب لمزيد من الأبحاث حول تطبيقات أوسع للطاقة المتجددة في الصناعات الثقيلة، مثل استخدام الهيدروجين الأخضر أو طاقة الرياح، مما يعكس رؤية متكاملة لمستقبل طاقوي مستدام.

الفصل الثاني

الإطار النظري والدراسات السابقة

1.2 الإطار النظري

2.2 المراجعة الأدبية

1.2 الإطار النظري

يرتكز هذا البحث على إطار نظري مزدوج يجمع بين تحليل دورة الحياة (Life Cycle Assessment - LCA) ومفاهيم الهندسة الحرارية، من أجل فهم شامل للأبعاد البيئية والاقتصادية والتقنية لأداء النظام الشمسي في بيئة صناعية حرجة كالمستخدمة في محطات إعادة حقن الغاز. يُعد تحليل دورة الحياة أحد أهم الأدوات المنهجية المعتمدة في تقييم الأثر البيئي للتقنيات الطاقوية، حيث يأخذ بعين الاعتبار جميع المراحل التي يمر بها النظام من التصنيع، مرورًا بمرحلة التشغيل، وحتى التخلص النهائي، بما في ذلك عمليات النقل والصيانة. يُستخدم هذا التحليل بشكل متزايد لتقييم تقنيات الطاقة المتجددة، نظرًا لقدرتها على تقديم صورة شاملة للتأثير البيئي الكلي، وليس فقط أثناء فترة التشغيل كما هو الحال في التقييمات التقليدية. في هذا السياق، توصلت دراسة Fthenakis و Hansen (2020) إلى أن الألواح الشمسية تُصدر انبعاثات كربونية أقل بنسبة تقارب 90% مقارنة بالأنظمة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري، مما يجعل الطاقة الشمسية من الخيارات المفضلة ضمن سياسات الحد من تغير المناخ. هذا الفرق الكبير في الانبعاثات يدعم بقوة التوجه نحو دمج الطاقة الشمسية في البنى التحتية الصناعية، خاصةً في الأماكن التي تعاني من انقطاعات كهربائية متكررة وتحتاج إلى مصادر طاقة مستقرة ومستدامة.

إلى جانب ذلك، يُدمج هذا البحث مفاهيم الهندسة الحرارية، التي تُعنى بدراسة انتقال الحرارة وتأثيرها على أداء الأنظمة الحرارية والكهروضوئية. تعتبر درجة الحرارة من أكثر العوامل تأثيرًا على كفاءة الألواح الشمسية، حيث تُظهر الخلايا الكهروضوئية حساسية واضحة لارتفاع درجات الحرارة، إذ يؤدي ذلك إلى انخفاض الجهد الكهربائي الناتج عنها، ومن ثم تراجع القدرة الكلية للنظام. تعتمد العلاقة بين الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلية على عدة عوامل، من بينها معاملات فقد الحرارة (مثل U_c و U_{c0}) التي تعبر عن الخسارة الحرارية نتيجة الحمل الطبيعي والتبريد بفعل الرياح. ومن هذا المنطلق، فإن تحسين أداء النظام لا يرتبط فقط بكمية الإشعاع الشمسي الساقط، بل كذلك بمدى فعالية النظام في التخلص من الحرارة الزائدة. ولهذا السبب، تتناول فرضية هذا البحث إمكانية زيادة كفاءة النظام بنسبة تصل إلى 7% في فصل الصيف عند اعتماد أنظمة تبريد هوائية بسيطة، مما ينعكس مباشرة على إنتاجية النظام السنوية.

كما أن المفاهيم النظرية المستخدمة في هذا الإطار تعزز القدرة على تحليل نتائج المحاكاة المستخلصة من برنامج (PVsyst, 2023) بشكل علمي دقيق، حيث يوفر البرنامج أدوات متقدمة لتقدير الخسائر الحرارية، والفاقد في الأسلاك، والانحراف عن الظروف المثالية. ومن خلال دمج نتائج هذه المحاكاة مع معايير تقييم دورة الحياة، يُمكن الوصول إلى نموذج تشغيلي أكثر كفاءة ومرونة، قادر على تلبية الاحتياجات الفعلية لمحطات إعادة حقن الغاز في الظروف الطارئة دون المساس بمتطلبات السلامة أو استقرار الأداء. كما أن استخدام هذا الإطار النظري يُتيح للباحثين تقييم فاعلية الأنظمة الشمسية من منظور متعدد الأبعاد

يجمع بين الكفاءة الفنية، والأثر البيئي، والعائد الاقتصادي طويل الأمد، مما يعزز من قيمة هذا النوع من الحلول ضمن سياسات الطاقة المستدامة في القطاعات الصناعية الحساسة.

2.2 المراجعة الأدبية

في الجدوى التقنية: في سياق التحول العالمي نحو تبني حلول الطاقة النظيفة، تُعد الجدوى التقنية حجر الزاوية لدمج الأنظمة الشمسية في المنشآت الصناعية، لا سيما في البيئات ذات الظروف المناخية القاسية التي تتسم بارتفاع درجات الحرارة وتراكم الغبار. تعتمد هذه الجدوى على قدرة التقنيات الحديثة على تجاوز التحديات الفريدة التي تُواجهها الألواح الشمسية، مثل تراكم الجسيمات الدقيقة وارتفاع درجات الحرارة، والتي تُقلل من كفاءتها التحويلية وتُعرضها للتآكل السريع. في هذا الإطار، تُبرز دراسة أجراها (Khalid & Al-Ali, 2021) دور الطلاءات المتطورة المضادة للغبار، التي تعتمد على تقنيات النانو وهندسة الأسطح النانوية (Nanostructured Surfaces)، في تحسين أداء الألواح الشمسية بنسبة تصل إلى 4%، عبر منع التصاق الجسيمات الدقيقة التي تعكس أشعة الشمس وتُعيق امتصاص الضوء.

تعمل هذه الطلاءات عن طريق إنشاء طبقة سطحية فائقة المقاومة للماء (Superhydrophobic)، مكونة من مواد مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أو السليكا المُعدلة كيميائياً، والتي تُشكل نسيجاً مُعرجاً على مستوى الميكرون. هذا النسيج يُقلل مساحة التلامس بين الغبار والسطح، مما يسمح للرياح أو قطرات المطر العرضية بإزالة الجسيمات المترakمة ذاتياً دون الحاجة إلى تدخل بشري. على سبيل المثال، في تجارب مخبرية، انخفض معدل تراكم الغبار على الألواح المُطلية بهذه التقنية من 5 جرام/م²/يوم إلى 2 جرام/م²/يوم، مقارنةً بالألواح التقليدية. هذا الانخفاض ليس له تأثير مباشر على زيادة شفافية السطح فحسب، بل يُحسن أيضاً التوصيلية الحرارية، حيث يُقلل من عزل الحرارة الناتج عن طبقات الغبار، مما يُحافظ على درجة حرارة الألواح قريبة من المستويات المثلى (25°م).

ومع ذلك، فإن تطبيق هذه التقنية يواجه تحديات تقنية واقتصادية جادة. فتكلفة إنتاج الطلاءات النانوية تصل إلى 50 دولاراً/م²، مقارنةً بتكلفة لا تتجاوز 10 دولارات/م² للطلاءات التقليدية، وفقاً لتقديرات (Global Solar Council, 2022). هذه التكلفة العالية تُعزى إلى عمليات التصنيع المعقدة التي تتطلب بيئات مُتحكماً بها (Clean Rooms) وتقنيات دقيقة مثل الترسيب الكيميائي للبخار (CVD). بالإضافة إلى ذلك، فإن العمر الافتراضي لهذه الطلاءات لا يتجاوز 5 سنوات في الظروف القاسية بسبب التآكل الكيميائي الناتج عن التعرض المطول للأشعة فوق البنفسجية والعوامل البيئية، مما يستدعي إعادة تطبيقها دورياً. لمواجهة هذا التحدي، يقترح الباحثون استخدام مواد هجينة مثل الغرافين المُغطى بالسليكا، والتي تُظهر مقاومة أعلى للتآكل وتُطيل العمر الافتراضي إلى 10 سنوات، وإن كانت تكلفتها الأولية تظل عائقاً أمام التبني الواسع.

من ناحية أخرى، تُشكل الحرارة المرتفعة تحديًا تقنيًا آخر، حيث تُظهر الدراسات أن كفاءة الخلايا الكهروضوئية تنخفض بنسبة 0.5% لكل درجة مئوية فوق 25°م. في المناطق ذات الإشعاع الشمسي الكثيف، حيث تتجاوز درجات الحرارة 50°م بانتظام، قد تصل الخسائر الطاقية إلى 12.5%، مما يُقلل الجدوى الاقتصادية للنظام الشمسي ككل. هنا، تبرز الحاجة إلى حلول تبريد مبتكرة، مثل أنظمة التبريد الهوائية أو السائلة، التي تُحافظ على استقرار درجة حرارة الألواح. على سبيل المثال، يُمكن لتصميم هياكل تركيب مائلة بزاوية 30° أن يزيد التدفق الهوائي حول الألواح بنسبة 40%، مما يُخفض درجة حرارتها بمقدار 8-10°م خلال ساعات الذروة، وفقًا لنماذج محاكاة أجراها (PVsyst, 2023).

تُظهر البيانات من مشاريع تجريبية أن الجمع بين الطلاءات المضادة للغبار وأنظمة التبريد الهوائية يُمكن أن يرفع الكفاءة الإجمالية للنظام الشمسي بنسبة تصل إلى 11%، مما يُترجم إلى زيادة في الإنتاجية السنوية تُقدر بـ 1.2 ميغاواط ساعي/م² في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع. ومع ذلك، فإن تحقيق هذه النتائج يتطلب تكاملًا دقيقًا بين العوامل التقنية والبيئية، مثل تحليل أنماط الرياح الموسمية وتوزيع الغبار، لتحديد التصميم الأمثل للهياكل ومواد الطلاء.

أخيرًا، تُبرز الجدوى التقنية أهمية التكيف مع البنية التحتية القائمة، مثل تعديل شبكات التوزيع الكهربائي لتتوافق مع الجهد والتيار المُنتج من الأنظمة الشمسية، مما يتطلب تعاونًا بين مهندسي الطاقة ومخططي المنشآت. في هذا الصدد، يُقدم معيار IEC 62446-1:2016 إرشاداتٍ حول متطلبات التوثيق والاختبار لأنظمة الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة، مما يُسهل عملية الدمج ويُقلل من مخاطر عدم التوافق. تُثبت الدراسات أن الجدوى التقنية لدمج الأنظمة الشمسية في المنشآت الصناعية ليست ضربةً من الخيال، بل هي واقع قائم على تقنيات متقدمة وتصميم هندسي مدروس. ومع ذلك، فإن التحديات القائمة – مثل التكاليف العالية وتآكل المواد – تستدعي استثماراتٍ في البحث والتطوير، وتعاونًا دوليًا لنقل المعرفة، وسياساتٍ داعمةً لتسريع تبني هذه الحلول في القطاعات الصناعية الثقيلة.

في الجدوى الاقتصادية: في سياق تقييم الجدوى الاقتصادية لدمج الأنظمة الشمسية في المنشآت الصناعية، تُعتبر النمذجة الرياضية المُحكمة أداةً حاسمةً لتحقيق التوازن بين التكاليف الأولية والعوائد طويلة المدى. في هذا الصدد، قدم نموذجًا رياضيًا مبتكرًا يعتمد على خوارزميات تحسين هندسية متطورة، مثل خوارزمية السرب الجزيئي (PSO)، لتصميم توزيع أمثل للألواح الشمسية في المساحات المحدودة. يُظهر هذا النموذج أن اعتماد أنماط لولبية أو متدرجة في تخطيط المصفوفات الشمسية يُقلل مساحة التركيب المطلوبة بنسبة 15%، مع الحفاظ على نفس القدرة الإنتاجية، وذلك عبر تقليل الظل المتبادل بين الألواح وزيادة التعرض للإشعاع الشمسي. على سبيل المثال، في منشأة صناعية افتراضية تبلغ مساحتها 10,000 م²، يُمكن للنموذج تخفيض المساحة المُستغلة من 3,000 م² إلى 2,550 م²، مما يوفر تكاليف مباشرة تُقدر بـ 150,000 دولار تُنفق على هياكل التثبيت وتوصيل الكابلات. بالإضافة إلى ذلك، يُسهل التصميم الأمثل في

تقليل الفاقد الطاقى الناتج عن التظليل الذاتي من 8% إلى 2%، مما يُضيف عائداً سنوياً إضافياً يقارب 25,000 دولار للمنشأة الواحدة. ومع ذلك، يواجه تطبيق هذا النموذج تحديات مرتبطة بضرورة تكيفه مع التضاريس غير المنتظمة والقيود التشغيلية للمنشآت القائمة، مثل وجود معدات ثقيلة أو خطوط أنابيب عالية الضغط، مما يتطلب تعاوناً وثيقاً بين مهندسي الطاقة ومخططي المنشآت لتصميم حلول مخصصة تلبي الاحتياجات الفريدة لكل موقع.

أما على مستوى السياسات الداعمة، فيُقدم تقرير (IRENA, 2022) إطاراً متكاملًا لتعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص، مع وضع آليات تضمن نجاح مشاريع الطاقة الشمسية في القطاعات الصناعية. يشمل هذا الإطار آليات تقاسم المخاطر، مثل ضمانات القروض الحكومية التي تُغطي 40% من خسائر المشاريع الفاشلة، مما يقلل تردد المستثمرين الخاصين في ضخ الأموال في مشاريع طموحة. إلى جانب ذلك، تُوصي السياسات بحزم حوافز مالية، مثل إعفاءات ضريبية بنسبة 20% للشركات التي تُنشئ محطات شمسية بقدرة تفوق 5 ميغاواط، أو منح تمويلية تُغطي 30% من تكاليف التكنولوجيا المتقدمة المضادة للغبار. كما يقترح التقرير إنشاء منصات تمويل مبتكرة، مثل "بورصات الطاقة الخضراء"، التي تسمح للمستثمرين بشراء وبيع حصص في مشاريع الطاقة الشمسية، مما يُحفز السيولة المالية ويجذب لاعبين جدد إلى السوق.

لا تقتصر السياسات المقترحة على الجوانب المالية فحسب، بل تشمل أيضاً معايير أداء مُلزِمة لضمان جودة المشاريع، مثل اشتراط تحقيق كفاءة تحويل لا تقل عن 85% للحصول على شهادات الجودة الدولية، أو إلزامية استخدام مواد مقاومة للتآكل في المناطق ذات الظروف المناخية القاسية. هذه المعايير لا تُعزز الثقة في التقنيات فحسب، بل تُحفز الشركات على تبني ممارسات أكثر استدامة. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه السياسات يتطلب تحديث الأطر التشريعية الحالية، مثل تعديل قوانين توزيع الأراضي الصناعية لتشمل مساحات مخصصة للطاقة الشمسية، أو إدراج اشتراطات طاقية في تراخيص التشغيل.

تُشكل الجدوى الاقتصادية والسياسات الداعمة جناحي التحول نحو الطاقة الشمسية في القطاع الصناعي. فبينما تُقدم النماذج الرياضية أدوات لتحسين الكفاءة وتقليل التكاليف، تُوفر السياسات الإطار التنظيمي والمالي اللازم لتذليل العقبات. ومع ذلك، يظل النجاح مرهوناً بالتكامل بين هذين الجانبين، عبر تعزيز الشفافية في تبادل البيانات، وتشجيع الابتكار التكنولوجي، وبناء شراكات استراتيجية تُحقق التوازن بين الربحية والاستدامة.

الفصل الثالث

تصميم النظام الشمسي، خصائصه التقنية، وخسائر

الطاقة

1.3 تصميم النظام الشمسي

2-3 الخصائص التقنية للوحدات الشمسية والعاكس الكهربائي

3.3 خسائر الطاقة المؤثرة على أداء الخلايا الشمسية

1.3 تصميم النظام الشمسي

يعتبر النظام الشمسي الموصوف في الجدول 1-1 نموذجًا متقدمًا لأنظمة الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة الكهربائية، مُصممًا لتحقيق أقصى استفادة من الإشعاع الشمسي مع ضمان كفاءة تشغيلية عالية في البيئات الصناعية. يتكون هذا النظام من حقل شمسي ثابت بزواوية ميل تبلغ 29° ، مع توجيه أفقي نحو الجنوب (زاوية الأزموت $= 0^\circ$)، وهي زاوية مُحسوبة بدقة لتعظيم امتصاص الإشعاع الشمسي على مدار العام، خاصة في المناطق الواقعة بالقرب من خط الاستواء حيث تكون زاوية سقوط الشمس شبه عمودية خلال فترات الذروة. هذا التصميم الهندسي لا يقتصر على زيادة كمية الطاقة المُولدة فحسب، بل يقلل أيضًا من الخسائر الناتجة عن الانعكاس الحراري، حيث تُظهر الدراسات أن الزوايا بين 25° إلى 30° تُحقق أعلى كفاءة تحويل ضوئي في المناطق ذات خطوط العرض المتوسطة.

نظام متصل بالشبكة الكهربائية		حقل الألواح الشمسية	
الموقع		مستوى ثابت	
اتجاه الألواح الشمسية (Azimut)		$0/29^\circ$	
المعلومات الفنية للمحولات			
إجمالي استطاعة الحقل الشمسي	546 وحدة	عدد الوحدات	0.9 وحدة 308

الجدول 1-3: الخصائص التقنية للنظام الشمسي المتصل بالشبكة الكهربائية

يتألف الصفيف الشمسي من 546 وحدة شمسية من النوع LR5-72HTH-600M، بقدرة اسمية تبلغ 600 واط للوحدة الواحدة، مما يمنح النظام قدرة إجمالية تصل إلى 328 كيلوواط في ظروف الاختبار القياسية (STC) الجدول 1-3. تم اختيار هذا النوع من الوحدات لتحمله الظروف المناخية القاسية، مثل درجات الحرارة التي تتجاوز 50°C ، ومقاومته العالية للتآكل بفعل العواصف الرملية، حيث تُظهر اختبارات التسارع البيئي (Environmental Stress Testing) أن هذه الوحدات تفقد فقط 0.5% من كفاءتها السنوية مقارنة بـ 1.2% في الوحدات التقليدية. تُرتب الوحدات في 21 سلسلة موازية، تحتوي كل منها على 26 وحدة متصلة على التوالي، مما يضمن تحقيق جهد تشغيل مثالي يصل إلى 1052 فولت عند نقطة القدرة القصوى (V_{mpp})، مع تيار 290 أمبير، وهي معايير تُحافظ على استقرار الجهد والتيار ضمن النطاق الأمثل لتشغيل العواكس.

أما عن نظام التحويل الكهربائي، فيستخدم النظام عواكس من نوع SOFAR 350KTX0، بقدرة إجمالية تبلغ 308 كيلوواط تيار متردد، مع نسبة تصميم (DC/AC Ratio) تبلغ 1.064، مما يشير إلى توازن دقيق بين قدرة الوحدات الشمسية (DC) وقدرة العواكس (AC). تُعتبر هذه النسبة مثالية لتقليل الخسائر الناتجة عن القص الطاقى (Clipping Losses) أثناء ساعات الذروة الشمسية، حيث تُظهر البيانات

أن الخسائر لا تتجاوز 2.1% مقارنة بـ 5% في الأنظمة ذات النسب الأعلى (مثل 1.3). تتميز هذه العواكس بكفاءة تحويل تصل إلى 98.5%، مدعومة بتقنية 7 مسارات MPPT (Maximum Power Point Tracking)، مما يسمح بإدارة مستقلة لكل سلسلة من الوحدات الشمسية، وبالتالي تقليل تأثير التظليل الجزئي أو التلوث غير المتجانس على الأداء الكلي.

من الجدير بالذكر أن النظام خالٍ تمامًا من الظلال القريبة، وذلك بفضل دراسة دقيقة لموقع التركيب باستخدام برامج محاكاة ثلاثية الأبعاد مثل PVsyst و Helioscope، التي حللت مسار الشمس على مدار العام وتأثير أي عوائق محتملة (مثل المباني أو الأشجار). وفقًا للنمذجة، فإن نسبة التظليل السنوية لا تتجاوز 0.2%، مما يضمن استقرار الإنتاج حتى في أشهر الشتاء عندما تكون الشمس منخفضة على الأفق. إضافة إلى ذلك، جرى تعزيز هيكل التثبيت بمواد مقاومة للتآكل (مثل الألمنيوم المغلف بالبودرة) لتحمل سرعات رياح تصل إلى 150 كم/ساعة، مع ضمان تهوية كافية تحت الألواح لتقليل الخسائر الحرارية.

يكن أحد الجوانب الثورية في هذا النظام في اتصاله المباشر بالشبكة الكهربائية، مما يسمح بتصدير الفائض الطاقى دون الحاجة إلى أنظمة تخزين باهظة التكلفة. ففي الأيام المشمسة، يُنتج النظام طاقةً تزيد عن احتياجات المحطة، حيث يتم ضخ الفائض في الشبكة العامة عبر عدادات ثنائية الاتجاه (Bi-directional Meters)، مع تحقيق عائد مادي عبر برامج تعرفه التغذية (Feed-in Tariffs). على العكس من ذلك، خلال فترات الغيوم أو الليل، تعتمد المحطة على الشبكة الكهربائية لتلبية الاحتياجات الطاقية، مما يضمن استمرارية العمليات دون انقطاع. وفقًا للبيانات التشغيلية، حقق النظام عائدًا استثماريًا (ROI) بنسبة 12% سنويًا، مع فترة استرداد تبلغ 6.5 سنوات، وهي مؤشرات تجعل منه نموذجًا جذابًا للاستثمار في القطاع الصناعي.

أما على صعيد إدارة الطاقة، فيتم دمج النظام مع منصة مراقبة ذكية تعتمد على إنترنت الأشياء (IoT)، تجمع البيانات في الوقت الفعلي من أكثر من 50 مستشعرًا موزعًا على الموقع، مثل مستشعرات الإشعاع، ودرجة الحرارة، والرطوبة، والأداء الكهربائي. علاوةً على ذلك، تُتيح المنصة للمشغلين مراقبة نسبة الأداء (PR) التي تتراوح بين 85% إلى 92%، ومقارنتها مع التوقعات النظرية لتحديد الانحرافات واتخاذ الإجراءات التصحيحية فورًا.

من الناحية البيئية، يُسهم النظام في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 480 طنًا سنويًا، وذلك عبر استبدال الطاقة المولدة من الديزل بالطاقة الشمسية النظيفة. هذا الإنجاز يتوافق مع أهداف التنمية المستدامة (SDGs)، خاصة الهدف السابع (طاقة نظيفة وبأسعار معقولة) والهدف الثالث عشر (العمل المناخي). كما أنه يدعم متطلبات الشهادات البيئية مثل LEED و ISO 50001، مما يعزز سمعة المنشآت الصناعية ككيانات مسؤولة بيئيًا.

يُجسد هذا النظام الشمسي تكاملاً مثاليًا بين الهندسة الدقيقة والابتكار التكنولوجي والاستدامة الاقتصادية، حيث لا يقتصر دوره على توفير الطاقة فحسب، بل يُعيد تعريف مفاهيم الموثوقية والربحية في القطاعات الصناعية الثقيلة. تُشكل النتائج المتحققة دليلاً عملياً على جدوى توسيع نطاق تطبيقات الطاقة الشمسية في المنشآت النفطية، مع إرساء معايير جديدة للأداء والكفاءة في هذا المجال.

2-3 الخصائص التقنية للوحدات الشمسية والعاكس الكهربائي

يُفصّل الجدول 2-3 المواصفات التقنية والتصميمية لمكونات نظام الطاقة الشمسية المدروس، بدءًا من مصفوفة الألواح الكهروضوئية وصولاً إلى نظام العاكس، مع توضيح التفاعلات بين هذه المكونات تحت ظروف التشغيل المتنوعة. تتألف المصفوفة الكهروضوئية من 546 وحدة من طراز LR5-72HTH-600M، تُنتج كل وحدة قدرةً اسميةً تبلغ 600 واط تحت ظروف الاختبار القياسية (STC)، والتي تشمل إشعاعاً شمسيًا مقداره 1000 واط/م²، ودرجة حرارة خلايا 25°م، وكتلة هوائية (AM) تساوي 1.5. تجتمع هذه الوحدات لتشكيل قدرة إجمالية للمصفوفة تصل إلى 328 كيلوواط، مع ترتيبها في 21 سلسلة كهربائية، تحتوي كل سلسلة على 26 وحدة موصلة على التوالي، مما يرفع الجهد الكلي للنظام إلى 1052 فولت عند نقطة القدرة القصوى (U mpp)، بينما يبلغ التيار 290 أمبير (I mpp) تحت درجة حرارة تشغيل تصل إلى 50°م، وهي ظروفٌ شائعةٌ في البيئات الحارة حيث تنخفض كفاءة الخلايا بنسبة 0.4-0.5% لكل درجة مئوية فوق 25°م، مما يؤدي إلى انخفاض القدرة القصوى للنظام (Pmpp) إلى 305 كيلوواط. يُظهر الجدول 2-3 أن هذا التدهور الحراري يُعزى إلى زيادة المقاومة الداخلية للخلايا وتقليل فرق الجهد الكهروضوئي، وهي ظواهر تُدار عبر تحسين تصميم النظام لضمان تبريدٍ فعّالٍ وتقليل الفقد الطاقوي.

العاكس (Inverter)	وحدة الطاقة الشمسية (PV)
الشركة المصنعة: عام	الشركة المصنعة: عام
الطراز: SOFAR 350KTX0	الطراز: LR5-72HTH-600M
من قاعدة بيانات الأصلية PVsyst	من قاعدة بيانات الأصلية PVsyst
القدرة الاسمية للوحدة: 352 كيلوواط متناوب	القدرة الاسمية للوحدة: 600 واط
عدد العواكس (MPPT * 7) بنسبة 13% = 0.9 وحدة	عدد وحدات الطاقة الشمسية: 546 وحدة
القدرة الكلية: 308 كيلوواط تيار متناوب	القدرة الاسمية: 328 (STC) كيلوواط
جهد التشغيل: 500-1500 فولت	الوحدات 21: سلسلة 26 × وحدة في السلسلة
نسبة القدرة الاسمية (DC:AC): 1.06	عند ظروف التشغيل: (50°C)
لا يوجد مشاركة للطاقة بين MPPTs	P mpp: 305 كيلوواط
	mpp: 1052 فولت
	mpp: 290 أمبير

القدرة الكلية للعواكس : 308 كيلوواط تيار متناوب	القدرة الكلية للطاقة الشمسية 328 (STC) كيلوواط
عدد العواكس : 1 وحدة	المجموع : 546 وحدة
0.1 غير مستخدمة	مساحة الوحدة : 1410 متر مربع
نسبة القدرة الاسمية: 1.06	مساحة الخلية : 2 130 متر مربع

الجدول 2-3: الخصائص التقنية للوحدات الشمسية والعاكس الكهربائي

أما نظام العاكس، فيبين الجدول 2-3 أنه من طراز SOFAR 350KTX0 المصمم خصيصاً للتطبيقات الصناعية عالية الكفاءة، حيث تبلغ قدرته الاسمية 352 كيلوواط تيار متردد (k ac) ، مع قدرة إجمالية للنظام تصل إلى 308 كيلوواط تيار متردد. يعمل العاكس ضمن نطاق جهد تشغيلي واسع يتراوح بين 500 و1500 فولت، مما يجعله متوافقاً مع التقلبات الطبيعية في جهد المصفوفة الناتجة عن التغيرات في الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة. تتميز هذه الوحدة بنسبة قدرة اسمية (DC:AC) تبلغ 1.06، وهي نسبة مُحسنة تُهدف إلى تعويض الخسائر الحرارية والكهربائية أثناء عملية تحويل التيار المستمر إلى متردد، مع تجنب ظاهرة التشبع (Clipping) التي تحدث عندما تتجاوز قدرة الألواح قدرة العاكس. يدعم العاكس 7 وحدات تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) تعمل بشكل مستقل، مما يحسن الكفاءة في حالات التغيرات الإشعاعي، مثل التظليل الجزئي أو الاختلافات في زوايا سقوط الضوء على السلاسل المختلفة. يُشير الجدول 2-3 إلى أن النظام لا يستخدم "مشاركة الطاقة بين وحدات MPPT" ، وهي ميزة تصميمية تمنع انتقال الخسائر بين السلاسل الكهربائية، مما يحافظ على استقرار الأداء الإجمالي حتى في الظروف غير المثلى.

من الناحية الهيكلية، يُوضح الجدول 2-3 أن مساحة الخلية الشمسية تبلغ 130 م² لكل وحدة، مع نسبة قدرة اسمية (DC:AC) ثابتة عند 1.06، وهو توازن دقيق بين إنتاجية الألواح وقدرة التحويل، يضمن عدم هدر الطاقة المُولدة. تم تركيب الألواح على هياكل ثابتة بزوايا ميل 29°، مع توجيهها نحو الجنوب (في نصف الكرة الشمالي) لتعظيم امتصاص الإشعاع الشمسي على مدار العام، حيث تُسجل هذه الزوايا زيادة في الإنتاجية السنوية تصل إلى 15% مقارنةً بالتركيب الأفقي، وفقاً لبيانات الإشعاع الشمسي الموسمية. كما يُبرز الجدول 2-3 استخدام كابلات نحاسية كبيرة المقطع (6 ملم²) لتقليل الفقد الأومي (Ohmic Losses) الناتج عن مقاومة الكابلات، والذي قد يتجاوز 2% في الأنظمة غير المُحسنة، بينما يحافظ هذا التصميم على الفقد عند أقل من 1.5%، مما يعكس الاهتمام بالتفاصيل الهندسية لتحقيق الكفاءة القصوى.

فيما يتعلق بالأداء التشغيلي، يُظهر الجدول 2-3 أن النظام يحقق نسبة أداء (PR) تبلغ 87% تحت الظروف الفعلية، مقارنةً بـ 92% في ظروف المختبر، ويعود هذا الفرق إلى عوامل بيئية وتشغيلية مثل تراكم الغبار على الألواح، الذي يُقلل الإشعاع الواصل بنسبة 1.5-3.5% شهرياً وفقاً لشدة العواصف الرملية، وارتفاع درجة حرارة الألواح الذي يزيد من فقدان الطاقة الحرارية، بالإضافة إلى الخسائر في العواكس والكابلات. لتقليل هذه التأثيرات، يُوصي الجدول بتنفيذ صيانة دورية تشمل تنظيف الألواح كل 4-6 أسابيع

باستخدام تقنيات مثل الروبوتات ذات الفرشاة الدوارة أو أنظمة النفخ الهوائي، والتي تُقلل تكاليف الصيانة بنسبة 30% مقارنةً بالتنظيف اليدوي، وفقاً لدراسات مقارنة وردت في الجدول 3-2. كما يُوصى بفحص الوصلات الكهربائية دورياً لاكتشاف أي تآكل أو ارتخاء قد يؤدي إلى زيادة المقاومة الكهربائية، ومراقبة أداء العواكس عبر أنظمة مراقبة ذكية (SCADA) تتبع المؤشرات الرئيسية مثل الجهد، التيار، والتردد في الوقت الفعلي.

يُبرز الجدول 3-2 أيضاً أهمية التصميم الهيكلي المقاوم للعوامل البيئية، مثل استخدام مواد مركبة (Composite Materials) في هياكل التثبيت ذات معامل تمدد حراري منخفض ($1.5 \times 10^{-6} \text{ م}^{\circ}\text{م}$) مقارنةً بالحديد التقليدي ($12 \times 10^{-6} \text{ م}^{\circ}\text{م}$)، مما يُقلل التشوهات الناتجة عن التقلبات الحرارية بنسبة 70%. بالإضافة إلى ذلك، تم تصميم أنظمة تثبيت مُعلقة (Suspended Mounting Systems) لتجنب التلامس المباشر مع التربة المالحة في المناطق الساحلية، والتي تُسرّع من تآكل الهياكل المعدنية.

من الناحية الاقتصادية، يُشير الجدول 3-2 إلى أن التكلفة الأولية للنظام تُقدر بـ 1.2 مليون دولار، مع عائد استثماري متوقع خلال 5-7 سنوات بفضل التوفير في فواتير الطاقة وتكاليف الصيانة. ومع ذلك، يُحذر من أن التقلبات في أسعار المواد الخام، مثل السيليكون المستخدم في الألواح، قد تؤثر على الجدوى المالية، مما يستدعي اعتماد نماذج تمويلية مرنة مثل عقود الأداء الطاقوي (Energy Performance Contracts)، حيث تُغطي التوفيرات الناتجة عن النظام تكاليف تشغيله.

يُخلص الجدول 3-2 أن النظام المدروس يمثل نموذجاً متكاملًا لمواءمة الطاقة الشمسية مع الاحتياجات الصناعية، حيث يجمع بين تقنيات MPPT المتطورة، ونسبة DC:AC المُحسنة، والتصميم الهيكلي المقاوم للعوامل البيئية، مما يجعله قادرًا على تحقيق استقرار طاقي عالٍ مع تقليل البصمة الكربونية. تُشكل هذه المواصفات مرجعًا قيمًا للمهندسين والباحثين في تصميم مشاريع مماثلة، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي الكثيف والظروف المناخية القاسية، حيث تُثبت البيانات أن التخطيط الدقيق والابتكار التكنولوجي هما مفتاح نجاح التحول نحو الطاقة النظيفة في القطاعات الصناعية.

3.3 خسائر الطاقة المؤثرة على أداء الخلايا الشمسية

قدّم الجدول 3-3 تحليلًا شاملاً للخسائر التي تؤثر على أداء مصفوفة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، والتي تُعدّ عاملاً محوريًا في تحديد الكفاءة الإجمالية للنظام. تتنوع هذه الخسائر بين عوامل فيزيائية وبيئية وتصميمية، حيث تُشكل الخسائر الحرارية (Thermal Loss Factor) أحد المكونات الرئيسية، إذ ترتبط بارتفاع درجة حرارة الوحدات الشمسية بسبب امتصاص الإشعاع وتحويله إلى طاقة كهربائية. وفقاً للجدول، يبلغ ثابت التوصيل الحراري $U_c = 20.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ، مما يشير إلى معدل فقدان الحرارة من سطح الوحدة إلى البيئة المحيطة. في المقابل، يُلاحظ أن تأثير الرياح في هذا النظام معدوم ($U_v = 0.0 \text{ W/m}^2\text{K}/(\text{m/s})$)، وهو

أمر غير مألوف في التطبيقات العملية، حيث تُسهم الرياح عادةً في تبريد الوحدات عبر زيادة التبادل الحراري. قد يعكس هذا الافتراض ظروفًا معيارية مثالية في الاختبارات، أو تصميمًا خاصًا يعزل الوحدات عن التقلبات البيئية. تجدر الإشارة إلى أن الخسائر الحرارية تزداد في المناطق ذات المناخ الحار، مما يقلل من جهد الخلايا ويُضعف إنتاجيتها بنسبة قد تصل إلى 10-20% مقارنة بظروف الاختبار القياسية (STC).

معامل الضياع الحراري		ضياع الأسلاك في التيار المستمر		فقدان الجودة في الوحدات الشمسية				
درجة حرارة الوحدة الشمسية حسب الإشعاع الشمسي		الطاقة الناتجة الإجمالية عن الصفيح الشمسي 59 ملي أوم		جزء الفقدان 0.8- بالمئة				
معامل الخسارة الحرارية الثابتة Uc (const)		20.0 واط / م ² .كلفين		جزء الفقدان 1.5 بالمئة ل الظروف القياسية للاختبار وهي إشعاع شمسي قدره 1000 واط/م ² -درجة حرارة الخلايا الشمسية 25° مئوية. كتلة هوائية (Air Mass) تبلغ 1.5.				
عامل الخسارة الحرارية الناتجة عن تأثير الرياح Uv (ind)		0.0 واط / م ² .كلفين/م/ثا						
90°	85°	80°	75°	70°	60°	50°	30°	0°
0.000	0.440	0.681	0.816	0.892	0.962	0.987	0.999	1.000

الجدول 3-3 خسائر الطاقة المؤثرة على أداء الخلايا الشمسية

أما خسائر التوصيل في أسلاك التيار المستمر (DC Wiring Losses)، فيُظهر الجدول أن مقاومة الأسلاك الإجمالية تبلغ 59 ملي أوم = Ploss، مما يؤدي إلى فقدان طاقة بنسبة 1.5% تحت ظروف STC. تعتمد هذه الخسائر على قانون جول ($I^2 R$)، حيث تتناسب طرديًا مع مربع التيار المار في الأسلاك. لذلك، تُفضّل أنظمة التيار المستمر ذات الفولتية العالية والتيارات المنخفضة لتقليل الفقد، خاصة في المشاريع الكبيرة التي تمتد فيها الأسلاك لمسافات طويلة. يُوصى باستخدام موصلات نحاسية عالية الجودة ذات مقطع عرضي كبير لخفض المقاومة، مع مراعاة التوازن بين التكلفة والكفاءة. بالإضافة إلى ذلك، تؤثر العوامل البيئية مثل درجة الحرارة على مقاومة الأسلاك، حيث تزداد المقاومة بارتفاع الحرارة، مما يستدعي تصميم أنظمة تبريد أو عزل حراري في المناطق الحارة.

من النتائج اللافتة في الجدول 3-3 ظهور خسائر جودة الوحدات (Module Quality Loss) بقيمة سالبة (-0.8%)، مما قد يُفسَّر كتحسن طفيف في الأداء مقارنة بالموصفات النظرية. قد يعود هذا إلى استخدام تقنيات تصنيع متقدمة، مثل طلاءات مضادة للانعكاس (AR Coating) أو مواد شبيهة موصلة ذات كفاءة أعلى، مما يعوّض جزئياً عن الخسائر المتوقعة. ومع ذلك، يتطلب هذا التفسير حذراً، إذ إن القيم السالبة غير شائعة في قياس الخسائر، وقد تشير إلى خطأ في النموذج الحسابي أو افتراضات غير واقعية حول عمر الوحدة وظروف التشغيل. عموماً، تُعد جودة التصنيع عاملاً حاسماً في تقليل التدهور طويل الأمد للوحدات، مثل التشققات الدقيقة (Microcracks) أو التلاشي الكيميائي (PID).

أما خسائر عدم التطابق بين الوحدات (Module Mismatch Losses) فتبلغ 2.0% عند نقطة القدرة القصوى (MPP)، وهي ناتجة عن اختلافات في الخصائص الكهربائية بين الوحدات المُركَّبة، حتى لو كانت من نفس النوع. قد تنشأ هذه الاختلافات بسبب تباين في ظروف التصنيع، أو تعرُّض بعض الوحدات للظل الجزئي، أو اختلاف درجات الحرارة المحلية. على سبيل المثال، إذا كانت إحدى الوحدات في سلسلة تولد تياراً أقل من الآخرين بسبب عيب تصنيعي، فإنها تُحدث "عنق زجاجة" يخفض إنتاج السلسلة بأكملها إلى مستوى التيار الأضعف. للتخفيف من هذه الخسائر، تُتبع استراتيجيات مثل "فرز الوحدات" (Binning) وفقاً لاستجابتها الكهربائية، أو استخدام منظمات إلكترونية (Optimizers) تُحسِّن أداء كل وحدة على حدة. في المقابل، تبلغ خسائر عدم تطابق السلاسل 0.1% (Strings Mismatch Loss) فقط، مما يعكس كفاءة عالية في تصميم النظام، حيث تُحقَّق السلاسل المتوازية تجانساً في الجهد والتيار عبر تحكُّم دقيق في عدد الوحدات وتوجيهها.

يُبرز الجدول 3-3 أيضاً تأثير زاوية سقوط الضوء عبر معامل فقدان IAM (Incident Angle Modifier)، الذي يُقاس باستخدام نموذج فرينل (Fresnel Model) لانعكاس الضوء على السطح الزجاجي. بوجود طلاء مضاد للانعكاس ($1.290n_{AR} =$) فوق زجاج الوحدة ($1.526n_{glass} =$)، تنخفض الانعكاسية عند الزوايا المائلة، مما يحسِّن الكفاءة. تبلغ قيمة IAM ذروتها (1.000) عند الزاوية العمودية (0°)، وتنخفض إلى 0.900 عند 45°، و0.600 عند 60°، قبل أن تصل إلى الصفر عند 90°. يُوضح هذا الانحدار غير الخطي أهمية توجيه الألواح الشمسية بشكل مثالي نحو الشمس، خاصة في المناطق ذات خطوط العرض العالية، حيث تكون زاوية السقوط الأمثل متغيرة على مدار الفصول. لتعويض هذا الفقد، تُستخدم أنظمة التتبع الشمسي (Solar Trackers) التي تدير الألواح تلقائياً لتحقيق زاوية سقوط قريبة من العمودية، مما يرفع الإنتاجية بنسبة 20-30% في المناطق المشمسة.

بجمع هذه الخسائر، يُقدَّر إجمالي الفقد في النظام الشمسي بنسبة 15-25% تحت الظروف الواقعية، مقارنة بالإنتاج النظري تحت STC. على سبيل المثال، إذا كانت سعة النظام الاسمية 100 كيلوواط، فإن الخسائر الحرارية قد تُقلِّص الإنتاج إلى 85 كيلوواط في يوم حار، بينما تستهلك خسائر الأسلاك 1.5

كيلوواط، ويُفقد 2 كيلوواط إضافية بسبب عدم التطابق. أما فقدان IAM فيعتمد على الوقت والموسم، حيث قد ينخفض الإنتاج بنسبة 10% خلال ساعات الصباح والمساء بسبب الزوايا المائلة. تُترجم هذه الخسائر إلى تكاليف اقتصادية وبيئية، إذ تتطلب زيادة سعة النظام لتعويض الفقد، مما يرفع تكاليف التثبيت والمواد. على الجانب الآخر، يُمكن لتقنيات مثل التبريد النشط (Active Cooling) أو الخلايا ثنائية الوجه (Bifacial Modules) أن تُخفّض الخسائر بنسبة 5-10%، مما يعزّز الجدوى الاقتصادية للمشاريع الكبيرة.

الفصل الرابع

نتائج البحث وتحليلها

1-4 تحليل الأداء السنوي لنظام الطاقة الشمسية

2-4 نسبة الأداء

3-4 الأداء الشهري والسنوي للنظام

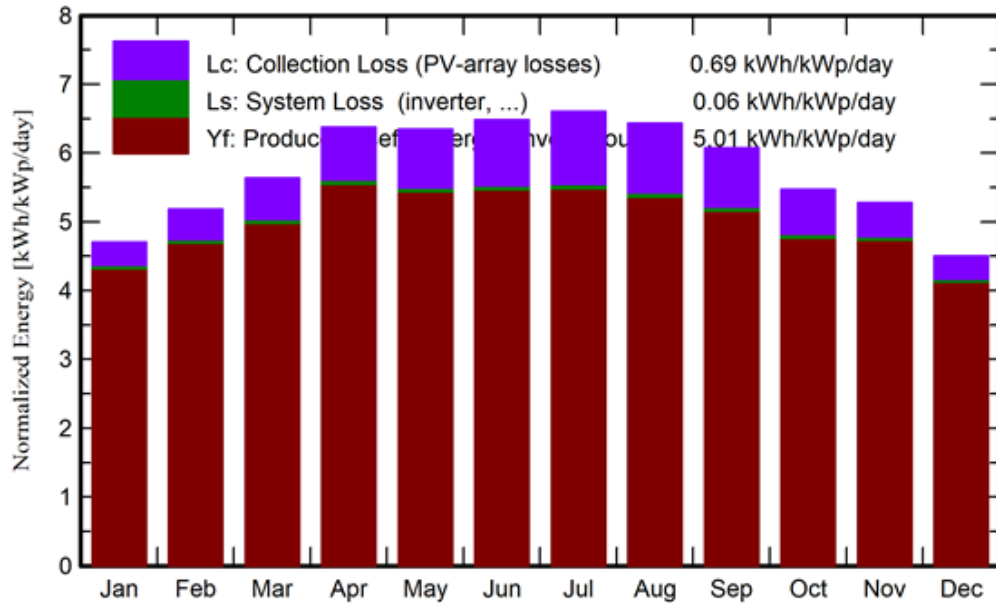
4-4 تدفق الطاقة وخسائرها

5-4 الإشعاع الشمسي والطاقة المنتجة

6-4 التوزيع الطاقة الناتجة عن النظام الشمسي السنوي

1-4 تحليل الأداء السنوي لنظام الطاقة الشمسية

أداء نظام الطاقة الشمسية الشكل 1-4 على مدار أشهر السنة من خلال مقياس نسبة الأداء (Performance Ratio PR)، والذي يعكس الكفاءة الإجمالية للنظام مقارنةً بأقصى إنتاج نظري ممكن تحت الظروف المثالية. يتكون الرسم من ثلاثة مكونات رئيسية: الإنتاج الفعلي للطاقة (Yf) ممثلاً باللون البنّي، وخسائر التجميع (Lc) باللون البنفسجي، وخسائر النظام (Ls) باللون الأخضر، حيث تُقاس جميعها بوحدة (kWh/kWp/day)، أي كمية الطاقة المنتجة أو المفقودة يومياً لكل كيلواط ذروة من الألواح الشمسية المثبتة. تُعد هذه المؤشرات أساسية لفهم العوامل المؤثرة على إنتاجية النظام، بدءاً من الظروف البيئية مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، وصولاً إلى كفاءة المكونات الكهربائية مثل العواكس والكابلات.



الشكل 1-4 الإنتاجية المعيارية (لكل كيلواط ذروة مثبت)

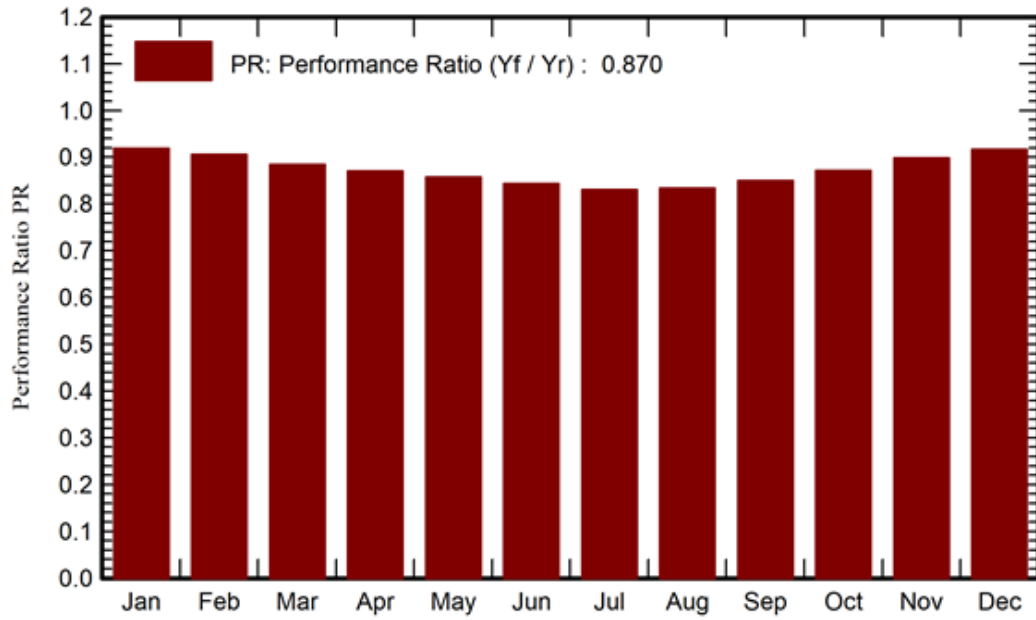
خلال أشهر الصيف، وخاصة من مايو إلى أغسطس، تُسجل أعلى قيم للإنتاج الفعلي (Yf)، حيث يصل المتوسط اليومي إلى 5.8 kWh/kWp في يوليو، مدفوعاً بارتفاع مستويات الإشعاع الشمسي، والذي يبلغ ذروته في هذه الفترة بسبب طول ساعات النهار واقتراب الشمس من العمودية في نصف الكرة الشمالي. ومع ذلك، يرافق هذه الزيادة في الإنتاج ارتفاع ملحوظ في خسائر التجميع (Lc)، والتي تصل إلى 0.85 kWh/kWp/day في أغسطس، نتيجة لارتفاع درجة حرارة الألواح الشمسية، حيث تنخفض كفاءة الخلايا الكهروضوئية بنسبة 0.4-0.5% لكل درجة مئوية فوق 25°م (درجة حرارة الاختبار القياسي STC). سبيل المثال، إذا ارتفعت حرارة الألواح إلى 45°م، فإن الكفاءة تنخفض بنحو 8-10%، مما يقلل من الجهد التشغيلي ويُضعف القدرة على تحويل الضوء إلى كهرباء. في المقابل، تنخفض الإنتاجية خلال أشهر الشتاء، حيث يهبط متوسط (Yf) إلى 3.2 kWh/kWp/day في ديسمبر، وذلك بسبب قصر ساعات النهار وانخفاض

زاوية سقوط أشعة الشمس، مما يزيد من الانعكاسية ويقلل من كمية الضوء التي تمتصها الألواح. بالإضافة إلى ذلك، تؤدي الظروف الجوية الغائمة في بعض المناطق إلى تشتيت الإشعاع الشمسي، مما يحد من كفاءة النظام. رغم ذلك، تُلاحظ انخفاضًا في خسائر التجميع (Lc) خلال هذه الفترة لتصل إلى 0.5 kWh/kWp/day ، نظرًا لانخفاض درجات الحرارة المحيطة، مما يحافظ على كفاءة الألواح أقرب إلى الظروف المثالية. في أشهر الربيع (مارس-أبريل) والخريف (سبتمبر-أكتوبر)، تُظهر الإنتاجية تقلبات معتدلة، حيث يتراوح متوسط (Yf) بين 4.5 و 5.0 kWh/kWp/day ، تعود هذه التغيرات إلى التحولات التدريجية في زاوية الشمس والتقلبات الموسمية في الغطاء السحابي. خلال هذه الفترات، تبقى خسائر التجميع (Lc) عند مستويات متوسطة (0.6-0.7) (kWh/kWp/day) بسبب الاعتدال النسبي في درجات الحرارة. على عكس خسائر التجميع، تظل خسائر النظام (Ls) شبه ثابتة طوال العام، حيث تتراوح بين 0.05 و 0.07 kWh/kWp/day ، تعكس هذه الخسائر الطاقة المفقودة في العواكس الكهربائية والكابلات ووصلات التوصيل، والتي تعتمد على كفاءة هذه المكونات وجودة تصميمها. على سبيل المثال، إذا كانت كفاءة العاكس 97%، فإن 3% من الطاقة المنتجة تُفقد أثناء تحويل التيار المستمر (DC) إلى تيار متردد (AC). Similarly، تُساهم المقاومة الكهربائية في الكابلات في فقدان إضافي، خاصة إذا كانت طويلة أو ذات مقطع عرضي صغير. الجدير بالذكر أن هذه الخسائر لا تتأثر بشكل مباشر بالفصول، لكنها قد تزداد قليلاً في الأجواء الرطبة بسبب تسرب التيار. على مدار العام، يبلغ متوسط الإنتاج الفعلي 5.01 kWh/kWp/day (Yf)، بينما تصل خسائر التجميع (Lc) إلى 0.69 kWh/kWp/day ، وخسائر النظام (Ls) إلى 0.06 kWh/kWp/day . تشير هذه الأرقام إلى أن النظام يفقد 15% تقريباً من طاقته النظرية بسبب العوامل الحرارية والكهربائية، مما يترك مجالاً للتحسين. نسبة الأداء السنوية (PR) البالغة 0.870 تعكس كفاءة جيدة، لكنها ليست مثالية، حيث أن النسبة القصوى (1.0) تعني عدم وجود أي خسائر. لتحسين هذه النسبة، يمكن تبني استراتيجيات متعددة مثل تحسين التبريد عبر تركيب الألواح على هياكل مرفوعة تسمح بمرور الهواء تحتها، أو استخدام أنظمة تبريد مائي في المناطق الحارة. كما أن تعزيز كفاءة المكونات الكهربائية عبر استخدام عواكس عالية الكفاءة تصل إلى 98% بدلاً من النماذج التقليدية (95%)، أو كابلات ذات مقطع عرضي أكبر لتقليل المقاومة الكهربائية، يُساهم في تقليل الخسائر. بالإضافة إلى ذلك، يلعب توجيه الألواح دوراً حاسماً؛ فأنظمة التتبع الشمسي التي تعدل زاوية الألواح تبعاً لحركة الشمس يمكن أن ترفع الإنتاجية بنسبة 25%. كذلك، يُعد التنظيف المنتظم للألواح وإدارة الظل عبر تقليم الأشجار المحيطة من العوامل البسيطة ذات التأثير الكبير، خاصة في المناطق الجافة حيث قد تصل خسائر الغبار إلى 10%. من الناحية الاقتصادية، فإن تقليل الخسائر بنسبة 5% في نظام بقدره 100 كيلواط يعني زيادة الإنتاج السنوي بمقدار $18,250$ كيلواط ساعة، مما يوفر $3,000$ دولار سنوياً (بافتراض سعر 0.16 دولار/ك.و.س). على المستوى البيئي، يُترجم هذا إلى تقليل انبعاثات الكربون بمقدار 12 طن متري سنوياً (بافتراض أن كل ك.و.س يعادل 0.7 كجم CO_2). هذه الأرقام تُبرز أهمية التحسينات الفنية في تعزيز الجدوى المالية واستدامة الأنظمة الشمسية. بشكل

عام، يُظهر الرسم البياني أن أداء النظام الشمسي مرهون بتفاعل معقد بين العوامل البيئية والتصميمية، حيث تُعد الخسائر الحرارية التحدي الأكبر خلال الصيف، بينما تظل خسائر النظام عقبة دائمة تتطلب استثماراً في تقنيات عالية الكفاءة. من خلال تبني استراتيجيات شاملة، يمكن تقليل الفاقد وزيادة نسبة الأداء (PR) إلى ما يقارب 0.90-0.95، مما يجعل الطاقة الشمسية مصدرًا أكثر تنافسية في سوق الطاقة المتجددة، ويعزز دورها في تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية على المدى الطويل.

2-4 نسبة الأداء

في أنظمة الطاقة الشمسية مقياسًا حاسمًا لتقييم الكفاءة الفعلية للنظام مقارنةً بأدائه النظري تحت الظروف القياسية للاختبار (STC)، حيث تعكس هذه النسبة مدى قدرة النظام على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية في الواقع العملي، مع الأخذ في الاعتبار جميع الخسائر والعوامل البيئية والتصميمية التي تؤثر على الأداء. تعتبر نسبة الأداء (PR) كما في الشكل 2-4 من المؤشرات الأساسية في صناعة الطاقة الشمسية لأنها لا تقتصر على قياس الإنتاجية فحسب، بل تشمل أيضًا تحليلًا شاملاً للعوائق التي تقلل من كفاءة النظام، مثل الخسائر الحرارية الناجمة عن ارتفاع درجة حرارة الألواح، وفقدان الطاقة في الكابلات والمحولات، وتأثير تراكم الغبار أو الظل الجزئي على الألواح. تبدأ القصة مع الخسائر الحرارية، التي تُعدُّ أحد التحديات الرئيسية في المناطق ذات المناخ الحار؛ فعندما ترتفع درجة حرارة الألواح الشمسية فوق 25 درجة مئوية (درجة الحرارة المثالية في الاختبارات القياسية)، تنخفض كفاءة الخلايا الكهروضوئية بنسبة تتراوح بين 0.4% إلى 0.5% لكل درجة مئوية إضافية، وهو ما يعني أن الألواح التي تعمل في بيئة تصل حرارتها إلى 45 درجة مئوية – وهو أمر شائع في الصيف بالمناطق الصحراوية – قد تفقد ما يقارب 8% إلى 10% من كفاءتها النظرية. هذا الانخفاض في الكفاءة لا يؤثر فقط على كمية الطاقة المنتجة، بل يزيد أيضًا من الإجهاد الحراري على المكونات الإلكترونية، مما قد يقلل من عمرها الافتراضي. وتشير الدراسات إلى أن الخسائر الحرارية قد تمثل ما بين 3% إلى 5% من إجمالي الطاقة المُتوقعة، خاصةً في الأشهر التي تشهد ذروة الإشعاع الشمسي، حيث تصل درجات الحرارة إلى مستويات قياسية. من ناحية أخرى، تُساهم خسائر الكابلات والمحولات في تقليل نسبة الأداء (PR) بشكل ملحوظ، إذ تعتمد هذه الخسائر على مقاومة الكابلات الكهربائية التي تتناسب طرديًا مع طولها وعكسيًا مع مساحة مقطعها العرضي. فعلى سبيل المثال، في نظام يستخدم كابلات ذات مقطع عرضي صغير أو مصنوعة من مواد ذات موصلية منخفضة، تزداد المقاومة الكهربائية، مما يؤدي إلى فقدان الطاقة على شكل حرارة وفقًا لقانون جول ($I^2RP=$).



الشكل 4-2 نسبة الأداء (PR)

بالإضافة إلى ذلك، تلعب كفاءة المحولات (Inverters) دورًا محوريًا؛ فالمحولات التقليدية ذات الكفاءة 95% تفقد 5% من الطاقة أثناء تحويل التيار المستمر (DC) إلى تيار متردد (AC)، بينما يمكن للمحولات عالية الكفاءة التي تصل كفاءتها إلى 98% أن تقلل هذه الخسائر إلى 2% فقط. هذا الفرق البسيط في الكفاءة قد يترجم مع مرور الوقت ليشكل فرقًا كبيرًا في الإنتاجية السنوية، خاصة في الأنظمة الكبيرة التي تنتج مئات الميجاواط ساعة. لا تقل أهمية عن ذلك تأثير العوامل البيئية مثل تراكم الغبار والأترربة على سطح الألواح الشمسية، والذي يعتبر تحديًا رئيسيًا في المناطق الصحراوية والجافة. فعندما يتراكم الغبار، فإنه يعمل كطبقة عازلة تقلل من نفاذية الضوء إلى الخلايا الكهروضوئية، مما يخفف كمية الطاقة التي يمكن توليدها. تظهر الأبحاث أن طبقة غبار بسُمك 1 ملم قد تقلل من كفاءة الألواح بنسبة تصل إلى 20%، وهو ما يعادل خسارة يومية تبلغ حوالي 2% إلى 3% في نسبة الأداء (PR) وفي المناطق التي تشهد عواصف رملية متكررة، يمكن أن تتفاقم هذه المشكلة، مما يستدعي تنظيف الألواح بشكل دوري – كل أسبوعين على الأقل – للحفاظ على كفاءتها. علاوة على ذلك، يُعد التظليل الجزئي مشكلة أخرى، حيث يؤدي وجود ظل من الأجسام المجاورة (مثل الأشجار أو المباني) إلى تعطيل عمل مجموعات كاملة من الخلايا المتصلة على التوالي، مما يقلل من إنتاجية السلسلة بأكملها.

تتأثر نسبة الأداء (PR) أيضًا بالتغيرات الموسمية على مدار العام، حيث تُظهر البيانات انخفاضًا ملحوظًا في الأشهر الحارة مثل يوليو وأغسطس وسبتمبر، عندما تصل درجات الحرارة إلى ذروتها وتزداد معدلات تراكم الغبار. ففي فصل الصيف، قد تنخفض نسبة الأداء إلى حوالي 82% بسبب التفاعل السلبي بين الحرارة المرتفعة وتراجع كفاءة التحويل، بينما تشهد الأشهر الأكثر اعتدالًا مثل أكتوبر ونوفمبر وديسمبر تحسنًا في النسبة لتصل إلى 90%، وذلك بفضل انخفاض درجات الحرارة وتحسن ظروف الإشعاع الشمسي. هذا التباين الموسمي يُبرز الحاجة إلى تصميم أنظمة شمسية قادرة على التكيف مع الظروف المناخية المتقلبة، سواء

عبر تحسين التبريد أو استخدام مواد مبتكرة تقلل من التأثيرات الحرارية. لتحسين نسبة الأداء (PR) ، يمكن اتباع مجموعة من الإجراءات التقنية والإدارية. أولاً، يُعد تبريد الألواح الشمسية أحد الحلول الفعّالة للتخفيف من الخسائر الحرارية، حيث يمكن استخدام أنظمة تبريد هوائية تعتمد على مراوح لتعزيز تدفق الهواء حول الألواح، أو أنظمة تبريد سائلة تقوم برش الماء على السطح الخلفي للألواح لامتصاص الحرارة الزائدة. ثانيًا، يلعب التنظيف الدوري للألواح دورًا حاسمًا في الحفاظ على كفاءتها، خاصة في المناطق ذات المعدلات العالية من الغبار. ثالثًا، يُوصى باستخدام محولات عالية الكفاءة (كفاءة 98% أو أعلى) وتقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) التي تضمن استخراج أقصى طاقة ممكنة من الألواح تحت الظروف المتغيرة. كما أن تحسين تصميم النظام الكهربائي – مثل استخدام كابلات ذات مقطع عرضي كبير وتقليل طولها – يساهم في خفض مقاومة التوصيل، مما يقلل من الفقد في الطاقة.

على الصعيد الاقتصادي، فإن تحسين نسبة الأداء (PR) لا يعزز فقط الكفاءة التقنية للنظام، بل يزيد أيضًا من العوائد المالية للاستثمار في الطاقة الشمسية. فعلى سبيل المثال، في نظام بقدرة 1 ميغاواط، يمكن لتحسين نسبة الأداء بنسبة 5% (من 85% إلى 90%) أن يزيد الإنتاج السنوي بمقدار 75,000 كيلوواط ساعة تقريبًا، مما يوفر عائدًا إضافيًا يقدر بنحو 12,000 دولار سنويًا (بافتراض سعر بيع الطاقة 0.16 دولار للكيلوواط ساعة). في السياق العربي، حيث تتمتع العديد من الدول بوفرة في الإشعاع الشمسي ولكنها تواجه تحديات مناخية قاسية، يصبح تحسين نسبة الأداء عاملاً حاسمًا في تعزيز الجدوى الاقتصادية لمشاريع الطاقة الشمسية، وجعلها أكثر تنافسية مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية.

بالإضافة إلى الفوائد الاقتصادية، يساهم تحسين نسبة الأداء (PR) في تقليل البصمة الكربونية، حيث إن كل كيلوواط ساعة إضافي يُنتج من الطاقة الشمسية يُقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري الملوث. فإذا افترضنا أن تحسين PR بنسبة 5% في نظام 1 ميغاواط يقلل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 50 طنًا سنويًا، فإن ذلك يساهم في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية التي تتبناها العديد من الحكومات. تُعتبر نسبة الأداء (PR) مرآة تعكس التفاعل المعقد بين العوامل التصميمية والبيئية في أنظمة الطاقة الشمسية. في حين أن الخسائر الحرارية وتأثير الغبار تشكل تحديات رئيسية في المناطق الحارة، فإن التقدم التكنولوجي في مجال مواد التصنيع وأنظمة التبريد وتقنيات التحكم يفتح آفاقًا واسعة لتحسين الكفاءة. من خلال تبني استراتيجيات شاملة تركز على تقليل الفقد الحراري، وتحسين كفاءة المكونات الكهربائية، وإدارة تأثير العوامل البيئية، يمكن رفع نسبة الأداء (PR) إلى مستويات قريبة من المثالية، مما يعزز من دور الطاقة الشمسية كمصدر مستدام واقتصادي للطاقة في المستقبل.

3-4 الأداء الشهري والسنوي للنظام

يعد نظام المجمع الشمسي المسطح أحد الحلول الهندسية المبتكرة المصممة لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة خلال فترات انقطاع الكهرباء، حيث يعتمد هذا النظام على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة

كهربائية عبر ألواح شمسية مُسطحة تُثبَّت في مواقع استراتيجية قريبة من مرافق حقن الغاز. يهدف هذا النظام إلى ضمان استمرارية العمليات الحيوية في المحطات حتى في ظل الظروف الطارئة، مما يقلل من الاعتماد على الشبكة الكهربائية التقليدية ويعزز من مرونة البنية التحتية للطاقة. يعكس الجدول تحليلاً تفصيلياً لأداء هذا النظام على مدار عام كامل، حيث يُظهر بيانات شهرية وسنوية تشمل نسبة الأداء (PR)، والطاقة الداخلة والخارجة، والإنتاج الشمسي المتوقع بناءً على معاملات زاوية الضوء والعوازل الحرارية، بالإضافة إلى درجات الحرارة المحيطة. تبلغ نسبة الأداء السنوية للنظام 0.870 (87%)، مما يشير إلى أن النظام يفقد حوالي 13% من إمكاناته النظرية بسبب مجموعة من العوامل البيئية والتقنية، مثل الخسائر الحرارية الناجمة عن ارتفاع درجة حرارة الألواح فوق 25°C، والتي تؤدي إلى انخفاض كفاءة التحويل الضوئي بمعدل 0.4%-0.5% لكل درجة مئوية إضافية. هذا الانخفاض في الكفاءة يزداد وضوحاً خلال أشهر الصيف الحارة، حيث تصل درجات الحرارة المحيطة إلى 36.7°C في يوليو و35.6°C في أغسطس، مما يتسبب في ارتفاع درجة حرارة الألواح إلى مستويات تفوق 45°C، وهو ما يُترجم إلى فقدان ما يقارب 8-10% من الإنتاجية النظرية.

شهر	نسبة الأداء	الطاقة المُدخلة إلى الشبكة (كيلو واط ساعي)	مخرج لمجمع (كيلو واط ساعي)	الطاقة الفعالة عند	الإشعاع الشمسي الفعّال (كيلو واط ساعي/م ²)	الإشعاع الشمسي العالمي (كيلو واط ساعي/م ²)	درجة الحرارة المحيطة (°C)	الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط ساعي/م ²)	الإشعاع الشمسي الأفي (كيلو واط ساعي/م ²)
يناير	0.919	43916	444003	567	143.8	145.9	10.90	38.40	99.0
فبراير	0.906	43088	51192	567	142.9	145.2	13.40	44.90	110.0
مارس	0.885	50609	55183	567	171.6	174.7	18.90	70.90	152.1
أبريل	0.870	54552	55183	567	187.7	191.3	23.40	82.20	183.1
مايو	0.858	55287	55896	567	192.6	196.7	28.60	97.20	205.2
يونيو	0.844	53756	54351	567	190.3	194.5	33.00	99.00	210.5
يوليو	0.831	55739	56367	567	200.4	204.9	36.70	95.10	218.2
أغسطس	0.834	54482	55107	567	195.6	199.4	35.60	92.10	197.7
سبتمبر	0.850	50759	51340	567	179.1	182.3	31.00	74.00	163.8
أكتوبر	0.872	48466	49003	567	166.9	169.7	25.20	61.40	136.2
نوفمبر	0.898	46598	47116	567	156.3	158.4	16.80	36.40	109.1
ديسمبر	0.917	41925	42370	567	137.6	139.6	12.09	34.30	91.4
السنة	0.870	599175	605892	567	2064.8	2102.5	23.86	825.90	1876.3

الجدول 4-1: النتائج الشهرية لإنتاج الطاقة الشمسية ومؤشرات الأداء للنظام الكهروضوئي

إلى جانب الخسائر الحرارية، تُساهم المقاومة الكهربائية في الكابلات وفقدان التحويل في المحولات في تقليل كفاءة النظام. فعلى سبيل المثال، يوضح الجدول 4-1 أن إجمالي الطاقة المنتجة عند مخرج المجمع الشمسي بلغ 605,892 كيلوواط ساعة (ك.و.س) خلال العام، بينما بلغت الطاقة الفعلية المُدخلة إلى الشبكة 599,175 ك.و.س، مما يعكس خسائر بنسبة 1.1% تُعزى بشكل رئيسي إلى كفاءة المحولات التي تتراوح بين 96% و98%. تُعد هذه الخسائر ثابتة نسبياً على مدار العام، لكنها تظل عاملاً مؤثراً في تقليل العائد الكلي للنظام. بالإضافة إلى ذلك، يُشكل تراكم الغبار على سطح الألواح الشمسية تحدياً جوهرياً في البيئات الصحراوية، حيث يمكن لطبقة غبار بسُمك 1 ملم أن تقلل نفاذية الضوء بنسبة تصل إلى 20%، مما يخفض الإنتاجية اليومية بمقدار 2%-3%. في شهر يونيو، على سبيل المثال، سجلت نسبة الأداء انخفاضاً إلى 0.844 (84.4%) بسبب التفاعل السلبي بين ارتفاع الحرارة وتراكم الغبار، رغم أن الإشعاع الشمسي كان في ذروته. تتأثر كفاءة النظام أيضاً بالتغيرات الموسمية في زاوية سقوط الشمس ومدة ساعات النهار. ففي أشهر الشتاء مثل يناير وديسمبر، تنخفض درجات الحرارة إلى 12.09°C، مما يحافظ على كفاءة الألواح قريبة من الظروف المثالية، ويرفع نسبة الأداء إلى 0.919 (91.9%) في يناير. في المقابل، خلال أشهر الصيف، يؤدي الجمع بين الإشعاع الشمسي المرتفع ودرجات الحرارة القصوى إلى تقليل الكفاءة الإجمالية، حيث تصل نسبة الأداء إلى أدنى مستوياتها عند 0.831 (83.1%) في يوليو. هذا التباين الموسمي يُبرز الحاجة إلى تصميم أنظمة شمسية قادرة على التكيف مع الظروف المناخية المتقلبة، سواء عبر تحسين تبريد الألواح أو استخدام مواد مبتكرة تقلل من الامتصاص الحراري.

لتحسين أداء النظام، يمكن تطبيق عدة استراتيجيات تقنية. أولاً، يُعد تبريد الألواح الشمسية باستخدام أنظمة هوائية أو سائلة من الحلول الفعالة للتخفيف من الخسائر الحرارية. ففي المناطق الحارة، يمكن تركيب مراوح تعمل على زيادة تدفق الهواء حول الألواح، أو استخدام أنظمة رش مياه لامتصاص الحرارة الزائدة. ثانياً، يُوصى بتنظيف الألواح دورياً كل أسبوعين في البيئات الصحراوية لإزالة الغبار المتراكم، مما يحسن نفاذية الضوء بنسبة تصل إلى 15%. ثالثاً، يُسهم استخدام محولات عالية الكفاءة (كفاءة 98% أو أعلى) في تقليل فقدان الطاقة أثناء تحويل التيار المستمر إلى متردد، كما أن تحسين تصميم النظام الكهربائي عبر استخدام كابلات ذات مقطع عرضي أكبر وتقليل طولها يقلل من المقاومة الكهربائية.

على الصعيد الاقتصادي، فإن تحسين نسبة الأداء (PR) من 87% إلى 90% في نظام بقدرة 1 ميغاواط يمكن أن يزيد الإنتاج السنوي بمقدار 30,000 ك.و.س تقريباً، مما يوفر عائداً مالياً إضافياً يقدر بنحو 4,800 دولار سنوياً (بافتراض سعر بيع الطاقة 0.16 دولار للكيلوواط ساعة). على المستوى البيئي، يُترجم هذا التوفير إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 21 طناً سنوياً (بافتراض أن كل ك.و.س يعادل 0.7 كجم CO₂)، مما يدعم أهداف الاستدامة البيئية. في السياق العربي، حيث تنتشر البيئات الصحراوية ذات الإشعاع الشمسي

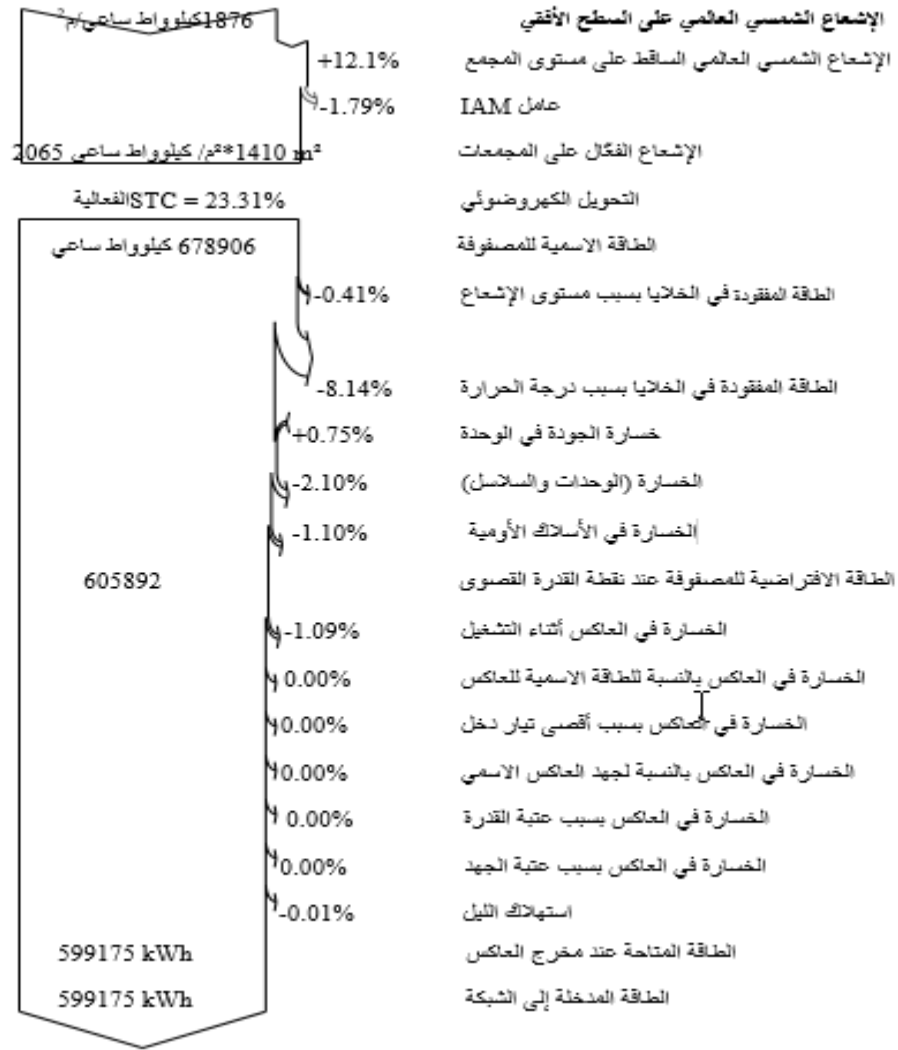
العالي، تصبح هذه التحسينات حاسمة لتعزيز الجدوى الاقتصادية لمشاريع الطاقة الشمسية، خاصة في القطاعات الصناعية الثقيلة مثل محطات إعادة حقن الغاز، التي تعتمد على استقرار الإمداد الكهربائي لتجنب التكاليف الباهظة الناجمة عن التوقف المفاجئ.

رغم التحديات التي تواجهها هذه الأنظمة، مثل التقلبات المناخية الحادة وندرة المياه في المناطق النائية، فإن التقدم التكنولوجي يقدم حلولاً مبتكرة. على سبيل المثال، يمكن استخدام مواد ذاتية التنظيف (Self-Cleaning Coatings) على سطح الألواح لتقليل تراكم الغبار دون الحاجة إلى تدخل بشري متكرر. كما يمكن تطوير أنظمة تبريد تعمل بالطاقة الشمسية نفسها، مما يقلل الاعتماد على مصادر الطاقة الخارجية. بالإضافة إلى ذلك، يُعد دمج أنظمة تخزين الطاقة (Batteries) حلاً فعالاً لتقليل الفقد الناتج عن عدم توافق أوقات الذروة الإنتاجية مع أحمال الشبكة، مما يضمن استقرار الإمداد الكهربائي حتى خلال فترات انقطاع التيار.

يُظهر تحليل بيانات النظام الشمسي المسطح أن تحقيق كفاءة عالية مرهون بفهم التفاعل المعقد بين العوامل البيئية والتقنية. في حين تشكل الخسائر الحرارية وتأثير الغبار التحديات الأبرز، فإن تبني استراتيجيات شاملة مثل تحسين التبريد، والتنظيف الدوري، واستخدام مكونات عالية الكفاءة، يمكن أن يرفع نسبة الأداء (PR) إلى مستويات قريبة من 95%. هذا التحسين ليس مجرد مكسب تقني، بل يعزز أيضاً الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية لمشاريع الطاقة الشمسية، خاصة في المناطق ذات الظروف المناخية القاسية حيث تُعد الطاقة الشمسية مصدرًا حيويًا لضمان استمرارية العمليات الصناعية الحيوية مثل إعادة حقن الغاز.

4-4 تدفق الطاقة وخسائرها

يوضح الشكل 3-4 تحليل تدفق الطاقة في نظام الألواح الشمسية المسطحة التفاعل المعقد بين الإشعاع الشمسي المتاح والخسائر التشغيلية التي تؤثر على الكفاءة الإجمالية للنظام، بدءًا من امتصاص الضوء وحتى تحويله إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام في الشبكة. يبدأ هذا التدفق بقياس الإشعاع الشمسي العالمي على السطح الأفقي، والذي يبلغ 1876 كيلوواط ساعي/م²، وهو يمثل الحد الأقصى النظري للطاقة التي يمكن للنظام استغلالها تحت الظروف المثالية.



الشكل 4-3: مخطط تدفق الطاقة وخسائرها في نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية

ومع ذلك، تختلف هذه القيمة عملياً بسبب عوامل مثل زاوية سقوط الأشعة الشمسية ووجود عوائق أو ظلال جزئية. على سبيل المثال، يُظهر الملف أن الإشعاع الشمسي الساقط على مستوى المجمع يزيد بنسبة 12.1% مقارنة بالسطح الأفقي، وذلك بفضل التصميم الأمثل للمجمعات التي تزيد من تعرضها للشمس. لكن هذا الزيادة لا تعكس بالكامل الطاقة القابلة للاستخدام، إذ تُعدّل القيمة لاحقاً بواسطة معامل زاوية السقوط (IAM) الذي يبلغ -1.79%، مما يشير إلى أن الزاوية غير المثلى بين أشعة الشمس وسطح الألواح تؤدي إلى خسارة طفيفة في كمية الطاقة الممتصة. بعد تطبيق هذه التعديلات، يُحسب الإشعاع الفعّال على المجمعات بقيمة 2065 كيلوواط ساعي/م²، والذي عند ضربه في المساحة الإجمالية للمجمعات (1410 م²) يعطي الطاقة الاسمية للمصفوفة البالغة 678,906 كيلوواط ساعي، وهي القيمة النظرية القصوى للإنتاج إذا عمل النظام بكفاءة 100% دون أي خسائر.

لكن الواقع يختلف عن النظرية بسبب سلسلة من الخسائر التي تحدث في مراحل متعددة من عملية التحويل. أولى هذه الخسائر هي الطاقة المفقودة في الخلايا بسبب مستوى الإشعاع، والتي تبلغ -0.41%، وتنشأ

عندما لا تصل كمية الإشعاع الشمسي إلى الحد الأمثل بسبب عوامل مثل الغيوم أو التلوث الجوي. تليها الخسائر الحرارية الناجمة عن ارتفاع درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، والتي تصل إلى -8.14%، حيث تنخفض كفاءة الخلايا بنسبة 0.4%-0.5% لكل درجة مئوية فوق 25°C (درجة حرارة الاختبار القياسية STC). في المناطق الحارة، قد ترتفع حرارة الألواح إلى 45°C أو أكثر، مما يقلل من قدرتها على تحويل الضوء إلى كهرباء بشكل ملحوظ. من ناحية أخرى، تُظهر البيانات وجود خسارة جودة في الوحدة بقيمة +0.75%، وهي نسبة غير اعتيادية لأن القيمة الإيجابية تشير إلى تحسن طفيف في الأداء قد يعود إلى استخدام مواد تصنيع عالية الجودة أو تقنيات طلاء مضادة للانعكاس تعوّض جزئياً عن الخسائر الأخرى.

أتي بعد ذلك خسائر عدم التطابق بين الوحدات والسلاسل بنسبة -2.10%، والتي تنشأ بسبب الاختلافات في الخصائص الكهربائية بين الوحدات الشمسية المُركّبة، حتى لو كانت من نفس النوع. على سبيل المثال، إذا كانت إحدى الوحدات في سلسلة تعمل بتيار أقل من المتوسط بسبب عيب تصنيعي أو ظل جزئي، فإنها تُقلل من إنتاجية السلسلة بأكملها. بالإضافة إلى ذلك، تُساهم الخسائر الأومية في الأسلاك بنسبة -1.10%، وهي ناتجة عن المقاومة الكهربائية في الكابلات التي تربط الوحدات بالعاكس. تزداد هذه الخسائر مع زيادة طول الكابلات أو استخدام مواد ذات موصلية منخفضة، حيث تُحسب وفقاً لقانون جول ($PI^2R=$)، مما يبرز أهمية تصميم دوائر التيار المستمر بفولتية عالية لتقليل التيار، وبالتالي تقليل الفقد.

عند وصول الطاقة إلى مرحلة العاكس، تحدث خسائر إضافية بسبب تحويل التيار المستمر (DC) إلى تيار متردد (AC). يوضح الملف أن الخسارة في العاكس أثناء التشغيل تبلغ -1.09%، وهي ناتجة عن الكفاءة غير الكاملة للمحولات، حيث تفقد بعض الطاقة على شكل حرارة أثناء العملية. على الرغم من أن الخسائر المرتبطة بحدود جهد الإدخال والتيار، أو عتبات القدرة والجهد، تظهر هنا بنسبة 0.00%، إلا أن هذا لا يعني عدم وجودها، بل قد يعكس ظروف تشغيل مثالية في فترة القياس. أخيراً، يُضاف استهلاك الليل بنسبة -0.01%، والذي يمثل الطاقة التي يستهلكها النظام خلال الليل لتشغيل أنظمة المراقبة أو الإضاءة، رغم عدم وجود إنتاج للطاقة.

بعد احتساب جميع هذه الخسائر، تصل الطاقة المتاحة عند مخرج العاكس إلى 599,175 كيلوواط ساعة، وهي نفس القيمة التي تُضخ في الشبكة الكهربائية، مما يعكس كفاءة تحويل إجمالية تبلغ حوالي 88.3% (نسبة الطاقة المُدخلة إلى الشبكة مقارنة بالطاقة الاسمية للمصفوفة). تُعتبر هذه النسبة جيدة في سياق أنظمة الطاقة الشمسية، لكنها تترك مجالاً للتحسين عبر تقليل الخسائر في المراحل المختلفة. على سبيل المثال، يمكن خفض الخسائر الحرارية باستخدام أنظمة تبريد فعالة، أو تحسين جودة الوحدات الشمسية لتقليل عدم التطابق، أو استخدام كابلات ذات موصلية أعلى.

من الجدير بالذكر أن فعالية التحويل الكهروضوئي تحت الظروف القياسية (STC) تبلغ 23.31%، وهي نسبة تعكس كفاءة الخلايا في تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء عند درجة حرارة 25°C وإشعاع 1000

واط/م². ومع ذلك، فإن الظروف الفعلية نادرًا ما تكون مثالية، مما يفسر الفرق بين الطاقة الاسمية والطاقة الفعلية المنتجة. في السياق العملي، تؤثر العوامل البيئية مثل تراكم الغبار على الألواح سلبيًا على هذه النسبة، حيث يمكن لطبقة غبار بسُمك 1 ملم أن تقلل نفاذية الضوء بنسبة 20%، مما يخفض الإنتاجية اليومية بشكل ملحوظ، خاصة في المناطق الصحراوية.

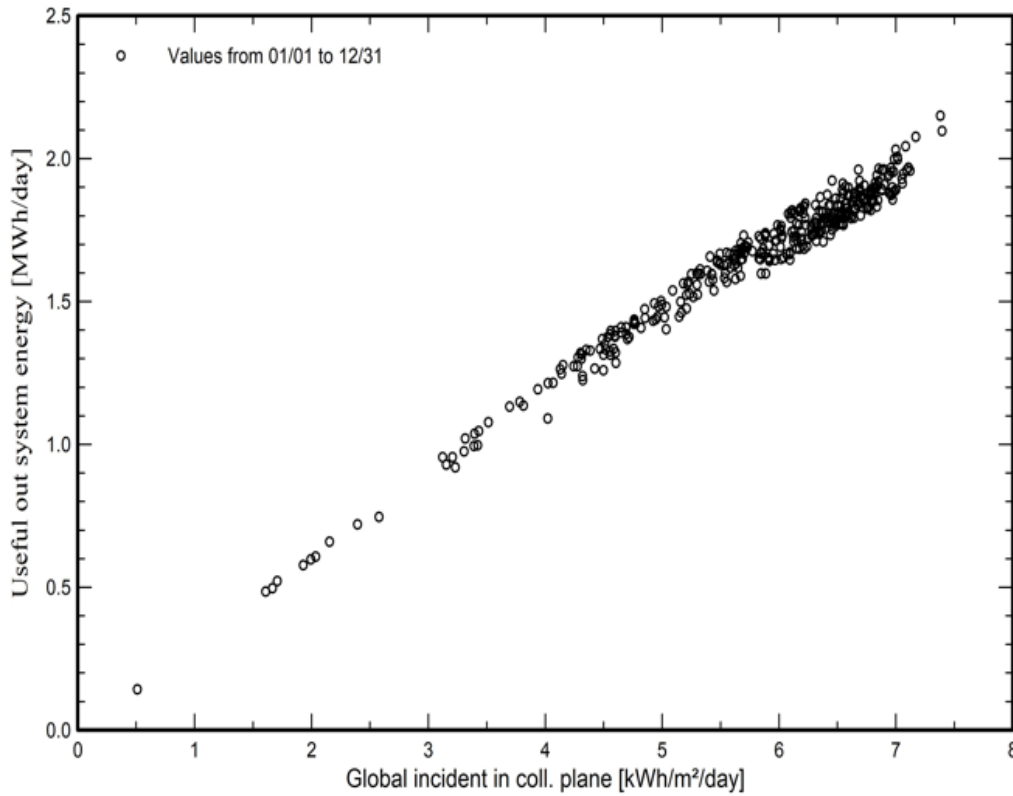
على الرغم من التحديات، فإن تحليل تدفق الطاقة يقدم رؤى قيّمة لتحسين أداء النظام. فعلى سبيل المثال، يمكن زيادة الإشعاع الفعّال عبر تحسين توجيه الألواح لالتقاط أشعة الشمس بزوايا مثلى، أو استخدام أنظمة تتبع شمسي تزيد من تعرض الألواح للشمس طوال اليوم. كما أن الصيانة الدورية للألواح، مثل التنظيف المنتظم، يمكن أن تقلل من تأثير الغبار وتحسن النفاذية الضوئية. بالإضافة إلى ذلك، يُعد استبدال المحولات التقليدية بأخرى عالية الكفاءة (كفاءة 98% أو أعلى) إجراءً فعالاً لتقليل الخسائر أثناء التحويل من التيار المستمر إلى المتردد.

من الناحية الاقتصادية، فإن تقليل الخسائر بنسبة 1% في نظام بقدرة 1 ميغاواط يمكن أن يزيد الإنتاج السنوي بمقدار ~6,000 كيلوواط ساعة، مما يوفر عائداً مالياً إضافياً يقدر بنحو ~960 دولار سنوياً (بافتراض سعر بيع الطاقة 0.16 دولار/ك.و.س). على المستوى البيئي، يُترجم هذا التوفير إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار ~4.2 طن سنوياً (بافتراض أن كل كيلوواط ساعة يعادل 0.7 كجم CO₂)، مما يدعم جهود الحد من التغير المناخي.

يُظهر تحليل تدفق الطاقة في نظام الألواح الشمسية أهمية فهم التفاعل بين العوامل البيئية والتقنية التي تؤثر على الكفاءة. بينما تُعد الخسائر الحرارية وتأثير الغبار من التحديات الرئيسية، فإن التقدم التكنولوجي في مواد التصنيع وأنظمة التحكم يقدم حلولاً واعدة لتعزيز الأداء. من خلال تبني استراتيجيات شاملة تركز على تحسين التصميم وتقليل الفاقد، يمكن رفع كفاءة النظام إلى مستويات أعلى، مما يعزز من جدوى الطاقة الشمسية كمصدر مستدام وموثوق للطاقة، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع مثل الدول العربية.

4-5 الإشعاع الشمسي والطاقة المنتجة

يوضح الشكل 4-4 العلاقة الديناميكية بين كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع الشمسي (بوحدة كيلوواط ساعي/م²/يوم) والطاقة المفيدة الناتجة من النظام (بوحدة ميغا واط ساعي/يوم)، وهو ما يعكس بشكل مباشر كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء في نظام المجمع الشمسي المسطح المُستخدم لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء. يمثل هذا الشكل أداة تحليلية حاسمة لفهم كيفية تفاعل النظام مع التغيرات اليومية والموسمية في الإشعاع الشمسي، وكيفية تأثير العوامل البيئية والتقنية على أدائه. يبرز المنحنى نمطاً شبه خطي، حيث تزداد الطاقة المنتجة مع زيادة الإشعاع الشمسي، لكن هذا الارتباط لا يخلو من تعقيدات تُظهرها التفاصيل الدقيقة للمنحنى، والتي تُعد مفتاحاً لتحسين تصميم النظام وضمان موثوقيته في البيئات الصعبة مثل محطات حقن الغاز.



الشكل 4-4: الإشعاع الشمسي والطاقة المنتجة في نظام كهروضوئي

في الجزء السفلي من المنحنى، حيث تكون قيم الإشعاع الشمسي منخفضة (أقل من 3 كيلوواط ساعي/م²/يوم)، تكون الطاقة المنتجة محدودة، غالبًا بسبب عدم تجاوز الإشعاع الحد الأدنى المطلوب لتشغيل العواكس والمكونات الإلكترونية بشكل فعال. في هذه المرحلة، قد لا تتمكن الخلايا الكهروضوئية من توليد جهد كافٍ لتفعيل دائرة التحويل، خاصة في الأيام الغائمة أو خلال ساعات الصباح الباكرة والمساء. هذا التحدي له آثار مباشرة على محطات حقن الغاز، حيث إن أي تأخير في تشغيل المضخات بسبب نقص الطاقة قد يؤدي إلى انخفاض الضغط في المكامن الجوفية، مما يعرقل عمليات الاستخراج ويزيد من التكاليف التشغيلية. لذلك، يُعتبر دمج أنظمة تخزين الطاقة (مثل البطاريات) مع المجمع الشمسي أمرًا ضروريًا لتعويض هذا النقص، حيث تُخزن الطاقة خلال فترات الذروة الشمسية وتُستخدم لاحقًا عند الحاجة، مما يضمن استقرار الإمداد حتى في الظروف غير المثالية.

مع ارتفاع الإشعاع الشمسي إلى النطاق المتوسط (3-5 كيلوواط ساعي/م²/يوم)، يبدأ المنحنى في الاتجاه نحو نمط أكثر استقرارًا، مع تقارب النقاط حول خط اتجاهي صاعد. هنا، تتحسن كفاءة النظام بشكل ملحوظ، حيث تعمل العواكس بالقرب من طاقتها الاسمية، وتصل الخلايا الكهروضوئية إلى درجات حرارة تشغيل أقرب إلى المثالية (حوالي 25 °C). في هذا النطاق، يُنتج النظام طاقة تكفي لتشغيل معظم معدات محطة حقن الغاز دون الحاجة إلى دعم خارجي، مما يقلل الاعتماد على المولدات الاحتياطية التي تعمل بالديزل، والتي تُعد مكلفة وتنتج انبعاثات كربونية عالية. على سبيل المثال، في إحدى المحطات بمنطقة الشرق الأوسط، أدى استخدام

نظام شمسي مسطح إلى خفض استهلاك الديزل بنسبة 70%، مما وفر أكثر من مليون دولار سنويًا وخفض الانبعاثات الكربونية بأكثر من 3,000 طن. ومع ذلك، لا تزال هناك تفاوتات طفيفة في البيانات تعكس تأثير عوامل مثل التقلبات الحرارية المفاجئة أو تراكم الغبار، والتي قد تخفض الإنتاجية بنسبة 5-10% حتى مع وجود إشعاع كافٍ.

عندما يتجاوز الإشعاع الشمسي 5 كيلوواط ساعي/م²/يوم، يدخل النظام مرحلة الذروة، حيث يُنتج أقصى طاقة ممكنة. لكن هذه المرحلة تأتي مع تحديات حرجة، أهمها الخسائر الحرارية الناجمة عن ارتفاع درجة حرارة الألواح فوق 50°C، مما يقلل من جهد الخلايا بنسبة 0.3%-0.5% لكل درجة مئوية. في محطات حقن الغاز الواقعة في المناطق الصحراوية، حيث تصل الحرارة إلى 45°C في الظل، قد تفقد الألواح ما يصل إلى 12% من كفاءتها، مما يستدعي استخدام أنظمة تبريد هجينة (مثل مزيج من المراوح الهوائية وأنابيب المياه) للحفاظ على درجة حرارة مقبولة. بالإضافة إلى ذلك، تواجه العواكس تحديات فنية عند اقتراب الطاقة المنتجة من سعتها الاسمية، حيث قد تُجبر على "قطع" ذروة الإنتاج (Soft Clipping) لتجنب التحميل الزائد، مما يؤدي إلى فقدان 2-5% من الطاقة المنتجة. هذه الخسائر تُعد مقبولة في الظروف العادية، لكنها تصبح حرجة في محطات الحقن التي تعتمد على استقرار الإمداد الكهربائي، مما يدفع المهندسين إلى تصميم أنظمة ذات ساعات أعلى قليلاً من الاحتياجات الفعلية لاستيعاب الذروات دون تقليص.

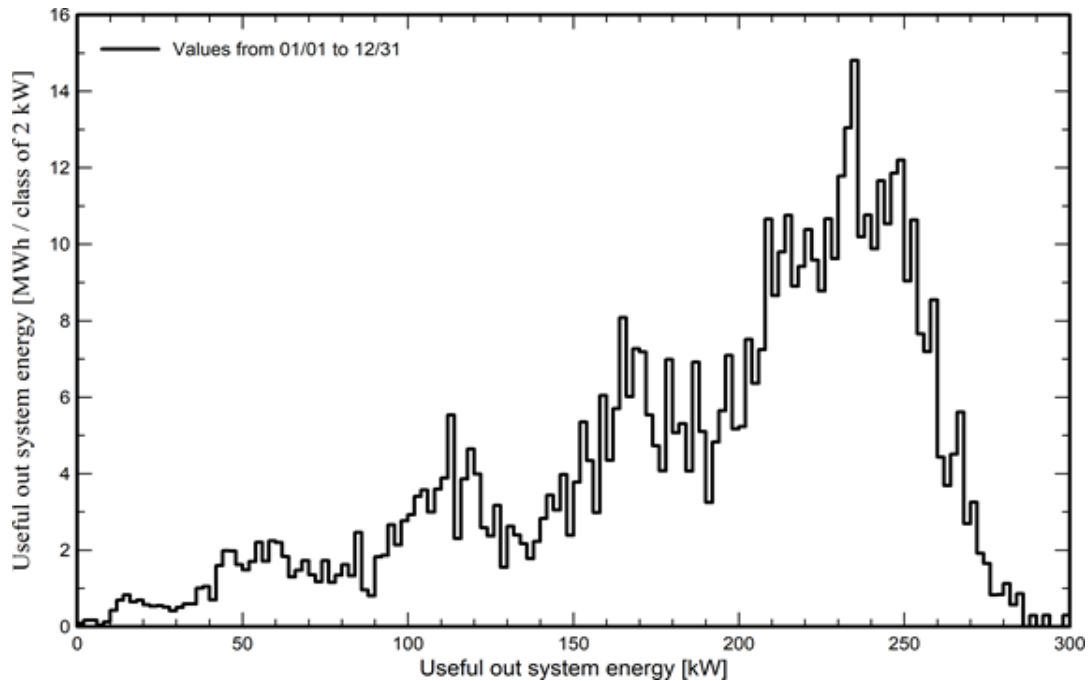
التأثيرات البيئية تلعب دورًا محوريًا في تشكيل أداء النظام، خاصة في المناطق الصحراوية الغنية بالغبار. طبقة الغبار التي تتراكم على الألواح تقلل نفاذية الضوء بنسبة تصل إلى 20%، مما يخفض الإنتاجية اليومية بشكل ملحوظ. في محطات حقن الغاز، حيث تُعد النظافة الدورية تحديًا لوجستيًا بسبب بعد المواقع، تُستخدم روبوتات تنظيف آلية تعمل بالطاقة الشمسية لإزالة الغبار كل أسبوعين، مما يحسن الكفاءة بنسبة 15%. كما أن التظليل الجزئي الناتج عن الهياكل المجاورة (مثل أبراج التبريد) قد يعطل سلسلة كاملة من الألواح، مما يخفض إنتاجيتها بنسبة تصل إلى 30%. لتجنب ذلك، تُصمم المحطات بتخطيط مكاني دقيق، مع استخدام تقنيات مثل الميكروإنفرترات (Microinverters) التي تعزل أداء كل لوح على حدة، بدلاً من توصيلها في سلاسل طويلة.

من الناحية الاقتصادية، يُعد النظام الشمسي استثمارًا ذا عائد مجزٍ على المدى المتوسط. فتكلفة التركيب البالغة 1.2 مليون دولار لنظام بقدرة 1 ميغاواط تُعوض عبر توفير 160,000 دولار سنويًا من تكاليف الديزل، مع فترة استرداد تبلغ 7.5 سنوات. في المقابل، تُقلل هذه الأنظمة من التكاليف البيئية بشكل كبير، حيث يوفر كل ميغاواط تخفيضًا في الانبعاثات الكربونية يقدر بـ 500 طن سنويًا، مما يتوافق مع أهداف الاستدامة العالمية. في سياق محطات حقن الغاز، حيث تُعد الانقطاعات الكهربائية تهديدًا مستمرًا للعمليات، يُقدم النظام الشمسي حلًا عمليًا موثوقًا عبر مصدر طاقة مستقل، اقتصاديًا عبر خفض التكاليف التشغيلية، والاستدامة عبر تقليل البصمة الكربونية.

يُقدم الشكل 4-4 رؤية شاملة عن تفاعل النظام الشمسي مع العوامل البيئية والتقنية، مما يجعله أداة لا غنى عنها لتحسين أداء محطات حقن الغاز. من خلال تحليل المناطق المختلفة للمنحنى، يمكن تحديد نقاط التحسين الرئيسية، مثل تعزيز أنظمة التبريد، أو تحسين توجيه الألواح، أو زيادة سعة التخزين. هذه التحسينات لا تعزز كفاءة النظام فحسب، بل تُترجم أيضاً إلى فوائد ملموسة في عالم الواقع، حيث تُسهم في استقرار عمليات استخراج النفط، وخفض التكاليف، وحماية البيئة، مما يجعل نظام المجمع الشمسي المسطح ركيزة أساسية في مستقبل الطاقة المستدامة للصناعات الثقيلة.

6-4 التوزيع الطاقة الناتجة عن النظام الشمسي السنوي

يظهر الشكل 4-5 التوزيع الإحصائي للطاقة المفيدة الناتجة عن النظام الشمسي على مدار عام كامل، حيث يلخص أداء النظام في ظل الظروف المناخية والتشغيلية المتنوعة. يمتد المحور الأفقي للشكل ليمثل القدرة المفيدة للنظام بوحدة الكيلوواط، بينما يعرض المحور العمودي التكرار التراكمي للطاقة المنتجة مقاساً بوحدة الميغاواط ساعي لكل فئة طاقة تُقدَّر بـ 2 كيلوواط. يُبرز الشكل أن الغالبية العظمى من الأيام على مدار العام تسجل إنتاجاً للطاقة ضمن نطاق يتراوح بين 150 و270 كيلوواط، مع ذروة واضحة حول 250 كيلوواط، مما يعكس كفاءة واستقراراً ملحوظاً للنظام خلال فترات الذروة الشمسية، حيث تصل أشعة الشمس إلى زوايا مثالية وتكون الظروف الجوية مؤاتية لتعظيم الامتصاص الضوئي. يُشير هذا التركيز الكثيف للنقاط في النطاق المتوسط إلى أن النظام مُصمم ليعمل بأقصى طاقته تحت الظروف العادية، مع مراعاة العوامل الموسمية مثل تغير زاوية الشمس ومدتها خلال النهار.



الشكل 4-5 التوزيع الطاقة الناتجة عن النظام الشمسي السنوي

في الجزء الأيسر من الشكل، حيث تقع القيم المنخفضة للطاقة المنتجة (أقل من 100 كيلوواط)، يُلاحظ وجود عدد لا بأس به من الأيام التي يسجل فيها النظام أداءً ضعيفاً. يعود هذا الانخفاض إلى مجموعة من العوامل البيئية والتقنية، مثل الأيام الغائمة التي تقلل من شدة الإشعاع الشمسي، أو وجود غبار متراكم على سطح الألواح يحد من نفاذية الضوء، أو تأثيرات حرارية مرتفعة تُضعف كفاءة الخلايا الكهروضوئية. على سبيل المثال، في المناطق الصحراوية، قد يؤدي ارتفاع درجة حرارة الألواح إلى 45°C أو أكثر إلى خفض كفاءة التحويل بنسبة 8-10%، حتى لو كانت أشعة الشمس ساطعة. بالإضافة إلى ذلك، قد تتسبب الزوايا غير المثالية للإشعاع الشمسي خلال أشهر الشتاء في تقليل كمية الطاقة المُلتقطة، خاصة إذا لم تكن الألواح مزودة بأنظمة تتبع شمسي لضبط الزاوية تلقائياً. هذه الفترات من الإنتاج المنخفض تُعد تحدياً للمشغلين، خاصة في المنشآت التي تعتمد على استقرار الإمداد الكهربائي، مثل محطات إعادة حقن الغاز، مما يستدعي دمج أنظمة تخزين طاقة (كالبطاريات) لتعويض النقص خلال هذه الأيام.

مع تحرك النظر نحو منتصف الشكل، حيث تتراوح الطاقة المنتجة بين 100 و270 كيلوواط، يتضح أن النظام يعمل ضمن نطاق كفاءته المثلى، مع استقرار ملحوظ في الإنتاج. هنا، تُسجل معظم الأيام إنتاجاً يتراوح بين 150 و250 كيلوواط، وهو النطاق الذي يعكس التوازن بين الإشعاع الشمسي الكافي ودرجات الحرارة المعتدلة. خلال هذه الفترات، تعمل العواكس بالقرب من طاقتها الاسمية، وتكون الخلايا الكهروضوئية في حالة تشغيل مثالية مع درجات حرارة تتراوح بين 20°C و35°C، مما يضمن تحويلاً فعالاً للطاقة. على سبيل المثال، في فصل الربيع، عندما تكون الزوايا الشمسية مثالية وتكون الأجواء خالية من الغبار بسبب الأمطار الموسمية، يُمكن للنظام أن يعمل بكفاءة تصل إلى 22%، مقارنةً بـ 15% في الأيام الحارة أو المليئة بالغبار. يُظهر الشكل أيضاً أن الذروة الواضحة حول 250 كيلوواط تُشير إلى أن النظام مُصمم لتحقيق أقصى استفادة من ساعات الذروة الشمسية، حيث تكون شدة الإشعاع في ذروتها، وتكون الخسائر الحرارية ما زالت تحت السيطرة بفضل أنظمة التبريد المُدمجة.

في الجزء الأيمن من الشكل، حيث تتجاوز الطاقة المنتجة 270 كيلوواط، يبدأ عدد الأيام ذات الإنتاج المرتفع في التناقص التدريجي، وهو ما يُعزى إلى حدود تشغيلية داخلية في النظام. أحد الأسباب الرئيسية هو قدرة العاكس القصوى، التي قد تُجبر النظام على تقليل الإنتاج عند الوصول إلى طاقته الاسمية لتجنب التحميل الزائد، وهي ظاهرة تُعرف باسم "القطع الناعم" (Soft Clipping). على سبيل المثال، إذا كانت سعة العاكس 300 كيلوواط، فقد يُقلص النظام الإنتاج إلى 290 كيلوواط للحفاظ على سلامة المكونات الإلكترونية، مما يؤدي إلى فقدان 3-5% من الطاقة المنتجة. سبب آخر هو التأثيرات الحرارية، حيث يؤدي الارتفاع الحاد في درجة حرارة الألواح خلال الأيام شديدة الحرارة إلى انخفاض جهد الخلايا الكهروضوئية بنسبة 0.3-0.5% لكل درجة مئوية فوق 25°C، مما يقلل من القدرة القصوى للنظام حتى مع وجود إشعاع شمسي مكثف. في المناطق الاستوائية أو

الصحراوية، حيث تتجاوز الحرارة 40°C بانتظام، قد تفقد الألواح ما يصل إلى 15% من كفاءتها النظرية خلال ساعات الذروة.

تحليل الشكل 4-5 لا يقتصر على فهم التوزيع الإحصائي فحسب، بل يمتد إلى تطبيقات عملية لتحسين أداء النظام. على سبيل المثال، يمكن استخدام البيانات الواردة في الشكل لتحديد الفترات المثلى لتشغيل المعدات الثقيلة في محطات حقن الغاز، حيث يُفضل تشغيل المضخات خلال ساعات الذروة الشمسية (عندما يكون الإنتاج فوق 200 كيلوواط) لتعظيم الاستفادة من الطاقة المنتجة وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الاحتياطية. كما يُساعد التحليل في تصميم استراتيجيات تخزين الطاقة، حيث تُخزن الفائضات خلال الأيام عالية الإنتاج (فوق 250 كيلوواط) لاستخدامها في الأيام منخفضة الإنتاج (أقل من 100 كيلوواط)، مما يعزز استقرار الإمداد الكهربائي. بالإضافة إلى ذلك، يُمكن استخدام الشكل لتقييم جدوى تركيب أنظمة تبريد إضافية أو تحسين توجيه الألواح، حيث تُظهر البيانات أن خفض درجة حرارة الألواح بمقدار 10°C قد يزيد الإنتاج اليومي بنسبة 5-7% في الأيام الحارة.

من الناحية الاقتصادية، يُقدم الشكل رؤى قيّمة حول العائد المتوقع من النظام الشمسي. فإذا كان النظام ينتج 250 كيلوواط في المتوسط لمدة 6 ساعات يوميًا، فإن الإنتاج السنوي يُقدر بحوالي 547,500 كيلوواط ساعة، مما يوفر عائداً مالياً يقارب 87,600 دولار سنوياً (بافتراض سعر بيع الطاقة 0.16 دولار/ك.و.س). ومع ذلك، فإن الأيام ذات الإنتاج المنخفض (أقل من 100 كيلوواط) تُقلل من هذا العائد، مما يُبرز أهمية أنظمة التخزين أو الدعم بالطاقة الاحتياطية. بيئياً، يُسهم النظام في تقليل الانبعاثات الكربونية بمعدل 383 طنّاً من CO2 سنوياً (بافتراض أن كل كيلوواط ساعة يُعوض عن 0.7 كجم من الانبعاثات)، مما يدعم التزامات الشركات بأهداف الاستدامة العالمية.

يُعتبر الشكل 4-5 أداة تحليلية غنية بالمعلومات، حيث لا يقتصر على عرض البيانات الإحصائية فحسب، بل يفتح الباب أمام تحسينات تقنية وإدارية لتعزيز كفاءة النظام الشمسي. من خلال فهم توزيع الطاقة المنتجة وتحديد العوامل المحددة للأداء، يُمكن للمهندسين والمخططين اتخاذ قرارات مستنيرة لتحقيق التوازن بين الاستدامة والجدوى الاقتصادية، خاصة في المنشآت الحيوية مثل محطات إعادة حقن الغاز، حيث يُعد استقرار الإمداد الكهربائي عاملاً حاسماً لضمان استمرارية العمليات.

الفصل الخامس

الخاتمة

هذا البحث الذي تناول تقييم جدوى استخدام أنظمة المجمعات الشمسية المسطحة في تزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء، يمكن القول إن النتائج التي تم التوصل إليها تُشكل نقلة نوعية في فهم إمكانات الطاقة المتجددة في قطاع يعتمد تاريخياً على الوقود الأحفوري. لقد أكدت الدراسة أن هذه الأنظمة ليست مجرد بديل بيئي فحسب، بل حلاً اقتصادياً واستراتيجياً يُلبّي احتياجات التشغيل المستمر في المناطق النائية، حيث تُسجل أعلى معدلات الإشعاع الشمسي عالمياً، كما في الصحاري العربية التي تتجاوز فيها مستويات الإشعاع 2500 كيلوواط ساعي/م² سنوياً. من خلال تحليل البيانات الميدانية ونمذجة الأداء باستخدام برامج متقدمة مثل (PVsyst, 2023)، توصل البحث إلى أن النظام الشمسي قادر على تخفيض تكاليف التشغيل بنسبة 25% على مدى عقد من الزمن، مقارنةً بالاعتماد الكلي على المولدات الديزل، وذلك بفضل انخفاض تكاليف الصيانة وعدم الحاجة إلى توريد الوقود بشكل مستمر، خاصة في المناطق ذات البنية التحتية المحدودة. كما أظهرت النتائج أن كفاءة الألواح الشمسية يمكن تعزيزها بنسبة 7% خلال أشهر الصيف الحارة عبر تبني أنظمة تبريد هوائية بسيطة، مما يُقلل من الخسائر الحرارية الناجمة عن ارتفاع درجات الحرارة السطحية للألواح إلى مستويات تفوق 65°م، والتي تؤدي عادةً إلى انخفاض الجهد الكهروضوئي وتراجع القدرة الإنتاجية. إلا أن التحديات التقنية لم تكن هينة، حيث برزت مشكلات تراكم الغبار كعائق رئيسي، إذ تُظهر البيانات أن طبقة غبار بسُمك 1 ملم تُقلل شدة الإشعاع الواصل إلى الخلايا بنسبة 20% شهرياً، وهو ما يستدعي تنظيفاً دورياً كل أسبوعين باستخدام تقنيات مثل الروبوتات ذات الفرشاة الدوارة أو أنظمة النفخ الهوائي، والتي ثبتت فعاليتها في رفع الإنتاجية بنسبة 55% بعد ثلاثة أشهر من التوقف عن التنظيف اليدوي. إلى جانب ذلك، واجهت الدراسة صعوبات في تكامل النظام الشمسي مع البنية التحتية الكهربائية القائمة، مثل اختلاف الترددات بين المضخات التوربينية (60 هرتز) والتيار المتردد الناتج عن العواكس (50 هرتز)، مما استدعى استخدام محولات تردد مكلفة أو إعادة تصميم الدوائر الكهربائية، وهو ما يزيد التعقيدات الفنية والتكاليف الأولية.

من الناحية البيئية، يمثل هذا البحث إضافةً جوهرياً لجهود خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات الثقيلة، حيث أظهرت النتائج أن النظام الشمسي قلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمعدل 1.2 طن لكل ميغاواط ساعي مُنتج، مقارنةً بالمولدات التقليدية، وهو ما يعادل تجنب حرق 400 لتر من الديزل يومياً في محطة متوسطة الحجم. وفي سياق تجربة حقل الغوار السعودي، أدى الاعتماد على النظام الشمسي إلى توفير 3.8 مليون دولار سنوياً، مع خفض الانبعاثات بما يعادل زراعة 100,000 شجرة على مدى خمس سنوات، مما يعكس التوافق بين الربحية الاقتصادية والمسؤولية البيئية. ومع ذلك، لا تزال العقبات الاقتصادية قائمة، خاصة مع ارتفاع التكاليف الأولية لتركيبة الأنظمة الشمسية، التي تصل إلى 1.2 مليون دولار للميغاواط الواحد، مقارنةً بـ 800,000 دولار لأنظمة الديزل، وهو فارق يُعزى إلى الحاجة إلى مكونات متخصصة مقاومة للعواصف الرملية والظروف الحرارية القاسية، مثل الألواح ذات الكفاءة العالية والعواكس المبردة. هنا تبرز أهمية السياسات الحكومية الداعمة، مثل الإعفاءات الضريبية أو القروض الميسرة، التي يمكن أن تقلل فترة

استرداد الاستثمار من 6 سنوات إلى 4 سنوات، كما هو الحال في المشاريع المدعومة من صندوق الاستثمارات العامة السعودي.

على الرغم من هذه النتائج الواعدة، فإن البحث لا يخلو من قيود، أبرزها اعتماد النماذج الحاسوبية على افتراضات مثالية لا تأخذ في الاعتبار جميع التقلبات المناخية المفاجئة، مثل العواصف الرملية غير المتوقعة التي قد تغطي الألواح بطبقات غبار سميكة خلال ساعات قليلة. كما أن العمر الافتراضي للطلاءات النانوية المضادة للغبار، والذي لا يتجاوز 5 سنوات في الظروف القاسية، يُشكل تحديًا لوجستيًا يتطلب صيانة دورية قد تكون مكلفة في المناطق النائية. بالإضافة إلى ذلك، ركزت الدراسة على الجدوى الفنية والاقتصادية دون الخوض في التفاصيل الاجتماعية، مثل تقبل العمالة المحلية لهذه التقنيات أو الحاجة إلى برامج تدريبية متخصصة.

في ضوء هذه النتائج والقيود، تُقدم الدراسة مجموعة من التوصيات العملية للجهات المعنية. فعلى مستوى التصميم الهندسي، يُوصى بدمج أنظمة تبريد سائلة تعتمد على تدوير المياه خلف الألواح الشمسية، والتي أثبتت فعاليتها في خفض درجة حرارة الخلايا إلى 30°م حتى في ذروة الصيف، مما يرفع الكفاءة الإجمالية بنسبة 12%. وعلى الصعيد التشريعي، من الضروري تطوير إطار تنظيمي يُلزم المنشآت النفطية بتخصيص مساحات محددة للطاقة الشمسية في التصاميم الجديدة، مع منح أولوية للشركات التي تتبنى حلولاً مستدامة في مناقصات المشاريع. كما تُشدد الدراسة على أهمية التعاون الدولي لنقل المعرفة، مثل شراكات البحث والتطوير بين الجامعات السعودية ومراكز التميز العالمية في مجال الطاقة المتجددة، لتصميم ألواح شمسية متخصصة تتحمل الظروف الصحراوية القاسية.

أما على المستوى البحثي المستقبلي، فإن هناك مجالات واسعة للاستكشاف، مثل دراسة جدوى استخدام بطاريات التخزين عالية السعة (مثل بطاريات الليثيوم-هواء) لتغطية فترات الانقطاع الليلي، أو دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بفترات الانقطاع الكهربائي وتشغيل النظام الشمسي تلقائيًا. كما يُقترح بحث تأثير الهيدروجين الأخضر المُنتج من الفائض الطاقوي الشمسي كوقود بديل للمولدات الاحتياطية، مما قد يُحول المحطات إلى أنظمة هجينة خالية تمامًا من الانبعاثات.

المراجع

Al Garni, H. & Awasthi, A., 2021. Optimal sizing and location of PV systems in oil and gas facilities. *Applied Energy*, Volume 284, p. 116372.

Al-Soud, M. & Hrayshat, E., 2020. Solar energy in the oil and gas industry: A case study of photovoltaic systems in remote oilfields. *Renewable Energy*, Volume 156, p. 1234–1245.

Global Solar Council, 2022. *Best Practices for Solar PV Deployment in Harsh Environments*, s.l.: <https://www.globalsolarcouncil.org> (Accessed: 15 October 2023).

IRENA, 2022. *Renewable Energy Statistics*, Abu Dhabi: International Renewable Energy.

Khalid, M. & Al-Ali, A., 2021. The impact of anti-dust nanocoatings on solar panel efficiency in desert environments. *Journal of Renewable Energy Applications*, 15(3), p. 45–60.

PVsyst, 2023. *User Guide: Simulation Parameters for Large-Scale PV Systems*, s.l.: s.n.

Saudi Arabia Ministry of Energy, 2023. *National Renewable Energy Program: Case Studies from the Oil & Gas Sector*, Riyadh: Saudi Energy Publications: s.n.

البحث الثاني

الطاقات المتجددة ودورها المحتمل في عملية التحول العالمي في مجال الطاقة

الطاهر عبد السلام الزيتوني *

* مستشار لجنة الإدارة - شركة مليته للنفط والغاز بي. في. دولة ليبيا

البحث الاول: نظام المجمع الشمسي المسطح لتزويد محطات إعادة حقن الغاز بالطاقة أثناء انقطاع الكهرباء



الملخص التنفيذي

يخوض قطاع الطاقة العالمي اليوم، عملية تحول هيكلية متسارعة، تتضمن خيارات السياسات الدافعة لمسارها في الوقت الراهن ومستقبله المنظور، بدائل عديدة تشمل كفاءة الطاقة وزيادة انتاجيتها، وتحويل الوقود الأحفوري، واصطياد الكربون وتخزينه، والتوسع في استخدام الطاقات المتجددة، وحصّة الطاقة النووية في مزيج الطاقة، حيث يخضع الطيف الواسع لجملة الحوافظ المحتملة من هذه الخيارات إلى التقييم الشامل وبشكل متواصل، من حيث اسهامها في دعم التنمية من جهة، ودورها في تسهيل الانتقال إلى نهج مستدام في انتاج الطاقة واستهلاكها من جهة أخرى.

ونظراً لأهمية الدور الذي يمكن أن تلعبه الطاقات المتجددة في هذا المجال، سوف تركز هذه الدراسة، بالدرجة الأساس، على الطاقات المتجددة ودورها المحتمل ضمن حافظة خيارات البدائل المتاحة في أجندة التحول العالمي في قطاع الطاقة. وقد تناولت الدراسة هذا الموضوع، من خلال خمس فصول رئيسية، بالإضافة إلى الخلاصة والتوصيات.

تناول الفصل الأول التطورات في استخدام الطاقات المتجددة على الساحة العالمية والعربية والاستثمارات العربية في الطاقات المتجددة، وتطرق الفصل الثاني إلى التقنيات الحديثة لإنتاج الطاقات المتجددة واتجاهات التكلفة في تقنيات الطاقة المتجددة، واستعرض الفصل الثالث الآفاق المستقبلية للطاقات المتجددة من حيث ملامح التحول العالمي في قطاع الطاقة ومؤشراته الرئيسية والتوقعات المستقبلية للطلب على مصادر الطاقة الأولية، وخصص الفصل الرابع للسياسات الوطنية والدولية ودورها في تعزيز نشر الطاقة المتجددة، بينما تناول الفصل الخامس التحديات والصعوبات التي تواجه الاستخدام الأوسع للطاقات المتجددة، وختمت الدراسة بالخلاصة والتوصيات، ومن أهم ما أوصت به الدراسة ما يلي:

☞ تختزن الأقطار الأعضاء في أوابك فرصاً استثمارية هائلة في قطاع الطاقات المتجددة، على غرار قطاع النفط والغاز، بسبب الموارد الضخمة والنمو القوي في الطلب المحلي على الطاقة، وتواجه بعض هذه الدول تحدياً حقيقياً بسبب الضغوط على ميزانياتها المترتبة عن المفاضلة بين ضخ مبالغ طائلة في هذه الاستثمارات ما بين هذين القطاعين، وبين الاحتياجات الاستثمارية في القطاعات الاقتصادية الأخرى لتحقيق التوازن القطاعي للتنمية، ولكن الاستثمار في المزيد من حصّة الطاقات المتجددة في مزيج الطلب المحلي يعني تحرير المزيد من النفط والغاز للتصدير، وتوفير المزيد من الوظائف الجديدة في الأجل القصير، وتحقيق الاستدامة في الأجل الطويل، لذا ينبغي على الدول التي تواجه هذا التحدي أن تفكر جدياً

في الدور الحيوي للتخطيط الاستراتيجي الطويل الأمد في تحقيق أهداف واضحة ومستدامة وتقديم خارطة طريق شاملة تستهدف توجيه الاستثمارات والمشاريع نحو المسارات المحددة، ولا يجب أن يقف دور التخطيط الاستراتيجي عند مجرد وضع الأهداف، بل يجب أن يشمل تصميم البرامج الواضحة والإجراءات التنفيذية الدقيقة (بما يشمل في هذا السياق الإصلاحات التشريعية الممكنة لتعزيز جاذبية الاستثمار)، مما يتيح قياس التقدم بشكل دوري وتحديد مجالات التحسين.

➤ ضرورة العمل على تحديث مرافق الكهرباء والشبكات الكهربائية التي تقوم هذه المرافق بتشغيلها في الدول التي تعاني مشكلة في ضعف المرافق والشبكات، فلن تكون مصادر الطاقة المتجددة وفي مقدمتها طاقة الرياح والطاقة الشمسية قادرة على إحداث التحول المنشود، ما لم تكن مرافق الكهرباء قوية ومستدامة مالياً، ومؤهلة لجذب الاستثمارات اللازمة لتحديث الشبكات وتلبية الاحتياجات التي تزداد تعقيداً، فالطاقة المتجددة تختلف عن الطاقة الأحفورية حيث تعتمد الطاقة الشمسية وطاقت الرياح على عوامل الطقس، وتتغير تبعاً لتغيراتها من موسم لآخر، وأحياناً من دقيقة لأخرى، لذلك يجب أن يشمل تحديث البنى التحتية القائمة تهيئتها لمواجهة هذه التغيرات، كما يحتاج القطاع أيضاً إلى توجيه المزيد من الاستثمار لإدارة كميات أكبر من مصادر الطاقة الموزعة، مثل ألواح الطاقة الشمسية فوق الأسطح، حيث يزيد استخدام العملاء لها لإمداد منازلهم بالكهرباء مع بيع الفائض مرة أخرى إلى المرافق.

➤ ضرورة الاهتمام بإخضاع الآثار البيئية والاجتماعية الإجمالية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة إلى دراسة متأنية لأنشطة استخراج ومعالجة المعادن التي ينطوي عليها نشر التكنولوجيا الخضراء كثيفة الاستخدام للموارد المعدنية، والذي إذا لم يتم إدارته بشكل صحيح، فقد يؤدي إلى إعاقة تحقيق أهداف المناخ وأهداف التنمية المستدامة ذات الصلة.

➤ يجب أن ينتقل مفهوم التعاون الدولي في مجال إدماج الطاقات المتجددة في منظومة الطاقة العالمية من مفهوم التفاهات رفيعة المستوى إلى مستوى التطبيق العملي، وأن يعمل في شكل شراكات تقنية وفرق عمل تنفيذية مشتركة، بصورة يمكن معها جلب اللاعبين الدوليين الحقيقيين، في مختلف مراحل سلاسل توريد صناعة الطاقة المتجددة للعمل معاً على تحقيق هدف واحد، هو إيجاد وتطبيق الحلول الفعلية للتحديات الحقيقية التي تشكل في مجموعها عوائق التقنية والتكلفة، والتي تقيد انطلاقة التصنيع المرتبطة بصناعة الطاقات المتجددة على كافة مراحل سلاسل توريدها.

➤ توصي الدراسة بإعداد خرائط مفصلة لسلاسل التوريد العالمية لصناعة الطاقات المتجددة، توضح الدول أو الأقاليم المؤهلة لتوطين المحتوى، وتحقيق القيمة المضافة، لتحقيق التنوع في توزيع المصادر والإنتاج، وسلاسل التوريد الإقليمية.

الفصل الأول

التطورات في استخدام الطاقات المتجددة

1. التطورات العالمية في استخدام الطاقات المتجددة:

يشير الاتجاه العام لمعدلات نمو الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقات المتجددة، إلى أن عملية تحول قطاع الطاقة العالمي من نظام معتمد على المصادر الهيدروكربونية إلى نظام يعتمد على المصادر المتجددة قد بدأت فعلاً، فالنمو المتسارع بشكل لافت لمعدلات استهلاك مصادر الطاقة الجديدة المتجددة، منذ أواخر العقد الأول للقرن الحادي والعشرين، يدل بما لا يدع مجالاً للشك، أن العالم قد ولج المرحلة الأولى من هذا الانتقال، حيث سجل إجمالي الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقات المتجددة الجديدة (لا تشمل الكهرومائية) قفزة غير مسبوقة، من نحو 10.5 إكساجول خلال عام 2010، إلى نحو 50.6 إكساجول خلال عام 2023، بمعدل نمو سنوي بلغ نحو 12.8% خلال الفترة (2010-2023)، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-1: إجمالي الاستهلاك العالمي من الطاقات المتجددة، إكساجول



Source: bp Statistical Review of World Energy 2022 & 2024

وبملاحظة مشهد التغيير في حصص المصادر الأولية من إجمالي الاستهلاك العالمي لهذه المصادر خلال الأربعة عقود الماضية والذي اتسم بوثيرة متسارعة للزيادة في حصة مصادر الطاقات المتجددة الأخرى (غير الكهرومائية)، لا سيما خلال العقدين الماضيين، يمكن أن نرى بوضوح لا شك فيه أن عملية الانتقال تمر الآن بمرحلة تغيير واسع في مزيج الطاقة المستهلكة عالمياً من مصادر الوقود التقليدي إلى مصادر الطاقة المتجددة، الأمر الذي يعكس مشهده خلال الأربعة عقود الماضية انتقال الزخم من مصادر الغاز الطبيعي والطاقة النووية التي جنت ثمار التحول خلال العقدين الأولين (1983-2003) إلى الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) التي باتت تجني ثمار التحول في مزيج الطاقة المستهلكة خلال العقدين الأخيرين، حيث قفزت حصتها من حوالي 0.9% خلال عام 2003 إلى نحو 8.2% خلال عام 2023، كما هو موضح بالشكل التالي:

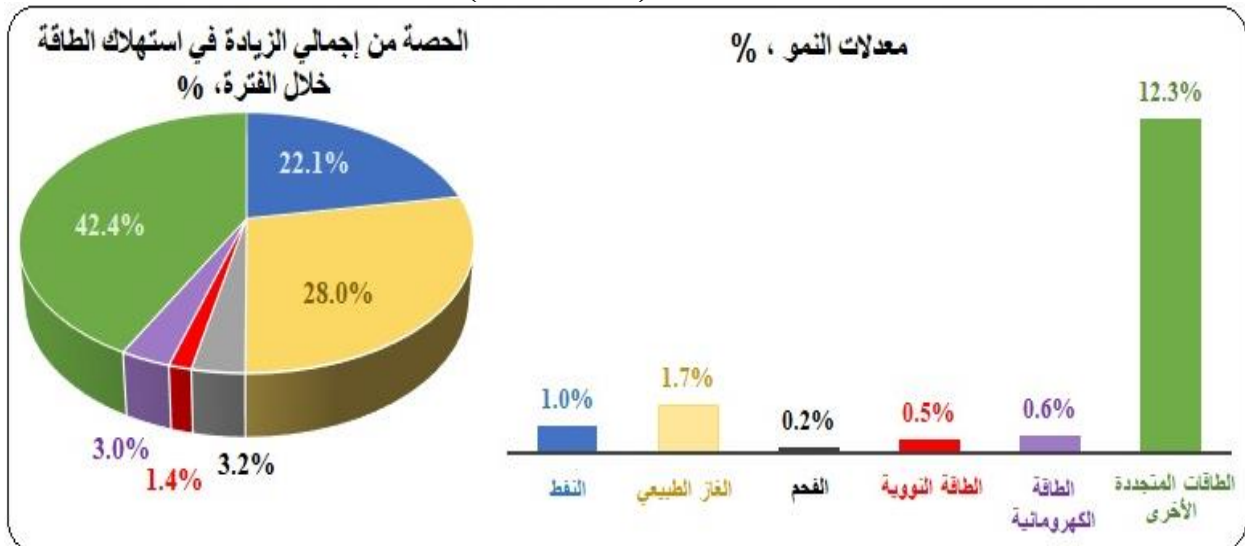
الشكل 1-2: مزيج الطاقة المستهلكة عالمياً، حصة المصادر الأولية من إجمالي الطاقة المستهلكة %



Source: bp Statistical Review of World Energy 2022 & 2024

وقد حققت مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) أسرع معدلات النمو في استهلاك مصادر الطاقة الأولية خلال الفترة (2013 – 2023)، حيث سجل معدل النمو في استهلاكها الزوجية عند نحو 12.3%، يليها الغاز الطبيعي الذي سجل أسرع معدلات النمو بين المصادر الأخرى بمعدل نمو بلغ نحو 1.7% خلال هذه الفترة، الأمر الذي انعكس في استحواد مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) على حصة بلغت نحو 42.4% من إجمالي الزيادة في الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الأولية خلال الفترة (2013 – 2023)، يليها الغاز الطبيعي الذي بلغت حصته نحو 28% من إجمالي الزيادة في الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الأولية خلال هذه الفترة، ثم أتى النفط ثالثاً بحصة بلغت حوالي 22.1% كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-3: معدلات نمو استهلاك مصادر الطاقة الأولية وحصصها من إجمالي الزيادة في الاستهلاك خلال الفترة (2013-2023)

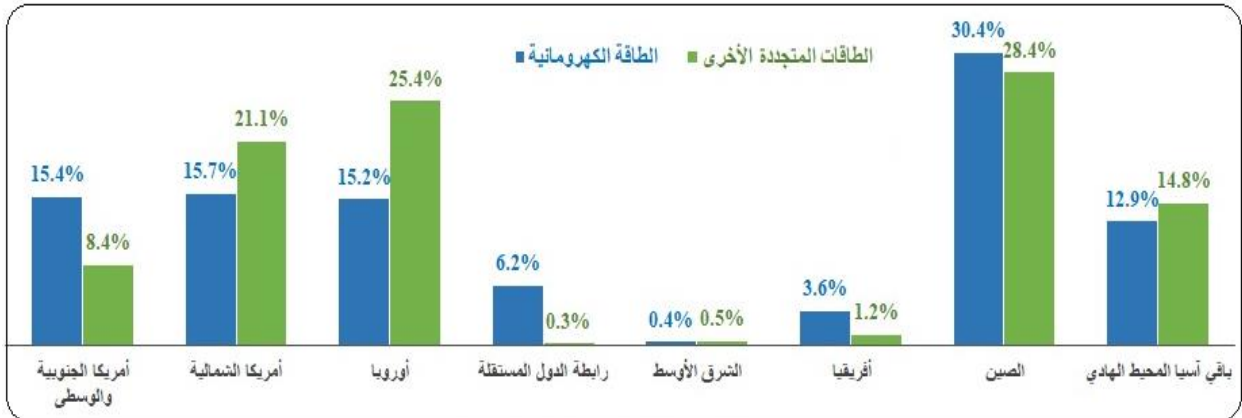


Source: bp Statistical Review of World Energy 2022 & 2024

وعلى الصعيد الجغرافي، تستأثر الصين بنصيب الأسد في إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهرومائية، حيث بلغت حصتها من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهرومائية نحو 30.4% من إجمالي الاستهلاك العالمي لعام 2021، أي ما يوازي تقريباً ضعف حصة مجموعة دول أمريكا الجنوبية والوسطى التي تضم البرازيل موطن الأمازون، كما تمثل حصة الصين من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهرومائية تقريباً ضعف حصة مجموعة دول أمريكا الشمالية مجتمعة، أو ضعف حصة مجموعة دول أوروبا موطن أنهار الفولجا والدانوب والراين واللوار من غير دول الإتحاد السوفيتي السابق، كما تجاوزت حصة الصين بمفردها من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهرومائية أيضاً إجمالي حصص باقي دول آسيا بما يشمل دول آسيا المحيط الهادي والشرق الأوسط ورابطة الدول المستقلة مجتمعة مع كامل دول أفريقيا موطن النيل وشلالات فيكتوريا وتوجيلا.

وفيما يتعلق بمصادر الطاقات المتجددة الأخرى، استأثرت الصين أيضاً بنصيب الأسد في إجمالي الاستهلاك العالمي من هذه المصادر، حيث بلغت حصتها نحو 28.4% من إجمالي الاستهلاك العالمي لعام 2021، تليها مجموعة دول أوروبا من غير دول الإتحاد السوفيتي السابق، بحصة تجاوزت قليلاً ربع إجمالي الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقات المتجددة الأخرى خلال عام 2021، ثم مجموعة دول أمريكا الشمالية مجتمعة التي تجاوزت حصتها خمس الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقات المتجددة الأخرى خلال عام 2021 بقليل، الجدير بالذكر أن حصة دول أفريقيا والشرق الأوسط ورابطة الدول المستقلة مجتمعة لم تتجاوز ما نسبته 2% من إجمالي الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقات المتجددة الأخرى خلال عام 2021، على الرغم من تمتع منطقة شمال أفريقيا والشرق الأوسط بموارد هائلة من المصادر المتجددة وخاصة الشمسية والرياح، ويوضح الشكل التالي التوزيع الجغرافي لاستهلاك الطاقة المتجددة خلال عام 2021:

الشكل 1-4: التوزيع الجغرافي لاستهلاك الطاقات المتجددة لعام 2021، % من إجمالي الاستهلاك العالمي

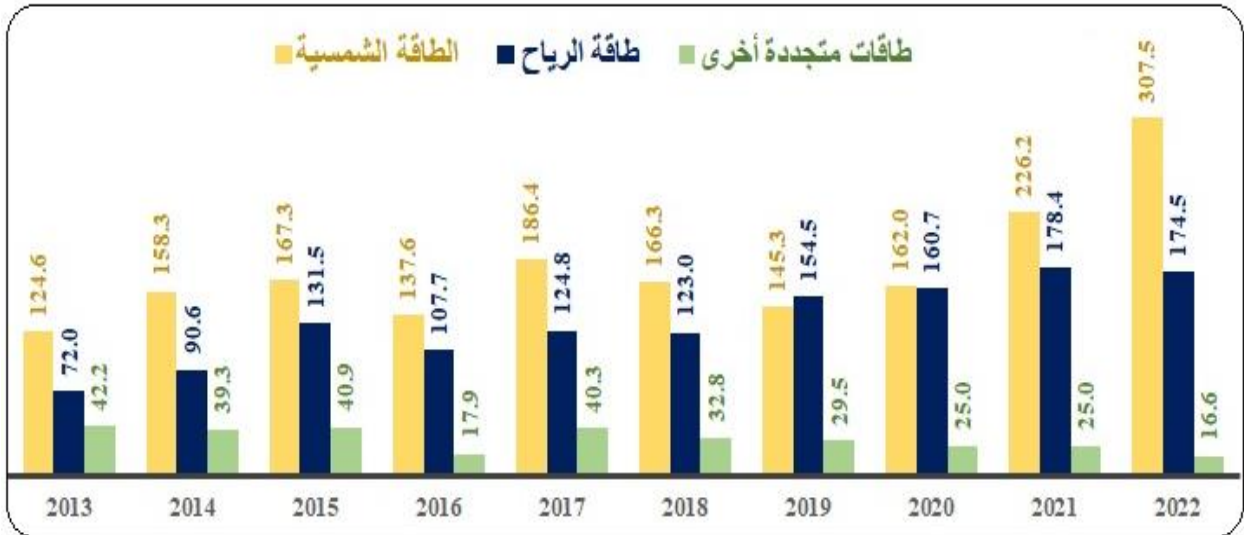


Source: bp Statistical Review of World Energy June 2022

وفيما يتعلق بالكهرباء، شهد إجمالي قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة نمواً بمعدل 7.4% خلال الفترة (2000-2023) ليرتفع من حوالي 0.8 تيراواط خلال عام 2000 إلى نحو 3.9 تيراواط خلال عام 2023. وقد حققت الطاقات الشمسية تليها طاقات الرياح أسرع معدلات النمو بين مصادر الطاقات المتجددة، حيث سجل إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية قفزات سنوية بمعدل 35.9% خلال الفترة (2000 – 2023)، بينما حققت القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من طاقات الرياح، ثاني أعلى معدلات النمو في قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة، بوثيرة سنوية بلغت نحو 19.5% خلال ذات الفترة.

وتكمن القوة الدافعة لهذا النمو القوي، في التقدّمات المتسارعة لتقنيات توليد الكهرباء باستخدام هذه المصادر وتطبيقاتها، والتي بدورها كانت نتيجة حتمية للزخم الواسع من طيف الاستثمارات السخية التي استأثرت بها تكنولوجيات الطاقات الشمسية والرياح، حيث اجتذبت هذه التقنيات مجتمعة نصيب الأسد من إجمالي الاستثمارات العالمية المخصصة لتقنيات الطاقة المتجددة خلال الفترة (2013-2022)، وهيمنت على حصة تدرجت من 82.3% خلال عام 2013 إلى 96.7% خلال عام 2022، كما هو موضح بالشكل والجدول التاليين:

الشكل 1-5: حجم الاستثمارات العالمية السنوية في تقنيات الطاقات المتجددة حسب النوع، مليار دولار



الجدول 1-1: الحصة من إجمالي الاستثمارات العالمية في تقنيات الطاقات المتجددة، %

2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	
61.7%	52.7%	46.6%	44.1%	51.6%	53.0%	52.3%	49.2%	54.9%	52.2%	الطاقة الشمسية
35.0%	41.5%	46.2%	46.9%	38.2%	35.5%	40.9%	38.7%	31.4%	30.2%	طاقة الرياح
3.3%	5.8%	7.2%	9.0%	10.2%	11.5%	6.8%	12.0%	13.7%	17.7%	طاقات متجددة أخرى

Source: Global Landscape of renewable energy finance 2023, IRENA & Climate Policy Initiative February 2023

وقد آنت ثمار هذا النمو القوي أكلها في استحواد القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية على نصيب الأسد من إجمالي القدرات العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة خلال عام 2023 بحصة بلغت حوالي 36.7% مقارنة بمساهمة لا تكاد تذكر خلال عام 2000 قدرت بنحو 0.2% آنذاك. وسارت طاقات الرياح كذلك في ركب النمو المتسارع، مستفيدة من زخم الاستثمار السخي، لترتفع حصة قدراتها المركبة من إجمالي قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة من 2.3% خلال عام 2000 إلى حوالي 26.3% خلال عام 2023م، في اتجاه مغاير لمسيرة الطاقة الكهرومائية، التي تباطأ نموها خلال الفترة (2000 - 2023) فتراجعت حصتها من إجمالي قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة كما هو موضح بالجدول والشكل التاليين:

الجدول 1-2: إجمالي قدرات توليد الكهرباء العالمية المركبة من الطاقات المتجددة، ميجاواط

	الطاقة الحيوية	الطاقة الحرارية الجوفية	الطاقة الكهرومائية*	الطاقة البحرية	الطاقة الشمسية	طاقة الرياح	إجمالي الطاقات المتجددة
2000	28,968	8,273	696,580	238	1,216	16,964	752,239
2023	148,840	15,026	1,264,742	508	1,418,008	1,017,390	3,864,514

الشكل 1-6: معدلات نمو القدرات المركبة (2000-2023)، والحصة من الإجمالي لعام 2023، %

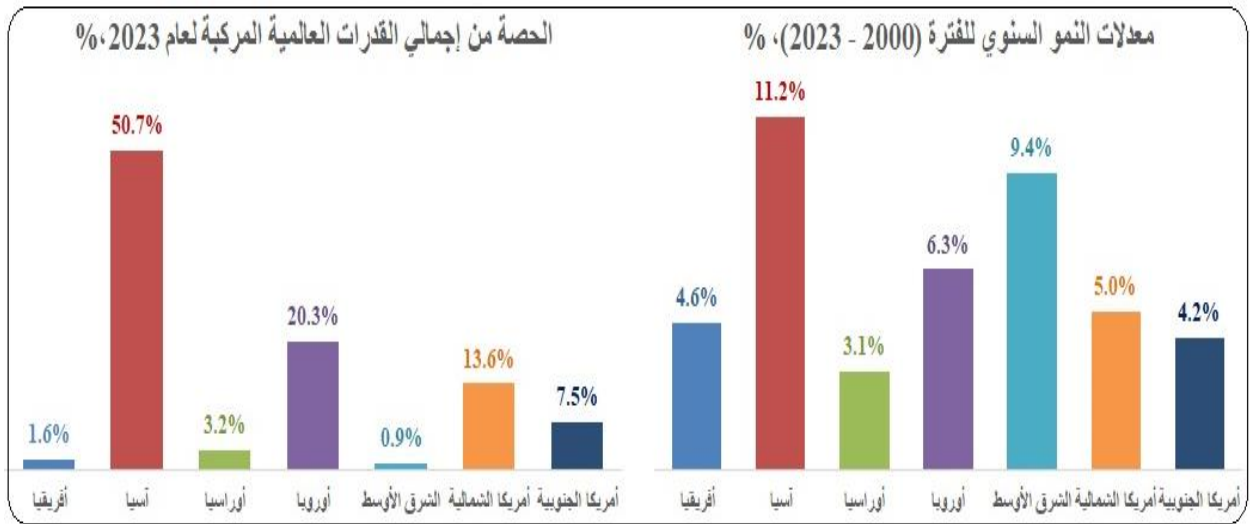


المصدر: تحليل بيانات الجدول رقم (1) في الملحق

وعلى الصعيد الجغرافي، شهد إجمالي القدرات المركبة الأسيوية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة أسرع معدلات النمو بين مناطق العالم الأخرى مسجلة معدل نمو بالخانة الزوجية عند نحو 11.2% خلال الفترة (2000 - 2023)، لتستحوذ آسيا على ما يزيد عن نصف إجمالي القدرات العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة خلال عام 2023. وبينما سجل إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة لمجموعة بلدان الشرق الأوسط ثاني أسرع معدلات النمو بين مناطق العالم خلال الفترة (2000 - 2023) عند نحو 9.4%، إلا أن ثمار هذا النمو لم تبرز انعكاس مناظر في حصة مجموعة بلدان الشرق الأوسط في إجمالي القدرات العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة خلال عام 2023م التي لم تتجاوز 0.9% بسبب القاعدة الضعيفة لأساس النمو، مما يدل على استفاقة متأخرة لبرامج التكامل في منظومة الطاقة في المنطقة التي تتمتع

بموقع استراتيجي في أسواق الطاقة العالمية عندما يرجع الأمر لمصادر الطاقة الهيدروكربونية، كما تتمتع بموارد هائلة من المصادر المتجددة لطاقت الرياح والطاقت الشمسية غير مستغلة بعد بشكل يتناسب مع قدراتها، في حين تسير دول أوروبا في ركب النمو بمعدلات بلغت نحو 6.3% في إجمالي القدرات المركبة الأوروبية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة خلال الفترة (2000 - 2023)، لتستحوذ أوروبا على ما يزيد عن خمس إجمالي القدرات العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة خلال عام 2023، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-7: معدلات النمو في إجمالي القدرات المركبة للفترة (2000-2023) وحصص المناطق الرئيسية لعام 2023، %



المصدر: تحليل بيانات الجدول رقم (2) في الملحق

وتركز نحو ثلثي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية ونصف القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقات الرياح في قارة آسيا، حيث تستأثر الصين على نصيب الأسد منها، فلقد بلغ إجمالي القدرات المركبة الصينية لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية حوالي 610 جيجاواط خلال عام 2023، مستحوذة على نحو 43% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية خلال عام 2023، وهي حصة تتجاوز ضعف حصة أوروبا مجتمعة البالغة نحو 20.3% من إجمالي القدرات المركبة العالمية.

وتجاوزت حصة الصين وحدها من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، إجمالي القدرات العالمية المركبة لباقي دول العالم بما يشمل مجموعة دول أمريكا الشمالية والجنوبية وأوراسيا وأفريقيا والشرق الأوسط وباقي آسيا والمناطق الأخرى من العالم التي بلغ إجمالي حصصها مجتمعة نحو 36.7% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية خلال عام 2023.

وبالنسبة لطاقة الرياح، استأثرت الصين أيضاً بنصيب الأسد من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من هذه المصادر، حيث بلغ إجمالي القدرات المركبة الصينية لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح حوالي 442 جيجاواط خلال عام 2023، مستحوذة على نحو 43.4% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح خلال عام 2023، بينما بلغت حصة أوروبا نحو 25.1% ومجموعة دول أمريكا الشمالية حوالي 16.9% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح خلال عام 2023، كما هو موضح بالجدول والشكل التاليين:

الجدول 1-3: توزيع القدرات العالمية المركبة من الطاقة الشمسية وطاقات الرياح لعام 2023، ميغاواط

العالم	أمريكا الجنوبية	أمريكا الشمالية	أوروبا	أوراسيا	الشرق الأوسط	أفريقيا	الصين	باقي آسيا	مناطق أخرى
1418008	49392	156000	288644	14204	18826	13438	609921	229400	38184
1017390	39852	172328	255615	14305	1866	8654	441895	66704	16172

الشكل 1-8: التوزيع الجغرافي للحصص من قدرات المركبة من الطاقة الشمسية والرياح لعام 2023، %



المصدر: تحليل بيانات قاعدة البيانات الإحصائية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)

وقد كانت الطاقة الشمسية الكهروضوئية و طاقة الرياح البرية نجمتي النمو الذي شهدته القدرات الانتاجية للطاقات المتجددة عالمياً خلال السنوات الماضية، حيث نمت إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح البرية بوتيرة الخانة الزوجية، فسجلت الأولى قفزات سنوية بلغت نحو 26% خلال الفترة (2014-2023)، بينما سجلت الثانية معدل نمو سنوي بلغ نحو 12% خلال ذات الفترة، لترتفع حصة القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية من 97.5% خلال عام 2014 إلى نحو 99.5% خلال عام 2023، بينما تراجع حصة الطاقة الشمسية المركزة من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية من 2.5% خلال عام 2014 إلى نحو 0.5% خلال عام 2023.

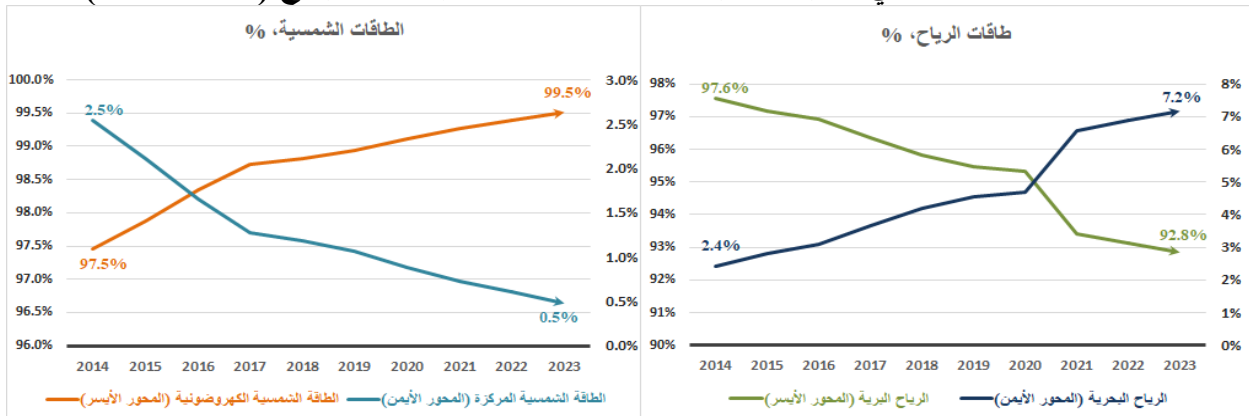
من جهة أخرى، حققت طاقة الرياح البحرية وثائر أسرع في قدراتها المركبة لتوليد الكهرباء خلال الفترة (2014-2023) من نظيراتها للرياح البرية، حيث بلغ معدل النمو السنوي للقدرات المركبة للرياح البحرية نحو 27% خلال هذه الفترة، مقارنة بمعدل 12% للرياح البرية، مما انعكس في تراجع حصة القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح البرية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح من 97.6% خلال عام 2014 إلى نحو 92.8% خلال عام 2023، لترتفع بالمقابل حصة القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح البحرية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح من 2.4% خلال عام 2014 إلى نحو 7.2% خلال عام 2023.

وعلى الرغم من نموها المتسارع، لا زالت سوق الرياح البحرية متواضعة نظراً لصغر حجمها بالمقارنة مع سوق الرياح البرية حالياً، ومن المرجح أن تستمر طاقة الرياح البرية في الاستحواذ على الحصة الأكبر من إجمالي القدرات المركبة لطاقت الرياح في الأجل القريب، على الرغم من تحقيق طاقة الرياح البحرية لوثائر أسرع في النمو، إلا أن تقلص المساحات المتاحة لطاقت الرياح على اليابسة خاصة في الدول التي نضجت عندها صناعة الرياح البرية سيتطلب نقل تلك المرافق إلى البحر حتى يتسنى لتلك الدول الاستمرار في تنمية طاقتها المتجددة، وهو ما يؤشر إلى آفاق واعدة للنمو في الرياح البحرية مستقبلاً بجانب التقدّمات المحرزة في تقنياتها مؤخراً، كما أن الرياح البرية لا زالت أيضاً على موعد مع مستويات نمو قوية في الصين والهند تحديداً. ويوضح الجدول والشكل التاليين التطور في القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقت الرياح والطاقت الشمسية خلال الفترة (2014-2023):

الجدول 1-4: القدرات العالمية المركبة من طاقت الرياح والطاقت الشمسية (2014-2023)، جيجاوات

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	معدل النمو السنوي
الرياح البرية	341	405	453	496	540	594	699	770	839	945	12.0%
الرياح البحرية	8.5	11.7	14.4	18.8	23.6	28.3	34.4	54.3	62.0	72.9	27.0%
الطاقة الشمسية الكهروضوئية	176.159	224.207	296.215	391.245	486.828	589.114	721.989	867.482	1066.559	1412.093	26.0%
الطاقة الشمسية المركزة	4.6	4.9	5.0	5.1	5.8	6.4	6.4	6.4	6.6	6.9	4.6%

الشكل 1-9: الحصة من إجمالي القدرات المركبة للطاقت الشمسية وطاقت الرياح (2014-2023)، %



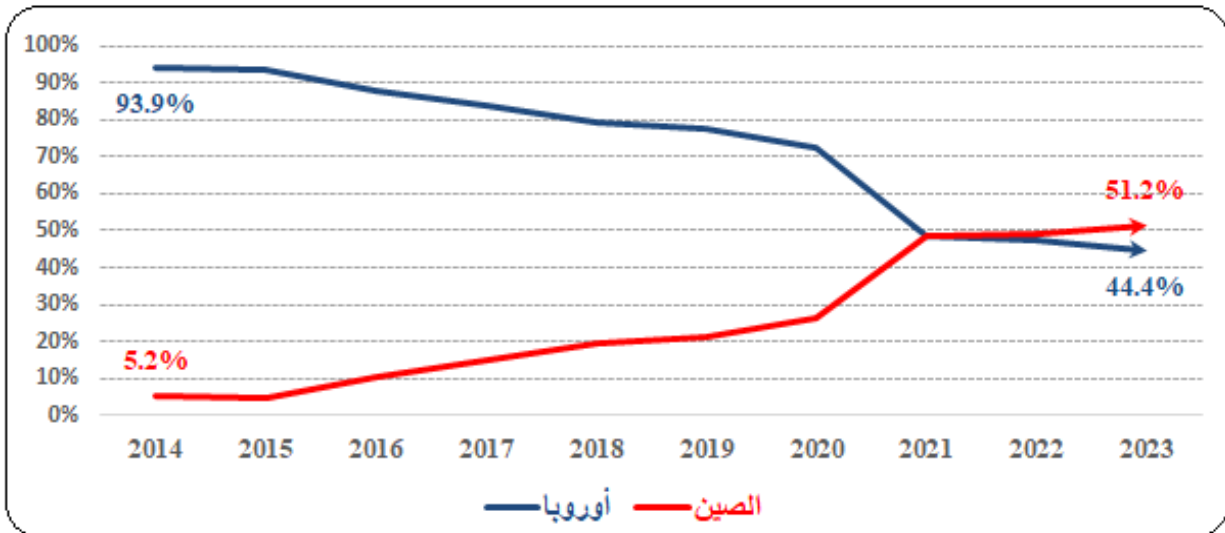
المصدر: تحليل بيانات قاعدة البيانات الإحصائية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)

ولقد كانت أوروبا القوة الأكبر خلف نمو سوق الرياح البحرية في سنواتها الأولى حيث استحوذت على حصة بلغت نحو 94% خلال عام 2014، ثم شهدت سوق الرياح البحرية في الصين انطلاقة قوية لتتجاوز الصين حصة أوروبا في أسواق الرياح البحرية مستحوذة على كرسي القيادة في هذا السوق، باستحواذها على نحو 51.2% من إجمالي القدرات العالمية خلال عام 2023، بينما تراجعت حصة أوروبا إلى نحو 44.4% من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقات الرياح البحرية كما هو موضح بالجدول والشكل التاليين:

الجدول 5-1: قدرات التوليد العالمية المركبة من طاقات الرياح البحرية (2014-2023)، جيجاوات

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	معدل النمو السنوي
أوروبا	7986	11006	12644	15802	18727	21967	24928	26415	29539	32369	16.8%
الصين	440	559	1480	2788	4588	5930	8990	26390	30460	37290	63.8%
العالم	8503	11735	14358	18837	23590	28292	34369	54265	61967	72854	27.0%

الشكل 10-1: الحصة من إجمالي قدرات التوليد المركبة لطاقات الرياح البحرية (2014-2023)، %



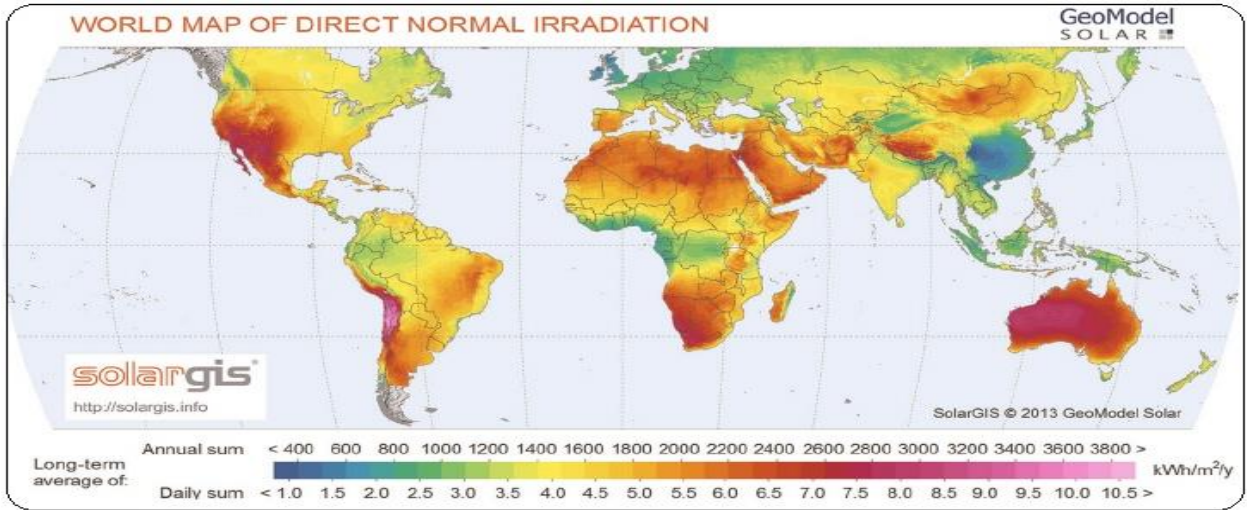
المصدر: تحليل بيانات قاعدة البيانات الإحصائية للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)

2. الطاقات المتجددة في الدول العربية:

تمتلك الدول العربية إمكانات هائلة من مصادر الطاقات المتجددة، فهي تقع في منطقة جغرافية تمتاز بأعلى سطوع شمسي على الأرض وسرعات ريحية معتدلة إلى مرتفعة، ولدى بعض الدول العربية موارد كبيرة أيضاً من مصادر الطاقة المائية، وجميع هذه الدول مؤهلة لاستغلال هذه الموارد المتجددة، إلا أن جميع هذه الموارد لم تستغل كما يجب حتى الآن.

فعلى صعيد الطاقة الشمسية، تمتلك منطقة شمال أفريقيا والشرق الأوسط إمكانات ضخمة لتوليد الطاقة نظراً لتمتعها بمستويات عالية من الإشعاع الشمسي وانخفاض معدلات تواجد الغيوم، تؤهلها للتموضع في مصاف متقدمة بين مناطق العالم المؤهلة لإنتاج الطاقة الشمسية، حيث توضح خارطة الإشعاع الشمسي الطبيعي المباشر (Direct Normal Irradiation-DNI) أن منطقة شمال أفريقيا والشرق الأوسط هي من ضمن أكثر مناطق العالم تعرضاً لأشعة الشمس، و يتراوح معدل الإشعاع الطبيعي المباشر فيها ما بين (5.5 - 7.5) كيلووات ساعة لكل متر مربع يومياً، وما بين (2000-2800) كيلووات ساعة لكل متر مربع سنوياً، كما هو موضح بالشكل التالي:

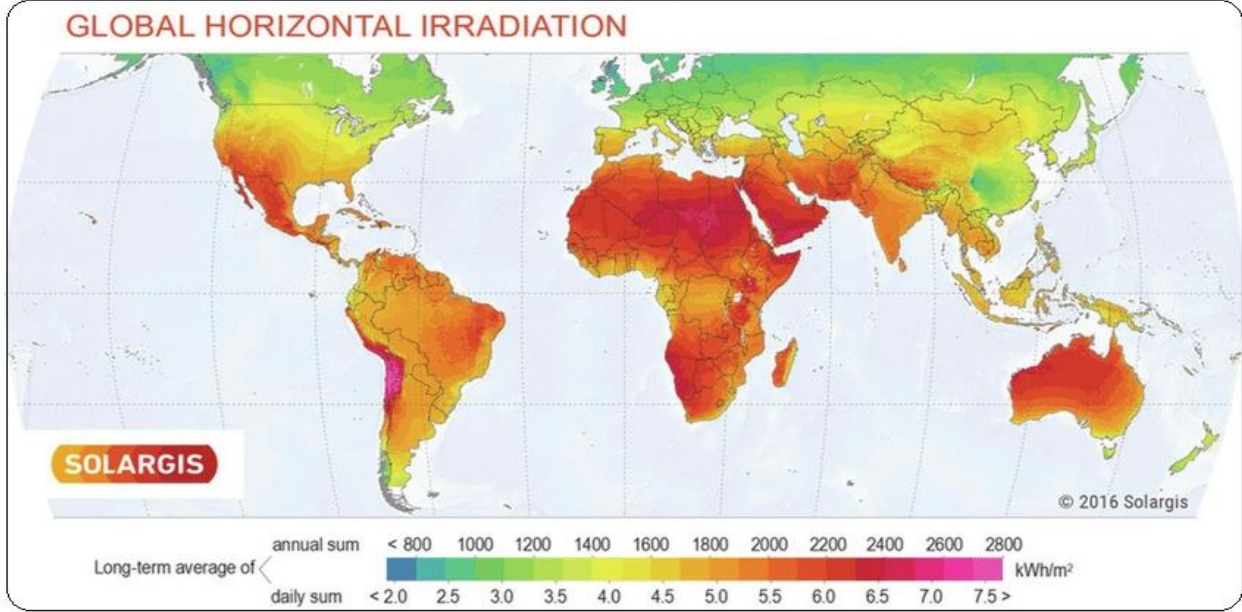
الشكل 1-11: خريطة الإشعاع الشمسي الطبيعي المباشر



المصدر: الصورة من سولار جي أي اس SolarGIS © 2016 GeoModel Solar

ومن جهة أخرى، توضح خارطة الإشعاع الشمسي الأفقي العالمي (- Global Horizontal Irradiation - GHI) أن أعلى مناطق العالم تعرضاً لأشعة الشمس الأفقية هي المنطقة الممتدة من طول الجنوب الليبي والجنوب الغربي لمصر والشمال الغربي للسودان وشمال تشاد بالإضافة إلى النصف الغربي من الأراضي السعودية واليمن وصحراء أتاكاما في تشيلي، حيث يتجاوز معدل الإشعاع الشمسي الأفقي في هذه المناطق 7.5 كيلووات ساعة لكل متر مربع يومياً، وحوالي 2800 كيلووات ساعة لكل متر مربع سنوياً، كما توضح الخارطة أيضاً، أن منطقة الصحراء الكبرى التي تشمل النصف الجنوبي من الجزائر وأغلب الأراضي الليبية والمصرية (باستثناء الشريط الساحلي على ضفاف المتوسط) وأغلب الأراضي في شبه الجزيرة العربية تقع ضمن ثاني أعلى المناطق في العالم تعرضاً للإشعاع الشمسي الأفقي الذي يتراوح معدله ما بين 6-7 كيلووات ساعة لكل متر مربع يومياً، وما بين 2200-2500 كيلووات ساعة لكل متر مربع سنوياً، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-12: خريطة الإشعاع الشمسي الأفقي العالمي



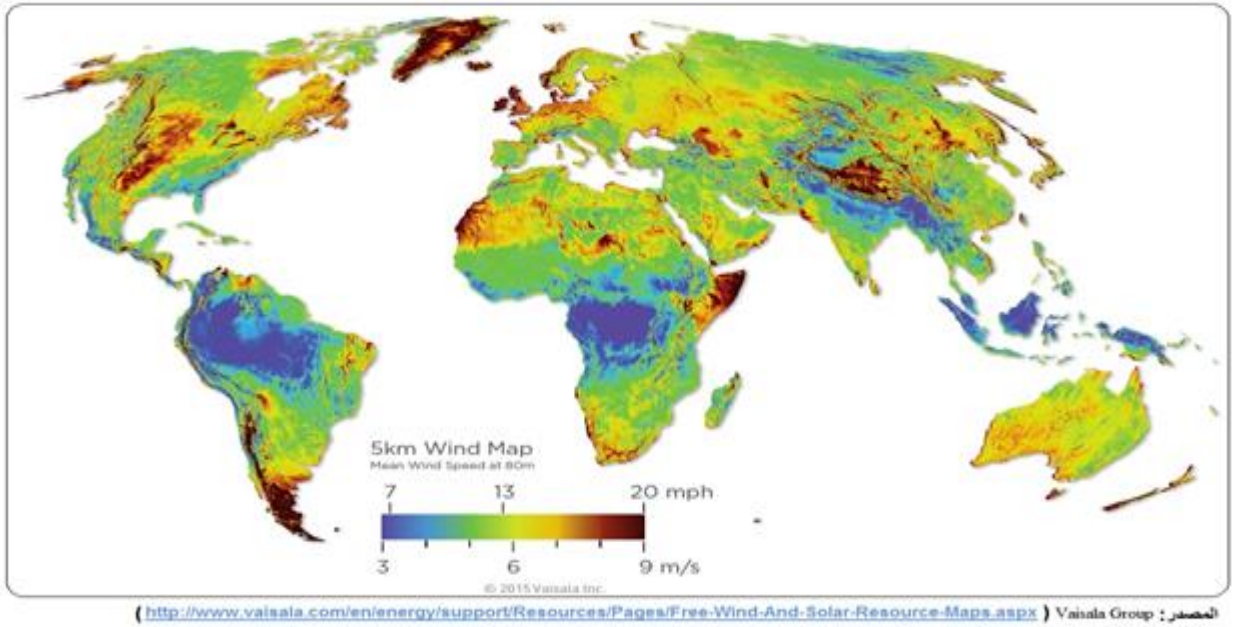
المصدر: الصورة من سولار جي أي اس SolarGIS © 2016 GeoModel Solar

وبينما تشير معدلات الإشعاع الطبيعي المباشر إلى أن تكاليف مشاريع توليد الكهرباء باستخدام محطات الطاقة الشمسية المركزة بكل الدول العربية تعتبر مجدية اقتصادياً وتنافسية مع مصادر الطاقة التقليدية والطاقات المتجددة الأخرى، تؤكد معدلات الإشعاع الشمسي الأفقي أن الأنظمة الفولتوضوئية (Photovoltaic Systems) مؤهلة للعمل بكفاءة عالية في كل الدول العربية، وأن جدوى الاستثمار في الطاقة الشمسية بهذه الدول أمر بديهي كبديل عن حرق موردها الثمين من المصادر الهيدروكربونية.

وعلى صعيد طاقات الرياح، تتمتع منطقة شمال أفريقيا والشرق الأوسط بموارد هامة من الرياح تؤهلها لتصبح أحد أهم مصادر طاقة الرياح في العالم، حيث تشير خارطة سرعة الرياح في العالم أن سرعة الرياح في أغلب أنحاء المنطقة تتجاوز 5 متر/ ثانية، كما تشير الخارطة أيضاً إلى أن أعلى المناطق من حيث سرعات الرياح في الدول العربية تقع في السواحل الغربية على المحيط الأطلسي لجنوب المغرب على امتداد الصحراء الغربية وموريتانيا، وكامل الأراضي في الشمال الصومالي من القرن الأفريقي، بالإضافة إلى الساحل الغربي لسيناء بجمهورية مصر العربية المتاخم للبحر الأحمر من الإسماعيلية شمالاً وحتى الطور جنوباً بالإضافة إلى الضفاف الغربية لسيناء على خليج العقبة، وكذلك السواحل الشرقية من ليبيا على ضفاف البحر الأبيض المتوسط من مدينة بنغازي غرباً إلى مدينة درنة شرقاً، حيث تتجاوز سرعات الرياح بهذه المناطق 9 أمتار / ثانية، فهي بذلك تقع ضمن أعلى مناطق العالم من حيث سرعات الرياح وتعتبر مناسبة جداً لمشاريع استغلال طاقات الرياح.

كما تعتبر المناطق الممتدة من وسط إلى السواحل الشرقية للمملكة العربية السعودية على ضفاف البحر الأحمر وكذلك سلسلة جبال أطلس من غرب الجزائر وامتداداتها بمنطقة الجبل الغربي في ليبيا وشمال تونس أيضاً، من المناطق الجغرافية الهامة لمصادر طاقة الرياح بالدول العربية حيث تتراوح سرعات الرياح بهذه المناطق ما بين 7-9 أمتار/ثانية، مما يؤهلها أيضاً بقوة ضمن المناطق المرشحة للعب دور حيوي في مشاريع استغلال طاقات الرياح بالمنطقة، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-13: خريطة سرعات الرياح في العالم

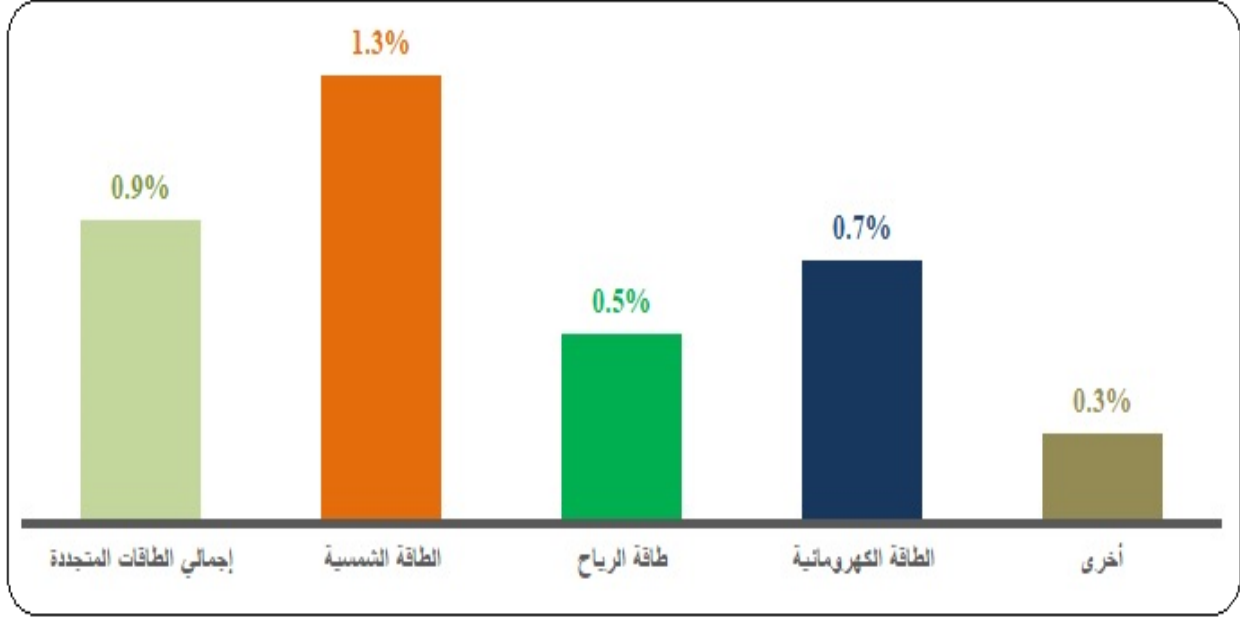


وبالرغم من هذه الموارد الهائلة، إلا أن الطاقات المتجددة لم تحظى حتى الآن بالاستغلال الأمثل الذي يجب أن تحظى به في معظم الدول العربية، ولا تعكس مساهمتها في مزيج الطاقة في الواقع حقيقة الإمكانيات المتاحة منها، حيث لم تتجاوز إجمالي حصة الدول العربية نحو 0.4% من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهربائية، وحوالي 0.8% من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقات المتجددة الأخرى خلال عام 2023¹.

وفيما يتعلق بالكهرباء، لم تتجاوز حصة الدول العربية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية 1.3%، وطاقة الرياح 0.5%، والكهرومائية 0.7%، وحوالي 0.9% من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة مجتمعة خلال عام 2023، كما هو موضح بالشكل التالي:

¹ BP-Energy Institute Statistical Review of World Energy 2024

الشكل 1-14: حصة الدول العربية من إجمالي القدرات المركبة من الطاقات المتجددة لعام 2023



المصدر: تحليل بيانات الجداول رقم (3 و 1) في الملحق

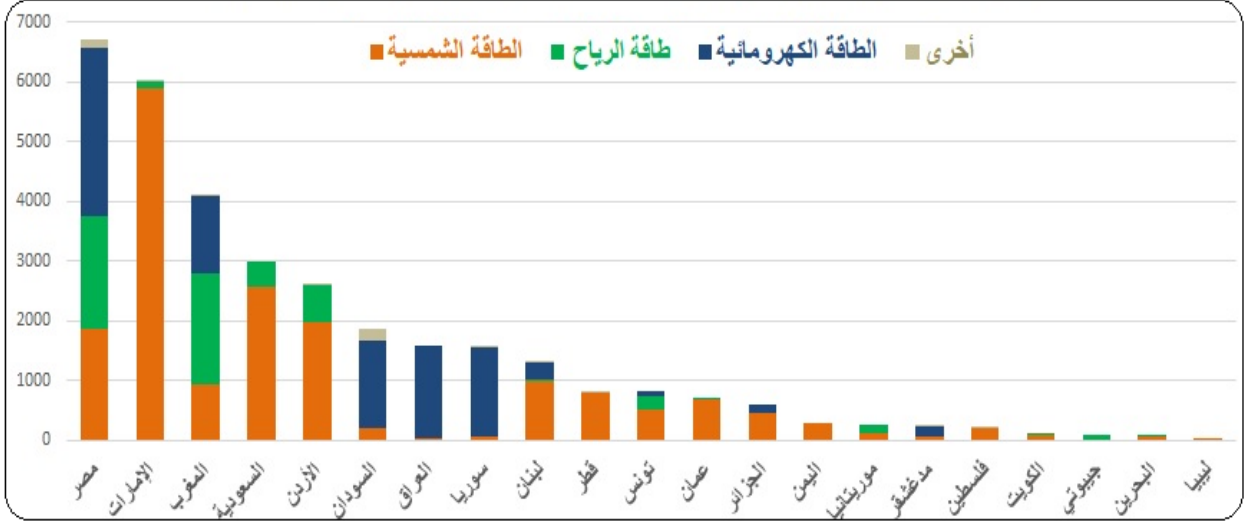
وتركز نحو 51% من إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة للدول العربية خلال عام 2023 في ثلاث دول هي مصر والإمارات والمغرب، حيث استأثرت مصر بنحو خمس إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة للدول العربية خلال عام 2023، بينما بلغت حصة الإمارات نحو 18.3%، والمغرب حوالي 12.4% من إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة للدول العربية خلال عام 2023.

وتنوع مزيج المصادر المتجددة التي تشكلت منها القدرات المركبة لتوليد الكهرباء في مصر والمغرب من مصادر الطاقة الشمسية والرياح والكهرومائية، بينما هيمنت الطاقة الشمسية على المزيج الإماراتي بحصة بلغت حوالي 97.9% مع مشاركة متواضعة لطاقة الرياح، وكذلك في السعودية والأردن التي ساهمت الطاقة الشمسية بحصة بلغت حوالي 86.5% و 75.9% من مزيج المصادر المتجددة التي تشكلت منها القدرات المركبة لتوليد الكهرباء فيهما على التوالي، كما ساهمت الطاقة الشمسية بالحصة الأكبر كذلك في لبنان وقطر وتونس والجزائر واليمن، بينما هيمنت الطاقة الكهرومائية على مزيج الطاقة المتجددة في سوريا والعراق والسودان، كما هو موضح بالجدول والشكل التاليين:

الجدول 1-6: الحصة من إجمالي القدرات المركبة من الطاقات المتجددة للدول العربية لعام 2023

ليبيا	0.0%	البحرين	0.2%	جيبوتي	0.2%	الكويت	0.3%	فلسطين	0.6%	مدغشقر	0.7%	موريتانيا	0.8%	اليمن	0.9%	الجزائر	1.8%	عمان	2.2%	تونس	2.5%	قطر	2.5%	لبنان	3.9%	سوريا	4.7%	العراق	4.8%	السودان	5.7%	الأردن	7.9%	السعودية	9.1%	المغرب	12.4%	الإمارات	18.3%	مصر	20.3%
-------	------	---------	------	--------	------	--------	------	--------	------	--------	------	-----------	------	-------	------	---------	------	------	------	------	------	-----	------	-------	------	-------	------	--------	------	---------	------	--------	------	----------	------	--------	-------	----------	-------	-----	-------

الشكل 1-15: إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة في الدول العربية لعام 2023



المصدر: تحليل بيانات الجداول رقم (3 و 1) في الملحق

وبالنسبة للطاقة الحيوية، فبالرغم من جهود بعض الدول العربية في مشاريع إعادة تدوير النفايات التي يلقي جزء كبير منها في مناطق مخصصة (مكببات)، إلا أن جهود إنشاء محطات تحويل نفايات إلى طاقة لا تزال في طور الأفكار التي تطرح بين الحين والآخر كحل لتقليل عدد المكبات ومشاكلها المتعلقة بالتلوث الأرضي والهوائي، وتعتمد فرص هذه التقنيات النظيفة والمتطورة على التكلفة الاقتصادية لها والفرص التي ستجعلها تتقدم في بعض الدول العربية.

3. الاستثمارات العربية في الطاقات المتجددة:

شهدت الاستثمارات العامة في تقنيات الطاقة المتجددة للدول العربية قفزة خلال عام 2003 ليبلغ إجماليها نحو 1.7 مليار دولار أمريكي، ثم تراجعت خلال باقي الفترة التي شهدت انتعاشاً قوياً لأسعار النفط فتوجه الزخم الاستثماري إلى قطاع البترول حتى اندلاع الأزمة المالية العالمية خلال أواخر عام 2008 ومطلع 2009، وما صاحبها من تداعيات سلبية على أسعار النفط واستثماراته، فعاد الدفق الاستثماري مجدداً لقطاع الطاقات المتجددة الذي بلغ ذروته عند نحو 2.8 مليار دولار خلال عام 2017، ثم عادت للتراجع مجدداً لتبلغ نحو 1.3 مليار دولار خلال عام 2022. وبالمقارنة مع التوجه العالمي لا يزال إجمالي الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقات المتجددة يعتبر متواضعاً، حيث لم تتجاوز حصته من إجمالي الاستثمارات العالمية 0.8% في أحسن أحواله خلال الفترة (2013-2022).

وقد اجتذبت الطاقة الشمسية وطاقت الرياح النصيب الأكبر من إجمالي الاستثمارات العامة في تقنيات الطاقة المتجددة للدول العربية خلال الفترة (2014-2022) بحصة تجاوزت نصف إجمالي الاستثمارات خلال كامل الفترة، وتجاوزت 90% خلال بعض السنوات كما هو موضح بالجدول والشكل التاليين:

الجدول 7-1: إجمالي الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقات المتجددة خلال الفترة (2000-2022)، مليار دولار أمريكي

2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
1.3	0.5	0.8	1.6	1.2	2.8	2.0	0.9	1.8	0.6	1.4	0.5	1.5	0.6	0.6	0.4	0.2	0.7	0.2	1.7	0.007	0.043	0.018

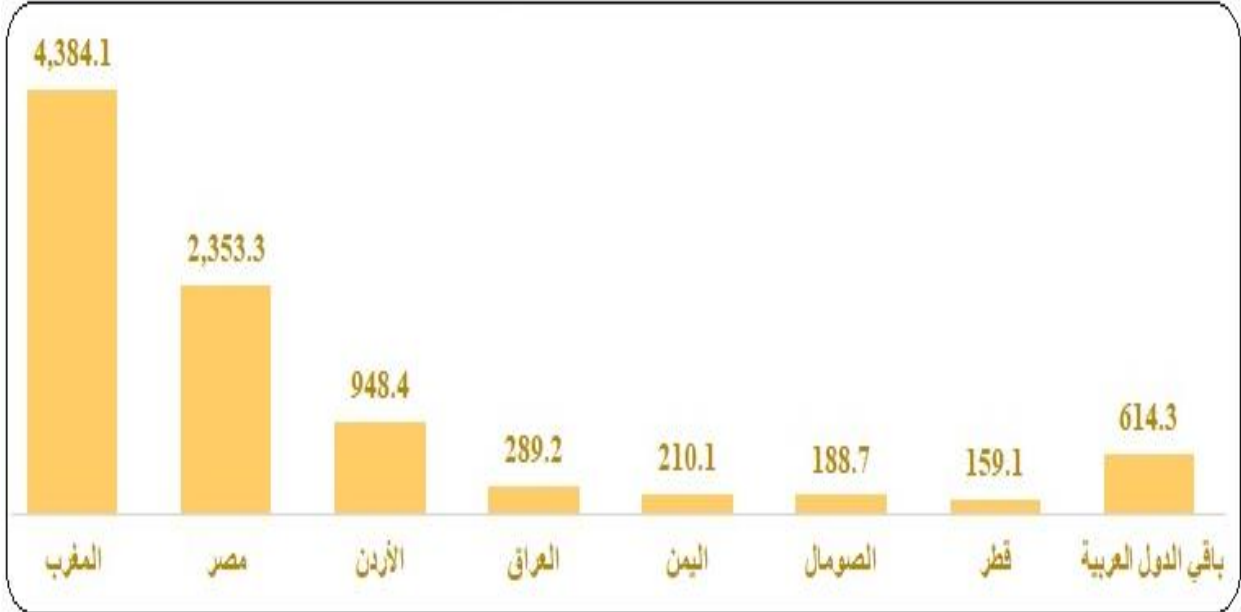
الشكل 1-16: الحصة من إجمالي الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقات المتجددة



المصدر: قاعدة بيانات المالية العامة للوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA) 2024 & قاعدة بيانات إحصاءات لجنة المساعدة الإنمائية (DAC) بمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) 2024.

وتركز نحو 84% من مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقة الشمسية خلال كامل الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022 والمقدرة بنحو 9.15 مليار دولار حسب إحصاءات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA) ومنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) لعام 2024، في ثلاث دول عربية هي المغرب ومصر والأردن، حيث بلغ مجموع الاستثمارات العامة المغربية في تقنيات الطاقة الشمسية خلال الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022 نحو 4.38 مليار دولار، أي ما يمثل نحو 48% من إجمالي استثمارات الدول العربية مجتمعة خلال هذه الفترة، بينما بلغ مجموع الاستثمارات العامة المصرية نحو 2.35 مليار دولار، والأردنية حوالي 948 مليون دولار أمريكي، أي ما بحصة بلغت نحو 25.7% و 10.4% من إجمالي استثمارات الدول العربية مجتمعة خلال هذه الفترة لكليهما على التوالي، ويوضح الشكل التالي مجموع الاستثمارات العامة المغربية في تقنيات الطاقة الشمسية خلال الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022:

الشكل 1-17: مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في الطاقة الشمسية خلال الفترة (2000-2022)
مليون دولار أمريكي

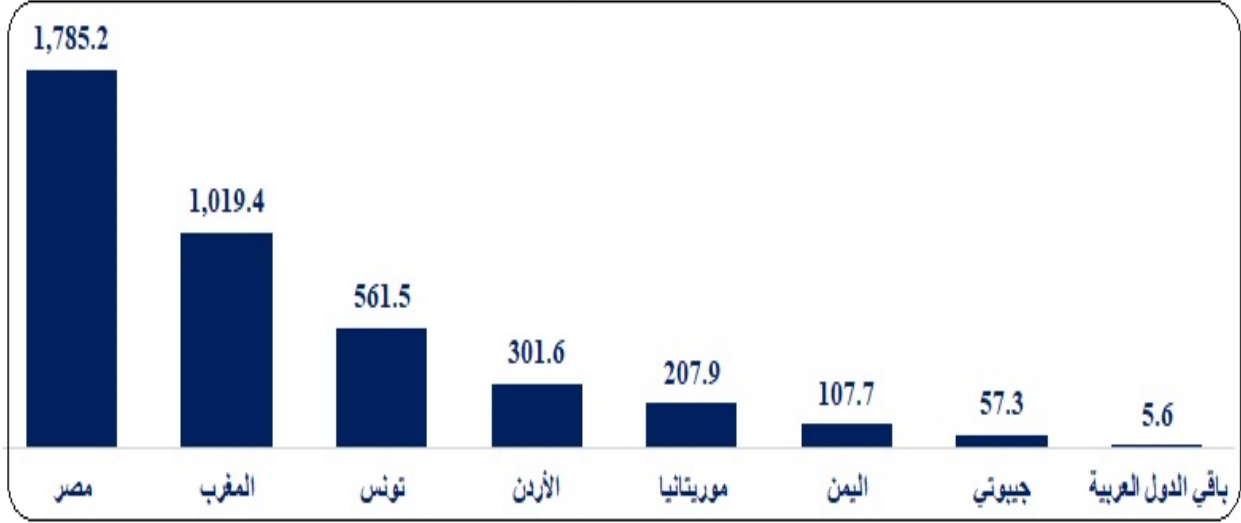


المصدر: قاعدة بيانات المالية العامة للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) 2024 & قاعدة بيانات إحصاءات لجنة المساعدة الإنمائية (DAC) بمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) 2024.

وتعتبر تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي التقنية المهيمنة على قدرات توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية في الدول العربية، وصاحبة حصة الأسد من الاستثمارات المخصصة لتقنيات الطاقة الشمسية خلال الفترة الماضية.

وبالمقابل، تركز نحو 83.2% من مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات طاقة الرياح خلال كامل الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022 والمقدرة بنحو 4.05 مليار دولار حسب إحصاءات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) ومنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) لعام 2024، في ثلاث دول عربية هي مصر والمغرب وتونس، حيث بلغ مجموع الاستثمارات العامة المصرية في تقنيات طاقة الرياح خلال الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022 نحو 1.8 مليار دولار، أي ما يمثل نحو 44.1% من إجمالي استثمارات الدول العربية مجتمعة خلال هذه الفترة، بينما بلغ مجموع الاستثمارات العامة المغربية أكثر من واحد مليار دولار، والتونسية حوالي 561 مليون دولار أمريكي، أي بحصة بلغت نحو 25.2% و 13.9% من إجمالي استثمارات الدول العربية مجتمعة خلال هذه الفترة لكليهما على التوالي، ويوضح الشكل التالي مجموع الاستثمارات العامة المغربية في تقنيات طاقة الرياح خلال الفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2022:

الشكل 1-18: مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في طاقات الرياح خلال الفترة (2000-2022)
مليون دولار أمريكي



المصدر: قاعدة بيانات المالية العامة للوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA) 2024 & قاعدة بيانات إحصاءات لجنة المساعدة الإنمائية (DAC) بمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) 2024.

الجدير بالإشارة أيضاً، أن تقنيات الرياح البرية هي التقنية المهيمنة على قدرات توليد الكهرباء من طاقات الرياح في الدول العربية، وصاحبة الحصة الكاملة من الاستثمارات المخصصة لتقنيات طاقات الرياح خلال الفترة الماضية.

الفصل الثاني

التقنيات الحديثة لإنتاج الطاقات المتجددة واتجاهات التكلفة

1. التقنيات الحديثة لإنتاج الطاقات المتجددة:

تشهد التقنيات الحديثة لإنتاج الطاقة المتجددة تطورات سريعة، مدفوعةً بالتقنيات الرقمية الجديدة التي تُحدث ثورة في كيفية توليد الطاقة المتجددة وتوزيعها واستخدامها، وتتطور في عالمنا اليوم اتجاهات تكنولوجية حاسمة لدفع النمو وتحسين كفاءة الطاقة، بدءًا بخلايا البيروفسكايت (Perovskite) الشمسية المرنة، وبطاريات التدفق والبطاريات ذات الحالة الصلبة لتخزين الطاقة (Flow Battery & Solid-state batteries)، وتوربينات الرياح العائمة (Floating Wind turbine)، وتقنيات الهيدروجين (Hydrogen technologies)، وقطارات الطاقة الشمسية (Solar Railway)، إلى شبكات الكهرباء الذكية (Smart Grids) واستخدامها لإنترنت الأشياء (IoT) وتكنولوجيا سلاسل الكتل (Blockchain)، حيث تعمل هذه الاتجاهات على تغيير كيفية تفاعلنا مع الطاقة وخلق فرص جديدة لمستقبل أكثر استدامة ومرونة.

I. خلايا البيروفسكايت المرنة (تقنيات 3.0 الواعدة لكفاءة الألواح الشمسية):

هناك نوعان رئيسيان حتى الآن على الأقل من الخلايا الشمسية التي تجعل استخدامنا للطاقة الشمسية ممكناً من خلال تجميع الفوتونات من الشمس، وتسبب تفاعلاً كهروكيميائياً ينتج الكهرباء، النوع الأول الأكثر استخداماً هو الخلايا الشمسية القائمة على السيليكون البلوري، ويشكل هذا النوع ما يقارب من 95% من الوحدات المباعة والمستخدمه اليوم، حيث يعتبر السيليكون معياراً لجدوي الاعتماد عليها لأنه ثاني أكثر المواد وفرة على الأرض بعد الأكسجين، وتتألف هذه الخلايا القائمة على السيليكون من ذرات السيليكون المتصلة لتكوين شبكة بلورية، وتساعد هذه البنية الوحدة على تحويل الضوء إلى كهرباء بكفاءة أكبر.

النوع الرئيسي الآخر من الخلايا الشمسية هو خلايا الأغشية الرقيقة المرنة من البيروفسكايت، وهي مادة لها نفس التركيب البلوري لمعدن أكسيد الكالسيوم والتيتانيوم، ويعتبر ظهورها أحد أكثر التطورات إثارة للاهتمام في تقنيات الطاقة المتجددة، حيث تُعدُّ خلايا البيروفسكايت المرنة الكهروضوئية من الجيل الثالث من الطاقة الشمسية المعروفة باسم الطاقة الشمسية 3.0 التي تقوم بمضاعفة كفاءة الخلايا الشمسية التقليدية القائمة على السيليكون، بفضل بنيتها البلورية الفريدة التي تمكنها من التقاط المزيد من الطاقة عبر امتصاص طيف أوسع من ضوء الشمس وتحويلها إلى كهرباء مما يعزز كفاءة الخلايا الشمسية، كما يعتبر استخدام خلايا البيروفسكايت خياراً أكثر استدامة بفضل انخفاض تكلفتها إنتاجياً.

الشكل 1-2: خلايا البيروفسكايت المرنة



Image: Solarabic

وتبرز اليابان في طليعة الابتكار في تقنيات خلايا البيروفسكايت المرنة، حيث يسير فريق من العلماء من جامعة توينن يوكوهاما (Toin University of Yokohama) بقيادة البروفسور مياساكا تسوتومو (Professor Tsutomu Miyasaka) في مقدمة جهود تطوير الخلايا الشمسية المصنوعة من البيروفسكايت، كبديل مرن وخفيف الوزن للخلايا السيلكونية القياسية المحصورة بين ألواح زجاجية ثقيلة، وتستفيد اليابان من كونها أحد كبار منتجي البيود المستخدم في خلايا البيروفسكايت، وتطمح الحكومة اليابانية بما يتوفر في البلاد من خبرة تقنية كبيرة إلى تبني سياسات صناعية للاستثمار في هذه التقنية الواعدة من خلال إعانات البحث والتطوير².

II. محطات الطاقة الشمسية الفضائية (الحلم الذي يتحول إلى حقيقة):

على الرغم من كونها الأسرع نمواً في مجال الطاقة المتجددة، تواجه الطاقة الشمسية تحديات فنية وعوائق تكنولوجية عديدة، في مقدمتها عدم الاستمرارية الذي يعرقل تحقيق انتقال مستدام إلى الطاقة الشمسية، حيث لا يمكن جمع الطاقة إلا عندما يتوفر ضوء الشمس بكمية كافية.

ولمعالجة هذه العقبة، أمضى العلماء عقوداً في البحث عن محطات الطاقة الشمسية الفضائية (Space-SBSP based solar power)، التي تقوم بجمع الطاقة الشمسية التي يمكنها الحصول عليها دون انقطاع من المدارات المتزامنة (geosynchronous) على بعد 22 ألف ميل في الفضاء وإرسالها إلى الأرض.

وسوف تعالج هذه التقنية قضية موثوقية الطاقة الشمسية، حيث يمكن لمحطة الطاقة الشمسية الفضائية أن تدور في تلك المدارات البعيدة بمواجهة الشمس 24 ساعة في اليوم، نظراً لعدم انعكاس ظل الأرض عليها، مما يعني فيضاً لا ينضب ومتواصلاً على مدار الساعة، من الطاقة الكهربائية المتجددة، وأيضاً ستلتقى الخلايا الشمسية

² <https://www.cc.toin.ac.jp/sc/miyasaka/en/index.html>

الموجودة فوق الغلاف الجوي المزيد من ضوء الشمس وتنتج المزيد من الطاقة بكفاءة أعلى من وجودها على سطح الأرض، حيث يمتص الغلاف الجوي للأرض بعضاً من ضوء الشمس ويعكسها.

الشكل 2-2: محطات الطاقة الشمسية الفضائية

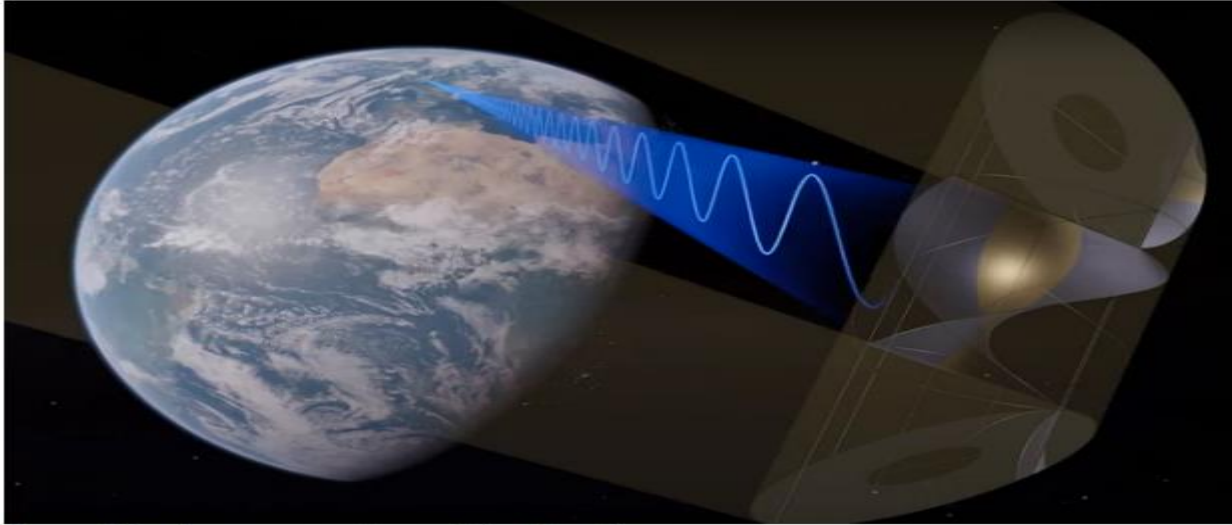


Image: <https://www.spacesolar.co.uk/our-team/>

وتواجه تقنيات محطات الطاقة الشمسية الفضائية SBSP تحديين رئيسيين، يمثل التحدي الأول الذي يجب التغلب عليه هو كيفية تجميع وإطلاق ونشر مثل هذه البنى العملاقة في الفضاء وتكلفتها المرتفعة، وقد أعلن تحالف بريطاني بين شركة ترانزشن لابس (Transition Labs) وشركة سبيس سولار (Space Solar)، وشركة طاقة أيسلندية تدشين أول مشروعات محطات الطاقة الشمسية الفضائية خارج الغلاف الجوي المحيط بمدينة ريكيافيك الأيسلندية بقدرة تبلغ حوالي 30 ميغاوات، وتكلفة تبلغ نحو 800 مليون دولار أمريكي³. التحدي الرئيسي الآخر، هو إعادة نقل الطاقة الشمسية، أي بثها إلى الأرض، وقد تمكن العلماء من التغلب عليه أيضاً، حيث أعلن باحثون من مشروع الطاقة الشمسية الفضائية (Space Solar Power Project - SSPP) في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (California Institute of Technology - Caltech)، عن نجاح أول عملية نقل لاسلكية للطاقة الشمسية عبر الفضاء، باستخدام تقنية مصفوفة الموجات الدقيقة (Microwave) التي تعمل على انتقال وتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية يمكن نقلها لأي مكان في العالم، حيث أطلق على هذه التكنولوجيا مصفوفة الموجات الدقيقة لتجربة المدار المنخفض لنقل الطاقة (Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment - MAPLE)، وتتميز هذه التقنية بعدم الحاجة إلى

³ أول مشروعات الطاقة الشمسية الفضائية ينطلق من أيسلندا ويُنتقل في صاروخ - الطاقة

الكوابل والأسلاك، مما يجعلها أكثر كفاءة وسرعة في التنفيذ، كما أنها تساعد على تحسين نسبة تحويل الطاقة وتقليل الخسائر الناجمة عن النقل⁴.

ولا يزال هناك الكثير من العمل الذي يتعين القيام به لكي تصبح محطات الطاقة الشمسية في الفضاء حقيقة ملموسة في العقود القادمة، غير أن هناك جهوداً حثيثة تبذل في هذا الاتجاه، حيث يعتقد العلماء في أنحاء كثيرة من العالم أن تقنيات بناء ونشر محطات الطاقة الشمسية في الفضاء لالتقاط الإشعاع الشمسي المباشر وإرسال الطاقة الناتجة عنه لاسلكياً إلى الأرض، ستكون أحد الحلول المستدامة للحصول على الطاقة الشمسية في المستقبل.

III. بطاريات التدفق والبطاريات ذات الحالة الصلبة (تقنيات متطورة لتخزين

(الطاقة):

يعتبر تخزين الطاقة عاملاً أساسياً في توفير المرونة والموثوقية لشبكات الطاقة الحديثة، وتحقيق التوازن بين العرض والطلب على الكهرباء، ودمج المصادر المتجددة، وتحسين جودة الطاقة وكفاءة استخدامها. وتعد مسألة تخزين الطاقة من أهم القيود التي لازالت تكبح جماح الانطلاقة القوية للمصادر المتجددة، حيث تشكل السعات التخزينية المحدودة لبطاريات الليثيوم أيون السائدة في السوق اليوم، وارتفاع تكلفتها عائقاً رئيسياً أمام تحقيق الانتشار العالمي واختراق أغلب شرائح المستهلكين التي ما زالت غير قادرة على شراء المركبات الكهربائية بسبب ارتفاع أسعارها مقارنة بالسيارات التقليدية، ولذلك فإن هناك حاجة إلى جيل جديد من أجهزة تخزين الطاقة القادرة على التغلب على هذه التحديات وتلبية الطلب المتزايد على السعات التخزينية القادرة على دمج مصادر الطاقة المتجددة المتقطعة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في الشبكة الكهربائية بشكل أكثر فعالية، مما يؤهلها إلى لعب دور أساسي في الانتقال إلى نظام طاقة أكثر استدامة واستقلالية. أحد المرشحين الواعدين لهذا الدور هو بطاريات التدفق والبطاريات ذات الحالة الصلبة.

بالنسبة لبطارية التدفق فهي بطارية قابلة لإعادة الشحن يتدفق فيها الإلكتروليت⁵ عبر خلية كهروكيميائية واحدة أو أكثر من خزان واحد أو أكثر. في بطارية التدفق البسيط، من السهل زيادة سعة تخزين الطاقة عن طريق زيادة كمية الإلكتروليت المخزنة في الخزانات، ويمكن توصيل الخلايا الكهروكيميائية كهربائياً على التوالي أو

⁴ <https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space>

⁵ الإلكتروليت: هو أي مادة تحتوي على أيونات حرة تشكل وسطاً ناقلاً للكهرباء.

على التوازي، وبالتالي تحديد قوة نظام بطارية التدفق، ويعد هذا الفصل بين تصنيف الطاقة وتصنيف القوة ميزة مهمة لأنظمة بطاريات التدفق.

الشكل 2-3: نظام بطاريات التدفق

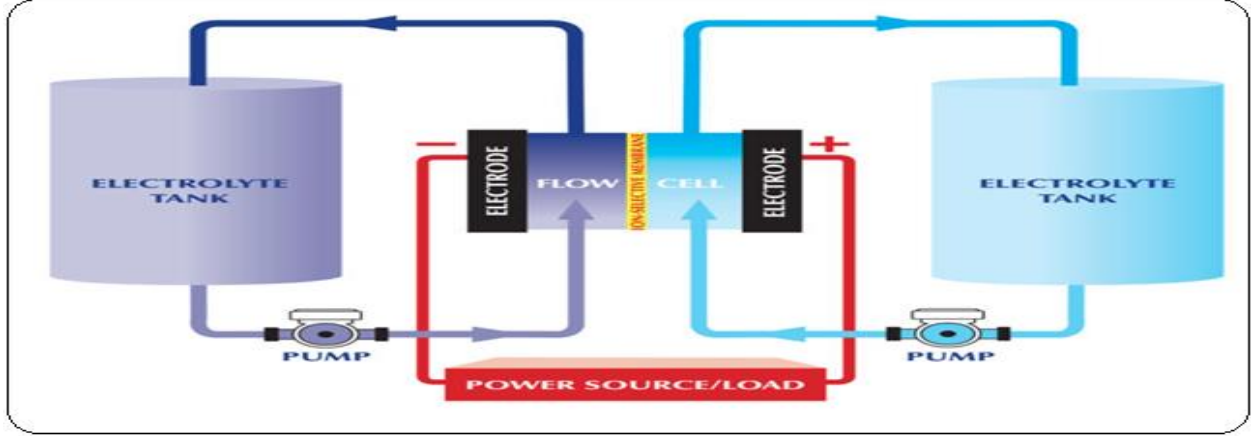


Image: The International Flow Battery Forum (IFBF)

على نطاق الشبكة، يمكن لبطاريات التدفق أن توفر تنظيم التردد، ودعم الجهد، واحتياطي الدوران، وتخفيف الازدحام، كما يمكن لها أن تتيح تكامل مصادر الطاقة المتجددة المتقطعة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية، من خلال تخفيف تقلباتها وتخزين طاقتها الزائدة، كما يمكنها أن تقلل من ذروة الطلب وتخفف تكاليف الكهرباء سواء للمرافق أو المستهلكين.

وعلى مستوى الشبكات الصغيرة، يمكن لبطاريات التدفق أن تعزز أداء واستقرار هذه الشبكات من خلال توفير الطاقة الاحتياطية، وتحويل الأحمال، وتكامل الطاقة المتجددة، كما يمكن لها أن تزود السيارات الكهربائية ووسائل النقل الأخرى بالطاقة، مثل الحافلات والقطارات والسفن والطائرات، كما توفر بطاريات التدفق مدى قيادة طويل، وتزويدًا سريعًا بالوقود، وأمانًا عاليًا للسيارات الكهربائية، وأن تقلل من وزن وحجم مجموعة البطارية، وتطيل عمر السيارة، كما يمكن لبطاريات التدفق أيضًا تمكين مفهوم السيارة إلى الشبكة (V2G)، حيث يمكن للسيارات الكهربائية توفير الطاقة للشبكة أو الأحمال الأخرى عندما تكون متوقفة أو خاملة، كما توجد تطبيقات أخرى محتملة لهذه التكنولوجيا الواعدة تتمثل في إمكانية دمج بطاريات التدفق مع تقنيات تخزين الطاقة الأخرى، مثل المكثفات الفائقة أو التخزين الحراري لتكوين أنظمة تخزين طاقة هجينة يمكنها تحسين أداء وتكلفة تخزين الطاقة. وبالمقارنة مع بطاريات الليثيوم أيون، لا تعد بطاريات التدفق وبطاريات الليثيوم أيون متنافية، بل متكاملة، حيث تتمتع كلاهما بإيجابيات وسلبيات مختلفة، ويعتمد الاختيار الأفضل على الغرض المحدد للتطبيق، حيث تعتبر بطاريات التدفق أكثر ملاءمة للتطبيقات التي تتطلب سعة طاقة عالية، ومدة أطول، وعمراً طويلاً، وتكلفة أقل، وأماناً أعلى، مثل تخزين الطاقة على نطاق الشبكة، أو الشبكات الصغيرة، أو الطاقة الاحتياطية، بينما تعتبر بطاريات الليثيوم أيون أكثر ملاءمة للتطبيقات التي تتطلب كثافة

طاقة وكفاءة عالية، ووزناً وحجماً أقل، كما هو الحال في السيارات الكهربائية أو الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية، لذا يمكن القول أن السيناريو الأرجح ربما يكون في التوجه نحو دمج هذه التقنيات في أنظمة تخزين طاقة هجينة يمكنها تحسين أداء وتكلفة نظم تخزين الطاقة.

من جانب آخر، لا تزال تقنيات البطاريات الصلبة في مرحلة التجارب، ويؤمل منها أن توفر بطاريات أكثر أماناً وأرخص وأقوى للسيارات الكهربائية، فضلاً عن أوقات شحن أسرع، حيث تحزم هذه التكنولوجيا من الجيل التالي المزيد من الطاقة في كل وحدة من الحجم مقارنة ببطاريات الليثيوم أيون. وكما يوحي الاسم، تحتوي البطاريات الصلبة على إلكتروليت صلب، مصنوع من مواد مثل السيراميك، وهذا يجعلها مختلفة عن بطاريات الليثيوم أيون التقليدية، التي تحتوي على إلكتروليت سائل. وبخلاف بطاريات الليثيوم أيون، لا يتطلب إنتاج البطاريات الصلبة معادن أرضية نادرة مثل النيكل أو الكوبالت، حيث نجح مصنعها في إدخال إلكتروليتات مصنعة من البوليمر، وكاثودات مصنعة من فلوريد الحديد قادرة على توفير أكثر من ضعف الطاقة لكل كيلوغرام من بطاريات الليثيوم أيون وبتكلفة أقل، ولذلك تتميز البطاريات الصلبة بوزن وحجم أقل من بطاريات الليثيوم أيون السائلة، كما تتميز أيضاً بسرعة الشحن، ومعدل احتفاظ أعلى بالشحن، مما يقلل من معدلات إعادة شحنها ويوفر مرونة أعلى للمسافرين عبر مسافات أطول. من جهة أخرى، تعتبر عملية معالجة وتصنيع بطاريات الحالة الصلبة أكثر تعقيداً وتكلفة من عملية تصنيع بطاريات الليثيوم أيون، مما يعيق التحول إلى نمط الإنتاج التجاري، ويبطئ من سرعة دمجها في الاستعمالات اليومية، كما سجلت بعض التجارب أداءً ضعيفاً لهذه البطاريات في أثناء العمل في درجات حرارة منخفضة، ما يعني أن تثبيتها لتكون مفيدة في درجات حرارة الغرفة ليس أمراً مسلماً به دائماً.

IV. **توربينات الرياح العائمة (ثورة في تقنيات طاقات الرياح البحرية):**

طاقة الرياح البحرية تشكل نسبة بسيطة من سوق طاقة الرياح عالمياً، حيث أن القدرة الإنتاجية لطاقة الرياح البحرية المركبة عالمياً بلغت نحو 73 جيجاوات وهو ما يشكل نحو 7.2% من إجمالي القدرات الإنتاجية لطاقات الرياح المركبة عالمياً خلال عام 2023، والذي يشكل في معظمها طاقات الرياح على اليابسة لكن الرياح البحرية لها آفاق نمو واعدة جداً على مدار العقود المقبلة، فالتطورات التقنية الأخيرة أدت إلى توربينات أكبر حجماً ونسب تشغيل أعلى، هذا إلى جانب ابتكار توربينات بحرية عائمة. كل هذه القدرات ترفع القدرات الإنتاجية للتوربين الهوائي وتخفض معه الكلفة المعيارية لإنتاج الطاقة على مدى حياة المشروع، حيث أن انخفاض الكلفة هو العامل الرئيسي القادر على فتح الباب أمام طاقة الرياح البحرية لتحقيق نمواً سريعاً وواسعاً

مستقبلاً، فمن المتوقع أن تتوسع هذه الصناعة من أسواقها التقليدية في شمال أوروبا والصين، لتشمل مستقبلاً الولايات المتحدة، وآسيا، ومناطق أخرى في أوروبا على رأسها بريطانيا.

مشاريع إنتاج الكهرباء من الرياح البحرية موجودة منذ زمن، ولكن الجديد على هذا الصعيد هو تقنية طاقات الرياح البحرية العائمة، فبدلاً من تثبيت التوربين من خلال أنابيب من الصلب تغرس في قاع البحر، يتم وضع التربين في عوامة اسطوانية تربط بحبال إلى قاع البحر. تقنية التوربينات البحرية العائمة تسمح ببناء مزارع رياح بحرية في عرض البحار العميقة، حيث تشتد سرعة وقوة الرياح، ما يعني إنتاج كميات طاقة أكبر مقارنة بطاقة الرياح البحرية الثابتة، مما يفسح المجال أمام استغلال مناطق بحرية شاسعة قبالة السواحل لتوليد الطاقة الكهربائية النظيفة.

أكبر مشروع قائم اليوم يعمل باستخدام التوربينات العائمة، وهو مشروع Hywind في اسكتلندا، والذي تشغله شركة Equinor النرويجية، والسبب في ذلك أن تكلفة إنتاج الكهرباء من التوربينات العائمة تصل إلى ضعفي تكلفة التوربينات البحرية الثابتة، حيث يحتاج أي مشروع لطاقة الرياح البحرية العائمة إلى سعر بيع الكهرباء على الأقل عند 84 دولار للميغاواط/ساعة بحسب تقديرات مجلس الرياح العالمي⁶ GWEC، فاليوم يتم العمل على تطوير نماذج متعددة من المنصات العائمة، وهو ما يصعب على الصناعة تحقيق أي وفورات من توحيد المعايير وزيادة حجم الإنتاج، كما أن مزارع التوربينات العائمة ستحتاج إلى كوابل كهربائية أطول لربطها مع اليابسة، وهو ما يرفع أيضاً من كلفة هذا النوع من المشاريع، لكن عدداً ليس بسيطاً من الحكومات بدأت تلقت أكثر فأكثر نحو تقنية التوربينات العائمة مؤخراً، حيث بدأت تدرك أنها ستحتاج إلى هذه التقنية إذا ما أرادت تحقيق مستهدفاتها على صعيد خفض الانبعاثات، خاصة إذا لم يتوفر لديها حجم الأراضي المطلوب على اليابسة لإنشاء ما يكفي من مشاريع الطاقة الشمسية والرياح البرية. وقد تنبتهت بعض شركات النفط والغاز الدولية التي تسعى إلى التوسع في الطاقات المتجددة مثل شركات شل وBP وتوتال إلى الفرصة التي توفرها سوق التوربينات العائمة فبدأت تتحضر للدخول إليها حيث تشكل تلك السوق الواعدة امتداداً طبيعياً لخبرات تلك الشركات الطويلة في إنشاء المنصات والمرافق العائمة عند استخراج النفط والغاز من باطن الأرض في قاع المحيطات والبحار العميقة. الأفق أمام طاقة الرياح البحرية واعد، فهي مازالت أرضاً خصبة تتسارع الدول إلى زراعتها بتقنيات جديدة تسهم نتائجها في زيادة حصة الطاقات المتجددة، حيث شهدت إجمالي الاستثمارات العالمية في محطات الرياح البحرية مستويات قياسية عام 2024م بلغت نحو 60 مليار دولار، ويتوقع أن ترفع إلى نحو 100 مليار دولار في عام 2030م⁷.

⁶ GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2024

⁷ [Rystad Energy - Navigating the future of energy](#)

V. تكامل الطاقة المتجددة الذكي (حلول مبتكرة لشبكات الطاقة الذكية):

تلعب تقنيات الشبكات المتطورة التي تعتمد على الأدوات الرقمية للتواصل، دوراً أساسياً ومهماً في تكامل منظومات الطاقة المتجددة والتعامل مع التنوع والتوزيع الجغرافي لمصادر الطاقة المتجددة، ويؤدي إدارة الشبكة بكفاءة أعلى إلى تحقيق التوازن بين الطلب والإمدادات، مما يساهم في تعزيز كفاءة استخدام الطاقة وزيادة ثبات الشبكة، كما تقدم الابتكارات الحديثة مثل أنظمة التحكم في الطاقة الموزعة، ومنصات تبادل الطاقة المبنية على سلاسل الكتل (Blockchain)، وبرامج التجاوب مع الطلب طرقاً مبتكرة لجعل شبكات الطاقة أكثر مرونة وتكيفاً.

ويتطلب النمو المستمر والموسع لحصة مصادر الطاقة المتجددة في الشبكات المركزية واللامركزية اتباع نهج جديد فعال لإدارة الشبكات، يوظف الاستفادة الكاملة من الشبكات الذكية وتقنياتها. فمن جانب، دخلت إنترنت الأشياء (IoT) إلى مجال الطاقة المتجددة من خلال الرقمنة، حيث تستفيد هذه التكنولوجيا من أجهزة الاستشعار والأجهزة المتصلة لمراقبة توليد الطاقة واستهلاكها والتحكم فيها عن بُعد، وهذا يجلب العديد من الفوائد، مثل تحسين الكفاءة وتسهيل الإدارة الذكية للشبكات. وبفضل إنترنت الأشياء، يمكن الحصول على بيانات الوقت الفعلي (Real time data) لإنتاج الطاقة المتجددة واستهلاكها، كما يمكن لأجهزة الاستشعار المثبتة على الألواح الشمسية وتوربينات الرياح إرسال معلومات فورية حول الأداء والظروف البيئية، بينما تقوم الأجهزة الذكية المتصلة بالشبكة بتسجيل البيانات اللحظية حول استخدام الطاقة والطلب عليها، وتسمح معلومات الوقت الحقيقي هذه للمشغلين ومقدمي الخدمات بتوقع المشاكل ومعالجتها بسرعة وكفاءة أكبر. من جهة أخرى، توفر تقنية سلاسل الكتل فرصاً جديدة لتسويق وتوزيع الطاقة المتجددة من خلال توفير عقود ذكية ومعاملات لامركزية، هذه التكنولوجيا لديها القدرة على تحويل أسواق الطاقة من خلال إتاحة المزيد من الكفاءة والشفافية مع تمكين المستهلكين من توليد الطاقة المتجددة واستهلاكها.

إن الطبيعة اللامركزية لتكنولوجيا سلسلة الكتل للطاقة المتجددة تلغي الحاجة إلى الوسطاء في معاملات الطاقة، مما يقلل التكاليف ويزيد من الكفاءة، حيث تسمح العقود الذكية القائمة على سلسلة الكتل بأن تكون معاملات الطاقة مؤتمتة وموثوقة وشفافة، وهذا يعني أنه يمكن للمستهلكين إجراء معاملات مباشرة مع مولدات الطاقة المتجددة دون وسطاء ودون تكبد تكاليف إضافية، وباستخدام العقود الذكية القائمة على سلسلة الكتل، يمكن ضمان دقة أكبر في قياس وتتبع توليد الطاقة المتجددة واستهلاكها.

VI. تقنيات خلايا الوقود الهيدروجينية (خطوات وأعادة لوقود المستقبل):

لقد برزت خلايا الوقود كتقنية مبتكرة تُحدث ثورة في طريقة توليد الكهرباء، مما يوفر بديلاً نظيفاً وعالي الكفاءة للأنظمة التقليدية القائمة على الاحتراق، ويمكن وصف خلايا الوقود الهيدروجينية بأنها محولات للطاقة، حيث تقوم بتحويل طاقة التفاعل الكيميائي للهيدروجين والأكسجين إلى طاقة كهربائية وحرارية، وتحدث عملية أكسدة الهيدروجين واختزال الأكسجين من خلال فصل الجزيئات باستخدام التحليل الكهربائي، فهي بالتالي نوع خاص من البطاريات التي تولد الكهرباء من خلال تفاعل كيميائي، على عكس البطاريات التقليدية التي تخزن الطاقة، حيث تقوم خلايا الوقود بتحويل الطاقة المخزنة في الوقود مباشرة إلى طاقة كهربائية، وهذا يجعلها خياراً جذاباً لمختلف تطبيقات التنقل والتطبيقات الثابتة. وعلى الرغم من كون الهيدروجين العنصر الأكثر وفرة في الأرض، إلا أنه يعتبر من أكثر العناصر ارتباطاً بالعناصر الأخرى، ومن النادر وجوده في الطبيعة بشكل حر، ولذلك يتم إنتاج الهيدروجين الرمادي من الغاز الطبيعي، ولكن بدون التقاط الكربون وتخزينه، وعند إضافة تقنيات اصطياد الكربون وتخزينه، يطلق عليه الهيدروجين الأزرق، أو الهيدروجين منزوع الكربون، لكن تكلفته ستكون أعلى بطبيعة الحال. أما إنتاج الهيدروجين الأخضر فيتم بواسطة التحليل الكهربائي للماء، حيث يتم وضع قطبين كهربائيين في غالب الأحيان من فلزات خاملة كيميائياً لا تتفاعل مع نتائج التحليل (الهيدروجين أو الأكسجين) مثل البلاتين والإيريديوم، ويتم وصل القطبين إلى مصدر كهربائي بجهد عالي للتغلب على الروابط بين الهيدروجين والأكسجين حيث يتشكل غاز الهيدروجين على المهبط وغاز الأوكسجين على المصعد. ولا يؤثر إنتاج الهيدروجين الأخضر بهذه الطريقة على البيئة، لخلوها من الغازات الضارة، كما أنها لا تتطلب إلا طاقة كهربائية، وبالتالي فإن تأثير هذه الطريقة على البيئة يتحدد بمصدر الطاقة الكهربائية.

الشكل 2-4: أنواع الهيدروجين



ويُنظرُ إلى الهيدروجين الأخضر كأحد الحلول الممكنة لحل مشكلة تخزين الطاقة المتجددة والتحكم بمواعيد تغذية الشبكة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وهنا تكمن أهمية هذه التقنية بالنسبة للطاقة المتجددة، فمن المعلوم أن إنتاج مصادر الطاقات المتجددة يتغير بتغير المناخ خلال العام، لذا فإن استخدام الطاقة الكهربائية الفائضة عن الشبكة من محطات الطاقة الشمسية ومحطات طاقة الرياح في أوقات الإنتاج المرتفع، في توليد الهيدروجين الذي يتم تخزينه لأجل استخدامه لاحقاً في توليد الطاقة الكهربائية عند انخفاض الإنتاج بسبب سوء العوامل المناخية في فصل آخر، يجعل من أي تقدم محرز في هذه التقنية خطوة مهمة نحو تحقيق قيمة مضافة لرفع كفاءة إنتاج الطاقات المتجددة.

VII. القطارات العاملة بالطاقة الشمسية (ثورة في عالم النقل):

تمثل سكة الحديد واحدة من أكثر وسائل النقل استدامة في عالم اليوم، وتحظى صناعتها بأفكار متجددة تتراوح بين القطارات الهيدروجينية وكهربة الشبكة، والقطارات العاملة بالطاقة الشمسية. القطارات الشمسية هي قطارات كهربائية تستخدم الطاقة الشمسية كمصدر للطاقة، حيث تحصل على الطاقة من الخلايا الكهروضوئية، والمعروفة أيضاً باسم الألواح الشمسية، المثبتة على سطح القطار أو الموضوعة على جانب قضبان السكك الحديدية، حيث تقوم هذه الخلايا بالتقاط أشعة الشمس وتحويلها إلى طاقة كهربائية تعمل على تشغيل حركة القطار. وعادةً ما يستخدم القطار الشمسي ألواحاً شمسية على سطحه أو عن طريق وضع الألواح الكهروضوئية بالقرب من خطوط السكك الحديدية بجانب القضبان، حيث يمكن أن تولد ما يكفي من الكهرباء لتشغيل تيار الجر الذي يتم توزيعه على الشبكة، ويوجد عدد قليل جداً من مشاريع القطارات الشمسية في جميع أنحاء العالم لأنه من الصعب تقنياً تشغيل مثل هذه المركبة الكبيرة بالطاقة الشمسية.

الشكل 2-5: قطارات الطاقة الشمسية



Image : Sun-Ways



Image: Byron Bay Railroad Company

ومن المقرر أن تُفرش ألواح الطاقة الشمسية مثل السجاد على خطوط السكك الحديدية في سويسرا في سابقة هي الأولى من نوعها في العالم، حيث حصلت شركة Sun-Ways السويسرية الناشئة على الضوء الأخضر من المكتب الفدرالي للنقل للبدء في مشروع تجريبي مدته ثلاث سنوات في كانتون نوشاتيل الغربي، ومن المفترض أن يبدأ العمل في ربيع عام 2025. ستستخدم الشركة السويسرية نظاماً ميكانيكياً لتركيب ألواحها الشمسية القابلة للإزالة، وسيسير القطار الذي طورته شركة Scheuchzer السويسرية لصيانة المسارات على طول القضبان، ويضع الألواح الضوئية أثناء سيره فيما يشبه سجادة مفرودة، ويستخدم القطار المصمم خصيصاً آلية مكبس لفرد الألواح التي يبلغ عرضها متراً واحداً، والتي تم تجميعها مسبقاً في مصنع سويسري.

الشكل 2-6: قطار مصمم لوضع الألواح الضوئية أثناء سيره فيما يشبه سجادة مفرودة



A specially designed train will unfurl the panels as it travels along the track. - Sun-Ways

ويُعد ابتكار هذه اللوحات الشمسية قابلة للإزالة، ابتكاراً بالغ الأهمية نظراً لأن مسارات السكك الحديدية تحتاج إلى إزالتها من وقت لآخر لإجراء أعمال الصيانة الأساسية.

VIII. توربينات أقراص العسل (تقنية ثورية في طاقات الرياح)

في خطوة وُصفت بالواعدة، استحدثت شركة كاتريك تكنولوجي (Katrik Technologies) الإسكتلندية تصميمًا ابتكارياً لتوربينات رياح، يمثل انحرافاً جذرياً عن الأنماط التقليدية لتوربينات الرياح التي تعتبر عصب النشاط لطاقات الرياح في عالم اليوم.

تأخذ توربينات الرياح الجديدة شكل شبكة مدمجة سداسية الشكل تشبه قرص العسل، توضع فوق المباني الحضرية، أو حتى تُدمج في الهياكل القائمة، وتستغل طاقة الرياح أحسن الاستغلال عبر أجنحة هوائية، ما يجعلها مختلفة بالكلية عن الشفرات الدوارة في التوربينات العادية.

الشكل 2-7: توربينات الرياح الجديدة شكل شبكة مدمجة سداسية الشكل تشبه قرص العسل



<https://www.katricktechnologies.com/wind-technologies>

وعلى عكس التوربينات ذات الارتفاعات الشاهقة التي تعمل بشفرات دوارة، يُعتبر كشف كاثريك تكنولوجي عن هذه التقنية الحديثة خرقاً للنمطية التي تبدو عليها تلك التوربينات منذ عقود، من حيث التصميم والأداء الوظيفي وتمثّل الأجنحة الهوائية العنصر الحيوي الرئيسي في توربينات الرياح الجديدة، التي تعمل على التقاط طاقة الرياح بأقصى قدر من الفاعلية، وتحويلها إلى ذبذبات ميكانيكية، ثم تُحول تلك الذبذبات إلى كهرباء نظيفة، لتقدّم بذلك حلاً واعدًا في مسار تطوير طاقات الرياح.

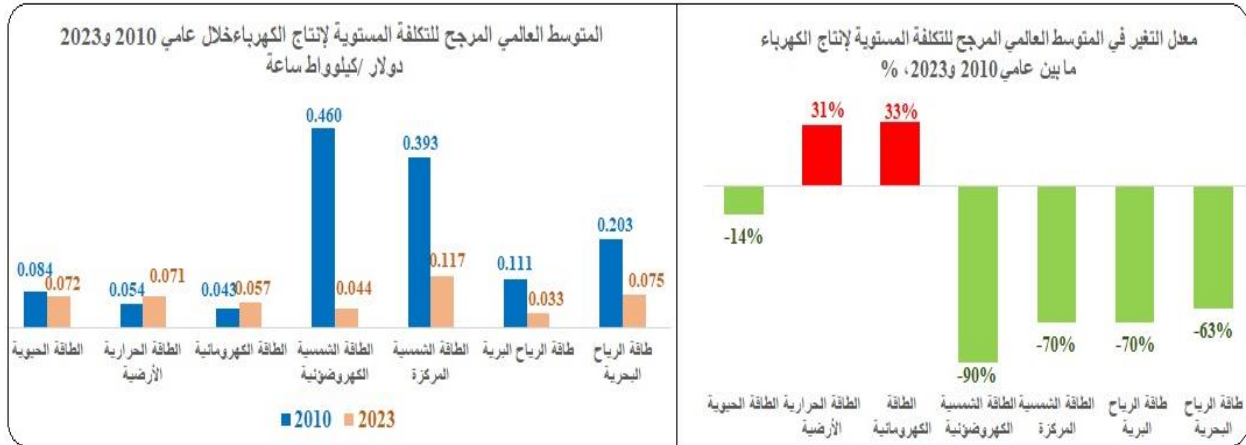
2. اتجاهات التكلفة في تقنيات الطاقة المتجددة

تعيد أنماط اتجاهات التكلفة المستمدة من بيانات تكاليف الطاقات المتجددة الصادرة عن قواعد بيانات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة، التأكيد على الدور المحوري الذي يؤديه الزخم الواسع من طيف الاستثمارات السخية التي استأثرت بها تكنولوجيات الطاقات الشمسية والرياح على النطاق العالمي، والتي كانت القوة الدافعة للنمو القوي لتقنيات توليد الكهرباء باستخدام هذه المصادر وتطبيقاتها، وتقدماتها المتسارعة بما يشمل الانخفاضات الكبيرة في تكاليف توليد الكهرباء باستخدام هذه التقنيات، وقد برهن انخفاض التكاليف وتحسن الأداء في تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح خلال العقد الماضي على أن الجدوى الاقتصادية لهذه التقنيات أصبحت مقنعة على نطاق واسع الآن، حيث تشير بيانات تقرير تكاليف توليد الطاقة المتجددة الصادر عن الوكالة الدولية للطاقات المتجددة خلال عام 2024، أن المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء (LCOE-levelized cost of electricity)⁸ من تقنيات الطاقة المتجددة شهدت تراجعاً خلال الفترة

⁸ التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE) هي مقياس لصافي القيمة الحالية لتكلفة توليد الكهرباء على مدى العمر الافتراضي لنظام التوليد، حيث تشمل هذه التكلفة التكاليف الكاملة لدورة الحياة (الثابتة والمتغيرة) لتكنولوجيا توليد الطاقة لكل وحدة من الكهرباء (كيلوواط ساعة)، وتستخدم LCOE لتخطيط الاستثمار ومقارنة تكاليف تقنيات توليد الكهرباء على أساس ثابت.

(2010 – 2023) في أغلب تقنياتها باستثناء الطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الكهرومائية التي شهدت ارتفاعات بنسبة 31% و33% على التوالي ما بين عامي 2010 و2023، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 2-8: المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة المتجددة



المصدر: Renewable power generation costs in 2023, IRENA 2024.

وكنتيجة حتمية للزخم الكبير من طيف الاستثمارات السخية التي استأثرت بها تكنولوجيات الطاقات الشمسية والرياح التي استأثرت بنحو 90% من إجمالي الاستثمارات العالمية المخصصة لتقنيات الطاقة المتجددة خلال العقد الأخير، شهدت المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الشمسية وطاقات الرياح تراجعاً حاداً خلال الفترة (2010-2023)، فانخفض المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية بنسبة 90% متراجفاً من حوالي 0.46 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.044 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023، بينما انخفض المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الشمسية المركزة بنسبة 70% متراجفاً من حوالي 0.393 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.117 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023، كما انخفض المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الرياح البرية بنسبة 70% متراجفاً من حوالي 0.111 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.033 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023، في حين انخفض المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الرياح البحرية بنسبة 63% متراجفاً من حوالي 0.203 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.075 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023.

وبالمقارنة مع الوقود الأحفوري، برهن انخفاض التكاليف وتحسن الأداء في تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح خلال العقد الماضي على أن الجدوى الاقتصادية لهذه التقنيات أصبحت مقنعة على نطاق واسع الآن،

فبدلاً عن كونها أعلى من المتوسط المرجح لتكلفة الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2010، انخفضت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقت الرياح البرية والبحرية إلى أقل من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، حيث تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى نسبة 44% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 511% خلال عام 2010، بينما تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البرية إلى نسبة 33% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 123% خلال عام 2010، في حين تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البحرية إلى نسبة 75% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 226% خلال عام 2010، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 2-9: المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة المتجددة مقارنة بالمتوسط المرجح للتكلفة المستوية للوقود الأحفوري خلال عامي 2010 و2023 دولار/كيلوواط ساعة



المصدر: Renewable power generation costs in 2023, IRENA 2024.

الفصل الثالث

الآفاق المستقبلية للطاقات المتجددة

البحث
الثاني

1. ملامح التحول العالمي في قطاع الطاقة ومؤشراته الرئيسية:

بالرغم من توشح مستقبل الطاقة بالكثير من الضبابية وانعدام اليقين، إلا أن العديد من الدلائل والتوجهات السارية باتت ترسم ملامح التحول الدراماتيكي في نظام الطاقة وتشي بوجهته، فمن انخفاض تكاليف تقنيات الطاقة المتجددة لحدود المنافسة الحقيقية مع الوقود الأحفوري، إلى بداية تأثير التقدّمات المُحرزة في إطالة الاستخدامات النهائية للطاقة، التي أفسحت المجال لإعادة تصور الإمكانيات المتاحة في ظل وفرة خيارات المصادر المتجددة، إلى الاهتمام المتنامي بتحول الطاقة القائم على المصادر المتجددة وتقنيات كفاءة الطاقة وترشيد استهلاكها باعتباره أداة فاعلة لكبح جماح التغير المناخي، هذا الاهتمام الذي دفع بالمنهجيات القائمة على تحولات جذرية متسارعة في نظام الطاقة قائمة على المصادر المتجددة إلى تصدر أجندات السياسات الدولية في مجال الطاقة، وهي منهجيات كانت تعدّ تقدّمية بشكل مبالغ فيه، أو خيالية أو حتى غير منطقية، فأضحت اليوم تمثل بوصلة التكنولوجيا والسياسات والأسواق التي تعيد بلورة قطاع الطاقة على مدى أكثر من عقد، مع تزايد أعداد الدول التي تعلن التزامها بالإستراتيجيات الداعمة لهذا التوجه، والتي وجد بعضها ضالته المنشودة في هذه الموجة التي تخدم بشكل مباشر أجندات أمن الطاقة المناهضة للبترول، فتدافع الزخم السياسي بشكل غير المسبوق لإحداث تغييرات جذرية في منظومة الطاقة العالمية، حتى أصبح من المؤكد الآن، أن التحول الشامل إلى قطاع للطاقة يعتمد على المصادر المتجددة بات أمراً قيد التنفيذ، والسؤال المطروح في هذه المرحلة هو: ما مدى سرعة تحقيق ذلك؟

وبينما تعتبر وثيرة النمو المتسارع في حصة الطاقات المتجددة دليلاً واضحاً على أن التحول سيكون سريعاً للغاية، وأن على جميع أصحاب المصلحة في نظام الطاقة العالمي أن يكونوا على أتم استعداد، يبقى الجواب الراسخ على هذا السؤال مرتبطاً بأربع مؤشرات رئيسية يتعلّق أولها باللمحة التي تهيمن فيها مصادر الطاقة المتجددة على كامل النمو في إمدادات الطاقة، وهو وقت لا يبدو بعيداً بالنظر إلى الاتجاه التاريخي للنمو، فقد حققت مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) أسرع معدلات النمو في استهلاك مصادر الطاقة الأولية خلال الفترة (2013 – 2023)، بمعدل نمو الخانة الزوجية عند نحو 12.3%، لتستحوذ هذه المصادر على حصة بلغت نحو 42.4% من إجمالي النمو في الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الأولية خلال الفترة (2013 – 2023). إن التسارع الكبير في معدلات نمو إجمالي الاستهلاك العالمي من الطاقات المتجددة مقارنة بالمصادر الأخرى يؤشر بقوة على الدور المتزايد لهذه المصادر في مزيج الطاقة العالمي، خاصة إذا علمنا أن معدل النمو في إجمالي الاستهلاك العالمي من الغاز الطبيعي الذي سجل أسرع معدلات النمو بين المصادر الأخرى لم يتجاوز معدل 1.7% خلال الفترة (2013 – 2023)، إن هذا التفاوت الكبير في سرعات النمو بين

الطاقات المتجددة ومصادر الطاقة الأخرى يؤشر بقوة على المسار الذي اتخذته منظومة الطاقة في حقبتها الحالية، فإذا افترضنا جدلاً استمرار النمو في مصادر الطاقة الأولية بنفس معدلات النمو المسجلة خلال الفترة (2013 – 2023) من واقع بيانات التقرير الإحصائي الصادر عن شركة برتش بتروليوم في نسخته (يونيو 2022 & 2024)، فإن مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) ستصبح المصدر الأول للطاقة خلال عام 2036 بحصة تبلغ نحو 26.4% في مزيج الطاقة الأولية المستهلكة عالمياً، حيث تساهم خلال عام 2036 بحصة تبلغ نحو 81% من إجمالي النمو في الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الأولية، وبمواصلة هذا الاتجاه سيتجاوز إجمالي استهلاكها العالمي خلال عام 2046 حجم إجمالي استهلاك الوقود الأحفوري بكافة مصادره المجتمعة (النفط والغاز الطبيعي والفحم)، لتساهم مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) بنحو 91.5% من إجمالي النمو في الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الأولية خلال عام 2046⁹، مع التأكيد هنا أن هذا السيناريو يفترض جدلاً استمرار النمو في مصادر الطاقة الأولية بنفس معدلات النمو المسجلة خلال الفترة (2013 – 2023)، أي بمعنى تواصل الالتزام بالدعم الكبير المقدم للطاقات المتجددة.

المؤشر الثاني يتعلق بالابتكار في تكنولوجيا الطاقة، وما إذا كان النمو في التطبيقات الجديدة خطياً (السيناريو التدريجي) أو أسياً (السيناريو السريع)؟، وفي هذا الشأن تُعد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أرخص بالفعل من الوقود الأحفوري عندما يتعلق الأمر بتوليد الكهرباء، كما تُشير الدلائل إلى أن الحواجز التي تحول دون انتشار السيارات الكهربائية في المستقبل المنظور يمكن القضاء عليها، وأنها سوف تنافس السيارات ذات محرك الاحتراق الداخلي في السعر في الأجل القريب. علاوة على ذلك، هناك موجات جديدة من الابتكار، في شكل تكنولوجيات ناشئة ولكنها قابلة للتطبيق بالفعل مثل تقنيات خلايا البيروفسكايت المرنة، ومحطات الطاقة الشمسية الفضائية، وبطاريات التدفق والبطاريات ذات الحالة الصلبة لتخزين الطاقة، وتوربينات الرياح البحرية العائمة، وتقنيات شبكات الطاقة الذكية المتطورة، وتقنيات خلايا الوقود الهيدروجينية الخضراء، والقطارات العاملة بالطاقة الشمسية، وتوربينات أفراس العسل، وغيرها من الابتكارات الواعدة.

يتمثل المؤشر الرئيسي الثالث في السياسات العامة، وهل ستبقى عملية صنع السياسات على مسارها الحالي محدود النطاق بتركيزه على سرد أحادي الجانب يروج له البعض باعتباره المسار الوحيد الممكن لتحقيق خفض كبير في الانبعاثات، فيدفع بتوجيه دفة الاستثمار نحو مصادر معينة وإقصاء مصادر أخرى قيمة للطاقة لاتزال الحاجة واضحة لها، من خلال الترويج لوقف الاستثمارات في قطاعاتها، أم أن صناعات السياسات سيستجيبون لإطلاق سياسات غير تمييزية تفسح المجال أمام تغيير حقيقي يشمل كل مصادر الطاقة المتاحة، ويحقق التكامل

⁹ تحليل بيانات التقرير الإحصائي الصادر عن شركة برتش بتروليوم في نسخته (يونيو 2022 & 2024)

في منظومة الطاقة لصالح المنتجين والمستهلكين وأولئك الذين يستثمرون في صناعة الطاقة في كافة مراحلها ومصادر ها.

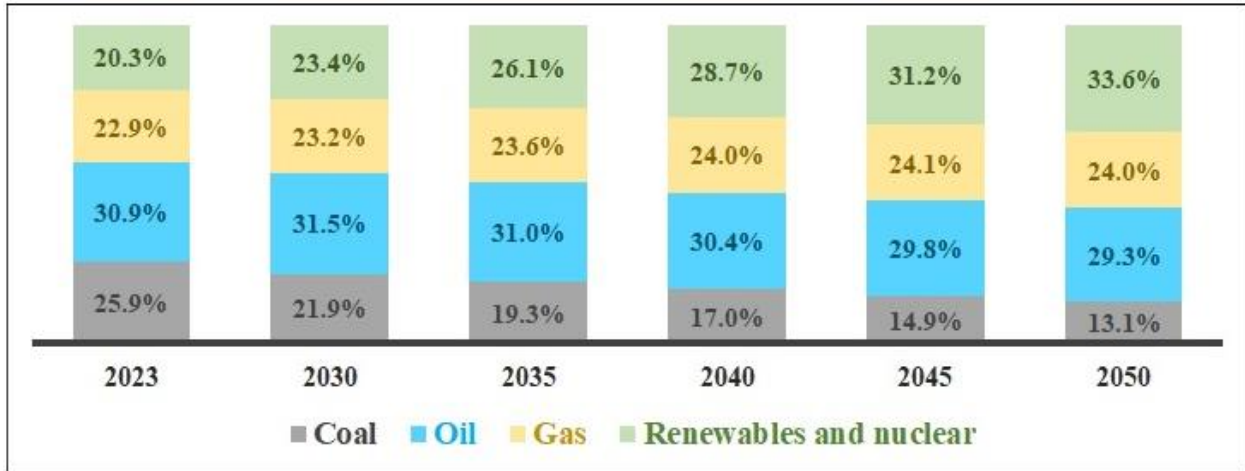
من المهم أن يستوعب صناع السياسات بشكل لا لبس فيه أن جميع مصادر الطاقة يجب أن تكون جزءاً من الحل لتحدي تغير المناخ، وأن حجم التحدي يعني أنه لا يوجد مصدر طاقة واحد يمثل حلاً سحرياً؛ كما لا يمكن التغاضي عن مساهمة صناعة النفط والغاز بأكملها، فهذا ليس سباقاً نحو مصادر الطاقة المتجددة وحدها، بل هو سباق نحو خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وبالتالي فإن مساهمة صناعة النفط والغاز بما تمتلكه من دراية وخبرة لازمة للحد من بصمتها البيئية، أمر ذو تأثير إيجابي لا يجب إغفاله. إن ما يقوله العلم والإحصاءات في قطاع الطاقة هو أن العالم بحاجة إلى تقليل الانبعاثات واستخدام الطاقة بكفاءة أكبر من خلال الابتكار في تطوير حلول تكنولوجية أنظف وأكثر كفاءة للمساعدة في تقليل الانبعاثات، كما وجب التنويه هنا إلى أن التحدي البيئي لا يكمن في النفط والغاز في حد ذاتهما، بل في الانبعاثات الناتجة عن حرقهما، لذا لا بد من بذل المزيد من الجهود في سبيل تسخير قدرة صناعة النفط والغاز على الابتكار التكنولوجي لإيجاد الحلول التي تقلل من هذه الانبعاثات وتزيلها في نهاية المطاف، ومواصلة التطوع باستمرار إلى تطوير واعتماد تكنولوجيات طاقة أنظف، فضلاً عن سياسات الطاقة الشاملة وغير التمييزية، التي تمكننا من تلبية الطلب المستقبلي المتوقع على الطاقة، بطريقة مستدامة وأكثر كفاءة من أي وقت مضى. غير ذلك، فإن السياسات التمييزية محدودة النطاق ذات النظرة الأحادية سوف تقودنا إلى سيناريو خطير محتمل قد يزيد من التقلبات بشكل كبير، ولن يساعد في تمكين التحول إلى مسار جديد ومستدام في التعامل مع الطاقة، وتقييم التكاليف السياسية والاقتصادية والاجتماعية والمناخية المترتبة على هذا التحول.

المؤشر الرئيسي الأخير هو الأسواق الناشئة، الأسواق الناشئة التي تُعرّف بأنها الدول التي تمر بمرحلة انتقالية من اقتصاد نامٍ إلى اقتصاد متقدم، وتتميز بمعدلات نمو مرتفعة، وزيادة الاستثمارات الأجنبية، وتطوير البنى التحتية، وتشمل دولاً، مثل الصين، والهند، وإندونيسيا، وكوريا الجنوبية، والبرازيل، وروسيا، وجنوب إفريقيا، والمكسيك، سوف تكون المحرك الأساسي لنمو الاقتصاد العالمي والطلب على الطاقة في الأجل المنظور، فهي بالتالي ستكون لاعباً أساسياً في تحديد مسار التحول في قطاع الطاقة العالمي وسرعته من حيث المسارات التي يمكن أن تأخذها هذه الأسواق في تغذية طلبها المتنامي على الطاقة، فهل ستتبع مسار الوقود الأحفوري في البلدان المتقدمة، أم أنها ستتحول مباشرة إلى محاولة الاعتماد على الطاقات المتجددة. وجب التذكير هنا أنه لا يزال يوجد مليارات من البشر الذين لا يبدأ يومهم بتشغيل مصباح أو فتح ثلاجة أو تشغيل محرك السيارة، فالحصول على الطاقة الحديثة بأسعار معقولة وموثوقة أمر لا يزال غير متاح لجميع البشر على هذا الكوكب حتى زماننا الحالي.

2. التوقعات المستقبلية للطلب على مصادر الطاقة الأولية:

تشير توقعات سيناريو الإشارة (Reference Case Scenario) لمنظمة الدول المصدرة للنفط أوبك إلى أن عملية التحول في هيكل مزيج الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية خلال الفترة القادمة حتى عام 2050 سوف تقوم على إحلال دراماتيكي لحصة مصادر الطاقة المتجددة والنووية محل الفحم، حيث يتوقع أن ترتفع حصة مصادر الطاقة المتجددة والنووية في المزيج العالمي من 20.3% خلال عام 2023 إلى نحو 33.6% متوقعة خلال عام 2050، في مقابل انحسار لحصة الفحم من 25.9% خلال عام 2023 إلى نحو 13.1% متوقعة خلال عام 2050. كما يتوقع تواصل احتفاظ النفط والغاز الطبيعي بحصتهما في المزيج العالمي خلال كامل الفترة الممتدة حتى عام 2050 عند حوالي 53.9%، بحيث تشهد حصة النفط انحساراً طفيفاً في حصته من المزيج العالمي بنحو 1.6% خلال عام 2050 مقارنة بحصته خلال عام 2023، تعوض بالزيادة الطفيفة في حصة الغاز الطبيعي من المزيج العالمي بنحو 1.1% خلال عام 2050 مقارنة بحصته خلال عام 2023، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 1-3: توقعات مزيج الطلب المستقبلي على مصادر الطاقة الأولية، الحصة من الإجمالي %
سيناريو الإشارة - أوبك



المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

ولأجل أن يكون النقاش حول المسارات المحتملة لتحول الطاقة واقعياً في الطرح، ومنفتحاً على وجهات النظر المختلفة، وحيادياً بشأن دور السياسات والمصالح، تضمن تقرير استشراف الآفاق المستقبلية لمزيج الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية بديلين إضافيين لتحفيز النقاش وإبراز دور التكنولوجيا والسياسات في توجيه دفة التحول، حيث يُبرزُ السيناريو القائم على التكنولوجيا (Technology-Driven Scenario)

مساراً يحقق هدف الحد من الزيادة العالمية في درجات الحرارة إلى أقل بكثير من درجتين مؤبوتين مع تجنب الآثار الاقتصادية السلبية الكبيرة على الاقتصادات النامية، وخاصة تلك التي تصدر الطاقة، وضمان درجة عالية من أمن الطاقة، كما يحدد هذا السيناريو خارطة طريق مجدية تسمح فيها الحلول التكنولوجية بزيادة حصة الطاقة المتجددة والاستمرار في استخدام النفط والغاز، ويكمل كل منهما الآخر بطريقة تتجنب الآثار السلبية المحتملة على اقتصادات البلدان النامية المصدرة للطاقة.

ويفترض السيناريو القائم على التكنولوجيا نفس فرضيات سيناريو الإشارة بشأن السكان والتنمية الاقتصادية العالمية حتى عام 2050، إلا أنه يختلف عن سيناريو الإشارة في فرضيتين أساسيتين، الأولى أن السيناريو القائم على التكنولوجيا يفترض تسريع الاستثمارات في التدابير والتقنيات التي تؤدي إلى تحسينات أسرع في كفاءة الطاقة في جميع القطاعات المستهلكة، بما يشمل نشر أسرع للطاقة المتجددة، وإحلالها محل محطات توليد الطاقة القديمة العاملة بالفحم، كما يستبدل السيناريو القائم على التكنولوجيا التوربينات الغازية القديمة بأخرى جديدة ذات كفاءة أعلى، ويوفر انتشاراً أسرع للسيارات التي تعمل بالاحتراق الداخلي مع توفير أفضل في استهلاك الوقود والسيارات الكهربائية في قطاع النقل البري، ويوفر تدابير تدعم الأجهزة وأنظمة التدفئة والتبريد الأكثر كفاءة في القطاع السكني، بالإضافة إلى تحسينات مماثلة في قطاع الصناعة وقطاعات النقل الأخرى. أما الفرضية الثانية فتتعلق بزيادة نشر تكنولوجيات إزالة الكربون، مثل تكنولوجيات اصطياد الكربون واستخدامه وتخزينه (Carbon capture utilization and storage) المتنقلة والثابتة، وتكنولوجيا احتجاز الكربون وتخزينه من مصادره أو الاصطياد المباشر في الهواء (CCS & DAC) في القطاعات الصناعية وغيرها، والتوسع في استخدام الهيدروجين، والانتقال السريع نحو اعتماد إطار عمل الاقتصاد الدائري للكربون (Circular Carbon Economy) على مستوى الاقتصاد العالمي.

ولذلك يرسم السيناريو القائم على التكنولوجيا مساراً عالمياً لخفض الانبعاثات يتسق مع الأهداف طويلة الأجل لاتفاقية باريس للحد من ارتفاع درجة الحرارة إلى أقل بكثير من درجتين مؤبوتين، وينهج نهجاً مختلفاً نحو تحقيق صافي انبعاثات صفرية (وإن لم يكن بالضرورة بحلول عام 2050) يسمح باستمرار وزيادة استخدام الهيدروكربونات من خلال تطبيق أكثر شمولاً لتكنولوجيات إزالة الكربون، بما في ذلك نشر الطاقة الحيوية على نطاق واسع مع استخدام الطاقة الشمسية في النصف الثاني من القرن، كما تلعب الطاقة النووية دوراً أكثر أهمية مقارنة بسيناريو الإشارة، وينخفض الطلب على الفحم أكثر في هذا السيناريو، حيث يتم الاستعاضة عنه إلى حد كبير بمصادر الطاقة المتجددة والنووية طوال فترة التوقعات، في حين أن أي استخدام متبقٍ للفحم سيكون مرتبطاً بتقنيات اصطياد الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS).

بالمقابل، يوضح سيناريو النمو المنصف (**Equitable Growth Scenario**) مساراً يتوخى مستقبلاً اقتصادياً أكثر إنصافاً وازدهاراً للبلدان النامية، إلى جانب نهج متميز لكيفية وتوقيت تحقيق أهداف خفض الانبعاثات، حيث يستند سيناريو النمو المنصف إلى افتراض نمو اقتصادي أقوى على المدى الطويل، خاصة بالنسبة للبلدان النامية، حيث تشهد أفريقيا والهند وباقي البلدان النامية في آسيا وأمريكا اللاتينية توسعاً أسرع في اقتصاداتها مقارنة بسيناريو الإشارة.

ونتيجة لفرضيات النمو المنصف، تشهد هذه البلدان النامية مستويات أعلى من التصنيع والتحضر، مما يؤدي بعد ذلك إلى زيادة الطبقة الوسطى وتحسن الظروف المعيشية لمليارات الأشخاص، الأمر الذي يؤدي إلى تحسين فرص الحصول على الطاقة في المناطق الأقل نمواً ويساعد في القضاء على فقر الطاقة وانتقال أسرع إلى خدمات الطاقة الحديثة في هذه البلدان، بما في ذلك الطاقة المتجددة والنفط والغاز والطاقة النووية، خاصة في النصف الأخير من فترة التوقعات. في هذا السيناريو، يتم إحراز بعض التقدم في تحسين كفاءة الطاقة نتيجة لسياسات محلية تحدد بوصلتها احتياجات التنمية القطرية على حساب القضايا العالمية نظراً لغياب التنسيق العالمي على مستوى فعال.

ويتوقع سيناريو الإشارة نمو إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية بنحو 1.2% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 327 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.7% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية نحو 374 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050. كما يتوقع أن يكون السيناريو القائم على التكنولوجيا أشد وطأة في كبح جماح النمو في الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية إلى حد الانكماش بمعدل سنوي يبلغ 0.3% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 295 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يعاود النمو بوتيرة بطيئة بمعدل 0.4% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية نحو 322 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أقل بحوالي 52 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية. بالمقابل يمثل سيناريو النمو المنصف داعماً إيجابياً للنمو في الطلب، حيث يتوقع تسارع نمو الطلب مقارنة بالحالة المرجعية إلى نحو 1.3% خلال الفترة (2023-2030) وإلى نحو 0.8% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية نحو 391 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أعلى بحوالي 17 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية، كما هو موضح بالشكل التالي:

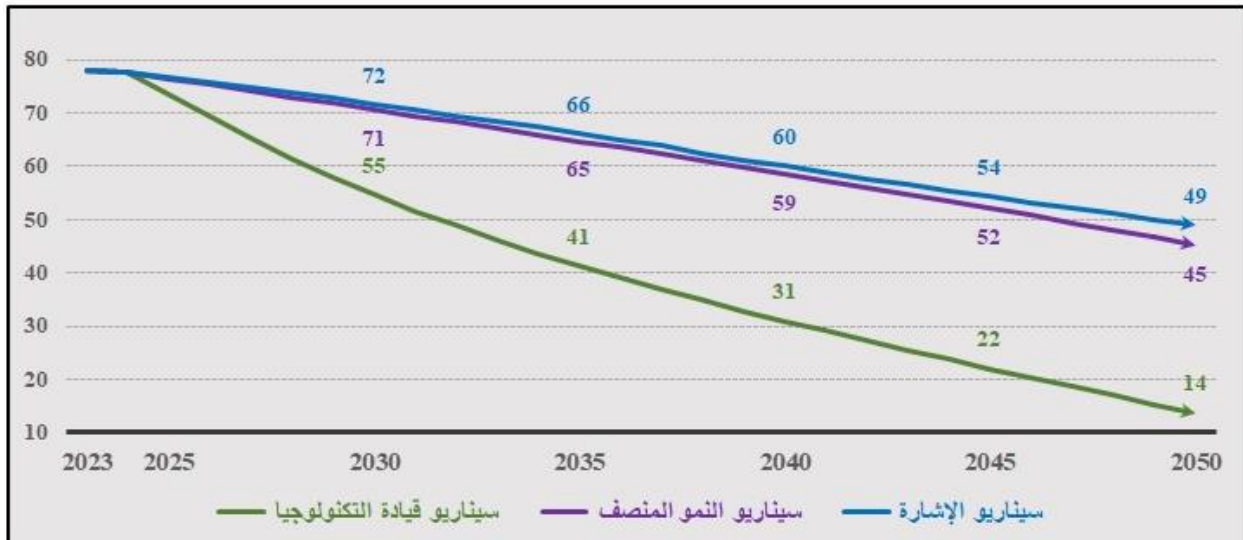
الشكل 3-2: التوقعات المستقبلية لإجمالي الطلب على الطاقة الأولية، م ب م ن / ي



المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

ويتوقع سيناريو الإشارة انكماش إجمالي الطلب العالمي على الفحم بنحو 1.7% خلال الفترة (2050-2023) ليلبلغ نحو 49 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، بينما يتوقع السيناريو القائم على التكنولوجيا أن يتسارع الانكماش إلى معدل 6.2% لينحسر إجمالي الطلب العالمي على الفحم إلى نحو 14 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أقل بحوالي 35 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية. في حين يتوقع تسارع انكماش الطلب العالمي على الفحم حسب سيناريو النمو المنصف إلى نحو 2% خلال الفترة (2050-2023) لينخفض إجمالي الطلب العالمي على الفحم إلى نحو 45 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أقل بحوالي 4 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 3-3: التوقعات المستقبلية لإجمالي الطلب على الفحم، م ب م ن / ي



المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

ويتوقع سيناريو الإشارة نمو إجمالي الطلب العالمي على النفط بنحو 1.5% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 103 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.3% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على النفط نحو 110 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050. كما يتوقع أن يكون السيناريو القائم على التكنولوجيا أشد وطأة في كبح جماح النمو في الطلب العالمي على النفط ليتباطأ نموه إلى معدل يبلغ 0.2% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 95 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يدخل مرحلة الانكماش بمعدل 0.4% خلال باقي الفترة (2030-2050) لينحسر إجمالي الطلب العالمي على النفط إلى نحو 88 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أقل بحوالي 22 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية. بالمقابل يمثل سيناريو النمو المنصف داعماً إيجابياً للنمو في الطلب العالمي على النفط، حيث يتوقع تسارع نمو الطلب مقارنة بالحالة المرجعية إلى نحو 1.7% خلال الفترة (2023-2030) وإلى نحو 0.5% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على النفط نحو 116 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أعلى بحوالي 6 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 3-4: التوقعات المستقبلية لإجمالي الطلب على النفط، م ب م ن / ي

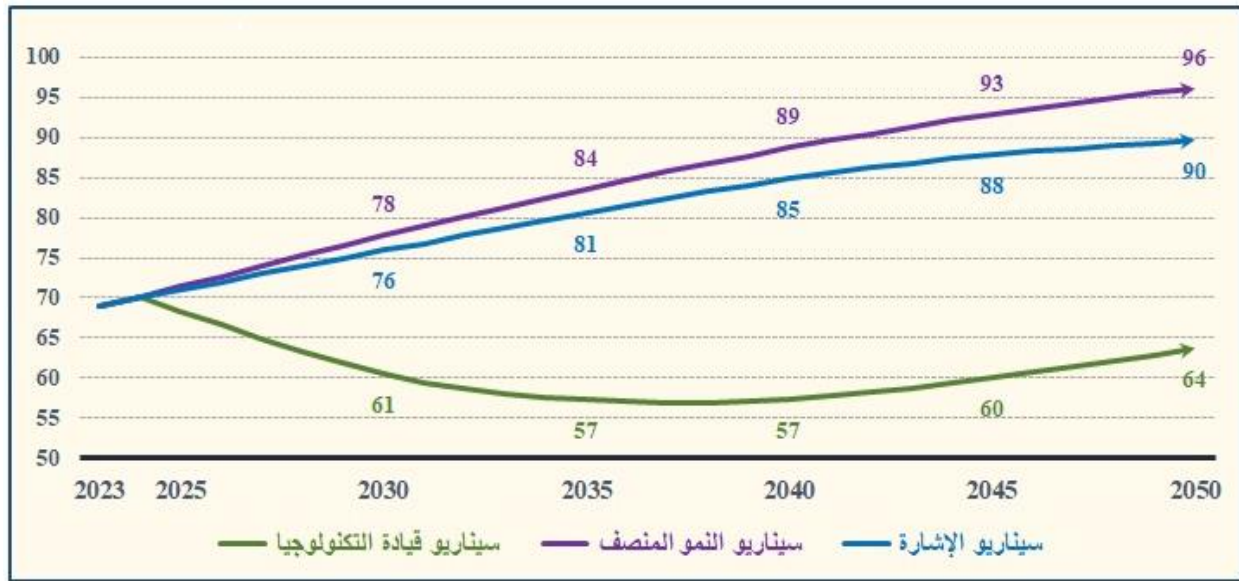


المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

بالمقابل، يتوقع سيناريو الإشارة نمو إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي بنحو 1.4% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 76 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.8% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي نحو 90 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050. وكما هو الحال بالنسبة للنفط والفحم، يتوقع أن يكون السيناريو القائم

على التكنولوجيا أشد وطأة في كبح جماح النمو في الطلب العالمي على الغاز الطبيعي حيث يتوقع أن ينكمش بمعدل 1.4% خلال الفترة (2023-2037) ليلبلغ نحو 57 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يعاود النمو بمعدل 0.9% خلال باقي الفترة (2037-2050) ليلبلغ إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي نحو 64 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أقل بحوالي 26 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية. بينما يمثل سيناريو النمو المنصف دافعاً إيجابياً للنمو في الطلب العالمي على الغاز الطبيعي، حيث يتوقع تسارع نمو الطلب مقارنة بالحالة المرجعية إلى نحو 1.7% خلال الفترة (2023-2030) وإلى نحو 1.1% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليلبلغ إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي نحو 96 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أعلى بحوالي 6 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 3-5: التوقعات المستقبلية لإجمالي الطلب على الغاز، م ب م ن / ي



المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

ويتوقع أن يمثل الطلب على مصادر الطاقة المتجددة والنووية قاطرة النمو في الطلب على الطاقة ووقود التحول المقبل وفق كل السيناريوهات خلال الفترة (2023 – 2050) وإن كانت بسرعات متباينة، حيث يتوقع سيناريو الإشارة نمو إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية بنحو 3.3% خلال الفترة (2023-2030) ليلبلغ نحو 77 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب قليلاً إلى نحو 2.5% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليلبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية نحو 126 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050. بينما يتوقع سيناريو النمو المنصف تسارع النمو في الطلب مقارنة بالحالة المرجعية إلى نحو 3.4% خلال الفترة (2023-2030) وإلى نحو 2.6% خلال باقي

الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية نحو 133 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أعلى بحوالي 7 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية. في حين تبلغ سرعة النمو في الطلب على مصادر الطاقة المتجددة والنووية ذروتها وفق السيناريو القائم على التكنولوجيا الذي يتوقع أن يقفز الطلب بمعدل سنوي يبلغ 4.9% خلال الفترة (2023-2030) وبنحو 3.1% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية نحو 157 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050، أي أعلى بحوالي 24 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم مقارنة بالحالة المرجعية، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 3-6: التوقعات المستقبلية لإجمالي الطلب على مصادر الطاقة المتجددة والنووية، م ب م ن / ي

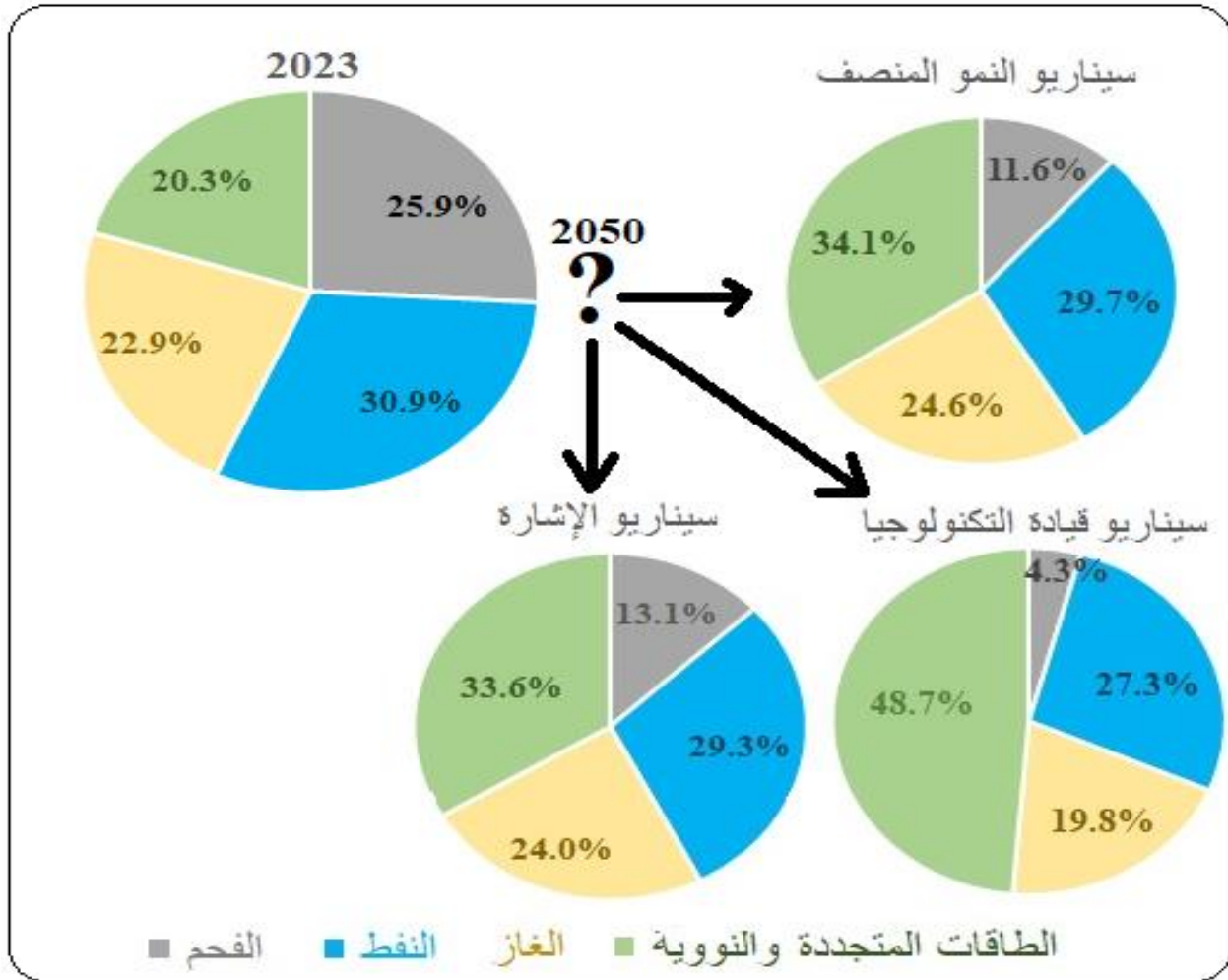


المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

وتتجلى الوجهة المستقبلية لمزيج الطاقة العالمي الناتج عن التحول الذي يشهده القطاع خلال المرحلة الحالية والمستقبل المنظور حسب سيناريو هي الإشارة و النمو المنصف في ارتفاع ملحوظ في توقعات حصة مصادر الطاقة المتجددة والنووية من مزيج الطلب العالمي على المصادر الأولية من 20.3% خلال عام 2023 إلى حصة تتراوح بين (33.6% - 34.1%) متوقعة خلال عام 2050، مقابل انحسار مناظر لحصة الفحم من حوالي 25.9% خلال عام 2023 إلى حصة تتراوح بين (11.6% - 13.1%) متوقعة خلال عام 2050، إلى جانب انخفاض طفيف متوقع في حصة النفط يتزامن مع ارتفاع طفيف متوقع بالمقابل في حصة الغاز الطبيعي. بيد أن السيناريو الذي يعكس صورة التحول الهيكلي في مزيج الطلب العالمي على المصادر الأولية هو في الحقيقة سيناريو قيادة التكنولوجيا الذي يتوقع أن ترتفع حصة مصادر الطاقة المتجددة والنووية إلى 48.7% من إجمالي الطلب العالمي على المصادر الأولية بحلول عام 2050، بينما تتراجع حصة النفط والغاز الطبيعي

معاً إلى نحو 47.1% وتنحسر حصة الفحم إلى 4.3% متوقعة خلال عام 2050، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 3-7: مزيج الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية خلال عام 2023 وتوقعاته المستقبلية خلال عام 2050، % من إجمالي



المصدر: World Oil Outlook 2024 database, OPEC 2024.

الفصل الرابع

السياسات الوطنية والدولية التي تعزز نشر الطاقة المتجددة

1. دور السياسات الوطنية والدولية في تعزيز نشر الطاقة المتجددة:

تلعب السياسات الوطنية والدولية التي تعزز نشر الطاقة المتجددة دوراً حاسماً في تشكيل صناعة الطاقة المتجددة، حيث تساعد هذه السياسات على خلق بيئة مواتية لتطوير ونمو الطاقات المتجددة بمختلف مصادرها، وتوفير إطاراً يشجع الاستثمار، ويحفز الابتكار، ويضمن الاستخدام الفعال والمستدام لمصادر الطاقة المتجددة.

فعلى المستوى الوطني، غالباً ما يكون تشجيع توليد الطاقات المتجددة أحد الأهداف الأساسية للحكومات التي تسعى سواء إلى تنويع مصادرها من الطاقة أو التحول نحو استخدام المصادر المتجددة إما لدوافع بيئية أو لأسباب متعلقة بمفهوم أمن الطاقة لديها، فتحدد تلك الحكومات أهدافاً وطنية معلنة للطاقة المتجددة، وترسم الخطط الكفيلة بتحقيقها، وتقدم حوافز مالية، مثل الإعفاءات الضريبية والمنح وتعريفات التغذية، لتشجيع تطوير ونشر مشاريع الطاقة المتجددة.

كما تهدف هذه السياسات الوطنية أيضاً إلى تسهيل الدخول إلى أسواق صناعة الطاقة المتجددة وتعزيز المنافسة فيها، من خلال تصميم التشريعات وسن القوانين ووضع الأطر التنظيمية والشفافة العادلة التي تسمح للجميع بالدخول إلى الأسواق، بهدف تعزيز المنافسة التي تؤدي إلى خفض التكاليف، ودعم التقدم التكنولوجي، وتعزيز الابتكار.

وعلى المستوى الدولي، يكون للسياسات الدولية تأثير كبير على تشكيل سياسات الطاقة المتجددة من خلال الاتفاقيات الدولية التي توفر الإطار المشترك الذي تعمل الدول داخله، وتحدد أهدافاً على المستوى العالمي تسعى الدول إلى تحقيقها، كما تعمل على تسهيل تبادل المعرفة والتعاون والاستثمار بين الدول في مشاريع الطاقة المتجددة، حيث يمكن للدول تسريع التحول إلى مستقبل أكثر استدامة للطاقة والتخفيف من الآثار غير المرغوب فيها للتغير المناخي على البيئة، من خلال موازنة السياسات الفردية للدول مع الاتفاقيات الدولية.

2. السياسات الدولية للطاقات المتجددة

تعمل الاتفاقيات الدولية كإطار حاسم لتشكيل سياسات الطاقة المتجددة في جميع أنحاء العالم، حيث تضع هذه الاتفاقيات مبادئ توجيهية، وأهدافاً وغايات يمكن أن تعمل الدول على الوصول إليها من أجل الانتقال إلى

مستقبل طاقة أكثر استدامة وأماناً، ونورد فيما يلي بعض أهم الاتفاقيات الدولية الرئيسية ودورها في تشكيل سياسات الطاقة المتجددة:

• بروتوكول كيوتو (Kyoto Protocol):

هي معاهدة دولية تم اعتمادها في كيوتو، بتاريخ 11 ديسمبر عام 1997، ودخلت حيز التنفيذ في 16 فبراير عام 2005. يعمل بروتوكول كيوتو على تفعيل اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ من خلال إلزام الدول الصناعية والاقتصادات التي تمر بمرحلة انتقالية بالحد من انبعاثات غازات الدفيئة وخفضها وفقاً لأهداف فردية متفق عليها، وتطلب معاهدة كيوتو من تلك الدول اعتماد سياسات وتدابير بشأن التخفيف من الانبعاثات وتقديم تقارير دورية.

ويستند بروتوكول كيوتو إلى مبادئ وأحكام الاتفاقية ويتبع هيكلها القائم على المرفقات، وهو لا يلزم إلا البلدان متقدمة النمو، ويضع عليها عبئاً أثقل بموجب مبدأ "المسؤولية المشتركة ولكن المتباينة وقدرات كل منها"، لأنه يعترف بأن الدول المتقدمة مسؤولة إلى حد كبير عن المستويات المرتفعة الحالية لانبعاثات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. وعلى الرغم من أن بروتوكول كيوتو ركز في المقام الأول على خفض الانبعاثات بدلاً من الطاقة المتجددة على وجه التحديد، إلا أنه أثر بشكل غير مباشر على سياسات الطاقة المتجددة من خلال خلق وعي عالمي حول الحاجة إلى الانتقال نحو مصادر الطاقة النظيفة، كما أنشأ آليات مثل آلية التنمية النظيفة (CDM) لتعزيز التنمية المستدامة ومشاريع الطاقة المتجددة في البلدان النامية.

• اتفاق باريس للمناخ (Paris Climate Accords):

لمواجهة تغير المناخ وآثاره السلبية، تبنت 197 دولة اتفاق باريس للمناخ الذي أعدت مسودته في مؤتمر الأطراف 21 (COP 21) الذي عُقد في باريس خلال الفترة (30 نوفمبر - 12 ديسمبر) 2015، تم توقيع الاتفاق في 22 أبريل 2016م، ودخل الاتفاق حيز التنفيذ في 4 نوفمبر 2016، ويهدف إلى الحد بشكل كبير من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية والحد من زيادة درجة الحرارة العالمية في هذا القرن إلى درجتين مئويتين مع السعي إلى الحد من الزيادة إلى 1.5 درجة. وقد أحدث اتفاق باريس نقلة نوعية نحو تحقيق المواءمة، إذ أصبحت جميع الدول ملزمة الآن بوضع أهداف وطنية محددة وتتمتع بمرونة متساوية للتعاون مع الآخرين لتحقيق هذه الأهداف. ويهدف هذا التعاون الدولي إلى تعزيز مستوى أعلى من الطموح وتحقيق فوائد ملموسة للإجراءات المناخية، ويشجع الاتفاق الدول على تعزيز جهودها في نشر الطاقة المتجددة ويوفر منصة

لتبادل أفضل الممارسات والتقنيات، حيث تمثل الطاقات المتجددة الأداة الوحيدة والجاهزة المتاحة لتوفير حلول مجدية لمشكلات التغيرات المناخية.

• أهداف التنمية المستدامة (The Sustainable Development Goals):

أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة هي مجموعة من 17 هدفاً وُضعت من قبل منظمة الأمم المتحدة، وقد ذُكرت هذه الأهداف في قرار الجمعية العامة للأمم المتحدة في 25 أيلول/سبتمبر 2015، وفي 1 كانون الثاني / يناير 2016 أدرجت هذه الأهداف في خطة التنمية المستدامة لعام 2030. وعلى الرغم من أن أهداف التنمية المستدامة ليست ملزمة قانوناً، إلا أن الحكومات تأخذ زمام ملكيتها وتضع أطر وطنية لتحقيقها، ولذا فالدول هي التي تتحمل المسؤولية الرئيسية عن متابعة التقدم المحرز واستعراضه.

وتوفر أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة الـ 17، إطاراً شاملاً للتنمية المستدامة في مختلف القطاعات، بما في ذلك الطاقة، ويهدف الهدف 7 - طاقة نظيفة وبأسعار معقولة - من أهداف التنمية المستدامة على وجه التحديد إلى ضمان حصول الجميع على طاقة حديثة وموثوقة ومستدامة وبأسعار معقولة، وقد دفع هذا الهدف العديد من البلدان إلى إعطاء الأولوية للطاقة المتجددة كوسيلة لتحقيق الوصول الشامل إلى الطاقة وتوسيع مصادر امداداتها.

• الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA):

تم تقديم اقتراح إنشاء وكالة دولية مكرسة للطاقة المتجددة في عام 1981 في مؤتمر الأمم المتحدة المعني بمصادر الطاقة الجديدة والمتجددة الذي عقد في نيروبي، كينيا، وقد تمت مناقشة الفكرة وتطويرها من قبل المنظمات الرئيسية في مجال الطاقة المتجددة، مثل يوروسولار.

ومع تزايد الاهتمام العالمي بالطاقة المتجددة بشكل مطرد، اجتمع قادة العالم في عدة أماكن للتركيز على سياسات الطاقة المتجددة والتمويل والتكنولوجيا، وشملت الاجتماعات الرئيسية مؤتمر القمة العالمي للتنمية المستدامة لعام 2002 في جوهانسبرغ بجنوب أفريقيا، وحوار غلين إيغلز السنوي لمجموعة الثمانية، ومؤتمر بكين الدولي للطاقة المتجددة لعام 2005، ومؤتمر بون الدولي للطاقة المتجددة لعام 2004، وقد تضمن القرار الختامي لمؤتمر بون دعم إنشاء الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، ثم تأسست الوكالة الدولية للطاقة المتجددة The International Renewable Energy Agency (IRENA) رسمياً في بون، ألمانيا، في 26 يناير 2009.

وقد وقعت 75 دولة على النظام الأساسي للوكالة الدولية للطاقة المتجددة في البداية، بينما بلغ عدد الدول الأعضاء في الوكالة 170 دولة بحلول عام 2024م¹⁰.

تلعب الوكالة الدولية للطاقة المتجددة دوراً حاسماً في تسهيل التعاون الدولي وتبادل المعرفة في مجال الطاقة المتجددة، وهي تشجع على اعتماد تكنولوجيات الطاقة المتجددة على نطاق واسع وتقدم المشورة في مجال السياسات إلى البلدان الأعضاء، وتساعد الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أيضاً البلدان في تطوير سياسات الطاقة المتجددة، وإجراء تقييمات الطاقة المتجددة، وتسهيل الاستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة.

وإلى جانب الاتفاقيات العالمية، تلعب الاتفاقيات الثنائية والإقليمية أيضاً دوراً مهماً في تشكيل سياسات الطاقة المتجددة، كما أبرمت بعض الدول اتفاقيات ثنائية مع دول أخرى لتسهيل نقل التكنولوجيا والتعاون في قطاع الطاقة المتجددة. وبالرغم من التقدم المحرز حتى الآن في جهود التعاون الدولي في مجال تعزيز نشر الطاقة المتجددة وادماجها في منظومة الطاقة العالمية إلا أنه تجدر الإشارة إلى جملة من الملاحظات التي ربما تجدر مراعاتها في سبيل رفع كفاءة التعاون الدولي في هذا المجال:

✓ يجب أن ينتقل مفهوم التعاون الدولي في مجال إدماج الطاقات المتجددة في منظومة الطاقة العالمية من مفهوم التفاهات رفيعة المستوى إلى مستوى التطبيق العملي، وأن يعمل في شكل شراكات تقنية وفرق عمل تنفيذية مشتركة، بصورة يمكن معها جلب اللاعبين الدوليين الحقيقيين، في مختلف مراحل سلاسل توريد صناعة الطاقة المتجددة جنباً إلى جنب، للعمل معاً على تحقيق هدف واحد، هو إيجاد وتطبيق الحلول الفعلية للتحديات الحقيقية التي تشكل في مجموعها عوائق التقنية والتكلفة، التي تقيد انطلاقة التصنيع المرتبطة بصناعة الطاقات المتجددة على كافة مراحل سلاسل توريدها. لقد أضحت الحاجة أكثر من ملحة لوجود مجموعات دولية أكثر تنوعاً، تتعاون وفق مسارات عمل فعلية لدفع عجلة الابتكار وتوحيد المقاييس وضمن معايير الحوكمة البيئية والاجتماعية والحوكمة المؤسسية.

✓ توجد حاجة ملحة إلى نهج متعدد الأطراف لعملية التصنيع، يحقق نقل سلس للمعرفة والتكنولوجيا من الشمال إلى الجنوب، بعيداً عن الإجراءات الأحادية وغير المنسقة، من خلال اتفاقات واسعة النطاق، تمهد الطريق لشراكات عادلة، تعزز الانتقال الطموح لانتشار واسع للطاقات المتجددة، بصورة عادلة في الجغرافيا العالمية.

✓ يتوجب إعداد خرائط مفصلة لسلاسل التوريد العالمية لصناعة الطاقات المتجددة، توضح الدول أو الأقاليم المؤهلة لتوطين المحتوى، وتحقيق القيمة المضافة، هذه الخرائط يجب أن تحدد بشكل أعمق، كيف يمكن

¹⁰ [IRENA – International Renewable Energy Agency](https://www.irena.org/)

استخدام إستراتيجيات المزايا التنافسية للدول على المستوى دون الإقليمي، لتحقيق التنوع في توزيع المصادر والإنتاج، في سلاسل التوريد الإقليمية.

✓ ضرورة العمل على تركيز الجهود حول توحيد المعايير للتقنيات المتاحة، والتطوير الأفقي المتوازن في كل مراحل سلسلة التوريد، بدلاً عن التركيز عن تطوير مراحل معينة في سلسلة التوريد، وإهمال المراحل الأخرى، مما يعرقل امكانية تطبيق التقنيات المطورة، فعلى سبيل المثال أغلب التوربينات البحرية الكبيرة المؤهلة للعمل التجاري اليوم، هي في الواقع لم تدخل الخدمة في البحار، بسبب التركيز على تطوير توربينات أكبر لتوليد طاقات الرياح البحرية، دون انجاز الأعمال المتعلقة بتأهيل المراحل الأخرى في سلسلة التوريد، وتهيتها لإنزال التوربينات البحرية الكبيرة للعمل في عرض البحار.

• اتفاقيات التعاون الدولي في مجال الطاقات المتجددة

تتعاون الحكومات في اتفاقيات دولية لتعزيز الطاقة المتجددة، ومن الممكن أن تتضمن هذه الاتفاقيات الأهداف وتقاسم التكنولوجيا وآليات الدعم المالي. وتوفر بعض الاتفاقيات الدولية مثل اتفاق باريس للمناخ إطاراً للدول للعمل المشترك معاً نحو مستقبل مستدام.

3. السياسات الوطنية للطاقات المتجددة

تلعب السياسات الوطنية واللوائح الحكومية دوراً حيوياً في تشكيل صناعة الطاقة المتجددة، وتوفر هذه السياسات إطاراً يدعم نمو قطاع الطاقة المتجددة ويساعد على التحول نحو مستقبل أكثر استدامة للطاقة، ويمثل تعزيز توليد الطاقة المتجددة، وتسهيل الدخول إلى أسواق صناعة الطاقة المتجددة وتعزيز المنافسة فيها، وضمان تكامل شبكات الطاقة واستقرارها، وتشجيع كفاءة الطاقة والحفاظ عليها، أهم الأهداف المتعارف عليها للسياسات الوطنية في مجال الطاقات المتجددة، وفيما يلي نبذة موجزة عنها:

• تعزيز توليد الطاقة المتجددة

غالباً ما يكون تشجيع توليد الطاقات المتجددة أحد الأهداف الأساسية للحكومات التي تسعى سواء إلى تنوع مصادر ها من الطاقة أو التحول نحو استخدام المصادر المتجددة إما لدوافع بيئية أو لأسباب متعلقة بمفهوم أمن الطاقة لديها، فتحدد تلك الحكومات أهدافاً وطنية معلنه للطاقة المتجددة، وترسم الخطط الكفيلة بتحقيقها، وتقدم حوافز مالية، مثل الإعفاءات الضريبية والمنح وتعريفات التغذية، التي تحفز وتشجع تطوير وانتشار مشاريع الطاقة المتجددة.

• تسهيل دخول الأسواق والمنافسة

أحد الأهداف الأساسية للسياسات الوطنية يتمثل في تسهيل الدخول إلى أسواق صناعة الطاقة المتجددة وتعزيز المنافسة فيها، وذلك من خلال تصميم التشريعات وسن القوانين ووضع الأطر التنظيمية والشفافة العادلة التي تسمح للجميع بالدخول إلى الأسواق، بهدف تعزيز المنافسة التي تؤدي إلى خفض التكاليف، ودعم التقدم التكنولوجي، وتعزيز الابتكار.

• ضمان تكامل شبكات الطاقة واستقرارها

يعتبر دمج الطاقة المتجددة في شبكات الكهرباء العاملة أحد التحديات الكبرى أمام صناعة الطاقة، ولذلك تضع السياسات الوطنية معالجة هذا التحدي في مقدمة أولوياتها من خلال وضع المبادئ التوجيهية لتكامل الشبكة واستقرارها، بحيث تضمن هذه المبادئ التوجيهية ربط مشاريع الطاقة المتجددة بالشبكة بطريقة لا تؤثر على موثوقية واستقرار إمدادات الكهرباء، من خلال عدة آليات قد تشمل تحديد قوانين الشبكة للمتطلبات الفنية لمولدات الطاقة المتجددة الضامنة للحفاظ على جودة الطاقة واستقرارها، كما يمكن أن توجه السياسات لتشجيع تطوير تقنيات تخزين الطاقة لمعالجة الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة.

• تشجيع كفاءة الطاقة والحفاظ عليها

لا تركز السياسات الوطنية المتكاملة على زيادة توليد الطاقة المتجددة فحسب، بل تشمل أيضاً أهداف تعزيز كفاءة الطاقة والحفاظ عليها، من خلال استهداف الحد من الهدر الزائد في استهلاك الطاقة وترشيد استخدامها، من خلال تشجيع المستهلكين على اعتماد ممارسات وتقنيات موفرة للطاقة، وتضمين قوانين وكودات البناء متطلبات التصميمات والمعدات التي تتسم بكفاءة استخدام الطاقة، وتقديم إعانات الدعم للأجهزة والأنظمة التي تتسم بكفاءة استخدام الطاقة، وتنفيذ معايير كفاءة استخدام الطاقة للأجهزة والمركبات.

• تحديد الأهداف الوطنية في مجال الطاقات المتجددة والاعلان عنها

تلعب الحكومة أدواراً أساسية في تعزيز الطاقة المتجددة من خلال اضطلاعها بمهام تحديد الأهداف الوطنية في مجال الطاقات المتجددة والاعلان عنها، حيث يمثل وضع أهداف طموحة وواضحة وقابلة للقياس، تستهدف حصص الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الوطني والإعلان عنها، ورسم الخطط اللازمة للوصول إليها وتحقيقها، وتقديم خارطة طريق لاتباعها كل من القطاع الخاص والعام لتنفيذ هذه الخطط ومتابعة تنفيذها من المهام الرئيسية

التي تضطلع بها الحكومات وتعتبر بمثابة حجر الزاوية في رسم وتنفيذ السياسات الوطنية في مجال الطاقات المتجددة.

• توفير الحوافز المالية والإعانات لدعم خطط التحول

من المهام الرئيسية أيضاً التي تضطلع بها الحكومات لرسم وتنفيذ السياسات الوطنية في مجال الطاقات المتجددة، تقديم حوافز مالية وإعانات لتشجيع تطوير واعتماد تقنيات الطاقة المتجددة ونشر تطبيقاتها وتعزيز انتشارها، ويمكن أن تأخذ هذه الحوافز أشكالاً مختلفة، مثل الإعفاءات الضريبية، والمنح، وتعريفات التغذية، حيث تساعد هذه الحوافز والإعانات على جعل الطاقة المتجددة أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية وجاذبية لكل من الشركات والأفراد.

• تمويل البحث والتطوير في تقنيات الصناعة

يقع توجيه الاستثمار الحكومي إلى مجالات البحث والتطوير في تطوير تقنيات الطاقة المتجددة في مقدمة المهام الرئيسية للحكومات لدعم الطاقات المتجددة، فمن خلال تمويل المبادرات البحثية، يمكن للحكومات دفع الابتكار وتسريع تطوير حلول جديدة وأكثر كفاءة للطاقة المتجددة.

• الإطار التنظيمي والتخطيط

من المهام الرئيسية أيضاً للحكومات في السياسات الوطنية الرامية لدعم الطاقات، إنشاء الأطر التنظيمية الداعمة ورسم السياسات التخطيطية، حيث تساعد هذه الأطر على تبسيط عملية الموافقة على مشاريع الطاقة المتجددة، مما يضمن الانتقال السلس إلى مصادر الطاقة النظيفة، وفي سبيل المثال على ذلك، وضمت الحكومة الألمانية قانون مصادر الطاقة المتجددة في ألمانيا تشريعاً يضمن مدفوعات ثابتة طويلة الأجل لمنتجات الطاقة المتجددة، بهدف توفير الاستقرار واليقين للمستثمرين، وقد كان لهذا التشريع دور فعال في تحول ألمانيا الناجح إلى اقتصاد قائم على الطاقة المتجددة.

• تنظيم حملات التوعية والتثقيف لحشد الدعم الشعبي

من المهام الرئيسية للحكومات أيضاً، تنظيم حملات التوعية والتثقيف بفوائد الطاقة المتجددة وأهمية الانتقال إلى مصادر طاقة أكثر استدامة، لحشد الدعم الشعبي وتبديد الخرافات والمفاهيم الخاطئة المحيطة بالطاقة المتجددة وتعزيز التصور الإيجابي بين عموم المواطنين.

• نقل التجارب الدولية الناجحة إلى المستوى المحلي

وتوفر التجارب الدولية السابقة في مجال الطاقات المتجددة، أمثلة حية على السياسات والحوافز الحكومية الرئيسية التي تم تنفيذها وحققت نجاحات ملموسة في سبيل دعم تطوير الطاقة المتجددة، ومن المهم لأصحاب المصلحة في صناعة الطاقة المتجددة أن يظلوا على علم التجارب التي نورد على سبيل المثال لا الحصر منها ما يلي:

1. تعريفات التغذية (FiTs) واتفاقيات شراء الطاقة

تعريفات التغذية هي آلية سياسية تستخدم لتشجيع انتشار مصادر الطاقة المتجددة، يضمن منتجو الطاقة المتجددة من خلالها دفع مبلغ ثابت مقابل كل وحدة من الكهرباء يقومون بتوليدها وتغذيتها في الشبكة، إن ضمان حصول منتجي الطاقة المتجددة على مدفوعات ثابتة مقابل الكهرباء المولدة، يوفر الاستقرار المالي على المدى الطويل، مما يجعل الطاقة المتجددة استثمارًا أكثر جاذبية. تم تنفيذ التعريفات الأولى للتغذية (FIT) من قبل إدارة كارتر في الولايات المتحدة في أواخر السبعينيات، حيث كان الهدف من قانون الطاقة الوطني هو تعزيز الحفاظ على الطاقة إلى جانب تطوير مصادر جديدة للطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، منذ ذلك الحين، تم استخدام FIT بشكل واسع في ألمانيا، إسبانيا، المملكة المتحدة، أوكرانيا، الصين، اليابان، الهند، إندونيسيا، ماليزيا، كوريا الجنوبية إلخ.

2. معايير محطة الطاقة المتجددة (RPS)

بموجب نظام RPS، يتعين على موردي الكهرباء الحصول على نسبة معينة من الكهرباء من مصادر متجددة، وهذا يخلق الطلب على الطاقة المتجددة ويشجع الاستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة الجديدة. وقد نفذت بعض الولايات في الولايات المتحدة، مثل كاليفورنيا، سياسات RPS لتحفيز أسواق الطاقة المتجددة، حيث فرضت ولاية كاليفورنيا على موردي الكهرباء في الولاية ضرورة الحصول على 60% من الكهرباء من مصادر متجددة بحلول عام 2030، وهو الهدف الذي أدى إلى استثمارات كبيرة في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وغيرها من مصادر الطاقة المتجددة. من خلال فرض أن يأتي جزء معين من الطاقة من مصادر متجددة، تضمن سياسات الطاقة المتجددة الطلب الثابت على الطاقة المتجددة، مما يحفز النمو في الصناعة ويضمن استمرار تدفق الاستثمارات إليها.

3. الإعفاءات الضريبية على الاستثمار (ITCs) والإنتاج (PTCs)

الإعفاءات الضريبية على الاستثمار (ITCs) والإعفاءات الضريبية على الإنتاج (PTCs) هي حوافز مالية تقدمها الحكومات لتشجيع اعتماد نظم الطاقة المتجددة، تسمح هذه الاعتمادات لدافعي الضرائب بخصم جزء من تكلفة تركيب منظومات الطاقة المتجددة من ضرائب الدخل، والهدف الأساسي من هذه الحوافز هو تحفيز الاستثمار في البنية التحتية للطاقة المتجددة. في الولايات المتحدة، على سبيل المثال، تقدم الحكومة الفيدرالية إعفاء ضريبياً على الاستثمار بنسبة 26% لمشاريع الطاقة الشمسية وائتماناً ضريبياً على الإنتاج لمشاريع طاقة الرياح. وكانت هذه الحوافز مفيدة في دفع نمو قدرة الطاقة المتجددة في البلاد.

4. شهادات الطاقة المتجددة (RECs)

شهادات الطاقة المتجددة (RECs) والمعرفة أيضاً بالشهادات الخضراء، هي أداة قابلة للتداول وغير ملموسة تمثل السمات البيئية لـ 1 ميغاوات في الساعة من الكهرباء المولدة من مصدر متجدد مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح أو الطاقة الحرارية الأرضية أو الطاقة المائية. عندما تنتج منشأة للطاقة المتجددة الكهرباء، يتم إصدار هذه الشهادات لمنتجي الطاقة المتجددة مقابل كل ميغاوات ساعة من الكهرباء يقومون بتوليدها. ويمكن بعد ذلك بيعها إلى المرافق أو مستهلكي الطاقة، الذين يمكنهم استخدامها للوفاء بالتزاماتهم في مجال الطاقة المتجددة.

5. صافي قياس الطاقة (NEM)

هي آلية سياسية تسمح لأصحاب أنظمة الطاقة المتجددة بتعويض استهلاكهم من الكهرباء بواسطة الكهرباء التي ينتجونها، وبموجب هذه الآلية، يتم تصدير أي كهرباء فائضة يولدها نظام الطاقة المتجددة إلى الشبكة، ويتم إضافتها إلى فاتورة الكهرباء لمالك النظام، وهذا يقلل بشكل فعال من تكاليف الكهرباء ويوفر حافزاً اقتصادياً للاستثمار في الطاقة المتجددة. تم استخدام هذه الآلية في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة، حيث نجحت في الترويج لتركيبات الطاقة الشمسية على الأسطح، من خلال السماح لأصحاب المنازل والشركات بالحصول على أرصدة مقابل الكهرباء الزائدة التي يولدها بالطاقة الشمسية.

الفصل الخامس

التحديات والصعوبات التي تواجه الاستخدام الأوسع

للطاقات المتجددة

1. ضعف المرافق والشبكات الكهربائية وعدم قدرتها على مجارات التحول المنشود:

يأتي في مقدمة التحديات والصعوبات التي تواجه الاستخدام الأوسع للطاقات المتجددة ضعف شبكات الطاقة الحالية، والبنية التحتية للنقل والتوزيع، وعدم قدرتها على مجارات التحول المنشود، فبالرغم من الطفرة الهائلة في القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة حول العالم، إلا أنها لا زالت تواجه مشاكل متزايدة في الربط البيئي مع شبكات الكهرباء حتى في كبرى الاقتصادات الأوروبية والأميركية والآسيوية، حيث وصل إجمالي ساعات المرافق المتجددة التي تنتظر الاتصال بالشبكات في الولايات المتحدة إلى 2600 جيجوات خلال عام 2023 بحسب تقديرات مختبر لورانس بيركلي الوطني في كاليفورنيا¹¹.

ولذلك لن تكون مصادر الطاقة المتجددة، وفي مقدمتها طاقة الرياح والطاقة الشمسية قادرة على إحداث التحول المنشود ما لم تكن مرافق الكهرباء قوية ومستدامة مالياً، ومؤهلة لجذب الاستثمارات اللازمة لتحديث الشبكات وتلبية الاحتياجات التي تزداد تعقيداً، فالمرافق الحالية في العديد من البلدان النامية والشبكات الكهربائية التي تقوم هذه المرافق بتشغيلها في حالة يرثى لها، وغير قادرة على تحقيق إيرادات كافية لتغطية تكاليف التشغيل وخدمة الديون - وهو الحد الأدنى للاستدامة المالية، حيث يؤدي ارتفاع التكاليف، وانخفاض التعرفة، وفقد الهدر الكبير في الكهرباء في شبكات التوزيع، بالإضافة إلى سوء التخطيط، إلى استمرار ضعف الأداء، وتراجع جاذبية الاستثمار وزيادة الاعتماد على الدعم الحكومي، مما ينتج عنه أعباء إضافية على موازنات هذه الدول مع حرمان الكثير من المستهلكين من مصادر الكهرباء المنتظمة.

وسيتجلى ضعف مرافق وشبكات الكهرباء القائمة وعدم قدرتها على مجارات التحول المنشود رويداً رويداً، مع تسارع وثيرة التحول في قطاع الطاقة القائم على المصادر المتجددة، والتي غالباً ما تقع مصادر بعيدة عن المدن الأمر الذي يتطلب معه المزيد من خطوط النقل والإمداد لتوصيل الطاقة من مصادر انتاجها إلى المستهلك النهائي، لكن المسافة ليست العامل الوحيد الذي يزيد الأمر تعقيداً. فهناك مسألة الاستقرار في امدادات الطاقة الكهربائية، حيث تتطلب الشبكات الكهربائية الاستقرار والتوازن، ولكن الطاقة المتجددة تختلف عن الطاقة الأحفورية حيث تعتمد الطاقة الشمسية وطاقت الرياح على عوامل الطقس، وتتغير تبعاً لتغيراتها من موسم لآخر، وحتى من دقيقة إلى أخرى، مما يعني أن ضرورة أن يشمل تحديث البنية التحتية القائمة تهيئتها لمواجهة هذه التغيرات، كما يحتاج القطاع أيضاً إلى توجيه المزيد من الاستثمار لإدارة كميات أكبر من مصادر

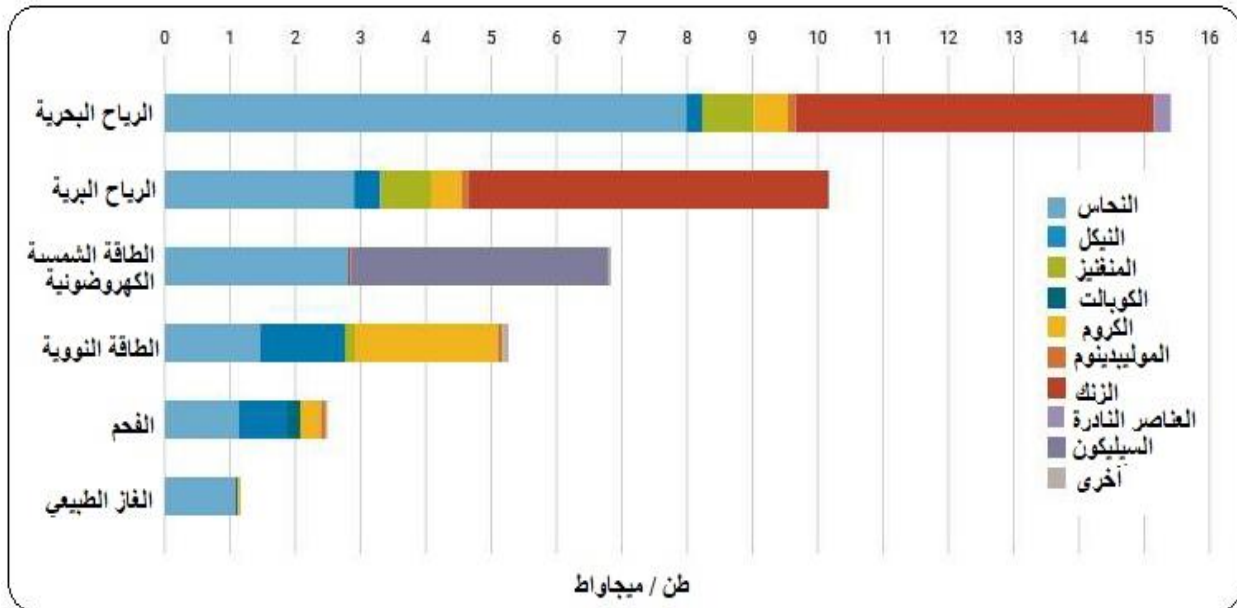
¹¹ Grid Connection Barriers To New-Build Power Plants In the United States, January 13, 2025

الطاقة الموزعة، مثل ألواح الطاقة الشمسية فوق الأسطح، حيث يزيد استخدام العملاء لها لإمداد منازلهم بالكهرباء مع بيع الفائض مرة أخرى إلى المرافق.

2. قضايا سلاسل التوريد التي تواجه بعض التقنيات وعدم انتظام الإمدادات

يمثل واقع سلاسل الإمداد الخاصة بالموارد المعدنية والتعدين المادي لتصنيع المكونات المرتبطة بإنتاج، ونقل وتخزين الطاقة المتجددة وتطبيقاتها والتي تتركز في مناطق محددة من العالم، إلى جانب تركيز أكبر لتقنيات الاستخلاص والتنقية في دول معينة، تحدياً آخرأ في جملة التحديات التي تواجه الاستخدام الأوسع للطاقات المتجددة، فالعديد من تكنولوجيات الطاقة التي يجري نشرها كجزء من عملية التحول في مجال الطاقة هي تكنولوجيات كثيفة المواد والمعادن. على سبيل المثال، تحتاج محطات الطاقات المتجددة كميات معادن تفوق محطات الطاقة الأحفورية لتوليد نفس كمية الكهرباء، وبالمقارنة مع محطة غاز طبيعي لتوليد ميجاوات كهرباء، تحتاج محطة طاقة الرياح البحرية إلى حوالي 15 ضعف المعادن، وتحتاج محطة طاقة الرياح البرية إلى حوالي 10 أضعاف، وتحتاج محطة الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى حوالي 6 أضعاف لتوليد نفس كمية الكهرباء، بحسب الرابطة العالمية للطاقة النووية نقلاً عن تقديرات وكالة الطاقة الدولية (IEA)، كما هو موضح بالشكل التالي:

الشكل 5-1: المتطلبات الأساسية من المعادن للتقنيات المختلفة لتوليد الكهرباء، طن/ميجاواط



المصدر: December 2024، World Nuclear Association، Mineral Requirements for Electricity Generation

ومن جانب التطبيقات، يعتبر النحاس والنيكل والكوبالت المنغنيز والليثيوم من المعادن المهمة لمستقبل السيارات الكهربائية، وتشير تقديرات الوكالة الدولية للطاقة إلى أن بناء السيارات الكهربائية يتطلب ستة أضعاف المدخلات من المعادن الحرجة التي تتطلبها السيارات التقليدية التي تعمل بمحرك احتراق داخلي وتستخدم الوقود الأحفوري الذي تسعى السيارات الكهربائية إلى استبداله¹².

تؤثر هذه التحديات إلى ضرورة إيلاء اهتمام أكبر لتخضع الآثار البيئية والاجتماعية الإجمالية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة إلى دراسة متأنية لأنشطة الاستخراج والمعالجة التي ينطوي عليها نشر التكنولوجيا الخضراء كثيفة الاستخدام للموارد المعدنية، والذي إذا لم يتم إدارته بشكل صحيح، فقد يؤدي إلى إعاقة تحقيق أهداف المناخ وأهداف التنمية المستدامة ذات الصلة.

3. التحديات البيئية الناجمة عن التحول في قطاع الطاقة

بينما يطرح التحول العالمي لقطاع الطاقة القائم على المصادر المتجددة كمسار وحيد لمعالجة أحد أكبر قضايا القرن في البيئة وهو قضية التغير المناخي، تبرز تحديات بيئية عديدة تواجه الاستخدام الأوسع للطاقات المتجددة في مقدمتها متطلباتها الأساسية من المعادن والآثار البيئية المترتبة عن أنشطة الاستخراج والمعالجة المصاحبة، والمخلفات الخطرة الناتجة عن التخلص من بطاريات تخزين الطاقة (كبطاريات الليثيوم) وألواح الطاقة الشمسية والصعوبات التقنية والاقتصادية التي تعيق عملية إعادة تدوير الألواح الشمسية لفصل وتنقية السيليكون، وكذلك إعادة تدوير مراوح توربينات طاقة الرياح، كما تعتبر مسألة الاستخدام الجائر للأراضي لغرض إنتاج الوقود الحيوي وتشييد مزارع طاقة الرياح على حساب الغابات والاستصلاح الزراعي لإنتاج الغذاء من التحديات البيئية التي تبرز عائقاً أمام التوسع في استخدام هذه المصادر.

من جهة أخرى تؤدي ممارسات استخراج المعادن والتصنيع في الدول النامية من المسببات الأساسية لتلوث المياه العذبة والتي قد تتسبب في تعقيدات جيوسياسية نتيجة تلوث بعض الأنهار العابرة للحدود، كما تؤدي هذه الممارسات أيضاً إلى تأثيرات على نوعية الهواء بالبيئات المحلية وبالتالي زيادة التوتر الداخلي تجاه الشركات أو الحكومات.

¹² Mineral Requirements for Electricity Generation, World Nuclear Association, December 2024.

4. البعد السياسي للتحول في قطاع الطاقة والمفهوم الجديد لأمن الطاقة

ارتبط التحول الحالي في قطاع الطاقة العالمي، منذ بداياته الأولى بأدبيات التغير المناخي وقضايا الاحتباس الحراري، والتي ارتبطت بدورها بأجندات أمن الطاقة من منظور كبرى الدول الصناعية المتقدمة التي تمثل الجانب التقليدي لمستهلكي الوقود الأحفوري، وليس بخفي على المتتبع للأدبيات التي سوقت لتحول الطاقة منذ بداياته الأولى في مؤتمرات الأطراف المتتابعة كيف قامت الدول المتقدمة بتسييس مسألة الاحتباس الحراري عندما تراجع علماء البيئة والاقتصاديون إلى المقاعد الخلفية، وتصدر الساسة الصفوف الأمامية ليتم استخدام ملف التغير المناخي لخدمة أجندات أمن الطاقة من منظور الدول المستوردة للنفط والغاز التي تعتمد في معظم إمداداتها على البلدان النامية، حيث توقف الصراع حول أمن الطاقة بمحطات متعددة، إلى أن تبلورت الجهود الدولية في إدارته في تأسيس منتدى الطاقة العالمي في المملكة العربية السعودية عام 2002 لخدم منصة رئيسية للحوار بين المستهلكين والمنتجين.

ومع دخول حقبة التحول في قطاع الطاقة مرحلة التنفيذ، تبنت الدول الداعمة للتحول الشامل، سرداً أحادي الجانب روجت له باعتباره المسار الوحيد الممكن لتحقيق خفض كبير في الانبعاثات، من خلال الدفع بتوجيه دفعة الاستثمار نحو مصادر الطاقة المتجددة والنووية وإقصاء مصادر الطاقة الأحفورية عبر الترويج لوقف الاستثمارات في قطاعاتها، بينما نادى دولاً أخرى صناعات القرار لإطلاق سياسات غير تمييزية تفسح المجال أمام تغيير حقيقي يشمل كل مصادر الطاقة المتاحة، ويحقق التكامل في منظومة الطاقة لصالح المنتجين والمستهلكين وأولئك الذين يستثمرون في صناعة الطاقة في كافة مراحلها ومصادرها.

ويستند هذا الطرح إلى ضرورة أن يستوعب صناعات السياسات بشكل لا لبس فيه، أن جميع مصادر الطاقة يجب أن تكون جزءاً من الحل لتحدي تغير المناخ، وأن حجم التحدي يعني أنه لا يوجد مصدر طاقة واحد يمثل حلاً سحرياً، كما لا يمكن التغاضي عن مساهمة صناعة النفط والغاز بأكملها، فهذا ليس سباقاً نحو مصادر الطاقة المتجددة وحدها، بل هو سباق نحو خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وبالتالي فإن مساهمة صناعة النفط والغاز بما تمتلكه من دراية وخبرة لازمة للحد من بصمتها البيئية، أمر ذو تأثير إيجابي لا يجب إغفاله.

ويؤكد هذا الطرح على أن ما يقوله العلم والإحصاءات في قطاع الطاقة هو أن العالم بحاجة إلى تقليل الانبعاثات واستخدام الطاقة بكفاءة أكبر من خلال الابتكار في تطوير حلول تكنولوجية أنظف وأكثر كفاءة للمساعدة في تقليل الانبعاثات، كما أن التحدي البيئي لا يكمن في النفط والغاز في حد ذاتهما، بل في الانبعاثات الناتجة عن

حرقهما، لذا لا بد من بذل المزيد من الجهود في سبيل تسخير قدرة صناعة النفط والغاز على الابتكار التكنولوجي لإيجاد الحلول التي تقلل من هذه الانبعاثات وتزيلها في نهاية المطاف، ومواصلة التطلع باستمرار إلى تطوير واعتماد تكنولوجيات طاقة أنظف، فضلاً عن سياسات الطاقة الشاملة وغير التمييزية، التي يمكن معها تلبية الطلب المستقبلي المتوقع على الطاقة، بطريقة مستدامة وأكثر كفاءة من أي وقت مضى. غير ذلك، فإن السياسات التمييزية محدودة النطاق، ذات النظرة الأحادية، سوف تقودنا إلى سيناريو خطير محتمل، قد يزيد من التقلبات بشكل كبير، ولن يساعد في تمكين التحول إلى مسار جديد ومستدام في التعامل مع الطاقة، وتقييم التكاليف السياسية والاقتصادية والاجتماعية والمناخية المترتبة على هذا التحول.

ومن جانب آخر، تتركز المعادن اللازمة للتحول في قطاع الطاقة القائم على المصادر المتجددة في دول أغلبها من الدول النامية، مما أدى إلى احتدام التنافس العالمي بين الدول الكبرى التي تملك الموارد المالية والتقنية اللازمة لاستخلاص واستغلال موارد تلك الدول النامية التي تسعى إلى تحقيق طفرات في النمو اعتماداً على ثرواتها الطبيعية، كما يعتبر تغيير خريطة النفوذ الجيوسياسي الذي سوف ينتج عن إعادة رسم طرق تجارة الطاقة في عالم يمكن فيه إنتاج الطاقة المتجددة في كثير من الدول، من الممكن أن تصبح بعض القوى الدولية أقل قدرة على ممارسة نفوذها التقليدي في التحكم في أعالي البحار والممرات البحرية الاستراتيجية اللازمة للصادرات ولنقل الوقود الأحفوري.

الخلاصة والتوصيات:

خلصت الدراسة إلى ما يلي:

- ✓ حققت مصادر الطاقات المتجددة (غير الكهرومائية) أسرع معدلات النمو في استهلاك مصادر الطاقة الأولية خلال الفترة (2013 – 2023)، حيث نمت بالخانة الزوجية بمعدل 12.3%، فبلغت حصتها نحو 42.4% من إجمالي الزيادة في الاستهلاك العالمي من مصادر الطاقة الأولية خلال هذه الفترة.
- ✓ تستأثر الصين بنصيب الأسد في إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقات المتجددة، بحصة بلغت نحو 30.4% من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقة الكهرومائية، وحوالي 28.4% من إجمالي الاستهلاك العالمي لمصادر الطاقات المتجددة الأخرى خلال عام 2021.
- ✓ شهد إجمالي قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة نمواً بمعدل 7.4% خلال الفترة (2000-2023) ليرتفع من حوالي 0.8 تيراواط خلال عام 2000 إلى نحو 3.9 تيراواط خلال عام 2023، حيث حققت الطاقات الشمسية أسرع معدلات النمو بقفزات سنوية بلغت 35.9%، بينما حققت طاقات الرياح ثاني أعلى معدلات النمو بوثيرة سنوية بلغت نحو 19.5% خلال ذات الفترة.
- ✓ اجتذبت الطاقة الشمسية وطاقة الرياح النصيب الأكبر من إجمالي الاستثمارات العالمية المخصصة لتقنيات الطاقة المتجددة خلال الفترة (2013-2022)، بحصة تدرجت من 82.3% خلال عام 2013 إلى 96.7% خلال عام 2022، فارتفعت حصة الطاقة الشمسية من إجمالي قدرات التوليد العالمية المركبة من الطاقات المتجددة من 0.2% خلال عام 2000 إلى نحو 36.7% خلال عام 2023، وارتفعت حصة طاقة الرياح من 2.3% خلال عام 2000 إلى نحو 26.3% خلال عام 2023.
- ✓ حققت آسيا أسرع معدلات النمو في إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة بالخانة الزوجية بمعدل 11.2% خلال الفترة (2000 – 2023)، لتستحوذ آسيا على نحو ثلثي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، ونصف القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقات الرياح خلال عام 2023.
- ✓ تستأثر الصين على حصة بلغت نحو 43% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، ونحو 43.4% من إجمالي القدرات المركبة العالمية لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح

- ✓ خلال عام 2023، بينما بلغت حصة أوروبا مجتمعة نحو 20.3% من إجمالي القدرات العالمية المركبة للطاقة الشمسية، نحو 25.1% من إجمالي القدرات العالمية المركبة من طاقات الرياح.
- ✓ الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح البرية كانتا نجمتي النمو الذي شهدته القدرات الانتاجية للطاقات المتجددة عالمياً خلال السنوات الماضية، حيث نمت إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء منهما بوثيرة الخانة الزوجية، فسجلت الأولى قفزات سنوية بلغت نحو 26% خلال الفترة (2014-2023)، بينما سجلت الثانية معدل نمو سنوي بلغ نحو 12% خلال ذات الفترة.
- ✓ حققت طاقة الرياح البحرية واثراً متسارعة بمعدل سنوي بلغ 27% في قدراتها المركبة لتوليد الكهرباء خلال الفترة (2014-2023)، إلا أن سوق الرياح البحرية لا زالت متواضعة نظراً لصغر حجمها بالمقارنة مع سوق الرياح البرية حالياً حيث بلغت حصة الرياح البحرية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح نحو 7.2% خلال عام 2023.
- ✓ كانت أوروبا القوة الأكبر خلف نمو سوق الرياح البحرية في سنواتها الأولى حيث استحوذت على حصة بلغت نحو 94% خلال عام 2014، ثم شهدت سوق الرياح البحرية في الصين انطلاقة قوية لتتجاوز الصين حصة أوروبا في أسواق الرياح البحرية مستحوذة على كرسي القيادة في هذا السوق، باستحواذها على نحو 51.2% من إجمالي القدرات العالمية خلال عام 2023، بينما تراجع حصة أوروبا إلى نحو 44.4%.
- ✓ تمتلك الدول العربية إمكانات هائلة من مصادر الطاقات المتجددة، فهي تقع في منطقة جغرافية تمتاز بأعلى سطوع شمسي على الأرض وسرعات ريحية معتدلة إلى مرتفعة، ولدى بعض الدول العربية موارد كبيرة أيضاً من مصادر الطاقة المائية، وجميع هذه الدول مؤهلة لاستغلال هذه الموارد المتجددة، إلا أن جميع هذه الموارد لم تستغل كما يجب حتى الآن.
- ✓ لم تتجاوز حصة الدول العربية من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية 1.3%، وطاقة الرياح 0.5%، والكهرومائية 0.7%، وحوالي 0.9% من إجمالي القدرات العالمية المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة مجتمعة خلال عام 2023.
- ✓ تركز نحو 51% من إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة للدول العربية خلال عام 2023 في ثلاث دول هي مصر ثم الإمارات ثم المغرب، حيث استأثرت مصر بنحو خمس إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء من الطاقات المتجددة للدول العربية، بينما بلغت حصة الإمارات نحو 18.3%، والمغرب حوالي 12.4%.

- ✓ لم تتجاوز حصة الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقات المتجددة من إجمالي الاستثمارات العالمية 0.8% في أحسن أحواله خلال الفترة (2013-2022)، وقد اجتذبت الطاقة الشمسية وطاقات الرياح النصيب الأكبر من إجمالي الاستثمارات العامة في تقنيات الطاقة المتجددة للدول العربية.
- ✓ تركز نحو 84% من مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات الطاقة الشمسية خلال الفترة (2000 – 2022) والمقدرة بنحو 9.15 مليار دولار في ثلاث دول عربية هي المغرب ومصر والأردن، حيث بلغت حصة المغرب 48%، ومصر 25.7%، والأردن 10.4%.
- ✓ تركز نحو 83.2% من مجموع الاستثمارات العامة للدول العربية في تقنيات طاقة الرياح خلال الفترة (2000 – 2022) والمقدرة بنحو 4.05 مليار دولار في ثلاث دول عربية هي مصر والمغرب وتونس، حيث بلغت حصة مصر 44.1%، والمغرب 25.2%، وتونس 13.9%.
- ✓ تشهد التقنيات الحديثة لإنتاج الطاقة المتجددة تطورات سريعة، مدفوعةً بالتقنيات الرقمية الجديدة التي تُحدث ثورة في كيفية توليد الطاقة المتجددة وتوزيعها واستخدامها، وتتطور في عالمنا اليوم اتجاهات تكنولوجية واعدة لدفع النمو وتحسين كفاءة الطاقة، بدءاً بخلايا البيروفسكايت الشمسية المرنة، وبطاريات التدفق والبطاريات ذات الحالة الصلبة لتخزين الطاقة، وتوربينات الرياح العائمة، وتقنيات الهيدروجين، وقطارات الطاقة الشمسية، إلى شبكات الكهرباء الذكية واستخدامها لإنترنت الأشياء وتكنولوجيا سلاسل الكتل، حيث تعمل هذه التقنيات على تغيير كيفية تفاعلنا مع الطاقة وخلق فرص جديدة لمستقبل أكثر استدامة ومرونة.
- ✓ شهد المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية تراجعاً بنسبة 90% خلال الفترة (2010-2023) لينخفض من حوالي 0.46 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.044 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023.
- ✓ شهد المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات الطاقة الشمسية المركزة تراجعاً بنسبة 70% خلال الفترة (2010-2023) لينخفض من حوالي 0.393 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.117 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023.
- ✓ شهد المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات طاقة الرياح البرية تراجعاً بنسبة 70% خلال الفترة (2010-2023) لينخفض من حوالي 0.111 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.033 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023.

- ✓ شهد المتوسط العالمي المرجح للتكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من تقنيات طاقة الرياح البحرية تراجعاً بنسبة 63% خلال الفترة (2010-2023) لينخفض من حوالي 0.203 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2010 إلى حوالي 0.075 دولاراً/كيلوواط ساعة خلال عام 2023.
- ✓ تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى نسبة 44% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 511% خلال عام 2010.
- ✓ تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البرية إلى نسبة 33% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 123% خلال عام 2010.
- ✓ تراجعت التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البحرية إلى نسبة 75% من التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء من الخيارات القائمة على الوقود الأحفوري خلال عام 2023، مقارنة بنسبة 226% خلال عام 2010.
- ✓ أصبح من المؤكد الآن وبإجماع كل المؤسسات الدولية المعنية بالتوقعات المستقبلية في شؤون الطاقة، أن التحول الشامل إلى قطاع للطاقة يعتمد على المصادر المتجددة بات أمراً قيد التنفيذ، إلا أن الخلاف القائم هو في تحديد المسارات الأكثر ترجيحاً وسرعاتها، ولا توجد صورة فريدة لمسار أكثر ترجيحاً في المستقبل، نحن نتعامل مع نظام معقد ومتعدد المكونات، بسبب تشابك العوامل المؤثرة في مستقبل مزيج الطاقة العالمي والضبابية المحيطة بها.
- ✓ من المتوقع أن يتراوح إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية خلال عام 2050 بين حده الأدنى المتوقع بنحو 322 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم وحد الأعلى عند نحو 391 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم، بينما تتوقع الحالة المرجعية أن يسجل إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية نمواً بنحو 1.2% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 327 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.7% خلال باقي الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة الأولية نحو 374 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050.
- ✓ من المتوقع أن يتراوح إجمالي الطلب العالمي على الفحم خلال عام 2050 بين حده الأدنى المتوقع بنحو 14 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم وحد الأعلى عند نحو 49 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم بحيث يسجل انكماشاً بنحو 1.7% خلال الفترة (2023-2050) بحسب الحالة المرجعية.

✓ من المتوقع أن يتراوح إجمالي الطلب العالمي على النفط خلال عام 2050 بين حده الأدنى المتوقع بنحو 88 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم وحد الأعلى عند نحو 116 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم، بينما تتوقع الحالة المرجعية نمو إجمالي الطلب العالمي على النفط بنحو 1.5% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 103 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.3% خلال باقى الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على النفط نحو 110 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050.

✓ من المتوقع أن يتراوح إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي خلال عام 2050 بين حده الأدنى المتوقع بنحو 64 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم وحد الأعلى عند نحو 96 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم، بينما تتوقع الحالة المرجعية نمو إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي بنحو 1.4% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 76 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب إلى نحو 0.8% خلال باقى الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي نحو 90 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050.

✓ من المتوقع أن يتراوح إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية خلال عام 2050 بين حده الأدنى المتوقع بنحو 126 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم بحيث يسجل نمواً بنحو 3.3% خلال الفترة (2023-2030) ليبلغ نحو 77 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2030، ثم يتباطأ نمو الطلب قليلاً إلى نحو 2.5% خلال باقى الفترة (2030-2050) ليبلغ إجمالي الطلب العالمي على مصادر الطاقة المتجددة والنووية نحو 126 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050 بحسب الحالة المرجعية، وبين حده الأعلى عند نحو 157 مليون برميل مكافئ نفط/اليوم خلال عام 2050.

✓ وتتجلى الوجهة المستقبلية لمزيج الطاقة العالمي الناتج عن التحول الذي يشهده القطاع خلال المرحلة الحالية والمستقبل المنظور في ارتفاع كبير في توقعات حصة مصادر الطاقة المتجددة والنووية من مزيج الطلب العالمي على المصادر الأولية من 20.3% خلال عام 2023 إلى حصة متوقعة تتراوح بين (33.6% - 48.7%) خلال عام 2050، مقابل انحسار مناظر لحصة الفحم من حوالي 25.9% خلال عام 2023 إلى حصة تتراوح بين (4.3% - 13.1%) متوقعة خلال عام 2050.

✓ تشير التوقعات إلى تراجع طفيف في حصة النفط من مزيج الطلب العالمي على المصادر الأولية من 30.9% خلال عام 2023 إلى حصة متوقعة تتراوح بين (27.3% - 29.7%) خلال عام 2050، بينما من المتوقع أن تتراوح حصة الغاز الطبيعي من مزيج الطلب العالمي على المصادر الأولية من بين (19.8% - 24.6%) خلال عام 2050، مقارنة بحصة بلغت نحو 22.9% خلال عام 2023.

وقد أوصت الدراسة بما يلي:

- ☞ تؤكد الموارد الهائلة لمصادر الطاقة المتجددة المتوفرة في الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، وخاصة الطاقة الشمسية وطاقت الرياح من جهة، والتجارب الناجحة للعديد من دول العالم في استغلال مواردها من هذه المصادر وانخفاض تكلفتها بالتوازي مع زيادة انتشارها من جهة أخرى، على إمكانية أحداث تغيير ملموس في كيفية الاستخدام الأمثل لموارد الطاقة الشمسية وطاقت الرياح وتقنيات الهيدروجين في الدول الأعضاء، لتوفر رافداً مهماً للنفط والغاز في مزيج الطاقة المحلي من جانب، ولتعزيز مصادر الدخل عن طريق تحرير المزيد من النفط والغاز للتصدير من جانب آخر، ودعم الإيرادات العامة بعوائد إضافية عن طريق تصدير الكهرباء المولدة من الطاقات المتجددة في مرحلة لاحقة للأسواق الإقليمية المجاورة، التي توفر آفاقاً واعدة للطلب على الكهرباء في المستقبل.
- ☞ تؤكد الدراسة بشكل واضح لا لبس فيه أن جميع مصادر الطاقة يجب أن تكون جزءاً من الحل لتحدي تغير المناخ، وأن حجم التحدي يعني أنه لا يوجد مصدر طاقة واحد يمثل حلاً سحرياً، ولا يمكن التغاضي عن مساهمة صناعة النفط والغاز بأكملها، فهذا ليس سباقاً نحو مصادر الطاقة المتجددة وحدها، بل هو سباق نحو خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وبالتالي فإن مساهمة صناعة النفط والغاز بما تمتلكه من دراية وخبرة لازمة للحد من بصمتها البيئية، أمر ذو تأثير إيجابي لا يجب إغفاله.
- ☞ إن التوازن بين التنمية والمحافظة على البيئة يتطلب توشي المسؤولية في استخدام كل مصادر الطاقة على حد السواء. وحيث أن من أهم سمات هيكل استهلاك الطاقة الحالي بالدول الأعضاء هو الاعتماد شبه الكامل على النفط والغاز، فإن استمرار النمو في معدلات استهلاك الطاقة بالدول الأعضاء بنفس الوتيرة سوف يزيد من الضغوط على الحصة المتاحة للتصدير في المستقبل، وبالتالي على مصادر الدخل الرئيسية في الدول الأعضاء.
- ☞ إن ما يقوله العلم والإحصاءات في قطاع الطاقة هو أن العالم بحاجة إلى تقليل الانبعاثات واستخدام الطاقة بكفاءة أكبر من خلال الابتكار في تطوير حلول تكنولوجية أنظف وأكثر كفاءة للمساعدة في تقليل الانبعاثات، كما وجب التنويه هنا إلى أن التحدي البيئي لا يكمن في النفط والغاز في حد ذاتهما، بل في الانبعاثات الناتجة عن حرقهما، لذا لا بد من بذل المزيد من الجهود في سبيل تسخير قدرة الصناعة النفطية على الابتكار التكنولوجي لإيجاد الحلول التي تقلل من هذه الانبعاثات وتزيلها في نهاية المطاف.
- ☞ تختزن الأقطار الأعضاء في أوابك فرصاً استثمارية هائلة في قطاع الطاقات المتجددة، على غرار قطاع النفط والغاز، بسبب الموارد الضخمة والنمو القوي في الطلب المحلي على الطاقة، وتواجه بعض هذه

الدول تحدياً حقيقياً بسبب الضغوط على ميزانياتها المترتبة عن المفاضلة بين ضخ مبالغ طائلة في هذه الاستثمارات ما بين هذين القطاعين، وبين الاحتياجات الاستثمارية في القطاعات الاقتصادية الأخرى لتحقيق التوازن القطاعي للتنمية، ولكن الاستثمار في المزيد من حصة الطاقات المتجددة في مزيج الطلب المحلي يعني تحرير المزيد من النفط والغاز للتصدير، وتوفير المزيد من الوظائف الجديدة في الأجل القصير، وتحقيق الاستدامة في الأجل الطويل، لذا ينبغي على الدول التي تواجه هذا التحدي أن تفكر جدياً في الدور الحيوي للتخطيط الاستراتيجي الطويل الأمد في تحقيق أهداف واضحة ومستدامة وتقديم خارطة طريق شاملة تستهدف توجيه الاستثمارات والمشاريع نحو المسارات المحددة، ولا يجب أن يقف دور التخطيط الاستراتيجي عند مجرد وضع الأهداف، بل يجب أن يشمل تصميم البرامج الواضحة والإجراءات التنفيذية الدقيقة (بما يشمل في هذا السياق الإصلاحات التشريعية الممكنة لتعزيز جاذبية الاستثمار)، مما يتيح قياس التقدم بشكل دوري وتحديد مجالات التحسين.

☞ ضرورة العمل على تحديث مرافق الكهرباء والشبكات الكهربائية التي تقوم هذه المرافق بتشغيلها في الدول التي تعاني مشكلة في ضعف المرافق والشبكات، فلن تكون مصادر الطاقة المتجددة وفي مقدمتها طاقة الرياح والطاقة الشمسية قادرة على إحداث التحول المنشود، ما لم تكن مرافق الكهرباء قوية ومستدامة مالياً، ومؤهلة لجذب الاستثمارات اللازمة لتحديث الشبكات وتلبية الاحتياجات التي تزداد تعقيداً، فالطاقة المتجددة تختلف عن الطاقة الأحفورية حيث تعتمد الطاقة الشمسية وطاقات الرياح على عوامل الطقس، وتتغير تبعاً لتغيراتها من موسم لآخر، وأحياناً من دقيقة لأخرى، لذلك يجب أن يشمل تحديث البنى التحتية القائمة تهيئتها لمواجهة هذه التغيرات، كما يحتاج القطاع أيضاً إلى توجيه المزيد من الاستثمار لإدارة كميات أكبر من مصادر الطاقة الموزعة، مثل ألواح الطاقة الشمسية فوق الأسطح، حيث يزيد استخدام العملاء لها لإمداد منازلهم بالكهرباء مع بيع الفائض مرة أخرى إلى المرافق.

☞ ضرورة الاهتمام بإخضاع الآثار البيئية والاجتماعية الإجمالية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة إلى دراسة متأنية لأنشطة استخراج ومعالجة المعادن التي ينطوي عليها نشر التكنولوجيا الخضراء كثيفة الاستخدام للموارد المعدنية، والذي إذا لم يتم إدارته بشكل صحيح، فقد يؤدي إلى إعاقة تحقيق أهداف المناخ وأهداف التنمية المستدامة ذات الصلة.

☞ يجب أن ينتقل مفهوم التعاون الدولي في مجال إدماج الطاقات المتجددة في منظومة الطاقة العالمية من مفهوم التفاهات رقيقة المستوى إلى مستوى التطبيق العملي، وأن يعمل في شكل شراكات تقنية و فرق عمل تنفيذية مشتركة، بصورة يمكن معها جلب اللاعبين الدوليين الحقيقيين، في مختلف مراحل سلاسل توريد صناعة الطاقة المتجددة للعمل معاً على تحقيق هدف واحد، هو إيجاد وتطبيق الحلول الفعلية

للتحديات الحقيقية التي تشكل في مجموعها عوائق التقنية والتكلفة، والتي تقيد انطلاقة التصنيع المرتبطة بصناعة الطاقات المتجددة على كافة مراحل سلاسل توريدها.

➤ توصي الدراسة بالعمل على وضع بند النقل السلس للمعرفة والتكنولوجيا من الدول التي تمتلك المعرفة إلى الدول صاحبة الموارد، على أجندة الحوار العالمي في مجال الطاقة من خلال اتفاقات واسعة النطاق تمهد الطريق لشراكات عادلة، تعزز الانتقال الطموح لانتشار واسع للطاقات المتجددة، بصورة عادلة في الجغرافيا العالمية.

➤ توصي الدراسة بإعداد خرائط مفصلة لسلاسل التوريد العالمية لصناعة الطاقات المتجددة، توضح الدول أو الأقاليم المؤهلة لتوطين المحتوى، وتحقيق القيمة المضافة، لتحقيق التنويع في توزيع المصادر والإنتاج، وسلاسل التوريد الإقليمية.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

1. اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا، الطاقة المتجددة: التشريعات والسياسات في المنطقة العربية، حقائق صحفية، 2019.
2. الوكالة الدولية للطاقات المتجددة، أسواق الطاقة المتجددة: مجلس التعاون الخليجي 2023، 2023.
3. الوكالة الدولية للطاقات المتجددة، الجغرافيا السياسية لتحول الطاقة: المواد الحرجة، 2023.
4. الوكالة الدولية للطاقات المتجددة، جيوسياسية تحول قطاع الطاقة: عامل الهيدروجين، 2022.
5. الوكالة الدولية للطاقات المتجددة، تقرير عن تكاليف توليد الطاقة المتجددة لعام 2023، 2024.
6. منظمة الأقطار العربية المصدرة للبتترول، مزيج الطاقة في الدول الأعضاء في منظمة أوابك "الوقع الحالي وفرص التنوع"، 2016.
7. مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية، ورقة نقاش: تقييم إمكانية تركيب ساعات توربينات الرياح البحرية العائمة في البحر الأحمر، يونيو 2024.

ثانياً: المراجع الأجنبية

1. *Bp, Statistical Review of World Energy, June 2022 & 2024.*
2. *Global Wind Energy Council, Global Wind Report, 2024.*
3. *IRENA, Off-Grid Renewable Energy Statistics, 2024.*
4. *IRENA, Renewable Capacity Statistics, 2024.*
5. *IRENA, Renewable Energy Statistics, 2024.*
6. *IRENA, Renewable power generation costs, 2021 & 2023.*
7. *IRENA, Smart Grids and Renewable, A guide for effective deployment, Nov.2013.*
8. *IRENA, World Energy Transitions Outlook 2023.*
9. *IRENA, IRENASTAT Online Data Query Tool.*
10. *OPEC, World Oil Outlook 2050, 2024.*
11. *Caltech, In a first, Caltech Space Solar Power Demonstrator Wirelessly Transmits Power in Space, June 2023.*

ملحق الجداول

الجدول (1)

إجمالي قدرات توليد الكهرباء العالمية المركبة من الطاقات المتجددة
ميجاواط

إجمالي الطاقات المتجددة	طاقة الرياح	الطاقة الشمسية	الطاقة البحرية	الطاقة الكهرومائية*	الطاقة الحرارية الجوفية	الطاقة الحيوية	
752239	16964	1216	238	696580	8273	28968	2000
775469	23959	1466	240	709695	7961	32149	2001
795186	30725	1811	243	720965	8113	33329	2002
827128	38664	2334	244	741794	8188	35902	2003
860630	47659	3419	243	762444	8209	38656	2004
900525	58468	4925	241	784837	8556	43497	2005
942658	73148	6475	240	806595	8759	47441	2006
994115	91521	8948	243	833796	9013	50594	2007
1057455	115535	15215	246	862594	9319	54546	2008
1137476	150103	23537	245	892390	9754	61448	2009
1224700	181061	41531	250	925870	9914	66074	2010
1329757	220199	72820	248	953932	10059	72499	2011
1442697	267310	103028	255	984708	10518	76879	2012
1565313	299929	140209	510	1029604	10786	84275	2013
1698287	349458	179632	514	1067334	11249	90101	2014
1852488	416435	228074	514	1099508	11847	96110	2015
2014995	467241	300138	525	1130045	12173	104874	2016
2185704	514930	395846	528	1151058	12754	110589	2017
2360950	563680	491980	528	1173784	13157	117821	2018
2548678	622730	595020	526	1192481	13824	124098	2019
2819239	733473	726221	505	1212866	14157	132017	2020
3083423	824321	870635	504	1235193	14432	138338	2021
3391341	902883	1070843	506	1258170	14653	144286	2022
3864514	1017390	1418008	508	1264742	15026	148840	2023

لا تشمل ضخ الطاقات الكهرومائية المخزنة*

*excl. pumped storage

Source:

IRENA (2024), Renewable Energy Statistics 2024, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi

الجدول (2)
التوزيع الجغرافي لإجمالي قدرات توليد الكهرباء العالمية المركبة من الطاقات المتجددة
جيجاواط

العالم	أخرى	أمريكا الجنوبية	أمريكا الشمالية	الشرق الأوسط	أوروبا	أوراسيا	آسيا	أفريقيا	
752	19	113	171	5	191	61	171	22	2000
775	20	115	174	5	196	61	182	22	2001
795	20	117	177	5	204	62	188	22	2002
827	20	121	180	6	211	63	202	23	2003
861	21	125	181	8	221	63	218	23	2004
901	22	128	185	10	234	64	235	23	2005
943	22	132	190	10	245	65	256	23	2006
994	23	137	198	11	257	66	279	23	2007
1057	24	139	208	11	273	67	312	24	2008
1137	25	142	221	11	295	68	350	26	2009
1225	26	147	233	12	322	70	388	27	2010
1330	28	152	244	13	361	72	434	27	2011
1443	30	156	264	14	395	77	478	28	2012
1565	32	161	274	14	419	81	553	31	2013
1698	34	170	288	16	440	85	633	33	2014
1852	38	179	309	16	465	89	722	35	2015
2015	40	194	333	17	489	92	813	37	2016
2186	43	203	350	17	513	97	921	43	2017
2361	49	214	368	19	538	101	1025	48	2018
2549	56	224	393	21	575	104	1125	50	2019
2819	63	233	425	24	609	110	1301	54	2020
3083	69	247	462	26	651	116	1456	56	2021
3391	76	267	492	31	716	119	1631	59	2022
3865	83	290	527	36	786	122	1959	62	2023

Source:

IRENA (2024), Renewable Energy Statistics 2024, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi

الجدول (3)

إجمالي قدرات توليد الكهرباء المركبة من الطاقات المتجددة بالدول العربية خلال عام 2023
ميجاواط

إجمالي الطاقات المتجددة	أخرى	الطاقة الكهرومائية	طاقة الرياح	الطاقة الشمسية	
590	0	129	10	451	الجزائر
59	0	0	3	57	البحرين
80	0	0	80	0	جيبوتي
6709	131	2832	1890	1856	مصر
1599	0	1557	0	42	العراق
2621	13	4	614	1990	الأردن
114	0	0	12	102	الكويت
1297	7	282	3	1005	لبنان
8	0	0	0	8	ليبيا
244	0	193	0	51	مدغشقر
260	0	0	137	123	موريتانيا
4105	7	1306	1858	934	المغرب
722	0	0	50	672	عمان
824	19	0	0	805	قطر
2988	0	0	403	2585	السعودية
192	0	0	0	192	فلسطين
1871	199	1482	0	190	السودان
1557	7	1490	1	60	سوريا
817	0	66	245	506	تونس
6035	29	0	99	5907	الإمارات
290	0	0	0	290	اليمن
32983	412	9340	5405	17826	الإجمالي

Source: IRENA (2024), Renewable Energy Statistics 2024, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi



البحث الثالث

تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة متجددة

د. نواف جمعة *

* دكتورة في الهندسة الكيميائية/اختصاص التلوث وحماية البيئة/

المقدمة

تؤثر في استهلاك الطاقة عوامل عديدة نذكر منها:

١- أسعار الطاقة المحلية والعالمية،

٢- القوانين الناظمة والتشريعات،

٣- التقدم التكنولوجي،

٤- معدل نمو السكان العالمي السنوي،

لقد أدى الاستهلاك العالمي المكثف للطاقات الأحفورية منذ منتصف القرن التاسع عشر وحتى الآن لمواكبة التنمية الاجتماعية والاقتصادية، إلى تزايد انبعاثات غازات الدفيئة وخصوصاً CO₂ في الغلاف الجوي للأرض بشكل كبير، مما ساهم في رفع متوسط درجة الحرارة على كوكب الأرض عام 2010 أكثر من 39% عن المستويات قبل الثورة الصناعية. ولحد من هذه الانبعاثات مع الاستمرار في تلبية الطلب العالمي على الطاقة، يجب توسيع استخدام التقانات المتقدمة في الطاقة المتجددة والجديدة، عن طريق دعم التحول إلى نظام طاقي يعتمد على موارد نظيفة، ووفقاً لتقرير SRREN الصادر عام 2011 يمكن للتقنيات الحديثة توفير وإنتاج أنواع متعددة من الطاقة تلبية الطلب الكبير باستخدام مصادر متجددة ذات أثر بيئي منخفض.

مع الاستنزاف الكبير لمصادر الطاقة التقليدية، تفاقمت أزمة التلوث والتي أدت إلى تدهور بيئي خطير، مما دفع المجتمعات نحو تبني بدائل نظيفة. وقد دعت "اتفاقيات كانكون الدولية للحد من زيادة متوسط درجات حرارة الأرض لئلا تزيد عن أكثر من درجتين مئويتين مقارنة مع ما كانت عليه قبل الثورة الصناعية"، وتم الاتفاق على السعي لتقليل الزيادة إلى 1.5 °C. لا تزال الطاقات الأحفورية المصدر الرئيسي للطاقة، وخاصة لدول وسط أفريقيا وجنوب آسيا، وعالمياً يتم التوسع ببطء في استخدام مصادر الطاقة المتجددة، وزيادة استهلاك الوقود الحيوي السائل الناتج عن التخمر (الايثانول) كبديل للمشتقات النفطية، ولكن بشكل محدود نظراً لارتفاع تكلفة إنتاجه ونقله، وخاصة في الاتحاد الأوروبي و البرازيل. (مبللة، 2019) [5]

تأتي أهمية البحث من أهمية الطاقات المتجددة في خفض التلوث البيئي، والحيلولة دون نزوب الطاقة الأحفورية، وتحقيق التنمية المستدامة.

كثير من دول العالم ليس لديها اكتفاء ذاتي من الطاقات الأحفورية مما يعرضها لخطر تقلب أسعار النفط، لذلك البديل الأهم هو الطاقات المتجددة والجديدة الموجودة في جميع دول العالم.

يعزى ضعف استخدام تطبيقات الطاقة المتجددة في الدول النامية إلى الاعتماد على التمويل الأجنبي، وضعف مشاركة القطاع الخاص، ووجود بعض المعوقات الفنية والمالية والمؤسسية التي يجب العمل على تطويرها وزيادة استخدامها. ينبغي التأكيد على استمرار حاجة العالم إلى الوقود الأحفوري حتى ما بعد عام 2050 وبالتالي لا بد من التركيز على القضايا التالية:

١. إرساء الأسس النظرية للتنمية المستدامة ودور الطاقات المتجددة في ذلك.
٢. ترشيد استهلاك الطاقة الأحفورية،
٣. التلوث البيئي ظاهرة لا تعرف الحدود و يمكن أن تنتج تلوثاً عابراً للقارات لذلك ينبغي التوسع في استغلال الطاقات المتجددة.
٤. تحويل نفايات زيوت المطبخ والنفايات البلاستيكية والنفايات العضوية والنفايات الألمنيومية إلى طاقة.

تتلخص مشكلة البحث في الاعتماد الكبير على مصادر الطاقة الأحفورية غير المتجددة، ناهيك عن التلوث البيئي الكبير بسبب تشكل مزيج غازي من أكاسيد الكربون وأكاسيد الكبريت وأكاسيد الأوزون إضافة إلى الجسيمات الصلبة الدقيقة والمركبات الهيدروكربونية وجميعها تسهم في تشكل الظواهر المتعددة لتلوث البيئة وبشكل خاص الاحتباس الحراري وثقب طبقة الأوزون والضباب الدخاني والأمطار الحامضية. [7] (نوال بو عالق-2017).

الأسئلة التي سيجيب عليها البحث تتعلق بكيفية تغطية الطلب الكبير على الطاقة بالاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة، وبشكل خاص كيفية استغلال النفايات التي تلوث البيئة والاستفادة منها لتوليد الوقود الحيوي، مثل إنتاج الديزل الحيوي من نفايات الزيوت النباتية المستهلكة، وإنتاج الغاز الحيوي من النفايات العضوية المنزلية، والحصول على الوقود البلاستيكي من النفايات البلاستيكية الخطيرة، وإنتاج الهيدروجين بأكسدة النفايات الألمنيومية بحمض كلور الماء، وبذلك يتم تجنب البيئة الأثر الضارة الناجمة عن صرف هذه النفايات فيها، وتحويلها إلى قيمة مضافة.

أنتج وقود الديزل الحيوي في هذا البحث من نفايات الزيوت النباتية المستهلكة والجديدة، وتم تحليل الديزل الحيوي الناتج، وقورنت مواصفاته مع المواصفات القياسية للديزل الحيوي فكانت متطابقة، مما يعني إمكانية استخدامه كوقود سيارات بمزجه بنسب معينة مع المشتق النفطي. كذلك تم بحث تأثير تحويل النفايات البلاستيكية الخطيرة على البيئة، بعمليات تحلل حراري بوجود وعدم وجود حفازات غير متجانسة، وبينت النتائج تشكل عدة أنواع من المنتجات الصلبة

والسائلة والغازية عند ظروف التشغيل المختلفة، يمكن استخدامها كوقود بعد اخضاعها لبعض عمليات المعالجة والفصل بالتقطير عند الضغط الجوي.

تتجلى أهمية البحث بالقدرة على تحويل النفايات من مواد ملوثة للبيئة إلى طاقة تكون رديفاً للاقتصاد وتحافظ على الموارد الطبيعية للدول وصديقة للبيئة إضافة إلى خفض تكاليف إنتاج الوقود، واستخدام محفزات رخيصة الثمن، بما يساهم في إمكانية تحسين القدرة التنافسية لهذا النوع من الوقود وتعزيز انتشاره في إطار التوجه العالمي نحو خفض الانبعاثات الكربونية وتأمين مصادر متجددة للطاقة.

التخلص من الأثر البيئي الضار للنفايات البلاستيكية بتحويلها الى وقود صديق للبيئة، مما يمثل فرصة تجارية مربحة للمستثمرين في الاقتصاد الأخضر، وهي نهج مناسب فعلى سبيل المثال يمكن الاستفادة من الانتاج العالمي الهائل للنفايات البلاستيكية وتقليل الحجم الكبير لها تجنباً لدفنها أو حرقها، بسبب صعوبة التحلل الحيوي لها وهذا سيلحق ضرراً كبيراً بالنظام البيئي، لذلك تم التفكير في إعادة هذه النفايات إلى صورتها الأصلية وذلك بتسخينها بمعزل عن الهواء، وإجراء عملية تحلل حراري لها تضمن تحطيم الجزيئات الكبيرة الى جزيئات أصغر، بتسخينها عند درجات حرارة مرتفعة فينتج مزيج من الغاز وزيت الوقود والشمع والأكاسيد المعدنية، تختلف نسب مكوناته باختلاف درجات الحرارة المطبقة والزمن ووجود أو عدم وجود حفاز غير متجانس.

المزيج الغازي الناتج يتضمن العديد من المركبات مثل الهيدروجين و الميثان و الايثان و البروبان و البوتان و البوتلن و البروبلن و البوتاديين، و الشموع الناتجة تمثل مصدراً للوقود يمكن تحويلها بسهولة إلى شكل آخر للطاقة المتجددة، أما المخلفات الصلبة المعدنية فإن لها قيمة اقتصادية مهمة فهي تمثل مزيج من الأكاسيد المعدنية الهامة.

كذلك ناقش البحث إمكانية الاستفادة من النفايات العضوية المنزلية والحيوانية حيث انخفضت قيمة COD التي تعبر عن كمية المواد العضوية المتبقية في مزيج الكتلة الحيوية المعالجة، بكفاءة وصلت حوالي 85 % .

ناقش البحث أيضاً طريقة الاستفادة من النفايات الألمنيومية عبر أكسدتها بحمض كلور الماء المركز، فكان الناتج غاز الهيدروجين النظيف وأكسيد الألمنيوم وكمية كبيرة من الطاقة الحرارية.

بالنتيجة فإن الأنواع المتعددة من النفايات تشكل مصدراً مهماً من مصادر الطاقة المتجددة، يضاف إلى المصادر الأحفورية، وهي تتميز على هذه المصادر الطبيعية كونها طريقة فعالة

لتخليص البيئة من التلوث الذي يهدد الأرض التي نعيش على سطحها فضلاً عن دورها في دعم الاقتصاد والمحافظة على الموارد الطبيعية للدول بدلاً من أن تكون مصدراً لتلوث البيئة. يوصي البحث بزيادة الاستثمار في النفايات في بلداننا العربية، والمحافظة على مخزون استراتيجي من الطاقات الأحفورية للأجيال القادمة لتحقيق أمن الطاقة من جهة أخرى. وتشجيع القطاع الخاص على ذلك، ودعم المشاريع الصغيرة والمتوسطة للأهالي. كذلك الاستفادة من النفايات الزيتية التي تقدر بآلاف الأطنان وتحويلها إلى ديزل حيوي، بذلك تجنب الآثار السلبية الناجمة عن التخلص منها بشكل عشوائي. والاستفادة من النفايات البلاستيكية وإعادتها إلى صورتها الأساسية (وقود)، عن طريق إقامة مشاريع ضخمة لإعادة التدوير بشكل خاص بطرق التحلل الحراري مما يسهم في حماية البيئة البحرية والأرضية من أضرارها.

تحويل النفايات العضوية المنزلية إلى غاز حيوي يستخدم في الطبخ والإنارة وغير ذلك، بشكل خاص للمجتمعات الريفية النائية، والعمل على الاستفادة من مياه الصرف الصحي في هذه التجمعات التي لا يوجد فيها شبكة عامة للصرف وبذلك تتحقق غايتان: الأولى تجنب تشكل الديوكسانات نتيجة التخلص من الفضلات العضوية المنزلية في المكبات الصحية، وتجنب الآثار السلبية الناجمة عن تشكل غاز الهيدروجين في هذه المكبات نتيجة الضغوط ودرجات الحرارة المرتفعة مما يهدد بانفجارات في الأبنية القريبة من المكبات.

الاستفادة من الكميات الهائلة للنفايات الألمنيومية وتوليد الهيدروجين منها واسترجاع أكسيد الألمنيوم الهام.

توجيه أقصى درجات الاهتمام لحماية البيئة من التلوث عن طريق حملات التشجير الواسعة واعداد برامج متخصصة في زيادة الوعي البيئي والتعاون بين القطاعين العام و الخاص لتعميم التجربة على كامل البلاد.

ملخص تنفيذي:

يهدف البحث إلى:

- استغلال الطاقات المتجددة للحد من التدهور البيئي الناتج عن الطاقات الأحفورية.
- دراسة حالة بعض دول العالم في مجال الاستثمار في الطاقات المتجددة.
- تحديد الشروط المثلى لإنتاج الديزل الحيوي بأسترة نفايات الزيوت النباتية.
- تصنيع مفاعل للتحلل الحراري للنفايات البلاستيكية وتحديد الشروط المثلى لذلك.
- تصنيع مفاعل هضم لاهوائي للنفايات المنزلية العضوية والحيوانية وحساب كفاءة العملية.
- تصنيع وحدة معالجة خاصة لتحويل النفايات الألمنيومية إلى غاز الهيدروجين.

تناول الفصل الأول من هذا البحث و هو بعنوان الطاقات المتجددة مفهوم الطاقة وتطور الطلب العالمي عليها، وتم في هذا الفصل أيضاً دراسة الغازات الناتجة عنها وتأثيرها على التلوث البيئي، والآثار الايجابية لها ومساهماتها في خليط الطاقة الكهربائية في المنطقة العربية، والرؤى المستقبلية للطاقة المتجددة في بعض الدول العربية.

تناول الفصل الثاني و هو بعنوان مصادر الطاقة المتجددة، الحديث عن طاقة الكتلة الحيوية وطاقة الشمس والطاقة الحرارية الجوفية والطاقة المائية وطاقة الرياح وتطور استخدامها وواقعها في الوطن العربي والعالم، والخطة الاستراتيجية في مجال تنمية استخدامات الطاقات المتجددة حتى 2030، كذلك تم الحديث عن طاقة الهيدروجين، وخصائص وعيوب الطاقات المتجددة بأنواعها.

الفصل الثالث بعنوان إنتاج الديزل الحيوي من الكتلة الحيوية تناول استخدام نفايات زيوت الطبخ في إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة التحويلية، ودراسة ميزات ومساوئ استخدامه كوقود مقارنة مع الديزل البترولي، والانبعاثات الناتجة عن ذلك. كما تضمن الفصل الثالث طريقة تحضير الحفازات غير المتجانسة المستخدمة.

في الفصل الرابع درس إنتاج الوقود من التحلل الحراري الوسيط للنفايات البلاستيكية، وكميات وحجوم النفايات البلاستيكية على مستوى العالم، ومصادرها و أضرارها على البيئة و طرق ادارتها.

مخبرياً تم تصنيع مفاعل للتحلل الحراري للنفايات البلاستيكية، تبين تشكل مزيج من نواتج التحلل الحراري القابلة للاشتعال، ومزيج صلب من الأكاسيد المعدنية المسترجعة على شكل مسحوق أبيض مائل للاصفرار. تم تحليل النواتج المختلفة باستخدام طرق تحليلية عالية الانجاز تبين أن تركيبها مشابه للتركيب الكيميائي للوقود النفطي. تضمن الفصل طريقة تحضير الحفاز

غير المتجانس وحساب معدل تدفق الغاز الناتج، ومعدل التسخين في المفاعل باختلاف نوع المادة الخام المتحللة.

تضمن **الفصل الخامس** دراسة انتاج الغاز الحيوي من الكتلة الحية بالتخمير. تم تصميم مفاعل مخبري لتخمير نفايات عضوية وحيوانية، وبموجب ذلك تم الحصول على غاز حيوي قابل للاشتعال، وسماد عضوي.

أما **الفصل السادس** و الأخير فقد تناول أحد أهم المواضيع في وقتنا الحاضر وهو انتاج الهيدروجين النظيف بأكسدة نفايات الألمنيوم باستخدام حمض كلور الماء، واسترجاع أكسيد الألمنيوم بكفاءة عالية، وتم إجراء التجارب في النموذج المخبري والآخر التجريبي. بالنتيجة:

- يمكن الحد من تلوث المناخ، وتخفيض CO₂، من خلال الاعتماد على الطاقات المتجددة، ورغم انخفاض تكاليف التشغيل، إلا أن تكاليف الانتاج لا تزال مرتفعة عند مقارنة كلفتها لإنتاج الكهرباء مع الأساليب التقليدية.
- خفض الاستخدام الواسع لتقانات الطاقة المتجددة تكاليف انتاج الكهرباء، فيما لا يزال استخدامها في قطاع النقل أقل، ومن المتوقع زيادة انتاج الكهرباء من الطاقة المتجددة.
- تنامي استخدام الوقود الحيوي السائل (الايثانول والديزل الحيوي) في قطاع النقل، أما استخدام الطاقة المتجددة في السيارات الكهربائية بقي بسيطاً.
- حظيت تكنولوجيا النظم الشمسية الكهروضوئية نظراً لانخفاض أسعارها باهتمام أغلب الدول، ويتوقع توسيع تطبيق هذه المشروعات لأغراض الإنارة وضخ وتحتلية المياه.
- ازداد اهتمام العالم بتوليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة باعتبارها من عناصر المزيج الوطني للطاقة في معظم الدول، باعتبارها أحد الغايات المستدامة 2030 التي اعتمدها الأمم المتحدة في سبتمبر 2015، ناهيك عن دورها في حماية البيئة من التلوث.
- تطابقت المواصفات القياسية للديزل الحيوي المنتج من نفايات زيوت المطبخ مع المواصفات القياسية العالمية للديزل الحيوي المستخدم كوقود.
- لدى إجراء التحليل باستخدام جهاز التحليل الحراري التفاضلي للشموع تبين انهيار كامل للشموع عند درجات حرارة أقل من 200 درجة مئوية.
- ازداد معدل التسخين في مفاعل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية لدى استخدام حفاز غير متجانس، وازداد بشكل أكبر لدى إجراء تحلل حراري للمطاط مقارنة مع البولي ايتيلن تيرفتالات، ويفسر ذلك بسهولة تسهيل المطاط مقارنة مع بولي ايتيلن تيرفتالات.

- إن عملية تحويل المخلفات العضوية المنزلية والحيوانية الضارة إلى وقود نظيف وسامد عضوي هي عملية بسيطة وغير مكلفة وصديقة للبيئة، ويمكن أن تكون الوحدات متنقلة أو ثابتة، كما يمكن تحويل المخلفات الزراعية عوضاً عن حرقها.
- الاستفادة من مياه الصرف الصحي في تأمين النسبة المطلوبة من المياه للتخمير، وكبادئ (مصدر مهم للبكتريا اللاهوائية) لا سيما في مناطق نائية تفتقر لشبكة الصرف الصحي.
- يوصى بتأمين درجة الحرارة اللازمة للتخمير باستخدام (مجمع شمسي بسيط) حيث يسخن الخليط باستخدام مبادل حراري في فصل الشتاء، أما في فصل الصيف فيمكن إجراء العملية عند درجة حرارة الجو الطبيعية.
- يوصي البحث باستخدام محفزات صلبة غير متجانسة في تفاعلات الأسترة التحويلية للحصول على الديزل الحيوي، وقد لعبت هذه الحفازات دوراً مهماً في الحصول على حجم أكبر من الوقود البلاستيكي السائل وبنقاوة أعلى في مفاعل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية.
- يوصي البحث بتطوير بنية تحتية مناسبة لنشر تطبيقات الطاقة المتجددة، وجذب الاستثمارات وتشجيع مشاريع الطاقة المتجددة الصغيرة والمتوسطة على المستوى المحلي، ودعم البحث والتطوير ربطاً بالقدرات الصناعية الوطنية.
- يوصي البحث بالاستفادة من الطاقة الحرارية الكبيرة الناتجة عن تفاعل النفايات الألمنيومية مع حمض كلور الماء، والاستفادة من الغاز الناتج كوقود نظيف يملك طاقة حرارية مشابهة للوقود الأحفوري، بدون أن يكون له تأثيرات سلبية على البيئة، وكذلك الاستفادة من أكسيد الألمنيوم الناتج كحفاز في عمليات إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة أو في عمليات إنتاج الوقود البلاستيكي بالتحلل الحراري الحفزي للنفايات البلاستيكية.
- الاستثمار الأخضر في جميع أنواع النفايات (زيوت الطبخ، النفايات البلاستيكية، النفايات العضوية المنزلية والحيوانية، النفايات الألمنيومية).

المصطلحات العلمية:

المصطلح العلمي	الاسم	
الهيئة العالمية لدراسة تغيرات المناخ	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
المنظمة العالمية للأرصاد الجوية	WMO	Meteorological Organisation World
البرنامج البيئي للأمم المتحدة	UNEP	Environmental Programme United Nations
منظمة الأغذية و الزراعة	FAO	Food and Agriculture Organization
آلية تطوير نظيفة	DMC	Development Mechanism Clean
الوكالة الدولية للطاقة المتجددة	IRENA	International Renewable Energy Agency
نظام توليد الطاقة الشمسية	SEGS	Solar Electric Generation System
مؤتمر الأمم المتحدة المعني لتغير المناخ (مؤتمر الأطراف)	COP 28	Conference of the Parties 28
حفاز متجانس		Homogeneous Catalyst
حفاز غير متجانس		Heterogeneous Catalyst
ديزل حيوي	B	Biodiesel
حرارة الاحتراق	H.V.	Heat Value
كثافة نوعية	API Gravity	American Petroleum Institute
نقطة الوميض		Flash point
رقم السيتان		Cetane Number
اللزوجة الحركية		Kinematic viscosity
العمليات الحيوية		Biological Processes
المواصفات القياسية الأمريكية للديزل الحيوي		ASTM D6751
الوزن النوعي	SG	(Specific Gravity)
جهاز الامتصاص الذري	AAS	(Atomic Absorption Spectroscopy)
بولي ايتلن منخفض الكثافة	LDPE	Low Dencity Poly Ethylene
بولي ايتلن عالي الكثافة	HDPE	High Dencity Poly Ethylene
بولي فينيل كلوريد	PVC	Poly vinyl Chloride
بولي ايتلن تيرفتالات	PET	polyethylene terephthalate
من الزجاج إلى الزجاج	B2B	From Bottles to Bottle
مؤسسة الغذاء الأمريكية	FDA	
التحلل المائي		hydrolysis
التحلل الأموني		Ammonolyses
التحلل الكحولي		Alcoholic's
القيمة السعيرية	CV	Calory value
التكسير التحفيزي للسوائل	FCC	Fluid catalytic cracking

زيوليتات طبيعية	HZSM5	Zeolites
الأشعة السينية المفلورة	X-Ray	Fluorescence pectrometer
التحلل الحراري التفاضلي	DSC	Differential Scanning Calorimeter
قوة التحطم		Crushing Value
السطح النوعي	S. A.	Surface Area
تقرير خاص عن المصادر المتجددة و التخفيف من آثار تغير المناخ	(SRREN)	Special Report on Renewable Sources and Climate Change Mitigation
كاؤولين – ترابة بيضاء		Kaolin
الغلاف الحيوي		Biosphere
الكتلة الحيوية		Biomass
الغاز الحيوي		Biogas
قانون الطاقات المتجددة الألماني	EEG	German Renewable Energy LaW
نسبة الخرق		Penetration ratio
	PJ	Peta Joule
مؤسسة الغذاء الأمريكية	FDA	AMERICAN FOOD Foundation
التحليل الحراري التفاضلي	DSC	Differential Scanning Calorimeter
الطاقة الشمسية المركزة	CSP	Concentrated solar power

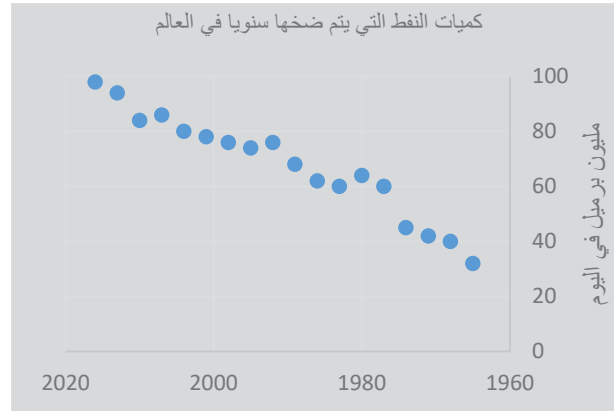
الفصل الأول الطاقات المتجددة

1-1- الطاقة [1, 8] (بسام حمود- وسام عبد القادر، 2014)

أصبح من الضروري تبني سياسات تدعم استخدام الطاقات المتجددة، فقد تأسست الهيئة العالمية لدراسة تغيرات المناخ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) في عام 1988 من قبل المنظمة العالمية للأرصاد الجوية Meteorological Organisation World (WMO) والبرنامج البيئي للأمم المتحدة Environmental Programme United Nations (UNEP) كمؤسسة علمية. تضع IPCC تقارير تشكل أساساً في الاستشارات السياسية واتخاذ القرارات،

تنبه سياسيو العالم إلى ضرورة تخفيض انبعاثات CO₂ لحماية الغلاف الجوي المحيط بكوكب الأرض، وتوصلوا في عام 1997 إلى ما يسمى محضر (بروتوكول) كيو توتو، الذي نص على تخفيض الانبعاثات بنسبة % 2.5 حتى عام 2012 نسبة إلى السنة المرجعية 1990. بعد الأزمات الاقتصادية العالمية ازداد الاستهلاك الطاقى في عام 1929 بشكل كبير، واكتسب الغاز الطبيعي أهمية خاصة.

يبين الشكل (1-1) تصاعد الاستهلاك العالمي للنفط خلال نصف قرن، و بشكل عام تصاعف استهلاك النفط العالمي ثلاثة أمثال ما كان عليه قبل نصف قرن.



الشكل 1-1: كميات النفط التي يتم ضخها سنوياً على مستوى العالم [10] (تقرير Statistical Review of World Energy, 2017)

يستمر الطلب العالمي على الطاقة في التصاعد، فالعديد من الدول النامية ذات النمو الاقتصادي العالي استهلكت الطاقة بشكل كبير، فيما لا يزال استهلاك الدول الصناعية للطاقة راکداً، وينبئ النمو الكبير في عدد سكان العالم بتصاعد استهلاك الطاقة في عام 2060 بمقدار 2.4 إلى 4 مرات. وبذلك ستزداد عواقب ظاهرة الاحتباس الحراري بنفس المعدل، وسيواجه العالم مشكلة نفاذ مصادر الوقود الأحفوري.

1-2- ظاهرة الاحتباس الحراري:

لولا التأثير الوقائي للغلاف الجوي لسادت على الأرض درجة حرارة تبلغ نحو 18°C ، بسبب بعض الغازات الطبيعية الموجودة في الغلاف الجوي بتركيز منخفضة مثل CO_2 وبخار الماء، فإن الأشعة الشمسية الواردة ضمن هذا الغلاف، تسبب حدوث أثر مشابه لأثر البيت الزجاجي المستخدم لزراعة محاصيل معينة في الفصول الباردة. ويمكن التمييز بين أثر طبيعي وآخر اصطناعي سببه الإنسان.

إن الاحتباس الحراري الطبيعي الموجود هو الذي يسمح بالحياة على الكرة الأرضية، حيث تقوم الأشعة الشمسية الواردة بتسخين سطح الأرض، وبذلك تصل درجة الحرارة الوسطية إلى 15°C ، ولولا الاحتباس الحراري الطبيعي فإن جزءاً كبيراً من الإشعاع الحراري سينعكس إلى الفضاء، مؤدياً إلى انخفاض درجة حرارة الأرض الوسطية بمقدار 33°C ، وقد حدث خلال آلاف السنين الماضية توازن في غازات الغلاف الجوي قليلة الوجود سمح بنشوء الحياة بالشكل الذي نعرفه. وبزيادة استهلاك الطاقة والتأثيرات الأخرى على البيئة فقد أطلقت كميات كبيرة من الغازات (منخفضة التركيز في الهواء النقي) إلى الغلاف الجوي، مما سبب الاحتباس الحراري بفعل الإنسان. ومن أهم الغازات التي تسهم في هذه الظاهرة هي: (CO_2 ، CH_4 ، N_2O ، O_3 ، CFC 11 ، HCFC 23) وقد ساهمت عوامل عديدة في تحقيق الاحتباس الحراري.

ينشأ ثاني أكسيد الكربون عن احتراق الوقود الأحفوري والكتل الحيوية، وتبلغ نسبة مساهمته في نشوء الاحتباس الحراري حوالي 61 %، وهو بالتالي المسؤول بالدرجة الأولى عن هذه الظاهرة.

تستخدم الكتلة الحيوية بمعدل مساوٍ للزمن اللازم لإعادة نموها، وبالتالي فإن تأثيرها حيادي على CO_2 . أما احتراق الغابات الاستوائية فإنه ينتج كميات هائلة من CO_2 تعادل ماجمعه النباتات خلال عشرات لا بل مئات السنين. أما انبعاثات CO_2 الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري فهو الأكبر، إذ تبلغ مساهمته في انبعاث CO_2 في الوقت الحاضر ما يزيد عن 75 % وهو في ازدياد مستمر. حيث تصاعد تركيز CO_2 من القيمة 280 ppm في العام 1850 إلى 367 ppm في العام 1999 وسيضاعف في العقود القادمة إذا استمر إطلاق CO_2 . إن محتوى الغلاف الجوي من CO_2 حالياً هو أعلى من أية لحظة زمنية أخرى منذ 250000 سنة.

أما غاز الميثان فهو يسهم في هذه الظاهرة بنسبة % 15، ولكن قدرة الميثان على التأثير على المناخ أكبر بكثير من قدرة CO₂ وتصل أربع أمثالها تقريباً ولذلك ينظر إلى التراكيز الصغيرة للميثان بجديّة كبيرة. وصل تركيز الميثان في التروبوسفير عام 1998 القيمة 1.745 ppm وهي أكبر من ضعف القيمة التي كانت سائدة قبل عصر الصناعة. تساهم الفريونات في الاحتباس الحراري بنسبة % 11 وتأثيرها أكبر بكثير من تأثير الميثان وثاني أكسيد الكربون ويمكن أن يصل آلاف الأمثال. أما أكسيد النتروز فينتج عند احتراق الغابات الاستوائية بشكل خاص عند استخدام أسمدة آزوتية وقد بلغ تركيزه في الغلاف الجوي عام 1998 0.314 ppm وهذه القيمة أعلى ب % 16 مقارنة مع عصر ما قبل الصناعة. يقسم الاحتباس الحراري بفعل الإنسان إلى مجموعات وفقاً إلى أسبابه:

- استخدام الوقود الأحفوري % 50.
- الفريونات والهالوجينات % 20.
- حرق وتعفن الغابات الاستوائية % 15.
- الزراعة % 5.

تفاوتت هذه النسب من موقع إلى آخر على سطح الأرض، ففي البلدان النامية السبب الرئيسي هو احتراق الغابات الاستوائية و الزراعة، وفي البلدان الصناعية السبب حرق الوقود الأحفوري.

لقد تم الإجماع على أنه لا يجوز التغاضي عن ظاهرة الاحتباس الحراري ولكن يمكن الحد من أثارها إلى قيم تقل عن 2 °C إذا اتخذت الإجراءات المناسبة. وبالتالي فإنه بين عامي 1990 و 2100 ينبغي القيام بما يلي:

1. تخفيض حاد لانبعاثات CO₂ من الوقود الأحفوري بنسبة % 70،
2. تخفيض انبعاثات N₂O بنسبة % 50 والميثان بنسبة % 5،
3. التخلي الكامل عن استخدام الفريونات والهالوجينات.

إن المسؤول الأكبر عن انبعاثات الغازات في الوقت الحاضر هو الدول الصناعية، أما الانبعاثات في الدول النامية فإنها أقل بكثير، ولذلك فإن تخفيض ما تصدره الدول الصناعية يجب أن يكون أشد. ولذلك وحتى تحقق هذا التخفيض في الانبعاثات يجب:

- تخفيض انبعاث CO₂ حتى عام 2050 بمقدار % 80 من قيمته عام 1990.
 - تخفيض انبعاث CO₂ حتى عام 2100 بمقدار % 90 من قيمته عام 1990.
- وهذا يعني في الواقع التخلي الكامل عن استخدام الوقود الأحفوري في القرون المقبلة،

وسيكون من الصعوبة بمكان تحقيق الأهداف المذكورة أعلاه.

يوضح الجدول التالي رقم (1-1) تراكيز الغازات الصادرة عن الأنواع المختلفة من

مصادر الطاقة. Paul Scherrer institute, 2015. , Statistical Review of World Energy, 2017 [10, 11]

الجدول رقم (1-1) الغازات الملوثة للبيئة الصادرة عن مصادر الطاقة المختلفة

المصدر	SO ₂ %	NO ₂ %	جزينات ملوثة أخرى لكل طن متري	غازات أخرى طن مكافئ	CO ₂ طن مكافئ
الفحم	10	20	500	3	9000
الطاقة النووية	0	0	0	0	0
الطاقة المائية	0	0	0	0	0
الغاز الطبيعي	0.5	2	0.4	5	4000
البترول	40	10	2	200	9000

3-1- إيجابيات استخدام الطاقة المتجددة:

الدوافع الرئيسية التي تحفز الدول إلى الاتجاه نحو الطاقة المتجددة هي:

١. أمن الطاقة:

٢. القلق من تغير المناخ:

٣. كلفة الطاقة.

يسهم تطوير استخدام الطاقات المتجددة في:

- تحسين مستوى معيشة السكان،
- استغلال مصادر الطاقة المتجددة،
- الامداد بالطاقة،
- التخفيف من حدة تغير المناخ و تقليل الآثار السلبية على الصحة و البيئة،
- تحقيق أمن الطاقة العالمي،
- انخفاض تكلفة الطاقات المتجددة،
- الحد من الفقر المستدام لقطاعات هامة كالزراعة و المياه العذبة و الطاقة.

4-1- الرؤى المستقبلية للطاقة المتجددة في بعض الدول العربية:

تتوأت مشاريع الطاقة المتجددة مكان الصدارة في استراتيجيات بعض الدول العربية لتحقيق التنمية المستدامة، وأكبر مثال على ذلك الاهتمام هو إنشاء مدينة مصدر في دولة

الإمارات العربية المتحدة ومدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة، وغيرها من المشاريع الكبرى.

يعود تبني دول مجلس التعاون الخليجي لمشاريع الطاقة المتجددة، إلى ارتفاع مستوى الوعي البيئي لديها وإدراكها حجم المخاوف البيئية، وعكفها على تنفيذ مبادرات في الطاقة المتجددة نظراً للارتفاع الكبير في نسب الإستهلاك المحلي في المنطقة، [6] (جوارين، 2013) في دولة الإمارات تضمنت الرؤية الاستراتيجية لأبو ظبي للعام 2030 تنفيذ أكبر مشروع استراتيجي لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، باستخدام تقنية الألواح الكهروضوئية ومركزات الطاقة الشمسية، وبنظام المنتج المستقل بإجمالي 6000 ميغا وات على مراحل، في الفترة بين 2020-2030 وتهدف استراتيجية دبي للطاقة النظيفة 2050 إلى توفير 75% من الطاقة بحلول عام 2050 من المصادر النظيفة.

مدينة "مصدر" هي أول مدينة خالية من الكربون والنفائيات في العالم، كاملة تعمل بالطاقة الشمسية؛ لذا فهي من أكثر مدن العالم استدامةً.

تبلغ مساحة مدينة مصدر 6 km^2 تقريباً، وتقع على بعد 17 km من وسط مدينة أبو ظبي، وتشكل منصة لاستعراض التقنيات النظيفة وطاقة المستقبل المتجددة، وإجراء البحوث عليها وتطويرها واختبارها وتسويقها. وهي مملوكة بالكامل لشركة "مبادلة للتنمية" التابعة لحكومة أبو ظبي، وتهدف إلى حفز وتفعيل التنوع في اقتصاد الإمارة.

تنجز فيها باستمرار أحدث مشاريع البحوث العلمية في مجالات الطاقة المتجددة والتقنيات النظيفة والتطوير والتحديث، وتجري فيها المشاريع التجريبية والتكنولوجية، وتوفر بيئة خصبة تلهم المؤسسات العاملة في هذا القطاع الحيوي، وتحفز على الابتكار.

تم اختيارها كمقر للوكالة الدولية للطاقة المتجددة (International Renewable Energy Agency) (IRENA) في عام 2009.

في عام 2010 أنشأت الحكومة المجلس الأعلى للطاقة في دبي، وفي عام 2016 تم إنشاء (1) مجلس العلماء لمراجعة السياسة الوطنية للدولة في مجال العلوم والتكنولوجيا وتغذية جيل جديد من علماء الإمارات، وتطوير العلوم والتكنولوجيا في دولة الإمارات العربية المتحدة بما يسهم في نمو وتنويع الاقتصاد والطاقة المستدامة.

(2) هيئة الطاقة في أبو ظبي، على غرار المجلس الأعلى للطاقة في دبي، وتضم جميع الكيانات الحكومية (منتجي الطاقة والمستهلكين الرئيسيين)، لوضع السياسات والاستراتيجية، والمساهمة في تبني الطاقة المتجددة في الدولة وتبادل المعلومات بين الجهات المعنية من أجل تلبية الأهداف الوطنية والالتزام الدولي تجاه تغير المناخ.

تم إنشاء صندوق مصدر للتكنولوجيا النظيفة، برأس مال 250 مليون دولار أمريكي بدعم من القطاع الخاص والحكومي للاستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة داخل البلاد وفي جميع أنحاء العالم، وصندوق أبو ظبي للتنمية برأس مال 350 مليون دولار أمريكي، لمنح قروض ميسرة لمشاريع الطاقة المتجددة في البلدان النامية. [15] (ايرينا، 2016)

في البحرين تضمنت الرؤية المستقبلية الاقتصادية الاستثمار في تقنيات تخفيف الانبعاثات الكربونية، وتشجيع الحصول على مصادر طاقة أكثر استدامة حتى عام 2030.

كشفت وزارة الطاقة البحرينية في 21 أيار/مايو 2012 عن عزم الهيئة الوطنية للنفط والغاز بالمملكة إقامة مشروع تجريبي للطاقة الشمسية في منطقة عوالي جنوب البحرين لتوليد 5 ميغاواط من الطاقة الكهربائية التي تكفي لسد حاجة 1800 ساكن.

في الجزائر وزارة الطاقة والتعدين هي المسؤولة الرئيسة عن قطاع الطاقة والتعدين وتوجد إدارتان تابعتان للوزارة هما إدارة الكهرباء والغاز، وإدارة الطاقة المتجددة وكفاءة استخدام الطاقة، ويعتبر مركز تنمية الطاقات المتجددة هو الهيئة الاستشارية الرئيسة للحكومة في هذا الشأن ويشترك المركز في عدد من مشروعات الطاقة المتجددة، ويسهم في تنمية القدرات ونقل التكنولوجيا بالاشتراك مع معاهد بحثية وشركات دولية. وتعمل وحدة تطوير المعدات الشمسية على تشجيع استخدام الطاقة الشمسية واختبار معداتها. في عام 2002 تأسست شركة «الجزائر للطاقة الجديدة»، بواسطة شركتي سوناطراك وسونال جاز وشركة خاصة بنسب % (45, 45, 10 على الترتيب) لإنتاج الكهرباء من المصادر المتجددة.

يعتمد البرنامج الوطني للطاقات المتجددة على تطوير استخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل واسع، إلى جانب الكتلة الحيوية وطاقة حرارة باطن الأرض بهدف الحصول على قدرات بسعة 22000 ميغاواط لتلبية احتياجات السوق حتى عام 2030.

في تونس بموجب القانون عدد 628 لسنة 1962 الشركة التونسية للكهرباء والغاز تابعة لوزارة الطاقة والمناجم والطاقات المتجددة، وتعمل في مجالات إنتاج الكهرباء عبر اللجوء إلى مصادر طاقة مختلفة (حرارية، مائية، هوائية...)، والنقل والتوزيع.

تأسست الوكالة الوطنية للتحكم في الطاقة عام 1985 كهيئة حكومية لتنفيذ سياسة الدولة في مجال الحفاظ على الطاقة والاستخدام العقلاني للطاقة وتشجيع الطاقات المتجددة.

في عام 2005 اعتمدت الحكومة برنامج بروسول (PROSOL) و الخاص بما يلي :

أ- تطوير سوق السخانات الشمسية للمياه في القطاع السكني، بالتعاون مع برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP)، ووزارة البيئة الإيطالية و الوكالة الوطنية التونسية للتحكم في الطاقة. وارتبط تنفيذ البرنامج بابتكار آلية مالية لتوفير الدعم المالي للأسر المحلية من خلال تقديم منح

معفاة من ضريبة القيمة المضافة، وتخفيض الرسوم الجمركية، وتقديم القروض المصرفية بمعدلات فائدة منخفضة على عمليات التسديد. وتم إدراج مبلغ سداد القرض في الفواتير الاعتيادية للشركة التونسية للكهرباء والغاز كمحصل للقرض والتي قد توقف الإمداد بالكهرباء للجهة التي تتأخر/تعجز عن السداد. وقد ساهم هذا الإجراء في الحد من المخاطر التي تواجه المصارف المحلية التي ترغب في تمويل مشروعات تسخين المياه بالطاقة الشمسية بمعدلات فائدة منخفضة. وتم وضع نظام اعتماد للموردين ومتخصصي التركيب ونماذج سخانات المياه بالطاقة الشمسية، وتطبيق إجراءات المراقبة لضمان جودة النظم وموثوقيتها، وكذلك استراتيجية لبناء القدرات لضمان تطوير المؤسسات المالية المحلية ومزودي التكنولوجيا على المدى الطويل، الأمر الذي ساعد في زيادة الطلب على السخان الشمسي ونمو السوق المحلي. وقد أدت النتائج الإيجابية للبرنامج إلى التوسع في استخدام التسخين الشمسي للمياه في قطاعي الصناعة والخدمات.

ب- الإسراع في إقامة سوق للخلايا الشمسية الكهروضوئية - الفوتوفلطية- على مستوى القطاع السكني، بالتعاون مع UNEP والوكالة الوطنية التونسية للتحكم في الطاقة، بغرض السماح للقطاعات السكنية والصناعية والزراعية والخدمات بتوليد الكهرباء بواسطة أنظمة الخلايا الفوتوفلطية لاستخدامها الخاص، وبيع فائض الكهرباء المولدة للشركة التونسية للكهرباء والغاز. وتتضمن آلية الدعم المالي مجموعة من الحوافز لعمال الشركة التونسية للكهرباء والغاز ممن يرغبون في شراء نظام خلايا فوتوفلطية لتغطية جزء من حاجاتهم للكهرباء، بما في ذلك إعانة على تكلفة رأس المال ومعدل الفائدة وقرض لمدة خمس سنوات تقدمه المصارف التجارية مستخدمة فاتورة الكهرباء كوسيلة لاسترداد القرض.

اعتماد الخطة الشمسية التونسية في مارس 2018، لتشجيع إنتاج الكهرباء من الطاقة المتجددة في إطار شراكة بين القطاعين العام والخاص، لزيادة حصة الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 إلى 30% من الكهرباء المنتجة. ويتم تمويل الخطة من الصندوق الوطني لكفاءة استخدام الطاقة والشركة التونسية للغاز والكهرباء والقطاع الخاص وصناديق التعاون الدولي. تمت المصادقة على الاستراتيجية الوطنية في قطاع الطاقة 2030 في 22 نوفمبر 2016 لترجمتها إلى خطط وبرامج عمل، بهدف تعزيز الموارد الوطنية للوقود الأحفوري والطاقات المتجددة ودعم استقلال الطاقة، وإنتاج 30% من الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة على مرحلتين بحلول عام 2030.

في الجمهورية العربية السورية أنشئ المركز الوطني لبحوث الطاقة بموجب القانون رقم 8/ لسنة 2003، تابع لوزارة الكهرباء، ومسؤول عن إجراء الدراسات والبحوث العلمية

والتطبيقية وتنفيذ المشاريع الريادية التجريبية التي تساعد على وضع السياسات واعتماد الاستراتيجيات الملائمة لتحقيق الاستفادة المثلى من مصادر الطاقة المتاحة وتنمية استخدامات مصادر الطاقات الجديدة والمتجددة وتطويرها وتحسين كفاءة استخدام الطاقة وترشيد استهلاكها في القطاعات المختلفة، وذلك بالتنسيق مع الجهات المعنية.

تضمنت استراتيجية وزارة الكهرباء حتى عام 2030 ضمان حصول كافة المواطنين على خدمات الكهرباء بتكاليف ميسرة، وزيادة نسبة مساهمة الطاقات المتجددة في جانب الطلب في ميزان الطاقة % 5 من استهلاك الطاقة الأولية، ورفع كفاءة استخدام الكهرباء في مختلف القطاعات، وتخفيض % 10 من استهلاك الطاقة الأولية، وإشراك القطاع الخاص في إنتاج وتوزيع الكهرباء. يتم إعداد الاستراتيجية الوطنية للتنمية المستدامة حتى عام 2030 استناداً إلى أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة 2030 والبرنامج الوطني لسورية ما بعد الحرب والذي يتضمن الأهداف الاستراتيجية لوزارة الكهرباء.

في السودان وضعت وزارة الموارد المائية والري استراتيجية قومية للطاقة المتجددة للاستفادة من الامكانيات التي يتمتع بها السودان من مصادر الطاقة المتجددة في توفير الكهرباء بجودة وكفاءة عالية من أجل التنمية المستدامة.

في لبنان مؤسسة كهرباء لبنان، تابعة لوزارة الطاقة والمياه، وهي المستخدم النهائي للطاقة المتجددة على مستوى شبكات النقل والتوزيع، خاصة ما يتعلق بمتطلبات ربط محطات الطاقة المتجددة على الشبكة الوطنية، واستقرارها. يعمل المركز اللبناني لحفظ الطاقة كوكالة وطنية معنية بالطاقة المتجددة، وقد تأسس في عام 2002 كمشروع مشترك بين وزارة الطاقة والمياه وبرنامج الأمم المتحدة للتنمية. مهامه حالياً الاهتمام بجميع الأمور المتعلقة بحفظ وكفاءة استخدام الطاقة وترشيد استهلاكها واستبدالها والطاقات المتجددة، ومساعدة وزارة الطاقة والمياه في إعداد التشريعات والسياسات المتعلقة بحفظ الطاقة وكفاءة استخدامها وترشيد استهلاكها وتلك المتعلقة بالطاقات المتجددة، وتشجيع القطاع العام والخاص للاهتمام بحفظ الطاقة وكفاءة استخدامها وترشيد استهلاكها واعتماد الطاقات البديلة، وتشجيع ودعم نمو النشاطات المرتبطة بذلك.

تضمنت خطة العمل الوطنية للطاقة المتجددة للفترة 2020-2016، مساهمة الطاقة المتجددة بنسبة % 12 في إنتاج الكهرباء والحرارة للتدفئة بحلول عام 2020 وتقييم إمكانات مصادر الطاقة المتجددة، والمتطلبات القانونية والسياسات اللازمة لتنمية استخدامها ومنهجية العمل بما يساعد في المراجعة والتعديل إذا لزم الأمر.

في سلطنة عمان تضمن البرنامج الاستراتيجي لبحوث الطاقة المتجددة وتنمية القدرات البحثية رؤية مستقبلية استندت إلى دعم الاقتصاد الوطني من خلال تحسين استخدام الطاقة واستغلال موارد الطاقة المتجددة كبديل لتأمين احتياجات السلطنة من الطاقة. كما بدأت سلطنة عمان مؤخراً التوجه إلى استخدام الطاقة الشمسية في استخراج النفط، وبدأ أول مشروع تديره شركة تطوير نفط عمان الحكومية لاستخراج المزيد من النفط من المكامن منخفضة الضغط في عام 2010 وطبق منذ ذلك الحين العديد من الأساليب الجديدة لزيادة الإنتاج. ويستخدم أحدث هذه المشروعات الطاقة الشمسية بدلاً من الغاز الطبيعي لإنتاج 50 طن يومياً في المتوسط من البخار الذي يجري ضخه في حقل أمل في جنوب غرب السلطنة، ويوفر استخدام الشمس توليد بخار يضخ في الحقول لدفع المزيد من النفط والغاز للخارج، كما تستخدم لتوليد الكهرباء وتحلية المياه، وقد يساعد هذا عمان في تصدير المزيد من الغاز الطبيعي المسال.

في قطر تشير رؤية قطر الوطنية 2030 إلى أن التنمية المستدامة تعمل على تلبية احتياجات الجيل الحالي دون الاضرار بقدرة الأجيال القادمة على تحقيق احتياجاتها، وأهمية استخدام موارد متجددة للطاقة، للحيلولة دون استنزاف الموارد التقليدية.

أعلنت قطر في أواخر عام 2012 عن إطلاق مشروع لإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية تحت مظلة وزارة الطاقة والصناعة وتنفيذ من "المؤسسة العامة القطرية للكهرباء والماء (كهرماء)"، يشمل استغلال المساحات المسطحة غير الفاعلة المتوفرة في البنية التحتية لمؤسسة كهرماء مثل أسطح المحطات الكهربائية وخزانات المياه لإنشاء محطات إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية. ويعد المشروع خطوة جيدة نحو التحول التدريجي لاعتماد أساليب أكثر استدامة مما يعني بيئة أكثر نقاء قابلة لتطبيق جميع عناصر التنمية المستدامة.

في الكويت تضمنت الرؤية الوطنية لخطة التنمية 2035 فيما يتعلق بالبند الخاص بالبيئة المعيشية المستدامة، استكمال تنفيذ مجمع الشقيا لإنتاج الكهرباء باستخدام الطاقة المتجددة، (محطة شمسية حرارية، محطة نظم شمسية كهروضوئية، ومحطة رياح).

بدأ معهد الكويت للأبحاث العلمية إنشاء محطة للطاقة المتجددة متعددة التقنيات في الشقيا عام 2009 بتكلفة إجمالية تصل إلى 202 مليار دينار، كجزء من استراتيجية الكويت لتنويع مصادر الطاقة، ومن المتوقع الانتهاء من مراحلها الثلاث عام 2030 وسوف تنتج 2070 ميغاوات من الكهرباء تكفي لإنارة خمسة آلاف منزل. ويعد مشروع الشقيا من المشاريع الوطنية الهامة، وقد بدأت الكويت بوضع استراتيجية طويلة المدى لمدة 20 سنة لأنواع الطاقات المتوفرة في العالم والتقنيات وكيفية استخدامها في الكويت ليكون هناك خليط من

الطاقات له انتاج مجد للمنطقة، كجزء من استراتيجية الكويت لتتويع مصادر الطاقة والحفاظ على النفط.

في مصر تضمنت الاستراتيجية الوطنية زيادة مساهمة الطاقة المتجددة بنسبة % 42 من الطاقة الكهربائية المنتجة بحلول عام 2035. وتعظيم الاستفادة من المصادر المتنوعة التقليدية والمتجددة للمساهمة في تعزيز النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة وتحقيق الريادة في مجالات الطاقة المتجددة والإدارة الرشيدة والمستدامة للموارد. الهدف الاستراتيجي الأول حول أمن الطاقة يتمثل في توفير إمدادات الطاقة اللازمة لاحتياجات التنمية، بما في ذلك تحديد المزيج الأمثل للطاقة، وتطوير الاعتماد على مصادرها المتجددة.

جاءت مصر في المرتبة الأولى إنتاجاً للكهرباء من الطاقة الشمسية و طاقة الرياح على مستوى العالم العربي، وتنتج الكهرباء من الطاقة الشمسية حالياً وطاقة الرياح بمعدل إنتاج 3.5 جيجاواط، تليها الإمارات بنحو 2.6 جيجا، وحلت المغرب في المركز الثالث بنحو 1.9 جيجا، ثم الأردن بنحو 1.7 جيجا، ثم السعودية بإنتاج 0.78 جيجا، كما وصل إنتاج مصر للكهرباء من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى 6.8 جيجاواط بحلول عام 2024 مقسمة بين 1.6 جيجا من طاقة الرياح و1.9 جيجا من محطات الطاقة الشمسية، ووضعت مصر استراتيجية للطاقة المتكاملة والمستدامة تتضمن بنداً استغلال الطاقة النظيفة، ومستهدفة الوصول بها إلى % 42 من القدرة الإجمالية للشبكة القومية للكهرباء، بحلول عام 2035 من بينها % 22 من الخلايا الشمسية، و% 14 من طاقة الرياح، و% 4 من المراكز الشمسية، و% 2 من الطاقة المائية، وظهر الأثر المباشر لاستراتيجية مصر في استغلال هذه الموارد في القضاء على أزمة الطاقة الكهربائية نهائياً.

تم تشييد محطة بنبان للطاقة الشمسية، كجزء من استراتيجية مصر للتنمية المستدامة 2035. تم اختيار موقع المحطة بأسوان، ويعد هذا المشروع أضخم مشروع لتوليد الكهرباء من الشمس في العالم. تضم المحطة 32 محطة شمسية بقدرة تصل نحو 1500 MW دخلت حتى الآن 17 محطة منها قيد الخدمة بإجمالي 830 MW، ويوجد أربع محطات لتفريغ الطاقة المنتجة من المحطات الشمسية. ويوجد لكل مستثمر قطعة أرض لإنشاء الخلايا الضوئية عليها، وجميعها موصولة بالمحطات التي توصل الكهرباء المنتجة بالشبكة، وتبلغ تكلفة المحطة مليار دولار، تم تمويل المشروع بنسبة % 85 من بايرن إل بي والنسبة الباقية من البنك العربي الإفريقي الدولي.

في المغرب في أكتوبر 2017 تضمن ملخص الاستراتيجية الوطنية للتنمية المستدامة 2030، في المحور الاستراتيجي الرابع إدراج تسريع الوتيرة الصناعية ضمن مسار الاقتصاد

الأخضر، تحديد الحكومة لعدد من المنظومات الخضراء، الأولى منها خاصة بمنظومات الطاقات المتجددة: المخطط المغربي للطاقة الشمسية، المخطط المغربي للطاقة الريحية والكهرومائية ومحطات تحويل الطاقة عن طريق الضخ ومحطات المعالجة، و الثانية خاصة بمنظومة النجاعة الطاقية في قطاع البناء والصناعة والنقل والفلاحة والإضاءة العمومية، والثالثة خاصة بمنظومات التعقيم ومعالجة المياه العادمة، والرابعة خاصة بمنظومات معالجة وتثمين النفايات. في حين تضمن المحور الاستراتيجي الخامس: تسريع وتيرة التحول الطاقوي، ورفع نسبة الطاقة المتجددة إلى % 52 من الطاقة الكهربائية الإجمالية المنتجة عام 2030.

المملكة العربية السعودية تضمنت رؤيتها للتنمية المستدامة 2030 بنداً خاصاً بسوق الطاقة المتجددة لتوطين نسبة كبيرة من سلاسل القيمة للطاقة المتجددة في الاقتصاد الوطني، بما فيها البحث والتطوير والتصنيع.

نفذت السعودية أكبر مشروع في العالم لتحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية، على ثلاث مراحل: تضمنت (المرحلة الأولى) بناء محطة لتحلية المياه المالحة بطاقة إنتاج تبلغ 30 ألف متر مكعب يومياً لسد احتياجات 100 ألف من سكان مدينة الخفجي من مياه الشرب، من خلال بناء محطة لإنتاج الطاقة الشمسية بطاقة 10 ميغاوات وأغشية التناضح العكسي باستخدام أحدث التقنيات المتطورة خلال ثلاث سنوات، بدأ تنفيذ هذه المرحلة فعلياً بداية العام 2010، تم في المرحلة الثانية بناء محطة لتحلية المياه بالطاقة الشمسية بطاقة إنتاج 300 ألف متر مكعب يومياً، واستغرقت هذه المرحلة لتنفيذها ثلاث سنوات بعد استكمال المرحلة الأولى وإنتاج يبلغ عشرة أضعاف إنتاج محطة المرحلة الأولى، وتم في المرحلة الثالثة بناء عدة محطات لتحلية المياه المالحة في مناطق مختلفة من المملكة.

لدى المملكة أعلى مستويات الإشعاع الشمسي في العالم وعلى مدار العام، لوقوعها استراتيجياً بالقرب من الحزام الشمسي، فضلاً عن توافر مساحات شاسعة من الصحراء من شأنها استيعاب معدات توليد الطاقة الشمسية الهائلة.

أوضح تقرير "توقعات السوق الشمسية في الشرق الأوسط و شمال إفريقيا 2013 - 2017"، أنّ السعودية شكلت السوق الأولى لتوليد الطاقة الشمسية على مستوى الجيغواط في المنطقة عام 2015، وتوقع خبراء أن تتحول السعودية إلى واحد من أهم منتجي الطاقة الشمسية النظيفة في العالم، لتخصيص الرياض نحو 108 مليارات دولار لإطلاق مشاريع عملاقة يتوقع أن تنتج كميات ضخمة من الكهرباء عبر ألواح الطاقة الشمسية. وستتمكن من تشغيل محطات للطاقة الشمسية بقدرة إنتاجية عالية بحلول عام 2032، ستلبي أكثر من 30

% من حاجات البلاد من الكهرباء. [3, 6](محمد غانم، جوارين، 2013)

في الأردن لمواجهة تحديات الطاقة والحفاظ على أمن الطاقة، اعتمد الأردن استراتيجية الطاقة الأردنية 2020-2030 التي شكلتها وزارة الطاقة و الثروة المعدنية MEMR تهدف الاستراتيجية إلى تنويع إمدادات الطاقة في الأردن، وزيادة نسبة الطاقة المحلية في مزيج الطاقة، وتقليل اعتمادها على النفط و الكهرباء المستوردين وحماية البيئة.

الفصل الثاني مصادر الطاقة المتجددة

2-1- مصادر الطاقة المتجددة (بسام حمود) [1]

تشتمل موارد الطاقة المتجددة على الكتلة الحية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الكهرومائية وموجات المد والجزر والطاقة الحرارية البحرية ولا يندرج الوقود الأحفوري تحت هذا التعريف.

يقدر اسهام الطاقة المتجددة عالمياً بـ % 12.9 من معروض الطاقة العالمي، وتسهم الكتلة الحيوية بنسبة % 10.2 والطاقة الكهرومائية بنسبة % 2.3 بينما المصادر الأخرى المتجددة أسهمت بنسبة % 0.4 .

أسهمت الطاقة المتجددة عام 2008 بنسبة % 19 من معروض الطاقة العالمي (% 16 قوى هيدرولوجية، % 3 طاقة متجددة أخرى) وأسهم الوقود الحيوي بنسبة % 2 من الطلب العالمي لوقود النقل على الطرق، وتم تأمين % 27 من احتياج الطاقة العالمي للتدفئة من الوقود الحيوي المعتمد على الكتلة الحيوية التقليدية بنسبة % 17، والمعتمد على الكتلة الحيوية الحديثة بنسبة % 8 والطاقة الحرارية الشمسية والحرارية الأرضية بنسبة % 2 . ويختلف هذا الاسهام عالمياً حسب البلد والاقليم. (SRREN, 2011) [4]

2-1-1- طاقة الكتلة الحيوية:

تعد طاقة الكتلة الحية من أوائل وأهم أنواع الطاقة التي اعتمدها الإنسان لتلبية احتياجاته، وبعد اكتشاف الفحم والآلة البخارية وأنواع الوقود الأحفوري، كان لانخفاض أسعارها وكفاءتها العالية تأثير سلبي على استغلال الكتلة الحية خاصة في الدول المتقدمة، أما في الدول النامية لا تزال تكتسب أهمية كبيرة، حيث ما زالت معتمدة في التدفئة والطهي وبعض الصناعات التقليدية، وبعض الاحتياجات الزراعية خاصة في المناطق النائية.

مع زيادة الوعي البيئي لاحتمالية نضوب المصادر التقليدية، وحدوث الخلل في التوازن البيئي زاد اهتمام دول العالم وخاصة الدول الصناعية بهذا النوع من مصادر الطاقة، وبدأ الاهتمام بإنتاج الجيل الثاني من الوقود الحيوي والذي يراهن عليه العلماء في حل جزء من المشاكل التي يواجهها العالم خاصة بعد إثبات فعالية الإيثانول مثلاً في مجال النقل، ومن ثم مساهمته في تخفيض انبعاثات الغازات الملوثة للبيئة، ولذلك يتم بذل جهود كبيرة في سبيل خفض تكلفته لتنافس المصادر الأخرى للطاقة.

لمقارنة إنتاج الكتلة الحيوية بالتحويلات الهندسية الأخرى للطاقة، تم حساب مردود يعطي نسبة الطاقة الشمسية التي تتحول إلى كتلة حيوية لمختلف النباتات كما في الجدول 2-1.

الجدول 1-2 المردود عند إنتاج الكتلة الحيوية

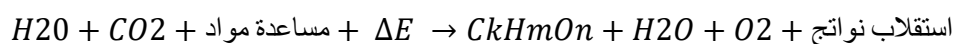
المحيطات	المياه الحلوة	الغابات	الذرة	الشمندر السكري	المناطق الزراعية	الأراضي العشبية	قصب السكر
0.07 %	0.5 %	0.55 %	3.2 %	5.4 %	0.3 %	0.3 %	4.8 %

حسب المردود بتقسيم القيمة الحرارية لبعض الكتل الحيوية المأخوذة من مساحة معينة خلال فترة محددة على الطاقة الشمسية الواردة على هذه المساحة خلال هذه الفترة. يجب التفريق عند استخدام الكتلة الحيوية بين استخدام النفايات العضوية أو بقايا المحاصيل الزراعية وبين زراعة النباتات للحصول على طاقة. في ألمانيا وحدها يقدر الرصيد الذي يمكن الحصول عليه من الأخشاب والقش والمواد الحيوية الأخرى بـ 4 % من استهلاك الطاقة النهائية. ولعبت الدانمرك دور ريادي في بداية التسعينيات في إنشاء محطات طاقة تستخدم الكتلة الحيوية. تقوم المحطات اللامركزية مثل محطة Mabjerg التي تصل استطاعتها إلى 30 MW بتزويد المدن الصغيرة بالتيار الكهربائي وحرارة التدفئة. ووقود الكتلة الحيوية لهذه المحطات يتم جلبه من البقايا الزراعية للمناطق المجاورة لتكون مسافة النقل صغيرة ما أمكن. تكتسب نباتات الطاقة سريعة النمو مثل الحلفاء الصينية أو اللفت أهمية خاصة، ويمكن استخدام 10 % أو 20 % من أصل 19.5 مليون هكتار (التي تمثل المساحة الزراعية في ألمانيا) لزراعة نباتات الطاقة دون الخوف من أن تشكل منافساً للمحاصيل الزراعية الغذائية، حيث يمكن زراعة نباتات ذات كتلة حيوية تحمل من الطاقة ما مقداره 841 PJ سنوياً. وهذا يعادل 5 % من الطلب على الطاقة الإبتدائية في ألمانيا. وعلى المستوى العالمي تؤمن الكتلة الحيوية 10 % من الطاقة.

في الدول النامية بشكل خاص يغطي 90 % من استهلاك الطاقة بواسطة الكتلة الحيوية، على الرغم من أنها لا تعتبر دوماً مصدراً متجدداً للطاقة، لأن الكثير من الدول تستهلك من الطاقة الحيوية أكثر مما ينمو فيها ثانية. لا يتوقع التوسع في زراعة هذه النباتات الحاملة للطاقة في الوقت الحاضر لأن تكاليف استثمار الكتلة الحيوية تفوق تكاليف الوقود الأحفوري. ولهذا السبب تم التراجع عن مشروع زراعة قصب السكر لإنتاج الكحول الإيثيلي (الوقود الحيوي السائل) المستخدم لتشغيل السيارات في البرازيل.

تكتسب الكتلة الحيوية أهمية خاصة بسبب استقرارها وثباتها وتمتلك طاقة مخزنة ثابتة يمكن استخدامها في أي وقت، بعكس الطاقات المتجددة الأخرى.

ويمكن وصف عملية إنتاج الكتلة الحيوية بواسطة المعادلة التالية:



تتفكك المواد الملونة مثل الكلوروفيل وبالإستفادة من طاقة ضوء الشمس المرئي ΔE يمكن تفكيك الماء، وتشكل من الهيدروجين H وثاني أكسيد الكربون CO₂ الموجود في الهواء كتلة حيوية صيغتها C_kH_mO_n وينطلق جراء هذه العملية الاكسجين. بعد ذلك يمكن استخدام الكتلة الحيوية بطرائق مختلفة في توليد الطاقة، وينشأ في العادة CO₂ ولكن كمية ما ينطلق من CO₂ لا تزيد عن الكمية التي سحبت مسبقاً من الهواء. فإذا لم تستخدم من الكتلة الحيوية إلا كميات معادلة لما ينمو ثانية، فإنه يمكن اعتبار الكتلة الحيوية عندئذ منبعاً متجدداً حياً بالنسبة للمناخ. تكمن الطاقة الحيوية بصور معقدة في نظم الكتلة الحيوية العالمية لإنتاج الغذاء والعلف والألياف وللمنتجات الحراجية، وفي إدارة المخلفات والنفايات وسبل العيش اليومية لمليارات البشر في البلدان النامية.

ويتطلب توسيع نطاق إنتاج الطاقة الحيوية توسيعاً كبيراً، إدارة متقدمة لاستخدام الأراضي والمياه، وتحقيق زيادة في إنتاجية المواد الأولية للغذاء والعلف والألياف والمواد الحراجية والطاقة، وادخال تحسينات جوهرية على تكنولوجيا تحويل الطاقة، والوصول لفهم أرقى للتفاعل بين المجتمع والطاقة والبيئة والمرتبطة بإنتاج الطاقة الحيوية واستخداماتها. تتضمن الكتلة الحية فضلات نباتية من المزارع والحقول، وفضلات الصناعات الغذائية والميكروبيولوجية، وفضلات المزارع الحيوانية، والمدن.

نذكر من طرق تحويل الكتلة الحية إلى وقود صالح للاستعمال في شكل صلب أو سائل أو غازي: **طريقة الحرق المباشر للفضلات** وهذا يؤدي إلى انبعاث غازات الدفيئة إلى الجو، والاستخلاص، والهضم اللاهوائي للفضلات الحيوانية للحصول على الغاز الحيوي والأسمدة الممتازة باستخدام المخمرات، والتميع (التحويل إلى سائل)، والتغويز وغيرها، من بين نواتج هذه الطرق نذكر الإيثانول وهو أحد أهم أشكال الكحول المستخرج من تخمر الحبوب، حيث يتم استخلاصه من قصب السكر والنشاء، وهو الجيل الأول لما يعرف بالوقود الحيوي، ومن بين الدول الرائدة في هذا المجال البرازيل حيث يتم استعماله كوقود للسيارات بنسبة تزيد عن 60 %، أما الجيل الثاني من الوقود الحيوي فيتم العمل على تطوير استخلاصه من الطحالب، لتفادي استعمال المحاصيل الزراعية المستخدمة كغذاء للإنسان، وتفادي انعكاس زيادة الطلب على الأسعار والأمن الغذائي، وحسب دراسة قام بها مجموعة من الباحثين الأمريكيين من قسم الأبحاث الزراعية بوزارة الزراعة الأمريكية عام 2007 وجدوا أن كمية الوقود المستخرجة من الطحالب تزيد 100 مرة عن تلك المستخرجة من المحاصيل العادية كقصب السكر، كما أنها لا تحتاج سوى لمساحة صغيرة لزراعتها، ومما يزيد من أهميتها هو إمكانية زيادة حجم الوقود المستخرج عن طريق الهندسة الوراثية.

إن أهم عائق يواجه إنتاج الجيل الثاني من الوقود الحيوي هو ارتفاع تكاليف الإنتاج وعنق الزجاجة في هذه العملية هو التكنولوجيا العالية المطلوبة لإنتاج وقود الطحالب، فارتفاع تكاليف زراعة تركيزات عالية منها إضافة إلى ارتفاع تكاليف استخلاص الوقود يجعل من الطحالب أكثر تكلفة من مصادر الوقود الحيوي الأخرى.

2-1-2- الطاقة الشمسية:

طاقة الشمس طاقة هائلة يمكن استغلالها في أي مكان، خلال هذا القرن المرشح الأول لزراعة عرش النفط، وتشكل مصدراً مجانياً للوقود الذي لا ينضب، كما أنها طاقة نظيفة لا تنتج أي نوع من أنواع التلوث البيئي، وتأتي أهميتها بالنظر إلى استمراريتها ومحدودية المصادر التقليدية.

يمكن استخدام **المحطات الشمسية الحرارية** لتوليد الكهرباء أو توفير الحرارة ذات الدرجات المرتفعة.

بين عامي 1984 و 1999 وضعت تسع مزارع شمسية كبيرة قيد الاستخدام أشير إليها ب SEGs (Solar Electric Generation System) SEGs IX و لكل من هذه المزارع استطاعة كهربائية اسمية تتراوح بين 13.8 MW و 80 MW وقد ساهمت في تجهيز هذه المنشأة شركات أوروبية.

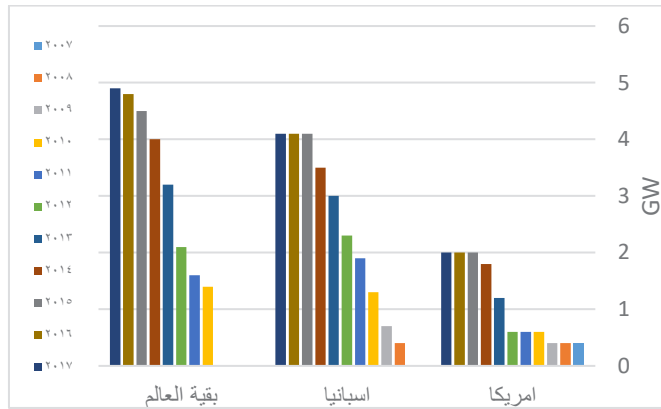
يمكن الوصول في المحطات ذات الأبراج الشمسية إلى درجات حرارة تفوق 1000°C بسهولة، تستخدم هذه الحرارة لتوليد الكهرباء في محطة توليد طاقة بخارية، أو في العمليات الصناعية. ويوجد في الولايات المتحدة الأمريكية وإسبانيا محطات تجريبية من هذا النوع. ويوجد في فرنسا منشأة ذات مرايا (فرن شمسي) يتم الحصول من خلالها على درجة حرارة تفوق 4000°C يمكن استخدامها للعمليات الصناعية وللأغراض التجريبية.

أما منشأة صحن ستيرلينغ و التي تتضمن استخدام مرآة مقعرة لتركيز الضوء، فإنها تأخذ شكل صحن كبير على المحرق، وتوجد بعض النماذج منها ذات استطاعة تصل إلى 50 kW في كل من الولايات المتحدة الأمريكية وإسبانيا والسعودية، ومردود المنشأة التي استطاعتها 9 Kw في إسبانيا.

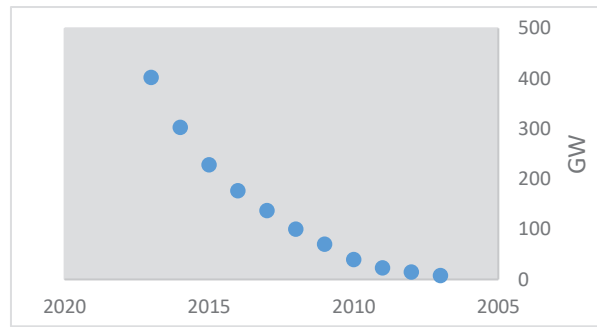
تبلغ التكاليف الحالية لإنتاج كيلو واط ساعي من الكهرباء تبعاً للتقانة وموقع المنطقة أقل من 0.15 €/kWh_{el} وهذا لا يزيد إلا قليلاً عن كلفة محطات الطاقة التقليدية.

لا تستخدم المنشآت ذات المجمعات الشمسية بكثرة للتدفئة، وإنما لتسخين الماء المنزلي. وفي عام 2000 ركبت في ألمانيا حوالي 600000 m^2 من المساحة للمجمعات. وقد كانت مساحة المجمعات في ألمانيا عام 1999 نحو 28 m^2 لكل 1000 شخص، بينما بلغت لكل

شخص في النمسا هذه المساحة 800 m^2 . يبين الشكل 1-2 تغير الطاقة الشمسية الحرارية حسب المناطق وتطور نسب تخزينها على مستوى العالم. [17, 18] (SEIA, 2022، الطاقة، 2022)



الشكل 1-2 تغير نسب تخزين الطاقة الشمسية الحرارية حسب المناطق يظهر الشكل 2-2 تغير الطلب العالمي على الطاقة الشمسية الكهروضوئية خلال أعوام 2007-2017 ، وأن هذا الطلب في تزايد مستمر ففي عام 2016 بلغ 303 GW وارتفع إلى 402 GW خلال 2017 بزيادة قدرها 32.7% . [17, 18] (SEIA, 2022 - الطاقة، 2022)



الشكل 2-2 الطلب العالمي على الطاقة الشمسية الكهروضوئية خلال أعوام 2007-2017
3-1-2- الطاقة الحرارية الجوفية (الجيوحرارية):

تزداد درجة حرارة القشرة الأرضية بزيادة العمق بحيث تصل درجة حرارة نواة الكرة الأرضية حوالي $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ إلى $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ ينتج سريان هذه الحرارة الجوفية في أراضي القارات عن النشاط الإشعاعي للقشرة الأرضية، وتعتبر هذه الطاقة الحرارية الجوفية مصدر لا ينفذ ومخزن في الماء الساخن أو الصخور، تغلي الأرض تحت أقدامنا حيث أن درجة حرارة 99% من الكوكب تتجاوز $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ وتنخفض إلى أقل من $100 \text{ }^\circ\text{C}$ عند الطبقة الخارجية، وبالتالي يمكن القول أن الحرارة الجوفية هي مصدر متجدد لنوعين هامين من الاحتياجات الطاقوية هما الكهرباء و الطاقة الحرارية، وتستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية في محطات الطاقة الحرارية أو في التطبيقات المنزلية والصناعية الزراعية الأخرى التي تتطلب

الحرارة، وفي تطبيقات توليد الحرارة والطاقة المشترك. وليس لتغير المناخ أي تأثير على فعالية الطاقة الحرارية الأرضية. [12] (مريم بو عشير، 2011)

2-1-4- الطاقة المائية:

تعتبر محطات المياه والكتلة الحيوية، الشكل الوحيد للطاقات المتجددة المستخدمة على نطاق واسع عالمياً في الوقت الحاضر، حيث يمكن توليد تيار كهربائي في محطات المياه الجارية وذلك باستخدام مياه الأمطار أو المياه الناتجة من ذوبان الثلوج.

يبين الجدول 2-2 نسبة مساهمة المحطات الكهرومائية في توليد الكهرباء في بعض بلدان أوروبا.

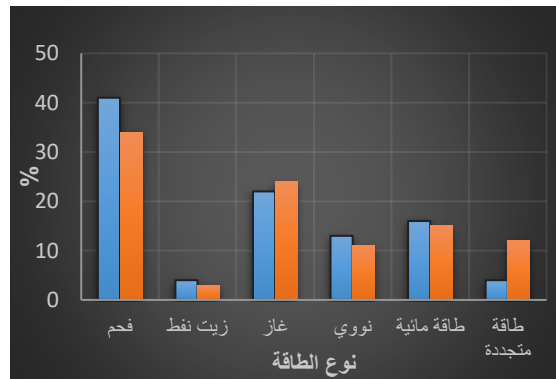
الجدول 2-2 نسبة مساهمة المحطات الكهرومائية في توليد الكهرباء في بعض بلدان أوروبا.

البلد	النرويج	النمسا	سويسرا	فرنسا	أيزلندا	ألمانيا	هولندا
النسبة %	99	66	54	13	90	4	0.1

2-1-5- طاقة الرياح: [19] (فريد أبو حامد، 2017)

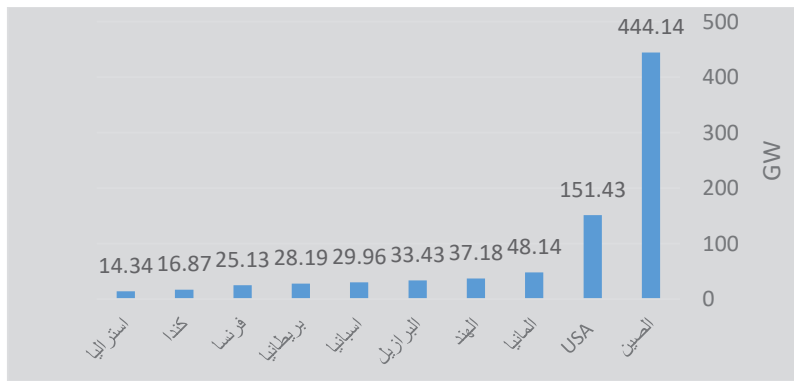
قدر العلماء أن 2 % من الطاقة الشمسية الساقطة على سطح الأرض تتحول إلى طاقة رياح لذا فإن أصل طاقة الرياح هي الشمس، وطاقة الرياح هي طاقة سريعة التأثير بالتغيرات في أشكال طبوغرافية المنطقة و الأنماط المناخية لها، إضافة إلى التغير المكاني هناك تغير زمني، حيث يسجل فرق في الطاقة المنتجة من الرياح خلال اليوم الواحد وخلال فصول السنة وحتى من سنة إلى أخرى، إضافة إلى ذلك هناك مشكلة تعيق استغلال هذا المصدر وهي صعوبة تحديد الأماكن الأفضل، وكذا تحديد مورد الرياح الذي يمكن الحصول عليه عملياً في منطقة معينة.

يوضح الشكل 2-3 أنواع مصادر الطاقة المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية والتوقعات المستقبلية لها بحلول عام 2030 مقارنة مع عام 2011.



الشكل 2-3 أنواع الطاقات المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية [19, 20] (فريد ، 2017، وكالة أبحاث الطاقة)

يظهر الشكل 2-4 أكبر عشر دول في قدرة طاقة الرياح عالمياً حتى عام 2024. حيث حلت الولايات المتحدة الأمريكية في المركز الثاني بعد الصين مع وصول قدرة طاقة الرياح إلى 151.43 GW أو ما يعادل 5 % من الإجمالي العالمي، وتحتل ألمانيا المركز الثالث بقرابة 48.14 GW تليها الهند 37.18 GW، ثم البرازيل 33.43 GW، وإسبانيا 29.96 GW، أما المملكة المتحدة 28.19 GW، وفرنسا 25.13 GW. وأخيراً كندا ثم أستراليا. بلغت قدرة طاقة الرياح العاملة في آسيا قرابة 521.72 GW وفي أوروبا 227.7 GW تليها أمريكا الشمالية 168.3 GW ثم أمريكا الجنوبية 57.1 GW وأوقيانوسيا 15.6 GW وأخيراً أفريقيا 9.63 GW.



الشكل 2-4 أكثر عشر دول امتلاكاً لقدرة توليد طاقة الرياح عالمياً نهاية عام 2024

في روسيا تأسست أول مؤسسة مركزية لطاقة الرياح بعد عام 1918 في الاتحاد السوفييتي السابق، وكانت وظيفتها تطوير عدد من الآلات المقادة بسرعة الرياح. وتعد أمريكا أرضاً خصبة لهذا الشكل من التكنولوجيا فقد انتشرت الطواحين الهوائية في الولايات المتحدة الأمريكية وبخاصة في المناطق التي كان من الصعب إيصال الخدمات الكهربائية إليها. وقد تم تشكيل وكالة سميت وكالة الطاقة الفيدرالية الأمريكية للرياح ووضعت تحت تصرف هذه الوكالة امكانات هائلة تقدر بمئات الملايين من الدولارات، وتضم هذه الوكالة مئات الاختصاصيين و الباحثين في هذا المجال. أشار بعض الخبراء أن الطواحين الهوائية تكفي % 10 من حاجة البلاد للكهرباء وهذا يوفر عليها ملايين الدولارات التي تصرف لشراء النفط.

ظهرت في كل من الدانمرك والسويد وألمانيا الغربية وبريطانيا وفرنسا وهولندا أبحاث هامة في هذا الموضوع خلال الخمسون سنة الماضية ولمعت أسماء كثيرة لأشخاص وشركات مهمة ومهتمة بطاقة الرياح والتي صنعت محطات ذات استطاعات متنوعة أعطت نتائج جيدة ونصبت في أماكن عديدة. وقد بلغت الاستطاعات المولدة من المحطات الكهروهوائية في السويد عام 1980 إلى 500 MW.

في ألمانيا تم تصنيع أكبر منشأة لاستثمار طاقة الرياح وكانت استطاعة العنفات الريحية 5000 kW لاستثمار طاقة الرياح بواسطة المحرك الرياحي على مصب نهر الألب وتسمى هذه المجموعة كرويان قطر العنفة فيها 100 m وضعت فوق برج ارتفاعه 100 m ولو قورنت هذه المجموعة بمفاعل ذري يعطي مليون كيلو واط لكانت نسبتها صغيرة جداً، أي أنه يجب إقامة منتي منشأة من هذه النوعية للحصول على نسبة من الطاقة تعادل نسبة مفاعل ذري واحد. [2](باكير، 2007)

في الدول العربية يعتبر المغرب مثلاً يحتذى به في البلدان العربية، والقارة الإفريقية في مجال الطاقات المتجددة، حيث سعى إلى التخفيف من استعمال الطاقة التقليدية، وقاص استخدام الفحم من % 48 إلى % 14، و الفيول من % 20 إلى % 14، في الفترة الممتدة بين 2010-2020، بالمقابل هدف إلى رفع حصة الطاقة المتجددة الممثلة بالرياح، والشمس والمياه إلى % 42، ضمن محفظة الطاقة، ورفع مساهمة الرياح من % 3 إلى % 14، وتجاوز إنتاجه من الطاقة الكهربائية عام 2020 قيمة 2000 MW.

تشهد مشاريع طاقة الرياح في المغرب، رغم قلة شهرتها مقارنة مع مشاريع الطاقة الشمسية ازدهاراً كبيراً خاصة في منطقة طرفاية (جنوب غرب المغرب)، حيث يوجد أكبر مزرعة للطاقة الريحية في إفريقيا باستطاعة 300 MW، وتمتاز المنطقة التي اختيرت لتشبيد محطة طرفاية برياح سرعتها بين 7-9 m/s، وتلك سرعة نادرة حيث يبلغ المعدل الوسطي لهذه السرعات 8.3 m/s.

و من أبرز المزارع الريحية المنفذة في المغرب:

١- المزرعة الريحية (طنجة-تطوان): نفذت عام 2000 باستطاعة 50 MW، وتضم 84 عنفة ريحية.

٢- المزرعة الريحية في تطوان: ونفذت عام 2005 باستطاعة 32 MW.

٣- المزرعة الريحية في طنجة: باستطاعة 140 MW، وتضم 165 عنفة ريحية.

٤- المزارع الريحية في الصويرة: باستطاعة 65 MW.

٥- المزرعة الريحية في تازة و نفذت عام 2009 باستطاعة 100 MW.

ومن المزارع الريحية قيد التنفيذ في المغرب:

- مزرعة الرياح في العيون باستطاعة 240 MW .
- مزرعة الرياح في فم الواد باستطاعة 200 MW .
- مزرعة الرياح في طرفاية باستطاعة 300 MW.
- مزرعة الرياح في تازة- الطواهر باستطاعة 150 MW.

- مزرعة الرياح في طنجة- دار الشاري باستطاعة 135 MW و تضم عنفة 45. في نهاية عام 2024 جاءت المغرب في المركز الثاني بقائمة أكثر الدول العربية امتلاكاً لقدرة طاقة الرياح بسعة 1.29 GW. من المتوقع أن يتم إنتاج % 20 من الكهرباء في مصر من مصادر الطاقات المتجددة كطاقة الرياح وطاقة الشمس بحلول عام 2025. في مصر تعتبر محطة الزعفرانة من أوائل مزارع الرياح إنتاجاً للطاقة الكهربائية في المنطقة العربية كلها، نفذت بدعم من جهات عربية داعمة، وتقع على بعد 120 km جنوب مدينة السويس، يصل حجم المشروع إلى 700 عنفة ريحية يبلغ إنتاجها 1400 GW/h سنوياً، وتقلل من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بنحو 800000 ton/year. يوجد في مصر أكثر من مزرعة رياح عاملة تتقدمها محطة رياح جبل الزيت بسعة 580 MW، إضافة إلى محطات رياح رأس غارب و خليج السويس وغرب بكر، بسعات 262، و 252، و 250 MW على الترتيب. افتتحت مصر عام 2023 محطة رياح في خليج السويس بقدرة 252 MW إضافة إلى محطات رياح ضخمة تعمل على تنفيذها ومنها مشروع طاقة رياح خليج السويس وجبل الزيت بسعة اجمالية 1.1 GW. في الأردن نفذ أول مشروع لطاقة الرياح في منطقة الطفيلة باستطاعة 117 MW، بتكلفة 205 مليون دولار ورفع الأردن إسهامات الطاقة المتجددة من الطاقة الكهربائية حتى وصلت إلى نحو % 20 في عام 2020. وافتتح في معان مشروع طاقة الرياح بتمويل من الصندوق الكويتي للتنمية الاقتصادية العربية بكلفة 148 مليون دولار، لتوليد طاقة كهربائية مقدارها 200 GW/h سنوياً. كما يوجد بمحافظة معان مشروعان لطاقة الرياح في منطقتي (الفجيع والراجف)، وباستطاعة تبلغ 89 GW لمشروع الفجيع، و 82 MW لمشروع الفاجع، وتبلغ قيمة مشاريع طاقة الرياح المنفذة والمتعاقد عليها نحو 470 MW. عربياً احتل الأردن المركز الثالث في امتلاكه لطاقة الرياح عام 2023 مقابل % 0.63 في عام 2015. تعد مزرعة الطفيلة أول محطة للطاقة المتجددة بقدرة 117 MW وتدعم تطلعات قطاع الطاقة في الأردن لتحقيق نمو وزيادة قدرة الطاقة المتجددة في توليد الكهرباء إلى % 50 بحلول عام 2030.

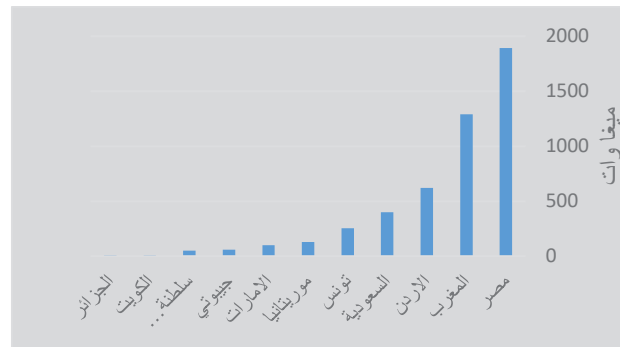
احتلت السعودية المركز الرابع بقائمة أكثر الدول العربية امتلاكاً لطاقة الرياح، بسعة بلغت 400 MW عام 2024، وتمثل محطة رياح دومة الجندل بقدرة 400 MW أول مشروعات طاقة الرياح في السعودية التي تستهدف زيادة قدرتها إلى 3.17 GW خلال ثلاث سنوات. يتوقع البدء بالانتاج من مزرعة رياح بطاقة 1.37 GW بحلول عام 2026 وهي تابعة لمشروع نيوم للهيدروجين الأخضر.

وأطلق البرنامج الوطني للطاقة المتجددة في المملكة مناقصة لثلاثة مشاريع لطاقة الرياح توزعت على المدن التالية: وعد الشمال بقدرة 500 MW وينبع بقدرة 700 MW، والغط بقدرة 600 MW.

وجاءت تونس في المركز الخامس بسعة توليد للكهرباء من طاقة الرياح قدرها 253MW عام 2024.

قامت الجزائر بالعمل على إنتاج الطاقة من مصادر متجددة حيث يمكن أن تغطي في أفق 2040 نحو 35 % من الطلب الوطني على الطاقة، وقد أسهمت الطاقات المتجددة بتوفير ما بين 6-8 % من الكهرباء المستهلكة في عام 2020.

يظهر الشكل التالي 2-5 الذي أعدته وحدة أبحاث الطاقة قائمة أكثر الدول العربية امتلاكاً لقدرة طاقة الرياح.



الشكل 2-5 أكثر الدول العربية امتلاكاً لقدرة طاقة الرياح. [17, 18] (SETA, 2022) (الطاقة، 2022)

2-1-6 طاقة الهيدروجين:

بدأ استخدام الهيدروجين كمصدر بديل للطاقة في بداية القرن العشرين، إلا أن هذه العملية صادفتها صعوبات منها ارتفاع تكلفة إنتاجه، ففصل الهيدروجين عن الأكسجين عن طريق التحليل الكهربائي أو الحراري للماء يحتاج إلى طاقة كما يحتاج لإنتاجه لطاقة أولية كالماء، وهو ما أعاق تطور إنتاجه، والذي عرف خلال العقود الأخيرة اهتماماً متزايداً بالنظر لأهميته ومؤهلاته التي تسمح له أن يحل محل الطاقات التقليدية، وقد ترجم هذا الاهتمام بتطوير طرق إنتاج الهيدروجين وخفض في تكلفة الإنتاج، كما نجح العلماء في مركز الطاقات المتجددة في

الولايات المتحدة الأمريكية في إنتاجه باستخدام الطاقة الشمسية، فقد ابتكروا جهازاً يقوم بفصل الهيدروجين من الماء وتحويله إلى طاقة كهربائية في نفس الوقت باستخدام أكثر من 12.5 % من الشعاع الشمسي، ويبقى أهم عائق هو عائق التكلفة حيث ما زال الجهاز غير اقتصادي التكلفة . يمتلك الهيدروجين مزايا عديدة تؤهله لأن يكون الوقود المستقبلي ومنها القدرة على التخزين، والتي يتفوق بها على الطاقات المتجددة الأخرى التي تعاني من عدم التواجد الدائم بنفس القدرة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وفي كوريا الجنوبية خصصت الحكومة 39.5 مليون دولار لتمويل مشروع بناء ثلاث سفن لنقل الهيدروجين المسال في البلاد سعة الأولى 2000 m^3 بحلول عام 2027، ومن المقرر أن يكتمل بناؤها عام 2030، كما أعلنت تطوير ناقلة هيدروجين مسال أخرى 40000 m^3 بحلول عام 2032، وأخرى بسعة 160 ألف متر مكعب بحلول عام 2040. وأوضحت وزارة التجارة والصناعة والطاقة الكورية الجنوبية أن أكبر ناقلة هيدروجين مسال ستعمل على تقليل حجمه 800 مرة وستزيد كفاءة النقل أكثر من عشر أضعاف.

الفصل الثالث

انتاج الديزل الحيوي من الكتلة الحيوية (زيوت الطهي المستعملة)

3-1- الديزل الحيوي: [21, 22, 23] (سعدون و رفاقه، 2018- الفياض، 2009- الزنكوي)

الديزل الحيوي هو وقود مصنع من المصادر القابلة للتجدد مثل الزيت النباتي المستعمل أو الدهون الحيوانية، ويمكن أن يستعمل كبديل مباشر لوقود الديزل البترولي في محركات الديزل. هو سائل مشابه للديزل البترولي ذو لون عنبري، ويمكن أن يستعمل لوحده في محركات الديزل أو يخلط مع الديزل البترولي بنسب معينة تتراوح بين % 10-100. يساعد ارتفاع محتواه من الأكسجين في اتمام حرق الوقود، مما يقلل من انبعاثات الجسيمات الملوثة للهواء وأحادي أكسيد الكربون والهيدروكربونات، ولكن ذلك يؤثر على خاصية التخزين والثبات، لا يحتوي على الكبريت إلا بكمية بسيطة جداً مما يقلل من انبعاث SO_2 / SO . تعالج الزيوت المستعملة للتخلص من لزوجتها العالية التي تشكل رواسب كربونية داخل محركات الاحتراق الداخلي لإنتاج أحد أنواع الوقود النظيفة، حيث تجري لها عملية أسترة باستخدام كحول الميثانول أو الايثانول أو البروبانول، وبوجود وسيط متجانس مثل الصودا الكاوية أو البوتاس الكاوي، أو وسيط غير متجانس.

3-2- خطوات إنتاج الديزل الحيوي

١. إنتاج ميثوكسيد البوتاسيوم بخلط الميثانول بالبوتاس الكاوي.
٢. تفاعل الزيت مع الميثوكسيد عند $60^\circ C$ مع التحريك.
٣. فصل الغليسيرين وتنقيته.
٤. غسيل الديزل الحيوي بالماء المقطر والتجفيف.

يتميز الديزل الحيوي بالتوفير في استهلاك السيارات للوقود، وتخفيض غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة % 60، وعدم وجود انبعاث لغاز ثنائي أكسيد الكبريت SO_2 ، وتخفيض انبعاث غاز أول أكسيد الكربون بنسبة % 10-15 وانعدام انبعاث الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات مما يزيد من عمر محركات الديزل وهو أكثر أماناً من الديزل البترولي.

قابل للنقل، ومتوفر بشكل دائم، ومتجدد، وله رقم سيتان مرتفع. [24] (كريستيان و رفاقه، 2009) بالمقابل ترتفع فيه نسبة الأكاسيد الأزوتية التي تعتبر المفتاح في تشكل الضباب الدخاني، ويتميز باللزوجة العالية، وانخفاض محتوى الطاقة، انخفاض سرعة المحرك، وتدهور نوعية الوقود عند التخزين لفترات طويلة.

3-3- العمل التجريبي (إنتاج وقود الديزل الحيوي):

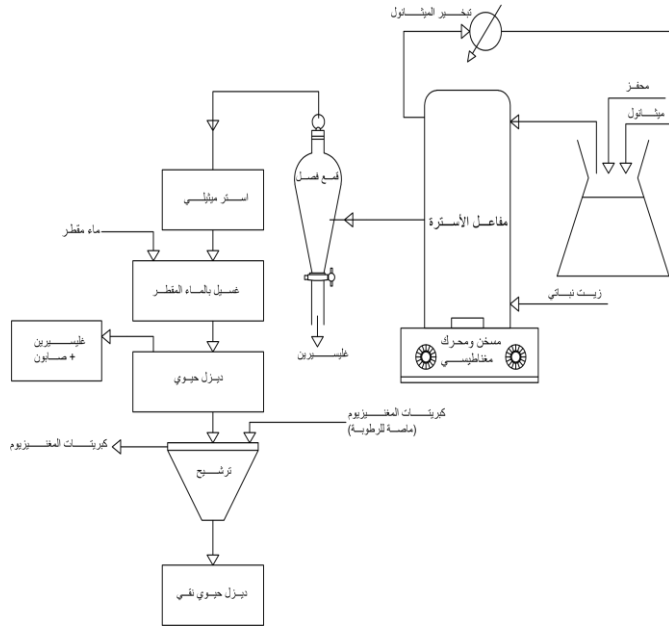
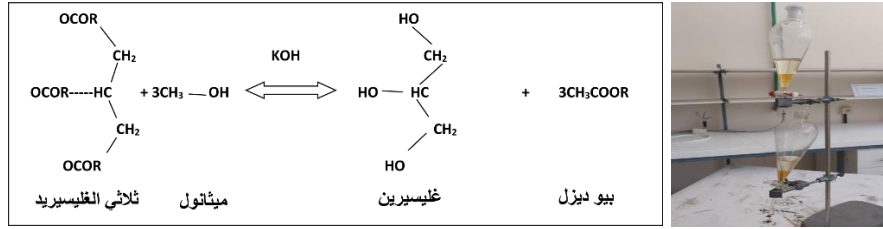
أنتج وقود الديزل الحيوي (أستر ميثيل الأحماض الدهنية) من نوعين من الزيوت النباتية الأول زيت دوار الشمس الجديد والمستعمل والثاني زيت فول الصويا، في حالتين مختلفتين:

وجود وعدم وجود محفزات غير متجانسة، عند نسب حجمية مختلفة ميثانول إلى زيت، وأزمنة تفاعل مختلفة، ودرجة حرارة ثابتة 65°C وسرعة تحريك ثابتة 900 دورة/دقيقة.

في الحالة الأولى استخدمت ماءات البوتاسيوم كمحفز، وفي الحالة الثانية استخدم محفز صلب غير متجانس (مكون من أكسيد الفناديوم المحمل على الكاؤولين). هذا المحفز عالج عيوب استخدام المحفزات المتجانسة.[27](Chen, 2012)

الأسطرة المحفزة غير المتجانسة تندرج ضمن مصطلح التكنولوجيا الخضراء بسبب سهولة فصل الديزل الحيوي عن الغليسرين وسهولة استرجاع المحفز، ولا حاجة إلى عمليات غسل الديزل الحيوي. يمثل الشكل 1-3 خطوات إنتاج الديزل الحيوي.

تفاعل الأسطرة: (1998- Overview. 2014- Micic, 2022- khemnath, 2022, 29, 30)

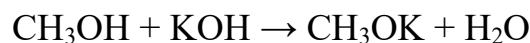


الشكل 1-3 خطوات إنتاج الديزل الحيوي

تمت دراسة مواصفات الديزل الحيوي الناتج، وقورنت مع المواصفات القياسية للديزل الحيوي.

خطوات العمل :

تم تسخين الزيت النباتي المستهلك إلى 85°C لنزع الماء الزائد في الزيت، بُرد الزيت إلى درجة حرارة التفاعل والتي ثبتت عند 65°C مع التحريك بسرعة 900 دورة/دقيقة، أضيف الميثانول إلى KOH لتشكيل ميثوكسيد البوتاسيوم الذي أضيف بدوره إلى الزيت بنسب حجمية للميثانول تراوحت بين (0.1-0.6) حجماً، ولماءات البوتاسيوم بين % 1-2 وزناً.



بعد إضافة ميثوكسيد البوتاسيوم، استمر التفاعل نصف ساعة وتشكل طوران، وخلال أقل من سبع دقائق تقريباً فصلت الطبقتان، العليا هي الديزل الحيوي والسفلى هي الغليسيرين، غُسل الديزل الحيوي الناتج بالماء المقطر ثم اتبعت العملية بالترشيح والتجفيف.

أعيدت التجربة بإضافة محفز صلب غير متجانس مكون من أكسيد الفناديوم المحمل على حامل من الكاؤولين، وقورنت النتائج مع حالة استخدام محفز آخر غير متجانس مكون من أكاسيد الحديد والنحاس المحملة على الغضار المشوي، فكانت النتائج متقاربة وواعدة جداً حيث تم التفاعل خلال 15 min فقط، وبذلك انخفض زمن التفاعل الى النصف لدى استخدام الحفازين كلٍ على حدا.

حجم الزيت المعالج 50 ml عند درجة حرارة ثابتة 65°C وسرعة تحريك ثابتة 900 دورة/دقيقة، ونسبة ماءات بوتاسيوم % 1 حجماً. يمثل الجدول 1-3 نتائج تفاعل الأسترة العابرة في وسط قلوي لزيت دوار شمس جديد، وتم حساب مردود التفاعل وفقاً للعلاقة:

$$\text{المردود} = (\text{حجم الديزل الحيوي} * \text{كثافته} / \text{حجم الزيت} * \text{كثافته}) * 100$$

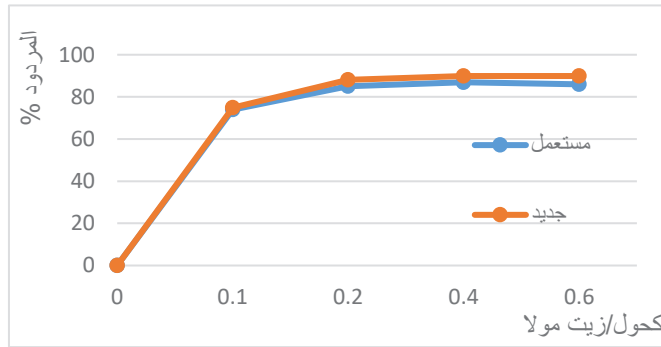
الجدول 1-3 نتائج الأسترة العابرة المتجانسة لزيت دوار الشمس الجديد

نسبة حجمية (ميثانول/زيت)	الديزل الحيوي- ml	الغليسيرين- ml	المردود %
0.1	40	15	74.9
0.2	47	13	88.05
0.4	48	13	89.9
0.6	48	13	89.9

أعيدت التجارب عند النسبة % 2 وزناً من KOH فكانت متقاربة جداً، وبالتالي من غير المجدي استخدام تراكيز أعلى من 1 % وزناً من KOH.

لدى استخدام زيت دوار الشمس المستعمل (زيت قلوي)، كانت درجة لون الديزل الحيوي والغليسيرين الناتجين أكبر، انخفض مردود التفاعل. وأفضل نسبة (كحول/زيت) في الحالتين هي % 0.2 حجماً، ونسبة ماءات البوتاسيوم % 1 وزناً، وزمن تفاعل 30 min، ودرجة حرارة 65°C .

قورنت النتائج مع حالة أسترة زيت فول صويا جديد عند نفس الشروط السابقة فكان مردود تفاعل الأسترة % 77.6، بالتالي يمكن القول أن زيت دوار الشمس الجديد أعطى نتيجة أفضل بقليل. يوضح الشكل 2-3 تغير المردود مع تغير النسبة (كحول إلى زيت) لكل من زيت دوار الشمس الجديد والمستعمل على الترتيب. ويوضح الجدول 2-3 الخصائص الفيزيائية لوقود الديزل الحيوي الناتج من الأسترة العابرة المتجانسة في وسط قلوي.



الشكل رقم (2-3) تغير مردود الديزل الحيوي لزيت دوار الشمس الجديد و المستعمل.

الجدول 2-3- الخصائص الفيزيائية للديزل الحيوي الناتج

الخصائص	زيت فول صويا جديد	زيت دوار شمس جديد	زيت دوار شمس مستعمل
الكثافة kg/m^3	0.88	0.852	0.86
اللزوجة الحركية- mm^2/sec	4.92	4.28	5.23
API gravity	29.29	34.50	32.9
T 90 % - C°	335	333	334
رقم السيٲان (ASTM D976)	53	50.87	49.2
مؤشر السيٲان (ASTM D4737)	63.5	62.5	61
C° - نقطة الوميض	154	110	113

لمقارنة نتائج الأسترة المتجانسة مع الأسترة غير المتجانسة تم تحضير الحفاز غير المتجانس (أكاسيد معدنية محملة على الغضار أو الكاؤولين)، حيث حضر حامل الحفاز من عجينة الغضار الذي نشط بمحلول حمض كلور الماء % 1 حجماً، لمدة 48 h، ثم رشح وغسل بالماء المقطر، ثم شكّلت العجينة على شكل عصيات بطول (1-2) cm وقطر (2-3) mm، وبعد التجفيف مدة 24 ساعة في الهواء، جفف عند درجة الحرارة $150^{\circ}C$ في فرن تجفيف، ثم كُلس في فرن حرق عند الدرجة $800^{\circ}C$ ، بعد ذلك حضر الحفاز بطريقة التثريب الرطب لملح نترات الحديد المائية وملح نترات النحاس المائية وبعد التثريح والغسيل بالماء المقطر عدة مرات، جفف الحفاز في الهواء أولاً ثم مرة أخرى عند الدرجة $150^{\circ}C$ ، و كُلس عند درجة الحرارة $300^{\circ}C$ مدة 4 h.

تم توصيف العامل الحفاز (أكاسيد الحديد والنحاس المحملة على الغضار المشوي) باستخدام تقنية الامتصاص الذري (AAS)، يمثل الجدول 3-3 النسب المئوية لأكاسيد الحديد والنحاس قبل وبعد التثريب، أما السطح النوعي للحفاز فكان $209.95 \text{ m}^2/\text{g}$ تم قياسه باستخدام جهاز .Bet

الجدول 3-3 تحاليل الحامل و الحفاز قبل وبعد التثريب

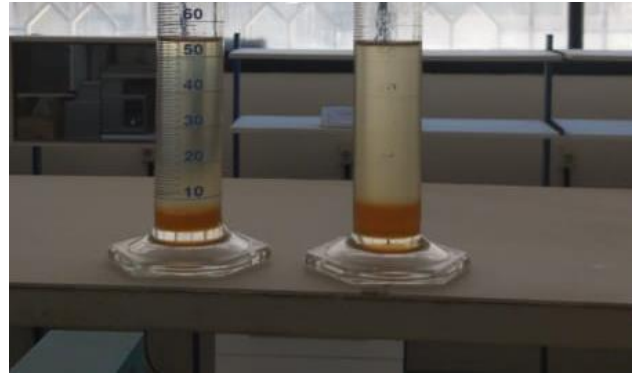
الأكاسيد المعدنية %	الحامل الغضاري	(Fe ₂ O ₃ +CuO)/حامل
Fe ₂ O ₃	10.10	11.2
TiO ₂	3.45	3.66
Al ₂ O ₃	14.67	15.20
K ₂ O	0.12	0.15
MgO	0.67	0.58
CaO	2.87	2.43
SiO ₂	51.36	51.9
CuO	0.89	1.47
P ₂ O ₅	0.9	0.92

أجري تفاعل الأسترة العابرة غير المتجانسة عند أفضل الشروط المطبقة في تفاعل الأسترة المتجانسة حيث النسبة الحجمية للكحول إلى الزيت = 0.2، pH=9، أظهرت النتائج انخفاض زمن تفاعل الأسترة إلى النصف تقريباً، ونقاوة أكبر للديزل الحيوي الناتج مقارنة مع حالة استخدام حفاز متجانس، وسرعة كبيرة في فصل طور الديزل الحيوي عن الغليسرين لم تتجاوز دقائق معدودة، كل هذه الميزات جعلت الحفاز غير المتجانس واعدأ للاستخدام في تفاعلات الأسترة العابرة للزيوت الجديدة أو المستعملة.

كان مردود الديزل الحيوي الناتج عن الأسترة غير المتجانسة لزيت دوار الشمس الجديد % 99.06، و لزيت دوار الشمس المستعمل % 97.92، ولدى مقارنة النتائج مع حالة أسترة زيت فول الصويا الجديد بوجود وسيط غير متجانس كان المردود أخفض وقيمه % 87.51. يظهر الجدول 3-4 تحليل خصائص الديزل الحيوي الناتج في حالة وجود محفز صلب غير متجانس، حيث لوحظ انخفاض في كثافة ولزوجة ورقم السيتان للديزل الحيوي الناتج عن أسترة الزيت المستعمل، مقارنة مع حالة الأسترة العابرة المتجانسة، وزيادة في نقطة الوميض، وهذه النتائج تضيء على الديزل الحيوي الناتج مواصفات أفضل من حالة استخدام محفز متجانس.

[31]SNI, 2015

يبين الشكل (3-3) الديزل الحيوي والغليسرين الناتجين في حالتين وجود وعدم وجود وسيط صلب غير متجانس. تظهر بشكل واضح شفافية الديزل الناتج لدى استخدام وسيط صلب غير متجانس في تفاعل الأسترة.



الشكل (3-3) مقارنة الديزل الحيوي في حالة وجود وعدم وجود حفاز صلب غير متجانس
الجدول 3-4- خصائص الديزل الحيوي الناتج من الأسترة العابرة باستخدام حفاز غير متجانس

المواصفة القياسية [31]	فول صويا جديد	دوار شمس مستعمل	دوار شمس جديد	الخصائص
0.85-0.89	0.838	0.859	0.8504	الكثافة g/cm ³
2.3-6.0	4.1	5.06	4.18	اللزوجة mm ² /sec
-	38.98	33.207	34.89	API
Max. 360	334	335	335	T 90 % ° C
At least 46 EN ISO 5165:1998	49.8	49.46	51.66	رقم السيطان (ASTM D970)
At least 51 EN-ISO 4264:1996	63	61	64.8	مؤشر السيطان (ASTM D4737)
Min. 100	120	120	115	نقطة الوميض
Max. 0.8	0.4	0.3	0.2	Free Fatty Acid mgKOH/g _{oil}

الاستنتاجات:

- النسب العالية من الكحول إلى الزيت تزيد كلفة الإنتاج وتعقد التفاعل، وتسبب صعوبات في تكرير الديزل الحيوي، وتخفيض نقطة الوميض.
- عززت الحفازات الصلبة غير المتجانسة اختلاط الزيت والكحول، وسرعت تفاعل الأسترة، وخفضت الزمن اللازم للعملية إلى النصف، وتم فصل الديزل عن الغليسيرين بوقت قصير جداً، وكان الديزل الناتج نقياً جداً وشفافاً.
- يتمتع بالحفاز الصلب المستخدم بمقاومة ميكانيكية عالية.
- تطابقت المواصفات القياسية للديزل الحيوي المنتج مع المواصفات القياسية العالمية.
- يعتبر هذا الوقود الحيوي آمناً تماماً، وهو خال من أي مادة سامة، بالتالي فإن تأثير تسرب كمية صغيرة منه إلى البيئة أقل بكثير من تأثير تسرب نفس الكمية من الديزل الأحفوري، ولكن تسربه بكميات كبيرة يكون ضاراً.
- يحسن الديزل الحيوي القدرة على التشحيم والتزييت، ما يجعله مناسباً لعمل محركات المركبات على نحو سلس.

الفصل الرابع

انتاج الوقود من التحلل الحراري الحفزي للنفايات البلاستيكية

4-1- مقدمة:

تتكون النفايات البلاستيكية بشكل أساسي من البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، والبولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)، والبولي بروبيلين (pp)، والبولي فينيل كلوريد (PVC)، والبولي ستيرين (PS)، وبولي إيثيلين تريفثالات (PET)، ويشكل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين الجزء الأكبر من النفايات البلاستيكية. [32] (KAPSARC, 2024)

أدت الزيادة في عدد سكان العالم وارتفاع مستويات المعيشة إلى زيادة سريعة في النفايات الصلبة المتولدة، لتصل إلى 1.3 مليار طن سنوياً. وازداد الإنتاج العالمي من البلاستيك من 1.5 مليون طن في عام 1950 إلى ما يقارب 359 مليون طن في عام 2018، ويعزى ذلك إلى الارتفاع السريع في قطاع التعبئة والتغليف، ويتم دفن أكثر من 250 مليون طن سنوياً أو توزيعها في البيئة، ونحو (10 ملايين طن) سنوياً ينتهي بهم الأمر في المحيطات.

بما أن البلاستيك يمكن أن يستمر في البيئة لفترة طويلة، لذلك فإن التخلص المستمر من النفايات البلاستيكية أمراً ضاراً بالنظام البيئي الأرضي والمائي، لعدم تحللها بيولوجياً بسهولة، ويمكن أن تستغرق عدة سنوات لتختفي، وتعتبر بعض الآليات مثل: التحلل الضوئي، الأكسدة التلقائية، الأكسدة الحرارية، التحلل الحراري، التحلل البيولوجي، آليات تحلل للنفايات البلاستيكية قائمة على الطبيعة ولكن بمعدل بطيء للغاية، من ناحية أخرى فإن الملوثات مثل: التولوين، الزيلين، البنزين، الفينولات التي يتم إطلاقها في الهواء والماء والتربة نتيجة لتحلل البلاستيك، تسبب مشاكل لا يمكن تجاهلها مثل: التأثير على صحة الإنسان والحيوان وتدهور نوعية المياه والتربة. [33, 34] (Zhang, 2022, Fucic, 2018)

يحول التحلل الضوئي النفايات البلاستيكية إلى قطع دقيقة (لدائن دقيقة) تطفو على أسطح الأنهار والبحيرات، وينتهي بها الأمر في البحار والمحيطات، ويمكن أن تخرق السلسلة الغذائية.

تستخدم تقنيات معالجة النفايات البلاستيكية مثل التحلل الحراري، والإسالة، والتغويز، لتحويل نفايات البلاستيك إلى وقود (مواد كيميائية)، وتبين أن تقنيات التحلل الحراري والتسييل الحراري المائي، قادرة على تقليل حجم البلاستيك في مدافن النفايات (المحيطات)، وتقليل محتوى الكربون العضوي القاسي، والأهم من ذلك أنها تتمتع بكفاءة تحويل عالية، وتكاليف أقل نسبياً عند مقارنتها بعمليات تحتاج درجات حرارة مرتفعة مثل التغويز. [36] (nanda, 2021)

يمكن تحويل البلاستيك بشكل انتقائي إما إلى زيت حيوي، وبنفط خام حيوي، وغاز التخليق، وهيدروجين، تؤثر متغيرات العملية مثل: معدل التسخين، تركيز المادة الأولية، زمن التفاعل، نوع المفاعل، والعوامل الحفازة بدقة. استخدمت نواتج التحلل الحراري الحفزي لنفايات

البلاستيك المختلطة (بوجود محفز من السيليكا والألومينا والكاولين)، في محركات الديزل، ووصل إنتاج الزيوت البلاستيكية إلى 80 % وزناً.

يتميز زيت التحلل الحراري بعدد سبتان أقل مقارنة بالديزل الأحفوري، وبالتالي تأخر الاشتعال، وكميات حرارة أعلى. [37](Damodharan, 2019)
تكون انبعاثات أكاسيد النيتروجين أعلى مع استخدام زيت التحلل الحراري البلاستيكي، بينما انبعاثات الدخان منخفضة، وزيت التحلل الحراري البلاستيكي مرشح جيد لاستبدال الديزل الأحفوري، ويعمل بسلاسة في محركات الديزل.

أجرى بعض الباحثين [38,39](Williams et al, 2009, 2021) مراجعة حول تحويل النفايات البلاستيكية إلى الهيدروجين والأنابيب النانوية الكربونية، عبر التحلل الحراري المقترن بإعادة التشكيل التحفيزي بالبخار (التحسين الوسيط بالبخار)، وبحث في تأثير تصميم المفاعل ونوع المحفز وظروف التشغيل على إنتاجية وجودة الأنابيب النانوية، وتوصل إلى أن درجة حرارة العملية جنباً إلى جنب مع نوع المحفز هما العاملان البارزان في التحلل الحراري للبلاستيك إلى الهيدروجين والأنابيب النانوية الكربونية.

تم تطبيق مفهوم الاقتصاد التدويري لتعظيم والاستفادة من النفايات البلاستيكية، بما يسهم في توفير الموارد، وخفض نسبة الانبعاثات الكربونية، وخاصة أن كميات المياه والطاقة اللازمة لإعادة تدوير النفايات البلاستيكية أقل من الكميات المستهلكة في إنتاج البلاستيك الجديد. واستند برنامج الأمم المتحدة إلى تجارب نحو 60 دولة حول العالم لاتخاذ التدابير اللازمة لتحسين إجراءات الحد من البلاستيك أحادي الاستخدام. (وحدة أبحاث الطاقة، 2024) [41].

أجريت دراسة حول المنافع البيئية والاقتصادية الممكنة لتدوير النفايات البلاستيكية في المدن العربية، وذلك ضمن خطة متكاملة لإدارة النفايات التي تسهم في حماية الصحة العامة وتحسين الوسط البيئي وصون الموارد الطبيعية، وهذا من خلال قيام الباحث بدراسة الواقع الراهن لقطاع النفايات البلاستيكية في الوطن العربي، بالتطرق لبعض الطرق الحديثة المتاحة في تدوير النفايات والتي تتسجم مع المتطلبات البيئية العربية، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، وقد توصلت هذه الدراسة إلى أن تطوير قطاع النفايات البلاستيكية في المدن العربية يعتبر مطلباً ملحاً وذو أولوية قصوى إذا أريد للوضع البيئي أن يتحسن من خلال الاعتماد على أسلوب تدوير النفايات البلاستيكية بمختلف أنواعها. (خلوفي سفيان، 2022) [42].

أجريت دراسة أخرى لإبراز دور وأسلوب تدوير النفايات البلاستيكية كأحد الأساليب المهمة للتخلص المستدام من النفايات وتحقيق التنمية المستدامة، وقد توصلت هذه الدراسة إلى وجود علاقة سببية بين أسلوب تدوير النفايات البلاستيكية وبين تحقيق التنمية المستدامة، كون هذا

الأسلوب يسهم في الحد من نسبة التلوث واستنزاف الموارد الطبيعية ويقلل من نسب استخدام الطاقة والمواد الأولية نتيجة إدخال هذه النفايات ضمن دورة الإنتاج، وبالتالي يعمل على تخفيض التكاليف إلى جانب خلق مراتب عمل جديدة تعرف بالعمل الأخضر للقائمين بعملية التدوير، مما يساهم في خفض معدلات البطالة. (Adeniran, 2022) [43].

دراسة أخرى وصفت كيفية التخلص من الكمية المتزايدة من النفايات البلاستيكية عشوائياً في جنوب أفريقيا، في حين أن معظم السكان لا يدركون أو لا يهتمون بالآثار البيئية والصحية السلبية لهذه الممارسات الخاطئة التي اعتادوا عليها. هذه الدراسة تبحث في البيئة والصحة وأثار التخلص السيئ من البلاستيك في جنوب أفريقيا كما هو الحال في البلدان النامية الأخرى حيث تفتقر هذه البلدان إلى توعية المواطنين بأهمية التقليل من كميات النفايات البلاستيكية وتأثيرها على صحة الإنسان والبيئة. (Baran, B. 2020) [44].

تم اجراء تقييم لكفاءة إدارة النفايات البلاستيكية في دول الاتحاد الأوروبي، نتج عنها تنفيذاً للسياسات الوطنية في هذا المجال. ونوقشت استراتيجيات النفايات البلاستيكية كاستجابة للتحديات المعاصرة كأحد العناصر الهامة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة والاقتصاد الدائري. (La Revue des Sciences Commerciales, 2018) [45].

تم استعراض عدد من المبادرات الدولية في مجال الالتزام العالمي بشأن الاقتصاد البلاستيكي الجديد الذي يلزم الشركات والحكومات والمنظمات الأخرى نحو الرؤية والأهداف المشتركة لمعالجة النفايات البلاستيكية، وتتضمن إدخال ودمج نسب معينة من النفايات البلاستيكية بعد إعادة تدويرها في إنتاج المنتجات البلاستيكية الجديدة، والتخلص التدريجي من العناصر غير المرغوبة منها، مثل الأكياس البلاستيكية ذات الاستخدام الواحد، والالتزام بإنشاء منظومة الاقتصاد التدويري للنفايات البلاستيكية بحلول عام 2050 [46] (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2024).

قامت شركة "ليونديل باسيل" Lyondell Basel بالإعلان عن خططها لإنتاج نحو 2 مليون طن سنوياً من البلاستيك المعاد تدويره بحلول عام 2030. وقد بدأت في سبتمبر/أيلول 2020 تشغيل مصنعها التجريبي في مدينة "فيرارا" بإيطاليا لإعادة التدوير بتقنية الانحلال الحراري.

قدمت شركة "داو" مشروع لإعادة تدوير حوالي مليون طن سنوياً من البلاستيك بحلول عام 2030، ومن المخطط أن تصل إلى % 100 من منتجاتها من مواد التعبئة والتغليف القابلة لإعادة التدوير أو لإعادة الاستخدام بحلول عام 2030. وقد انتجت الشركة بالفعل في نوفمبر 2020، منتجاً جديداً من أفلام البولي إيثيلين منخفض الكثافة يحتوي على حوالي % 70 من البلاستيك المعاد تدويره.

لدى إجراء مراجعة شاملة لمختلف تقنيات معالجة النفايات البلاستيكية المتقدمة غير القابلة للتحلل البيولوجي، توصل الباحثين إلى أن طرق إعادة التدوير الفيزيائية هي أكثر التقنيات استدامة، مع مراعاة انخفاض أداء البلاستيك بعد عدة عمليات إعادة تدوير، ولقد تم ذكر أن الانحلال الحراري هو المعالجة الحرارية الأكثر استخداماً وأن عائد الوقود (الديزل) هو مؤشر يمكن أن يعكس القيم الفعلية للعملية وقابليتها للتطبيق الصناعي.

يعتبر التحلل البيولوجي تقنية واعدة أخرى، ولكن معظم الدراسات تركز على استخدام أنواعاً مختارة من الكائنات الحية الدقيقة لتحطيم بوليميرات معينة، وعلى هذا النحو هناك حاجة إلى البحث عن الكائنات الحية الدقيقة القادرة على تحلل مخاليط من البلاستيك المختلفة.

التحديات التي يتم التغاضي عنها والمرتبطة بتراكم المواد البلاستيكية الدقيقة في التربة، ألهمت الباحثين استبدال البلاستيك التقليدي بالمنتجات المصنوعة من المواد البلاستيكية القابلة للتحلل، ومن ثم تحويل البلاستيك الحيوي إلى سماد للتخلص منه؛ ومع ذلك يمكن أن يحتوي السماد الناتج على جزيئات بلاستيكية حيوية دقيقة ناتجة عن تحلل حيوي غير كامل، مما يتسبب في تلوث التربة.

نوقشت الأنواع المختلفة لعمليات التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية فيما يتعلق بجودة وكمية المنتجات، علاوة على ذلك؛ مراجعة استخدام زيت البلاستيك الناتج من التحلل الحراري، كوقود أو كمادة ترقية الزيت البلاستيكي من خلال طرق مختلفة (على سبيل المثال التكسير الحراري لاستعادة المونومير و الهدرجة و المزج) جنباً إلى جنب مع تحويل النفايات البلاستيكية إلى أنابيب نانوية كربونية.

عالج هؤلاء المؤلفون هذه المشكلة من خلال تلخيص نماذج المعالجات المسبقة وتقنيات التحلل، وتتضمن كل من نهج التحلل الحراري (أي الانحلال الحراري) وغير التحلل الحراري (أي الفرز المسبق وحدود الكشف ذات الصلة)، وتوصلوا إلى أنه بسبب ضعف المعرفة بمعدل إنتاج المواد البلاستيكية الدقيقة و المصير وخصائص الامتصاص والسمية، يلزم اتباع نهج سريع ومناسب لتحديدها، حيث إن النهج التحليلي الحراري هو أكثر الاستراتيجيات الواعدة.

4-2- النفايات البلاستيكية

ينتج العالم سنوياً نحو 400 مليون طناً من البلاستيك الصناعي، يأتي معظم هذا الإنتاج من قارة آسيا التي تستأثر بنحو % 51 من الإنتاج العالمي، تليها أمريكا الشمالية التي تنتج % 19 من البلاستيك حول العالم. من خمسينات إلى سبعينيات القرن الماضي لم ينتج سوى كمية قليلة من المواد البلاستيكية، و نتيجة لذلك كان التحكم بالنفايات البلاستيكية ممكن نسبياً. لكن بين

سبعينيات و تسعينيات القرن الماضي تضاعف إنتاجها أكثر من ثلاثة أضعاف مما يعكس ارتفاعاً مشابهاً في إنتاج المواد البلاستيكية.

في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرون ازدادت كمية النفايات البلاستيكية المنتجة خلال عقد واحد ما يزيد عما أنتج خلال الأربعين عاماً الماضية. ويتوقع وصول الإنتاج العالمي من المواد البلاستيكية إلى 1100 مليون طن بحلول عام 2050. يستخدم ما يقارب من 36 % من جميع المواد البلاستيكية المنتجة في التغليف والتعبئة بما في ذلك المنتجات البلاستيكية التي تستخدم لمرة واحدة من حاويات المشروبات والأغذية ، والتي ينتهي المطاف بما يقارب 85 % منها في مدافن القمامة أو كنفايات غير منظمة.

يتم طرح أكثر من 50 % من كمية البلاستيك المنتجة عالمياً في مكبات النفايات، أو تتم إعادة تدويرها ويصل أكثر من 15 مليون طن إلى البحار والمحيطات كل عام. هناك عدة طرق ينتهي بها المطاف بالنفايات البلاستيكية في المحيط ويتم توليد ثلثي النفايات من مصادر برية، تترك القمامة على الشاطئ أو تجرفها الأنهار والمصارف.

تظهر النفايات أيضاً من الانسكابات الصناعية أو مواقع دفن النفايات التي تتم ادارتها بشكل سيئ، أو عن طريق صناديق القمامة بالقرب من الساحل. معظم هذه النفايات عبارة عن مواد بلاستيكية تستخدم لمرة واحدة مثل: زجاجات المشروبات وأعواد القطن والأدوات الصحية. يستخدم الحرق أيضاً للتخلص من النفايات ومع ذلك بلغت انبعاثات الولايات المتحدة من حرق البلاستيك 5.9 مليون طن متري من ثاني أكسيد الكربون في عام 2015، ومن المتوقع أن تصل إلى 49 مليون طن متري بحلول عام 2030 و 91 مليون طن متري بحلول 2050. يؤدي حرق النفايات إلى إطلاق آلاف الملوثات التي تؤثر على الأشخاص الذين يعيشون بالقرب من هذه المحارق. عند حرق النفايات البلاستيكية تطلق ديوكسينات ضارة (كيماويات شديدة السمية)، والتي يمكن أن يستنشقها الإنسان والحيوان، وتترسب في التربة والمياه السطحية وتترسب على النباتات. علاوة على ذلك، فإن طمر النفايات يتميز بتأثير بيئي أقل بكثير من الحرق ومع ذلك، فإن مدافن النفايات ممتلئة حالياً، ولا توجد مساحة إضافية لتراكم النفايات.

3-4- كميات النفايات البلاستيكية على مستوى العالم:

تشكل النفايات البلاستيكية مشكلة عالمية ضخمة، إذ تبلغ حالياً 4.9 مليار طن وقد تصل لـ 12 مليار طن بحلول عام 2050 ووصل إجمالي كمية النفايات البلاستيكية التي يتم جمعها سنوياً في أمريكا الشمالية إلى نحو 38 مليون طن، يتم إعادة تدوير حوالي 11% منها فقط، وتستخدم نسبة من النفايات تصل إلى نحو 13 % لإنتاج الطاقة، بينما يتم ردم حوالي 74 % في المكبات الأرضية، وهناك نسبة تصل إلى 2 % لا يتم التعامل معها بطريقة آمنة.

أما في دول الاتحاد الأوروبي والتي تعد الأسواق أكثر نضجاً، نظراً لتمييزها بوجود مراكز متخصصة ومتقدمة لجمع وتصنيف النفايات البلاستيكية مما يساهم في جمع نحو 42 مليون طن سنوياً من النفايات البلاستيكية، يتم تدوير حوالي 26 % منها، وتبلغ نسبة استخدام النفايات في توليد الطاقة حوالي 33 %، بينما يتم ردم حوالي 31 %، كما أن هناك كمية تصل نسبتها إلى حوالي 10 % يتم التخلص منها بطريقة غير آمنة.

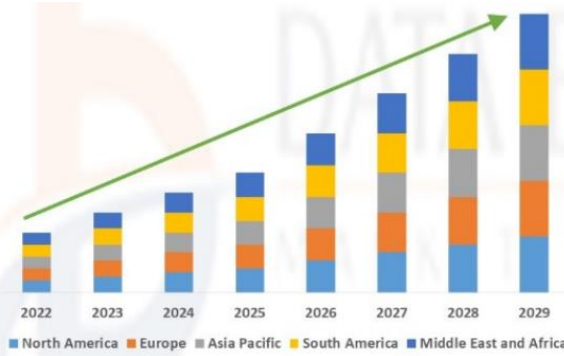
وفي المقابل نجد أن كمية النفايات البلاستيكية المجمعة في دول آسيا تصل إلى حوالي 120 مليون طن سنوياً، يتم تدوير حوالي 23 % منها، وتصل نسبة توليد الطاقة منها إلى 24 %، و ردم حوالي 14 %، بينما تبلغ نسبة التخلص غير الآمن من النفايات البلاستيكية 38 %. أما منطقة دول أفريقيا فتبلغ كميتها مجمعة حوالي 28 مليون طن سنوياً. يتم إعادة تدوير حوالي 11 % منها فقط، و ردم حوالي 29 %، بينما تصل نسبة التخلص غير الآمن إلى نحو 61 %. يبين الشكل حجم الأسواق العالمية للنفايات البلاستيكية، مما يشير إلى أن هناك كميات كبيرة من النفايات لا يتم التعامل معها بشكل مناسب.

في مصر تشكل النفايات البلاستيكية مشكلة بيئية خطيرة وفقاً لرسم خرائط سلسلة قيمة البلاستيك وتقييمها، تنتج مصر حوالي 20 مليون طن من النفايات سنوياً، ومع افتراض أن النفايات البلاستيكية تمثل 6 % من الإجمالي موزعة على القاهرة 60 % والإسكندرية 16 % ودلتا النيل 19 % و مناطق أخرى منها الصعيد وقناة السويس وسيناء 5 %.

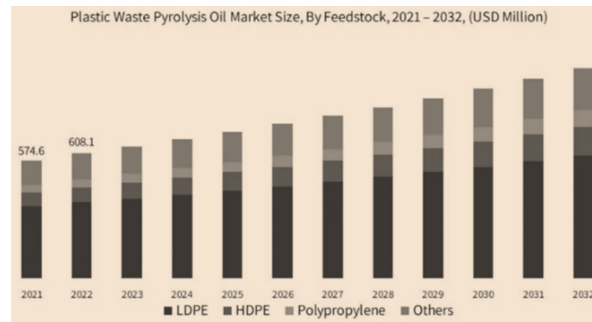
من أصل 970 كيلو طناً من النفايات البلاستيكية التي يتم انتاجها سنوياً يتم تقريباً إعادة تدوير 30 % فقط، بينما يعاد استخدام 5 % و 33 % يتم طمرها و 32 % تترك ليتم حرقها. يمثل إجمالي النفايات البلاستيكية 10 % من جميع النفايات في مصر، وتبلغ كمية البلاستيك الذي لا يتم جمعه ولا طمره 65 % وهذا يمثل 1.3 مليون طن سنوياً في مصر بينما تساهم القاهرة فقط ب 0.78 مليون طن.

تشكل المواد البلاستيكية غير المجمعة تهديداً للحيوانات والحياة البرية، وهناك العديد من تقنيات إدارة النفايات الناجحة التي تم تبنيها في الشرق. إن استخدام النفايات البلاستيكية لإنتاج الوقود، قلل من حجم النفايات الصلبة لمدافن النفايات، وستقل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن النفايات البلاستيكية بنسبة 30 % للسنة الأولى، علاوة على ذلك، سيقبل من الطلب المرتفع على منتجات الوقود الأحفوري، بالإضافة إلى ذلك فإن انبعاثات الكربون الناتجة باستخدام هذا الوقود الجديد أقل بنسبة 93 % من تلك الناتجة عن استخدام الديزل والبنزين العاديين.

تتعرض النفايات البلاستيكية لعملية انحلال حراري باستخدام المحفز، ويمكن أن يكون المحفز مزيجاً من الزيوليت والألومينا والسيليكات بنسب مختلفة، وهناك ثلاثة أنواع من تفاعلات الانحلال الحراري متباينة حسب زمن المعالجة ودرجة حرارة الكتلة الحيوية: الانحلال الحراري البطيء، و الانحلال الحراري السريع، والانحلال الحراري الوميضي. المنتجات الثانوية الرئيسية لهذه العملية هي الفحم والغاز وتعتمد نسبة المنتج الثانوي على درجة الحرارة ومعدل التسخين والضغط ووقت المكوث. يبين الشكل 1-4 حجم الأسواق العالمية للنفايات البلاستيكية وقدر عام 2021 بقيمة 34.85 بليون دولار أمريكي، و عام 2029 يتوقع أن يصل 45.54 بليون دولار أمريكي، ومعدل النمو السنوي المركب $CAGR = 3.4\%$ ، و يبين الشكل 2-4 حجم سوق زيت الوقود الناتج عن الانحلال الحراري للنفايات البلاستيكية وفقاً لتوقعات الأعوام من 2024-2032. (تقرير، 2024) [47]



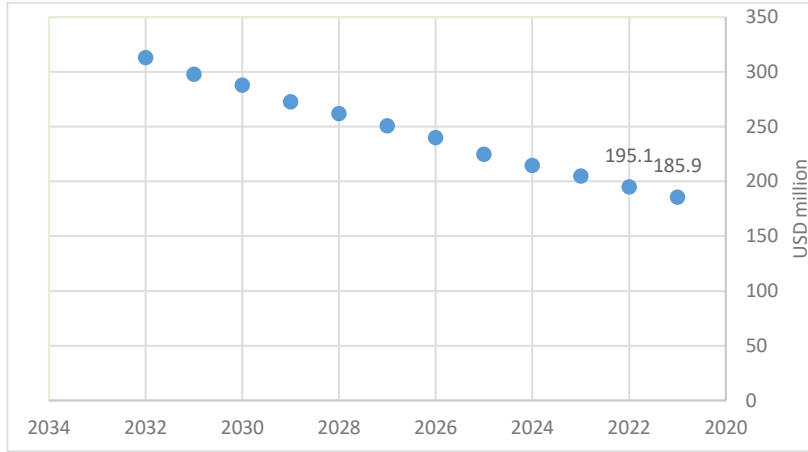
الشكل (1-4): حجم الأسواق العالمية للنفايات البلاستيكية



الشكل (2-4): حجم سوق زيت الانحلال الحراري للنفايات البلاستيكية، توقعات 2021-2032

هيمن قطاع الوقود على 60% من حصة سوق زيوت التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية في عام 2022، ومن المتوقع أن ينمو بحلول عام 2032 بوتيرة مربحة. ومع تزايد الإنتاج العالمي للنفايات البلاستيكية، هناك قلق بشأن التلوث البيئي واستنفاد الموارد. وعلاوة على ذلك، يمكن أن يكون الوقود الناتج من التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية بديلاً للوقود الأحفوري، وبذلك يمكن تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة وتخفيض الاعتماد على الموارد المحدودة، مما يسهم في مكافحة

تغير المناخ وتحقيق قدر أكبر من استدامة الطاقة. يبين الشكل 3-4 سوق وقود التحلل الحراري للنفائات البلاستيكية يبين إيرادات الدول الآسيوية بملايين دولارات من عام 2021 إلى عام 2032.



الشكل (3-4): توقعات إيرادات من زيت الانحلال الحراري للنفائات البلاستيكية 2021-2032

4-4- الأضرار البيئية للنفائات البلاستيكية:

4-4-1- أضرار النفائات البلاستيكية على اليابسة:

تطلق المواد البلاستيكية المكشورة مواد كيميائية ضارة بالتربة المحيطة بها والتي من الممكن أن تتسرب إلى المياه الجوفية والمساحات المائية القريبة منها مما يلحق الضرر بالكائنات الحية عند شربها بهذه المياه لكن الأثر الكبير يظهر في أراضي مكبات النفائات المكدسة بالعديد من المنتجات البلاستيكية ويتمثل ذلك في أنها الأراضي يوجد فيها العديد من الكائنات الحية الدقيقة التي تسرع عملية التحلل البيولوجي للبلاستيك مما يؤدي إلى إنتاج غاز الميثان الذي يعد أحد أهم الغازات المساهمة في زيادة تأثير ظاهرة الاحتباس الحراري وتقوم بعض الدول في تركيب أجهزة لتجميع غاز الميثان من مكبات النفائات واستخدامه في إنتاج الطاقة إلا أن ذلك لا يتم تطبيقه في كافة مكبات النفائات في العالم ما يجعل المشكلة قائمة حتى الآن.

4-4-2- أضرار النفائات البلاستيكية على البحر:

تقوم المنتجات البلاستيكية في تلويث المساحات المائية عن طريق السيلان السطحي لمياه الأمطار حيث تتدفق إلى البحار والمحيطات وتدخل ضمن السلسلة الغذائية للكائنات الحية وينتج عن ذلك الإصابة بالعديد من الأمراض على المدى البعيد لكل من الأسماك والحيوانات والانسان؛ بسبب انبعاث العديد من الملوثات والمركبات الكيميائية من المنتجات البلاستيكية والمعادن الثقيلة مثل: الرصاص، والزنبق، والكاديوم.

3-4-4- أضرار النفايات البلاستيكية على الحيوانات:

تتعرض الحيوانات لأخطار عديدة ناجمة عن المخلفات البلاستيكية التي تهدد حياتها، حيث تشير الإحصائيات إلى أن هناك ما يزيد على 400 ألف كائن من الحيوانات البحرية يموتون بسبب تلوث مياه المحيطات بالمواد البلاستيكية، و تمثل خطر المواد البلاستيكية في ابتلاع الحيوانات لها، وتشير الدراسات إلى أن هناك أكثر من 260 نوعاً من الحيوانات الفقارية واللافقارية يتعرضون لخطر التغذية على المواد البلاستيكية والتشابك فيها، وبشكل ابتلاع معظم الحيوانات البحرية لها الخطر الأكبر، ومثال على ذلك (السلاحف البحرية) والأنواع الأخرى التي تتغذى بشكل رئيسي على قنديل البحر؛ لأنها لا تستطيع التمييز بينه وبين الأكياس البلاستيكية، كما يحدث ذلك مع العديد من الطيور البحرية التي يختلط عليها الأمر أيضاً بين أسماك الحبار التي تمثل فريستها الطبيعية وجزيئات البلاستيك، وتشير إحصائيات أخرى إلى أنه في بحر الشمال تحتوي طيور النورس في معدتها ما معدله 30 قطعة من البلاستيك، ويتسبب ابتلاع الحيوانات للمواد البلاستيكية في انسداد القناة الهضمية لها و تلفها، مما يؤدي بها إلى تضورها جوعاً، فضلاً عن إصابتها بسوء التغذية وبالتالي ينتهي بها الأمر إلى الوفاة.

4-4-4- أضرار النفايات البلاستيكية على الإنسان:

تسبب المواد البلاستيكية العديد من الأضرار أهمها:
الأضرار الصحية:

تتعدى آثار و أضرار التلوث الناتج عن المخلفات البلاستيكية لتصل إلى صحة الإنسان وتم اكتشاف العواقب السلبية للعديد من المنتجات البلاستيكية التي تهدد صحة البشر والمستخدم في صناعة حاويات الأطعمة، فعند تسخينها في الميكرويف يمكن أن تتسرب هذه المواد الكيميائية إلى الطعام وتنتقل إلى الإنسان، وأظهرت العديد من الدراسات وجود ارتباط بين مستوى بعض المواد الكيميائية المستخدمة في صناعة البلاستيك وزيادة خطر الإصابة بالعديد من المشاكل الصحية ومن هذه المواد بيسفينول الكيميائية الموجودة في العبوات والمنتجات البلاستيكية، كما أوضحت الدراسات التي أجرتها مجموعة مايو كلينك الطبية و البحثية أن هذه المواد لها تأثيرات خطيرة على الدماغ و تسبب ارتفاعاً في ضغط الدم، لذا لا ينصح بتسخين الطعام في العبوات البلاستيكية.

أما بالنسبة للمواد الأخرى الموجودة في البلاستيك ومنها الفثالات التي يشار إليها باسم الملدنات بينت بعض الدراسات أنه لا يوجد لها آثار سلبية مؤكدة على جسم الإنسان، إلى جانب ذلك أشارت دراسات أخرى إلى أن هناك ارتباطاً واضحاً بين الفثالات وارتفاع ضغط الدم،

والسمنة في مرحلة الطفولة، لذا يجب استبدال العديد من المنتجات غير الضارة بالمنتجات البلاستيكية التي تسبب آثار صحية مخفية للبشر.

الأضرار الاقتصادية:

تسبب المخلفات البلاستيكية في المسطحات المائية حدوث آثار بالغة وكبيرة على النشاط الاقتصادي والعائدات من مختلف القطاعات الاقتصادية، ومن أضرار التلوث الناتج عن المخلفات البلاستيكية على الأنشطة الاقتصادية ما يأتي:

السياحة:

تعد المخلفات والقمامة البلاستيكية غير مرغوبة بالنسبة للأشخاص الذين يرتادون الشواطئ، مما ينتج عنه خسارة الإيرادات الناتجة من السياحة، وفي بعض الحالات يصل الأمر إلى إغلاقها بسبب كثرة المخلفات الملقاة عليها، كما تطلب عملية إزالة هذه المخلفات من الشواطئ والتخلص منها وقتاً طويلاً بالإضافة إلى تكلفتها العالية.

الصيد:

يعاني قطاع صيد الأسماك من آثار اقتصادية كبيرة ناتجة عن المخلفات البلاستيكية البحرية، حيث تتأثر مصائد الأسماك عندما تعلق الأسماك والمحار في شبكات الصيد المفقودة أو غيرها من المعدات، الأمر الذي ينجم عنه خسارة واضحة و فورية في مخزون الدائم من المأكولات البحرية المتاحة بسبب قلة وقوعها في المصائد، بالإضافة إلى انخفاض استدامة المخزون على المدى البعيد؛ بسبب الآثار السلبية على قدرة الأسماك على التكاثر، كما من الممكن أن يلحق الضرر بنشاط الصيد عندما تعلق المواد البلاستيكية في معدات الصيد من الشبكات والسفن، وبالتالي يؤدي ذلك إلى التوقف عن العمل لفترة زمنية قد تكون طويلة، إضافة إلى التكلفة العالية لإعادة إصلاح معدات الصيد.

الملاحة:

تمثل المخلفات البلاستيكية خطراً على الملاحة البحرية، إذ تتشابك المخلفات وتدخل إلى مراوح القوارب، مما يغلق صمام سحب المياه والتسبب بخسائر مالية كبيرة نسبياً، لأن إعادة إصلاح القوارب المتضررة يحتاج وقتاً طويلاً وتكلفته مرتفعة.

4-5 عملية الانحلال الحراري: (Irene Fahim, et al. 2021) [50]

هي عملية تكسير حراري متعددة الاستخدامات تحدث في غياب الاكسجين عند درجات حرارة أعلى من 400°C ، عادةً ما تُصنف عمليات الانحلال الحراري على أنها بطيئة وسريعة و مضيه.

تقسم هذه العملية الكيميائية الحرارية جزيئات البوليمر ذات السلسلة الطويلة إلى جزيئات أصغر وأقل تعقيداً من خلال الحرارة والتفاعلات الكيميائية، عادةً ما يتم إجراء الانحلال الحراري البطيء في درجات حرارة تتراوح بين 350°C و 550°C ، مع معدلات تسخين من 1 إلى 10 درجة مئوية/ دقيقة، وزمن مكوث بخار مطول.

المنتج الرئيسي للانحلال الحراري البطيء هو بقايا صلبة (تسمى شار)، حيث يفضل معدل التسخين البطيء تكوين المواد الصلبة بين التفاعلات التنافسية الموازية المختلفة. غالباً ما يحدث الانحلال الحراري السريع في درجات حرارة تتراوح بين 500°C و 700°C . يكون معدل التسخين الذي تتعرض له المادة الأولية أعلى من $1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، وتكون أزمنا بقاء البخار عادةً في نطاق بضع ثوانٍ.

يفضل الانحلال الحراري السريع إنتاج السائل واعتماداً على المادة الأولية، يمكن أن يصل العائد السائل بشكل مفاجئ إلى % 90 بالوزن للانحلال الحراري لمواد البولي أوليفين. في الانحلال الحراري الومضي عادةً ما تكون درجة الحرارة أعلى من 700°C ، ومعدل التسخين الذي يتعرض له اللقيم سريع للغاية، يمكن أن ينتج الانحلال الحراري الومضي عوائد أعلى من التحلل الحراري السريع للمواد الأولية للكتلة الحيوية، بينما يختلف بالنسبة للنفايات البلاستيكية حيث ينتج الأخير غازاً أكثر مقارنة بالمنتجات الأخرى، ويتم تصنيف المنتجات التي يتم الحصول عليها من الانحلال الحراري للنفايات البلاستيكية (جميع الأنواع، بمفردها، أو كمخاليط) إلى سائل/شمع، ومخلفات صلبة، وغاز.

الانحلال الحراري هو أسلوب قوي و يمكن استخدامه لاستعادة الوقود أو الجزيء، لاسيما أثناء مواجهة تحديات إدارة النفايات البلاستيكية. الانحلال الحراري السريع على عكس الانحلال الحراري البطيء: حيث يحدث الانحلال الحراري السريع في الأنظمة المستمرة وتمنع الإزالة السريعة للفحم من مساحة المفاعل المرتبطة بالعمليات المستمرة، التأثيرات التحفيزية غير المرغوب بها والتي تؤدي إلى التكسير المفرط للأبخرة، والتي إلى جانب أزمنا بقاء البخار القصيرة، وتقليل تفاعلات التكسير الثانوية، تؤدي إلى إنتاج سائل أكبر.

إن الانحلال الحراري السريع يمكن أن يحول ما يصل إلى 95 % وزناً من نفايات البلاستيك إلى منتج سائل/شمعي (على سبيل المثال: الانحلال الحراري للبولي إيثيلن مرتفع الكثافة HDPE عند 600°C ينتج منتج سائل/شمعي).

يعتبر زيت الانحلال الحراري الناتج عن الانحلال الحراري السريع مصدراً ممتازاً للبنزين والديزل، على عكس الزيوت الحيوية القائمة على الانحلال الحراري الغنية بالمياه المشتقة من المواد الأولية للكتلة الحيوية، فإن للزيوت البلاستيكية قيمة تسخين عالية، تزيد بثلاث مرات تقريباً عن الزيوت الحيوية، ومماثلة لوقود الديزل، بسبب عدم وجود مركبات عالية الأكسجين والماء.

كما أن المحتوى الحمضي للزيوت البلاستيكية أقل بشكل كبير من محتوى الزيوت الحيوية، وبالتالي قد لا تكون هناك حاجة إلى مزيد من التطوير لتطبيقات الوقود، وتشتمل المنتجات المشتركة للتحلل الحراري على مادة صلبة (شار)، والتي يمكن استخدامها كمادة مازة، والغاز هو مورد قيم يمكن استخدامه كمورد للطاقة لعملية الانحلال الحراري.

يمكن أن يكون الزيت البلاستيكي الناتج سائلاً أو شمعاً، حيث يكون الشمع مصفراً وله لزوجة عالية في درجة حرارة الغرفة ويتكون في الغالب من الألكانات وهيدروكربونات الألكينات بنقطة غليان عالية (20°C+). عادةً ما يكون الشمع منتجاً بسيطاً، وهناك حاجة إلى عملية أخرى، مثل التكسير التحفيزي للسوائل (FCC)، لتحويله إلى وقود سائل. يتكون الزيت البلاستيكي السائل بشكل أساسي من مركبات أليفاتية بالإضافة إلى مركبات أحادية ومتعددة. بالإضافة إلى كونه مقدمة واعدة لتطبيقات الوقود، يمكن استخدام الزيت البلاستيكي كمادة وسيطة وتحويله إلى إيثيلين وبروبيلين من خلال المزيد من التكسير في درجات حرارة أعلى وأزمنة تلامس منخفضة للغاية.

الأنواع الغازية الرئيسية التي تشكل "المنتج الغازي" هي الميثان والإيثيلين والإيثان والبروبيلين والبيوتادين والبيوتان. يمكن استخدام الغاز الناتج كمصدر للطاقة لتوفير طاقة الانحلال الحراري المطلوبة. مما يجعل العملية مكثفة ذاتياً ومستقلة عن مصادر الطاقة الخارجية. بالإضافة إلى ذلك يمكن فصل الأليفينات القيمة الموجودة في تيار الغاز واستعادتها لإعادة التدوير الكيميائي. البقايا الصلبة هي منتج الانحلال الحراري المتبقي، ومعظمها مصنوع من فحم الكوك والرماد.

كشفت النتائج أن السائل الناتج أثناء الانحلال الحراري البطيء يكون عادة زيتياً وليس شمعيًا. يمكن أن يصل إنتاج الزيت إلى 93 % بالوزن عندما يتحلل البولي إيثيلين منخفض الكثافة عند 550 °C ، مما يعني عائداً رائعاً مع مجموعة واسعة من التطبيقات.

الزيت البلاستيكي متعدد الاستخدامات و يمكن استخدامه إما مباشرة في الغلايات البخارية لتوليد الكهرباء، او كمنصة كيميائية لتطبيقات أخرى مثل وقود النقل، واستعادة الجزيء، وإنتاج الانابيب النانوية الكربونية. يكون ناتج المخلفات الصلبة أقل بكثير من الفحم الحيوي، نتيجة لانخفاض الكربون الثابت والمواد المتطايرة المرتفعة والمرتبطة بالنفايات البلاستيكية مقارنة بالكتلة الحيوية. يمكن أن يشكل جزء البنزين C6-C12، ما يصل إلى 90 % بالوزن من المنتج السائل، مما يجعله ذا قيمة لاستبدال البنزين التقليدي.

تأثير أنواع البلاستيك يشير إلى أن الانحلال الحراري للبولي أوليفينات، بما في ذلك LDPE و HDPE و PP، ينتج عادةً زيتاً سائلاً به جزء كبير من الأليفاتية (الألكانات والألكينات)، خاصة في حالة عدم وجود محفز.

4-6 تأثير المحفز على عملية الانحلال الحراري للبلاستيك:

أظهرت محفزات الزيوليت كفاءة تحفيزية ممتازة في التكسير والأزمنة للحلقة العطرية، ويعود ذلك إلى خصائصها الفيزيائية والكيميائية، بما في ذلك الحموضة القوية و البنية البلورية ذات المسام الدقيقة. يميل الانحلال الحراري البلاستيكي في وجود المحفزات الزيوليتية الطبيعية خاصة HZSM5، إلى إنتاج هيدروكربونات عطرية أكثر بشكل ملحوظ مقارنة بعملية الانحلال الحراري غير المحفزة، و بالتالي يساهم في جزء البنزين، علاوةً على ذلك يلاحظ عادةً إنتاج أعلى بكثير من الغازات في وجود محفزات الزيوليت بسبب تفاعلات التكسير المحسنة. تساهم محفزات السيليكا والالومينا غير المتبلورة بشكل كبير في إنتاج الأوليفينات الخفيفة، مع عدم وجود تغييرات ملحوظة في تكوين المواد العطرية، ويعزز ZSM-5 والزيوليت-Y تكوين كل من المواد العطرية والهيدروكربونات المتفرعة، إلى جانب زيادة كبيرة في نسبة الهيدروكربونات الغازية. يساهم التحسين التحفيزي فوق AI-MCM-41 بشكل أولي في إنتاج البنزين مع تأثير أقل على توليد الغاز، و يرجع ذلك على الأرجح إلى الخصائص الحمضية الأضعف وأبعاد المسام الكبيرة للمحفز. في وجود كل من المحفزات Y-zeolite و ZSM-5 ينخفض إنتاج الزيت بشكل كبير لصالح إنتاج الغاز. إن تفوق Y-zeolite مقارنة مع ZSM-5 من حيث إنتاج المركبات العطرية يتم تبريره من خلال الاختلافات في خصائص المحفز الفيزيائية والكيميائية. أي حجم المسام ومساحة السطح وحموضة السطح.

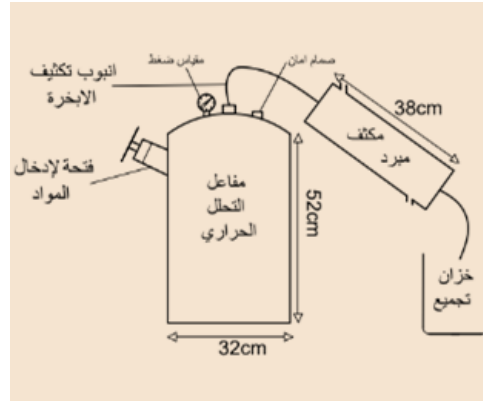
يكون الجزء الشمعي (C20+) في الانحلال الحراري السريع أكبر من الانحلال الحراري البطيء وزمن مكوث البخار أقصر، وبالتالي تتخفض تفاعلات التكسير كما ذكرنا سابقاً. يمكن استخدام المنتج الشمعي وهو مصدر ممتاز للبارافينات والأوليفينات، كمادة وسيطة في وحدات التكسير التحفيزي لإنتاج وقود النقل السائل والمركبات البتروكيماوية الأخرى.

7-4 الإجراء التجريبي:

تم تصنيع مفاعل التحلل الحراري من معدن الحديد، على شكل أسطوانة معدنية بطول 52 Cm عرض 32 Cm وارتفاع 56 Cm هذا المفاعل مزود بفتحة جانبية علوية مخصصة لإدخال المواد الأولية، و فتحتان من الأعلى خصصت احدهما لقياس الضغط، والأخرى لتركيب صمام أمان. ويوجد أعلى المفاعل في منتصفه أنبوب لتكثيف الأبخرة، عبارة عن ملف نحاسي طوله 4.5 m ملفوف بشكل حلزوني ضمن صندوق معدني، ومزود بفتحتان لدخول و خروج مياه التبريد (مكثف مبرد)، ويوجد خزان لتجميع المتكاثفات كما هو موضح في الشكل 4-4.

تم عزل المفاعل بمادة الصوف الزجاجي وورق الألمنيوم جزئياً من النصف العلوي للمفاعل، للمحافظة على درجة حرارة شبه ثابتة داخل المفاعل في كامل أجزائه. أيضاً تم تصنيع سخان كهربائي مزود بثلاثة ملفات تسخين حرارية، للتحكم بدرجة حرارة المفاعل بتشغيلها بشكل أحادي أو ثنائي أو ثلاثي.

استخدمت في هذا البحث تقنيات تحليلية عالية الكفاءة وهي: جهاز سبكتروفوتومتر (جهاز التحليل الطيفي المرئي - فوق البنفسجي)، جهاز التحليل باستخدام الأشعة تحت الحمراء، جهاز التحليل الحراري التفاضلي، جهاز المجهر الإلكتروني، جهاز التحليل باستخدام الأشعة السينية. النفايات البلاستيكية المستخدمة هي عبوات مياه غازية وعبوات منظفات، أما الحفاز المستخدم فهو مسحوق الكاؤولين الطبيعي.



الشكل-4-4 مخطط لمفاعل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية

آلية عمل المفاعل:

جمعت كمية من النفايات البلاستيكية وغسلت لإزالة الشوائب ثم جففت ووزنت و قطعت إلى قطع صغيرة لضمان حدوث عملية التحلل الحراري بشكل كامل وسريع الشكل 4-5.

تم إدخال كمية محددة 200 g من قطع النفايات البلاستيكية إلى المفاعل عبر فتحة إدخال المواد، ثم أغلقت الفتحة بإحكام لضمان عدم حدوث تسرب للوقود الغازي الناتج عن تحلل البلاستيك، تم تشغيل السخان الكهربائي بطاقته العظمى (شغلت ملفات التسخين الثلاثة) للوصول إلى درجة حرارة مناسبة لتحلل البلاستيك، وبعد بدء التحلل الحراري بزمن قصير بدأت الأبخرة بالخروج من الفتحة الموجودة في أعلى المفاعل، ومنه إلى المكثف المبرد، بقيت هذه الأبخرة الناتجة في الطور الغازي بعد مرحلة التكثيف (لم تتكثف)، وبعد مرور ساعة تقريباً على عملية التحلل الحراري، بدأت الأبخرة بالتكاثف جزئياً، أي أن قسم من الأبخرة تحول إلى سائل والقسم الآخر بقي في الطور الغازي. تم التأكد من ذلك عن طريق قرقرة الغازات الناتجة في أنبوب مدرج يقيس حجم السائل المتكاثف الذي تم استقباله في الأنبوب المدرج الذي جمعت فيه المتكاثفات.

١- التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية (بولي إيثيلين) بغياب الحفاز:

تم إجراء تجارب التحلل الحراري على نفايات بلاستيكية من البولي إيثيلين تيرفتالات، (عبوات مشروبات غازية)، وذلك بغياب الأكسجين الذي تم طرده من المفاعل من خلال ادخال غاز ثاني أكسيد الكربون إلى المفاعل، عبر أنبوب بلاستيكي. وقد تم تشكيل غاز الكربون من خلال تفاعل كربونات الصوديوم مع محلول حمض كلو الماء الممدد في وعاء أرلنماير. وبعد مرور 15 دقيقة على التحلل الحراري للنفايات، بدأ إنتاج مزيج من الغازات القابلة للاشتعال. استغرقت التجربة زمناً طويلاً، حيث استمر خروج الغازات على شكل فقاعات صغيرة جداً مدة طويلة تجاوزت 300 min.



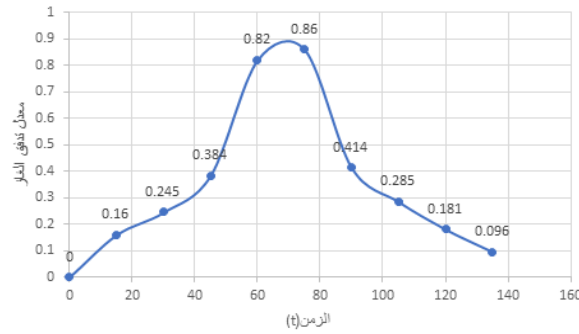
الشكل 4-5 البلاستيك المقطع

تم حساب التدفق الحجمي للمزيج الغازي الناتج عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية بطريقة الإزاحة، بمعنى أن حجم معين من الغاز الناتج عن التحلل الحراري، يزيح نفس الحجم من الماء الموجود في بالون معايرة مغمور في بيشر زجاجي ممتلئ بالماء، خلال زمن معين تم حسابه باستخدام مقياسية.

النتائج التي تم الحصول عليها موضحة في الجدول 1-4 والشكل 4-6.

الجدول 1-4 تغير تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري مع الزمن

125	66	42	29	14	15	32	49	72	زمن الإزاحة- sec
300	250	210	180	150	120	90	60	30	زمن التجربة min
0.16	0.245	0.384	0.82	0.86	0.414	0.285	0.181	0.096	معدل تدفق الغاز L/min



الشكل 4-6 معدل تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري للبولي إيثيلين مع الزمن

بينت نتائج التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية (بولي إيثيلين تيرفتالات) تشكل مزيجاً غازياً قابلاً للاشتعال ولم ينطفئ طوال مدة التجربة. والزمن لإتمام التجربة تجاوز 300 min. إضافة إلى مزيج الغازات الناتجة عن التحلل الحراري تشكلت مواد شمعية (زيوت ثقيلة) بكميات بسيطة تصلبت بسهولة عند درجة حرارة المخبر، كما هو مبين في الشكل 4-7.



الشكل 4-7 المواد الشمعية الناتجة عن عملية التحلل الحراري

نتج أيضاً عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية أكاسيد معدنية على شكل مسحوق ناعم جداً كما هو موضح في الشكل 4-8.



الشكل 4-8 الأكاسيد المعدنية الناتجة عن عملية التحلل الحراري للبلاستيك

٢- التحلل الحراري للبولي ايتلن عالي الكثافة بغياب الحفاز:

أعيدت التجربة السابقة عند نفس الشروط المطبقة لكن باستخدام نفايات بلاستيكية مركبة من البولي ايتلن عالي الكثافة (عبوات تعبئة منظفات)، وبعد زمن أقل من 30 min من بدء التحلل الحراري عند طاقة التسخين العظمى، بدأ إنتاج مزيج من الغازات القابلة للاشتعال، وبعد زمن حوالي 320 min بدأت الأبخرة بالتكاثف لتتحول إلى قطرات من الوقود السائل ذات لون أخضر فاتح مزرق برائحة نفطية قوية جداً، ويحتوي هذا الوقود السائل على بخار ماء متكاثف وغازات قابلة للتحلل بسهولة (ذات درجات غليان منخفضة وتطايرية عالية)، وهو قابل للاشتعال بسهولة مع الاستمرار بالاشتعال، والجزء المتبقي بعد الاشتعال كان ذو طبيعة حامضية تم التأكد من ذلك بتحديد درجة حموضة العينة المتبقية بعد إتمام احتراق الجزء القابل للاحتراق، وهذه الحموضة على الأغلب عائدة لتشكيل حمض كلور الماء الناتج عن التحلل الحراري للبلاستيك، الذي من المتوقع أن يكون محتويًا على نسبة من البولي فينيل كلوريد إضافة إلى البولي ايتلن عالي الكثافة، ويمكن أن نعزو ذلك أيضاً إلى وجود حمض الفثاليك ضمن بنية النفايات البلاستيكية المعالجة. يبين الشكل 4-9 المفاعل المصمم لهذا الغرض، ويبين الشكل 4-10 السائل المتكاثف الناتج، والذي لم تتجاوز كميته المتجمعة خلال خمسون دقيقة حجماً قدره 50 ml. واحتراق الوقود البلاستيكي السائل في جفنة بورسلانية.



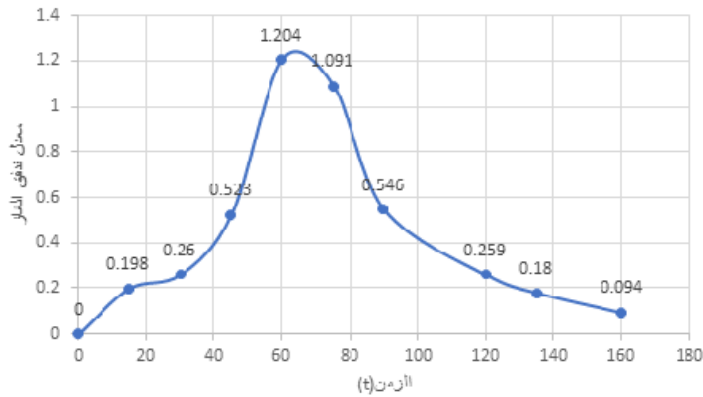
الشكل 9-4 مفاعل التحلل الحراري للبلاستيك



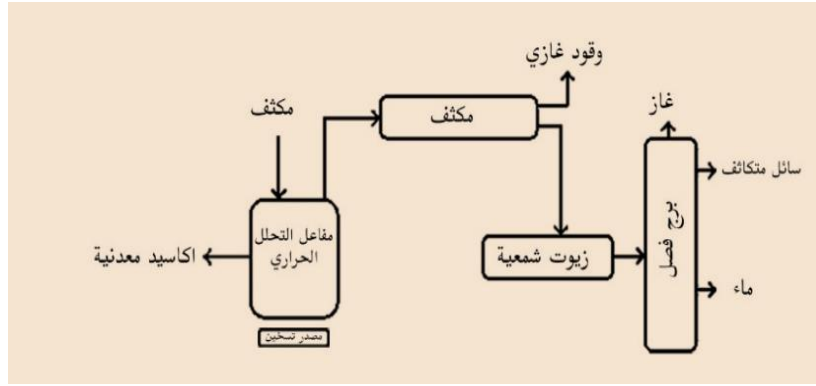
الشكل 10-4 السائل المتكاثف الناتج عن التحلل الحراري و الشعلة الناتجة عن الاحتراق وأثناء تنفيذ التجربة تم حساب حجوم الغازات الناتجة عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية بطريقة الإزاحة، وتم حساب معدل تدفق الغازات بمعرفة الزمن اللازم لإزاحة حجم محدد من الماء قدره 200 ml. فكانت النتائج التي حصلنا عليها كما هي موضحة في الجدول التالي 2-4 والشكل 11-4:

الجدول 2-4 يبين تغير تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري مع الزمن

127	96	43	22	11	10	23	54	61	زمن الإزاحة- sec
400	350	300	250	200	150	120	60	30	زمن التجربة min
0.094	0.18	0.259	0.546	1.091	1.204	0.523	0.26	0.198	معدل تدفق الغاز L/min



الشكل 11-4 تغير معدل تدفق الغاز مع الزمن اثناء التحلل الحراري للبولي ايتلن تريفتالات كما يبين الشكل 12-4 المخطط التكنولوجي للتكسير الحراري للنفايات البلاستيكية.



الشكل 4-12 مخطط التكسير الحراري للنفايات البلاستيكية بولي إيثيلين

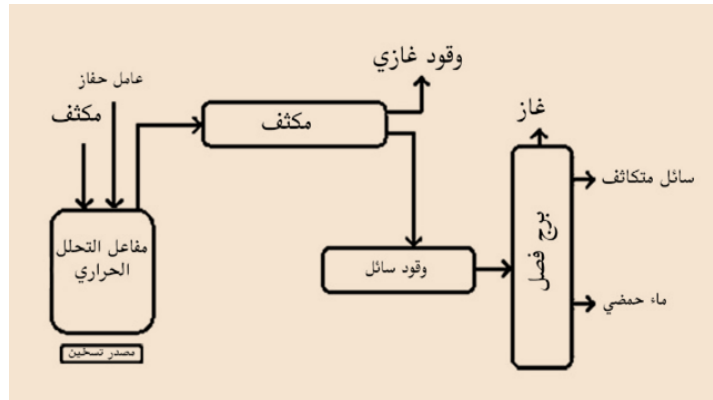
3- التحلل الحراري للبولي إيثيلين عالي الكثافة بوجود 20 g من الحفاز

تم ادخال 20 g من الحفاز الطبيعي (الكاؤولين) مع النفايات البلاستيكية عبر فتحة الإدخال، وتم إغلاق الفتحة بشكل محكم باستخدام رقائق من التفلون لضمان عدم حدوث تسريب للغازات الناتجة، ومن ثم تم تشغيل السخان الكهربائي بأقصى طاقة، طبقت الشروط السابقة نفسها حيث استخدم بولي إيثيلين عالي الكثافة. وبعد 15 min فقط من بداية التحلل الحراري بدأ خروج مزيج من الغازات القابلة للاشتعال، وبعد حوالي 140 min بدأت الأبخرة بالتكاثف لتتحول إلى قطرات من الوقود السائل مع استمرار تدفق الغازات إضافة إلى الوقود السائل (أي أن النواتج غاز وسائل). يبين الشكل 4-13 احتراق المزيج الغازي الناتج لدى تقريب شعلة منه.



الشكل 4-13 اشتعال الغاز الناتج عن عملية التحلل الحراري

يبين الشكل 14-4 مخططاً تكنولوجياً للتكسير الحراري للنفايات البلاستيكية بوجود وسيط.

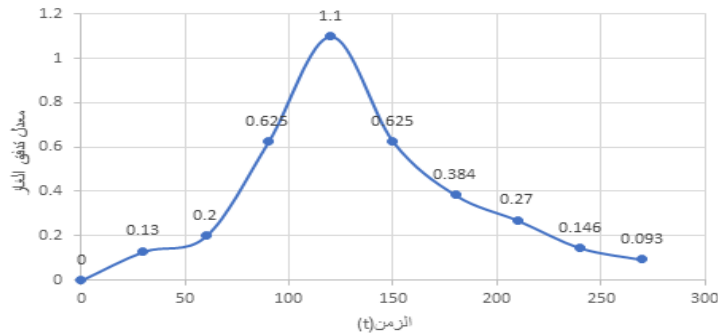


الشكل 14-4 مخطط تكنولوجياً للتكسير الحراري للنفايات البلاستيكية بوجود حفاز الكاؤولين.

تم حساب حجوم الغازات الناتجة عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية بوجود 20 g من حفاز الكاؤولين بطريقة الازاحة، والزمن اللازم للازاحة، ومعدل تدفق الغازات الناتجة عن التحلل الحراري، والنتائج موضحة في الجدول 3-4 و الشكل 15-4 .

الجدول 3-4 تغير معدل تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري بوجود 20 g حفاز

129	82	44	31	19	11	19	60	95	زمن الإزاحة-sec
240	210	180	150	120	90	60	30	15	زمن التجربة min
0.093	0.146	0.27	0.384	0.625	1.1	0.625	0.03	0.13	معدل تدفق الغاز L/min



الشكل 15-4 تغير معدل تدفق الغاز مع الزمن بوجود 20 g حفاز

الزمن المستغرق لإتمام التجربة 240 min، وبعد 140 min تقريباً بدأ تكاثف الأبخرة الناتجة بشكل سائل أخضر غامق اللون ووصل الحجم حوالي 90 ml، خلال 100 min تقريباً، هذا الوقود السائل الناتج شبيه بالسائل الناتج في التجربة السابقة ولكنه غير مختلط بالماء، وهو أكثر نقاوة وأعمق لوناً. ويظهر الفرق بين السائل الناتج من التحلل الحراري من دون حفاز والتحلل الحراري مع حفاز في الشكل 16-4.



الشكل 4-16 مقارنة الوقود السائل المتكاثف في حالة استخدام حفاز و بدونه

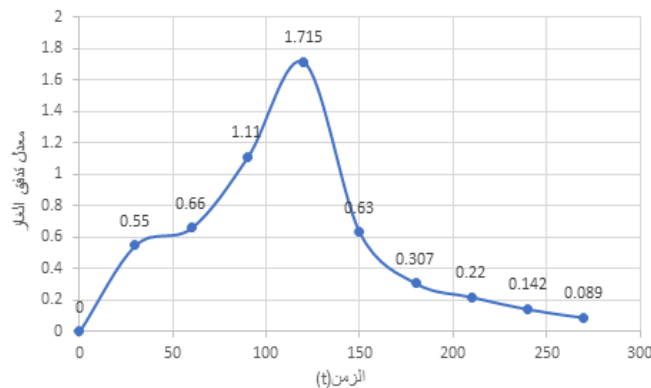
٤- التحلل الحراري للبولي إيثيلين عالي الكثافة بوجود 10 g من الحفاز

تمت دراسة تأثير كمية الحفاز المستخدم أثناء التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية مع تثبيت الشروط الأخرى المطبقة في التجربة السابقة جميعها، تبين أنه وبعد 30 min من بداية العملية بدأ إنتاج مزيج من الغازات القابلة للاشتعال، وبعد مدة زمنية قدرها حوالي 150 min بدأت الأبخرة بالتكاثف لتتحول إلى قطرات من الوقود السائل الأخضر الغامق اللون والنقي كما في التجربة السابقة.

تم حساب حجوم الغازات الناتجة بطريقة الإزاحة، وحسب الزمن اللازم للإزاحة و معدل تدفق الغاز والنتائج متضمنة في الجدول 4-4 وفي الشكل 4-17.

الجدول 4-4 تغير معدل تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري بوجود 10 g من الكافولين مع الزمن

زمن الإزاحة- sec	24	18	11	7	19	39	54	84	134
زمن التجربة min	30	60	90	120	150	180	210	240	270
معدل تدفق الغاز L/min	0.55	0.66	1.11	1.715	0.63	0.307	0.22	0.142	0.089



الشكل 4-17 تغير معدل تدفق الغاز مع الزمن أثناء التحلل الحراري للبلاستيك بوجود 10 g وسيط

كان الزمن المستغرق لإتمام التجربة 270 min و بعد 150 min تقريباً بدأ تكاثف الأبخرة الناتجة بشكل سائل أخضر اللون، و صل حجمه إلى 70 ml خلال زمن مقداره 120 min تقريباً، الوقود السائل الناتج كان لزجاً و قابلاً للاشتعال، و تم اختبار ذلك في المخبر في جفنة بورسلان، و لم يكن مختلطاً بالماء.

8-4 مناقشة نتائج التحاليل المنجزة:

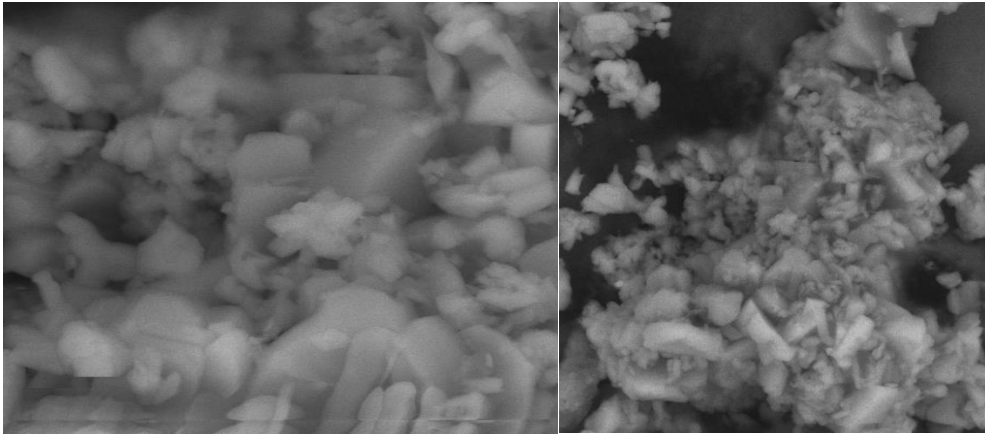
1-8-4 تحليل المسحوق الناتج عن التحلل الحراري للبولي ايتلن تيرفتالات في غياب

العامل الحفاز:

تم تطبيق التقنيات التحليلية التالية: (تحليل المجهر الإلكتروني - تحليل IR - التحليل باستخدام جهاز الأشعة السينية X-RAY) على المسحوق المتشكل نتيجة التحلل الحراري بدون استخدام حفاز للنفايات البلاستيكية ذات التركيب بولي ايتلن تيرفتالات.

أولاً: التحليل باستخدام المجهر الإلكتروني

بينت تحاليل المجهر الإلكتروني أن أبعاد هذا المسحوق صغيرة جداً أقل من $200 \mu m$ ، وظهر كندف القطن، وهذا يعني أنه مكون من أكاسيد معدنية تم استرجاعها من النفايات البلاستيكية في ظروف التحلل الحراري، على شكل مسحوق ناعم أبيض ذو رائحة نفطية قوية وواخزة، نتيجة تداخل مركبات أخرى من نواتج التحلل الحراري في تركيبة هذه الأكاسيد يعتقد أنها ديوكسينات. يوضح الشكل 4-18 المسحوق الذي تم استرجاعه كما ظهر بتقنية المجهر الإلكتروني.



الشكل 4-18 تحليل المجهر الإلكتروني للمسحوق الناتج

ثانياً: تحليل المسحوق باستخدام الأشعة تحت الحمراء IR

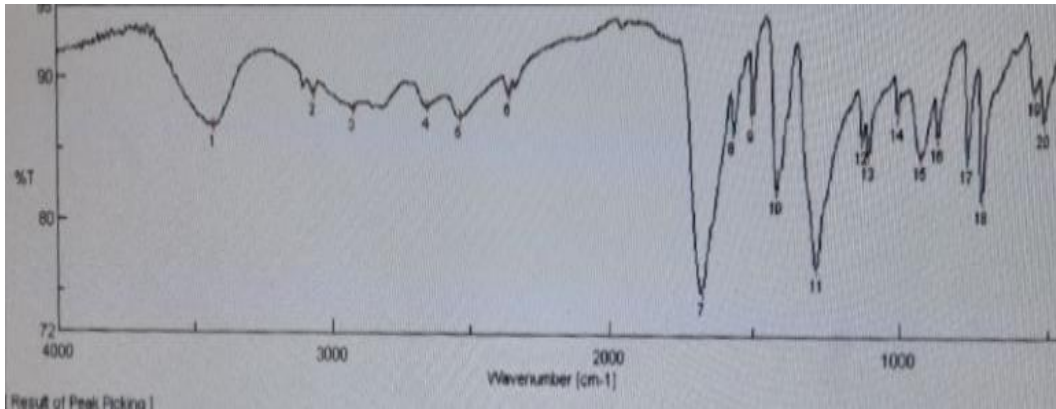
تم تحليل المسحوق الناتج باستخدام تقنية الأشعة تحت الحمراء، وهي من الطرق المعتمدة في تشخيص المركبات العضوية واللاعضوية للاستدلال عليها من خلال مواقع الحزم وقممها. وقد أظهر هذا التحليل وجود قمة عند العدد الموجي 3426 Cm^{-1} وهذا مؤشر لوجود وظيفة

هيدروكسيلية OH^- نتيجة الرطوبة المرتبطة بشكل جزيئات ماء مع الأكاسيد المعدنية. على سبيل المثال $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. وظهرت الحلقات العطرية في الموقع المخصص لها عند 3065 Cm^{-1} الرابطة C-H الأروماتية، أما مجموعة الميثيلن فقد ظهرت عند 2922.59 Cm^{-1} وتدل على وجود الأيتلن.

تشير القمة عند العدد الموجي 1675.8 Cm^{-1} إلى وظيفة كربونيلية تابعة للفتالات $\text{C}=\text{O}$ وهذا ممكن جداً أن يكون عبارة عن بقايا من حمض الفتاليك، و يؤكد هذا ترافق $\text{C}=\text{O}$ مع OH . أما بقية القمم فتشير إلى وجود معادن (لأنها ظهرت عند أعداد موجية أقل من 1700 Cm^{-1}).

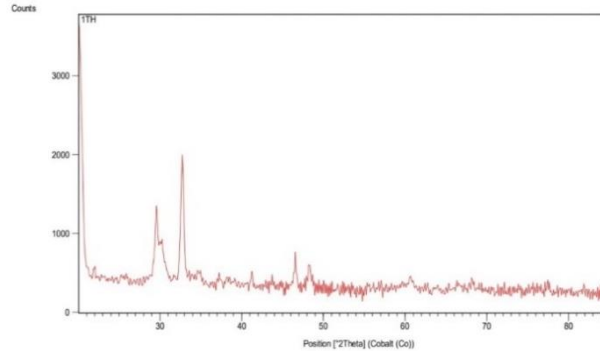
تعود القمم عند الأعداد الموجية 1572.66 Cm^{-1} و 1509.03 Cm^{-1} إلى الروابط المضاعفة الأروماتية $\text{C}=\text{C}$ ، ومن المحتمل أن تكون أسترات غير مشبعة والدليل عليها الرائحة الواخزة جداً للمسحوق الناتج.

أما القمة الحادية عشر عند العدد الموجي 1200 Cm^{-1} تشير إلى وظيفة إيترية $\text{C}-\text{O}$ عائدة إلى كربونيل استيري إيتري. والقمة الناتجة عند 1100 Cm^{-1} تمثل وظيفة كحولية عائدة إلى إيتلن غليكول مثلاً. والقمم الناتجة عند أعداد موجية أقل من 1000 Cm^{-1} فتشير إلى وجود عناصر معدنية (أسترات معدنية) مثل: $(\text{S}=\text{O} - \text{CuO} - \text{ZNO})$ وغيرها، كما مبين في الشكل 4-19.



الشكل 4-19 طيف الأشعة تحت الحمراء للمسحوق المعدني الناتج عن التحلل الحراري بغياب الحفاز
ثالثاً: التحليل باستخدام جهاز الأشعة السينية X-RAY للمسحوق الناتج

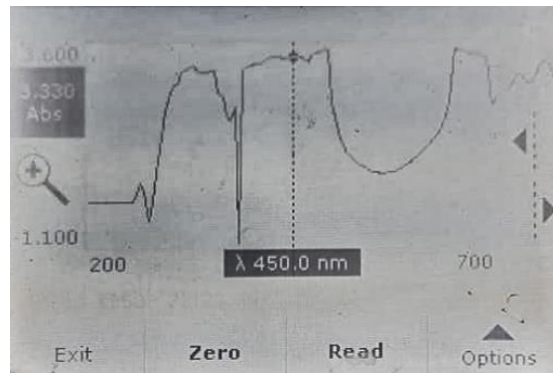
تم تحليل العينة باستخدام جهاز الأشعة السينية للتأكد من احتواء العينة على أكاسيد معدنية، حيث أن وجود زوايا انعراج متعددة يشير إلى وجود معادن مختلفة في العينة. كما هو مبين في الشكل 4-20.



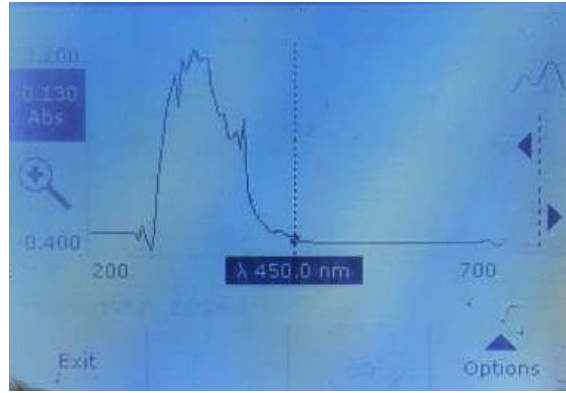
الشكل 4-20 تحليل X-RAY

4-8-2 تحليل السائل الناتج عن التحلل الحراري للبولي إيثيلين عالي الكثافة:

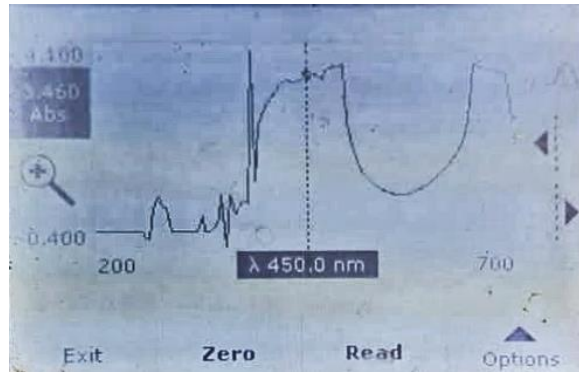
أولاً: التحليل الطيفي المرئي فوق البنفسجي باستخدام (السبكتروفوتومتر Dr-5000) تم إجراء مسح طيفي للسائل الناتج عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية باستخدام جهاز سبكتروفوتومتر، وتمت مقارنة الطيف الناتج لدى مسح العينة في مجال طول الموجة من 200-700 نانومتر مع الطيف الناتج لعينة البنزين (المشتق النفطي الناتج عن تكرير النفط)، فتبين أن بعض المركبات الموجودة في البنزين موجودة أيضاً في الوقود البلاستيكي، وذلك لدى معايرة جهاز السبكتروفوتومتر على الهواء كعينة مرجعية. كما هو مبين في الشكل 4-23. ولدى إعادة إجراء مسح طيفي للوقود السائل باستخدام البنزين كعينة مرجعية تبين اختفاء جميع المركبات التي ظهرت في طيف البنزين، وهذا يؤكد وجود مركبات مشتركة في كل من الوقود البلاستيكي والبنزين. كما هو مبين في الشكل 4-21 والشكل 4-22 والشكل 4-23.



الشكل 4-21 تحليل طيفي للوقود البلاستيكي {الشاهد هواء}



الشكل 22-4 تحليل طيفي للبنزين

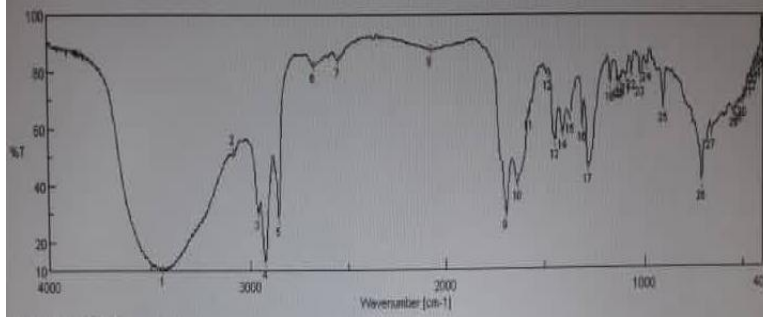


الشكل 23-4 تحليل طيفي للوقود البلاستيكي {الشاهد بنزين}

لقد تم التوصل إلى هذه النتيجة باعتبار أن لكل مركب ما امتصاصية عظمى له عند طول موجة محدد. و إذا ما تم التعمق في بحث هذه النتائج التي تم الحصول عليها من خلال اجراء تحاليل كروماتوغرافيا السائلة أو الغازية يمكن التعرف على هذه المركبات وكشف هويتها وتحديد نسبتها.

ثانياً: التحليل الطيفي للوقود البلاستيكي باستخدام الأشعة تحت الحمراء FTIR

لقد تم تحديد مواقع الحزم في طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR للسائل الناتج عن التحلل الحراري للبلاستيك اعتماداً على ما ورد في مراجع علمية حول أطيف الجزيئات المكونة لهذا النوع من المركبات العضوية المتسمة بتعقيدها بعض الشيء، وذلك بسبب التداخلات الحاصلة بين الحزم العائدة إلى الحلقة الأروماتية (العطرية) من جهة، والمجاميع المرتبطة بها من جهة أخرى. ولكون هذه الأطيف معقدة فقد تم تقسيمها إلى عدة مناطق طيفية لسهولة تفسيرها، وبيّن الشكل 24-4 طيف الأشعة تحت الحمراء للسائل البلاستيكي الناتج.



الشكل 4-24 طيف الأشعة تحت الحمراء للسائل الناتج عن التحلل الحراري للبلاستيك

في منطقة الطيف المحصورة بين $1700-1400 \text{ cm}^{-1}$ تظهر حزمة امتصاص عند المواقع (1493.6 - 1585-1641) وهي تمثل المركبات ذات الروابط الكربونية الممتلئة ب (C=O) و (C=N) وقد تداخلت مع حزم أخرى تعود إلى الروابط الأورماتية (C=C). ظهرت حزم امتصاص عند الموقع 1541.13 cm^{-1} تعود أيضاً إلى روابط الكربونيل والأزوت (C=O) و (C=N) و (C=C) و C-H. ظهور حزم امتصاص عند الموقع cm^{-1} (400-600) تعود إلى مجاميع وظيفية للفينيل و C-H.

في منطقة الطيف المحصورة بين $1700-4000 \text{ cm}^{-1}$ لوحظ ظهور حزمة عريضة عند الموقع 3442 cm^{-1} تعود إلى مجموعة الهيدروكسيل العائدة لجزيئات الماء ومركبات الفينول المندمجة مع مجموعة الأمين الثانوي (N-H). ظهور حزم امتصاص عند الموقع cm^{-1} (2924-2966) تعود إلى الروابط الأليفاتية (C-H)، وروابط CH_2 و CH_3 و C-H.

ظهور حزم امتصاص عند الموقع cm^{-1} (2000.8-2673-2549) حزم ضعيفة جدا تعود إلى الروابط الأليفاتية (C-H) وجميع هذه المجاميع الوظيفية موجودة في بنية المادة الأولية التي خضعت لعملية التحلل الحراري.

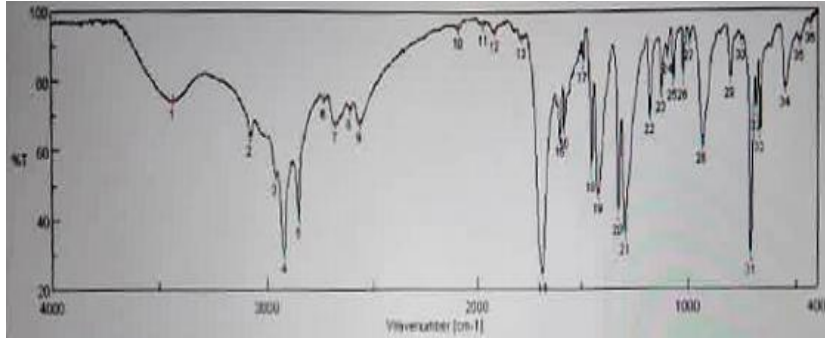
4-8-3 تحليل الشموع الصلبة الناتجة عن التحلل الحراري للبولي إيتلن

تيرفتالات:

أولاً: التحليل الطيفي للشموع الناتجة عن التحلل الحراري للبلاستيك باستخدام الأشعة

تحت الحمراء FTIR :

تم إجراء تحليل طيفي للشموع الناتجة عن التحلل الحراري للبلاستيك في حالة غياب العامل الحفاز والطيف الناتج يظهر في الشكل 4-25 .



الشكل 4-25 تحليل طيفي باستخدام الأشعة تحت الحمراء للشموع الناتجة

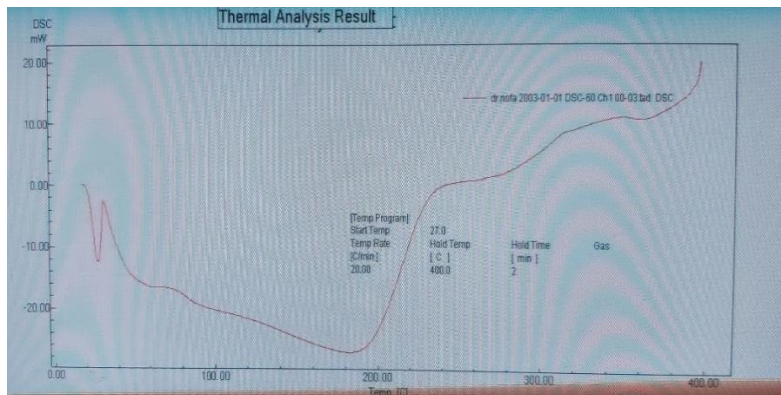
بمقارنة الطيف الناتج باستخدام الأشعة تحت الحمراء للسائل الناتج، مع الطيف الذي تم الحصول عليه للشموع الناتجة عن عملية التحلل الحراري للبلاستيك، لوحظ ما يلي:

- تضيق كبير للحزمة العائدة لمجموعة الهيدروكسيل في طيف الشموع، وهذه الحزمة عائدة لمجموعة الهيدروكسيل، بسبب وجود الماء في السائل المتكاثف مما يؤدي الى تشكيل روابط هيدروجينية مع الماء فتتوسع الحزمة.
- تشابه في الحزم العائدة للروابط الأليفاتية وبقية الحزم، وهذا أمر طبيعي لان أصل المادتين واحد وهو البلاستيك.

ثانياً: التحليل الطيفي للشموع الناتجة عن التحلل الحراري للبلاستيك باستخدام تقنية

التحليل الحراري التفاضلي DSC :

توضح تقنية التحليل الحراري التفاضلي سلوك عينة الشموع الناتجة عن التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية فيما يتعلق بالزمن و درجة الحرارة، و تساعد في الحصول على مجال درجة الحرارة المثلى لتحلل الشمع البلاستيكي، و يظهر الشكل 4-26 منحنى تحليل DSC للشموع، و يظهر فيه انهيار الشموع عند درجة حرارة أقل من 200 °C .



الشكل 4-26 منحنى تحليل DSC للشموع.

4-9 تصنيع جهاز معدل من أجل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية:

تم تصميم مفاعل تحلل حراري بسيط وغير مكلف، جزؤه الأساسي عبارة عن أسطوانة مخصصة لتعبئة الغاز المنزلي سعة كيلو غرام غاز، مصنوعة من معدن الستانلس ستيل، والفتحة الجانبية في الجسم الأسطواني اليميني للمفاعل خصصت لربط مكثف مبرد فيها مع جسم المفاعل من خلال أنبوب نحاسي قطره 0.5 cm وبطول 40 cm، وهذا المكثف المبرد هو عبارة عن أنبوب نحاسي قطره 0.5 cm وطوله 1 m ملفوف بشكل حلزوني وموضوع ضمن صندوق معدني من الحديد محكم الاغلاق، ومزود بفتحتان لدخول وخروج مياه التبريد من الصنبور. تقع نهاية الانبوب الحلزوني النحاسي خارج الصندوق وهي مخصصة لخروج غازات ونواتج التحلل الحراري.

تم وصل ساعة ضغط في الفتحة الموجودة في أعلى المفاعل لقياس الضغط ضمن المفاعل أثناء التجارب، فكان قريباً من الضغط الجوي النظامي لدى خروج غازات فقط، وأصبح أعلى بقليل من الضغط الجوي لدى قرقرة الغازات الناتجة في المياه، بسبب حصول إعاقة لخروج الغازات المتشكلة، وكذلك كان يرتفع عن الضغط الجوي بقليل لدى خروج سائل متكاثف. تم إحداث فتحة جانبية صغيرة في الجانب العلوي اليساري للمفاعل لوصل حساس حراري لجهاز ترموستات رقمي حتى يعطي قيمة درجة الحرارة ضمن المفاعل أثناء التجارب. استخدم سخان كهربائي للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة التي تتشكل عندها نواتج التحلل الحراري، ولكن أقصى درجة أمكن الحصول عليها هي 195°C ، ولذلك تم استخدام مصدر حراري للتسخين باستخدام الغاز المنزلي، حيث تجاوزت درجة الحرارة التي تم الحصول عليها 236°C بمعدل تسخين أعلى من حالة استخدام سخانة كهربائية. يبين الشكل 27-4 وحدة التحلل الحراري الجديدة والمعدلة عن الوحدة السابقة التي تم الحديث عنها و العمل عليها وتحليل نواتجها.



الشكل 27-4 وحدة التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية

10-4 تشغيل وحدة التحلل الحراري للبلاستيك:

أجريت تجارب التحلل الحراري على نوعين من العينات البلاستيكية، النوع الأول هو عبوات مياه نقية مصنعة من بولي إيثيلين تيرفتالات PET كثافته 1.38 g/Cm^3 . بينما النوع الثاني هو شريط مطاطي أسود اللون يستخدم حول أبواب وزجاج السيارات يعتقد أن تركيبه الكيميائي هو رباعي إيثيل ثيورام ثنائي كبريتيد وزنه الجزيئي 296.5 ونقطة انصهاره من $70-74^\circ\text{C}$ ودرجة غليانه 117°C وكثافته 1.27 g/Cm^3 .

تم جمع عدد من العبوات البلاستيكية المخصصة لمياه الشرب، وبعد غسلها لإزالة الشوائب والأوساخ، تم تجفيفها ووزنها ومن ثم تقطيعها إلى قطع صغيرة على شكل شرائط رقيقة بطول 8 cm وثمانية 1-2 mm لتسهيل إدخالها في فتحة المفاعل.

تم إجراء تجارب التحلل الحراري ضمن هذه الوحدة في ثلاث حالات:

1. التفكك الحراري للبولي إيثيلين تيرفتالات بدون وجود حفاز،
2. التفكك الحراري للبولي إيثيلين تيرفتالات بوجود حفاز صلب غير متجانس تم تحضيره مخبرياً و هو مكون من أكاسيد معدنية محملة على الغضار المشوي،
3. التفكك الحراري للنفايات البلاستيكية رباعي إيثيل ثيورام ثنائي كبريتيد.

تمت مقارنة النتائج لمعرفة الاختلافات في زمن ودرجات حرارة ظهور الغازات غير القابلة للاشتعال والقابلة للاشتعال، وكذلك تتبع نوعية المنتجات المتشكلة سواء كانت صلبة مثل (الشموع أو الفحم) أو سائلة أو غازية، والتعرف على أعلى درجة حرارة تفكك حراري يمكن تسجيلها في كل حالة.

كذلك قورنت النتائج في حالة استخدام البولي إيثيلين تيرفتالات كلقيم، مع حالة استخدام نوع آخر من النفايات البلاستيكية يتمتع بكثافة مشابهة مثل رباعي إيثيل ثيورام ثنائي كبريتيد $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{S}_4$.

1-10-4 التحلل الحراري للبولي إيثيلين تيرفتالات بدون وجود حفاز:

بعد إدخال كمية 30 g من قطع النفايات البلاستيكية (بولي إيثيلين تيرفتالات) إلى المفاعل، تم كسح المفاعل بغاز ثاني أكسيد الكربون عن طريق أنبوب بلاستيكي موصول عبر غطاء من الفلين إلى حوالة تحتوي كربونات الكالسيوم مضاف لها حمض كلو الماء بتركيز 30 % vol، ثم تم وصل الحساس الحراري إلى الفتحة الجانبية للمفاعل، ومن ثم تم إغلاقها بإحكام لضمان عدم تسرب أي من الغازات الناتجة عن التحلل الحراري للبلاستيك، والذي يمثل الوقود الناتج عن العملية.

تم تشغيل السخان الكهربائي لتسخين المفاعل، كانت درجة الحرارة ترتفع بشكل طردي مع زمن التسخين.

بعد بدء التجربة بزمن بسيط لم يتجاوز تسع دقائق 9 min، وصلت درجة حرارة المفاعل 128 °C وبدأ إنتاج أبخرة غازية غير قابلة للاشتعال، وعند وصول درجة الحرارة إلى 175 °C وذلك بعد زمن قدره 14.30 min، أصبحت الأبخرة قابلة للاشتعال بسهولة بشعلة دائمة، استمر انطلاق هذه الأبخرة الناتجة من المكثف المبرد لمدة 32 min بعدها توقف نتيجة التحلل الحراري لكامل العينة، وهي فقط غازات غير قابلة للتكثيف.

في بداية التجربة انطلقت غازات تحوي على ثاني أكسيد الكربون غير القابل للاشتعال، إضافة إلى غازات أخرى، ثم بدأ تشكل غازات قابلة للاشتعال بسهولة، وهي عبارة عن نواتج التفكك الحراري للبولي إيثيلين تيرفتالات إلى مركبات هيدروكربونية بوزن جزيئي منخفض، وجميعها لم يتجاوز عدد ذرات الكربون فيها من C1 إلى C3 لأنها جميعها غازية لم تتكاثف لدى مرورها في المكثف، ولم تتشكل سوائل في هذه الحالة، يمكن التنبؤ بتشكيل غاز الهيدروجين القابل للاشتعال نتيجة تفاعلات التكسير إضافة إلى غازات الميثان والايثان والبروبان والايثلين والبروبلن وجميعها غير قابلة للتكثف، أما غاز كبريت الهيدروجين فقد كانت له رائحة واضحة في بداية التحلل الحراري، وهذا يبنى بوجود عنصر الكبريت ضمن التركيب الكيميائي للنفايات البلاستيكية. يبين الجدول التالي 4-5 تغير درجة حرارة التفكك الحراري مع الزمن منذ بداية التفكك و حتى نهاية العينة، وبالتالي معدل التسخين في المفاعل.

الجدول 4-5 تغير درجة حرارة التحلل الحراري لبولي إيثيلين تيرفتالات بدون حفاز مع الزمن.

30	25	20	17	15	10	7	5	0	زمن التفكك الحراري min
215	210	190	181	175	140	109	83	40	درجة حرارة المفاعل °C
1	4	3	1.2	7	10.33	13	8.6	0	معدل التسخين °C/min

بينت النتائج أن معدل التسخين ازداد طردياً مع زيادة زمن التجربة، ثم وصل إلى قيمة قصوى والتي عندها تحلل الجزء الأكبر من العينة، وكان تدفق المزيج الغازي الناتج أعظماً، ثم عاد للتناقص تدريجياً حتى انتهى ظهور النواتج الغازية ولم يتبقى شيء من العينة.

4-10-2 التحلل الحراري لبولي إيثيلين تيرفتالات بوجود حفاز غير متجانس:

تم تحضير الحفاز المستخدم مخبرياً، وهو عبارة عن أكسيد الفناديوم المحمل على حامل من الكاؤولين المشوي، بطريقة التشريب الرطب لملح فنادات الأمونيوم على الحامل.

تم إحضار غضار الكاؤولين المستخدم من معمل بورسلان في محافظة حماة؛ و تركيبه الكيميائي $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ تم التحقق منه باستخدام جهاز الأشعة السينية، تم تقدير وزنه النوعي فكان 2.65 g/cm^3 ، و تحمله الحراري $1750 \text{ }^\circ\text{C}$ وفي الدرجة $450-675 \text{ }^\circ\text{C}$ يطرد منه الماء الداخل في تركيبه الكيميائي، وحد السيولة له % 115 والمار من المنخ $74 \mu\text{m}$ بنسبة % 100، $\text{pH}_{10\%}=8.257$.

حضر حامل الحفاز على شكل خيوط معكرونة بطول $(1 - 2) \text{ cm}$ و قطر $(2 - 3) \text{ mm}$ ، بعد تنشيط غضار الكاؤولين (الومينا سيليكات) بحمض كلور الماء المخفف مدة 24 ساعة بطريقة النقع، وبعد ترشيحه وغسله بالماء المقطر تم تجفيفه في الهواء عند درجة حرارة المخبر ثم عند الدرجة $150 \text{ }^\circ\text{C}$ في فرن تجفيف، وبعد ذلك تم ترميده عند درجة حرارة قدرها $800 \text{ }^\circ\text{C}$ وفق برنامج حراري تم من خلاله التحكم بمعدل التسخين $2 \text{ }^\circ\text{C}$ في الدقيقة.

تؤدي معالجة الأتربة الطبيعية بالحمض متنوعة بالمعالجة الحرارية بعد تشكيلها، إلى إحداث تغيرات ملحوظة في طبيعتها الكيميائية والفيزيوكيميائية، مثل التركيب الكيميائي والكثافة الظاهرية والحجم المسامي والسطح النوعي والحموضة السطحية مما يغير من فعاليتها الامتزازية، حيث يعمل التنشيط الحمضي عمى إزالة جزء من الشوارد المعدنية مثل الألمنيوم والمغنزيوم والحديد من البنية البلورية ثمانية الوجوه، كما يخفض كمية الكربونات.

وأثبت من خلال أشعة X أن هذه الإزالة تخلف فجوات في البنية البلورية، وبالتالي زيادة في مساحة السطح الداخلي، وفي نفس الوقت تحتل تلك الشوارد المتحررة (شوارد الألمنيوم والمغنزيوم والحديد) والأكثر حموضة محل شوارد أقل منها حموضة مثل (شوارد الكالسيوم واليوتاسيوم والصوديوم) المتواجدة فيما بين الصفائح والمزلة بنتيجة المعالجة، مما يؤدي إلى زيادة في عدد مواقع الحموضة السطحية القوية، كما أن زيادة الحموضة تتعلق بعدد المسامات ذات الأقطار ما بين $50-200 \text{ \AA}$ والمناسبة لامتزاز جزيئات المركبات الملونة، وليس بالحجم المسامي الكلي للتربة. ومن جهة أخرى فقد وجد أن المعالجة الحمضية المعتدلة تعمل على زيادة فعالية التربة نتيجة تحرر حمض السيليس الابللوري أو المسامي، في حين أن المعالجة الحمضية الشديدة تنقص هذه الفعالية بنزعها للسيليك عديمة الشكل وانقاصها للمساحة السطحية.

بعد الانتهاء من عملية تشكيل حامل الحفاز تم اجراء عملية التشريب الرطب الجزئي للحامل باستخدام محلول فنادات الامونيوم NH_4VO_3 حيث غمرت عصيات الحامل بمحلول ملح الفناديوم مدة لا تقل عن 24 ساعة، ثم تم ترشيح و غسل و تجفيف العصيات عند درجة حرارة

المخبر، ثم عند درجة حرارة 150°C ، ثم أجريت عملية ترميد للوسيط عند درجة حرارة 500°C مدة أربع ساعات لتفكيك فنادات الأمونيوم وتحويلها إلى أكسيد الفناديوم.

1-2-10-4 تحليل الحفاز المستخدم:

١- التحليل باستخدام جهاز الامتصاص الذري (AAS):

استخدم جهاز الامتصاص الذري (AAS) جهاز Spectra AA-200، لتحديد النسب المئوية الحقيقية للأكاسيد المكونة لكل من الحامل والمحفز على حد سواء.

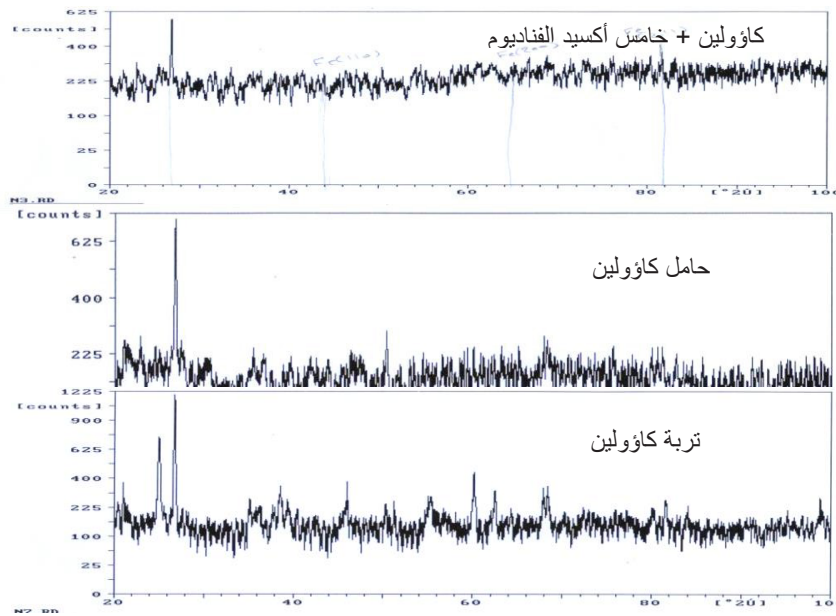
أجريت التحاليل الكمية للحفاز المستخدم بعد طحن العينة وضغطها باستخدام جهاز الأشعة السينية المفلورة، Multi-Channel X-Ray Fluorescence Spectrometer Mxf- 2300 الموجود في معمل حديد حماة في جو تخطلي 0.018 atm بوجود غاز Ar/CH_4 = 90/10، وبواسطته تم تحديد النسب المئوية الحقيقية للأكاسيد المؤلفة لكل من الحامل والحفاز على حد سواء، وبالتالي تم التعرف على نسب تحميل حامل الكاؤولين المشوي بخامس أكسيد الفناديوم. والجدول 4-6 يبين النسب المئوية لكل من الأكاسيد المعدنية المكونة للحامل قبل وبعد التشريب، علماً أن تركيز الأكسيد المشرب في محلوله الملحي هو $2\% \text{ V}_2\text{O}_5$.

الجدول 4-6 التركيب النسبي المنوي للأكاسيد المكونة لكل من الحامل والحفاز

الأكسيد %	حامل الكاؤولين	كاؤولين + V_2O_5
Fe_2O_3	8.17	8.25
V_2O_5	-	1.84
TiO_4	2.03	1.82
Al_2O_3	7.93	7.87
Cr_2O_3	0.027	0.029
MgO	1.66	1.64
CaO	28.94	27.89
SiO_2	40.20	39.59
الفاقد عند 900°C	11.76	9.95
Σ %	100.76	98.89

٢- التحليل باستخدام جهاز الأشعة السينية:

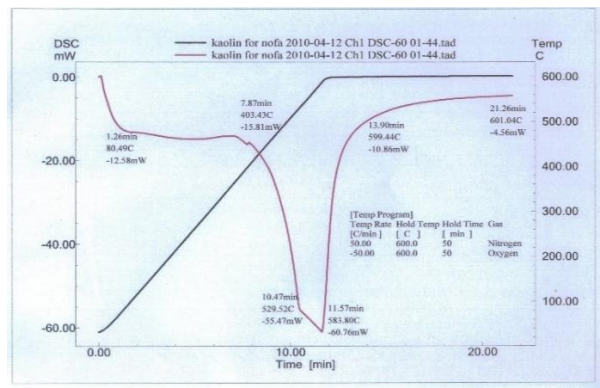
أجري التحليل باستخدام جهاز X – MET 920XRT Single Sample Probe إنتاج شركة Metorex الفنلندية، نتائج التحليل تظهرها الطيوف الموضحة في الشكل 4-28 الذي يمثل كل من التربة الخام والحامل، والحفاز.



الشكل 4-28 طيوف أشعة X لكل من تربة الكاؤولين الخام والحامل والحفاز المكون من خامس أكاسيد الفناديوم/ الكاؤولين

٣- التحليل باستخدام جهاز التحليل الحراري التفاضلي:

أجري التحليل باستخدام جهاز DSC-60 Differential Scanning Calorimeter SHIMADZU للتعرف على التغيرات التي يخضع لها الحامل والحفاز المستخدم في البحث أثناء ترميده في المرمدة عند درجات حرارة مرتفعة، وذلك باستخدام جهاز قياس التحليل الحراري التفاضلي كما يظهر في الشكل 4-29.



الشكل 4-29 مخطط التحليل الحراري التفاضلي للكاؤولين

٤- التحليل باستخدام جهاز قياس السطح النوعي Bet و جهاز قياس قوة التحطم:

يبين الجدول 4-7 قيم السطح النوعي للحفاز المستخدم وللحامل، والتي تم قياسها بواسطة جهاز Gemini 2370 V5.01 Bet. حسبت قيم السطح النوعي متعدد النقاط والسطح النوعي أحادي النقطة وقوة التحطم.

الجدول 7-4 قيم السطح النوعي للحفاز و قوة التحطم

Catalyst/parameter	Surface Area (S.A) m ² /g	Bet single point (S.A) m ² /g	Crushing Value N/mm
Kaolin Soil	248.8	-	-
Kaolin Support activated	223.01	113.4	79.5
V ₂ O ₅ /Kaolin	201.4	126.66	293.6

سحقت كمية 5 g من الحفاز وأضيفت للمفاعل مع النفايات البلاستيكية، وأجريت عملية التحلل الحراري بوجود حفاز صلب غير متجانس. و الشكل 4-30 يبين الحفاز المستخدم.



الشكل 4-30 الحفاز الصلب (خامس أكسيد الفناديوم المحمل على الكاؤولين المشوي)



الشكل 4-31 البلاستيك المقطع

4-2-10-2 حساب معدل التسخين في المفاعل:

ادخلت كمية 30 g من النفايات البلاستيكية (بولي ايتلن تيرفتالات) إلى المفاعل، مع كمية 5 g من مسحوق العامل الحفاز المستخدم، وتم تشغيل وحدة التحلل الحراري كما في التجربة السابقة.

وبعد بدء التجربة بزمن بسيط لم يتجاوز خمس دقائق 5 min وصلت درجة حرارة المفاعل 97 °C وبدأ إنتاج أبخرة غازية غير قابلة للاشتعال، مقارنة مع تسع دقائق في حالة عدم وجود

حفاز. وعند وصول درجة الحرارة إلى 108°C وذلك بعد زمن 7.30 min ، أصبح الغاز الناتج قابلاً للاشتعال بلهب ضعيف، مقارنة مع 14.30 min ودرجة حرارة 175°C في حالة عدم وجود حفاز.

يتضح من هذه النتائج أن وجود العامل الحفاز قد خفض إلى النصف تقريباً زمن ودرجات الحرارة التي تشكلت عندها الغازات غير القابلة للاشتعال والقابلة للاشتعال على حد سواء، وهذه نتيجة ممتازة لاستخدام الحفاز. أي أن الحفاز خفض إلى النصف طاقة تنشيط التفاعل. عند الزمن 18 min تقريباً ودرجة حرارة 168°C ، أصبح اللهب قوياً، وهذه الأبخرة الناتجة من المكثف المبرد استمر انطلاقها لمدة تقريباً 30 min بعدها توقف انطلاق الغازات عند تمام التحلل الحراري لكامل العينة.

يبين الجدول التالي 4-8 تغير درجة حرارة التحلل الحراري ضمن المفاعل مع الزمن.

الجدول 4-8 تغير درجة حرارة المفاعل مع الزمن، ومعدل التسخين في المفاعل.

30	25	20	17	15	10	7	5	0	زمن التفكك الحراري min
203	200	190	165	155	126	108	97	40	درجة حرارة المفاعل $^{\circ}\text{C}$
0.6	2	8.3	5	5.8	6	5.5	11.4	0	معدل التسخين HR $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

يتضح من الجدول 4-8 أن معدل التسخين وصل قيمة قصوى في بداية التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية، عند الزمن 5 min كان 11.4 مقارنة مع 8.6 في حالة غياب الحفاز، وهذا يعكس الدور الكبير للحفاز في ذلك، وهذا كان سبباً في ظهور لهب قابل للاشتعال عند زمن أقل. ثم عاد للتناقص تدريجياً حتى انتهى ظهور النواتج الغازية ولم يتبقى شيء من العينة.

4-10-2-3 حساب معدل تدفق المزيغ الغازي الناتج:

تم حساب تدفق المزيغ الغازي بطريقة الإزاحة، باستخدام بالون معايرة سعة 100 ml وحسب الزمن اللازم لإزاحة الماء من خلاله فكان 3 min ، و بمعدل تدفق $33.33\text{ ml}/\text{min}$. بقي معدل التدفق شبه ثابت تقريباً مدة 8 min ومن ثم بدأ بالتناقص فوصل إلى $11.11\text{ ml}/\text{min}$ عند قرب انتهاء التجربة، في الدقيقة 23 min من بدء التجربة. حيث تطلب إزاحة 100 ml من الماء زمناً قدره 9 min ، وكانت درجة الحرارة 203°C . وهذا أمر طبيعي يؤشر إلى أن العينة تحللت تقريباً بالكامل. تم حساب معدل تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري والنتائج ممثلة في الجدول 4-9.



الشكل 4-32 حساب تدفق الغاز الناتج بطريقة الإزاحة

الجدول 4-9 تغيير تدفق الغاز الناتج عن التحلل الحراري

10	3.45	3	8	10	زمن إزاحة 100 ml-min
23	18	15	10	6	زمن التجربة min
10	28.9	33.3	12.5	10	معدل تدفق الغاز ml/min

3-10-4 التحلل الحراري للمطاط:

تم استخدام 100 g من النفايات المطاطية (شريط مطاطي أسود اللون يستخدم حول أبواب وزجاج السيارات تركيبه الكيميائي هو رباعي إيثيل ثيورام ثنائي كبريتيد)، بعد تقطيعها إلى شرائح بطول من 6-8 cm وثمانية 2-3 mm، لتسهيل إدخالها إلى المفاعل، وقورنت النتائج مع حالة استخدام نفايات بلاستيكية من البولي إيثيلين تيرفتالات، لكن بدون وجود حفاز. يبين الشكل 4-32 شرائح المطاط المستخدم بعد تقطيعها.



الشكل 4-33 شرائح المطاط المستخدمة في تجربة التحلل الحراري.

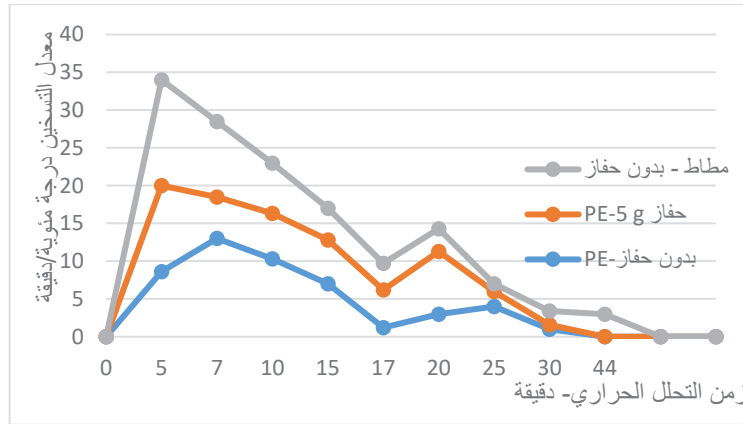
1-3-10-4 حساب معدل التسخين أثناء تحلل المطاط:

يبين الجدول 4-10 تغيير درجة الحرارة ضمن مفاعل التحلل الحراري للمطاط، و معدل التسخين في المفاعل مع الزمن.

الجدول 10-4 تغيير درجة حرارة المفاعل مع الزمن، ومعدل التسخين في المفاعل.

t-min	0	3	5	7	10	15	17	20	25	30	44
T-°C	40	76	104	124	145	166	173	180	185	194	236
HR=°C/min	0	12	14	10	6.66	4.2	3.5	3	1	1.8	3

وصل معدل التسخين قيمة عظمى في بداية زمن التحلل الحراري، ثم انخفض مع زيادة زمن التحلل الحراري، وهذا يدل أن العينة تحولت إلى سائل (انصهرت) منذ الدقائق الأولى للتسخين، وأن تشكل الأبخرة منذ الدقائق الثلاث الأولى يثبت ذلك. الشكل 4-34 يبين تغيير معدل التسخين مع الزمن في الحالات الثلاث السابقة.



الشكل 4-34 تغيير معدلات التسخين مع الزمن في حالة التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية و المطاطية بالمقارنة مع نتائج تحلل البولي إيثيلين تيرفتالات بدون وجود حفاز، نجد أن معدل التسخين أعلى عند نفس الزمن على سبيل المثال، عند الزمن 5 min أصبح 14 °C/min في حالة تحلل المطاط، مقارنة مع 8.6 °C/min في حالة تحلل بولي إيثيلين تيرفتالات. و مع تقدم التجربة عند الزمن 7 min أصبح معدل التسخين 10 °C/min مقارنة مع 13 في حالة بولي إيثيلين تيرفتالات، ونعزو ذلك إلى تسيل المطاط عند زمن أقل. ويؤكد ذلك انصهار العينة منذ الدقائق الثلاث الأولى عند 77 °C والتي هي درجة انصهار المطاط بدليل تشكل الأبخرة، بينما احتاج بوليمير PET إلى تسع دقائق ودرجة حرارة 128 °C حتى بدأت الأبخرة غير القابلة للاشتعال بالتشكل. يمكن تفسير عدم الحصول على شعلة في الدقائق الأولى على الرغم من تشكل الأبخرة بارتفاع تركيز غاز كبريت الهيدروجين في المزيج الغازي المتشكل، نظرا لوجود عنصر الكبريت في التركيب الكيميائي للمطاط المستخدم. يثبت ذلك الرائحة المزعجة جدا للمزيج الغازي المتشكل وهي رائحة غاز كبريت الهيدروجين التي تشبه رائحة البيض الفاسد.

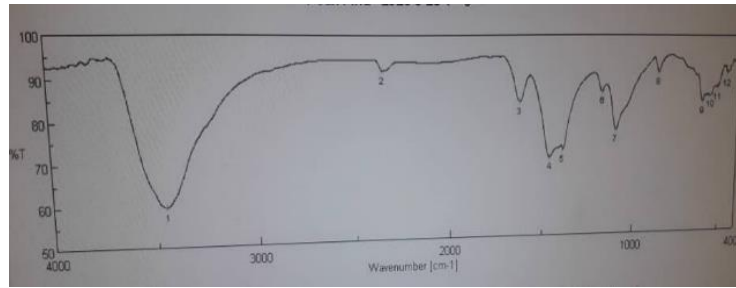
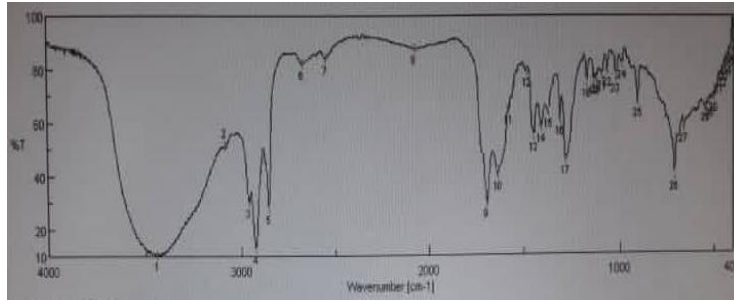
تم الوصول إلى شعلة دائمة غير منطفئة عند الزمن 25 min تقريباً، عند 185°C ، وتشكل إضافة إلى المزيج الغازي أيضاً وقود سائل متكاثف بلون بني محمر، يشبه بمواصفاته الفيزيائية إلى حد بعيد الديزل النفطي كما هو موضح في الشكل يبين الشكل 4-34. ازداد حجم الوقود السائل المتكاثف ووصلت درجة حرارة التصلب الحراري إلى 236°C ، واستمرت انطلاق الوقود الغازي والسائل مدة 44 min تقريباً ثم توقف. كان حجم السائل الناتج عن تحلل 100 g تقريباً 8-10 ml، وأجريت عليه بعض التحاليل الممكنة، وهي مسح طيفي للسائل الناتج عن التصلب الحراري للمطاط باستخدام الأشعة تحت الحمراء.



الشكل 4-35 السائل الناتج عن التصلب الحراري للمطاط

4-10-3-2 تحليل الوقود البلاستيكي السائل باستخدام الأشعة تحت الحمراء:

بمقارنة طيف التحليل باستخدام الأشعة تحت الحمراء للسائل البلاستيكي الناتج عن التصلب الحراري للمطاط مع الشكل الذي يمثل الطيف للسائل البلاستيكي الناتج عن التصلب الحراري للبولي إيثيلين تيرفتالات بوجود حفاز غير متجانس، نجد تشابهاً في المجموعات الوظيفية المكونة لكل منهما مع اختلاف بسيط في نسب هذه المكونات. يوضح الشكل 4-36 طيف التحليل بالإشعاع تحت الأحمر للسائل البلاستيكي في الحالتين.



الشكل 4-36 طيف التحليل بالإشعاع تحت الأحمر للسائل البلاستيكي الناتج عن تحلل كل من البلاستيك و المطاط

الفصل الخامس

إنتاج الغاز الحيوي من الكتلة الحيوية

1-5 المقدمة:

تعتمد الطاقة الناتجة عن الكتل الحيوية على إنتاج وتجميع مخلفات المحاصيل وروث الحيوانات والفضلات المنزلية وغير ذلك. كثير من دول العالم انتقلت من استعمال هذا المصدر للطاقة إلى استعمال الفحم في القرن التاسع عشر، والنفط في القرن العشرين. ولا تزال المصدر الوحيد للطاقة لأكثر من ملياري نسمة يعيش معظمهم في جنوب آسيا وفي أواسط إفريقيا وبالتالي تشكل 10 % من المصادر الأولية للطاقة العالمية.

حالياً تعتبر الكتلة الحيوية من أهم مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة والصديقة للبيئة، وهي توجد في طبقة رقيقة جداً تدعى الغلاف الحيوي Biosphere، ومصطلح الكتلة الحيوية Biomass يشير إلى المواد العضوية التي يمكن أن تتحول إلى طاقة.

إن إنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية يخلص البيئة من المخلفات العضوية الزراعية والمنزلية وأثرها الملوث على البيئة، إضافة إلى تخفيض استهلاك الوقود الأحفوري وتخفيض آثاره الملوثة أيضاً، وفوق ذلك تلبية احتياجات المناطق الزراعية من السماد الحيوي الناتج كبديل عن السماد الكيميائي الضار، وثبت نجاحها كمصادر بديلة للطاقة الأحفورية. (الأمين، 2006) [51]

تكمن أهمية البحث في إمكانية استغلال المخلفات العضوية بأنواعها المختلفة، النباتية والحيوانية والمنزلية والصناعية، وإعادة تدويرها في وحدات خاصة تدعى وحدات الغاز الحيوي، وينتج عن ذلك الطاقة الكهربائية التي يمكن توفيرها بسهولة خاصة في المناطق البعيدة، كذلك يمكن استغلال مخلفات الصناعات الغذائية كمصدر للطاقة السائلة والصلبة وهذا يسمح بتوفير تكاليف معالجتها.

يهدف البحث إلى إنتاج الغاز الحيوي من النفايات المنزلية العضوية والنفايات الحيوانية بطريقة التخمير اللاهوائي لتحويلها إلى غاز يمكن الاستفادة منه بطرق عديدة، (الطهي والتدفئة وتوليد الكهرباء)، كما يمكن الاستفادة من بقايا عملية التخمير في زيادة خصوبة الأراضي الزراعية، والحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المسبب لظاهرة الاحتباس الحراري.

2-5-2 الغاز الحيوي: [53] (نوو، سيف الدين، 2002).

يعرف الغاز الحيوي بأنه الغاز الناتج عن تحلل المواد العضوية بطريقة التخمير اللاهوائي ضمن هواضم خاصة تدعى المفاعلات اللاهوائية. يشكل غاز الميثان النسبة العظمى من الغاز الحيوي، وهو غاز غير سام وكثافته أقل من كثافة الهواء بحوالي 20 % ويحترق بلهب أزرق.

تتراوح نسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي بين % 45-75، و نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون % 25-55، إلا أن هذه القيم تكون متغيرة خلال مراحل التخمر، ففي الأيام الأولى للتخمير تكون نسبة الميثان منخفضة مقارنة مع غاز CO_2 . وفقاً لدراسة أعدتها الجمعية الألمانية للغاز والمياه، فإن النسب المئوية لأهم مكونات الغاز الحيوي هي كما في الجدول 1-5.

الجدول 1-5 التركيب الكيميائي للغاز الحيوي وفقاً للجمعية الألمانية للغاز والمياه

المكون	القيمة %	القيمة الوسطى %
الميثان CH_4	45-70	60
CO_2	25-55	35
H_2O	0-10	3.1
N_2	0.01-5	1
O_2	0.01-2	0.3
H_2	0-1	1 % >
NH_3	0.01-2.5 mg/m ³	0.7 mg/m ³
H_2S	10-30000 mg/m ³	500 mg/m ³

يقدر المحتوى الطاقى في الغاز الحيوي $1.3-1.5 \text{ kWh/m}^3$ حسب محتواه من الميثان، وهذا يعادل 0.6 m^3 من الغاز الطبيعي، 0.8 kg من الفحم، 1 L من كحول الايتانول، 0.7 L من البنزين، و ينتج 6 kWh من الكهرباء. تصل درجة حرارة اشتعاله إلى $650-750 \text{ }^\circ\text{C}$. تؤثر عوامل عديدة على عملية التخمر ومعدل إنتاج الغاز الحيوي أهمها:

- 1- درجة الحرارة: البكتريا المنتجة للغاز الحيوي درجة الحرارة المثلى لها $35-37 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 2- درجة الحموضة: يجب أن تكون متعادلة لتتمكن البكتريا من العمل بكفاءة عالية، وعلى الرغم من أن بكتريا التحلل اللاهوائي يمكنها أن تعيش في ظروف حامضية وتحول المواد العضوية إلى أحماض عضوية كنتاج جانبي من عملية التحلل الأولى للمادة العضوية، إلا أن بكتريا الميثان التي تقوم بتكسير الأحماض العضوية وإنتاج غاز الميثان كمنتج جانبي تعمل بشكل أفضل عند $5.8-8.6$.
- 3- تستهلك البكتريا اللاهوائية المنتجة لغاز الميثان عنصري الكربون والأزوت بنسبة 25-30 % كربون إلى 1 نتروجين، و يحتوي روث الأبقار والأغنام على هذه النسبة بشكل تقريبي. يوجد الجراثيم اللاهوائية التي تحول المركبات العضوية المعقدة مثل البروتينات والسلولز والليغنينات والليبيدات إلى مركبات منحلة وحيدة الجزيئة، مثل الحموض الأمينية والغلوكوز والحموض الدسمة والجليسيرين، وتشكل وسطاً مغذياً للمجموعة الجرثومية الحمضية، والأنزيمات الخلوية مثل السلولز والبروتياز والليباز تحفز حلمهة الجزيئات المعقدة.

- ٤- الجراثيم المخمرة تحول السكريات والحموض الأمينية والحموض الدسمة والحموض العضوية مثل (الخل و البيوتيريك والبروبيونيك والفورميك واللاكتيد والسوكسينيك) و الكحول والكيونات إلى الخلات وغاز ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. وتعد الخلات الناتج الرئيسي لتخمير السكريات.
- ٥- البكتريا المنتجة للخلات تحول ما تبقى من الحموض الدسمة والكحول إلى خلات وهيدروجين و CO_2 .
- ٦- الجراثيم المنتجة للميتان تحول حمض النمل والميتانول و ميتيل أمين وحمض الخل في ظروف لا هوائية إلى غاز الميتان. في مجال ضيق لدرجة الحموضة 6.5-7.5.
- ٧- للمحافظة على جريان مناسب ولمنع تكون الأحماض بمعدلات أكبر من استهلاكها، فإن تركيز المادة الصلبة في محلول التغذية بين % 8-10، وكذلك للمحافظة على التوازن في عملية التبخر. ولدى تخمير القمامة والقش يمكن زيادة النسبة إلى % 25-30، وفي هذه الحالة تضاف كربونات الكالسيوم للمساعدة في التوازن نظراً لتشكيل الأحماض.
- ٨- درجة التحميل بالمادة العضوية (كمية التغذية نسبة لحجم المخمر): يزداد إنتاج الغاز الحيوي كلما ازداد معدل التحميل بالمادة العضوية، ولكن زيادة النسبة أكثر من اللازم يؤدي إلى تراكم الأحماض العضوية لعدم تمكن بكتريا الميتان من تحويلها لغاز، مما يسبب توقف إنتاج الغاز.
- ٩- زمن مكوث المحلول في المفاعل اللاهوائي يشير إلى عدد الأيام التي يبقى فيها المحلول ضمن المخمر، و تحكم هذا الأمر عوامل عديدة منها نوع المخمر ودرجة الحرارة، و طبيعة المادة العضوية، وسهولة تخمرها. وعادة يصل الزمن حتى 40 يوماً لتخمير روث الماشية في ظروف عدم التسخين، والحد الأدنى لزمن المكوث يحدده سرعة تكاثر البكتريا، أما الحد الأقصى تحدده عوامل اقتصادية، حيث أن زيادة زمن البقاء يؤدي إلى زيادة حجم المخمر وبالتالي زيادة التكاليف.
- ١٠- المواد السامة في التغذية: تعتبر المعادن الثقيلة والمضادات الحيوية والمنظفات الصناعية والمبيدات، مواد سامة للبكتريا المنتجة للغاز الطبيعي، كما أن ارتفاع تركيز الأمونيا والذي ينجم عن انخفاض نسبة الكربون إلى الأزوت قد يسبب تسمم البكتريا.
- ١١- استخدام البادئات: عند بداية تشغيل المخمر يفضل إضافة نسبة مخلوط تخمير نشط وذلك للاسراع في عملية التخمير، يحتوي هذا المنشط نسب متوازية من بكتيريا الميتان وبكتيريا الحمض، ويمكن للمخمر العمل بدونه في حالة استخدام روث الماشية، ولكن ذلك يتطلب الإنتظار بضعة أيام لحين تكاثر ونمو عدد كاف من بكتيريا الميتان.

١٢- من الضروري التحريك داخل المخمر لرفع كفاءة عملية التخمر وزيادة الغاز المنتج، نظراً لتجانس مكونات المخمر وبالتالي ترتفع معدلات إنتاج الغاز بسبب زيادة فرص التلامس بين المخلفات والبكتيريا، ويزداد نشاط بكتيريا الميتان. يمنع التحريك تشكل طبقة الخبث فوق سطح المزيج المتخمر والتي تعيق صعود الغاز للأعلى. تعتبر عمليات تزويد المخمر بالمواد الطازجة إحدى طرق التحريك، ولذا كان من الأفضل زيادة عدد مرات عملية التغذية اليومية. يمكن استخدام التحريك اليدوي والميكانيكي. إن مفاعلات الغاز الحيوي الأكثر تواجداً في العالم هي الهاضمات المنزلية، ففي عام 2004 كان في الصين وحدها 20 مليون منشأة صغيرة لتوليد الغاز الحيوي، ارتفع العدد إلى أكثر من 30 مليون هاضم منزلي في الصين و 3.8 مليون هاضم منزلي في الهند وكذلك 200000 في النيبال و 60000 في بنغلادش. ويوجد في البلدان الإفريقية عدد قليل من الهاضمات الصغيرة. في أوروبا وأمريكا توجد هاضمات أكبر في الحجم، مقارنة مع الهاضمات المنزلية في البلدان النامية. ففي عام 2010 كانت هناك 162 هاضم مزرعة في الولايات المتحدة و 17 في كندا. أما ألمانيا فلديها أكثر من 4000 هاضم لاهوائي على مستوى مزرعة في نطاق العمل في عام 2011. بينما كانت هناك 350 في النمسا و 72 في سويسرا و 65 في المملكة المتحدة و 35 في الدانمارك.

في أوروبا وفي عام 2010 تم توليد 126.5 TW من الغاز الحيوي. الغاز الحيوي المستخرج من مكبات القمامة، هو النشاط السائد في المملكة المتحدة، وإيطاليا، وفرنسا وإسبانيا، بينما محطات الهضم المشترك ومحطات النفايات البلدية الصلبة ومحطات على نطاق المزرعة هي أكثر تواجداً في ألمانيا وهولندا و التشيك والنمسا وبلجيكا و الدانمارك ولوكسمبورغ والعديد من بلدان أوروبا الشرقية. في عام 2010 كانت نسب إنتاج الغاز الحيوي: % 26 من المكبات الصحية، % 10 من حمأة الصرف الصحي، والباقي % 64 من محطات الهضم المشترك، ومحطات النفايات البلدية الصلبة، ومحطات على نطاق المزرعة.

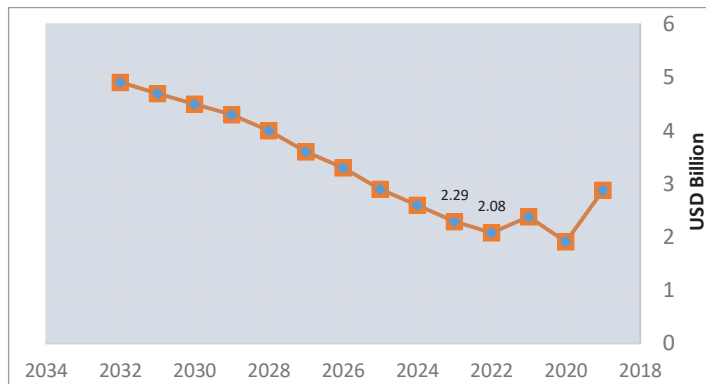
الاستعمال الرئيسي للغاز الحيوي المنتج في أوروبا للتدفئة وإنتاج الكهرباء.

في عام 2010 وصل إنتاج الكهرباء من الغاز الحيوي 35.9 TWh، ومع ذلك فإن ترقية الغاز الحيوي إلى غاز الميتان يتم على نطاق ضيق. فقد تم تحديد 177 مصنع في أوروبا، 128 مصنع منها فقط تقوم بضخ الغاز المنتج في شبكة الغاز.

وفي السويد يوجد 233 مصنعا للغاز الحيوي في عام 2011 والتي أنتجت 1473 GWh من الغاز الحيوي (، والسويد هي البلد الوحيد في أوروبا الذي يقوم بترقية أكبر كمية من الغاز الحيوي إلى غاز الميتان حيث تم استخدام % 50 من الغاز المنتج كوقود في المركبات.

أصبحت أوروبا أكبر منتج للغاز الحيوي عام 2020 نظراً لوجود قاعدة كبيرة من مرافق الغاز الحيوي، حيث يقع معظمها في ألمانيا وإيطاليا، كانت المنطقة أكبر منتج للغاز الحيوي، حيث يوجد حوالي 18943 مصنعاً للغاز الحيوي، ووفقاً للجمعية الأوروبية للغاز الحيوي (EBA)، من المتوقع أن يصل إنتاج الغاز الحيوي في أوروبا إلى 98 مليار متر مكعب من الميثان الحيوي بحلول عام 2050، أي بزيادة قدرها % 4800 عن مستويات الإنتاج الحالية. (تقرير سوق محطات الغاز الحيوي، 2024) [55].

قامت ألمانيا وعلى مدى السنوات الماضية بتطوير مصانع الغاز الحيوي وإنشاء بنية تحتية جديدة للغاز الحيوي لتوفير دعم إضافي لسوق الغاز الحيوي المتنامي. على سبيل المثال، في يونيو 2020، نتيجة تعاون بين شركاء الصناعة في صناعة الميثان الحيوي وشركة Deutsche Energie-Agentur تم بناء خط أنابيب جديد للغاز الحيوي يمكنه تجميع إمدادات الغاز الحيوي الخام لما يصل إلى 48 مصنعاً للغاز الحيوي في جميع أنحاء ألمانيا. تمتاز منشآت الغاز الحيوي في المناطق الزراعية بأنها تنتج الغاز الحيوي بأقل التكاليف. بلغ حجم السوق العالمي لمحطات الغاز الحيوي 4.18 مليار دولار أمريكي في عام 2023. ومن المتوقع نموه من 4.57 مليار دولار أمريكي في عام 2024 إلى 9.09 مليار دولار أمريكي في عام 2032 بمعدل نمو سنوي مركب قدره % 8.79 خلال الفترة (2024-2032). في الولايات المتحدة الأمريكية من المتوقع أن ينمو سوق محطات الغاز الحيوي بشكل كبير، ليصل إلى قيمة تقدر بـ 131.49 مليون دولار أمريكي بحلول عام 2032، مدفوعاً بالتحسين المستمر في إدارة النفايات المنزلية وزيادة استخدام الوقود الحيوي كبديل للطاقة. يبين الشكل 5-1 نمو سوق محطات الغاز الحيوي بين عامي 2019-2032.



الشكل 5-1 نمو سوق محطات الغاز الحيوي بين عامي 2019-2032

يعد الغاز الحيوي الناتج منافساً للغاز الطبيعي من حيث الخصائص الفيزيائية وطاقة الاحتراق والجدول التالي يبين الفروقات بين الغاز الطبيعي والغاز الحيوي.

الجدول 2-5 الفروقات بين الغاز الطبيعي و الحيوي

المكون	الغاز الطبيعي	الغاز الحيوي
الميثان % vol CH ₄	85-90	60-80
% vol CO ₂	0.5-1	20-35
ppm N ₂	1	500
ppm NH ₃	0	100
الكثافة kg/m ³	0	1.16
الطاقة المنتجة kwh/m ²	0	1.16

3-5 تصميم مخمر مخبري:

تم استخدام مخمر بلاستيكي بحجم 20 L مزود بفتحة في الأعلى مخصصة لخروج الغازات الناتجة عن التحلل اللاهوائي للفضلات، هذه الفتحة تم وصلها إلى إطار سيارة عبر أنبوب بلاستيكي مزود بصمام على شكل حرف T أحد فتحتي الصمام مخصصة لدخول الغاز الناتج عن التخمر إلى الإطار، والفتحة الأخرى للتحقق من إنتاج الغاز الحيوي وقابلية اشتعاله. تمت تغذية المخمر باللقيم الذي هو عبارة عن (فضلات منزلية بقايا خضار وبقايا طعام بطاطا وفلفل أحمر وحمص) بعد خلطه باستخدام الخلاط الكهربائي للتجانس، كان وزن الكمية المضافة من المخلفات المنزلية 6.8 kg، أضيف أيضاً للقيم فضلات طيور بنسبة 15 % من المخلفات أي ما يعادل 1.02 kg، وأضيف ماء من الصنبور حتى وصل الحجم 16 L. حسبت نسبة الرطوبة في المخمر فكانت 80 %، تم حسابها بعد أخذ كمية من المكونات الصلبة والسائلة (الخليط المتجانس) في جفنة بورسلان معلومة الوزن، ثم تم وزنها باستخدام ميزان الكتروني، وتجفيفها عند درجة حرارة 105 °C حتى ثبات الوزن، ثم حساب الرطوبة بالنسبة المئوية. بالتالي فإن نسبة المواد الجافة 20 %.

ترك فراغ هوائي في المخمر حوالي 4 L لتجنب فيض ناتج التخمر، فأصبح الحجم الفعال 16 L، تم قياس قيمة درجة الحموضة للخليط فكانت حوالي 6 وهذه القيمة منخفضة لذلك أضيف المزيج كربونات الصوديوم الحامضية لرفع القيمة حتى وصلت حوالي 7.5.

وضعت المواد في المخمر بتاريخ 2/12/2023 وأغلق المخمر بإحكام وكان متوسط درجة الحرارة في ذلك الوقت 15-18 °C والتسخين كان يتم عن طريق سخانة كهربائية لتأمين الحرارة للمخمر الذي وضع في حجرة مغلقة للحفاظ على درجة حرارة مناسبة للمخمر.

في الأيام السبعة الأولى للتخمر تشكل غاز برائحة كريهة جداً، رائحة البيض الفاسد وهذا مؤشر لتشكيل غاز كبريت الهيدروجين، ولدى اختبار امكانية الاشتعال لم يشتعل الغاز وهذا يدل على ارتفاع نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في المزيج الغازي الناتج، وبعد مرور 10-15 يوم

على التخمر انخفضت الرائحة بشكل واضح وبدأ المزيج الغازي بالاشتعال، واستمر بالاشتعال وبلهب أقوى لغاية مرور 45 يوماً تقريباً على التخمر.

لحساب حجم الهاضم يمكن استخدام العلاقة: $V = HRT * m = 45 * 16 = 640 \text{ L}$
إذن يحتاج الأمر إلى مخمر حجمه 0.64 m^3 ، وخزان لتجميع الغاز الناتج، وخزان لتجميع الفضلات المتبقية (السماد).

درجة الحرارة التي تمت المحافظة عليها بشكل تقريبي بين $30-40 \text{ }^\circ\text{C}$ تمت المحافظة عليها ضمن هذا المجال، لضمان عدم توقف العملية نتيجة موت البكتريا المنتجة للميثان.

لتقدير كفاءة المعالجة في المخمر المصمم تم قياس قيمة COD للخليط قبل وبعد انتهاء التحلل اللاهوائي فكانت كمية الأكسجين المطلوبة لأكسدة المواد العضوية في ليتر من العينة قبل المعالجة $\text{COD}_0 = 36000 \text{ mg/L}$ وبعد انتهاء إنتاج الغاز الحيوي أصبحت $\text{COD}_{45} = 4800 \text{ mg/L}$ = إذن كفاءة المعالجة % 86.7.

يبين الشكل 5-2 مخمر لإنتاج الغاز الحيوي بعد مرور أربعين يوماً على التخمر.

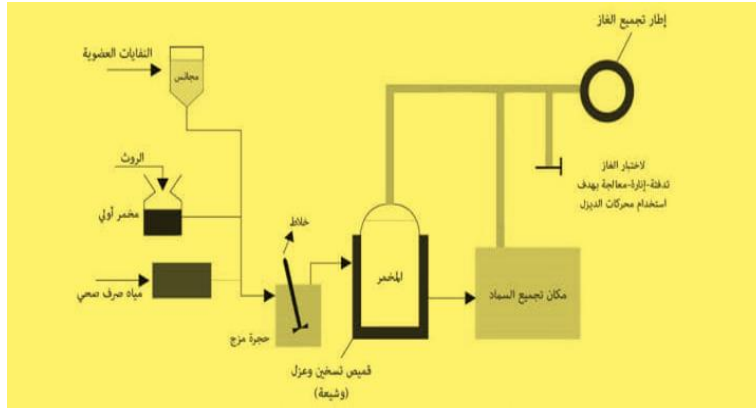


الشكل 5-2 وحدة إنتاج الغاز الحيوي

من خلال البحث تم الوصول إلى النتائج التالية:

- 1- عملية تحويل المخلفات العضوية الضارة إلى وقود نظيف بسيطة وغير مكلفة وصديقة للبيئة.
- 2- يمكن إنتاج الكومبوست (السماد العضوي) الغني بالمواد المغذية للنبات من مركبات آزوتية وفوسفور وبوتاسيوم إلى جانب الغاز الحيوي، وهذا يتعلق بنوع المخلفات المحللة.

- ٣- الوحدات المنتجة للغاز الحيوي يمكن أن تكون ثابتة أو متنقلة، صغيرة أو كبيرة حسب الحاجة.
- ٤- فترة تأقلم البكتريا المحللة لم تتجاوز سبعة أيام، ويمكن اختصارها في فصل الصيف.
- ٥- فترة نمو البكتريا وتكاثرها استمرت حوالي 35 يوماً.
- ٦- بعد حوالي أسبوعين من التجربة بدأ الغاز الحيوي يشتعل بلهب خفيف أزرق، واستمر وأصبح اللهب أقوى بعد مرور حوالي ثلاثون يوماً.
- ٧- يمكن تحويل النفايات الزراعية وغيرها من المخلفات القابلة للتحلل اللاهوائي إلى طاقة يمكن الاستفادة منها بسهولة عوضاً عن حرقها.
- ٨- الاستعاضة عن السماد الكيماوي الضار بالنظم البيئية في حال وصوله إليها، بالسماد الحيوي الناتج عن التخمر اللاهوائي للمخلفات.
- ٩- الاستفادة من مياه الصرف الصحي في تأمين النسبة المطلوبة من المياه للتخمير، وكبداء (مصدر مهم للبكتريا اللاهوائية) لا سيما في مناطق نائية تفتقر لشبكة صرف صحي.
- ١٠- يمكن معالجة الغاز الناتج عن الهضم اللاهوائي للمخلفات العضوية المنزلية بإجراء عملية غسيل للمزيج الغازي الناتج باستخدام سائل امتصاص مناسب.
- ١١- يوصى بتأمين درجة الحرارة اللازمة للتخمير باستخدام (مجمع شمسي بسيط) حيث يسخن الخليط باستخدام مبادل حراري في فصل الشتاء، أما في فصل الصيف فيمكن إجراء العملية عند درجة حرارة الجو الطبيعية.
- ١٢- من خلال هذا البحث تم التوصل إلى اقتراح لتصميم وحدة خاصة متنقلة الهدف منها معالجة المخلفات المنزلية والحيوانية. تتضمن هذه الوحدة عدة مراحل:
المرحلة الأولى: جمع النفايات العضوية، والمخلفات الحيوانية بعد تخميرها بشكل أولي، ومياه الصرف الصحي في حجرة خاصة مزودة بمحرك ميكانيكي أو كهربائي.
المرحلة الثانية: ادخال المزيج المتجانس إلى مفاعل التخمير، ويجب أن يكون بشكل أسطواني، ومزوداً بقميص تسخين ومادة عزل للمحافظة على درجة حرارة شبه ثابتة تقريباً بداخله.
المرحلة الثالثة: هي مرحلة تجميع الغاز الناتج عن التحلل اللاهوائي، وفصل السماد الناتج في خزان خاص.
المرحلة الرابعة: هي مرحلة فصل الغازات الأكاله من المزيج.
يبين الشكل 3-5 مخططاً توضيحياً للوحدة المقترحة.



الشكل 3-5 مخطط تكنولوجي لوحدية إنتاج الغاز الحيوي المقترحة.

الفصل السادس

انتاج الوقود النظيف (الهيدروجين) من النفايات الألمنيومية و

استرجاع معدن الألمنيوم

1-6 المقدمة:

في ظل التطور التقني والصناعي المتسارع تزداد كمية النفايات الصلبة التي يخلفها الإنسان، حتى باتت تشكل عبئاً كبيراً على التوازن البيئي لما تسببه من تلوث وضرر للماء والهواء والتربة، لذلك لا بد من إيجاد طرق مناسبة واقتصادية لمعالجة هذه النفايات والاستفادة منها ودرء خطرهما عبر تحويلها إلى منتجات ذات قيمة مضافة.

تعتبر النفايات الألمنيومية مورداً قيماً لا يتم استثماره بطريقة صحيحة، ويتم توجيهه في كثير من الأحيان إلى مكبات النفايات، حيث لا توجد حلول حقيقية قابلة للتطبيق لاستخدام هذه النفايات الصناعية.

بعد الحرب العالمية الثانية ازدادت بشكل كبير عملية إعادة تدوير النفايات الألمنيومية، ولكن بشكل محدود حتى أواخر عام 1960 عندما انتشرت المشروبات المعبأة في علب من الألمنيوم. لذلك ستم في هذا البحث إدارة هذه النفايات بتفاعلها مع حمض كلور الماء من أجل توليد غاز الهيدروجين النظيف كنتاج رئيسي، إضافة إلى منتج ثانوي ذو قيمة مضافة هو مسحوق الألمنيوم ذو الاستخدامات المهمة والعديدة وذو القيمة الاقتصادية الكبيرة، وفوق ذلك كمية هائلة من الحرارة الناتجة عن التفاعل الناشر للحرارة بشكل كبير، وسيتم تحليل بنية منتجات الأكسدة. الهيدروجين الناتج عن عملية التحويل عديم الأثر البيئي، حيث ينتج عن احتراقه بخار الماء فقط، أضف إلى ذلك إمكانية استرجاع معدن الألمنيوم الثمين على شكل أكسيد الألمنيوم، الذي له استعمالات مهمة كحفاز أو كحامل للحفازات ومادة مازة وغير ذلك.

تأتي أهمية البحث من كون الطريقة قائمة على فرز هذه النفايات وجمعها قبل التخلص منها في المكبات، وبالتالي يعالج مشكلة انفجار الهيدروجين الذي يمكن أن يتشكل نتيجة تفاعلات كيميائية لهذه النفايات الألمنيومية مع العصارة الحمضية المتشكلة في المكب نتيجة تحلل النفايات العضوية المنزلية.

كذلك تمثل الطريقة المقترحة لإعادة تدوير نفايات الألمنيوم حلاً واعداً وفعالاً من حيث التكلفة في الحالات التي ينطوي فيها نقل النفايات إلى مصانع إعادة التدوير على خسائر مالية كبيرة (مثل المناطق النائية).

كذلك تأتي أهمية البحث من القدرة على التعامل مع الكميات الهائلة من النفايات الألمنيومية، والتي تزداد عالمياً بمعدل كبير، نتيجة التزايد الكبير في الاستهلاك العالمي للألمنيوم، حيث تضاعف استهلاك الألمنيوم حوالي 3 مرات من عام 2006 حتى عام 2015 بمقدار بمعدل تزايد 4% في كل عام.

هناك العديد من الأسباب الاقتصادية والبيئية والسياسية وراء الاهتمام بالهيدروجين باعتباره مصدراً للطاقة، إلا أن قضية التغير المناخي هي السبب الرئيس لتبنيه في الوقت الحالي، كونه وقوداً صديقاً للبيئة، خاصةً مع وفرة الطاقة المتجددة التي يمكن استغلالها لتوليد الكهرباء، ومن ثم استخدامها في إنتاج الهيدروجين الذي يعتبر وقود المستقبل.

واستخدم الهيدروجين في وسائل النقل، فقبل اختراع الطائرات النفاثة شاع استخدامه في المناطيد وسفن الهواء في الولايات المتحدة، بصفته غاز رفيع نظراً لارتفاع تكلفة الهيليوم في ذلك الوقت، لكن توقف استخدامه بعد الحريق المروع في المنطاد الألماني، هندنبرغ (Hindenburg)، المملوء بغاز الهيدروجين في مدينة ليكهرست في ولاية نيو جيرسي الأمريكية عام 1937؛ حيث لقي آنذاك 35 شخصاً حتفهم، مما تسبب في حظر استخدامه.

الهيدروجين هو غاز عديم الطعم والرائحة وغير سام، لا ينحل في الماء، سريع الاشتعال، كثافته تقل عن كثافة الهواء بنحو 14 مرة، كعنصر كيميائي هو الأبسط والأخف والأكثر وفرة في الطبيعة، ويشكل نحو 75% من الحجم الكلي للكون، كما أن 90% من الذرات كافة عبارة عن ذرات هيدروجين. (وحدة أبحاث الطاقة، 2022)

الهيدروجين يكون غالباً مرتبطاً مع الغاز الطبيعي في حالته الغازية أو مع الماء والنفط في حالته السائلة؛ لذلك يجب فصله عن العناصر الأخرى بهدف الحصول عليه.

اكتشف الهيدروجين عام 1671 على يد العالم البريطاني روبرت بويل، عندما وضع قطعة من معدن داخل حمض ونتج عن ذلك فقاعات غازية، وسجل "بويل" هذه المشاهدات قبل أكثر من 350 عاماً لكن لم يعرف سبب هذه الفقاعات ولا نوع الغاز الناتج، إلا أن التجارب استكملها العالم البريطاني، هنري كافنديش، بعد قرابة 100 عام وتحديداً عام 1766، حيث جمع الفقاعات الناجمة واستخدمها في الاشتعال، فكانت النتيجة تكثيف بخار الماء، فأطلق عليه وقتها "هيدروجين"، وتعريفه: أنه مادة تتسبب نتيجة الاشتغال في تكوين بخار الماء، اشتقت التسمية من الإغريق حيث أن لفظ هيدرو يعني الماء و جين تعني مكون أو مولد.

وبالنسبة لأنواع الهيدروجين، فقد تم تقسيم الهيدروجين إلى عدة ألوان تبعاً لطريقة إنتاجه، علماً أنه عديم اللون له، لكنها تُستخدم في الصناعة كرموز للتمييز بين أنواع الهيدروجين. عندما يكون الهيدروجين نقياً فإن لهبه لا لون له، أما إذا كان لهبه يميل إلى الزرقة فهذا يدل على وجود عنصر الكبريت فيه، وإذا كان يميل إلى الصفرة فهذا دليل وجود شوائب.

بمرور الوقت وحتى بين البلدان يمكن ان تتغير تعريفات الألوان، وهناك تصنيفاً جديداً من الأمم المتحدة يعتمد على الانبعاثات ويتجاهل الألوان. (وحدة أبحاث الطاقة، 2022)

2-6 مخاطر نفايات الألمنيوم :

نفايات الألمنيوم لا تصنف كمادة خطيرة، لذلك فإنه غالباً ما يتم توجيهها إلى مكب النفايات دون أي معالجة مسبقة، ومع ذلك هناك مخاطر يمكن أن تشكلها هذه النفايات عند تخزينها في مثل هذه البيئات، حيث يمكن أن يظل الألمنيوم خاملاً لسنوات عديدة حتى يتلامس مع مصدر أساسي للمياه (مثل العصارة الحمضية) وبالتالي سيتفاعل الألمنيوم مع هذا السائل بقوة لتوليد جيوب من الهيدروجين المركز في مكب النفايات أو المطامر عند ضغوط عالية، وهذا ما يمكن أن يؤدي إلى احتراق المطامر، وهذا النوع من الحالات يمكن أن يكون مدمراً لأنه في كثير من الأحيان لا يمكن اكتشافه، وقد لا يولد دخاناً مرئياً بسبب طبقات النفايات المترامية. لذلك تتطلب مدافن النفايات التي تستقبل نفايات الألمنيوم ضوابط صارمة لتجنب تراكم مثل هذه الغازات الخطرة.

إضافة إلى ذلك، يعتبر الألمنيوم معدن غير سام بالنسبة للنباتات في حال تواجده بتركيز معينة في التربة، ولكن بسبب ظاهرة الأمطار الحامضية التي تتشكل نتيجة تلوث الهواء بالغازات الكربونية والكبريتية والأزوتية، فإن وجود الألمنيوم في التربة يؤدي في هذه الحالة إلى التفاعل مع هذه الأمطار وتشكيل معقدات صعبة الامتصاص من قبل النباتات وهذا ما يؤدي إلى تراجع إنتاج التربة والتخفيض من خصوبتها.

3-6 أهمية تدوير نفايات الألمنيوم:

أ – الأهمية الاقتصادية: [56] (O A Buryakovskaya. et al, 2017)

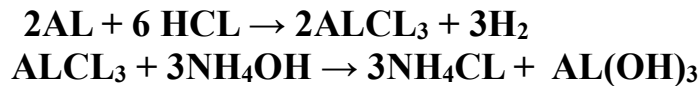
تبلغ الكمية الإجمالية للنفايات البلدية والصناعية المتولدة سنوياً في جميع أنحاء العالم حوالي 4 مليار طن، وتساهم النفايات الصلبة البلدية بحوالي 2 مليار طن ومعدل توليد النفايات يزداد باستمرار. وتحتوي هذه النفايات على نسب مختلفة من المعادن غير الحديدية (والتي تعتبر ذات قيمة صناعية واقتصادية كبيرة) تبلغ نسبة الألمنيوم من هذه المعادن حوالي 60 %، وتأتي نفايات الألمنيوم هذه من مصادر عديدة أبرزها الخردة الإلكترونية وورق الألمنيوم المستعمل في المطابخ وعلب المشروبات وأجزاء من وسائل النقل وغير ذلك. ما يعني أن هناك كميات هائلة من المنتجات المصنوعة من الألمنيوم تتحول إلى نفايات وتشكل مخاطر كبيرة على البيئة، وإذا ما تم استغلالها بصورة صحيحة فإنها تصبح مورد اقتصادي مهم لأسباب عديدة:

١. استرجاع مركبات الألمنيوم غالية الثمن وأهمها أكسيد الألمنيوم الذي يستعمل على نطاق واسع في الصناعة وأهم استعمالاته: (عامل مؤكسد في التفاعلات الكيميائية التي تحدث في درجات حرارة عالية بسبب ثباته العالي، صناعة قطع الأسنان في عيادات الأسنان

- بسبب صلابته العالية، ماص للرطوبة، مقاوم للحرارة لأن نقطة انصهاره عالية، يستعمل كحفاز في عمليات التكسير الحفزي في المصافي النفطية).
٢. توفير تكاليف استخراج معدن الألمنيوم من فلزاته الطبيعية (البوكسيت) حيث أن إعادة تدوير 1 kg من الألمنيوم يحافظ على 8 kg من البوكسيت و 4 kg من المواد الكيميائية و 14 كيلو واط ساعي من الكهرباء. [57] (Noor G. et al, 2019)
٣. الحصول على مصدر رخيص ومتجدد لغاز الهيدروجين الهام في العديد من الصناعات الكيميائية، بالإضافة لإمكانية استعماله كوقود.

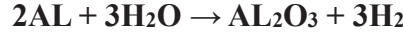
ب – الأهمية البيئية: [58]. (Saleh N. et al, 2021)

١. الحد من الآثار البيئية الناجمة عن استخراج البوكسيت، والمتمثلة بانبعاث الغازات الضارة مثل غاز البيروفلوروكربون وغاز ثنائي أكسيد الكربون.
٢. إنتاج وقود نظيف لا يسبب انبعاثات ضارة بالبيئة.
٣. التخلص من مشكلة تراكم النفايات الألمنيومية وتجنب خطورة ذلك.
- يعتمد مبدأ الطريقة الكيميائية المتبعة على إذابة قطع النفايات الألمنيومية بعد تنظيفها جيداً من الشوائب بحمض كلور الماء المركز، فيتم الحصول على محلول ملح كلور الألمنيوم وينطلق الهيدروجين في تفاعل شديد ناشئ للحرارة، وبعد انتهاء التفاعل يتم استخدام عامل ترسيب مناسب عبارة عن ماءات الأمونيوم، يضاف بكميات محسوبة فيترسب هيدروكسيد الألمنيوم على شكل هلام أو جل الألمنيوم، يرشح على ورق ترشيح عادي ويغسل ويجفف ويرمد عند درجات حرارة مناسبة حسب الشكل الذي يراد الحصول عليه من أكسيد الألمنيوم (ألفا أو بيتا أو غاما) حيث أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الترميد يتم الحصول على أكاسيد ذات بنية بلورية مختلفة. التفاعلات الكيميائية الحاصلة:



يمكن استخدام أحماض أخرى مثل حمض الأزوت وحمض الكبريت للحصول على أملاح الألمنيوم مثل نترات الألمنيوم أو كبريتات الألمنيوم، ولكن لا يفضل استعمال هذه الحموض لأن الأكاسيد الثانوية الناتجة عن التفاعلات مثل ثنائي أكسيد الأزوت وثنائي أكسيد الكبريت سامة وضارة بالبيئة إذا ما تم إطلاقها في الغلاف الجوي، فهي تعتبر السبب الرئيسي لظاهرة الأمطار الحامضية والضباب الدخاني واستنزاف طبقة الأوزون.

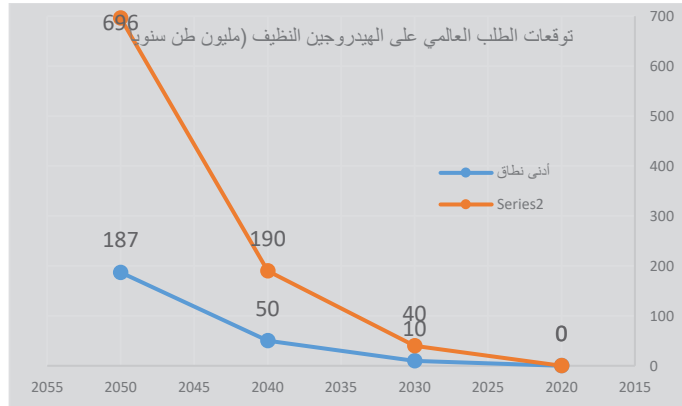
كذلك يمكن استخدام عوامل ترسيب أخرى مثل ماءات الصوديوم. الألمنيوم بسبب وزنه المكافئ المنخفض، لديه إمكانيات كبيرة ليصبح منتجاً فعالاً للهيدروجين بالإضافة إلى قدرته العالية على الأكسدة، والتي تسمح له بالتفاعل مع الماء لإنتاج الهيدروجين والألومينا كما في المعادلة: [56] (O A Buryakovskaya. et al, 2017)



وكما هو الحال مع العديد من المعادن عند تعرضها للهواء فإنه سيخضع للتخميل، ونتيجة ذلك تتكون طبقة خاملة على سطح المعدن. في حالة الألمنيوم سوف يتأكسد لتشكيل طبقة ملتصقة بإحكام من أكسيد الألمنيوم تمنع أي أكسجين إضافي من اختراق الطبقة للوصول إلى الألمنيوم والتفاعل معه. نتيجة لذلك يحدث تخميل للسطح نتيجة تفاعل الألمنيوم مع الماء مما يعيق استمرار التفاعل وبالتالي سينخفض معدل التدفق نتيجة تشكل أكسيد الألمنيوم وتصبح الطريقة غير مجدية لإنتاج الهيدروجين.

علقت آمال بشكل كبير على استخدام الهيدروجين كوقود المستقبل، وتزايدت الأبحاث والدراسات حول هذا الموضوع انطلاقاً من كونه وقود صديق للبيئة، لا يتسبب بانبعاثات ضارة و طاقة إشتعاله ضئيلة تبلغ نحو 7% فقط من طاقة إشتعال الغاز الطبيعي، وأخيراً كونه مصدر طاقة متجدد يمكن الحصول عليه بطرق شتى.

يبين الشكل 1-6 توقعات الطلب العالمي على الهيدروجين النظيف حتى عام 2050 حيث يتوقع أن تصل إلى 700 مليون طن سنوياً. (الطاقة، 2022)



الشكل 1-6- توقعات الطلب العالمي على الهيدروجين النظيف حتى عام 2050

ربما يكون للهيدروجين دور في معالجة إحدى مشكلات المناخ وتقليل تداعيات هذه النفايات عبر استغلالها في إنتاج الهيدروجين النظيف.

يقتصر دور الهيدروجين الرئيس حالياً على استخدامه كمادة خام في العديد من الصناعات، إضافة إلى استخدامه ضمن التجهيزات العلمية وأمامه مستقبل مشرق كونه في اقتصاد عالمي خالٍ من الكربون.

يستخدم الهيدروجين على نطاق محدود كمصدر للوقود، أو حاملاً للطاقة في تطبيقات خلايا الوقود؛ وأيضاً يستخدم بصفته مادة خام في صناعة السماد وبعض المواد الكيميائية والتكرير، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة، مثل صناعة الصلب.

وتستحوذ صناعة الأمونيا وقطاع تكرير النفط على الهيدروجين النقي بنسبة تبلغ % 33 و % 27 على الترتيب من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين، وتشمل التطبيقات الأخرى التي تستهلك الهيدروجين النقي؛ قطاع النقل وبعض الصناعات مثل صناعة الزجاج والإلكترونيات وغيرها؛ ما مجموعه % 4 من إجمالي الطلب العالمي. (وحدة أبحاث الطاقة، 2018).

استخدام الهيدروجين منذ القدم كوقود، بداية من سفن الفضاء، ومروراً بالسيارات والقطارات حتى الطائرات، فضلاً عن استخدامه وقوداً في محطات توليد الكهرباء.

وقود لسفن الفضاء : كانت بداية استخدام الهيدروجين في عام 1958، وذلك بالتزامن مع تأسيس وكالة الفضاء الأميركية ناسا التي اعتمدت على الهيدروجين السائل لتزويد البعثات المرسلة للفضاء. وذلك بسبب كون الهيدروجين السائل يحل مشكلة الوزن؛ لكونه أخف عنصر في الطبيعة، إذ إن وزنه في الغالب يكون 1/3 من وزن أي وقود مكافئ على القيمة الحرارية. **وقود للسيارات :** يسير عدد المركبات العاملة باستخدام خلايا وقود الهيدروجين بشكل مطرد؛ ففي عام 2019 تضاعف الأسطول العالمي لأكثر من 25 ألف سيارة مقارنة بـ 13 ألف مركبة تقريباً عام 2018.

وتحتل الولايات المتحدة الصدارة حول العالم باعتمادها على الهيدروجين كوقود للمركبات، بأسطول يضم 8039 مركبة، تليها الصين (6180 مركبة) ثم كوريا الجنوبية (5083 مركبة) واليابان (3633 مركبة)، بينما على الصعيد العربي تأتي السعودية والإمارات في الصدارة (الإجمالي في البلدين يبلغ 9 مركبات). (وحدة أبحاث الطاقة عن تقرير منظمة أوبك).

وقود للقطارات: شهد عام 2019 تشغيل قطارين يعملان بخلايا الوقود في ألمانيا، بالإضافة للخطط الرامية لتشغيل 14 قطاراً آخر في الدولة نفسها، وتخطط كندا لتطوير أول قطار يعمل بالهيدروجين في أميركا الشمالية، كما أعلنت كل من إسبانيا وفرنسا وإيطاليا والمملكة المتحدة خطاً لإدخال الهيدروجين في قطاع السكك الحديدية.

وقود للطائرات: رغم عدم وصول الهيدروجين لمرحلة التطبيق التجاري على نطاق واسع بصفته وقوداً في قطاع النقل الجوي؛ فإن العديد من الشركات -مثل شركة بوينغ الأميركية-

أبدت اهتماماً بتنفيذ مشروعات تجريبية من أجل استخدامه وقوداً للطائرات؛ بهدف القضاء على الانبعاثات تماماً في هذا القطاع بحلول عام 2050.

وأبرمت مؤخراً شركة كونكت إيرلاينز الأميركية اتفاقية لشراء 75 طائرة تستخدم الهيدروجين الأخضر وقوداً بدلاً من الكيروسين، في مسعى لتسيير رحلات جوية خالية من الانبعاثات الكربونية. ومن المقرر أن تبدأ عمليات التسليم في 2025، مع وجود بند آخر لشراء 25 طائرة إضافية.

وقود لتوليد الكهرباء: يمكن استخدام الهيدروجين وقوداً للتوربينات مباشرة، لكنها تعتمد على استخدام خليط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي. كما يمكن استخدام الأمونيا المنتجة من الهيدروجين في عمليات توليد الكهرباء المشتركة عبر المحطات العاملة بالفحم.

بدأت الشركات المصنعة للتوربينات بتطوير توربينات تعمل على الهيدروجين النقي بنسبة (100 % هيدروجين) ويتوقع أن تدخل هذه العملية التطبيق التجاري بحلول عام 2030.

ومن ضمن تعريفات الهيدروجين أنه حامل أو مخزن للطاقة، ومن ثم فإنه يحل معضلة كبيرة في قطاع الكهرباء، حيث يتم تخزينه بجوار محطات توليد الطاقة المتجددة عند وجود فائض، على أن يعاد استخدامه مرة أخرى في توليد الكهرباء عند انخفاض إنتاج الطاقة النظيفة، فيما يطلق عليه المحطة ذات التوليد المشترك.

يمكن استخدام الهيدروجين بشكل مباشر في محركات الاحتراق الداخلي كوقود، وفي توليد الكهرباء، وفي خلايا الوقود كونه يتفاعل مع الأكسجين، وهو التطبيق الأكثر نجاحاً و شيوعاً حتى هذه اللحظة.

يحظى الهيدروجين باهتمام عالمي حيث ظهرت فكرة الهيدروجين للمساهمة في توسيع قطاع الطاقة المتجددة؛ إذ تعد الطاقة النظيفة (الشمسية أو الرياح) ذات طبيعة متقطعة، لذلك كانت هناك رغبة في إيجاد حل جذري لهذه المعضلة.

لقد قطعت الشبكات الأوروبية شوطاً كبيراً في الطاقة المتجددة؛ فهي أول من عانت مشكلة إنتاج الطاقة من مصادر نظيفة بوتيرة تفوق احتياجات المحلية، والعجز حال انقطاعها، ما دفع المؤسسات البحثية الأوروبية للبحث عن كيفية استغلال هذا الفائض وتخزينه لحين الحاجة، وبسبب محدودية قدرة البطاريات على التخزين، رغم أنها الخيار الأول لذلك، وهي مكلفة، من هنا ظهر الهيدروجين خياراً مناسباً.

من هنا بدأ استغلال فائض الطاقة المتجددة في التحليل الكهربائي للماء في محطات الطاقة المتجددة لإنتاج الهيدروجين وتخزينه، ويمكن استخدام الهيدروجين في توليد الكهرباء حال انقطاع الطاقة المتجددة.

الهدف من ظهور الهيدروجين مساعدة الشبكات الأوروبية، تلا ذلك تنفيذ عدة مشروعات للهيدروجين باعتبارها مشاريع استرشادية للتأكد من القدرة على استغلال الهيدروجين بصفته حاملاً للطاقة وحلاً لطبيعة الطاقة المتجددة المتقطعة، لكن فجأة تحوّل الحديث لأن يكون للهيدروجين نفسه دور كبير في منظومة الطاقة.

على الرغم من أن الهيدروجين ليس وليد اللحظة؛ لكن يمكن القول إن هناك ثلاثة عناصر أساسية تمثل مجتمعة سر الاهتمام بهذا العنصر المتوافر بكثرة في الكون.

الأول: يسهّل استخدام الهيدروجين بشكل موسع عملية اقحام الطاقة المتجددة في العديد من القطاعات؛ كونه يسهم في التوسع بإنتاج الطاقة المتجددة واستغلال الفائض وتعويضه في أوقات الانقطاعات ويوفر حلاً لمشكلة الطاقة النظيفة المتقطعة.

الثاني: يمكن استخدام الهيدروجين كوقود أو كمادة خام بشكل مباشر؛ حيث أن مشكلة الكهرباء (إحلال الكهرباء محل أنواع الطاقة الأخرى)، تكمن في صعوبة التخلص من البصمة الكربونية في بعض القطاعات التي لا يمكن الاعتماد فيها بالكامل على الكهرباء والاستغناء عن بعض أنواع الوقود مثل القطاع الصناعي.

الثالث: تقديم الهيدروجين بصفته وافداً جديداً في أسرة الطاقة ليكون مع الوقود الأحفوري والطاقة المتجددة، ومن ثم تعزيز أمن الطاقة في العديد من الأسواق مما يتيح تنويع مزيج الطاقة في أنحاء العالم كافة.

لطالما وصف الهيدروجين بأنه وقود المستقبل كونه بديلاً للمشتقات النفطية عبر ما يعرف باسم خلايا الوقود، أضف إلى ذلك الدور الذي يمكن أن يؤديه في عملية تحول الطاقة، إلا أن الأمر قد يحتاج مدة زمنية طويلة حتى يتحقق؛ بالنظر إلى التكاليف وغيرها من العقبات الفنية والاقتصادية. يعد توفير الهيدروجين للشركات الصناعية الآن من المهام الرئيسية حول العالم، فقد ازداد الطلب عليه أكثر من 3 أمثال منذ عام 1975، لكن يجب أولاً تجاوز مجموعة من العقبات التي تحد من التوسع في استخدامه بصفته مصدراً للطاقة في المستقبل.

من بين التحديات صعوبة رصد حرائق الهيدروجين بسبب قابليته الكبيرة للاشتعال في الهواء عند تراكيز مختلفة، ما يسبب وهجاً تصعب رؤيته في ضوء النهار.

كما أن للهيدروجين قدرة تفجيرية تصل إلى 2.5 ضعف القدرة التفجيرية لأي وقود أحفوري، تجعل الهيدروجين بحاجة لمعايير أكثر صرامة من جانب الأمن والسلامة.

بحسب تقديرات وكالة الطاقة الدولية الصادرة منتصف عام 2020 تتراوح كلفة إنتاج الهيدروجين من الفحم بين 2.2-1.2 دولاراً لكل كيلوغرام، بينما تصل في حالة الغاز الطبيعي

إلى ما بين 0.9-3.2 دولارا لكل كيلوغرام، أما في حالة استخدام الطاقة المتجددة لتحليل الماء، فتصل لما يتراوح بين 3-7.5 دولارا لكل كيلوغرام.

ويعني ذلك أن الهيدروجين الأخضر، الذي يُنتج باستخدام الطاقة المتجددة لفصل المياه، يكون ذا تكلفة أعلى عدة مرات مقارنة بالنسخة التقليدية المنتجة بالوقود الأحفوري وتكون في الغالب غير صديقة للبيئة ما لم يجر احتجاز الكربون وتخزينه لاستخدامات أخرى.

تراجعت تكلفة التحليل الكهربائي للماء خلال الفترة 2014-2019، بنسبة % 40 بالنسبة لإنتاج الهيدروجين في أوروبا وأمريكا الشمالية، وفقاً لوكالة بلومبرغ نيو إنرجي فاينانس.

وتشير التوقعات إلى زيادة انخفاض تكاليف إنتاج الهيدروجين بطريقة صديقة للبيئة؛ لتصبح معادلة لتكلفة الهيدروجين المُنتج عبر استخدام الوقود الأحفوري، وذلك عام 2040، وإن كانت شركة الاستشارات والأبحاث "وود ماكنزي" تتوقع تحقيق خفض التكاليف ذلك في بعض الدول؛ مثل ألمانيا، في وقت مبكر، وربما بحلول عام 2030.

وبالتزامن مع هبوط تكاليف الطاقة المتجددة؛ فإن تكاليف إنتاج الهيدروجين الأخضر تراجعت بنحو % 40 منذ عام 2015، كما تشير مؤسسة الأبحاث "أي إتش إس ماركت" مع توقعات بانخفاض هذه التكلفة % 40 أخرى حتى حلول عام 2025.

وإذا وصلت نسبة تخفيض تكلفة الهيدروجين الأخضر لنحو % 90 مقارنة بالمستويات الحالية التي تتراوح بين 3-8 دولارات لكل كيلوغرام؛ فإن ذلك سيمثل فرصة جيدة للتنافس مع الهيدروجين الرمادي، الذي تقل تكلفته عن دولار واحد.

ووفق تقديرات مؤسسة ماركت؛ يتوقع تراجع تكاليف الهيدروجين الأخضر دولارين لكل كيلوغرام بحلول عام 2030، لينافس الهيدروجين الذي يُنتج من الغاز الطبيعي مع استخدام تقنية احتجاز الكربون وتخزينه، والذي يعرف أيضاً بالهيدروجين الأزرق.

بالمقابل عالمياً سترتفع تكاليف الهيدروجين الرمادي (باستثناء الصين)-الأقل تكلفة حالياً- بنحو % 82 بحلول عام 2040، نتيجة الزيادة في أسعار الغاز الطبيعي، والتي بدأت بالفعل منذ العام (2021) وسط أزمة الطاقة العالمية.

من المتوقع أيضاً زيادة تكاليف الهيدروجين الأزرق بنسبة % 59 بعد حوالي 20 عاماً، ومجدداً ستكون أسعار الغاز الطبيعي كلمة السر في ارتفاع التكلفة.

وكما يشير تقرير صادر عن مجلس الطاقة العالمي مايو/أيار 2022؛ فمن المرجح تراجع متوسط تكلفة الهيدروجين منخفض الكربون -المُنتج عبر الكهرباء المتجددة- لأقل من دولارين لكل كيلوغرام بدايةً من عام 2040 مقابل 3.5 دولاراً حال إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي مع التقاط الكربون. يبين الشكل 6-2 تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر في ست دول عربية.



الشكل 6-2 تكلفة إنتاج الهيدروجين في ست دول عربية (الطاقة، 2023)

وتعد عمليات نقل الهيدروجين وتوزيعه -وهي المرحلة الوسيطة بين الإنتاج والاستهلاك- بمثابة تحدٍ كبير آخر من الناحية الاقتصادية أمام التوسع في استخدام هذا العنصر الموجود بوفرة في الكون؛ نظراً لارتفاع تكلفة نقله إلى مسافات طويلة، مقارنة بأنواع الوقود الأخرى.

وخلاصة الأمر، أنه بينما يكون الاعتماد على الهيدروجين وحده ذا تكلفة عالية للغاية؛ فإنه يجب استغلاله في سياق التكامل مع سياسة الطاقة المتجددة؛ إذ تبدو المغرب هنا مثلاً للاعتماد على الهيدروجين كخيار؛ نظراً لأنها ليست دولة نفطية لكنها توسعت في الطاقة المتجددة، وتستخدمه باعتباره عنصراً في مزيج الطاقة مع تصدير الفائض.

إن دخول الهيدروجين في مزيج الطاقة، يعني القدرة على إنتاجه وتخزينه ونقله واستخدامه بكميات كبيرة، إلا أن التكلفة مجدداً تبدو التحدي الرئيس في الوقت الراهن، وهي العقبة التي ربما تُحل مستقبلاً كما هو الحال مع الطاقة المتجددة.

تراجعت تكلفة الخلايا الشمسية بأكثر من 80% مقارنة بالتكلفة قبل عقد من الزمن تقريباً، ومن المتوقع أن يسلك الهيدروجين نفس المسلك.

تعتبر طريقة تخزين الهيدروجين على شكل غاز، أحد أكثر التقنيات البسيطة وأكثرها شيوعاً، وتتم داخل صهاريج أو حاويات أو اسطوانات غاز.

وهناك خيارات لنقل الهيدروجين، وهي السفن أو الناقلات، وسط تجارب لنقل الهيدروجين السائل دون ضغط مثل الغاز المسال، ومع ذلك يظل الخيار الأكثر فاعلية والمطروح كذلك على الساحة العالمية حالياً هو عدم نقله في صورته السائلة ولا في صورته الغازية المضغوطة ولكن تحويل الهيدروجين إلى أمونيا.

وأبرز التحديات هنا هو فقدان طاقة تتراوح بين 13-34% عند إعادة تحويل الأمونيا إلى هيدروجين، وتشير بعض التقديرات إلى أن الفقد يتراوح بين 7-8% وعموماً فإن هذا التحدي

يمكن تفاديه عبر الاستخدام المباشر للأمونيا في بعض الصناعات مثل الأسمدة حالياً أو على هيئة وقود في المستقبل.

ويبقى تحدي تخفيض تكاليف تخزين الهيدروجين؛ حيث لا تزال التجارب تجريبية وفي مراحلها الأولى؛ وشهدت مدينة لوليو السويدية افتتاح منشأة تجريبية بعد أن خضعت لاختبار مدته عامان لتخزين الهيدروجين الأخضر تحت الأرض داخل كهف صخري، وهي التجربة الأولى من نوعها، بعدما أثبتت تقنية تخزين الغاز في كهف صخري جنوب السويد منذ قرابة 20 عاماً نجاحها.

وتعمل شركة أرامكو السعودية على تطوير تقنيات تعتمد على استخدام ألياف الكربون وهي مادة رقيقة للغاية أخف من الألمنيوم وأقوى من الفولاذ لاستخدامها في تطبيقات صهاريج لتخزين الهيدروجين.

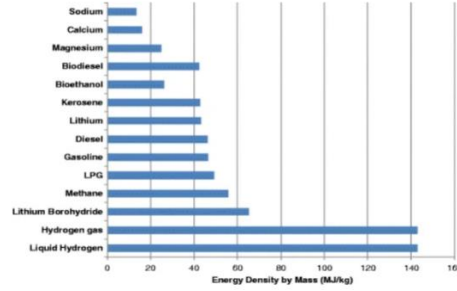
يوجد تقريباً 522 مشروعاً للهيدروجين حول العالم % 50 من هذه المشروعات لإنتاج الهيدروجين الأزرق عبر استخدام الغاز الطبيعي و الأخرى للهيدروجين الأخضر.

منذ زمن بعيد والجميع يدرك أهمية الهيدروجين، لكن لم يكن أمراً ممكناً استخراجه بالطريقة الخضراء؛ نظراً لارتفاع التكاليف؛ لأن كمية الطاقة المستخرجة كانت أقل من كمية الطاقة المستخدمة.

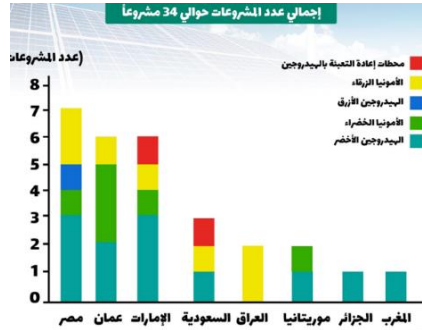
ورغم تعارض المؤيدين للهيدروجين وبين الذين يعتقدون أنها تقنية فاشلة ولا جدوى منها، تلوح في الأفق قضية الاستثمار والتمويل.

عالمياً يتمتع الهيدروجين النظيف (أو الأخضر) بدعم كبير بين القادة السياسيين؛ إذ يعتقدون أنه وسيلة لتخفيض البصمة الكربونية، وتعزيز الوظائف والاستثمار.

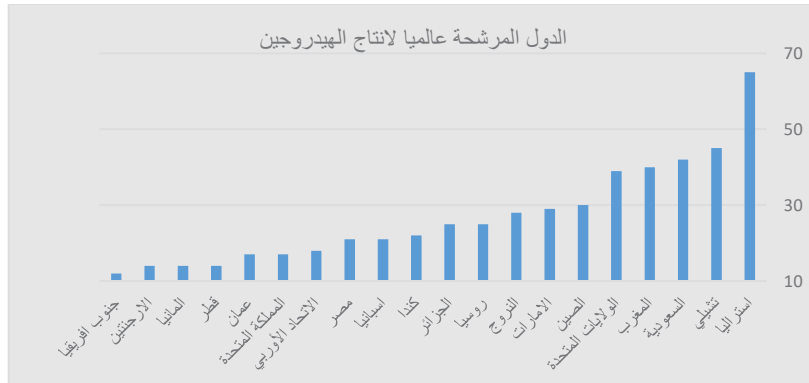
تواجه الدول بسبب تضاعف عدد سكانها طلباً متزايداً على الطاقة ونتيجة لذلك هناك بحث مستمر عن أكثر التقنيات فعالية من حيث الكلفة والتأثير على البيئة، والهيدروجين أحد أهم مصادر الطاقة النظيفة. يبين الشكل 3-6 تغير انتاج الهيدروجين كغاز بديل مقارنة مع أنواع أخرى للوقود ويبدو من الشكل أن النسبة العظمى لكل من الهيدروجين السائل والغازي على حد سواء.



الشكل 6-3: إنتاج الهيدروجين كغاز بديل بالمقارنة مع أنواع الوقود الأخرى



الشكل 6-4: المشروعات المعلنة في الدول العربية في إنتاج الهيدروجين حتى عام 2021. (الطاقة، 2022)
يشير الشكل 6-4 إلى مشاريع إنتاج الهيدروجين في الدول العربية حتى عام 2021 والنسبة العظمى لإنتاج الهيدروجين الأخضر في الإمارات ومصر، والأمونيا الخضراء في عمان، والزرقاء في العراق.



الشكل 6-5: الدول المرشحة عالمياً لإنتاج الهيدروجين (أيرينا 2022، الطاقة 2022)

يبين الشكل 6-5 الدول المرشحة عالمياً لإنتاج الهيدروجين حيث تتصدر أستراليا في إنتاج الهيدروجين و من بين الدول العربية السعودية والمغرب.
يتصف الهيدروجين بالعديد من الإيجابيات :

- الاستدامة، مصدر نظيف للطاقة، غير ضار بصحة الإنسان خلاف الطاقة النووية أو الغاز الطبيعي، يتصف بالكفاءة العالية والقدرة على توفير كميات كبيرة من الطاقة، يسرع الهيدروجين استخدامات الطاقات المتجددة، وهو قابل للمزج مع الغاز الطبيعي.

أما السلبيات:

١. يشكل مع الهواء مزيجاً منفجراً فيحترق بسهولة عند تعرضه للهب أو لحرارة أو شرارة كهربائية ولذلك يعتبر استعماله خطراً.
٢. الهيدروجين أخف من الغاز الطبيعي وأسهل تسرباً من الشقوق ولذلك فإن حصره أصعب، إلا أنه أسهل تيدداً وأسرع انتشاراً.
٣. يغلي الهيدروجين السائل في الدرجة 21 كلفن، ويتطلب تخزينه سائلاً تبريد الوعاء إلى درجة منخفضة من الحرارة، وهذا ينطوي على خطر كبير بسبب صعوبة التعامل مع السوائل شديدة البرودة، كما يتطلب تخزينه سائلاً عزل الوعاء حرارياً مما يزيد من حجم المخزن المطلوب، ويشغل عند خزنه حجماً كبيراً جداً لأن كثافة الهيدروجين السائل تزيد 14 مرة عن كثافة الماء.
٤. قد يخزن الهيدروجين بشكل غازي لكن خزنه يستلزم عندئذ أوعية ثقيلة كبيرة.

4-6- الإجراء التجريبي:

غسلت العبوات الألمنيومية بشكل جيد، بعد ذلك نقعت بحمض الكبريت المركز % 96 ثم غسلت بالماء العادي لإزالة آثار الدهان والورنيش والحمض، كما في الشكل رقم 6-6.



الشكل 6-6 العبوات الألمنيومية بعد إزالة الدهانات بالحمض

يلي مرحلة الغسيل مرحلة التقطيع، حيث تم تقطيع علب الألمنيوم إلى قطع صغيرة بهدف زيادة سطح التماس مع الحمض و زيادة سرعة التفاعل. وضعت القطع الألمنيومية بوزن (6 g) في حوالة مزودة بأنبوب جانبي وموصولة بواسطة أنبوب بلاستيكي إلى موقد لحرق غاز الهيدروجين المنطلق، وسكب حمض كلور الماء المحضر سابقاً (بتركيز % 65 vol) وتم إحكام إغلاق الحوالة. الشكل 6-7 يبين قطع الألمنيوم وقد غمرت بالحمض في حوالة زجاجية ذات مأخذ جانبي.



الشكل 6-7 قطع الألمنيوم و وعاء التفاعل بينها و بين الحمض

بعد انتهاء التفاعل تم ترشيح المحلول الملحي الناتج و تم الحصول على بواقي الترشيح وهي قطع الغلاف البلاستيكي الداخلي المبطن للعلب الألمنيومية، كما في الشكل 6-8.



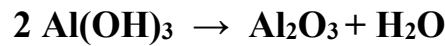
الشكل 6-8 قطع البلاستيك المبطنة لعلب الألمنيوم من الداخل

أضيف إلى الرشاحة السابقة محلول ماءات الأمونيوم المركز (25 %) كعامل ترسيب على دفعات مع التحريك، للحصول على راسب ماءات الألمنيوم على شكل هلام، تم ترشيحه على ورقة ترشيح عديمة الرماد مجففة وموزونة مسبقاً، ثم غسل الراسب بالماء المقطر حتى خلوه من بقايا حمض كلور الماء أو ماءات الألمنيوم . كما في الشكل 6-9.



الشكل 6-9 الراسب الهلامي المتشكل (ماءات الألمنيوم) قبل و بعد الترشيح

جفف الهلام الناتج في فرن تجفيف عند الدرجة 100 °C ووزن الراسب المتبقي بعد التجفيف لترميده بعد وضعه في جفنة بورسلانية عند درجات حرارة مرتفعة 1000°C مدة ساعتين، ثم ترك ليبرد و وزن أكسيد الألمنيوم المتبقي بعد الترميد وفقاً للمعادلة الكيميائية التالية.

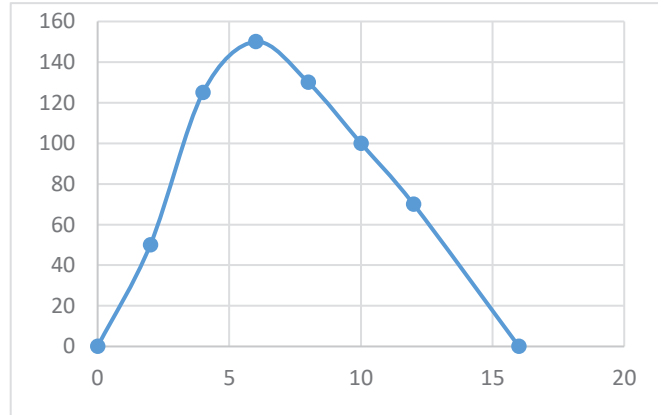


الشكل 6-10 أكسيد الألمنيوم الذي تم الحصول عليه من 6 g نفايات ألمنيومية

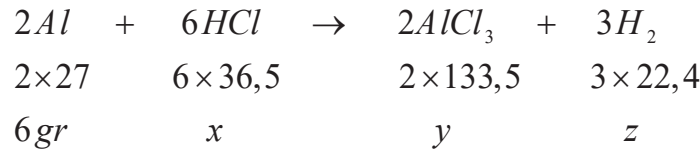
أعطت هذه الدراسة نتائج واعدة للغاية، حيث سمحت بإنتاج الهيدروجين بحجم حوالي 7 L تم حسابها بطريقة الماء المزاح، وقد تم التأكد من تشكل غاز الهيدروجين عن طريق حدوث فرقة لدى تقريب مصدر لشعلة من فوهة الأنبوب البلاستيكي الذي يخرج منه الهيدروجين. إلى جانب الهيدروجين تم الحصول على أكسيد الألمنيوم. والجدول 6-1 يبين معدل إنتاج غاز الهيدروجين الناتج حيث استمر التفاعل حوالي 15 دقيقة. والشكل 6-11 يبين معدل تدفق الهيدروجين مع الزمن.

الجدول 6-1 حساب معدل تدفق الهيدروجين مع الزمن

t (min)	2	4	6	8	10	12	16
V (ml)	100	500	900	1040	1000	840	0
Q (ml/min)	50	125	150	130	100	70	0



الشكل 6-11: معدل تدفق الهيدروجين مع الزمن



$$x = \frac{6 \times 6 \times 36,5}{2 \times 27} = 24,3 \text{ gr} \text{ كمية الحمض النظرية اللازمة للتفاعل}$$

$$y = \frac{6 \times 2 \times 133,5}{2 \times 27} = 29,67 \text{ gr} \text{ كمية ملح كلور الألمنيوم النظرية الناتجة}$$

$$z = \frac{6 \times 2 \times 22,4}{2 \times 27} = 7,46 \text{ L} \text{ حجم غاز الهيدروجين المنطلق نظريا}$$

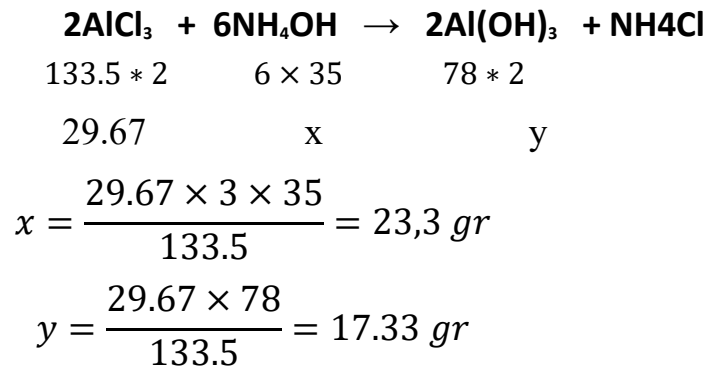
بما أن حمض كلور الماء المستعمل كثافته 1.19 gr / ml و نسبته المئوية الوزنية % 37 فإنه يلزم لتأمين 24.3 gr من الحمض حجماً قدره 55.12 ml تم حسابها على الشكل التالي:

$$0.37 \times 1190 = 440 \text{ g /L}$$

$$X = \frac{24.3 \times 1000}{440.3} = 55.12 \text{ ml}$$

تم حساب الحجم مع افتراض أن التفاعل يتم وفق النسب الستوكيومترية، ولضمان غمر كامل كمية الألمنيوم المتفاعلة تم إضافة الكمية اللازمة للتفاعل مع فائض من الحمض فكان الحجم 65 ml لضمان حدوث التفاعل بشكل كامل ومددت بالماء المقطر حتى 100 ml فأصبح تركيز الحمض المضاف 65 % vol.

لحساب كمية كلور الألمنيوم الناتج عن التفاعل نظرياً وعملياً:
من المعادلة السابقة نجد أن الكمية الناتجة من ملح كلور الألمنيوم هي 29.67 g، يجب مفاعلها مع ماءات الأمونيوم ذو التركيز 25 % حسب المعادلة التالية:



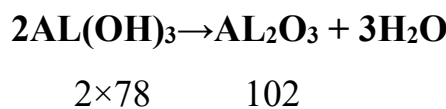
كمية محلول الأمونيا الواجب إضافته 23.33 g، تركيزه 25 % وكثافته 0.88 g/ml لذلك يجب حساب الحجم الواجب إضافته لضمان التفاعل مع ملح كلور الألمنيوم من العلاقة:

$$X = \frac{23.33 \times 1000}{220} = 106 \text{ ml}$$

إذن يجب إضافة حجم مقداره 106 ml من محلول هيدروكسيد الأمونيوم تركيزه 25 % وقد تمت إضافة كمية فائضة من الهيدروكسيد (125 ml)، فتشكل هلام أبيض (هيدروكسيد الألمنيوم) ولكن كان هذا الجل مشوباً بلون وردي فاتح، بسبب الشوائب المعدنية الداخلة في التركيب الكيميائي لعلب النفايات الألمنيومية المستعملة (نقاوة علب الألمنيوم ليست 100 %) وهذا المعدن هو على الأغلب معدن المنغنيز الذي تعطي شوارده اللون الوردي.

تم غسل الجل الناتج بالماء المقطر عدة مرات حتى خلوه من أي أثر للحمض أو الأساس المستعمل وتم التحقق من ذلك باستعمال ورق عباد الشمس.

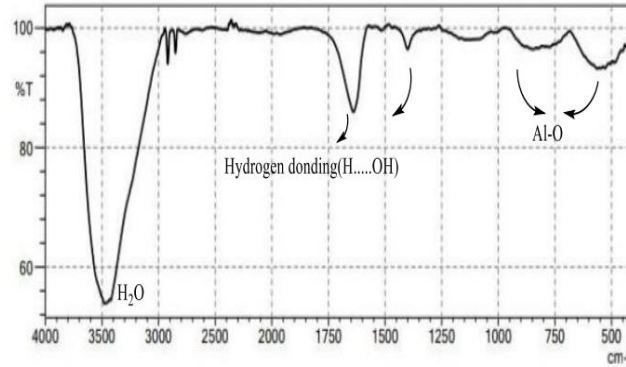
بعدها تم تجفيف العينة عند درجة حرارة المخبر ثم في مجفف عند الدرجة 100°C، ثم أدخلت العينة إلى مرمدة و كلست عند الدرجة 1000°C حتى ثبات الوزن فكان الناتج هو أوكسيد الألمنيوم. تم حساب كمية الأوكسيد الناتج نظرياً من المعادلة التالية:



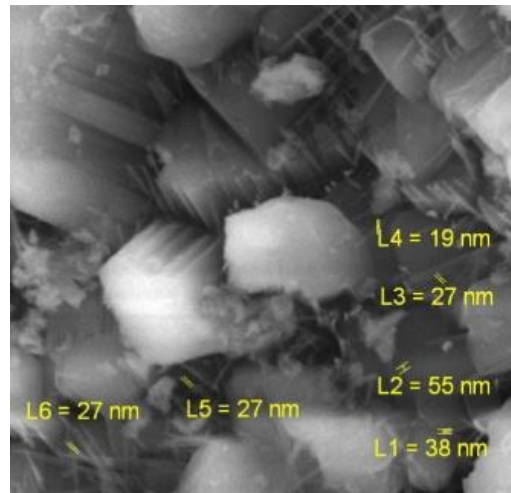
$$17.33 \quad X$$

$$x = \frac{17.33 \times 102}{2 \times 78} = 11.33gr$$

الكمية النظرية هي 11.33 g و لدى وزن أوكسيد الألمنيوم الذي تم الحصول عليه باستخدام ميزان حساس فكان 10 gr تقريباً و بالتالي مردود العملية حوالي % 88. هذا الأوكسيد ليس نقياً % 100 وللتأكد من وجود عناصر معدنية أخرى يجب إجراء تحليل عنصرى لقطع الألمنيوم، لمعرفة البنية البلورية بدقة يجب إجراء تحليل باستخدام الأشعة السينية للأوكسيد الناتج، علماً أنه على الأغلب من النوع ألفا بسبب تكليسه عند درجات حرارة مرتفعة. بجميع الأحوال فإنه منتج ذو قيمة مضافة كبيرة يمكن استعماله لأغراض متعددة. تم تسجيل طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR للألومينا غاما، حيث أظهر الطيف امتصاصاً قوياً عند العدد الموجي 3500 Cm^{-1} عائداً لوجود رطوبة في الألومينا، وامتصاصين عند 1600 Cm^{-1} و 1400 Cm^{-1} نتيجة وجود روابط هيدروجينية -OH، وامتصاصين عريضين عند العددين الموجيين 600 Cm^{-1} و 800 Cm^{-1} لامتطاط الرابطة Al-O.



الشكل 6-12 طيف الأشعة تحت الحمراء لأوكسيد الألمنيوم غاما الناتج بعد الترميد



الشكل 6-13 أوكسيد الألمنيوم غاما كما أظهره المجهر الإلكتروني بأبعاد نانوية

5-6 تصنيع وحدة لانتاج الهيدروجين من النفايات الألمنيومية:

أظهرت النتائج السابقة تفاعل كمية صغيرة من النفايات الألمنيومية مع حمض كلور الماء المركز في حوجلة زجاجية، وكان من الصعب في هذه الحالة تخزين الهيدروجين المنطلق، أو الاستفادة منه باختباره كوقود احتراق، ولتحقيق هذا الهدف ولتجميع كمية كبيرة نسبياً من غاز الهيدروجين، تم تصنيع وحدة مخصصة لمعالجة النفايات الألمنيومية بوجود حمض كلور الماء، مكونة من مفاعلين معدنيين على شكل أسطواني كانا مخصصين لتخزين غاز التبريد (الفريون)، تم تخصيص المفاعل الأول لإجراء تفاعل قطع النفايات الألمنيومية مع الحمض بداخله، والمفاعل الآخر كخزان تبريد وتجميع للهيدروجين المنطلق من المفاعل الأول.

تم إحداث فتحة جانبية مزودة بغطاء محكم في الجانب العلوي الأيمن من المفاعل الأول، وتم وصل هذا المفاعل عبر قضيب نحاسي وعند الفتحة المخصصة لخروج الغاز منه، مع المفاعل الثاني الذي يحتوي الماء حتى منتصفه. تم الوصل مع المفاعل الثاني عبر إحداث فتحة مقابلة في الجانب الأيمن العلوي له بطريقة اللحام، وأحدثت فيه فتحة أخرى في الجانب العلوي الأيسر خصصت لت تركيب مقياس ضغط، ووصل أنبوب نحاسي آخر مزود بصامولة عند الفتحة المخصصة لخروج غاز الهيدروجين من المفاعل الثاني. والشكل التالي 6-14 يبين الجهاز المصنع محلياً والذي تم إجراء التفاعلات ضمنه.



الشكل 6-14 الجهاز المصنع محلياً

ويبين الشكل 6-15 الراسب المتشكل نتيجة إضافة عامل الترسيب (ماءات الأمونيوم) إلى محلول ملح كلور الألمنيوم الناتج عن التفاعل. يظهر الراسب باللون الأبيض وهو لون هيدروكسيد الألمنيوم، ولكن بعد غسله وتجفيفه و ترميده عند الدرجة 1000°C أصبح اللون مائلاً للبني، على خلاف لون الأكسيد الذي حصلنا عليه لدى إجراء التجربة باستخدام حوجلة زجاجية، ونعزو ذلك إلى تفاعل الحمض مع معدن الأسطوانة المستخدمة كمفاعل والتي يدخل في تركيبها معدن الحديد، بالتالي فإن امكانية ذوبان جزء من معدن الحديد في الحمض المضاف أدى إلى تشكل هيدروكسيد الحديد مع الراسب الأساسي المتشكل (هيدروكسيد الألمنيوم)، ولدى إجراء الترميد للهيدروكسيدات المتشكلة تحولت إلى أكسيد الألمنيوم المشوب بأكسيد الحديد والذي تكفي كمية صغيرة منه لتلوين أكسيد الألمنيوم باللون الأحمر المائل للبني.



الشكل 6-15 هيدروكسيد الألمنيوم المشوب و أكسيد الألمنيوم المشوب

نستنتج من البحث ما يلي:

- ١- أن توليد الهيدروجين بهذه الطريقة أنتج كمية هائلة من الحرارة التي انطلقت نتيجة التفاعل الناشر جداً للحرارة.
- ٢- لم يحتاج التفاعل إلى مبادر و لكن كان شديداً منذ اللحظات الأولى للتفاعل.
- ٣- ينبغي الاستفادة من كمية الحرارة المنطلقة في تطبيقات أخرى.
- ٤- ينبغي تركيب قميص تبريد للمفاعل لتخفيض درجة حرارته، و بالتالي تخفيض الضغط المطبق ضمنه، لأن جهاز قياس الضغط أشار إلى توليد ضغط أعلى من الضغط الجوي ضمن المفاعل.
- ٥- كان اشتعال غاز الهيدروجين الناتج سريعاً، و أدى إلى اشتعال عبوة بلاستيكية بسهولة لدى تقريبها من مخرج الغاز بعد اشتعاله.
- ٦- اشتعل الغاز بلهب غير مرئي، و تم كشفه من خلال تقريب العبوة البلاستيكية منه.
- ٧- تم استرداد أكسيد الألمنيوم بكمية تعادل تقريباً كمية رقائق النفايات التي أدخلت للتفاعل، مع انطلاق الناتج المهم جداً و هو غاز الهيدروجين و الذي استعمل كوقود.
- ٨- يوصى بأخذ احتياطات الأمن و السلامة بشكل كبير، لأن التفاعل شديد جداً و أي تسرب للغاز إذا ما لامس شعلة فإنه سيسبب انفجاراً كبيراً و حريقاً قوياً.
- ٩- يوصى بأن يكون تزويد المفاعل بالحمض بعد وضع قطع النفايات الألمنيومية آلياً، بحيث يتم التحكم بكمية الغاز المنطلق بسهولة. حيث تتوقف عملية إنتاج الغاز بمجرد توقف الحمض المقدم، و في ذلك تطبيقاً لإجراءات الأمن و السلامة.

١٠- يوصى باستخدام مفاعل من الستانلس ستيل أو الكروم الذي لا يتأثر بالحمض، و
أن تكون التوصيلات أيضاً من الكروم أو من الستانلس ستيل.

الاستنتاجات والتوصيات:

تعتبر الطاقة المحرك الأساسي للاقتصاد وأحد ركائز التنميته، حيث يقاس تقدم المجتمعات بما تستهلكه وتملكه من طاقة، ولتحسين مستوى معيشة الفرد في المجتمعات لا بد من تحقيق نمو اقتصادي يعتمد على الطاقة بشكل رئيسي، وهذا أدى إلى تزايد الطلب على الطاقة الأحفورية بشكل كبير مما هدد بنضوبها، ولتدارك الأمر كان لا بد من الاستثمار في الطاقات المتجددة والجديدة، بشكل خاص بسبب التهديد الكبير للنظام البيئي العالمي وتدهوره بعد الارتفاع الكبير في درجة حرارة الأرض مقارنة مع ما قبل الثورة الصناعية، نظراً لكون الطاقات المتجددة صديقة للبيئة.

في الوقت نفسه فإن هذه الطاقات المتجددة تؤمن التوازن بين الاحتياجات الحالية من الطاقة، والاحتياجات المستقبلية، وتضمن حق الأجيال القادمة في استغلال الثروات الباطنية من جهة، وفي بيئة نظيفة من جهة ثانية. وبالتالي يتحقق الأمن الطاقوي والأمن البيئي إضافة إلى الأمن الاقتصادي والاجتماعي.

لتحقيق ذلك الهدف سعت الكثير من دول العالم وبالأخص الدول الصناعية الكبرى مثل الصين والولايات المتحدة الأمريكية إلى الاستثمار في الطاقات المتجددة والجديدة، واستغلال و تطوير الطاقات المتجددة المتاحة لديها لتوليد الطاقة الكهربائية، وتقليص استهلاك الوقود الأحفوري، لتحقيق تنمية مستدامة حقيقية تراعي جميع أبعاد التنمية، على الرغم من أن الاحتياطي من الوقود الأحفوري يكفي.

بالنسبة للفرضية الأولى التي مفادها أنه تتوفر مصادر الطاقة المتجددة على إمكانات ضخمة مما يجعل التحول نحو الاعتماد عليها ضرورة حتمية لاحتمية نضوب الطاقات الأحفورية، وهي بذلك بديلاً استراتيجياً يحل محلها. فقد تحققت جزئياً أن استغلال مصادر الطاقة المتجددة في تزايد، إلا أن الطاقات الأحفورية وبالرغم من حتمية نفاذها ستبقى مصدر الطاقة الرئيسي في المستقبل القريب، لذلك لا يمكننا اعتبار أن التحول نحو البدائل الطاقوية المتجددة ضرورة حتمية في الوقت القصير أو المتوسط، و أما بخصوص الفرضية الثانية القائلة بأن الطاقات المتجددة تسهم في تأمين الطاقة وخلق فرص عمل دائمة والقضاء على الفقر وتحقيق عوائد اقتصادية وبيئية على المدى المتوسط والبعيد، فقد تحققت الفرضية حيث أن الطاقات المتجددة من شأنها أن تسهم في رفع كفاءة القطاعات الاقتصادية المختلفة.

تلعب الحكومات دوراً بالغ الأهمية في دعم قطاع الطاقة المتجددة وذلك من خلال وضع سياسات مناسبة وأطر تنظيمية وآليات تحفيزية لتطوير ونشر حلول الطاقة المتجددة.

لضمان نجاح عملية تطوير صناعات الطاقة المتجددة في الدول المنتجة للنفط والغاز، فإن العمل بخطط وآليات مماثلة لتشجيع استخدام مصادر الطاقة المتجددة يعد أمراً ضرورياً من شأنه مساعدة تلك الدول على المنافسة في سوق الطاقة المتجددة وخفض التكاليف وتطوير التقنيات النظيفة.

تبدي دول مجلس التعاون اهتماماً فعلياً بمجال الطاقة المتجددة وذلك لتحقيق مجموعة من الفوائد أهمها توسيع دور مصادر الطاقة المتجددة في تنويع الاقتصاد المحلي ومصادر الدخل، فضلاً عن كونها الحل الفعلي والأمثل للحد من ظاهرة تغير المناخ.

التوصيات:

١. القيام بمشاريع رائدة و كبيرة نوعاً ما وعلى مستوى يفيد البلد كمصدر آخر من الطاقة وتدريب الكوادر العربية عليها بالإضافة إلى عدم تكرارها بل تنويعها في البلدان العربية.
٢. تشجيع التعاون التبادل العلمي مع الدول المتقدمة في هذا المجال والاستفادة من خبراتها من خلال عقد الندوات و اللقاءات الدورية على أن يكون ذلك مبنياً على أساس المساواة و المنفعة المتبادلة.
٣. التوعية العامة وتنمية مهارات الفنيين لتلافي عدم كفاءة الطاقة، ورفع القدرات الإدارية ووضع أساس لنظام معلوماتي.
٤. إشراك القطاع الخاص في تعزيز التنمية الصناعية الإقليمية للطاقة المتجددة.
٥. زيادة استخدام تقنيات الطاقة المتجددة، وزيادة الإنفاق على الأبحاث والتطوير فيها، و زيادة الإستثمار في طاقة الكتلة الحيوية لأنها منخفضة التكاليف وقليلة التلوث للبيئة، والحد من استخدام الطاقة التقليدية بسبب زيادة تلويثها للبيئة،
٦. اجراء دراسات وبحوث معمقة في تقنية التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية و العضوية الأخرى، واستخدام حفازات صلبة غير متجانسة ذات جدوى وكفاءة وانتقائية عالية.
٧. الاستفادة من الكميات الهائلة لزيتون القلي المستعملة عن طريق تحديد مراكز لتجميعها بأسعار مناسبة، لتشجيع المواطنين على بيعها وبالتالي تجنب الآثار الصحية السلبية لها.
٨. تصنيع وحدات متنقلة لتخمير النفايات العضوية تصل إلى المناطق الزراعية النائية .
٩. زراعة أنواع معينة من الأشجار الحراجية التي تنتج زيوت غير غذائية، يمكن استخدامها كمادة خام لتصنيع الديزل الحيوي، وذلك في الأراضي غير الصالحة للزراعات الموسمية نظراً لمقاومة هذه الأنواع الجفاف.

المراجع:

١. نظم الطاقات المتجددة – التكنولوجيا – الحسابات، ترجمة د. بسام حمود، المركز العربي للتعبير والترجمة والتأليف والنشر. جامعة الدول العربية المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم.
٢. د. محمد باكير، محطات توليد الطاقة. منشورات جامعة حمص، 2007.
٣. دور الطاقة المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة في مصر، د. محمد حسين حفني غانم، المجلة العلمية للدراسات والبحوث المالية والتجارية كلية التجارة – جامعة دمياط المجلد الرابع - العدد الثاني – الجزء الرابع - يوليو 2023.
٤. التقرير الخاص بشأن مصادر الطاقة المتجددة و التخفيف من آثار تغير المناخ SRREN، للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC، 2011، 4، 9169-631-92-978-978-92-9169-631-4، Youba Sokona, Ramon Pichs-Madruga, Ottmar Edenhofer.
٥. الاستثمار في الطاقات المتجددة كخيار استراتيجي لتحقيق التنمية المستدامة. المركز الجامعي عبد الحفيظ بو الصوف مبللة، معهد العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم التسيير. 2019.
٦. الطاقة المتجددة و دورها في تحقيق التنمية المستدامة لدول مجلس التعاون الخليجي (GCC)، المؤتمر القطري السابع للتنمية و البيئة في الوطن العربي، د. عدنان فرحان الجوارين، جامعة البصرة، 2013.
٧. واقع الطاقة المتجددة و آفاقها في تحقيق التنمية المستدامة في الجزائر خلال الأعوام 2015-2030. نوال بو عالق، مجلة الحكمة للدراسات الاقتصادية، الجزائر، ديسمبر، 2016، ISSN, 2353-0480.
٨. تقييم عملية فسم الرابطة OH القوية و الضعيفة و بوجود محفز بالإثارة الليزرية لتأمين الطاقة الهيدروجينية، جامعة دمشق، المعهد العالي لبحوث الليزر و تطبيقاته، وسام نزيه عبد القادر، 2014.
٩. مبادئ الطاقات المتجددة، المعهد التقني/الحويجة، وحدة بحوث الطاقات المتجددة، د. عمر خليل أحمد الجبوري، د. أحمد حسن أحمد الجبوري، 2010.
١٠. Union of Concerned Scientists, 2014.
١١. Paul Scherrer institute, "Data for Nuclear accidents Modified to Reflect Unsear Findings/ Recommendation 2012 and NRC Soarca Study", 2015.
١٢. دور وأهمية الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة، كلية العلوم الاقتصادية و علوم التسيير، بو عشير مريم، خالد بوجعدار، 2011. الجزائر جامعة منتوري قسنطينة.
١٣. World Economic Outlook (WEO), 2004.
١٤. الطاقة المتجددة التشريعات و السياسات في المنطقة العربية، اللجنة الاقتصادية و الاجتماعية لغربي آسيا. الأمم المتحدة- الاسكوا ESCWA -2019.
١٥. تقرير ايرينا International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Energy and Jobs, Annual Review 2016.
١٦. تعزيز الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة لتحقيق أقصى قدر من الأثر الاقتصادي والاجتماعي-حالة الأسر في الأردن، ديانا العتامنة، دينا الحيارى. Euro-mesco، العدد 56، 2023.
١٧. SEIA, 2022.

١٨. الطاقة، 2022
١٩. طاقة الرياح-العنفات الريحية، الدكتور فريد سليم أبو حامد، المركز العربي للتعبير والترجمة والتأليف والنشر.
٢٠. وحدة أبحاث الطاقة، سنوات مختلفة.
٢١. كتاب الطاقة البديلة، مصادرها واستخداماتها. د. سمير سعدون مصطفى-د. بلال عبدالله ناصر-محمود خضر سلمان، 2018.
٢٢. الوقود الحيوي، الآفاق والمخاطر والفرص. د. موسى الفياض، م. عبير أبو رمان. المركز الوطني للبحث والإرشاد الزراعي. المملكة الأردنية الهاشمية، 2009.
٢٣. تقرير الوقود الحيوي المتجدد، إعداد فيصل عبدالله الزنكوي. مراجعة هشام محمد جحيل- مدير إدارة الاقتصاد الكلي والسياسة المالية. د. خالد بسام الحمود مستشار صندوق النقد الدولي (IMF) بالإدارة.
٢٤. Biodiesel CO₂ emissions: A comparison with the main fuels in the Brazilian market. Christian, R., C., João, Andrade de C., Jr., José, L. S., 90 (2009) 204 – FUEL PROCESSING TECHNOLOGY 211.
٢٥. Advanced Chemical Reactor Technologies for Biodiesel Production from Vegetable Oils., Luqman, B., Istadi, I., Purwanto, P., A Review Department Of Chemical Engineering, Indonesia 2016.
٢٦. Stratras Advisors, A Hart Energy Company. Global Biofuels Outlook to 2025. Paul Niznik. Biomass Research and Development Board, Technical Advisory Commihes, May 20, 2015.
٢٧. Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system. Chen, K.S., Lin, Y.C., Hsu, K.H., Wang, H.K., Energy, 2012; 38(1): 151-156.
٢٨. UFOP. Biodiesel 2014/2015: Report on the current situation and prospects, Berlin, 2016.
٢٩. Influence of reaction conditions and type of alcohol on biodiesel yields and process economics of supercritical transesterification. Micic, R.D., Tomić, M.D., Kiss, F.E., Nikolić-Djorić, E.B., Simikić, M. Energy Convers Manag, 2014; 86: 717-726.
٣٠. An Overview of Biodiesel Life Cycles. A Joint Study Sponsored by: U.S. Department of Agriculture and U.S. Department of Energy. May 1998.
٣١. Biodiesel SNI 7182:2015 System Information Standard Nasional Indonesia.
٣٢. دور الاقتصاد الدائري في إدارة النفايات البلاستيكية، التقرير الصادر عن مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية، KAPSARC، واطلعت عليه وحدة أبحاث الطاقة 2024.

- Pyrolysis of polyolefin plastic waste and potential applications in asphalt road construction. Abdy C., Zhang Y., Wang J., Yang Y., Artamendi I., Allen B., 2022: A technical review. Resources, Conservation and Recycling 180, 106213.
- Potential health risk of endocrine disruptors in construction sector and plastics industry: Fucic, A., Galea, K. S., Duca, R. C., El Yamani, M., Frery, N., Godderis, L., & Moshammer, H. (2018). a new paradigm in occupational health. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(6), 1229.
- Plastic waste conversion to fuel" a review on pyrolysis process and influence of operating parameters". Murthy, Krishna, Rahul J. Shetty, and Kumar Shiva, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (2020): 1-21.
- Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: Nanda, Sonil, and Franco Berruti. a review." Environmental Chemistry Letters 19.1 (2021): 123-148.
- Damodharan, D., et al. "Utilization of waste plastic oil in diesel engines: a review." Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 18.4 (2019): 681-697.
- Onwudili, Jude A., Nagi Insura, and Paul T. Williams. "Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 86.2 (2009): 293-303.
- Williams, Paul T. "Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: A review." Waste and Biomass Valorization 12.1 (2021): 1-28.
- Recycling of consumer dry cell batteries, David J. Hurd, David M. Muchnick, Michael P. Schedler, and Tom Mele, Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, (1993), 276 pp. [ISBN No.: 0-8155-1325-9].
٤١. دور الاقتصاد الدائري في إدارة النفايات البلاستيكية، التقرير الصادر عن مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية، KAPSARC، واطلعت عليه وحدة أبحاث الطاقة 2024.
٤٢. الإدارة المتكاملة للنفايات لتعزيز الاستدامة البيئية، دراسة حالة شركة بيئة، الباحث خلوفي سفيان، جامعة العربي التبسي، الجزائر، April 2022.
- Adeniran, A. A., & Shakantu, W. (2022). The Health and Environmental Impact of Plastic Waste Disposal in South African Townships: A Review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(2), 779.

- Baran, B. (2020). Plastic waste as a challenge for sustainable development and circularity in the European Union. *Ekonomia i Prawo. Economics and Law*, 19(1): 7–20. doi:10.12775/EiP.2020.001. .٤٤
٤٥. متطلبات التحول من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري لحماية البيئة، منصة المجالات العلمية الجزائرية، *La Revue des Sciences Commerciales* Volume 17, N. , P. 25-38, 2018. .٤٦
٤٦. تقنيات متقدمة لتدوير مخلفات البلاستيك، تقرير صادر عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة (يونيب) ، 2024. .٤٧
- Europe Plastic Waste Pyrolysis Oil Market Analysis, 2024. .٤٨
- Moses Jeremiah Barasa Kabeyi and Oludolapo Akanni Olanrewaju. Review and Design Overview of Plastic Waste-to-Pyrolysis Oil Conversion with Implications on the Energy Transition. *Journal of Energy* Volume 2023, Article ID 1821129, 25 pages. .٤٩
- Sadegh Papari, Hanieh Bamdad and Franco Berruti, Pyrolytic Conversion of Plastic Waste to Value-Added Products and Fuels: A Review. 2021. .٥٠
- Irene Fahim , Omar Mohsen and Dina ElKayaly, Production of Fuel from Plastic Waste: A Feasible Business. 2021. .٥١
٥١. الأمين، عادل علي صالح محمد. تصميم و تنفيذ مفاعل محسن لإنتاج الغاز الحيوي وأمثلة عناصر التفاعل. رسالة دكتوراه، كلية الهندسة الزراعية، جامعة دمشق، 2006. .٥٢
٥٢. فاسم، عبد الوهاب شلبي. الطاقة من الكتل الحيوية. منشورات كلية الزراعة، جامعة الاسكندرية، دار الإيمان للطباعة، ٢٠٠٨. .٥٣
٥٣. نوو، سيف الدين. رؤية جديدة للاستفادة من المخلفات الزراعية. ندوة الهندسة الزراعية في الاستفادة من المخلفات الزراعية والمحافظة على البيئة. مجلة الهندسة الزراعية المصرية، عدد خاص 2002. .٥٤
٥٤. عريشة منال، مدخلات ومخرجات الهاضم الحيوي والعوامل المؤثرة على التحلل اللاهوائي، 2009. .٥٥
٥٥. تقرير سوق محطات الغاز الحيوي، 2024. Source: <https://www.mordorintelligence.com/ar/industry-reports/biogas-plant-market>. .٥٦
- O A Buryakovskaya, E A Meshkov, M S Vlaskin, E I Shkolnikov and A Z Zhuk, Utilization of Aluminum Waste with Hydrogen and Heat Generation, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 250 (2017) 012007. .٥٧
- Noor A. Ghulam, Mohammed N. Abbas, Dawood E. Sachit, Preparing of Alumina from Aluminum Waste. *International Journal of Innovative Science and Research Technology* ISSN No:-2456-2165. Volume 4, Issue 3, March – 2019. .٥٨
- Saleh N. Al-Busafi and Yahya A. Al-Shafouri, Green Preparation of Aluminum-based Metal Organic Framework (Al-MOF) from Waste Plastic Bottles and Waste Aluminum Scraps, *SQU Journal for Science*, 2021, 26(2), 98-106, Sultan Qaboos University.

المخلص:

- من خلال البحث تم:
- تحديد الشروط المثلى لانتاج الديزل الحيوي بأسترة نفايات الزيوت النباتية.
- تصنيع مفاعل للتحلل الحراري للنفايات البلاستيكية وتحديد الشروط المثلى لذلك.
- تصنيع مفاعل هضم لاهوائي للنفايات المنزلية العضوية والحيوانية وحساب كفاءة العملية.
- تصنيع وحدة معالجة خاصة لتحويل النفايات الألمنيومية إلى غاز الهيدروجين.

تناول انتاج الديزل الحيوي من الكتلة الحيوية استخدام نفايات زيوت الطبخ في انتاج الديزل الحيوي بالأسترة التحويلية، ودراسة ميزات ومساوئ استخدامه كوقود مقارنة مع الديزل البترولي، والانبعثات الناتجة عن ذلك. كما تضمن الفصل الثالث طريقة تحضير الحفازات غير المتجانسة المستخدمة.

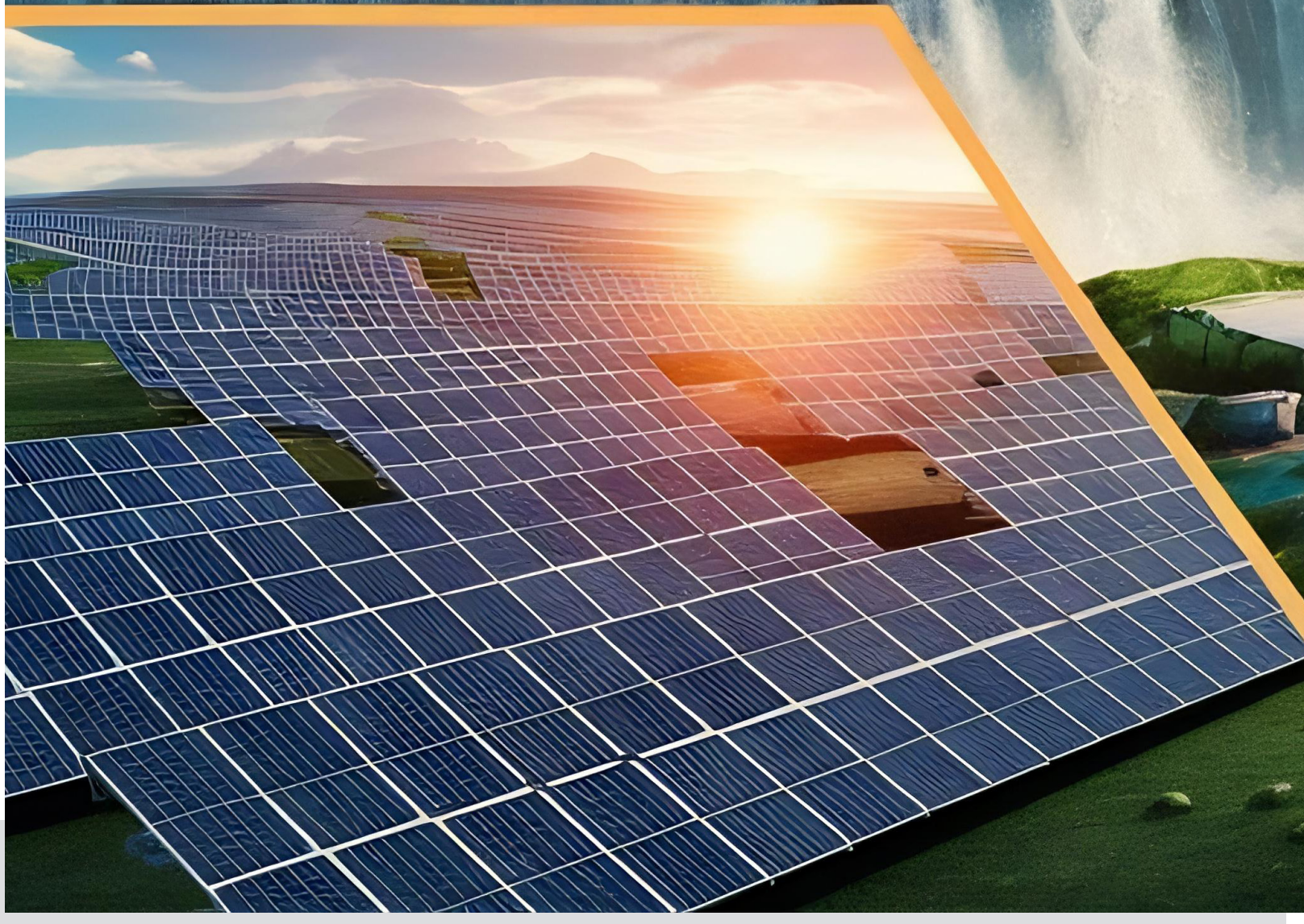
ثم درس انتاج الوقود من التحلل الحراري الوسيط للنفايات البلاستيكية، وكميات وحجوم النفايات البلاستيكية على مستوى العالم، ومصادرها و أضرارها على البيئة و طرق ادارتها. مخبرياً تم تصنيع مفاعل للتحلل الحراري للنفايات البلاستيكية، تبين تشكل مزيج من نواتج التحلل الحراري القابلة للاشتعال، ومزيج صلب من الأكاسيد المعدنية المسترجعة على شكل مسحوق أبيض مائل للاصفرار. تم تحليل النواتج المختلفة باستخدام طرق تحليلية عالية الانجاز تبين أن تركيبها مشابه للتركيب الكيميائي للوقود النفطي. تضمن الفصل طريقة تحضير الحفاز غير المتجانس وحساب معدل تدفق الغاز الناتج، ومعدل التسخين في المفاعل باختلاف نوع المادة الخام المتحللة.

في الفصل الخامس تم تصميم مفاعل مخبري لتخمير نفايات عضوية وحيوانية، وبموجب ذلك تم الحصول على غاز حيوي قابل للاشتعال، وسماد عضوي. تم انتاج الهيدروجين النظيف بأكسدة نفايات الألمنيوم باستخدام حمض كلور الماء، واسترجاع أكسيد الألمنيوم بكفاءة عالية، وتم إجراء التجارب في النموذج المخبري والآخر التجريبي.

بالنتيجة:

- تنامي استخدام الديزل الحيوي في قطاع النقل،
- تطابقت المواصفات القياسية للديزل الحيوي المنتج من نفايات زيوت المطبخ مع المواصفات القياسية العالمية للديزل الحيوي المستخدم كوقود.

- لدى إجراء التحليل باستخدام جهاز التحليل الحراري التفاضلي للشموع تبين انهيار كامل للشموع عند درجات حرارة أقل من 200 درجة مئوية.
- ازداد معدل التسخين في مفاعل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية لدى استخدام حفاز غير متجانس، وازداد بشكل أكبر لدى إجراء تحلل حراري للمطاط مقارنة مع البولي ايتلن تيرفتالات، ويفسر ذلك بسهولة تسهيل المطاط مقارنة مع بولي ايتلن تيرفتالات.
- إن عملية تحويل المخلفات العضوية المنزلية والحيوانية الضارة إلى وقود نظيف وسماد عضوي هي عملية بسيطة وغير مكلفة وصديقة للبيئة، ويمكن أن تكون الوحدات متنقلة أو ثابتة، كما يمكن تحويل المخلفات الزراعية عوضاً عن حرقها.
- الاستفادة من مياه الصرف الصحي في تأمين النسبة المطلوبة من المياه للتخمير، وكبداء (مصدر مهم للبكتريا اللاهوائية) لا سيما في مناطق نائية تفتقر لشبكة الصرف الصحي.
- يوصى بتأمين درجة الحرارة اللازمة للتخمير باستخدام (مجمع شمسي بسيط) حيث يسخن الخليط باستخدام مبادل حراري في فصل الشتاء، أما في فصل الصيف فيمكن إجراء العملية عند درجة حرارة الجو الطبيعية.
- يوصي البحث باستخدام محفزات صلبة غير متجانسة في تفاعلات الأسترة التحويلية للحصول على الديزل الحيوي، وقد لعبت هذه الحفازات دوراً مهماً في الحصول على حجم أكبر من الوقود البلاستيكي السائل وبنقاوة أعلى في مفاعل التحلل الحراري للنفايات البلاستيكية.
- يوصي البحث بتطوير بنية تحتية مناسبة لنشر تطبيقات الطاقة المتجددة، وجذب الاستثمارات وتشجيع مشاريع الطاقة المتجددة الصغيرة والمتوسطة على المستوى المحلي، ودعم البحث والتطوير ربطاً بالقدرات الصناعية الوطنية.
- يوصي البحث بالاستفادة من الطاقة الحرارية الكبيرة الناتجة عن تفاعل النفايات الألمنيومية مع حمض كلور الماء، والاستفادة من الغاز الناتج كوقود نظيف يملك طاقة حرارية مشابهة للوقود الأحفوري، بدون أن يكون له تأثيرات سلبية على البيئة، وكذلك الاستفادة من أكسيد الألمنيوم الناتج كحفاز في عمليات إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة أو في عمليات إنتاج الوقود البلاستيكي بالتحلل الحراري الحفزي للنفايات البلاستيكية.
- الاستثمار الأخضر في جميع أنواع النفايات (زيوت الطبخ، النفايات البلاستيكية، النفايات العضوية المنزلية والحيوانية، النفايات الألمنيومية).



تقارير

متابعة فصلية حول مستجدات الطاقات الجديدة والمتجددة
وقضايا تحولات الطاقة

* ماجد إبراهيم عامر *



المحور الأول

التطورات في قطاع الطاقات المتجددة

المحور الأول: التطورات في الطاقات المتجددة

شهدت مصادر الطاقات المتجددة اهتماماً متنامياً على المستوى العالمي في السنوات الأخيرة، مدفوعة بالحاجة الملحة لمواجهة التغير المناخي. وتشمل هذه المصادر الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والطاقة المائية، والكتلة الحيوية، وغيرها. وتعد هذه المصادر عنصراً محورياً في جهود التحول نحو مستقبل منخفض الكربون. ومع التقدم التكنولوجي وتراجع تكاليف الإنتاج، أصبحت الطاقات المتجددة خياراً استراتيجياً للعديد من الدول لتأمين احتياجاتها من الطاقة، وتعزيز أمنها الطاقوي، ودعم نموها الاقتصادي المستدام. وتشير التوقعات إلى أن حصة الطاقة المتجددة من الميزج العالمي للطاقة ستستمر في الارتفاع بشكل كبير خلال العقود المقبلة، لا سيما مع تعهدات مؤتمر الأطراف "COP28" بزيادة القدرات العالمية المركبة للطاقة المتجددة بمقدار ثلاث مرات بحلول عام 2030.

■ النمو المتسارع في الطاقات المتجددة

واصل قطاع الطاقات المتجددة أدائه القوي خلال الربع الرابع من عام 2025 وبدرجات متفاوتة على المستوى العالمي. وفي هذا السياق، استمرت الصين في ريادتها العالمية للتوسع السريع في مصادر الطاقة المتجددة، ليصل إجمالي قدرتها المركبة من الطاقة المتجددة إلى نحو 3.89 تيراواط بحلول نهاية شهر ديسمبر 2025، أي بزيادة قدرها 16.1% على أساس سنوي. وقد استحوذت الطاقة الشمسية على الحصة الأكبر من هذا التوسع، حيث ارتفعت قدرتها المركبة بنحو 315 جيجاواط، وهو مستوى قياسي جديد، لتصل إلى 1.2 تيراواط، مسجلة ارتفاعاً ملحوظاً نسبته 35.4% مقارنة بالعام السابق. هذا وقد ارتفعت تركيبات الطاقة الشمسية في الصين في شهر أكتوبر 2025 بنحو 12.6 جيجاواط، وفقاً لبيانات إدارة الطاقة الوطنية الصينية التي أظهرت ارتفاع تلك التركيبات لتتجاوز 40 جيجاواط في شهر ديسمبر، وهو مستوى يُضاهي التركيبات السنوية للعديد من أسواق الطاقة الشمسية الكهروضوئية الرئيسية، ويعزى ذلك إلى توجه المطورين للانتهاج من المشروعات قبل نهاية العام، فضلاً عن إصدار وثيقة تعزيز التنمية واسعة النطاق للطاقة الشمسية المركزة. أما فيما يخص طاقة الرياح، فقد تجاوزت قدرتها المركبة في الصين مستوى 0.6 تيراواط في شهر نوفمبر 2025، أي ما يمثل 46% من الإجمالي العالمي، تزامناً مع التوجه إلى إضافة 120 جيجاواط من القدرة الإنتاجية الجديدة سنوياً، منها 15 جيجاواط من مشروعات طاقة الرياح البحرية.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ارتفعت القدرات المضافة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في شهر نوفمبر إلى ثاني أعلى مستوى لها خلال عام 2025، حيث استحوذ المصدران على نحو 93% من إجمالي الطاقة المضافة الجديدة، مع استمرار هيمنة الطاقة الشمسية التي شكلت وحدها حوالي 72% من الإضافات منذ بداية العام، وفقاً لبيانات لجنة تنظيم الطاقة الفيدرالية الأمريكية التي أظهرت تشغيل 38 مشروع للطاقة الشمسية خلال شهر نوفمبر بقدرة بلغت حوالي 2879 ميغاواط، من ضمنها 13 مشروع بقدرة 100 ميغاواط أو أكثر، بما في ذلك مشروع "Parliament" بقدرة 484.6 ميغاواط، ومشروع "Stampede" بقدرة 256.3 ميغاواط، وكلاهما في ولاية "Texas". ووصل عدد الوحدات المضافة من الطاقة الشمسية واسعة النطاق في الفترة (يناير - نوفمبر 2025) نحو 690 وحدة بقدرة إجمالية تبلغ 25.5 جيجاواط، وهو مستوى يقل قليلاً عن نفس الفترة من عام 2024، لكنه يؤكد استمرار الطاقة الشمسية في قيادة توسع القدرات المضافة. وفي السياق ذاته، واصلت الطاقة الشمسية على نطاق المرافق العامة كونها المصدر الأسرع نمواً لقدرة توليد الكهرباء، مع توقع ارتفاعها من 290 مليار كيلوواط/ساعة في عام 2025 لتصل إلى نحو 424 مليار كيلوواط/ساعة بحلول عام 2027. ومن المقرر تشغيل نحو 70 جيجاواط من مشروعات توليد الطاقة الشمسية الجديدة في عامي 2026 و2027، وهو ما يمثل ارتفاع بنسبة 49% في قدرة الطاقة الشمسية العاملة في الولايات المتحدة مقارنة بنهاية عام 2025. أما فيما يخص طاقة الرياح، فقد ارتفعت قدرتها المضافة بنحو 818 ميغاواط في شهر نوفمبر، أي ما يعادل 20.6% من إجمالي القدرات المضافة، وهي ثاني أعلى زيادة شهرية لطاقة الرياح في عام 2025، بدعم من الأحكام القضائية الأخيرة التي ألغت أو خففت القيود على إنشاء مزارع الرياح البحرية.

وفي أوروبا، تسارعت وتيرة نمو قطاع الطاقات المتجددة خلال الربع الرابع من عام 2025. فعلى سبيل المثال، تم انجاز بناء محطات طاقة رياح وطاقة شمسية جديدة في إيطاليا بقدرة تصل إلى 200 ميغاواط تقريباً خلال الأشهر العشرة الأولى من عام 2025، مع إطلاق برنامج لإضافة أكثر من 500 ميغاواط من قدرة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الجديدة في عام 2026. وفي ألمانيا، ارتفعت القدرة المركبة لتوليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة بنحو 21 جيجاواط أو بنسبة 11% على أساس سنوي، لتصل إلى نحو 210 جيجاواط في نهاية عام 2025، وكانت الطاقة الشمسية هي

المحرك الرئيسي لهذا النمو بإضافة نحو 16.4 جيجاواط، فيما أضافت طاقة الرياح البرية حوالي 4.6 جيجاواط لتبلغ قدرتها الإجمالية حوالي 68.1 جيجاواط، بينما بلغت طاقة الرياح البحرية نحو 9.5 جيجاواط بعد زيادة قدرها 0.3 جيجاواط بدعم من تشغيل بعض المشروعات مثل مزرعة الرياح البحرية "Borkum Riffgrund" التي بدأت في تزويد الشبكة الألمانية بالطاقة في ديسمبر 2025 بقدرة مركبة تبلغ حوالي 913 ميغاواط. وسجلت بريطانيا رقماً قياسياً في توليد الطاقة من الرياح بلغ نحو 23.8 جيجاواط في أوائل شهر ديسمبر 2025، ووصل إنتاج الطاقة المتجددة إلى أكثر من 127 تيراواط/ساعة، مسجلاً أعلى مستوى له على الإطلاق، مع مساهمة مصادر الطاقة المتجددة في إنتاج نسبة قياسية بلغت 44% من إجمالي الكهرباء خلال عام 2025.

وارتفع توليد الطاقة الشمسية في الهند خلال الربع الرابع 2025 بنسبة 8% مقارنة بالربع السابق، ليصل إلى نحو 41.2 تيراواط/ساعة، وهو مستوى مرتفع بنسبة 20.4% على أساس سنوي. ويُعزى هذا النمو إلى توسع تركيبات الطاقة الشمسية مدفوعاً بتشغيل عدد من المشروعات المتأخرة منذ عامي 2021 و2022، تزامناً مع إنهاء القيود الشاملة المفروضة على تطوير مشروعات الطاقة المتجددة في المناطق ذات الأولوية، الذي ساهم في تسريع وتيرة التنفيذ، من خلال توفير وضوح تنظيمي سمح باستئناف أعمال الإنشاء وربط المشروعات بشبكات نقل الكهرباء. أما على الجانب السلبي، فقد برزت تحديات دمج الطاقة الشمسية في الشبكة بشكل أوضح في الربع الرابع 2025، حيث سجلت الولايات الهندية ذات معدلات الإنتاج المرتفعة من الطاقة المتجددة، مستويات تقليص تتراوح بين 10% إلى 30% بسبب عدم توفر شبكات النقل. وبشكل عام، بلغت القدرة المركبة للطاقة المتجددة في الهند خلال الربع الرابع 2025 - بما في ذلك مشروعات الطاقة الكهرومائية حوالي 258.3 جيجاواط، أي ما يمثل نحو 50.2% من إجمالي القدرة المركبة لتوليد الكهرباء.

وواصلت العديد من الدول العربية سياساتها نحو دعم الطاقات المتجددة استناداً إلى نهج تنويع الاقتصاد، وضمان تحقيق أمن الإمدادات، وخفض الانبعاثات، وتعزيز كفاءة استخدام الموارد. فعلى سبيل المثال لا الحصر، أعلنت المملكة العربية السعودية في شهر أكتوبر 2025، عن توقيع خمسة مشروعات جديدة ضمن المرحلة السادسة من البرنامج الوطني للطاقة المتجددة، بإجمالي سعة يبلغ 4500 ميغاواط، واستثمارات تتجاوز قيمتها نحو 2.4 مليار دولار، وتضم تلك المشروعات:

مشروع "الوادمي" لطاقة الرياح بسعة تصل إلى 1500 ميغاواط، وتكلفة إنتاجية هي الأقل لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح عالمياً. ومشروع "نجران" للطاقة الشمسية بسعة تبلغ 1400 ميغاواط، وتكلفة إنتاجية تُعد هي ثاني أقل مستوى قياسي في تكلفة إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية عالمياً، بعد مشروع "الشعيبة 1" في المملكة أيضاً. فضلاً عن مشروع "الدرب" للطاقة الشمسية بسعة تبلغ 600 ميغاواط، ومشروع "صامطة" للطاقة الشمسية بسعة تبلغ 600 ميغاواط، ومشروع "السفن" للطاقة الشمسية بسعة تبلغ 400 ميغاواط. كما وقعت المملكة العربية السعودية في أكتوبر 2025، عقوداً مع شركة "PowerChina" وشركة "Energy China" لتنفيذ مشروع "عفيف 1" و"عفيف 2" للطاقة الشمسية الكهروضوئية ومشروع طاقة الرياح بإجمالي 7 جيجاواط، وبقيمة تزيد عن نحو 4.2 مليار دولار. كما وقع تحالف تابع لشركة هندسة الطاقة الصينية "Energy China" ثلاثة عقود مع مشروع سعودي يضم شركة "أكوا باور"، وشركة "أرامكو"، وصندوق الاستثمارات العامة، بقيمة إجمالية تبلغ حوالي 2.75 مليار دولار، تشمل تطوير مشروع "خليص" للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة تصل إلى 2 جيجاواط، ومشروع طاقة رياح بقدرة مركبة تبلغ 3 جيجاواط. وفي شهر نوفمبر 2025، دخلت محطة "وادي الدواسر" للطاقة الشمسية الكهروضوئية حيز التشغيل التجاري بقدرة 112 ميغاواط. كما تم إنجاز الإغلاق المالي بقيمة 8.2 مليار دولار، لتطوير خمس محطات للطاقة الشمسية الكهروضوئية، تشمل: محطة "بيشة" بقدرة 3 جيجاواط ومحطة "هميج" بقدرة 3 جيجاواط، ومحطة "خليص" بقدرة 2 جيجاواط، ومحطة "عفيف 1" بقدرة 2 جيجاواط، ومحطة "عفيف 2" بقدرة 2 جيجاواط. فضلاً عن محطتين لطاقة الرياح، وهما: محطة "ستارة" بقدرة 2 جيجاواط، ومحطة شقراء بقدرة 1 جيجاواط. وفي شهر ديسمبر 2025، أعلنت شركة "أكوا باور" وشركة "بابكو إنرجيز" عن توقيع اتفاقية تطوير مشترك لتطوير محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة إنتاجية متوقعة تصل إلى نحو 2.8 جيجاواط على عدة مراحل، مدعومة بتقنية تخزين الطاقة في المنطقة الشرقية من المملكة العربية السعودية وتصديرها إلى مملكة البحرين. كما تم تدشين أكبر نظام لتخزين الطاقة في البطاريات بقدرة 7.8 جيجاواط/ساعة بالشبكة الكهربائية، مما يمثل إنجازاً كبيراً في تطوير الطاقة المتجددة في منطقة الشرق الأوسط.

وفي دولة الإمارات العربية المتحدة، تم ترسية عقد مشروع محطة "الخنزة" للطاقة الشمسية على شركة "مصدر" الإماراتية وشركة "إنجي" الفرنسية في شهر أكتوبر 2025، بقدرة تبلغ حوالي 1.5 جيجاواط، حيث يتوقع أن تزود نحو 160 ألف منزل بالكهرباء، وتحد من انبعاثات 2.4 مليون طن متري من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، من خلال 3 مليون لوح شمسي مزود بخاصية تتبع مسار الشمس طوال ساعات النهار، ما يعزز القدرة الإنتاجية. كما تم وضع حجر الأساس لتطوير أول وأكبر مشروع من نوعه على مستوى العالم، يوفر طاقة حمل أساسي متجددة وعلى نطاق واسع وبتكلفة منافسة عالمياً، يضم محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة 5.2 جيجاواط مزودة بنظام بطاريات لتخزين الطاقة بسعة 19 جيجاواط/ساعة، مما سيوفر 1 جيجاواط من طاقة الحمل الأساسي المتجددة، وتفادي إطلاق نحو 5.7 ملايين طن من الانبعاثات الكربونية سنوياً، ومن المتوقع أن يدخل المشروع حيز التشغيل في عام 2027. وقامت مصدر الإماراتية في شهر نوفمبر 2025 بتوقيع اتفاقية إستراتيجية مع مجموعة "موانئ أبو ظبي" لتطوير حلول متقدمة في قطاع طاقة الرياح البحرية. وفي ديسمبر 2025، أعلنت شركة "أبو ظبي الوطنية للطاقة"، وشركة "مياه وكهرباء الإمارات"، عن إنجاز صفقة باستثمارات تبلغ 3.6 مليار درهم لتمويل مشروع محطة "الظفرة" لتوليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة بقدرة 1 جيجاواط، بهدف توفير الطاقة الكهربائية لمشروعات مراكز البيانات، بما يعزز تنفيذ الإستراتيجية الوطنية لدولة الإمارات للذكاء الاصطناعي لعام 2031.

وفي دولة الكويت، تم البدء في تنفيذ دراسة الجدوى الميدانية للمرحلتين الثالثة والرابعة من مشروع "الشقايا" للطاقة المتجددة خلال شهر أكتوبر 2025، الذي شهد أيضاً الإعلان عن تأهيل 9 تحالفات عالمية لمشروع "الدببة" لتوليد الطاقة الكهربائية، ومشروع الشقايا للطاقة المتجددة (المرحلة الثالثة - المنطقة الثانية) لإنتاج 500 ميغاواط. وفي شهر نوفمبر 2025 تم فتح باب استقبال العطاءات المشاركة، مع تحديد الموعد النهائي في السادس عشر من فبراير 2026، ويتوقع أن يستفيد المشروع من اتفاقية شراء الطاقة مع وزارة الكهرباء والماء والطاقة المتجددة بصفتها المشتري لمدة 30 عاماً. تجدر الإشارة إلى أنه في إطار السعي لتعزيز الطاقة النظيفة في المباني الحكومية، تُلزم دولة الكويت تلك المباني بتوفير الاشتراطات المطلوبة للحصول على التيار الكهربائي، ومن بينها إنتاج ما لا يقل عن 10% من الحمل الأقصى للطاقة الكهربائية للمبنى بواسطة الطاقة المتجددة.

وفي جمهورية مصر العربية، تم توقيع خطابات النوايا بشأن تمويل مشروع "دندرة" للطاقة الشمسية في شهر أكتوبر 2025، لتأمين جزء كبير من احتياجات مجمع شركة "مصر للألومنيوم"، ما يخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بنسبة تصل إلى 30%، ليصبح أول مشروع صناعي واسع النطاق لإزالة الكربون في المنطقة، ويأتي هذا المشروع ضمن المنصة الوطنية لبرنامج «نُوفي» التي تستهدف زيادة قدرات الطاقة المتجددة بنحو 10 جيجاوات بحلول عام 2028. وتم توقيع اتفاقيتين لاستكمال مشروع طاقة شمسية بقدرة إجمالية تبلغ 1.2 جيجاواط في شهر نوفمبر 2025، إضافة إلى محطات لتخزين الكهرباء بسعة 720 ميغاواط/ساعة، ويشمل المشروع إنشاء محطة طاقة شمسية بقدرة 200 ميغاواط في "منطقة بنبان" بمخطط الوصول للتشغيل التجاري في الربع الثالث 2026، مدعومة بوحدة تخزين كهربائي باستخدام البطاريات بسعة 120 ميغاواط/ساعة، فضلاً عن محطة أخرى للطاقة الشمسية في منطقة غرب المنيا بقدرة 1000 ميغاواط وسعة تخزين تبلغ 600 ميغاواط/ساعة بمخطط الوصول للتشغيل التجاري في الربع الثالث من عام 2027. كما تم توقيع اتفاقية لإنشاء محطة لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية بقدرة 20 ميغاواط، إلى جانب محطة لتخزين الطاقة الكهربائية بتقنية البطاريات بسعة 30 ميغاواط/ساعة في الغردقة، لإنتاج نحو 48 ألف ميغاواط/ساعة سنوياً، مما يسهم في خفض الانبعاثات الكربونية بنحو 26.4 ألف طن سنوياً. وفي ديسمبر 2025، أعلنت مؤسسة التمويل الدولية عن شراكة مع شركة "AMEA Power" لتنفيذ مشروع "أبيدوس 2" في أسوان، وهو محطة طاقة شمسية بقدرة 1000 ميغاواط مزودة بنظام تخزين بطاريات بسعة تبلغ نحو 600 ميغاواط/ساعة، وسيوفر المشروع أكثر من 3 مليون ميغاواط/ساعة سنوياً من الكهرباء النظيفة، ويسهم في خفض الانبعاثات الكربونية بنحو 1.6 مليون طن سنوياً، ويتوقع بدء التشغيل التجاري في شهر يونيو 2026. كما تشير التقديرات الرسمية إلى وصول إجمالي قدرات الطاقة المتجددة في مصر بنهاية عام 2025 إلى نحو 8866 ميغاواط من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية، إلى جانب 300 ميغاواط/ساعة من قدرات بطاريات التخزين.

وفي دولة ليبيا، تم تدشين مشروع استراتيجي لتعزيز الأمن المائي في شهر أكتوبر 2025، يتضمن إنشاء وتشغيل 9 محطات طاقة شمسية مخصصة لأبار مياه الشرب، مما يضمن استمرارية الإمدادات حتى في أوقات انقطاع التيار الكهربائي. وفي شهر نوفمبر 2025، تم إطلاق البرنامج

الوطني للطاقات المتجددة وكفاءة الطاقة للفترة (2025 - 2040)، كما تم الاتفاق مع شركة "جيسيرت" التركية على تنفيذ مشروعات للطاقة المتجددة في ليبيا، من خلال إعداد الدراسات الفنية اللازمة، تمهيداً للدخول في مرحلة التنفيذ. كما أطلق جهاز الطاقات المتجددة المسار التشريعي الأول لتنظيم قطاع الطاقات المتجددة في ليبيا في شهر ديسمبر 2025.

وفي الجمهورية العراقية، تم الإعلان عن إنشاء مصنع متكامل لإنتاج الألواح الشمسية في شهر أكتوبر 2025 بطاقة إنتاجية تبلغ 750 ميغاواط سنوياً، ويأتي ذلك بالتزامن مع الكشف عن خطة طموحة تهدف إلى إنتاج 12 ألف ميغاواط من الطاقة المتجددة لإضافتها إلى شبكة الكهرباء الوطنية بحلول عام 2030، حيث تستهدف المرحلة الحالية من الخطة رفع القدرة الإنتاجية إلى ما بين 3500 إلى 7000 ميغاواط. وفي نوفمبر 2025، تم الإعلان عن قرب بدء الموعد التشغيلي للمرحلة الأولى من محطة "شمس البصرة" بقدرة 250 ميغاواط، من إجمالي قدرة تصميمية تصل إلى 1 جيجاواط.

وفي الجمهورية الجزائرية، تم الإعلان في شهر أكتوبر 2025 عن التقدم الملموس في وتيرة إنجاز محطتي "الغروس" و"تندلة" التي تبلغ قدرة كل منهما 200 ميغاواط، وتُعد المحطتان جزء من مشروع ضخم لإنتاج 3200 ميغاواط من الطاقة الشمسية، يشتمل على إنشاء 22 محطة كهروضوئية تتراوح قدرتها بين 80 إلى 220 ميغاواط. هذا وقد سجلت الواردات من الألواح الشمسية من الصين قفزة قياسية خلال شهر نوفمبر 2025، حيث ارتفعت إلى نحو 450 ميغاواط وهو أعلى مستوى لها على الإطلاق، بزيادة بلغت نسبتها نحو 70% على أساس شهري.

وفي مملكة البحرين، تم البدء في إنشاء أكبر محطة طاقة شمسية على الأسطح في موقع واحد على مستوى العالم في نوفمبر 2025 بسعة تبلغ 50 ميغاواط، من خلال تركيب 77 ألف لوح شمسي، ضمن مشروع يبلغ إجماليه 123 ميغاواط من الطاقة الشمسية. كما تم وضع حجر الأساس لمحطة "الدور" لإنتاج الكهرباء بالطاقة الشمسية المخطط أن تصل سعتها إلى نحو 100 ميغاواط بحلول الربع الثالث من عام 2026، فضلاً عن تدشين مشروع لتوليد الطاقة الشمسية داخل جامعة البحرين بسعة إجمالية 46.2 ميغاواط.

وفي دولة قطر، بلغت القدرة المركبة من الطاقة الشمسية 1675 ميغاواط في نهاية 2025، وينتظر أن تشهد تلك القدرة ارتفاعاً ملحوظاً خلال الأعوام القادمة، بدعم من محطة "دخان" للطاقة

الشمسية، وهي واحدة من أكبر المحطات في العالم، المقرر بنائها على مرحلتين ليصل إجمالي قدرتها الإنتاجية إلى 2000 ميغاواط بحلول منتصف عام 2029، وذلك في إطار السعي لتحقيق أحد أهداف استراتيجية قطر للطاقة للاستدامة، وهو توليد أكثر من 4 آلاف ميغاواط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030. ومن المتوقع أن تسهم تلك المحطة إلى جانب محطات الطاقة الشمسية الأخرى في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 4.7 مليون طن سنوياً، وتساهم بنسبة تصل إلى 30% من إجمالي الطلب على الكهرباء في دولة قطر خلال أوقات الذروة، وستبدأ محطة دخان مرحلة الإنتاج الأولى بنهاية عام 2028 بتوليد 1000 ميغاواط من الطاقة مستخدمة نظام تتبع الأشعة الشمسية، وستعزز كفاءتها من خلال تركيب محولات قادرة على العمل بكفاءة عالية في بيئة ذات درجات حرارة عالية. وتستهدف دولة قطر الاعتماد على الطاقة الشمسية بنسبة 30% قبل حلول عام 2030.

وفي الجمهورية العربية السورية، وقعت المؤسسة العامة لنقل وتوزيع الكهرباء مذكرات تفاهم مع شركتين سعوديتين في أكتوبر 2025، تتضمن تنفيذ مشروعات طاقة شمسية وطاقة رياح بقدرة إجمالية تبلغ 500 ميغاواط. كما تم توقيع اتفاقية مع شركة "STE" السورية - التركية لشراء 100 ميغاواط من الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية لتغطية النقص في الإمدادات. وفي شهر نوفمبر 2025، تم افتتاح 3 مشروعات جديدة للطاقة الشمسية بقدرة تصل إلى 15 ميغاواط.

■ أفاق الطاقات المتجددة: تضاعف القدرات والتحديات

لا يزال النمو العالمي في قطاع الطاقة المتجددة قوياً، مدفوعاً بشكل رئيسي بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، رغم تزايد التحديات التي تواجه هذا القطاع على المستوى العالمي. وفي هذا السياق، من المتوقع أن تتضاعف القدرة العالمية للطاقة المتجددة بنحو 4600 جيجاوات حتى عام 2030، وهو ما يعادل تقريباً إضافة قدرة توليد الطاقة في الصين والاتحاد الأوروبي واليابان مجتمعة إلى مزيج الطاقة العالمي. وتشكل الطاقة الشمسية الكهروضوئية الجزء الأكبر من هذه الزيادة، بما يقارب 80% من إجمالي النمو المتوقع، تليها طاقة الرياح، والطاقة الكهرومائية، والطاقة الحيوية، والطاقة الحرارية الأرضية. كما يتوقع أن تشهد أكثر من 80% من دول العالم نمواً أسرع في قدرات الطاقة المتجددة خلال الفترة (2025 - 2030) مقارنة بالفترة الخمسية السابقة، رغم وجود تحديات مستمرة تتعلق بتكامل الشبكات، وهشاشة سلاسل الإمداد، واحتياجات التمويل.

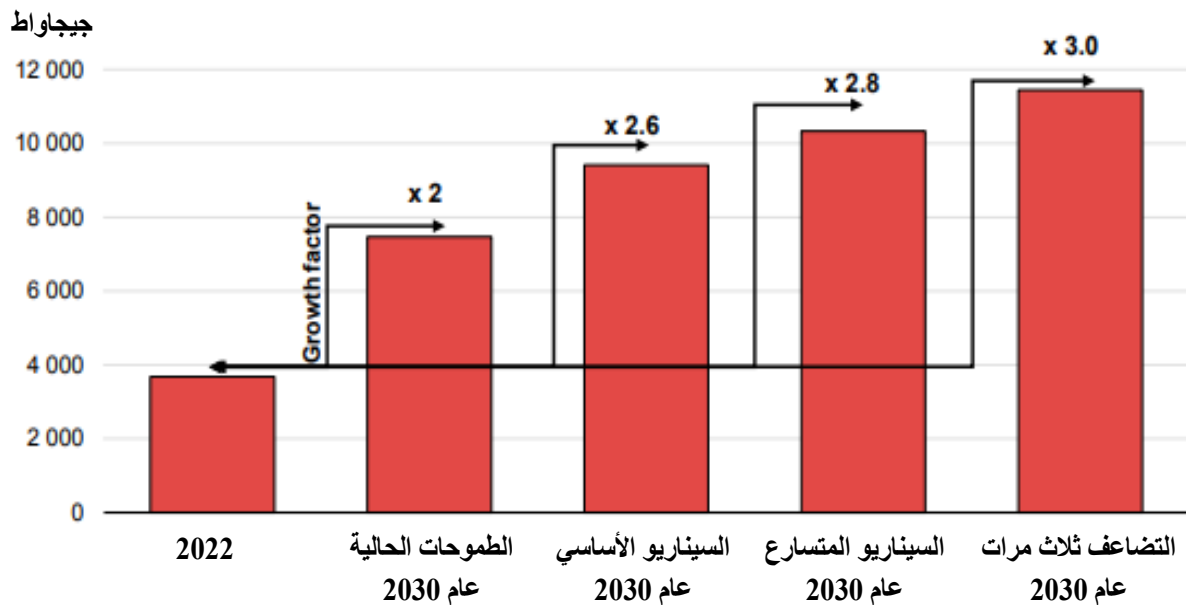
ومن المتوقع أن تتضاعف القدرة المركبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية بما يزيد عن الضعفين خلال الأعوام الخمسة المقبلة، مما يجعلها المحرك الأساسي للنمو العالمي في الطاقة المتجددة، بدعم رئيسي من انخفاض التكاليف وسرعة الحصول على التراخيص والقبول المجتمعي الكبير. أما طاقة الرياح، فتواجه تحديات في سلاسل الإمداد، وارتفاعاً في التكاليف، وتأخيرات في إجراءات الحصول على التراخيص، غير أن التوقعات تشير إلى أن القدرة العالمية من طاقة الرياح ستتضاعف تقريباً لتتجاوز مستوى 2000 جيجاوات بحلول عام 2030، حيث سيتم مواجهة هذه التحديات عبر سياسات وإجراءات داعمة في الاقتصادات الكبرى - لا سيما في الصين ودول الاتحاد الأوروبي. وفيما يخص الطاقة الكهرومائية، فمن المتوقع أن تمثل نحو 3% فقط من إضافات الطاقة المتجددة حتى عام 2030. كما يتوقع أن تصل الإضافات السنوية للطاقة الحرارية الأرضية في عام 2030 إلى مستويات قياسية، تبلغ نحو ثلاثة أضعاف الزيادة المحققة في عام 2024، بدعم من نمو المشروعات في الولايات المتحدة الأمريكية واندونيسيا واليابان وتركيا وكينيا والفلبين.

هذا وقد تم تعديل توقعات نمو القدرة العالمية للطاقة المتجددة بالخفض بنسبة 5% انعكاساً لتغير السياسات واللوائح في بعض الأسواق الرئيسية منذ شهر أكتوبر 2024. وفي هذا السياق، تم تعديل التوقعات بالخفض في الولايات المتحدة بنسبة تقارب 50%، على خلفية الإلغاء المبكر للإعفاءات الضريبية الفيدرالية، وفرض قيود جديدة على الواردات، وتعليق تأجير مزارع الرياح البحرية الجديدة، وتقييد إصدار تراخيص مشروعات طاقة الرياح البرية والطاقة الشمسية الكهروضوئية على الأراضي الفيدرالية. وفي الصين، يؤثر التحول من التعريفات الثابتة إلى المزادات سلباً على المشروعات التي قد تصبح أقل ربحية أو حتى غير مجدية اقتصادياً، ومن ثم يُقلل من توقعات نمو القدرة المركبة. ومع ذلك، لا تزال الصين تستحوذ على ما يقرب من 60% من نمو القدرة العالمية للطاقة المتجددة، وهي تسير على الطريق الصحيح لتحقيق هدفها المعلن لعام 2035 في مجال طاقة الرياح والطاقة الشمسية، قبل خمس أعوام من الموعد المحدد.

أما بالنسبة للأسواق الأخرى، فتبدو آفاق الطاقة المتجددة أكثر إيجابية، لا سيما في الهند وأوروبا ومعظم الاقتصادات الناشئة والنامية. حيث يعزى توسع الطاقة المتجددة في الهند إلى زيادة حجم المزادات، والدعم الجديد لمشروعات الطاقة الشمسية على أسطح المباني، وتسريع إجراءات منح

تراخيص مشروعات الطاقة الكهرومائية، بما يتيح للهند تحقيق أهدافها لعام 2030، لتصبح ثاني أكبر سوق نمو للطاقة المتجددة بعد الصين، مع توقع بمضاعفة القدرة الإنتاجية بمقدار 2.5 مرة خلال خمسة أعوام. وفي الاتحاد الأوروبي، تم تعديل توقعات النمو بالزيادة الطفيفة نتيجة لتركيبات الطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق العامة، تزامناً مع النشاط القوي لاتفاقيات شراء الطاقة للشركات في ألمانيا وإسبانيا وإيطاليا وبولندا، مما يعوض ضعف النمو المتوقع لطاقة الرياح البحرية. كما تم تعديل توقعات نمو الطاقة المتجددة في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا بالزيادة بنسبة 25%، وهي أكبر زيادة إقليمية، نتيجة النمو الملحوظ للطاقة الشمسية الكهروضوئية في المملكة العربية السعودية. وفي جنوب شرق آسيا، يتسارع نشر الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، مدفوعاً بأهداف أكثر طموحاً ومزادات جديدة.

وعلى وقع تلك المعطيات، يتوقع نمو القدرة العالمية للطاقة المتجددة بحلول عام 2030 بمقدار 2.6 ضعف مستواها المسجل في عام 2022، إلا أنها ستظل أقل من التعهد المُعلن عنه في مؤتمر الأطراف الثامن والعشرون "COP28" الذي عُقد في دولة الإمارات العربية المتحدة في نوفمبر 2023 بمضاعفة هذه القدرة ثلاث مرات. هذا ولا يزال بالإمكان تحقيق ذلك الهدف بشرط تبني الدول سياسات مُحسنة لسد الفجوات بين الطموح والتنفيذ، بما في ذلك خفض فترة إصدار التراخيص، وزيادة الاستثمار في البنية التحتية للشبكة، وتخفيف مخاطر التمويل، كما يوضح الشكل التالي:



المصدر: IRENA Renewables 2025, Analysis and forecasts to 2030.

ومن المتوقع أن تظل سلاسل إمداد الطاقة الشمسية الكهروضوئية والعناصر الأرضية النادرة المستخدمة في صناعة توربينات الرياح شديدة التركيز في الصين، مما يبرز مخاطر أمن سلاسل الإمداد العالمية. هذا وقد أدى فائض الطاقة الإنتاجية، وانخفاض الأسعار، والحواجز التجارية، والتغيرات التنظيمية إلى تباطؤ الاستثمارات الجديدة في سلاسل توريد الطاقة الشمسية الكهروضوئية داخل الصين، في حين تتوسع القدرة التصنيعية خارجها. ومع ذلك، سيظل تركيز سلاسل الإمداد لقطاعات الإنتاج الرئيسية في الصين أعلى من 90% في عام 2030، وهو نفس المستوى الحالي تقريباً، حيث تهيمن الصين على تعدين نسبة 60% وتكرير نسبة 90% من العناصر الأرضية النادرة المستخدمة في صناعة توربينات الرياح الكبيرة البرية والبحرية، فضلاً عن استحواذها على حوالي 90% من إنتاج المغناطيسات الأرضية النادرة.

كما يتوقع أن ترتفع حصة مصادر الطاقة المتجددة من الطلب على الطاقة في قطاع النقل لتصل إلى نحو 6% في عام 2030 مقارنة بحصة تبلغ نحو 4% في الوقت الحالي، ويُعزى ما يقرب من نصف هذا النمو إلى استخدام الكهرباء المنتجة من الطاقة المتجددة لتشغيل المركبات الكهربائية، ويتركز النمو بشكل رئيسي في الصين وأوروبا. أما الوقود الحيوي السائل فيشكل الجزء الأكبر من النسبة المتبقية، ويتركز النمو في البرازيل، تليها أوروبا وإندونيسيا والهند وكندا. كما يتوقع أن تُشكل مصادر الطاقة المتجددة نسبة 18% من الطلب العالمي على التدفئة بحلول عام 2030، ارتفاعاً من 14% في الوقت الحالي. هذا ويعزى الارتفاع المتوقع بنسبة 42% في استهلاك التدفئة من مصادر الطاقة المتجددة خلال الأعوام الخمسة المقبلة إلى استخدام الكهرباء المتجددة في الصناعة والمباني، فضلاً عن تزايد استخدام الطاقة الحيوية.

بشكل عام، يتضح أن الزخم القوي الذي يشهده قطاع الطاقة المتجددة العالمي لم يعد مدفوعاً باعتبارات الاستدامة البيئية وخفض الانبعاثات فحسب، بل أصبح نتيجة تداخل العديد من العوامل الاقتصادية والتكنولوجية والاستراتيجية، حيث ساهم الانخفاض الكبير في تكاليف تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، إلى جانب التطور الملحوظ في حلول تخزين الطاقة وكفاءة الشبكات الذكية، في تعزيز الجدوى الاقتصادية للطاقة المتجددة وجعلها أكثر تنافسية مع مصادر الطاقة الأخرى. وفي الوقت نفسه، برزت الطاقة المتجددة كأداة محورية لتعزيز أمن الطاقة، وتقليل التعرض للمخاطر

الجيوسياسية وما يرتبط بها من اضطرابات في سلاسل الإمداد العالمية. ويأتي ذلك بالتوازي مع نمو غير مسبوق في الطلب على الكهرباء مدفوعاً بالتوسع السريع في تطبيقات الذكاء الاصطناعي، والحوسبة السحابية، وانتشار مراكز البيانات كثيفة الاستهلاك للطاقة، مما يرسخ الدور الاستراتيجي للطاقة المتجددة في تلبية احتياجات الطاقة المستقبلية بشكل آمن ومستدام.

المحور الثاني

Hydrogen H₂
zero emission

تقارير

الهيدروجين كوقود للمستقبل

المحور الثاني: الهيدروجين كوقود للمستقبل

حظي الهيدروجين بأنواعه المختلفة – لا سيما الهيدروجين الأخضر – باهتمام عالمي متزايد، كأحد الركائز الأساسية في التحول إلى الطاقة النظيفة والمستدامة. ويمثل الهيدروجين الذي يمكن إنتاجه بطرق مختلفة تشمل الاعتماد على الطاقة المتجددة، مصدراً واعداً للطاقة يمكن استخدامه في مجموعة واسعة من التطبيقات، بدءاً من إنتاج الكهرباء والنقل وصولاً إلى الصناعات الثقيلة. ومع تزايد الدعوات للحد من الانبعاثات الكربونية، أصبح الهيدروجين من الحلول الاستراتيجية لدعم انتقال الاقتصاد العالمي إلى مسار منخفض الكربون. وفيما يلي استعراض لأهم التطورات التي شهدتها قطاع الهيدروجين الأخضر العالمي خلال الربع الرابع من عام 2025:

■ الهيدروجين الأخضر في الولايات المتحدة بين محدودية التمويل واستمرارية المشروعات

تراجع سعي الولايات المتحدة الأمريكية لريادة قطاع الهيدروجين الأخضر، في ظل إعادة تنظيم سياسة الطاقة الأمريكية، بما في ذلك خفض الحوافز الفيدرالية والإعفاءات الضريبية المقدمة لمشروعات الهيدروجين واسعة النطاق، مما أدى إلى إعادة تقييم المطورين للعديد من المشروعات وسط مخاوف من أن تظل تكاليف الإنتاج مرتفعة بحيث لا يمكنها المنافسة عالمياً. وفي هذا السياق، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية في شهر أكتوبر 2025 عن إلغاء تمويل بقيمة تبلغ 2.2 مليار دولار لاثنتين من مراكز الهيدروجين، مع توقع أن تشهد خمسة مراكز أخرى تخفيضات أو تأخيرات في التمويل، مما أثار حالة من عدم اليقين بشأن إدراج الهيدروجين ضمن الخطط طويلة الأجل لإزالة الكربون، تستوجب إعادة تقييم جدوى المشروعات والجداول الزمنية.

أما على الجانب الإيجابي، واصلت بعض الشركات الأمريكية تطوير مشروعاتها، وتخطط لبناء العديد من المنشآت التي ستوفر الهيدروجين الأخضر في قطاعي الخدمات اللوجستية والصناعة، تزامناً مع تعديل استراتيجيات خفض التكاليف، من خلال التوجه لبناء تلك المنشآت بالقرب من مزارع طاقة الرياح أو محطات الطاقة الشمسية بهدف تأمين طاقة منخفضة التكلفة، مع بحث إمكانية مزج الهيدروجين بالغاز الطبيعي في خطوط أنابيب شبكات النقل أو التوزيع لخفض الانبعاثات دون الحاجة إلى تغيير كامل البنية التحتية، حيث لا ينتج عن الهيدروجين انبعاثات عند احتراقه.

وفي هذا السياق، يستعد قطاع الهيدروجين الأخضر في الولايات المتحدة الأمريكية لتحويل جذري مع بدء تشغيل خمسة مشروعات لإنتاج الهيدروجين النظيف واستخدامه في مجالات متنوعة مثل خلايا الوقود والنقل، تشمل: أولاً، مشروع "St. Gabriel" للهيدروجين الأخضر في ولاية لويزيانا الذي يستهدف إنتاج نحو 15 طن يومياً من الهيدروجين الأخضر في مرحلته الأولى، مع وجود خطط مستقبلية لتوسيع الطاقة الإنتاجية إلى 500 طن يومياً، ويتوقع أن يسهم في تجنب انبعاث نحو 4.3 مليون طن متري من ثاني أكسيد الكربون. ثانياً، مشروع "Sauk Valley" للهيدروجين الأخضر في ولاية إلينوي الذي يعتمد على استخدام الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية، مع وجود منشآت تخزين لتعزيز مرونة التشغيل واستقرار الإمدادات، وتبلغ طاقته الإنتاجية حوالي 52 طن من الهيدروجين الأخضر سنوياً. ثالثاً، مشروع "Kingsland" للهيدروجين الأخضر في ولاية جورجيا، بطاقة إنتاجية 15 طن يومياً، ويركز على عمليات تسيل الهيدروجين وتخزينه ونقله لتلبية احتياجات أسواق خلايا الوقود والتطبيقات الصناعية. رابعاً، مشروع "Casa Grande" للهيدروجين الأخضر في ولاية أريزونا، بطاقة إنتاجية تبلغ نحو 10 طن يومياً، ويعتمد على مصادر الطاقة المتجددة الخالية من الانبعاثات الكربونية باستخدام تقنيات التحليل الكهربائي المتقدمة، ويركز على إنتاج الهيدروجين السائل لتلبية الطلب المتنامي في قطاع النقل. خامساً، مشروع "Donaldsonville" للهيدروجين والأمونيا الخضراء في ولاية لويزيانا، أحد أكبر مشروعات دمج تقنيات التحليل الكهربائي للمياه مع تصنيع الأمونيا في أمريكا الشمالية، يستهدف إنتاج 20 ألف طن سنوياً من الأمونيا الخضراء بالاعتماد على الكهرباء المتجددة المتاحة عبر الشبكة، ويبرز التوجه لإزالة الكربون من الصناعات الكيماوية الثقيلة.

■ الهيدروجين الأخضر كأولوية استراتيجية في الخطة الخمسية الصينية

أعلنت الصين عن إدراج الهيدروجين الأخضر كأولوية استراتيجية في مسودة الخطة الخمسية الخامسة عشر للتنمية الاقتصادية والاجتماعية الوطنية للفترة (2026 – 2030)، وواصلت تعزيز قدرتها في هذا المجال، حيث تستحوذ على نحو 65% من القدرة العالمية المركبة، مستفيدة من كونها الدولة الرائدة عالمياً في تصنيع أجهزة التحليل الكهربائي، وهي التقنية الأساسية المستخدمة في إنتاج الهيدروجين الأخضر. وفي هذا السياق، شهد شهر أكتوبر 2025 إطلاق أول آلية تمويل حكومي

مباشر للهيدروجين الأخضر في الصين تسمح بتغطية ما يصل إلى 20% من النفقات الرأسمالية ضمن خمس فئات من مشروعات إزالة الكربون، كما بدأت أعمال إنشاء خط أنابيب بطول يصل إلى 1000 كيلومتر لنقل أكثر من 1.5 مليون طن سنوياً من الهيدروجين الأخضر من مركز الطاقة النظيفة في "Zhangjiakou" إلى مدينة "Tangshan" مركز صناعة الصلب، وتجاوزت طاقة إنتاج الهيدروجين الأخضر قيد التطوير في الصين مستوى 10 مليون طن للمرة الأولى على الإطلاق. وفي شهر نوفمبر، تمت الموافقة على إنشاء مشروع لإنتاج 90 ألف طن من الهيدروجين الأخضر سنوياً بتكلفة تبلغ حوالي 730 مليون دولار، كما بدأ التشغيل التجاري لأول مشروع لتحويل الفحم إلى مواد كيميائية باستخدام الهيدروجين الأخضر في الصين. وفي شهر ديسمبر 2025، بدأ التشغيل الفعلي لأكبر مشروع عالمي متكامل لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا والميثانول يُعرف باسم "المرحلة الأولى من مجمع Songyuan الصناعي"، حيث من المخطط أن تبلغ طاقته الإنتاجية من الهيدروجين الأخضر 45 ألف طن سنوياً، ويشمل سلسلة التوريد الصناعية بأكملها، بدءاً من توليد الطاقة المتجددة وإنتاج الهيدروجين، وصولاً إلى تصنيع المعدات، والتخزين الذي يُعد هو الأكبر عالمياً بسعة إجمالية تكفي لتلبية احتياجات الطهي اليومية لنحو 600 ألف شخص.

هذا وقد تجاوزت الصين أهدافها لعام 2025 في إنتاج الهيدروجين الأخضر، حيث بلغ إنتاجها 220 ألف طن، أي ما يمثل أكثر من 50% من الإنتاج العالمي، وفقاً لإدارة الطاقة الوطنية الصينية، بالاستفادة من إنشاء ما يزيد عن 540 محطة لتزويد الهيدروجين، وهو ما يمثل حوالي 40% من الإجمالي العالمي، فضلاً عن انخفاض تكلفة تصنيع أجهزة التحليل الكهربائي في الصين المُقدرة بحوالي 600 دولار/كيلوواط مقارنة بالتكاليف في أوروبا التي تبلغ نحو 2500 دولار/كيلوواط، مع وفرة الكهرباء المتجددة منخفضة التكلفة من محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الضخمة.

وتشير التوقعات إلى ارتفاع طاقة إنتاج الهيدروجين الأخضر في الصين إلى 1.2 مليون طن بحلول عام 2030، ارتفاعاً من نحو 125 ألف طن في نهاية عام 2024، مدفوعة بالطلب على الوقود والطاقة النظيفة لقطاعي التكرير وتحويل الفحم إلى مواد كيميائية. هذا وقد تراوحت تكاليف إنتاج الهيدروجين المتجدد في الصين ما بين 3 إلى 3.5 دولار/كيلوجرام خلال شهر أكتوبر 2025، ومن المتوقع انخفاض هذه التكاليف إلى نطاق يتراوح ما بين 1.50 إلى 1.75 دولار/كيلوجرام، بدعم رئيسي من تحقيق وفورات الحجم مع زيادة الطاقات الإنتاجية، فضلاً عن التراجع المستمر في

تكاليف تقنيات إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، الذي سيساهم في انخفاض أسعار الهيدروجين بنسبة تتراوح ما بين 15 إلى 20% خلال الفترة (2025 – 2027)، يتبعه انخفاض إضافي تتراوح نسبته ما بين 15 إلى 30% خلال الفترة (2028 – 2030).

■ الهيدروجين الأخضر في أوروبا بين الطموح والتحديات

تُعد توجيهات الاتحاد الأوروبي المعدلة بشأن الطاقة المتجددة هي السياسة الرئيسية التي تُحفز استخدام الهيدروجين الأخضر في أوروبا، حيث تُلزم بأن تكون نسبة 42% من الهيدروجين المستخدم في قطاع الصناعة من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2030، وأن تأتي نسبة 1% من وقود النقل من الهيدروجين الأخضر. هذا وقد شهد قطاع الهيدروجين الأخضر في أوروبا تبايناً ملحوظاً خلال الربع الرابع من عام 2025. حيث استمر تطوير المشروعات الكبرى في شهر أكتوبر، وتواصل تنفيذ مبادرات إزالة الكربون في مصافي التكرير، وإطلاق مشروعات الوقود الإلكتروني واسعة النطاق، إلى جانب التقدم في إنشاء محطات التحليل الكهربائي الجديدة. يأتي هذا التقدم على الرغم من التحديات التنظيمية والتجارية، بما في ذلك، حالة عدم اليقين بشأن السياسات، والتأخير في منح التمويل، وارتفاع التكاليف، وصعوبة تأمين عقود شراء ملزمة طويلة الأجل. كما أضف تأجيل المنظمة البحرية الدولية لإطار صافي الانبعاثات الصفرية لمدة عام، مزيداً من عدم اليقين بشأن مستقبل الطلب على وقود الشحن منخفض الكربون – لا سيما الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء، حيث يُتوقع أن يؤدي هذا التأجيل إلى مراجعة توقعات الطلب بالخفض، بما قد ينعكس سلباً على قرارات الاستثمار في مشروعات الإنتاج والبنية التحتية المرتبطة بقطاع النقل البحري.

وشهد شهر نوفمبر 2025 تقدماً سياسياً لدعم اتفاقيات شراء الهيدروجين طويلة الأجل، لمعالجة أحد أكبر تحديات السوق والمتمثل في صعوبة تأمين إيرادات مستقرة، حيث لا يمتلك سوى نحو ربع المشروعات المعلنة اتفاقيات مؤكدة. وأطلق الاتحاد الأوروبي أول دعوة ضمن آلية الهيدروجين التابعة لبنك الهيدروجين الأوروبي لربط المنتجين بالمستهلكين وتحويل الطلب المبكر إلى عقود قابلة للتمويل حتى عام 2029، مع هيمنة مشروعات التحليل الكهربائي المرتبطة بالهيدروجين الأخضر على معظم الاتفاقيات، وتركز الطلب في القطاعات الصناعية كثيفة الانبعاثات مثل الكيماويات والصلب والتكرير. وعلى المستوى التنظيمي، دخل القانون التفويضي للهيدروجين

منخفض الكربون حيز التنفيذ، موسعاً نطاق التعريف ليشمل منتجات مشتقة مثل الأمونيا والميثانول، وموفراً وضوحاً لمسارات إنتاج بديلة. كما أقرت المملكة المتحدة إعفاء الكهرباء المستخدمة في التحليل الكهربائي من ضريبة تغير المناخ اعتباراً من عام 2026، ما يعزز تنافسية الهيدروجين الأخضر. ورغم استمرار تقدم المشروعات واتخاذ قرارات استثمار جديدة، فإن إلغاء بعض المشروعات الكبرى أثار مخاوف متزايدة بشأن احتدام المنافسة على الأراضي، لا سيما مع التوسع السريع لمراكز البيانات في أوروبا، حيث جاء أحد الإلغاءات نتيجة تنافس مباشر مع مشروع مركز بيانات ضخم مقترح.

وفي شهر ديسمبر، أعلنت المفوضية الأوروبية عن إطلاق المزاد الثالث لإنتاج الهيدروجين ضمن بنك الهيدروجين الأوروبي بميزانية تبلغ 1.3 مليار يورو، بهدف تقديم دعم مالي لإنتاج الهيدروجين منخفض الكربون أو الهيدروجين الأخضر، فضلاً عن تعزيز الاستثمارات في مشروعات الهيدروجين في أوروبا. وبحلول نهاية عام 2025، بلغ إنتاج أوروبا من الهيدروجين المنتج بالتحليل الكهربائي نحو 333 ميغاواط، وأخذت قرارات الاستثمار النهائي لمحطات بقدر 943 ميغاواط، مع استهداف بدء تشغيلها في عام 2026، مما سيرفع القدرة الإنتاجية إلى نحو 1.28 جيجاواط.

■ الهيدروجين الأخضر في الهند: من السياسات إلى التنفيذ الفعلي

شهد قطاع الهيدروجين الأخضر في الهند تحولاً ملحوظاً من مرحلة وضع السياسات إلى مرحلة التنفيذ الفعلي، مع نهاية الربع الرابع من عام 2025، مدعوماً بسياسات حكومية قوية وتزايد مشاركة القطاع الخاص، واستندت هذه التطورات إلى "المهمة الوطنية للهيدروجين الأخضر" التي تهدف إلى جعل الهند مركزاً عالمياً لإنتاج واستهلاك وتصدير الهيدروجين ومشتقاته، مع إطلاق برامج منح قدرات إنتاجية ومشروعات تجريبية وسياسات لخفض التكاليف بالتوازي. في هذا السياق، تم ترسية مناقشتين لتصنيع المحطات الكهربائية بطاقة إنتاجية تصل إلى نحو 3 جيجاواط سنوياً، إضافة إلى مشروعات لإنتاج الهيدروجين الأخضر بنحو 862 ألف طن سنوياً خُصص جزء كبير من هذه القدرات ضمن مناقصات برنامج «التدخلات الاستراتيجية لانتقال الهيدروجين الأخضر» الذي أطلقته مؤسسة الطاقة الشمسية الهندية، فضلاً عن مشروعات لإمدادات الأمونيا الخضراء بحوالي 724 ألف طن سنوياً، وتخصيص كميات لتزويد المصافي بنحو 20 ألف طن سنوياً. أما على مستوى

التنفيذ الفعلي للمشروعات، تم تشغيل قدرات إنتاجية للهيدروجين الأخضر بنحو 5 آلاف طن سنوياً، إلى جانب قدرات طاقة متجددة مرتبطة تبلغ 6.48 ميغاواط في عدة مواقع داخل الهند، كما قامت شركة "JSW Neo Energy" بتشغيل أول وأكبر منشأة للهيدروجين الأخضر في الهند، داخل مجمع "Vijayanagar" لإنتاج الصلب منخفض الكربون بولاية "Karnataka"، بطاقة إنتاجية تصل إلى 3800 طن سنوياً. وفي إطار خفض التكاليف، تم اعتماد إجراءات تنظيمية تشمل إعفاءات من رسوم نقل الكهرباء عبر الشبكات بين الولايات في الهند لمدة 25 عاماً للمشروعات الجديدة، وتقديم مزايا ضريبية لمعدات الطاقة المتجددة، إضافة إلى توفير بيئة تنظيمية مستقرة وطويلة الأجل، بهدف تعزيز جدوى الاستثمار وتقليل تكلفة إنتاج الهيدروجين.

■ التطورات في قطاع الهيدروجين الأخضر بالدول العربية

واصل قطاع الهيدروجين الأخضر في الدول العربية عمليات التطوير خلال الربع الرابع من عام 2025، مدفوعاً برؤية استراتيجية تهدف إلى تنويع مصادر الطاقة وتعزيز مكانتها كمركز عالمي لإنتاج وتصدير الوقود النظيف منخفض الكربون. فعلى سبيل المثال لا الحصر، في المملكة العربية السعودية، وقعت شركة "SARCO" مذكرة تفاهم مع شركة "Go Energy" الإماراتية في شهر أكتوبر 2025، للتعاون في تطوير مشروع لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المملكة العربية السعودية. وأعلنت شركة "نيوم" في شهر ديسمبر 2025، أن مشروع للهيدروجين الأخضر الواقع في شمال غرب المملكة العربية السعودية، والمُصنّف كأكبر مشروع من نوعه على مستوى العالم، يسير وفق الجدول الزمني المحدد لإنجازه، مدعوماً باستثمارات إجمالية تبلغ نحو 8.4 مليار دولار، حيث تم الانتهاء من حوالي 90% من أعمال الإنشاء في جميع المواقع. ومن المقرر الانتهاء من هذا المشروع الرائد خلال عام 2026، مع توقع بدء التسليمات الأولية من الأمونيا الخضراء في مطلع عام 2027. وسيستخدم المشروع نحو 2.2 جيجاواط من أجهزة التحليل الكهربائي، مدعومة بنحو 4 جيجاواط من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وتصل طاقته الإنتاجية المستهدفة إلى نحو 600 طن من الهيدروجين الأخضر يومياً. وتتوقع منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية أن تصل تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر في مشروع "نيوم" إلى أقل من 3 دولار/كيلوجرام، وهي تكلفة تنافسية.

وفي دولة الإمارات العربية المتحدة، أعلنت شركة أبو ظبي لطاقة المستقبل "مصدر" في شهر نوفمبر 2025 عن توقيع اتفاقية ملزمة مع شركة "OMV" النمساوية لتأسيس مشروع مشترك لتمويل وبناء وتشغيل محطة التحليل الكهربائي للهيدروجين الأخضر في "Bruck an der Leitha" في جمهورية النمسا، بقدرة 140 ميغاواط، ومن المتوقع أن يصبح خامس أكبر مشروع للهيدروجين الأخضر في أوروبا، عند بدء العمليات التشغيلية في عام 2027. وتُهد هذه الشراكة الطريق لتعاون استراتيجي مستقبلي لاستكشاف إنتاج الهيدروجين الأخضر، ووقود الطيران المستدام الاصطناعي، والكيماويات الاصطناعية في دولة الإمارات العربية المتحدة. من جانب آخر، تجدر الإشارة إلى تعاون المؤسسة الوطنية للنفط في إمارة الشارقة مع شركة "Siemens" وشركة "Decahydron" لتقييم جدوى استخدام الهيدروجين الطبيعي لتوليد الطاقة والتطبيقات الصناعية الأخرى، حيث من المقرر بدء عمليات الحفر في عام 2026 لتوفير بيانات تفصيلية عن الموارد وقياس معدلات التدفق، مما سيسهم في تحديد إمكانات هذا المورد الطبيعي من الهيدروجين. وفي حال ثبوت جدوى استخدامه، يمكن استخدام الهيدروجين الطبيعي بشكل مباشر، متجاوزاً تكاليف التخزين والنقل، وموفرًا في الوقت ذاته مصدر جديد للطاقة منخفضة الكربون في المنشآت كثيفة الاستهلاك للطاقة، مثل مراكز البيانات.

وفي جمهورية مصر العربية، أعلنت شركة "Destiny Energy" السنغافورية في شهر نوفمبر 2025، عن استثمار حوالي 210 مليون دولار في بناء منشآت لإنتاج أكثر من 100 ألف طن متري سنوياً من الهيدروجين الأخضر والأمنيا الخضراء في المنطقة الاقتصادية لقناة السويس. ويأتي ذلك عقب توقيع مذكرة تفاهم مع حكومة مدينة طوكيو لتعزيز التعاون في مجال تطوير الهيدروجين الأخضر في شهر أكتوبر 2025، وهو ما يعكس الهدف الاستراتيجي لجمهورية مصر العربية في أن تصبح مركزاً إقليمياً وعالمياً لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر، حيث تعمل على تطوير حزم حوافز استثمارية تهدف إلى رفع حصتها في سوق الهيدروجين الأخضر العالمي إلى حوالي 8%، مع إنتاج متوقع يصل إلى نحو 10 مليون طن سنوياً خلال العقود القادمة.

وفي الجمهورية الجزائرية، جاري العمل على إنشاء محطة شبه صناعية لإنتاج الهيدروجين الأخضر ومشتقاته بقدرة 50 ميغاواط في مدينة أرزيو الساحلية بدعم مالي من الحكومة الألمانية والاتحاد الأوروبي. فضلاً عن وضع اللامسات الأخيرة على الإطار القانوني والمؤسسي لأنشطة الهيدروجين بهدف جذب المزيد من الاستثمارات في مختلف مراحل سلسلة قيمة الهيدروجين،

مع مواصلة تعزيز الدور الاستراتيجي كشريك أوروبا في الهيدروجين الأخضر، حيث تمتلك الجمهورية الجزائرية كافة المقومات اللازمة لتصبح مورداً رائداً للطاقة النظيفة، بما في ذلك الموارد الوفيرة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وبنية تحتية حديثة، وخطوط أنابيب مباشرة تربطها بالأسواق الأوروبية. وهنا تجدر الإشارة إلى مشروع ممر الهيدروجين الجنوبي "SoutH2" المتعدد الأطراف، الذي أعلن عنه في شهر يناير 2025، ويهدف إلى تحويل خطوط أنابيب الغاز القائمة لنقل 4 مليون طن من الهيدروجين الأخضر من الجزائر إلى أوروبا سنوياً، أي ما يقارب 10% من الطلب الأوروبي المتوقع على الهيدروجين بحلول عام 2040.

وفي سلطنة عُمان، وقعت شركة "هيدروجين عُمان" ومؤسسة "H2Global" في شهر أكتوبر 2025 مذكرة تفاهم لاستكشاف كيفية دعم آلية مبتكرة قائمة على السوق لاستراتيجية عُمان الوطنية للهيدروجين التي تهدف إلى أن تصبح سلطنة عُمان مُصدراً عالمياً رائداً للهيدروجين الأخضر ومشتقاته المنتج باستخدام الطاقة المتجددة بحلول عام 2030، بالاستفادة من موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الوفيرة لإنتاج طاقة نظيفة بأسعار تنافسية. كما عُقد "منتدى الهيدروجين الأخضر بين الاتحاد الأوروبي وسلطنة عُمان"، الذي نظمه مشروع التعاون بين الاتحاد الأوروبي ومجلس التعاون الخليجي في نهاية شهر نوفمبر 2025، لبحث سبل تعزيز الشراكة الاستراتيجية طويلة الأمد بين في مجال الهيدروجين الأخضر. وفي شهر ديسمبر 2025، نظمت سلطنة عُمان "قمة الهيدروجين الأخضر لعام 2025" تحت شعار "سد الفجوات، ودفع عجلة العمل" التي شكلت منصة لعرض آخر المستجدات في القطاع، وأكدت على انتقال سلطنة عُمان من مرحلة التخطيط الاستراتيجي إلى مرحلة التنفيذ الفعلي.

■ مخرجات مؤتمر "Wood Mackenzie" للهيدروجين

عُقد مؤتمر "Wood Mackenzie" للهيدروجين خلال شهر نوفمبر 2025، ويمكن إيجاز أهم ما خلص إليه المؤتمر في النقاط التالية: أولاً، تم التأكيد على الريادة القوية للصين في سوق الهيدروجين الأخضر والأمونيا، حيث تمتلك الصين أكثر من 70% من القدرة العالمية التي وصلت إلى قرار الاستثمار النهائي خلال عام 2025، مع توقعات بأن تكون صادرات الأمونيا الخضراء الصينية منافسة للهيدروجين المحلي في أوروبا خلال الأعوام القادمة. ثانياً، عدم توافق السياسات مع

واقع السوق، خاصة في أوروبا والولايات المتحدة، حيث يشعر المطورون بأن الأطر التنظيمية لا تواكب التطور السريع في المشروعات، مع تأخير في تنفيذ القوانين ودعم البنية التحتية، مما يعوق الاستثمارات ويزيد من المخاطر. ثالثاً، بدأت تكاليف إنتاج الهيدروجين تستقر بعد أعوام من الضغوط التضخمية وتقلبات أسعار المواد الخام، مع بوادر توقعات بتراجع التكاليف مستقبلاً من خلال التوحيد القياسي للمعدات والتصنيع المعياري، لكن المنافسة مع التكنولوجيا الصينية تظل حادة. رابعاً، فيما يخص ديناميكيات سوق الكهرباء وتأثيرها على مشروعات الهيدروجين الأخضر، فقد أدى الطلب القوي من قطاعات مثل مراكز البيانات إلى ارتفاع الأسعار وضغط على الشبكات، مما يضع مشروعات التحليل الكهربائي في منافسة مع مستخدمي الطاقة الآخرين ويزيد من تكاليف الإنتاج. خامساً، تعزيز فرص التوسع في سوق الأمونيا الخضراء والتصدير البحري، يتطلب تسريع تنفيذ البنية التحتية من الإنتاج إلى الشحن والتوزيع، وإبرام عقود شراء طويلة الأجل لضمان الاستقرار المالي للمشروعات.

المحور الثالث

تقارير

تحولات الطاقة

تقارير: متابعة فصلية حول مستجدات الطاقات الجديدة والمتجددة وقضايا تحولات الطاقة

المحور الثالث: تحولات الطاقة

برزت تحولات الطاقة كأحد أهم القضايا الجوهرية على الساحة العالمية، في ظل تنامي جهود التصدي لتغير المناخ والسعي لتحقيق التنمية المستدامة. وتشمل تلك التحولات تحديث البنية التحتية، وتعزيز كفاءة الطاقة، وزيادة الاهتمام بمصادر الطاقة المتجددة، وتطوير تقنيات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه. ومع تنامي الالتزامات الدولية بخفض الانبعاثات وتحقيق الحياد الكربوني، أصبحت تحولات الطاقة من المسارات الاستراتيجية لضمان أمن الطاقة ودعم النمو الاقتصادي منخفض الكربون. وتشير التقديرات إلى أن الاستثمارات العالمية في تقنيات الطاقة النظيفة ستواصل الارتفاع خلال العقد الحالي، مدفوعة بتقدم التكنولوجيا والسياسات المناخية الطموحة.

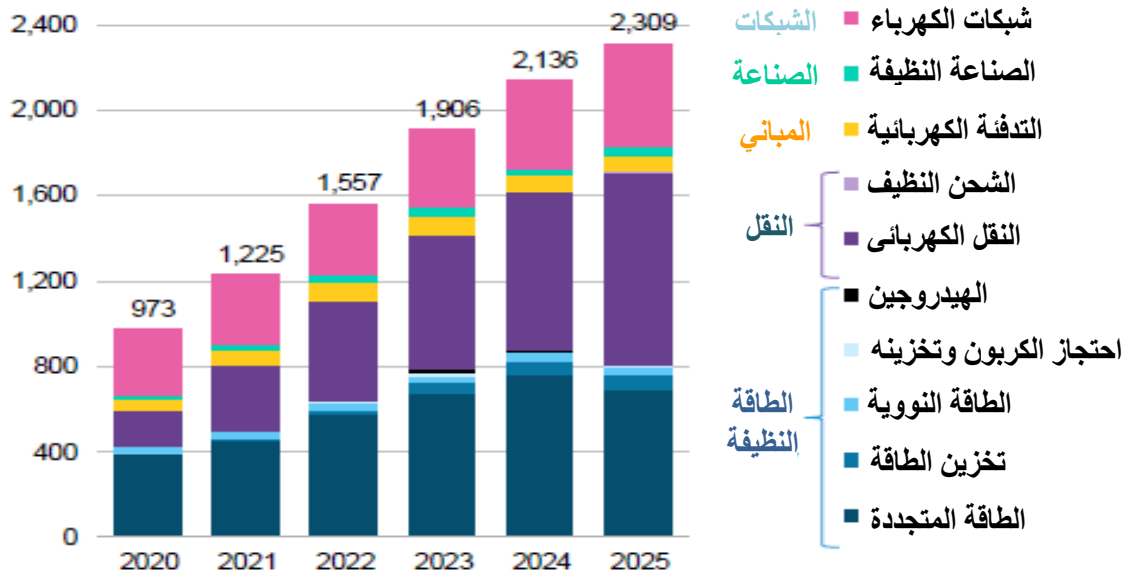
■ الاستثمارات العالمية في تحولات الطاقة

ارتفعت الاستثمارات العالمية في تحولات الطاقة إلى مستوى قياسي جديد بلغ حوالي 2.3 تريليون دولار في عام 2025، بزيادة نسبتها نحو 8.1% مقارنة بالعام السابق، غير أن وتيرة هذا النمو واصلت تباطؤها التدريجي من 27% في عام 2021. وفي هذا السياق، ارتفعت الاستثمارات في سلسلة إمداد الطاقة النظيفة إلى حوالي 127 مليار دولار، وشهد تمويل الأسهم في مجال تكنولوجيا المناخ نمواً عقب ثلاثة أعوام متتالية من التراجع مسجلاً ارتفاعاً ملحوظاً بلغت نسبته حوالي 53%، وارتفع إصدار ديون تحولات الطاقة إلى 1.2 تريليون دولار، وذلك بالرغم من تصاعد التوترات الجيوسياسية والاضطرابات التجارية خلال عام 2025، الأمر الذي يؤكد مرونة تحولات الطاقة.

وقد استحوذ قطاع النقل الكهربائي (المركبات الكهربائية وما يرتبط بها من بنية تحتية للشحن) على الحصة الأكبر من إجمالي الاستثمارات في تقنيات تحولات الطاقة خلال عام 2025 بقيمة تصل إلى 893 مليار دولار، بزيادة نسبتها نحو 21% على أساس سنوي - لا سيما في آسيا وأوروبا. يليه قطاع الطاقات المتجددة بقيادة الطاقة الشمسية بقيمة 690 مليار دولار، وهو مستوى منخفض بنسبة 9.5% على أساس سنوي، متأثراً بالإصلاحات السوقية في الصين. ثم قطاع شبكات نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية بقيمة نحو 483 مليار دولار، مسجلاً ارتفاعاً بنسبة بلغت 17% على أساس سنوي. وشهد قطاع الهيدروجين انخفاضاً في الاستثمارات لتصل إلى نحو 7.3 مليار دولار، كما انخفضت الاستثمارات في قطاع الطاقة النووية لتصل إلى نحو 36 مليار دولار. في حين شهدت باقي القطاعات

الأخرى ارتفاعاً في الاستثمارات لتبلغ 71 مليار دولار لقطاع تخزين الطاقة، ونحو 6.6 مليار دولار لقطاع احتجاز الكربون وتخزينه، و4.2 مليار دولار لقطاع الشحن النظيف، ونحو 84 مليار دولار لقطاع التدفئة الكهربائية، و 34 مليار دولار لقطاع الصناعة النظيفة، كما يوضح الشكل التالي:

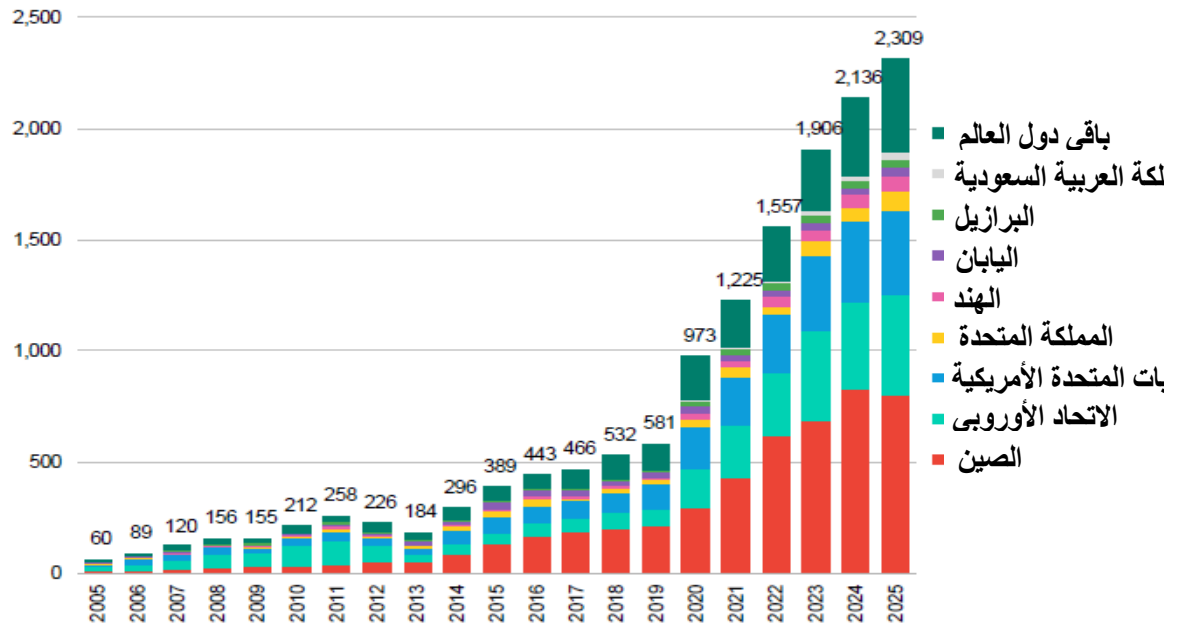
الاستثمارات العالمية في تحويلات الطاقة، وفقاً للقطاع خلال الفترة (2020 – 2025) (مليار دولار)



ملاحظة: تشير التقديرات إلى أن الاستثمار في مراكز البيانات بلغ حوالي نصف تريليون دولار في عام 2025، مما يجعله متقدماً على الطاقة الشمسية ولكنه متأخر عن قطاع النقل الكهربائي.

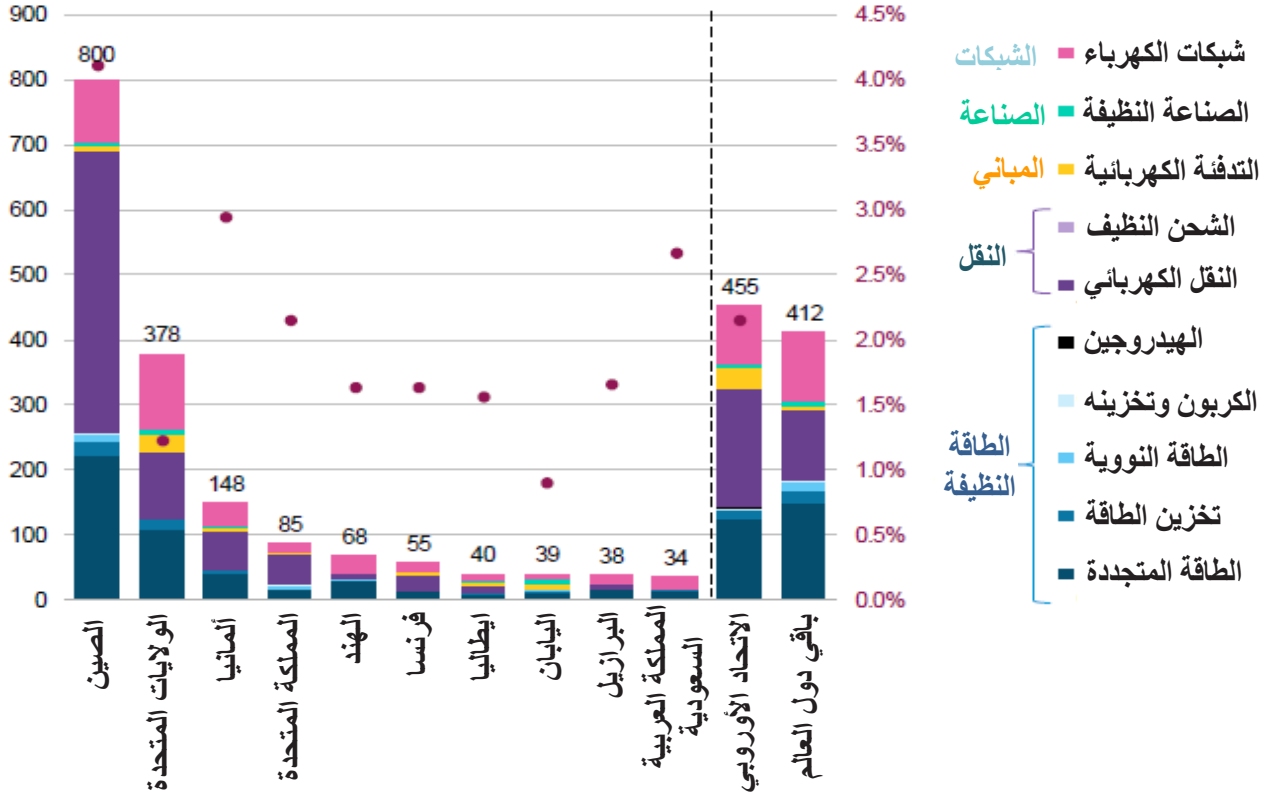
وفيما يخص التوزيع الجغرافي، تغير المشهد الإقليمي مجدداً خلال عام 2025، حيث احتفظت الصين بريادتها كأكبر سوق عالمي لاستثمارات تحويلات الطاقة، على الرغم من تسجيل أول انخفاض سنوي لها منذ عام 2013، وقد كان للنمو القوي في سوق السيارات الكهربائية دوراً رئيسياً في التخفيف حدة هذا الانخفاض. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ارتفعت الاستثمارات بنسبة 3.5% لتصل إلى نحو 378 مليار دولار، على الرغم من السياسة الأمريكية لإبطاء عملية تحويلات الطاقة – لا سيما في قطاع الطاقة المتجددة. وتمكن الاتحاد الأوروبي من تجاوز التحديات ليحقق نمواً بنسبة بلغت 18% في العديد من القطاعات ويصل إلى 455 مليار دولار، مستحوذاً على الحصة الأكبر من النمو في استثمارات تحويلات الطاقة، كما يوضح الشكل التالي:

الاستثمارات العالمية في تحويلات الطاقة، وفقاً للدول خلال الفترة (2005 – 2025) (مليار دولار)



أما فيما يخص أكبر عشر دول استثمراً في تحويلات الطاقة على مستوى العالم في عام 2025، جاءت الصين في المرتبة الأولى، يليها كل من الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا والمملكة المتحدة التي حافظت على مراكزها من الثاني إلى الرابع على التوالي. وواصلت الهند صعودها في التصنيف متجاوزة فرنسا باستثمارات بلغت حوالي 68 مليار دولار. في حين تراجع تصنيف البرازيل خلف كل من إيطاليا واليابان التي شهدت نمواً نسبته 44% في الاستثمارات لتصل إلى نحو 39 مليار دولار. وتأتي المملكة العربية السعودية في المركز العاشر، للمرة الأولى على الإطلاق، لتحل محل كندا، حيث ارتفعت استثماراتها في تحويلات الطاقة بنسبة 70% على أساس سنوي، لتصل إلى حوالي 34 مليار دولار، بفضل الزيادة الكبيرة في الاستثمارات في الطاقة المتجددة وشبكات الكهرباء، كما يوضح الشكل التالي:

الاستثمارات في تحويلات الطاقة وحصتها من الناتج المحلي الإجمالي في عام 2025 (أكبر عشرة اقتصادات بالإضافة إلى الاتحاد الأوروبي وباقي دول العالم) (مليار دولار)



هذا ومن المتوقع أن تشهد استثمارات تحويلات الطاقة مرحلة مفصلية خلال الأعوام القليلة القادمة، تزامناً مع بدء انتقال العديد من تطبيقات الطاقة النظيفة من مرحلة الابتكار إلى مرحلة التطبيق على نطاق واسع في مختلف القطاعات والمناطق الجغرافية. فقد أصبحت مصادر الطاقة المتجددة (مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) أكثر تكاملاً ضمن الشبكات الكهربائية، بينما يتواصل الانخفاض في تكاليف تخزين الطاقة في شبكات البطاريات ليصل إلى أكثر من النصف مقارنة بما كانت عليه قبل ثلاثة أعوام، وتتوسع المركبات الكهربائية تدريجياً في قطاع النقل محققة ارتفاعاً بنسبة بلغت نحو 20% على المستوى العالمي خلال عام 2025، كما تتقدم العديد من التقنيات مثل المضخات الحرارية الصناعية والحلول المتقدمة للتبريد نحو الاستخدام الواسع، مع التركيز المتزايد على تحسين كفاءة الصناعة وتقليل الانبعاثات الكربونية.

ورغم ذلك، لا يزال مسار تحويلات الطاقة غير واضح: هل سيستمر تسارع تحويلات الطاقة، أم سيتعثر بل ويتراجع نتيجة للتوترات الجيوسياسية، واضطراب التجارة العالمية، وتغير السياسات –

لا سيما في الولايات المتحدة الأمريكية التي بدأت في تبني مساراً يميل إلى إبطاء وتيرة التوسع في الطاقة المتجددة، شمل انسحابها من اتفاقية باريس لتغير المناخ، مما دفع وكالة الطاقة الدولية إلى خفض توقعاتها لنمو الطاقة المتجددة في الولايات المتحدة بنحو 50% خلال الأعوام الخمس القادمة. وفي ضوء تلك الملامح المتشابكة، يبدو أن عام 2026 سيشكل امتداداً لمرحلة التحول الحذر في أسواق الطاقة العالمية، حيث يتقاطع تباطؤ بعض محركات الطلب مع وفرة الإمدادات، في حين تظل التوترات الجيوسياسية عاملاً ضاغطاً يعيد تشكيل توازنات السوق بشكل مستمر. ورغم التقدم النسبي في مسار تحولات الطاقة، فإن النفط والغاز سيحتفظان بدورهما المحوري في ضمان استقرار الإمدادات، في وقت تتزايد فيه متطلبات الطاقة المرتبطة بالنمو التكنولوجي ومراكز البيانات. وفي المقابل، يفرض تباطؤ الاستثمارات، وعدم اليقين الجيوسياسي، سقفاً على الأسعار وتحديات إضافية أمام المنتجين والمستثمرين. وعليه، فإن إدارة معضلة الطاقة الثلاثية – أمن الإمدادات، والاستدامة، والقدرة على تحمل التكاليف – ستبقى هي الأولوية الأهم والأكبر لصانعي السياسات والشركات على حد سواء.

■ المملكة العربية السعودية كنموذج لتحولات الطاقة العادلة

تبرز المملكة العربية السعودية كنموذج يحتذى به في تعزيز استثمارات تحولات الطاقة العادلة، فقد حرصت على وضع أسس متينة لنمو الطاقة النظيفة حتى عام 2030، وهي الآن تُحقق إنجازات تفوق التوقعات بتسريعها وتيرة نشر الطاقة النظيفة بشكل ملحوظ، متفوقة على العديد من دول العالم التي انطلقت من نقطة بداية أقوى بكثير، مدفوعة ببرنامجهما الوطني للطاقة المتجددة، وهدفها المتمثل في الوصول إلى صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2060. حيث تسعى المملكة للحفاظ على ريادتها العالمية في مجال الطاقة من خلال تنمية مصادر الطاقة المستدامة وبأسعار معقولة، وتحقيق نسبة 50% من الكهرباء المولدة من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030، بما يساهم في خفض الانبعاثات في شبكة الكهرباء الوطنية، فضلاً عن خفض انبعاثات الكربون في المصانع وأنظمة النقل في دول أوروبا والشرق الأقصى من خلال إنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر، وخفض الانبعاثات في مجال الذكاء الاصطناعي والبنية التحتية الرقمية تزامناً مع سعي المملكة إلى أن تصبح لاعباً رئيسياً في مراكز بيانات الذكاء الاصطناعي.

وإضافة إلى جهودها الناجحة في مجال كفاءة الطاقة، تواصل المملكة العربية السعودية أبحاثها في مجال الطاقة النووية السلمية، وتبني أنظمة تخزين طاقة البطاريات واسعة النطاق لتعزيز مرونة الشبكة وموثوقيتها، وتحقيق هدف الوصول إلى 48 جيجاواط ساعة من سعة التخزين بحلول عام 2030 كجزء من مزيج الطاقة لديها، مما يُتيح زيادة الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، حيث تقوم بنشر الطاقة الشمسية بوتيرة أسرع من أي دولة أخرى في التاريخ، كما تستكشف إمكاناتها الهائلة في طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية على طول ساحل البحر الأحمر الذي يبلغ فيه النشاط التكتوني ذروته، ومن ثم يُمكن توفير طاقة أساسية موثوقة ومتجددة بالاستفادة من خبرتها الكبيرة في مجال الحفر ورسم خرائط باطن الأرض.

وتحرص المملكة العربية السعودية على الحد من مخاطر استثمارات الطاقة النظيفة، وتحقيق أدنى تكاليف للطاقة المتجددة في العالم، من خلال توفير قياسات موثوقة لتعزيز الثقة في الإنتاج المتوقع، وتحسين توقعات الإيرادات، وتقليل الجداول الزمنية لتطوير المشروعات الجديدة والحد من مخاطرها، مما يخفض تكلفة رأس المال لتمويل تلك المشروعات، الأمر الذي ساهم بشكل رئيسي في وصول المملكة إلى المركز العاشر عالمياً من حيث قيمة الاستثمارات في تحولات الطاقة خلال عام 2025.

تجدر الإشارة إلى أنه رغم ما قد توفره تحولات الطاقة من فوائد اقتصادية واجتماعية وبيئية هامة، إلا أنها لا تضمن بالضرورة تحقيق العدالة، لا سيما وأنها تتم ضمن نظام طاقة عالمي يعاني أساساً من اختلالات وفجوات عميقة، حيث لا تزال خدمات الطاقة الموثوقة وبأسعار مناسبة بعيدة عن متناول مئات الملايين من السكان في العديد من الدول النامية والمتقدمة على حد سواء. ومع تصاعد الدعوات لتحقيق تحولات طاقة عادلة، يبقى من الصعب الوصول إلى تعريف عالمي موحد لها، مما يستدعي تطوير مقاربات ومبادئ تتناسب مع الخصوصيات الاقتصادية والجغرافية والسياسية والثقافية والاجتماعية لكل دولة من دول العالم. ومن هذا المنطلق، لا يكمن جوهر النقاش في جدوى تحولات الطاقة بحد ذاتها، بل في الكيفية التي يمكن من خلالها توظيف تلك التحولات لبناء مسار شامل وعادل، حيث يتطلب تحقيق تحولات الطاقة العادلة توزيعاً متوازناً للمنافع والأعباء، بالاعتماد على عمليات صنع قرار شاملة، والالتزام بمعالجة التحديات التي تواجه الفئات الأكثر تأثراً، إضافة إلى الوقاية من الأضرار أو إصلاحها في حال حدوثها خلال مسار تحولات الطاقة.

وفي هذا السياق، يجب الأخذ في الاعتبار بأن مستقبل استثمارات تحولات الطاقة العالمية لا يُقاس فقط بمعدلات النمو أو الأرقام القياسية المحققة، بل بمدى قدرة تلك الاستثمارات على تحقيق توازن دقيق بين الأمن والاستدامة والعدالة. وفي عالم تتسارع فيه التحولات التكنولوجية وتتزايد فيه التحديات الجيوسياسية، تُمثل النماذج الوطنية – كما في حالة المملكة العربية السعودية – دليلاً عملياً على إمكانية صياغة مسارات تحولات طاقة عادلة، تُسهم في تحقيق توازن معضلة الطاقة الثلاثية – أمن الطاقة واستدامتها والقدرة على تحمل تكاليفها، مع خفض الانبعاثات الكربونية، مما يعزز استقرار أسواق الطاقة العالمية.

■ التطورات في الطاقة النووية

تواصل الاهتمام العالمي بالطاقة النووية كخيار لتحقيق أمن الطاقة وخفض الانبعاثات خلال الربع الرابع من عام 2025، فعلى سبيل المثال لا الحصر، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية في أواخر شهر أكتوبر 2025 عن شراكة استراتيجية مع شركتي "Brookfield" و "Cameco" تهدف إلى تسريع نشر وتوسيع قدرات الطاقة النووية في الولايات المتحدة الأمريكية، وذلك في إطار تنفيذ الأوامر التنفيذية الصادرة في مايو 2025 لتعزيز الطاقة النووية كجزء من استراتيجية الأمن القومي والطاقة النظيفة، وتتمحور هذه الشراكة حول بناء مفاعلات نووية جديدة، بتكلفة تبلغ 80 مليار دولار، عبر استخدام تكنولوجيا مفاعلات "Westinghouse" النووية الحديثة، مما سيعزز بشكل كبير من قدرة الولايات المتحدة الأمريكية على تلبية الطلب المتزايد على الكهرباء واحتياجات أمن الطاقة على نطاق واسع، بما في ذلك توفير طاقة لمراكز البيانات وقدرات الحوسبة الضخمة، لضمان تنمية قاعدة صناعية قوية لصناعة الطاقة النووية والريادة في مجال الذكاء الاصطناعي. وفي نوفمبر 2025، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية عن إتمام قرض بقيمة 1 مليار دولار لخفض تكاليف الطاقة وإعادة تشغيل مركز "Crane" للطاقة النظيفة، المتوقف عن العمل منذ عام 2019، وهو محطة طاقة نووية تبلغ قدرتها 835 ميغاواط، تقع على نهر "Susquehanna" في ولاية بنسلفانيا، مما يساهم في توفير طاقة موثوقة وأمنة وبأسعار معقولة في كافة أنحاء منطقة وسط المحيط الأطلسي، حيث يتوقع أن يُغذي حوالي 800 ألف منزل بالكهرباء. وأعلنت ولاية نيويورك عن فتح باب تقديم طلبات لمشروعات مفاعلات نووية متطورة جديدة، بهدف إضافة نحو 1 جيجاوات من الطاقة إلى بحلول عام 2040. وفي شهر ديسمبر 2025، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية عن اختيار هيئة وادي "Tennessee" وشركة "Holtec" لدعم عمليات النشر المبكرة للمفاعلات المعيارية الصغيرة المتقدمة التي تعمل بالماء الخفيف في الولايات المتحدة الأمريكية، بتمويل يبلغ نحو 800 مليون دولار، ويشمل تسريع نشر مفاعل نووي "GE Vernova Hitachi BWRX-300" في موقع "Clinch River" النووي في ولاية "Tennessee"، ونشر مفاعلين نوويين من طراز "SMR-300" في موقع محطة "Palisades" لتوليد الطاقة النووية في ولاية "Michigan". هذا وتجدر الإشارة إلى أن هيئة التنظيم النووي الأمريكية (NRC) أعلنت الموافقة على تجديد 13 ترخيص لمفاعلات نووية خلال عام 2025 بقدرة إجمالية تبلغ 12 ألف ميغاواط على مدى العشر سنوات القادمة.

ومن جانبها، واصلت الصين تعزيز موقعها كقوة نووية عالمية خلال الربع الرابع من 2025، حيث بدأت الوحدة الثانية من مشروع محطة "Zhangzhou" للطاقة النووية باستخدام تقنية "Hualong One"¹، بتحميل أول دفعة من الوقود النووي في شهر أكتوبر 2025، وهو ما يعني الانتقال إلى مرحلة التشغيل التجريبي، قبل الربط بالشبكة الكهربائية. هذا ومن المخطط أن يضم المشروع ست وحدات من مفاعلات "Hualong One"، ما يجعله أكبر قاعدة نووية من نوعها على مستوى العالم، وبمجرد اكتماله وتشغيله بالكامل، من المتوقع أن يُنتج حوالي 60 مليار كيلوواط/ساعة من الكهرباء النظيفة سنوياً، وهو ما يكفي لتلبية حوالي 75% من إجمالي الطلب على الطاقة في مدينتي "Xiamen" و "Zhangzhou" بمقاطعة "Fujian" في جنوب شرق الصين. ونجحت الصين أيضاً في تحقيق إنجاز بارز في مجال الاندماج النووي خلال شهر أكتوبر 2025، تمثل في تطوير مشروع تكنولوجيا "الشمس الاصطناعية" من الجيل التالي، وهو أكبر نموذج أولي للمحول في العالم صُمم ليتحمل حرارة ثابتة تبلغ 20 ميغاواط لكل متر مربع، مما يساهم في ضمان التشغيل المستقر لقلب المفاعل، وتحقيق الاكتفاء الذاتي في الوقود النووي لمفاعلات الاندماج النووي. ويمثل المشروع خطوة رئيسية نحو إنتاج طاقة اندماج نووي مستقبلية تحاكي الطاقة الشمسية، وتوفر مصدراً مستداماً من الطاقة النظيفة. كما حقق جهاز "Tokamak" للبلازما التجريبي فائق التوصيل، وهو جهاز صغير الحجم لتجارب الاندماج النووي قيد الإنشاء في مدينة "Hefei" بمقاطعة "Anhui" الواقعة شرق الصين، إنجازاً هاماً بتركيب أول مكون رئيسي له بنجاح، وهو قاعدة "Dewar"، مما يمثل تقدماً نحو أول توليد للكهرباء في العالم من طاقة الاندماج النووي. وتم افتتاح أول مركز تعاون تابع للوكالة الدولية للطاقة الذرية في العالم لأبحاث وتدريب طاقة الاندماج النووي، تم إنشاؤه في جنوب غرب الصين. وفي شهر نوفمبر 2025، أطلقت الصين برنامجاً علمياً دولياً يركز على أبحاث بلازما الاندماج النووي، حيث قام علماء الاندماج النووي من أكثر من عشر دول، منها فرنسا والمملكة المتحدة وألمانيا، بالتوقيع على إعلان "Hefei" للاندمج النووي، الذي يهدف إلى تشجيع الباحثين في جميع أنحاء العالم على المشاركة في جهود أبحاث الاندماج النووي في الصين.

¹ تقنية مفاعلات الماء المضغوط من الجيل الثالث، هي تقنية صينية الصنع تتمتع بحقوق ملكية فكرية مستقلة تماماً، وبفضل التقدم المطرد في نشرها المعياري واسع النطاق، أصبحت أكثر تقنيات الجيل الثالث النووية استخداماً في العالم، سواء في المفاعلات العاملة أو المفاعلات قيد الإنشاء.

وفي أوروبا، عُقدت قمة الاستثمار النووي لدول الشمال والبلطيق في مدينة ستوكهولم بالسويد في شهر أكتوبر 2025، حيث وقعت السويد وفنلندا وإستونيا ولاتفيا وبولندا على إعلان مشترك يدعم دور الطاقة النووية في تعزيز أمن الطاقة والتنافسية ومواجهة تغير المناخ، مع التأكيد على أن محطات الطاقة النووية الجديدة تسهم في تلبية احتياجات الكهرباء المستقرة. ويأتي هذا الإعلان في سياق تغير سياسات الطاقة في أوروبا، حيث تم اقتراح توسيع إمكانية بناء محطات نووية جديدة وفتح تشريعات تسمح باستثمارات أكبر، فيما تسعى الشركات والهيئات الصناعية إلى تعزيز الحوار حول نشر تقنيات نووية جديدة مثل المفاعلات الصغيرة (SMRs)، مما يعكس اهتماماً متزايداً بتحقيق أمن الطاقة وتنويع مصادرها وخفض الانبعاثات. وفي شهر نوفمبر، دعت المفوضية الأوروبية إلى إبداء الآراء للمساهمة في صياغة استراتيجيتها للمفاعلات المعيارية الصغيرة، تهدف إلى تسريع تطوير ونشر تلك المفاعلات في أوروبا خلال العقد القادم، وتتضمن ثلاثة محاور وهي: أولاً، طموح الاتحاد الأوروبي للوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2050. ثانياً، جهود الاتحاد الأوروبي للتخلص التدريجي من واردات الطاقة الروسية. ثالثاً، تحسين القدرة التنافسية لاقتصاد الاتحاد الأوروبي. وفي هذا السياق، تجدر الإشارة إلى أن أكثر من 10 دول من الاتحاد الأوروبي، أعربت في خطتها الوطنية النهائية المحدثة للطاقة والمناخ، عن اهتمامها بتطوير ونشر المفاعلات المعيارية الصغيرة خلال العقد المقبل، إلى جانب نشر مصادر الطاقة المتجددة، للمساعدة في خفض انبعاثات الكربون. كما صوت البرلمان السويدي في شهر نوفمبر 2025 على إنهاء حظر تعدين اليورانيوم اعتباراً من عام 2026، حيث تُساهم الطاقة النووية بنحو 30% من احتياجات السويد من الطاقة، ولديها ستة مفاعلات نووية عاملة، وتعمل على إنشاء مستودع تحت الأرض للوقود النووي المستهلك لتخزين نحو 12 ألف طن متري من الوقود النووي. وفي شهر ديسمبر 2025، وافقت المفوضية الأوروبية على تمويل بولندا لأول محطة طاقة نووية لها بمساعدات تُقدر بحوالي 14.2 مليار يورو، حيث من المقرر إنشاء المحطة في موقع "Lubiatowo-Kopalino" على ساحل بحر البلطيق في منطقة "Pomerania"، مع توقع بدء بناء المفاعل الأول في عام 2028، على أن يتم الانتهاء من الوحدة الأولى بحلول عام 2035.

أما على مستوى الدول العربية، فقد وقعت المملكة العربية السعودية اتفاقية "تاريخية" للتعاون في قطاع الطاقة النووية المدنية مع الولايات المتحدة الأمريكية في شهر نوفمبر 2025، والتي ترسخ الأساس لشراكة طويلة الأمد وصادرات محتملة من اليورانيوم المخصب إلى المفاعلات النووية في الولايات المتحدة الأمريكية. وحققت دولة الإمارات العربية المتحدة خطوات تنفيذية ملموسة، حيث قامت شركة "Framatome" الأمريكية بتصنيع أولى مجموعات وقود الرصاص لمحطة بركة للطاقة النووية التابعة لشركة الإمارات للطاقة النووية في شهر نوفمبر 2025، وذلك بموجب اتفاقية توريد الوقود التي سبق الإعلان عنها في شهر يوليو من نفس العام. كما وقعت شركة الإمارات للطاقة النووية مذكرة تفاهم مع شركة كوريا للطاقة الكهربائية تهدف لتوسيع التعاون في مجالات التقنيات النووية المتقدمة، بما في ذلك التقييم المشترك للمفاعلات المعيارية الصغيرة، وأنظمة المفاعلات المتقدمة، وابتكار دورة الوقود النووي، وإدارة النفايات المشعة، وأبحاث السلامة النووية، فضلاً عن تسهيل التعاون في مشروعات الطاقة النووية المحتملة في دول أخرى. وفي جمهورية مصر العربية، تم تسليم وعاء ضغط المفاعل للوحدة الأولى من محطة الضبعة للطاقة النووية في أكتوبر 2025، واكتمل صب الخرسانة للطابق الثالث من نظام التحكم في العمليات في الوحدة الثانية، كما تم صب الخرسانة لقاعدة مبنى الخدمات النووية في الوحدة الرابعة. وفي شهر نوفمبر 2025، تم توقيع اتفاقية مع شركة "Rosatom" الروسية لشراء وقود نووي، وكذلك اتفاقية تعاون شاملة، تزامناً مع تدشين تركيب وعاء ضغط المفاعل للوحدة الأولى من المحطة النووية.

■ التطورات في المعادن الحرجة

أصبحت المعادن الحرجة اللازمة لتحويلات الطاقة مثل الليثيوم والنيكل والكوبالت والجرافيت والنحاس والعناصر الأرضية النادرة الأخرى، محوراً رئيسياً في سياسات الطاقة والتجارة العالمية، ويعزى ذلك بشكل رئيسي إلى أهميتها البالغة في صناعة السيارات الكهربائية، وشبكات الكهرباء، وتقنيات الطاقة المتجددة. في هذا السياق، واصلت الولايات المتحدة الأمريكية مساعيها لتعزيز قدراتها في مجال المعادن الأرضية النادرة، حيث أعلن الرئيس الأمريكي عن رغبته في الاستحواذ على جزيرة جرينلاند² الواقعة في القطب الشمالي، والتابعة لمملكة الدنمارك، بفضل ما تزخر به من كميات كبيرة جداً من المعادن الأرضية النادرة والاستراتيجية، مثل الجرافيت والنحاس والنيكل والزنك والكوبالت، اللازمة لتقنيات تحويلات الطاقة، بما في ذلك بطاريات الليثيوم أيون والألواح الشمسية الكهروضوئية وتوربينات الرياح وشبكات الكهرباء والسيارات الكهربائية. حيث تشير تقديرات المسح الجيولوجي الدنماركي إلى أن جزيرة جرينلاند تحتوي على 36.1 مليون طن من المعادن الأرضية النادرة والاستراتيجية. في حين تقدر وكالة المسح الجيولوجي الأميركية أن 1.5 مليون طن منها قابلة للاستخراج اقتصادياً، حيث يوجد 37 من أصل 60 معدن تصنفها الولايات المتحدة كمعادن حرجة، على الرغم من كونها غير مستغلة إلى حد كبير، بسبب الظروف البيئية القاسية ونقص البنية التحتية والعوائق التنظيمية والتحديات اللوجستية والهندسية الكبيرة الناجمة عن مساحة الجزيرة الشاسعة، فهي أكبر جزيرة في العالم بمساحة تتجاوز 2.17 مليون كيلومتر مربع، وهي أكبر من مملكة الدنمارك نفسها بنحو 50 مرة، تغطي نحو 80% من مساحتها طبقة جليد دائمة، وتُصنف كثاني أكبر كتلة جليدية في العالم بعد قارة أنتاركتيكا، مما يستلزم استثمارات ضخمة.

ويُعد منجم "Kvanefjeld" الواقع في جزيرة جرينلاند أحد أهم المشروعات غير المطورة على مستوى العالم، حيث يمتلك إمكانات هائلة ليصبح مورداً أساسياً للمعادن الأرضية النادرة – لا سيما مجموعة "المعادن المغناطيسية" (neodymium، praseodymium، terbium، dysprosium) اللازمة لتقنيات الطاقة المتجددة ومحركات السيارات الكهربائية والهواتف الذكية،

² تتمتع جزيرة جرينلاند بالحكم الذاتي منذ يونيو 2009، وتم نقل صلاحيات استغلال الموارد المعدنية إليها اعتباراً من يناير 2010، مع مشاركة الدنمارك كشريك متساوي في السياسات الخارجية المتعلقة بذلك.

وتشير التقديرات إلى أن هذا المنجم يحتوي على احتياطيات كبيرة من الموارد المعدنية تكفي لتشغيله لمدة تزيد عن 37 عاماً. وفي حال المضي قدماً في المشروع، سيصبح منجم "Kvanefjeld" أحد أكبر مصادر المعادن النادرة في العالم، وخامس أكبر منجم لليورانيوم. ولكن في المقابل، يواجه هذا المشروع تحدياً رئيسياً، يتمثل في قانون برلمان جرينلاند رقم "20" الصادر في ديسمبر 2021، والذي يحظر التنقيب عن أي مورد معدني أو استكشافه أو استغلاله إذا تجاوز متوسط محتوى اليورانيوم فيه 100 جزء في المليون، وهو ما يقل عن تركيز اليورانيوم المختلط بالعناصر الأرضية النادرة في منجم "Kvanefjeld" البالغ حوالي 360 جزء في المليون. هذا وتجدر الإشارة إلى إقرار جزيرة جرينلاند لقانون المناجم الجديد (Mining Act) الذي دخل حيز التنفيذ في 1 يناير 2024، ويُعد الإطار التشريعي الأساسي لأنشطة الاستكشاف والتنقيب والاستخراج للموارد المعدنية في الجزيرة، ويستبدل هذا القانون الأنظمة السابقة بإجراءات أكثر وضوح وشفافية لمنح رخص الاستكشاف والاستغلال، مع تقليص البيروقراطية دون الإخلال بمتطلبات تقييم الأثر البيئي والاجتماعي، التي أصبحت شرطاً أساسياً قبل أي ترخيص نهائي. كما يشدد القانون على تسجيل الشركات محلياً، وتعزيز مشاركة العمالة والموردين من داخل الجزيرة، وربط عائدات التعدين بأهداف التنمية الاقتصادية طويلة المدى وتقليص الاعتماد على دعم الدنمارك.

وتُعاني جزيرة جرينلاند من قيود تتعلق بطبيعة مواردها المالية الحكومية في قطاع التعدين، حيث تعتمد بشكل كبير على الدنمارك التي تُقدم دعم سنوي للجزيرة يبلغ حوالي 511 مليون دولار³، أي ما يُمثل نحو 20% من الناتج المحلي الإجمالي لجزيرة جرينلاند، مما يدفعها إلى الاعتماد كلياً على شركات خاصة من دول أخرى، مثل الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الأوروبي وأستراليا، لتغطية تكاليف إنشاء المشروعات. وفي هذا السياق، قدم بنك التصدير والاستيراد الأميركي في شهر يونيو 2025 قرصاً بقيمة 120 مليون دولار لتطوير مشروع "Tanbreez" للمعادن النادرة الواقع في جنوب جزيرة جرينلاند، كما قام صندوق التصدير والاستثمار الدنماركي بزيادة حصته في شركة "Amaroq" الكندية المالكة لمحظة من مواقع المعادن الحيوية في جنوب الجزيرة، وأبدى اهتماماً أيضاً بتمويل مشروع "Amitsoq" للجرافيت الذي تم تصنيفه كمشروع استراتيجي

³ يُخصم من الدعم السنوي المالي الذي تقدمه الدنمارك لجزيرة جرينلاند نصف قيمة أي إيرادات تعدين تتجاوز حوالي 11 مليون دولار سنوياً، وذلك لتشجيع الاستثمار المحلي وجني الفوائد الاقتصادية.

للاتحاد الأوروبي، مما أتاح للمشروع الحصول على التمويل والدعم اللازم. ووقع الاتحاد الأوروبي وحكومة جزيرة جرينلاند في نوفمبر 2023 مذكرة تفاهم لإقامة شراكة استراتيجية تهدف إلى تطوير سلاسل قيمة مستدامة للمعادن الحرجة، بما يعزز أمن الإمدادات الأوروبية ويدعم التحول الأخضر. وقد استحوذت وزارة الطاقة الأمريكية في شهر أكتوبر 2025 على حصة 5% من أسهم شركة "Lithium Americas"، وحصة أخرى بنسبة 5% في مشروع منجم "Thacker Pass" المشترك مع شركة "General Motors"، وهو أكبر رواسب الليثيوم المعروفة في الولايات المتحدة، ويعتقد أنه يمتلك القدرة على تلبية ما يصل إلى 25% من الطلب العالمي على الليثيوم. كما وقعت الولايات المتحدة الأمريكية اتفاقية إطارية ثنائية بشأن المعادن الحيوية والعناصر الأرضية النادرة مع أستراليا، حيث ستوفر تلك الاتفاقية، التي تُعرف باسم "إطار الولايات المتحدة وأستراليا لتأمين الإمدادات في مجال تعدين ومعالجة المعادن الحيوية والعناصر الأرضية النادرة"، سلسلة إمداد آمنة بين الولايات المتحدة وأستراليا لهذه المعادن اللازمة للدفاع والتقنيات المتقدمة الأخرى، من خلال اتخاذ إجراءات لتوفير ما لا يقل عن 1 مليار دولار لكل منهما كاستثمارات ضمن مجموعة مشروعات للمعادن الحرجة ذات الأولوية في الدولتين، يبلغ إجماليها 8.5 مليار دولار، خلال الستة أشهر المقبلة. وفي هذا السياق، أعلنت أستراليا عن التزامات مالية لمشروعين من هذه المشروعات ذات الأولوية، أولهما، مشروع "Alcoa-Sojitz" لاستخراج الغاليوم في غرب أستراليا، الذي سيوفر نحو 10% من إجمالي إمدادات الغاليوم العالمية، وهو عنصر أساسي في الصناعات الدفاعية وأشباه الموصلات. وثانيهما، مشروع "Arafura Nolans" الذي سَيُنْتِج بمجرد تشغيله نحو 5% من إمدادات العناصر الأرضية النادرة العالمية، وهي عناصر حيوية لأمن الطاقة والدفاع.

وتجدر الإشارة إلى التقرير الصادر عن الحكومة الأمريكية في أكتوبر 2025، الذي بين اعتماد الولايات المتحدة بنسبة 100% على الواردات من 12 معدناً حرجاً، وبنسبة تزيد عن 50% على الواردات من 29 معدناً آخر. كما أوضح أنه على الرغم من استخراج بعض هذه المعادن داخل الولايات المتحدة، فإنها تُصدر الخام أو الأوكسيد غير المعالج لإعادة معالجته في الخارج، ثم يُعاد استيراده، مما يزيد من الاعتماد على مصادر خارجية ويضعف مواقع التصنيع المحلية. وأبرز التقرير أن ضعف القدرة على المعالجة والتكرير داخل الولايات المتحدة الأمريكية يُجبر القطاعات الاستراتيجية على الاعتماد على سلاسل إمداد خارجية. واستجابة لهذه النتائج، تم اتخاذ قرار بالدخول

في مفاوضات مع الشركاء التجاريين للتوصل إلى اتفاقيات من شأنها تعديل واردات المعادن الحرجة المعالجة ومنتجاتها، مع وجود خيار لفرض إجراءات بديلة في حال عدم التوصل إلى اتفاقات مناسبة خلال 180 يوماً، ومنها فرض حد أدنى لأسعار الاستيراد أو رسوم جمركية على بعض المعادن.

وفي شهر نوفمبر 2025، أعلنت الولايات المتحدة الأمريكية عن إضافة كل من النحاس والفضة والزنك والرصاص والباريت إلى قائمة "المعادن الحرجة" التي تُحدثها هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية كل ثلاثة أعوام، ليُصبح المجموع 60 معدناً تُصنفها الولايات المتحدة الأمريكية كمعادن حرجة. وبينما كان من المتوقع على نطاق واسع إضافة النحاس، فإن إدراج الفضة ضمن قائمة المعادن الحرجة الأمريكية قد يُحدث اضطراباً في الأسواق في حال فرض رسوم جمركية عليه.

ومن جانبها، اتخذت الصين خلال الربع الرابع من عام 2025 خطوات لتشديد سيطرتها على تصدير المعادن الحرجة، حيث أعلنت وزارة التجارة الصينية في أكتوبر 2025 عن تشديد الضوابط على صادرات المعادن الأرضية النادرة والمغناطيسات الدائمة، لتشمل تطبيق قاعدة المنتج الأجنبي المباشر "foreign direct product rule" للمرة الأولى على الإطلاق، وهي آلية طُبقت عام 1959 واستخدمتها الولايات المتحدة الأمريكية لفترة طويلة لتقييد صادرات أشباه الموصلات إلى الصين.

وبموجب تلك الإجراءات، سيُطلب من الشركات الأجنبية الحصول على موافقة الحكومة الصينية لتصدير المغناطيسات التي تحتوي على كميات ضئيلة من المعادن الأرضية النادرة صينية المنشأ، أو التي قد يكون تم إنتاجها باستخدام تقنيات صينية للتعيين أو للمعالجة أو تصنيع المغناطيس. كما سيُطبق إطار الترخيص الجديد على المغناطيسات المصنوعة من المعادن الأرضية النادرة⁴ في الخارج، وعلى مواد أشباه الموصلات المُختارة التي تحتوي على ما لا يقل عن 0.1% من المعادن الأرضية النادرة الثقيلة المُستوردة من الصين. مع الأخذ في الاعتبار بأن الصين تستحوذ على 70% من الإنتاج العالمي من المعادن الأرضية النادرة، وتمتلك طاقة تكرير وفصل تمثل نحو 90% من القدرة العالمية، كما تهيمن على 93% من صناعة المغناطيسات باستخدام المعادن الأرضية النادرة. كما سيتم رفض طلبات استخدام المعادن النادرة لأغراض عسكرية بشكل تلقائي بهدف منع المساهمات

⁴ المغناطيسات المصنوعة من المعادن الأرضية النادرة هي فئة من المغناطيسات الصناعية عالية القوة التي تعتمد في تركيبها على عناصر من مجموعة الأرض النادرة مثل النيوديميوم والديسبروسيوم والتريبيوم، تتميز بقوة مغناطيسية عالية جداً مقارنة بالأنواع التقليدية، وثبات حراري وقدرة على العمل في درجات حرارة مرتفعة، فضلاً عن الحجم صغير، ما يجعلها مثالية للأجهزة الدقيقة والمحركات عالية الأداء.

المباشرة أو غير المباشرة للمعادن النادرة الصينية المنشأ أو التقنيات ذات الصلة في سلاسل التوريد الدفاعية الأجنبية. وسيتم منع المواطنين الصينيين من المشاركة في أو تقديم الدعم للمشروعات الخارجية التي تنطوي على استكشاف أو استخراج أو معالجة أو تصنيع المغناطيس من المعادن الأرضية النادرة، إلا بعد الحصول على تصريح من السلطات الصينية.

وشهدت صادرات الصين من العناصر الأرضية النادرة ارتفاعاً ملحوظاً في نوفمبر 2025، لتصل إلى 5493.9 طن متري، بزيادة نسبتها 26.5% على أساس شهري، وقد يعزى ذلك إلى توصل الصين والولايات المتحدة الأمريكية إلى اتفاق مشترك بشأن تسريع شحنات المعادن الحرجة من أكبر مصفاة للمعادن الأرضية النادرة في الصين إلى الأسواق العالمية. وفي شهر ديسمبر 2025، أعلنت وزارة التجارة الصينية عن منحها عدة تراخيص عامة لتصدير المعادن الأرضية النادرة، وهي فئة جديدة من التراخيص تهدف إلى تسريع شحن هذه المعادن الحرجة.

الجدير بالذكر أن الصين تسعى هي الأخرى للاستفادة من المعادن الأرضية النادرة الموجودة في جزيرة جرينلاند، حيث دخلت شركة "Leshan Shenghe" الصينية للمعادن الحرجة في شراكة مع حكومة جرينلاند في عام 2016، لتستحوذ على حصة 10.5% من مشروع "Kvanefjeld". كما قامت شركة "Shenghe Resource" الصينية في يناير 2019، بتأسيس شركة مشتركة مع شركات تابعة للمؤسسة الوطنية الصينية للطاقة النووية لإنشاء مشروعات لتجارة ومعالجة المعادن الأرضية النادرة، ولكن قوانين جزيرة جرينلاند عطلت أي تقدم فعلي لتلك المشروعات حتى الآن.

واستجابة للاضطرابات في سلاسل إمدادات المعادن الحرجة، قامت المفوضية الأوروبية بإطلاق خطة جديدة للمعادن الحرجة "RESouceEU" في ديسمبر 2025، تستهدف بناء قدرة إنتاجية ذاتية وتقليل الاعتماد على مورد واحد، بما يساهم في تعزيز الأمن الاقتصادي والصناعي، من خلال تسريع الإستراتيجية الأوروبية للمعادن الحرجة، وتكريس مبادئ القانون الأوروبي للمعادن الحرجة الصادر في عام 2024، والذي حدد أهدافاً طموحة لتأمين الإمدادات بحلول عام 2030، منها زيادة طاقة الاستخراج المحلية إلى 10%، والمعالجة إلى 40%، وإعادة التدوير إلى 25% من إجمالي الاستهلاك الأوروبي من المعادن الحرجة الاستراتيجية، مع اشتراط ألا تتجاوز نسبة اعتماد الاتحاد الأوروبي على دولة واحدة أكثر من 65% من احتياجاته من تلك المعادن، بهدف تنويع

سلاسل الإمدادات. حيث تحتل المعادن الحرجة أهمية متزايدة في اقتصادات دول أوروبا، لكونها من المتطلبات الرئيسية لدعم وتعزيز تحولات الطاقة والتحول الرقمي وصناعة التقنيات المتقدمة، وتُعد المعادن مثل الليثيوم والكوبالت هي الأساس لتصنيع البطاريات، والمحركات الكهربائية، والألواح الشمسية، والتوربينات الهوائية، بالإضافة إلى استخداماتها في قطاعات الطاقة المتجددة والذكاء الاصطناعي. ومن ثم، فإن الدول التي تملك القدرة على استخراج وتصنيع تلك المعادن ورفع قيمتها السوقية ستجني عوائد كبيرة وستحظى بأهمية استراتيجية عالمية وتحقق الاستقلالية الاقتصادية والجيوسياسية. كما تعتمد دول أوروبا حالياً بدرجة كبيرة على الواردات الخارجية من المعادن الحرجة، وأهمها الواردات من الصين، التي تستحوذ على الجزء الأكبر من سلاسل القيمة العالمية لتلك المعادن، مما يقوض قدرة المصانع الأوروبية على ضمان استدامة الإمدادات اللازمة، لا سيما في ظل الإجراءات الأخيرة التي قامت الصين باتخاذها للحد من صادرات المعادن الحرجة النادرة المستخدمة في صناعة المغناطيس الدائم (يتمتع بقدرة على توليد مجال مغناطيسي مستمر دون الحاجة إلى مصدر طاقة خارجي، ويبقى ممغنط لفترات طويلة، وهو مكون أساسي في عدد كبير من التقنيات الحديثة، مثل صناعة السيارات الكهربائية وتوربينات الرياح).

وترتكز خطة أوروبا الجديدة للمعادن الحرجة "RESourceEU" على حزمة تمويل كبيرة تبلغ نحو 3 مليار يورو لتسريع المشروعات الاستراتيجية، تبدأ في عام 2026. حيث يخصص صندوق الاستثمار الاستراتيجي بقيادة بنك الاستثمار الأوروبي "Invest EU" مبلغ 2 مليار يورو، لتمويل مشروعات المعادن الحرجة في الاتحاد الأوروبي على امتداد سلسلة القيمة، بدءاً من البحث والتطوير وصولاً إلى الإنتاج. كما سيقوم صندوق الابتكار التابع للاتحاد الأوروبي - المتخصص في الصناعات منخفضة الكربون - بتوفير حوالي 700 مليون يورو إضافية لتصنيع التقنيات النظيفة، مثل البطاريات والمغناطيس الدائم. كما قرر الاتحاد الأوروبي تخصيص برنامج "Battery Booster"، بميزانية قدرها 1.8 مليار يورو، لتمويل مشروعات المعادن الحرجة الأساسية المستخدمة في صناعة البطاريات، لا سيما الليثيوم والكوبالت والنيكل والمنجنيز والجرافيت، بما يصل إلى 300 مليون يورو. إضافة إلى ذلك، سيتم إطلاق مجموعة شركات بحثية ضمن برنامج "Horizon Europe" بقيمة نحو 300 مليون يورو، مع دعم مناجم المعادن الحرجة المستدامة خارج أوروبا من خلال

مبادرة "Global Gateway" وهي مبادرة الاتحاد الأوروبي لمنافسة مبادرة "الحزام والطريق" الصينية، لمشروعات التعدين الاستراتيجية للمعادن الحرجة خارج الاتحاد الأوروبي، لضمان الحصول على الأولوية في التصدير إلى الدول الأوروبية.

وعلى صعيد السياسات، تتضمن خطة أوروبا الجديدة للمعادن الحرجة "RESourceEU" تسريعاً كبيراً في إجراءات الترخيص لمشروعات التنقيب ومشروعات المعالجة الناشئة، حيث تعتمد المفوضية الأوروبية إصدار وثيقة إرشادية لمساعدة الدول الأعضاء على تنسيق وتبسيط إجراءات التصريح البيئي لمشروعات التعدين والمصانع المعالجة، ومراجعة اللوائح والقوانين التنظيمية لتوازن بين السلامة البيئية والحاجة إلى بناء سلاسل الإمدادات. كما تتضمن خطة أوروبا الجديدة للمعادن الحرجة "RESourceEU" عدداً من الإجراءات الملموسة، من أهمها:

- خفض الاعتماد على أي مورد أجنبي منفرد بنسبة تتراوح بين 30 إلى 50% بحلول عام 2029، فيما يخص البطاريات والمعادن الأرضية النادرة.
- تسريع المشروعات من خلال فرض مواعيد نهائية صارمة تتراوح بين 12 إلى 36 شهر للحصول على التراخيص أو غيرها من الخطوات الإدارية الرئيسية.
- تعزيز تدابير دعم الطلب، بما في ذلك خيار تحديد حد أدنى للسعر لتعزيز الإمدادات غير الصينية.
- إنشاء مركز أوروبي رئيسي جديد للمعادن الحرجة الحيوية في الاتحاد الأوروبي، يتولى إدارة الاستثمار والتخزين والتفاوض والشراء المشترك. وستبدأ دول الاتحاد الأوروبي في تخزين المعادن الحرجة خلال العام القادم 2026.
- اتخاذ إجراءات لتقييد تصدير المواد الخام من البطاريات المستعملة ومخلفات المغناطيس من دول الاتحاد الأوروبي، مما سيضمن توفيرها لشركات إعادة التدوير في أوروبا، ويسهم في إنتاج إمدادات أوروبية من المعادن الحرجة، حيث لا تتعدى نسبة إعادة تدوير تلك المواد في أوروبا 1%.
- وهنا تجدر الإشارة إلى أن النفايات كانت تُصدر في السابق من الاتحاد الأوروبي إلى آسيا، لا سيما الصادرات من الكتلة السوداء وهي المادة الداكنة الناتجة عن تفكيك وطحن بطاريات الليثيوم أيون المستعملة بعد نزع الأغلفة المعدنية والبلاستيكية منها، وتشمل بشكل رئيسي الليثيوم، والكوبالت، والنيكل، والمنجنيز، والجرافيت، وهي جميعها من المعادن الحرجة أو المرتبطة بها.

وبناء على ما تقدم، تمثل خطة أوروبا الجديدة للمعادن الحرجة "RESourceEU" استمراراً للتحول الاستراتيجي في إدراك دول الاتحاد الأوروبي لأهمية تأمين سلاسل الإمداد كجزء لا يتجزأ من أمنها الاقتصادي والجيوسياسي، حيث سيتم توفير تمويل كبير لمشروعات التعدين في أوروبا، مما قد يُخفف من العجز المُتوقع مستقبلاً في بعض المعادن، مثل الليثيوم. ولكن رغم ما تنطوي عليه هذه الخطة من طموحات كبيرة وأدوات تمويل وتنظيم غير مسبوقة، فإن نجاحها سيظل مرهوناً بقدرة الدول الأوروبية على تسريع التنفيذ، وتحقيق توازن دقيق بين الاعتبارات البيئية وتحقيق استقلال صناعاتها. حيث من المرجح أن يستغرق وصول الإمدادات إلى السوق وقتاً، لا سيما وإن رأس المال وحده لا يمكنه حل مشكلة الحصول على التراخيص والموافقات المطولة في الاتحاد الأوروبي، كما إنه لا يُعالج مشكلة معارضة المجتمعات المحلية لمشروعات التعدين. ومن جانب آخر، قد يؤثر تخزين المعادن الحرجة في الاتحاد الأوروبي على أسعارها السوقية، ويزيد من تقلباتها.

وقامت العديد من الدول العربية باتخاذ خطوات بارزة نحو الدخول بفاعلية في أسواق المعادن الحرجة العالمية. فعلى سبيل المثال لا الحصر، أعلنت وزارة الصناعة والثروة المعدنية بالمملكة العربية السعودية في نوفمبر 2025، أن اكتشافات المعادن الأرضية النادرة قيمتها 375 مليار ريال، وأن الدراسات التفصيلية التي أجريت في 6 مواقع واعدة لهذه المعادن أسفرت عن تأكيد وجود موقعين يحتويان على موارد تُقدر بنحو 644 مليون طن، مع تحديد 4 مواقع أخرى كأهداف استكشافية واعدة، بإجمالي تقديرات ما بين 364 إلى 714 مليون طن. ويُعدّ منجم جبل صايد من أحدث الاكتشافات البارزة، ويُصنف رابع أكبر منجم عالمياً من حيث القيمة التقديرية لرواسب المعادن الأرضية النادرة، مما يتيح تطوير مشروعات مشتركة في الاستكشاف والمعالجة الأولية لإنتاج هذه المعادن. كما وقعت المملكة العربية السعودية إطار عمل استراتيجي مع الولايات المتحدة الأمريكية يهدف إلى تأمين وتعزيز سلاسل إمداد اليورانيوم والمعادن والمغناطيس الدائم وغيرها من المعادن الحرجة. وبموجب هذا الإطار، سيتم العمل على تعزيز أمن واستقرار واستدامة سلاسل الإمداد من خلال الاستفادة من الخبرة الأمريكية في هذا القطاع، والقدرات التعدينية المتنامية في المملكة العربية السعودية، مدعومة بمزاياها الاستراتيجية ومواردها المعدنية الوفيرة. وفي شهر نوفمبر 2025، وقعت شركة التعدين السعودية "معادن" اتفاقية مبدئية ملزمة مع شركة "MP Materials"،

المدعومة من وزارة الحرب الأمريكية، لإنشاء وتشغيل منشأة لتكرير وفصل العناصر الأرضية النادرة في المملكة العربية السعودية، حيث سيستفيد المشروع من المواد الخام السعودية والعالمية ليصبح مركزاً عالمياً لعمليات التصنيع ذات القيمة المضافة، ومساهماً في تطوير منظومة متكاملة وآمنة عالمياً للمعادن الحرجة. وفي شهر ديسمبر 2025، أبرمت شركة "معادن" السعودية للتعدين اتفاقية شراكة مع شركة "المدينة للاستكشاف المحدودة" لإنشاء مشروع يهدف إلى تعزيز جهود التنقيب والتطوير والتعدين للمعادن في المملكة العربية السعودية.

وعززت دولة الإمارات العربية المتحدة من دورها كمركز استثماري في المعادن الحرجة، حيث أعلن في شهر أكتوبر 2025 عن توقيع التزامات قدرها 1.8 مليار دولار بين صندوق الثروة السيادية في أبو ظبي ومؤسسة تمويل التنمية الدولية الأمريكية وشركة "Orion Resource" بهدف الاستثمار في تطوير عمليات المعالجة ودمج حلول تكنولوجية منخفضة التكلفة، بما يعزز أمن سلاسل الإمدادات العالمية من المعادن الحرجة، مثل الليثيوم والعناصر الأرضية النادرة التي تُعد ضرورية لقطاعات صناعية متنوعة، بما في ذلك الإلكترونيات والطاقة المتجددة. وينصب التركيز على الاستثمار في مشروعات التعدين والتكرير التي إما قيد الإنتاج حالياً أو قابلة لبدء العمليات قريباً في الأسواق الناشئة، مما يساهم في تسريع توفير المعادن الحرجة، وتلبية الطلب المتزايد، والحد من الاعتماد على المصادر المحدودة. ويستهدف هذا التعاون زيادة الاستثمارات إلى 5 مليار دولار من خلال استقطاب المزيد من المستثمرين العالميين. وفي شهر نوفمبر، تم الاتفاق بين دولة الإمارات العربية المتحدة وكندا على تعميق التعاون في تطوير سلسلة قيمة المعادن الحرجة، بالاستفادة من قدرات دولة الإمارات العربية المتحدة الكبيرة في مجال الخدمات اللوجستية والاستثمار، ونقاط قوة كندا في الموارد والتكنولوجيا.

وفي جمهورية مصر العربية، تم الإعلان عن قرب تطوير بوابة رقمية للاستثمار التعديني تهدف لتوفير وصول المستثمرين العالميين إلى البيانات الجيولوجية والفرص في قطاع التعدين، مع التوجه لجعل مراحل الاستكشاف أكثر جدوى من خلال تقليل التكاليف الأولية، ومنح إعفاءات ضريبية وجمركية لمعدات ومستلزمات وخدمات الاستكشاف ذات الصلة، بما يساهم في تعزيز الاستثمارات الأجنبية والمحلية. ويأتي ذلك في ظل ما تمتلكه جمهورية مصر العربية من تركيبة

جيولوجية غنية تضم رواسب كبيرة من الفوسفات والذهب والفضة والكوبالت والزنك، فضلاً عن موقعها الاستراتيجي، مما يتيح فرصة للوصول إلى الأسواق العالمية. وفي شهر نوفمبر 2025، تم توقيع مذكرة تفاهم بين الهيئة المصرية للثروة المعدنية وشركة "Xcalibur" الإسبانية المتخصصة في رسم الخرائط الذكية، لإجراء مسح جيوفيزيائي جوي شامل للإمكانات المعدنية على مستوى جمهورية مصر العربية، وتوفير الحلول التقنية اللازمة لتخطيط وتقييم الرواسب الغنية بالمعادن، وهو أول مشروع من نوعه منذ 40 عاماً، ومن المتوقع أن يبدأ خلال الربع الأول من عام 2026.

وفي سلطنة عُمان، تم توقيع مذكرة تفاهم مع تركيا في شهر أكتوبر 2025، بشأن تعزيز تبادل الخبرات في مجال علوم الأرض لاستكشاف فرص جديدة في استكشاف وإنتاج المعادن، مع تبادل المعلومات والبيانات حول مناطق تراخيص التعدين وفرص الاستثمارات، حيث تمتلك سلطنة عُمان إمكانات متنامية من المعادن الحرجة، لا سيما النحاس والألومنيوم والسيليكا وغيرها. وأعلنت شركة تنمية المعادن العمانية في نوفمبر 2025، عن توقيع اتفاقيات مساهمة مع مجموعة "JSW" الهندية، لتصبح شريكاً رئيسياً في مشروع معادن الجنوب، أحد أكثر المشروعات الواعدة في قطاع المعادن الصناعية في سلطنة عُمان.

وتشير إدارة معلومات الطاقة الأمريكية إلى أن أسواق المعادن الحرجة العالمية تبدو أقل شفافية من أسواق الطاقة الأخرى، حيث يتفاقم نقص بيانات الإمدادات والطلب في جميع سلاسل المعادن الحرجة، مما يُعيق اكتشاف الأسعار ويُصعب التحليل والتنبؤ، ويعزى ذلك إلى مجموعة من العوامل الرئيسية، أهمها: تأخر إصدار بيانات إنتاج المعادن الحرجة لمدة قد تصل إلى عام أو أكثر، ونقص بيانات المخزون والاستهلاك المحدثة بانتظام، وافتقار العديد من المعادن الحرجة ذات الصلة بالطاقة إلى نقاط مرجعية معترف بها عالمياً، وصعوبة تقدير تكاليف إنتاج المعادن الحرجة نظراً للاختلافات الجغرافية والإنتاجية والمعايير البيئية، وطول مدة تطوير المشروعات التي تؤدي إلى تقلبات في الأسعار عند ارتفاع الطلب أو انقطاع الإمدادات، وتأثير الابتكارات التكنولوجية على الطلب على المعادن الحرجة - حيث قد يُعقد تطوير تقنيات جديدة لبطاريات السيارات التنبؤ بالطلب المستقبلي على تلك المعادن، وعدم وجود معايير موحدة لتحديد أو تتبع متوسط عمر منتجات الطاقة التي تستخدم معادن حرجة في مختلف الصناعات - مما يُصعب تحديد الوقت المناسب لإعادة التدوير.

▪ تباين السياسات العالمية في كفاءة المركبات بين التشدد والمرونة

أعلنت الصين في شهر ديسمبر 2025 عن اعتماد أول معيار إلزامي عالمي لاستهلاك الطاقة في السيارات الكهربائية المخصصة للركاب، سيدخل حيز التنفيذ اعتباراً من 1 يناير 2026. ويحدد المعيار حداً أقصى لاستهلاك الكهرباء لكل 100 كيلومتر، بناءً على وزن السيارة وخصائصها الفنية، حيث لا ينبغي أن يتجاوز استهلاك سيارة وزنها حوالي 2 طن أكثر من 15.1 كيلوواط/ساعة لكل 100 كيلومتر، مما يتيح للسيارة قطع مسافة أكبر بنحو 7% باستخدام نفس سعة البطارية. وبموجب هذا المعيار، تخضع السيارات الكهربائية لاختبارات صارمة لتحديد استهلاك الطاقة، ضمن مسارات قياسية تشمل ظروف القيادة الحقيقية والاستثنائية، مع تقييم الأداء الفعلي للسيارة وليس فقط السعة النظرية للبطارية. ومن المقرر أن تُلزم الشركات المصنعة بتحديث سياراتها وتقنياتها، لضمان التوافق مع المتطلبات الجديدة لكفاءة الطاقة.

وتسعى الصين من خلال اعتماد هذا المعيار إلى تحقيق أهداف متعددة. فمن الجانب البيئي، سيؤدي خفض استهلاك الطاقة في السيارات الكهربائية إلى تقليل الانبعاثات الكربونية، فضلاً عن تشجيع شركات السيارات على تبني تقنيات موفرة للطاقة، وتحسين تصميم المحركات والإطارات لتقليل الفاقد من الطاقة. أما من جانب الصناعة، فيُعتبر المعيار الجديد أداة استراتيجية لدفع الابتكار التكنولوجي وتعزيز تنافسية الشركات المحلية، حيث يفرض تحديثات تقنية على الطرازات القديمة ويحفز تطوير محركات وأنظمة دفع أكثر كفاءة، وبيّح ربط الحوافز المالية والإعفاءات الضريبية بكفاءة السيارات، لا سيما وأن السيارات الكهربائية ستفقد تلك الحوافز والإعفاءات إذا لم تستوف حدود استهلاك الطاقة الجديدة، بما يوجه الدعم الحكومي نحو المركبات الأكثر كفاءة ويعزز قدرة الصين على التحكم في سلسلة القيمة الصناعية.

بالنسبة لشركات السيارات الصينية الكبرى، فقد أظهرت العديد من الطرازات الحديثة امتثالاً مسبقاً للمعايير الجديدة، مما يمنحها ميزة تنافسية محلية وعالمية. وعلى الرغم من ذلك، فإن الطرازات الأقدم التي لم تحقق استهلاك الطاقة المطلوب ستحتاج إلى تطوير تقني أو تعديل التصميم لتجنب فقدان المزايا الضريبية، حيث قد يتم استخدام مواد أخف وزناً، وتطوير بطاريات أكثر كفاءة مثل بطاريات فوسفات الليثيوم والحديد (LFP)، فضلاً عن استكشاف تكنولوجيا البطاريات الصلبة لتحسين الأداء

ورفع المدى دون زيادة الاستهلاك. كما ستضطر الشركات الأجنبية التي تسوق سياراتها الكهربائية في الصين بدورها إلى الالتزام بالحدود الجديدة لاستهلاك الطاقة لتجنب فقدان الميزة التنافسية.

ويمتد أثر معيار استهلاك الطاقة في السيارات الكهربائية ليشمل سلسلة التوريد العالمية، لا سيما سوق البطاريات والمعادن الحرجة التي تُهيمن الصين على إمداداتها العالمية، فزيادة كفاءة المركبات تقلل الحاجة إلى بطاريات أكبر، مما يخفف نمو الطلب على المعادن الحرجة اللازمة لصناعة البطاريات (الليثيوم والنيكل والكوبالت) وكذلك المعادن الأرضية النادرة، ويعيد توزيع الاستثمارات في قطاع التعدين - بما في ذلك إعادة التدوير، ويحفز تطوير إنتاج البطاريات على مستوى العالم. وبالفعل، تبنت شركات صينية، بشكل متزايد بطاريات فوسفات الليثيوم والحديد وبطاريات أيونية الصوديوم لتلبية المعايير الجديدة وزيادة الأمان، لا سيما وأن هذه البطاريات لا تحتوي على النيكل بنسبة عالية، مما يعني تقليل الاعتماد عليه مقارنة بالبطاريات التقليدية.

أما فيما يخص الانعكاسات المتوقعة على أسواق الطاقة العالمية، فإن التحسن في كفاءة السيارات الكهربائية قد يؤدي إلى تراجع طفيف في طلب الصين على النفط الخام والمنتجات النفطية، ويمكن أن يسهم على المدى المتوسط في تعديل توقعات الطلب العالمي على النفط. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه رغم كون الأثر المباشر على أسواق النفط يبدو محدوداً نسبياً، إلا أن التأثيرات المترابطة لتطبيق المعايير الصارمة على استهلاك الطاقة والكفاءة في أكبر سوق عالمي للسيارات الكهربائية قد تُعيد تشكيل توجهات الاستثمارات في قطاع الطاقة. وفي هذا السياق، يتوقع أن يُشجع هذا المعيار الصين على تسريع الاستثمارات في مصادر الطاقة المتجددة لتلبية احتياجات السيارات الكهربائية، حيث ستصبح تلك السيارات أكثر كفاءة وتستهلك طاقة أقل لكل كيلومتر، ومن ثم سيكون دمج الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح كافياً بشكل أفضل لتلبية الطلب دون التسبب في نقص أو ضغط على الشبكة، لا سيما في ظل انخفاض الطلب الكلي على الكهرباء. وسيدعم هذا التوجه أيضاً تعزيز تكنولوجيا الطاقة النظيفة، مثل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح، ويحفز تطويرها وخفض تكاليفها. كما أن الضغط الصيني لتطبيق معايير كفاءة الطاقة قد يدفع دول أخرى لاعتماد سياسات مماثلة، وهو ما سيجزم إلى تحولات كبيرة في طلب الطاقة.

ويعكس معيار استهلاك الطاقة في السيارات الكهربائية أن الصين تسلك طريقاً مغايراً عن بعض الاقتصادات العالمية الكبرى، حيث أعلن الرئيس الأمريكي في بداية ديسمبر 2025 عن قرار بإعادة ضبط معايير كفاءة استهلاك الوقود في الولايات المتحدة الأمريكية، يلزم شركات صناعة السيارات بتحقيق متوسط كفاءة استهلاك وقود يبلغ 34.5 ميلاً للجالون الواحد بحلول عام 2031، وهو مستوى أقل من الهدف السابق البالغ 50.4 ميلاً للجالون بحلول نفس العام. ويهدف القرار إلى خفض أسعار السيارات، ودعم القدرة التنافسية لشركات السيارات الأمريكية التقليدية التي تعمل بالغازولين، وتقليل الالتزام بالتحول السريع نحو السيارات الكهربائية، في خطوة تعكس التوجه نحو تشجيع صناعة السيارات التقليدية على حساب السياسات البيئية الأكثر صرامة. وتجدر الإشارة إلى أن الرئيس الأمريكي ألغى العقوبات المالية المفروضة على شركات صناعة السيارات التقليدية التي لا تستوفي معايير كفاءة استهلاك الوقود، وأنهى الإعفاء الضريبي للسيارات الكهربائية في نهاية سبتمبر 2025، مما أدى إلى تراجع حاد في مبيعاتها لتشكل نسبتها 5.3% فقط من إجمالي مبيعات المركبات الجديدة في الولايات المتحدة خلال نوفمبر 2025، أي أقل من نصف الرقم القياسي المسجل قبل شهرين. وفي إطار متصل، تم إلغاء قرار ولاية "كاليفورنيا" الأمريكية بحظر بيع المركبات التقليدية التي تعمل بالغازولين بعد عام 2035.

وفي أوروبا، كشفت المفوضية الأوروبية في شهر ديسمبر 2025، عن خطة لرفع الحظر الفعلي الذي يفرضه الاتحاد الأوروبي على السيارات الجديدة ذات محركات الاحتراق الداخلي اعتباراً من عام 2035. وبموجب هذا المقترح، ستتحول أهداف الاتحاد الأوروبي إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 90% مقارنة بمستويات عام 2021، لتحل محل القواعد الحالية التي تشترط أن تكون جميع السيارات والشاحنات الجديدة عديمة الانبعاثات اعتباراً من عام 2035. ومن الجانب العملي، سيظل بإمكان شركات صناعة السيارات بيع عدد محدود من المركبات التي تُصدر انبعاثات ضارة بالبيئة، بدءاً من السيارات الهجينة القابلة للشحن، وصولاً إلى سيارات الديزل، بعد عام 2035. وللقيام بذلك، ستحتاج هذه الشركات إلى تعويض انبعاثات الكربون المسببة للاحتباس الحراري من هذه المركبات (النسبة المتبقية البالغة 10%) باستخدام نوعين من أرصدة الكربون: النوع الأول، سيتم توليده من خلال استخدام الفولاذ منخفض الكربون المصنع في أوروبا في صناعة السيارات. والنوع الثاني، سيأتي من استهلاك الوقود الإلكتروني والوقود الحيوي. ويتضمن المقترح أيضاً

مراجع التقرير:**المحور الأول: التطورات في الطاقات المتجددة**

- Algerian News Agency, Developing renewable energies and increasing their share in the national energy mix is a priority, 7 October 2025.
- Bahrain News Agency, Bahrain to host the world's largest rooftop solar power plant, 2 November 2025.
- Bjreview, The truth behind China's wind power boom, 2 February 2026.
- Clean energy wire, Germany's renewable electricity generation capacity rises 11%, driven by solar, 8 January 2026.
- Daleel, Saudi renewable projects hit 4.5 GW in NREP round, 1 November 2025.
- Eye of Riyadh, TAQA, EWEC announce financial closing for 1GW Al Dhafra Power Plant, 31 December 2025.
- Global energy world, Borkum Riffgrund 3, Orsted's Largest Offshore Wind Farm in Germany, Produces First Power, 5 December 2025.
- International Finance Corporation, World bank group, IFC and AMEA Power Deepen Partnership to Boost Energy Security in Egypt, 18 December 2025.
- Iraq News, Iraq launches renewable energy projects, 12 October 2025.
- IRENA Renewables 2025, Analysis and forecasts to 2030.
- JMK Research, India's 2025 Renewable Energy Sector Review: Key Highlights and Way Forward, 30 December 2025.
- Mercomindia, India's solar power generation rises 22% yoy in 2025 on project commissioning surge, 5 February 2026.
- PR Newswire, 7.8 GWh Saudi Arabia ESS Project Officially Connected to the Grid, 18 December 2025.
- PV magazine, Kuwait shortlists five bidders for 500 MW solar project, 7 Oct. 2025.
- PV magazine, China adds 315 GW of solar in 2025, 28 January 2026.
- Renewables now, Renewables provide record 44% of Britain's power in 2025, 16 January 2026.
- Renewables now, Edison to kick off over 500 MW of new wind, solar in Italy in 2026, 5 December 2025.
- Reuters, China's solar installations up 30% month-on-month in October, 25 November 2025.
- Solar Paces, China connects 9 more CSP projects in 2025 for 27 total, 26 Jan. 2026.
- Solar power world, Solar continues to lead new US electricity deployments, 2 February 2026.

- Solarabic, Algeria adds 400 MW of solar power to its electricity grid, 7 Oct. 2025.
- Solarabic, Iraq announces progress on solar energy projects in 8 governorates, 24 November 2025.
- Solarabic, Egypt signs agreement to build solar power and storage plant in Hurghada, 6 November 2025.
- Solarabic, Ghat, Libya, inaugurates 9 solar power plants to secure drinking water, 29 October 2025.
- Solarabic, Kuwait: Buildings required to produce 10% of their consumption via solar energy, 7 December 2025.
- Think ING, Renewables growth to be driven by shifting priorities, 22 Jan. 2026.
- Trade Arabia, Kuwait issues RFPs for 500MW renewable energy projects, 2 December 2025.
- Transition Zero, A year of solar acceleration: the Q4 2025 Solar Asset Mapper release, 2 February 2026.
- Uisolar, Egypt signs 1.2gw solar plus storage project agreement, 21 Nov. 2025.

المحور الثاني: الهيدروجين كوقود للمستقبل

- Al24news, Green Hydrogen: Algeria Reaffirms Firm Commitment to Strategic Partnership with Europe, 13 November 2025.
- Bloomberg, China rumps up green hydrogen with support from 5-year plan, 17 November 2025.
- Decarbonfuse, Five US Green Hydrogen Projects Begin 2025 Shift to Cleaner Energy, 1 October 2025.
- Egypt Oil & Gas, Egypt Targets 10mt/y of Green Hydrogen with New Investment Push, 1 December 2025.
- EU-Oman Green Hydrogen Forum Summary Report, 30 November 2025.
- Fuel cells work, EU Commission Confirms SouthH2 Corridor Re-Included in PCI List as Key Hydrogen Infrastructure Project, 5 December 2025.
- Global hydrogen hub, China launches its first national green hydrogen subsidy framework, 24 October 2025.
- Hydrogen insight, China surpasses 10 million tonnes of green hydrogen production capacity under development for the first time, 25 November 2025.
- JMK research and analysis, India quarterly green hydrogen, Q4 2025.
- JSW, JSW Energy Commissions its first Green Hydrogen Plant, 11 Nov. 2025.
- Masdar, OMV and Masdar sign binding agreement to develop and operate new 140 MW green hydrogen plant in Austria, 6 November 2025.
- Nzero, U.S. DOE Cuts Hydrogen Funding: Implications for Building Decarbonization, 20 October 2025.

- Renewables now, Saudi Arabia's Neom green hydrogen project is 90% complete, 23 December 2025.
- Reuters, China's first coal to chemicals project with green hydrogen starts commercial operations, 21 November 2025.
- S&P global, Green hydrogen developers reckon with reality check in Europe, 5 November 2025.
- S&P global, Chinese hydrogen producers target cost of production reductions, 10 November 2025.
- Sunrise commodity data group, China's Annual Green Hydrogen Production Exceeds 220,000 Metric Tons, Leading Globally in Multiple Technical Indicators, 2 December 2025.
- Tank terminals, SARCO, Go Energy Explore Green H2 Project in Saudi Arabia, 15 October 2025.
- Univdatos, India Green Hydrogen Market Highlights, 9 January 2026.
- Utilities middle east, SNOG, Siemens Energy and Decahydron explore natural hydrogen potential in Sharjah, 5 November 2025.
- West wood energy, Hydrogen Compass – Nov., Dec. 2025 and Jan. 2026.
- Wood Mackenzie, The 5 key takeaways from Wood Mackenzie's Hydrogen Conference 2025, 2 December 2025.
- Zawya, SARCO, UAE's Go Energy to explore green hydrogen project in Saudi Arabia, 12 October 2025.

المحور الثالث: تحولات الطاقة

الاستثمارات العالمية في تحولات الطاقة

- BloombergNFE, Energy transition investments trends, February 2026.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), Fostering a just energy transition: A framework for policy design, January 2026.
- Sustainability Simplified, Why the energy transition still wins in 2026, 30 January 2026.
- United Nations Development Program (UNDP), The Saudi shift: laying the groundwork for a clean energy future, 2 October 2025.

التطورات في الطاقة النووية

- China daily, World's first IAEA collaboration center for fusion energy research, training established in SW China, 15 October 2025.
- China national nuclear corporation, Unit 2 of CNNC Zhangzhou Nuclear Power approved for fuel loading, 20 October 2025.

- Chinesees academy for science, China Achieves Milestone in Compact Fusion Project with Key Component Installation, 10 October 2025.
- Chinesees academy for science, China Launches International Program to Advance "artificial sun" Research, 25 November 2025.
- Chinesees academy for science, China's Next-generation "artificial sun" Achieves New Milestone with Divertor Prototype, 15 October 2025.
- Egypt oil & gas group, Egypt, Russia Seal Fuel Order, Cooperation for El-Dabaa Nuclear Plant, 19 November 2025.
- Euro news, EU carmakers to comply with 90% emissions reduction by 2035 as full combustion engine ban scrapped, 16 December 2025.
- European Commission, Commission invites views to shape its Small Modular Reactor Strategy, 10 November 2025.
- National Conference of State Legislatures, News Reactor, 18 November 2025.
- Nocent, Independent Nuclear News, US Nuclear Regulatory Commission Approved 13 Reactor Licence Renewals in 2025, 7 January 2026.
- Nordrip, Nordic and Baltic Ministers Endorse Nuclear Energy, 10 October 2025.
- Nuclear newswire, U.S. and Saudi Arabia reach deal on nuclear energy cooperation, 21 November 2025.
- Polskie radio, EU Commission approves funding for Poland's first nuclear power plant, 9 December 2025.
- Reuters, Unit 2 of CNNC Zhangzhou Nuclear Power approved for fuel loading, 29 October 2025.
- Rosatom newsletter, El Dabaa: A Year of Steady Growth, January 2026.
- U.S. Department of energy, Energy Department Closes Loan to Restart Nuclear Power Plant in Pennsylvania, 18 November 2025.
- U.S. Department of energy, Energy Department Selects TVA and Holtec to Advance Deployment of U.S. Small Modular Reactors, 2 December 2025.
- U.S. Department of energy, FACT SHEET: The Energy Department Is Delivering On Accelerating The Deployment Of Nuclear Power, 19 January 2026.
- U.S. Department of energy, U.S. Energy Secretary and Saudi Arabia's Energy Minister Announce Deal on Civil Nuclear Cooperation, 18 November 2025.
- Westinghouse, United States Government, Brookfield and Cameco Announce Transformational Partnership to Deliver Long-term Value Using Westinghouse Nuclear Reactor Technology, 28 October 2025.
- World nuclear association, Nuclear Power in Saudi Arabia, 28 November 2025.
- World nuclear news, Framatome makes first nuclear fuel assemblies for Barakah, 25 November 2025.
- World nuclear news, KEPCO and ENEC enhance cooperation in nuclear energy, 21 November 2025.

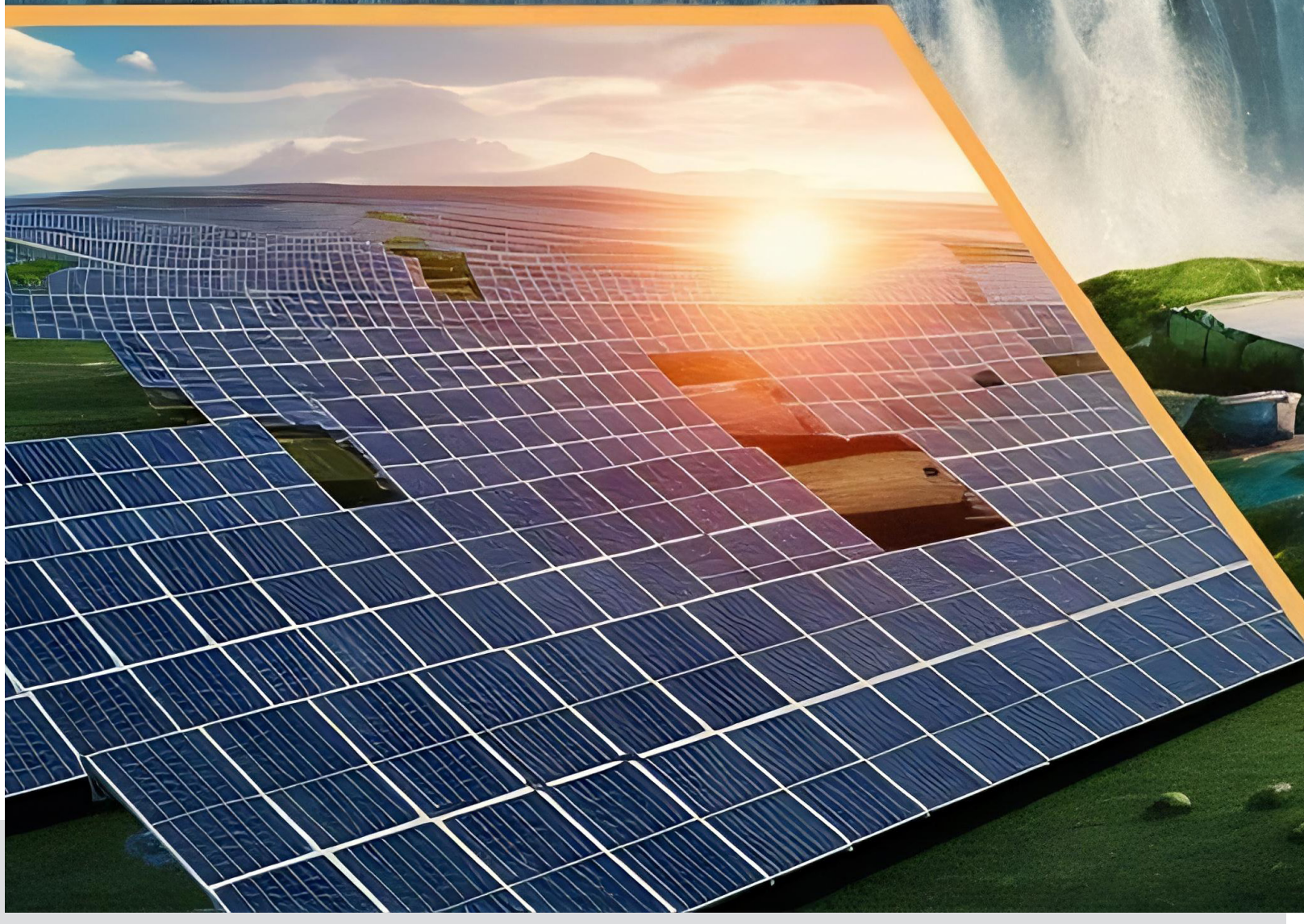
التطورات في المعادن الحرجة

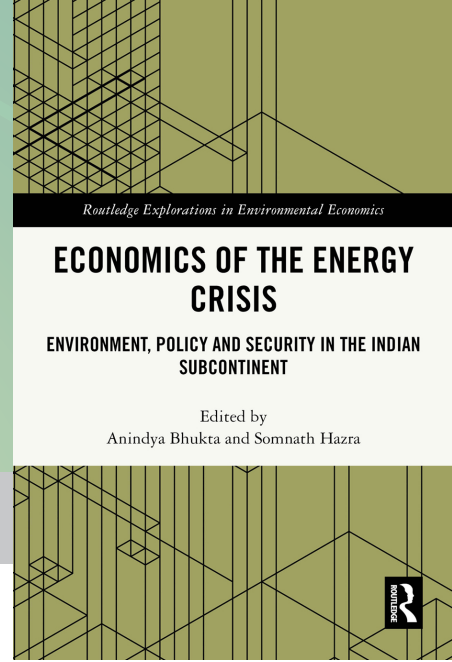
- ABC News, Why does Trump want Greenland and why is it so important?, 7 January 2026.
- American pacific mining, Copper Added to New USGS Critical Minerals List Highlighting Increased Support for US Copper Projects Like American Pacific's Madison & Palmer Projects, 6 November 2025.
- Arabian Gulf Business Insight, Egypt reveals incentives to attract global miners, 1 December 2025.
- Arabic trader, Ma'aden and "Hankook" partnership to develop mining projects in Saudi Arabia, 29 December 2025.
- Arctic today, Greenland warns it may turn to China if US and EU shun mining investments, 27 May 2025.
- Australian government, Historic critical minerals framework signed by President Trump and Prime Minister Albanese, 21 October 2025.
- Belt and road portal, China's Fujian launches first Arctic shipping route to Europe, 22 September 2025.
- China's Resource Risks, Raring to Go Mining in Greenland: Shenghe and the Kvanefjeld Rare Earth Project, 31 August 2020.
- EIA, Energy Minerals Observatory: The data deficits in critical supply chains, 10 December 2025.
- Egypt Oil & Gas Group, From Reform to Reality: Egypt's Mining in 2025, 13 January 2026.
- Egypt, State Information Service, Egypt to conduct airborne geophysical survey of nationwide mineral potential, 29 November 2025.
- European Commission, EU and Greenland sign strategic partnership on sustainable raw materials value chains, 30 November 2023.
- European Commission, RESourceEU Action Plan, Accelerating our critical raw materials strategy to adapt to a new reality, 3 December 2025.
- Global Mining Review, Copper added to new USGS critical minerals list, highlighting increased support for US copper projects, 14 November 2025.
- History, The U.S. Bought 3 Virgin Islands from Denmark. The Deal Took 50 Years, 28 May 2025.
- IEA, United States–Australia Framework for Critical Minerals and Rare Earths, 23 October 2025.
- Innovation News Network, The Kvanefjeld project: A potential world-class supplier of rare earths, 12 January 2024.

- Investor news, Critical Minerals Report (12.19.2025): China's Rare Earth Exports Jump 26.5%. Lithium Rallies, and Washington Backs Korea Zinc's \$7.4Bn U.S. Refinery, 19 December 2025.
- Maaden, maaden furthers commitment with mp materials to establish rare earth refinery joint venture in the kingdom, 19 November 2025.
- Muscat daily, MDO, JSW Group sign deal for RO204mn South Minerals Project, 17 November 2025.
- Reddit, UAE signs \$1.8 billion deal with US firm to boost global critical minerals supply, 25 October 2025.
- Reuters, China says it is granting new, streamlined rare earth export licences, 18 December 2025.
- Reuters, Greenland ends unsuccessful 50-year bid to produce oil, 16 July 2021.
- Reuters, US government takes 5% stakes in Lithium Americas and joint venture with GM, 2 October 2025.
- Reuters, US, Abu Dhabi governments to invest \$1.8 billion with Orion into critical minerals, 24 October 2025.
- S&P Global, Greenland govt opens doors to global miners amid tense geopolitical backdrop, 10 September 2025.
- Sahm capital, UPDATE 1-China's rare earth exports jump in November after Xi-Trump meeting, 8 December 2025.
- Saudi gazette, Saudi Arabia, US sign strategic framework to strengthen supply chains for critical minerals, 19 November 2025.
- The Minor Metals Trade Association (MMTA), EU advances its critical minerals strategy, 22 December 2025.
- The Oxford Institute For Energy Studies, Europe's new critical minerals plan will unlock new resources, but permitting and Chinese involvement remain key hurdles, 11 December 2025.
- The Prime Minister's Office of Denmark, Greenland.
- The Telegraph, Why does Donald Trump actually want Greenland?, 6 Jan. 2026.
- The White House, adjusting imports of processed critical minerals and their derivative products into the united states, 14 January 2026.
- The White House, Fact Sheet: President Donald J. Trump Solidifies Economic and Defense Partnership with the Kingdom of Saudi Arabia, 18 November 2025.
- Wikipedia, Thacker Pass lithium mine.
- World Nuclear News, New Chinese JV for rare earth minerals from Greenland, 23 January 2019.
- Zawya, Deal in minerals bolsters Oman-Türkiye ties, 27 October 2025.

تباين السياسات العالمية في كفاءة المركبات بين التشدد والمرونة

- AInvest, China's EV Energy Efficiency Standards vs. U.S. Rollbacks: A Diverging Path in Global E-Mobility Markets, 26 December 2025.
- Benzinga, China's New EV Energy Limits Contrast With US Rollback Of Fuel Economy Standards, 26 December 2025.
- Car News China, China to enforce world's first mandatory EV energy standard in 2026, capping two-tonne models at 15.1 kWh per 100 km, 26 December 2025.
- China EV Home, China Mandates World's First EV Energy Consumption Standard From 2026, 26 December 2025.
- EIA, China dominates global trade of battery minerals, 21 May 2025.
- Global China EV, China to tighten EV energy standard by 11% in 2026, limiting to 15.1 kWh/100 km, 27 December 2025.
- Ener data, European Commission proposes easing 2035 ban on new combustion-engine cars, 18 December 2025.
- Euro News, EU carmakers to comply with 90% emissions reduction by 2035 as full combustion engine ban scrapped, 16 December 2025.
- IEA, Global EV Outlook 2025.
- IEA, Tracking Cars and Vans, Country and regional highlights.
- Institute for Energy Research, Trump Proposes to Slash Biden's Fuel Economy Standards, 10 December 2025.
- Reuters, EU drops 2035 combustion engine ban as global EV shift faces reset, 16 December 2025.
- The White House, Fact Sheet: President Donald J. Trump Announces the Reset of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards, 3 December 2025.
- Xinhua Net, China to impose world's first mandatory EV energy consumption cap, 26 December 2025.





عرض كتاب

اقتصاديات أزمة الطاقة البيئة، والسياسة، والأمن في شبه القارة الهندية

عرض: م. تركي حسن حمش *

* خبير بترول/ استكشاف وإنتاج، ادارة الشؤون الفنية ، أوابك - الكويت



مراجعة كتاب:

اقتصاديات أزمة الطاقة**البيئة، والسياسة، والأمن في شبه القارة الهندية****Economics of the Energy Crisis: Environment, Policy and Security in the Indian
Subcontinent**

المحررون: Anindya Bhukta- Somnath Hazra

صادر عام 2026

عن دار نشر: Routledge، نيويورك، الولايات المتحدة الأمريكية

**إعداد: المهندس تركي حسن حمش
خبير بترول/ استكشاف وإنتاج****تعريف بالكتاب**

يأتي الكتاب في وقت يواجه فيه العالم تحدياً مزدوجاً: فمن ناحية، هناك فجوة متسعة بين قدرات إمدادات الوقود الأحفوري والطلب المتزايد على الطاقة، ومن ناحية أخرى، يتسبب حرق هذا الوقود -حسب رأي المشاركين فيه- في تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري. لا يتناول هذا الكتاب الأزمة كظاهرة عالمية مجردة فحسب، بل يغوص في تعقيداتها داخل سياق شبه القارة الهندية، مقدماً رؤية نقدية ترى أن الحل لا يكمن فقط في البحث عن مصادر جديدة، بل في رفع كفاءة الاستخدام وإدارة الموارد المتاحة بشكل أكثر صرامة، مع التأكيد على أن غياب أي مصدر طاقة صديق للبيئة تماماً سيفرض ضرورة ملحةً للتدقيق في أنماط الاستهلاك الحالية.

قسم الكتاب الأزمة إلى ثلاثة محاور رئيسية:

- 1- الأسباب الجذرية المتعلقة باختلال التوازن بين العرض والطلب.
 - 2- الأبعاد البيئية والسياسية المرتبطة بالاستدامة.
 - 3- تقديم مقترحات لسياسات فعالة قادرة على مواجهة هذه التحديات في منطقة تعد من أكثر مناطق العالم نمواً وحساسية للتغيرات المناخية.
- يمثل الكتاب محاولة لربط النظرية الاقتصادية بالواقع البيئي، مما يجعله مرجعاً لفهم كيفية موازنة متطلبات التنمية مع ضرورات الحفاظ على البيئة في واحد من أكثر أقاليم العالم تعقيداً.
- وفيما يلي استعراض مضمون الكتاب*:

* استعراض الكتاب لا يعني الموافقة على كل ما يتضمنه، لكن من الضروري معرفة آراء المستهلكين وكيف ينظرون إلى منتجي الطاقة.

الجزء الأول: أزمة الطاقة: تفسير اقتصادي

البحث (1): فهم أزمة الطاقة: مقدمة

Understanding Energy Crisis: An Introduction

Somnath Hazra and Anindya Bhukta

الطاقة كعمود فقري للاقتصاد

استهل المحرران الكتاب من خلال مقدمة هامة أكدت على أن الطاقة تمثل العمود الفقري للاقتصادات الحديثة، فهي شرط مسبق لا غنى عنه لعمليات التصنيع، والنقل، والتمدين. وأشارت المقدمة إلى وجود مؤشرات طاقة محددة تستخدم لتقييم حالة الاقتصاد، منها: حجم الاستهلاك الإجمالي، ومزيج المصادر المستخدمة، وكفاءة الإنتاج والتوزيع، بالإضافة إلى حجم الاحتياطات الاستراتيجية المخصصة للطوارئ. ومن خلال فحص هذه المؤشرات، يستطيع صانعو السياسات فهم الأداء الاقتصادي للطاقة ومدى أمن إمداداتها، فالدول ذات الدخل المرتفع تستهلك طاقة أكبر بكثير لتعكس نشاطها الصناعي والمدني الواسع. وقدم المحرران مقارنة رقمية مهمة، حيث سجلت الهند واحداً من أدنى معدلات استهلاك الفرد للطاقة عالمياً بواقع 2081 كيلووات ساعة في عام 2019، بينما يصل هذا الرقم في الولايات المتحدة إلى 31223 كيلووات ساعة، وفي النرويج إلى 19953 كيلووات ساعة، أما في الصين فكان الاستهلاك 5406 كيلووات ساعة. هذا التفاوت يؤكد أن التنمية والنمو السكاني يضغطان بقوة على الطلب، مما يولد أزمة مزدوجة: نقص في الإمدادات من جهة، واضطرابات مناخية من جهة أخرى.

الأزمة كظاهرة ثنائية الأبعاد

أوضح المحرران أن أزمة الطاقة العالمية ليست مجرد مشكلة تقنية، بل هي ظاهرة ثنائية الأبعاد، تتمثل في:

1. الفجوة بين العرض والطلب: الاتساع المتزايد بين قدرة الإمداد المتناقصة للوقود الأحفوري والطلب المتسارع.
2. الاحتباس الحراري: تزايد حدة المشكلات المناخية نتيجة حرق هذا الوقود. ويرى المحرران أن الاستهلاك المفرط وغير الرشيد في الدول الغنية مقارنة بالدول النامية يخلق توترات جيوسياسية حول المسؤولية عن هذه الأزمة.

الحالة الهندية: التحديات والمفارقات

أفردت هذه المقدمة مساحة لتحليل الواقع في الهند، مشيرة إلى أن الحكومة اتبعت نهجاً هجيناً في عام 2023 لتوسيع كافة أشكال إمدادات الطاقة. ورغم السعي نحو الاستدامة، إلا أن الدعم الحكومي للوقود الأحفوري سجل مستويات قياسية بلغت 3.2 تريليون روبية هندية*، نال الفحم والنفط والغاز منها الحصة الأكبر، إذ زاد دعم النفط والغاز عن 63%، بينما لم يتجاوز دعم الطاقة النظيفة 10% من إجمالي الدعم. ويعزو المحرران ذلك إلى الاعتماد الكبير على الواردات لتلبية الطلب المحلي المتزايد، مما يجعل موازنة مزيج الطاقة تحدياً حرجاً لتحقيق هدف صافي الصفر الكربوني.

آفاق الحل: التحول التكنولوجي والسياسات

اختلفت مقدمة الكتاب بتوصيات استراتيجية، مؤكدة أن الخطوة الحاسمة تكمن في التحول نحو تقنيات منخفضة الكربون وتعزيز كفاءة الطاقة في قطاعات النقل والصناعة. ورغم أن الطاقة المتجددة تواجه تحديات أهمها التقطع، إلا أن الحل يكمن في تحديث شبكات نقل الكهرباء، واستخدام الشبكات الذكية، والمقاييس الذكية لإدارة التقلبات الموسمية واليومية. كما يشدد المؤلفان على ضرورة قيام الحكومات بإلغاء دعم الوقود الأحفوري غير الفعال، ووضع آليات لتسعير الكربون، وخلق بيئة تنظيمية تشجع الاستثمار في الطاقة المستدامة. تضع مقدمة الكتاب القارئ أمام حقيقة واضحة: الانتقال إلى اقتصاد صافي الصفر الكربوني يتطلب استثمارات ضخمة في التكنولوجيا، وتغييراً جذرياً في السياسات الاقتصادية والاجتماعية، لا سيما في الاقتصادات الناشئة التي تسعى لتحقيق التوازن بين النمو والحفاظ على البيئة.

البحث (2): عدم التوازن بين العرض والطلب: السبب الجذري للأزمة.

Demand-Supply Imbalance- The Root Cause of the Crisis

Debarun Sengupta

قدم الباحث تحليلاً اقتصادياً معمقاً للأزمة، انطلاقاً من رؤية تعتبر أن أزمة الطاقة العالمية ليست مجرد نتاج لنضوب الموارد، بل هي نتيجة هيكلية لفشل التوازن بين قوى السوق العالمية، وهو ما انعكس بشكل حاد على اقتصادات دول شبه القارة الهندية.

* الدولار الأمريكي يعادل نحو 93.3 روبية هندية.

اتساع الفجوة الهيكلية

أكد الباحث أن السبب الأساسي للأزمة يكمن في النمو الآسي للطلب العالمي على الطاقة، مدفوعاً بالزيادة السكانية الهائلة والتحول الصناعي السريع في الدول الناشئة. وفي المقابل، يواجه العرض قيوداً طبيعية وجيوسياسية، فالوقود الأحفوري الذي لا يزال يهيمن على مزيج الطاقة العالمي هو مورد ناضب بطبيعته. وبالتالي فإن الأزمة لا تظهر فقط في صورة نقص كمي، بل في صورة تقلبات سعرية عنيفة تجعل الحصول على الطاقة أمراً مكلفاً وغير مستقر للدول المستوردة مثل الهند.

ديناميكيات السوق والاعتماد على الواردات

سلط البحث الضوء على انعدام مرونة الطلب في قطاع الطاقة، فالمجتمعات الحديثة لا يمكنها التوقف عن استهلاك الطاقة حتى مع ارتفاع الأسعار، مما يمنح الموردين قوة سوقية كبيرة ويجعل الدول النامية عرضة لصددمات الأسعار الخارجية. وفي حالة الهند، يوضح الباحث أن الاعتماد الكثيف على واردات النفط والغاز يخلق ضغطاً مستمراً على ميزان المدفوعات، حيث تضطر الدولة لإنفاق مبالغ طائلة بالعملة الصعبة لتأمين احتياجاتها الأساسية، مما يقلل من الفائض الموجه للتنمية المستدامة. حدد الباحث عدة عوامل تمنع السوق من الوصول إلى حالة التعادل، منها:

1. الفجوة الزمنية للاستثمار: بناء محطات طاقة جديدة أو تطوير حقول غاز يستغرق سنوات، بينما يتغير الطلب بشكل لحظي.
2. المضاربات الجيوسياسية: الصراعات الدولية تؤدي إلى تعطيل سلاسل الإمداد، مما يرفع الأسعار بشكل لا يعكس التكلفة الفعلية للإنتاج.
3. ضعف البنية التحتية: يشير البحث إلى أن جزءاً كبيراً من الطاقة يفقد في عمليات النقل والتوزيع نتيجة تهالك الشبكات، مما يفاقم من أزمة العجز في الإمداد، حتى لو كان الإنتاج كافياً عند المصدر.

الحلول المقترحة من منظور اقتصادي

رأى الباحث أن استعادة التوازن تتطلب استراتيجية مزدوجة المسار: يعتمد الأول على إدارة جانب الطلب عبر تحفيز ترشيد الاستهلاك واستخدام التقنيات الموفرة للطاقة، ويقوم المسار الثاني على تنويع قاعدة العرض لتقليل الاعتماد على الوقود المستورد. وقد خلص البحث إلى أن أزمة الطاقة ستظل قائمة ما دام هناك تأخر في استبدال الموارد الناضبة بمصادر متجددة مناسبة. ورأى أن الفشل في معالجة عدم التوازن بين العرض والطلب اليوم سيعني تكاليف باهظة في المستقبل، ليس فقط من الناحية المالية، بل ومن الناحية الاجتماعية والسياسية أيضاً.

البحث (3): تكلفة الطاقة المتجددة وسياساتها وسوقها في منطقة آسيا والمحيط الهادئ**Renewable Energy Cost, Policy and Market in Asia Pacific Region***Narendra N. Dalei, Subhra Rajat Balabantaray, and Atul Rawat*

استهل الباحثون دراستهم بالتأكيد على أن منطقة آسيا والمحيط الهادئ تمر بمرحلة انتقالية حرجة، حيث تسعى جاهدة لموازنة النمو الاقتصادي المتسارع مع الالتزامات المناخية الصارمة، مبينين أن الطاقة المتجددة لم تعد مجرد خيار بيئي ترفيحي، بل أصبحت ضرورة استراتيجية لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري المستورد وتخفيف حدة الانبعاثات الكربونية. ويشير المؤلفون إلى أن دولاً مثل الصين والهند واليابان وأستراليا تقود قاطرة هذا التحول عبر استثمارات ضخمة في البنية التحتية للطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وسلط البحث الضوء على التطور الكبير في خفض التكاليف، حيث انخفضت التكلفة المستوية للطاقة* LCOE لكل ميغاوات ساعة بشكل كبير خلال العقد الماضي. يعزو الباحثون هذا الانخفاض إلى التقدم التكنولوجي في كفاءة الخلايا الشمسية وتصنيع توربينات الرياح، بالإضافة إلى وفورات الحجم الناتجة عن الإنتاج الكثيف. ويقدم البحث مقارنات إحصائية تظهر أن الطاقة الشمسية في الهند وأجزاء من الصين أصبحت الآن أرخص من إنتاج الكهرباء عبر محطات الفحم الجديدة، مما يغير المعادلة الاقتصادية لصالح الاستدامة، حيث يتم حساب التكلفة بناءً على الميغاوات ساعة لضمان دقة المقارنة بين المصادر المختلفة.

أطر السياسات والحوافز الحكومية

ضمن هذا العنوان، تم التركيز بشكل مفصل على دور السياسات الحكومية في تشكيل سوق الطاقة. حيث يستعرض الباحثون مجموعة من الأدوات السياسية الفعالة التي تم تطبيقها في المنطقة، مثل تعريفات التغذية الكهربائية، والمزايدات التنافسية[†] وعقود الفروقات[‡]. ويؤكد البحث أن نجاح الهند في توسيع نطاق الطاقة المتجددة يعود بشكل كبير إلى سياسات الشراء الإلزامية وشهادات الطاقة المتجددة التي حفزت القطاع الخاص على الاستثمار بنشاط. كما يتناول البحث سياسات صافي القياس Net Metering التي سمحت للمستهلكين في المناطق الحضرية بالمساهمة في الشبكة، مما حول المستهلكين إلى منتجين فاعلين.

* تمثل متوسط التكلفة الإجمالية لبناء وتشغيل أصل لتوليد الطاقة على مدار عمره الافتراضي، مقسومة على إجمالي كمية الطاقة المتولدة خلال تلك الفترة

† في نظام المزايدات التنافسية، تفتح الحكومة مناقصة لمشروع معين، حيث تتنافس الشركات لتقديم أقل سعر للكهرباء.

‡ يتم الاتفاق بين الحكومة والمستثمر على سعر محدد للكهرباء، ويلتزم الطرفان بدفع الفرق لو زادت الأسعار أو انخفضت.

عوائق السوق وتحديات التكامل

رغم التفاؤل، لا يتجاهل البحث التحديات الكبيرة التي تواجه السوق، إذ يحدد مشكلة التقطع كعائق رئيسي، حيث تفتقر المنطقة حتى الآن إلى ساعات تخزين كافية بالبطاريات لضمان استقرار الإمداد عند غياب الشمس أو الرياح. كما يشير الباحثون إلى أن البنية التحتية للشبكات الكهربائية في العديد من الدول النامية بآسيا لا تزال غير مهيأة لاستيعاب التدفقات الكبيرة من الطاقة المتغيرة، مما يتطلب استثمارات ضخمة في الشبكات الذكية وأنظمة التحكم المتقدمة.

آفاق المستقبل والاستقلال الطاقى

خلص البحث إلى أن منطقة آسيا والمحيط الهادئ تمتلك إمكانات هائلة لتصبح رائدة عالمية في تصدير تقنيات الطاقة النظيفة. ويشدد المؤلفون على أن تحقيق التوازن في السوق يتطلب تنسيقاً دولياً في نقل التكنولوجيا وتوفير تمويل ميسر للمشاريع الكبرى. وتمثلت الرسالة الختامية للبحث في أن التحول الطاقى في هذه المنطقة سيعيد رسم الخريطة الجيوسياسية للطاقة، حيث سيقبل الاعتماد على القوى النفطية التقليدية مقابل صعود دول تمتلك التكنولوجيا والموارد الطبيعية المتجددة.

البحث (4): التفاوت في أسعار الطاقة: تحليل داخلي وبين الدول.

Disparities in Energy Prices: An Intra- and Inter-country Analysis

C. Muralee Krishnan

قدم البحث مساهمة أساسية في فهم التعقيدات الاقتصادية التي تحكم أسواق الطاقة العالمية والمحلية. يركز البحث على تحليل استكشافي لظاهرة تباين الأسعار، والتي عرّفها الباحث بأنها الاختلافات الملحوظة في تكلفة أنواع الطاقة المختلفة عبر المناطق الجغرافية المتنوعة وفئات المستهلكين المتباينة.

ينطلق الباحث من فرضية مفادها أن أسعار الطاقة ليست مجرد أرقام مجردة، بل هي نتاج تداخل معقد بين عوامل جغرافية مختلفة، مثل وفرة الموارد وجودة البنية التحتية، وعوامل اقتصادية وتنظيمية تشمل الضرائب والدعم الحكومي. ومن خلال دراسة شملت ثمانية عشر اقتصاداً رئيسياً، يوضح الفصل كيف تنصدر الدول الأوروبية قائمة أعلى أسعار البنزين عالمياً نتيجة السياسات الضريبية المرتفعة، بينما تتميز دول أخرى بأسعار منخفضة مدفوعة إما بوفرة الموارد المحلية أو بالدعم الحكومي.

تميز البحث بمنهجيته التي لم تكنف بالمقارنة بين الدول، بل عمدت إلى التحليل الداخلي عبر اتخاذ الهند نموذجاً لدراسة تباين أسعار الكهرباء بين الولايات وفئات المستهلكين المختلفة. وحذر الباحث من أن هذه التباينات ليست

ذات أثر اقتصادي فحسب، بل تمتد لتشمل أبعاداً اجتماعية، حيث تساهم الفوارق السعرية الكبيرة في تعميق ظاهرة (فقر الطاقة) لدى الأسر ذوات الدخل المحدود، مما يعيق قدرتها على الوصول إلى مصادر طاقة نظيفة وموثوقة.

الانعكاسات الاجتماعية والبيئية لسياسات التسعير

ربط البحث بين تسعير الطاقة والاستدامة البيئية، موضحاً أن الأسعار المرتفعة، رغم عبئها الاقتصادي، تعمل كمحفز للاستثمار في تقنيات كفاءة الطاقة وتغيير السلوك الاستهلاكي، في حين أن الأسعار المنخفضة قد تشجع على الاستهلاك غير المستدام وتزيد من انبعاثات غازات الدفيئة. خلص الباحث إلى أن معالجة تباينات الأسعار تتطلب سياسات متوازنة تضمن الوصول العادل للطاقة مع الحفاظ على الأهداف المناخية والاستدامة البيئية.

الجزء الثاني: أزمة الطاقة: منظور بيئي

البحث (5): البحث عن طاقة مستدامة

A Quest for Sustainable Energy
Anindya Bhukta and Rikhia Bhukta

مثل هذا البحث امتداداً طبيعياً للنقاش حول أزمة الطاقة، لكنه تجاوز التشخيص التقليدي لي طرح سؤالاً أكثر عمقاً، وهو: كيف يمكن تحقيق أمن الطاقة من دون تعميق الأزمة المناخية؟ انطلق الباحثان من أن الطاقة ليست مجرد سلعة اقتصادية، بل هي أساس للتنمية الحديثة، وأن استمرار الاعتماد على الوقود الأحفوري يجعل النمو الاقتصادي معرضاً لاختلالات العرض، وتقلبات الأسعار، وضغوط الانبعاثات الكربونية. ومن هنا، يتخذ البحث من مفهوم الاستدامة إطاراً مركزياً لفهم مستقبل الطاقة في الهند والعالم. وضع البحث أزمة الطاقة ضمن سياق مزدوج، إذ ربط بين اختلال التوازن في الإمداد والطلب من جهة، وبين التدهور البيئي من جهة أخرى. فالفحم والنفط لا يزالان يشكلان العمود الفقري لإمدادات الطاقة العالمية، غير أن هذا الاعتماد المتواصل يفاقم انبعاثات غازات الدفيئة ويهدد الاستدامة طويلة الأجل. ويرى الباحثان أن أزمة الطاقة الراهنة في الهند ليست أزمة نقص في الموارد فقط، بل أزمة نموذج تنموي، وهو ما يجعل البحث عن بدائل مستدامة ضرورة لا خياراً.

صورة الطلب على الطاقة في الهند

أولى البحث اهتماماً خاصاً بالهند بوصفها حالة دراسية بارزة، إذ أوضح أن استهلاك الطاقة فيها ما يزال منخفضاً نسبياً للفرد مقارنة بالمعدل العالمي، لكنه مرشح للارتفاع الحاد بسبب النمو السكاني، والتصنيع، والتوسع الحضري. ويرصد البحث أن الصناعة والنقل والبناء الحضري هي المحركات الكبرى لزيادة الطلب، مع توقعات تشير إلى أن الحاجة إلى الطاقة ستستمر في الصعود خلال العقود المقبلة. كما بين أن التوسع الحضري، رغم ارتباطه بالتنمية، يرفع الطلب على الكهرباء ويزيد الاعتماد على الأجهزة كثيفة الاستهلاك للطاقة، مثل أجهزة التبريد والتكييف.

وقد بيّن البحث أن الفحم ما يزال المصدر الرئيس للطاقة في الهند، خصوصاً في توليد الكهرباء، في حين يعتمد النفط بدرجة كبيرة على الاستيراد بسبب تراجع الإنتاج المحلي. أما الغاز الطبيعي، فرغم مزاياه البيئية، فإنه يظل محدود الحصة بسبب ضعف الإنتاج المحلي، وصغر السوق وقلة المنتجين والمستهلكين. وخلص الباحثان إلى أن البنية الطاقية الحالية في الهند غير قابلة للاستمرار على المدى البعيد، لأن الاعتماد على الفحم والنفط يخلق عبئاً اقتصادياً وبيئياً في الوقت نفسه. وانتقل البحث إلى مناقشة البدائل المتاحة، حيث منح الطاقة الشمسية وطاقة الرياح موقعاً محورياً في مسار التحول الطاقى. وأشار إلى أن الهند تمتلك ميزة جغرافية كبيرة في مجال الطاقة الشمسية، وأن كلفة هذه الطاقة انخفضت إلى مستوى جعلها تنافس الفحم في كثير من الحالات. كما ذكر أن طاقة الرياح شهدت توسعاً واضحاً في القدرة المركبة خلال العامين الأخيرين، لكنها ما تزال تواجه تحديات تتعلق بالتكلفة الابتدائية والتذبذب الطبيعي في الإنتاج. وأكد البحث أن أي بديل منفرد لا يستطيع أن يحل محل الوقود الأحفوري بالكامل، ولذلك فإن التحول المستدام يتطلب مزيجاً من المصادر المتجددة مع تحسين الكفاءة في الاستخدام.

كما ربط البحث بين التحول الطاقى والالتزامات المناخية الدولية، ولا سيما ما يتعلق باتفاق باريس وأهداف خفض شدة الانبعاثات. كما بين أن الهند وضعت أهدافاً طموحة لرفع قدرة الطاقة المتجددة، ثم عززتها لاحقاً في إطار التزاماتها المناخية. ومع ذلك، فإن الباحثين يلمحان إلى وجود فجوة بين الأهداف المعلنة والواقع التنفيذي، إذ ما تزال وتيرة التحول أقل من مستوى الطموح المطلوب. لذلك يؤكد البحث أن النجاح لا يقوم على الإعلان عن الأهداف فقط، بل على سياسات عملية تشمل الاستثمار، وإصلاح البنية التحتية، وتحسين الكفاءة، وتوجيه الحوافز نحو الطاقة النظيفة.

خلص البحث إلى أن أمن الطاقة والاستدامة البيئية لا يمكن فصلهما عن بعضهما، وأن مواجهة الأزمة تتطلب تحولاً تدريجياً من الوقود الأحفوري إلى منظومة طاقية أكثر نظافة وكفاءة وتنوعاً. وتتمثل قيمة البحث

في أنه لا يكتفي بالدعوة إلى الطاقة المتجددة، بل يربطها بإصلاحات هيكلية في الطلب، والتخطيط، والسياسات العامة. وبذلك يقدم الفصل رؤية متوازنة ترى أن المستقبل المستدام لا يتحقق بشعار واحد، بل بمنظومة متكاملة تجمع بين العدالة الطاقية، وأمن الإمداد، والالتزام المناخي.

البحث (6): إدارة وتدقيق الطاقة

Energy Audit and Management

Debalina Saha

ركز هذا البحث على تدقيق الطاقة بوصفه أداة أساسية لفهم أنماط الاستهلاك داخل المنشآت واكتشاف مواطن الهدر، ثم تحويل هذه المعرفة إلى إدارة أكثر كفاءة واستدامة. ويقوم على فكرة أن تحسين الأداء الطاقى لا يبدأ من التوسع في الإمداد فقط، بل من القياس الدقيق، والتحليل المنهجي، ثم اتخاذ إجراءات تصحيحية تقلل الفاقد وتخفف التكلفة.

انطلق البحث من أن تدقيق الطاقة هو الخطوة الأولى في بناء نظام فعال لإدارة الاستهلاك، لأنه يكشف أين تستهلك الطاقة وكيف ولماذا. وتظهر أهميته في المنشآت الصناعية والتجارية على وجه الخصوص، إذ يساعد على تحديد الأجهزة والأنظمة الأعلى استهلاكاً، ورصد الخلل في التشغيل، وتقدير فرص التوفير قبل الاستثمار في أي حلول جديدة. ولم يتوقف البحث عند حدود وصف الاستهلاك، بل ربط بين نتائج التدقيق وبين إدارة الطاقة بصورة عملية تقوم على التخطيط والتنفيذ والمراجعة والتحسين المستمر. ويرى أهمية اعتماد منهجية مؤسسية واضحة تجعل إدارة الطاقة جزءاً من القرار التشغيلي اليومي، لا مجرد إجراء عابر عند ارتفاع الفواتير أو حدوث أزمة في الإمداد.

أكد البحث أن نجاح التدقيق يعتمد على جمع بيانات موثوقة من الفواتير، وأجهزة القياس، والفحص الميداني للأنظمة مثل: التكييف، والإضاءة، والمحركات، والمعدات. كما أن تحليل جودة الطاقة، والتحميل الزائد، والانقطاعات، والتذبذب في الجهد، كلها عناصر تساعد على تفسير الخسائر غير الظاهرة وتحويلها إلى قرارات فنية قابلة للتنفيذ.

الجدوى الاقتصادية والبيئية

ربط البحث بين إدارة الطاقة وبين خفض الكلفة وتعزيز الاستدامة في الوقت نفسه، لأن تقليل الهدر يخفف الإنفاق التشغيلي ويقلل الأثر الكربوني. ومن ثم فإن التدقيق الطاقى لا ينظر إليه كأداة فنية فقط، بل كوسيلة اقتصادية وبيئية تساعد المنشآت على تحسين الكفاءة، ودعم الامتثال التنظيمي، وتعزيز صورتها في مجال

الاستدامة. ومن النقاط المهمة في هذا البحث، إيراده خطة الاتحاد الأوروبي لكفاءة الطاقة، فقد اعتمد الاتحاد الأوروبي توجيهات كفاءة الطاقة لأول مرة في عام 2012، وجرى تحديثها في عامي 2018 و2023. هدفت تلك الخطة بشكل رئيسي إلى دعم الصفقة الأوروبية الخضراء، وتحقيق التحول نحو اقتصاد خالٍ من الكربون. وتمثلت الأهداف الرئيسية ضمن خطة Fit-for-55 التي وضعت بهدف خفض استهلاك الطاقة بنسبة 9% بحلول عام 2030 مقارنة بالسيناريو المرجعي لعام 2020. أما خطة RePower EU فقد رفعت سقف الطموح لاحقاً ليصل إلى خفض بنسبة 13% في الاستهلاك، مع استهداف حصة طاقة متجددة تصل إلى 45%. وبين البحث أن هناك العديد من الفوائد لتحسين الكفاءة، منها:

1. تعزيز أمن الطاقة وتقليل الاعتماد على الواردات (خاصة الغاز الطبيعي).

2. خفض تلوث الهواء وحماية الموارد من الاستنزاف.

3. خلق فرص عمل جديدة والحد من فقر الطاقة.

ولتحقيق هذه الأهداف، تم اقتراح الخطوات التالية:

1. رفع التزامات توفير الطاقة للدول الأعضاء.

2. الحفاظ على (معايير أدنى لأداء الطاقة) في المباني وتطبيق تقارير التدقيق الطاقوي.

3. تقليل الدعم الموجه للوقود الأحفوري وفرض حظر على غلايات الوقود الأحفوري في المباني.

4. التوسع في استخدام الطاقة المتجددة في قطاعي النقل والصناعة.

5. زيادة معدلات تجديد المباني (السكنية وغير السكنية) والاعتماد على المضخات الحرارية.

خلص البحث إلى أن تدقيق الطاقة وإدارتها يمثلان مدخلاً عملياً لتقليل الهدر ورفع الكفاءة وتحقيق الاستخدام الرشيد للموارد. وقيمته الأساسية أنه ينقل التعامل مع الطاقة من منطق الاستهلاك السلبي إلى منطق الإدارة الذكية، بحيث تصبح كل وحدة طاقة مستخدمة على نحو أوعى وأكثر مردودية.

البحث (7): نحو تحقيق كفاءة الطاقة

Towards Gaining Energy Efficiency

Kriti Sharma

أتى هذا البحث كحجر زاوية في فهم العلاقة بين استدامة التنمية وكفاءة استخدام الموارد، حيث تؤكد الباحثة أن الوصول إلى الطاقة وضمان موثوقية إمداداتها هما الشرطان الأساسيان للنمو الاقتصادي الحديث. يتجاوز البحث مجرد الدعوة لترشيد الاستهلاك، لي طرح كفاءة الطاقة كأداة استراتيجية لفك الارتباط بين النمو الاقتصادي وزيادة الانبعاثات، مع التركيز بشكل خاص على الحالة الهندية التي تسعى لتقليل كثافة الطاقة عبر تبني تقنيات متطورة ومصادر متجددة.

استعرض البحث دور مؤشرات كفاءة الطاقة بوصفها أدوات لا غنى عنها لتحديد المحركات الرئيسية لاتجاهات الاستهلاك وتحديد الأولويات في التدخلات السياسية. وتوضح الباحثة أن دقة هذه المؤشرات تعتمد بشكل جوهري على جودة وتفصيل البيانات المتاحة حول الاستخدام النهائي للطاقة، مما يساعد في رصد المناطق الرمادية في سلسلة تدفق الطاقة وتقييم الأثر المحتمل للإصلاحات الاقتصادية والبيئية. كما تم رصد التطور التاريخي لسياسات كفاءة الطاقة في الهند، والتي انتقلت من مرحلة القلق بشأن ندرة الوقود الأحفوري إلى مرحلة التركيز على الفعالية من حيث التكلفة، وصولاً إلى اعتبارها ضرورة حتمية للتخفيف من آثار التغير المناخي. وفي هذا السياق، بين البحث الدور الذي لعبته مؤسسات مثل مركز إدارة الطاقة، والمكتب الهندي لكفاءة الطاقة، في دمج مفهوم الإنتاجية الطاقية ضمن خطط التنمية الوطنية.

العوائق الهيكلية وتحديات البنية التحتية

رغم التقدم المحرز، حدد البحث مجموعة من التحديات التي تعيق الوصول إلى المستويات المثلى من الكفاءة، ومن أبرزها ضعف قطاع التصنيع المحلي لتقنيات الطاقة النظيفة، وارتفاع تكاليف التخزين، والحاجة الماسة لإصلاح أسواق الطاقة لدمج المصادر المتجددة بشكل أفضل مع المصادر التقليدية. كما اشارت الباحثة إلى أن رفع الكفاءة التقنية للمنشآت وتحسين آليات تنفيذ العقود يمثلان دفعة قوية للقطاع تتجاوز في أثرها مجرد رفع الأسعار الذي قد يضر بالأسر ذات الدخل المحدود. خلص البحث إلى أن الهند تمتلك إمكانات هائلة غير مستغلة في مجال توفير الطاقة، والتي يمكن تفعيلها من دون المساس بمسار النمو الاقتصادي. وأكد أن النجاح في هذا المسار يتطلب بناء قدرات تقنية ومالية، وزيادة وعي المستهلكين، وتقديم حوافز لمشاريع الطاقة الشمسية اللامركزية. وبين أن الهدف النهائي هو بناء نظام طاقي مرن ومتنوع يضمن الوصول بأسعار معقولة ويحمي البيئة في آن واحد.

البحث (8): تحليل شامل لإطار السياسات لمعالجة وصول الأسر إلى الوقود النظيف واستخدامه في الهند

A Comprehensive Analysis of the Policy Framework to Address Household Access and Use of Clean Fuels in India

Pooja Sankhyayan and Shyamasree Dasgupta

تناول هذا البحث قضية جوهرية تتعلق بالعدالة الطاقية والرفاه الاجتماعي، وهي انتقال الأسر من استخدام الوقود التقليدي الملوث (مثل الحطب والكتلة الحيوية) إلى الوقود النظيف (مثل الغاز المسال والكهرباء). انطلق الباحثان من فكرة أن فقر الطاقة ليس مجرد نقص في الإمداد، بل هو عائق أمام التنمية البشرية، حيث

تتحمل النساء والأطفال العبء الأكبر من الآثار الصحية السلبية والوقت الضائع في جمع الوقود. ويكتسب هذا البحث أهميته بسبب أنه يضع نموذجاً يمكن تعميمه على دول أخرى في القارة الآسيوية تواجه تحديات مماثلة في قطاع الطاقة المنزلي.

يرى البحث أن نجاح التحول نحو الطاقة النظيفة يعتمد على ركيزتين أساسيتين: التوافر، والقدرة على تحمل الكلفة. فبينما يتعلق التوافر بإنشاء البنية التحتية، مثل شبكات الطرق وتوسيع خطوط النقل، تركز القدرة على تحمل الكلفة على تذليل العقبات المالية التي تحول دون حصول الأسر الفقيرة على التوصيلات الأولية لخطوط الغاز أو الاستمرار في دفع تكاليف الاستخدام المتكرر. ويؤكد الباحثان أن هاتين الركيزتين يجب أن تعملتا جنباً إلى جنب لتحقيق وصول عالمي للطاقة النظيفة.

تطور سياسات غاز البترول المسال (غاز الطهي) LPG

استعرض البحث رحلة السياسات في تعزيز استخدام غاز البترول المسال، بدءاً من الدعم غير الموجه وصولاً إلى المبادرات الأكثر استهدافاً. ويبرز البحث برنامج (PMUY) وهو برنامج أطلق عام 2016، كتحول استراتيجي لا يكتفي بدعم سعر الغاز، بل يعالج حاجز التكلفة الأولية عبر توفير توصيلات مجانية لملايين الأسر الفقيرة، كما ساهم في تقديم دعم مالي للأسر المؤهلة من الفئات تحت خط الفقر بقيمة 1600 روبية هندية (21.8 دولار) لشراء أسطوانة غاز البترول المسال. وقد ناقش البحث نظام التحويل النقدي المباشر ومبادرة تطوعية شجعت القادرين على التخلي عن الدعم لتركه لصالح الفئات الأكثر احتياجاً.

وفيما يخص الكهرباء، جرى تسليط الضوء على برامج طموحة مثل (Saubhagya) الذي أطلق عام 2017 بهدف ضمان توصيل الكهرباء لكل منزل، سواء في المناطق الريفية أو الحضرية. وأوضح الباحثان أن السياسات انتقلت من التركيز على كهربة القرى كمجمعات إلى التركيز على كهربة المنازل كأفراد، مع تحسين جودة الإمداد وفصل مغذيات الكهرباء لضمان استقرار الخدمة للأغراض المنزلية والزراعية بشكل منفصل. وقد قدم البحث تحليلاً اقتصادياً للمفاضلة بين تقديم دعم مباشر للوقود، أو منح مبالغ نقدية. ورغم أن المبالغ النقدية قد تكون أكثر كفاءة اقتصادياً، إلا أن الباحثين يشيران إلى أن الأسر الفقيرة قد توجه السيولة النقدية نحو احتياجات أخرى ملحة، مما يجعل دعم الوقود النظيف أمراً أكثر أهمية لضمان استمرارية استخدامه ومنع العودة للوقود التقليدي. وقد خلص البحث إلى أن تحقيق الوصول الشامل للطاقة النظيفة يتطلب سياسات متكاملة تتجاوز مجرد توفير التوصيلات التقنية. وأكد على ضرورة استمرار الدعم الموجه لضمان عدم تراجع الأسر عن استخدام الوقود النظيف بسبب التقلبات الاقتصادية. وهذا الإطار التحليلي لا يقتصر أثره على الهند فقط، بل يمتد ليشمل دولاً نامية أخرى تسعى لمواجهة أزمة الطاقة المنزلية وتحسين مؤشرات الصحة العامة والبيئة.

البحث (9): اختيار الأجهزة المنزلية الموفرة للطاقة في الهند الحضرية**Choosing Energy-Efficient Home Appliances in Urban India***Srobonti Chattopadhyay*

ركز هذا البحث على الجانب السلوكي للمستهلك في المناطق الحضرية في الهند، حيث يشهد نمط الحياة تحولاً كبيراً نحو الاعتماد الكثيف على الأجهزة الكهربائية. وانطلق البحث من فرضية أن كفاءة الطاقة في القطاع المنزلي لا تعتمد فقط على توفر التكنولوجيا، بل على القرارات اليومية التي يتخذها الأفراد عند شراء الأجهزة. تبرز أهمية خاصة لهذا البحث في ظل التوسع الحضري المتسارع الذي جعل المنازل في المدن محركاً رئيساً للطلب على الكهرباء، خاصة مع ارتفاع درجات الحرارة وزيادة الحاجة المستمرة إلى التبريد.

سلط البحث الضوء على الدور المحوري الذي يلعبه (المكتب الهندي لكفاءة الطاقة من خلال نظام الملصقات (النجوم). وبين كيف ساعدت هذه الملصقات في تبسيط المعلومات التقنية المعقدة للمستهلك العادي، مما يتيح له مقارنة الأجهزة بناءً على استهلاكها السنوي للكهرباء. ويرى الباحث أن هذا النظام يمثل أداة حيوية للحد من عدم تماثل المعلومات بين المنتج والمستهلك، حيث تصبح الكفاءة صفة مرئية وملموسة عند نقطة البيع.

مفارقة التكلفة الأولية مقابل التوفير طويل الأمد

ناقش البحث تحدياً كبيراً يواجه المستهلك الحضري، وهو حاجز السعر، فغالباً ما تكون الأجهزة ذات الكفاءة العالية (مثل تلك الحاصلة على 5 نجوم) أعلى ثمناً مقارنة بالأجهزة التقليدية. وحل البحث كيف يوازن المستهلك بين هذه التكلفة الرأسمالية الفورية وبين التوفير المتوقع في فواتير الكهرباء على مدى عمر الجهاز، مشيراً إلى أن الوعي المالي يلعب دوراً لا يقل أهمية عن الوعي البيئي في اتخاذ القرار، حيث يحتاج المستهلك إلى رؤية عائد واضح على الاستثمار لتبرير السعر المرتفع.

وقد أولى البحث اهتماماً خاصاً بأجهزة التكييف والثلاجات، بوصفها الأجهزة الأكثر استهلاكاً للطاقة في المنازل الهندية المعاصرة. وأوضح أن تحسين كفاءة هذه الأجهزة تحديداً يمكن أن يؤدي إلى خفض هائل في ذروة الطلب على الشبكة القومية، مما يقلل من احتمالات انقطاع التيار. كما رصد البحث اتجاهاً متزايداً في المدن الكبرى نحو اقتناء أجهزة متعددة في المنزل الواحد، مما يضاعف من أهمية اختيار الموديلات الموفرة للطاقة للحد من البصمة الكربونية الحضرية بشكل فعال.

وخلص البحث إلى أن مجرد وجود الأجهزة الموفرة في السوق ليس كافياً، بل يجب تعزيز الحوافز المالية وخفض الضرائب على التقنيات الخضراء لتشجيع الانتقال الجماعي نحو الكفاءة. واقترح تكثيف الحملات التوعوية التي تربط بين كفاءة الطاقة والفوائد الاقتصادية المباشرة للأسرة، بالإضافة إلى تطوير معايير صارمة

للمنتجين لضمان استمرارية الابتكار في خفض الاستهلاك، مع ضرورة مراعاة التنوع الاقتصادي بين فئات السكان في المدن. خلص البحث إلى أن المستهلك الحضري هو لاعب أساسي في معادلة أمن الطاقة، وأن قرارات الشراء الفردية تشكل في مجموعها ضغطاً أو تخفيفاً على موارد الدولة. لكنه بين كذلك عدم وجود أي تأثير إيجابي لأنشطة التوعية التي قامت بها شركة كهرباء BESCOM في بنغالور*.

الجزء الثالث: النمذجة الاقتصادية لسياسة الطاقة

البحث (10): هل من الممكن الحفاظ على النمو الاقتصادي مع خفض نمو الطاقة والانبعاثات؟

كيفية قياس ذلك؟

Is it Possible to Maintain Economic Growth While Reducing Energy and Emissions Growth. How to Measure?

Joyashree Roy, Nandini Das, Shyamasree Dasgupta, and Shreya Some

قدم هذا البحث إطاراً تحليلياً معمقاً لواحدة من أكثر القضايا إلحاحاً في الاقتصاد السياسي والبيئي المعاصر، وهي إمكانية فك الارتباط (Decoupling) بين التنمية الاقتصادية واستهلاك الطاقة. انطلق البحث من نقد للفرضية التقليدية التي ترى أن النمو الاقتصادي يتطلب بالضرورة زيادة مطردة في استخدام الطاقة وانبعاثات الكربون، مؤكداً أن الانتقال إلى اقتصاد منخفض الكربون ليس مجرد التزام بيئي، بل هو مسار ممكن تقنياً واقتصادياً إذا ما تم تبني منهجيات قياس دقيقة وسياسات هيكلية مدروسة.

استهل الباحثون دراستهم بتفكيك مفهوم فك الارتباط، مفرقين بين نوعين رئيسيين:

1. فك الارتباط النسبي الذي يحدث عندما ينمو الناتج المحلي الإجمالي بمعدل أسرع من معدل نمو استهلاك

الطاقة أو الانبعاثات. في هذه الحالة، تستمر الانبعاثات في الزيادة، ولكن بكثافة أقل لكل وحدة نمو.

2. فك الارتباط المطلق وهو الهدف الأسمى الذي يسعى إليه البحث، حيث يستمر الاقتصاد في النمو بينما

تبدأ مستويات استهلاك الطاقة أو الانبعاثات في الانخفاض الفعلي. ويرى الباحثون أن التحول نحو هذا

النوع، يمثل المفتاح الوحيد لتحقيق أهداف اتفاق باريس للمناخ دون التضحية بالرفاه الاقتصادي.

خصص البحث حيزاً واسعاً لشرح أدوات القياس، معتبراً أن الأرقام الخام لا تعكس الحقيقة دائماً. وفي هذا المقام

اقترح استخدام مؤشرين أساسيين:

* قدمت الشركة ورش عمل مثل تلك في 2024 لترويج الطاقة الشمسية، بالتعاون مع بائعي الألواح الشمسية وجمعيات السكان. وتبعتها لاحقاً حملات عامة لتوفير الطاقة مثل (ساعة الأرض)، ونصائح على موقعها لاستخدام أجهزة موفرة.

1. **كثافة الطاقة:** وهي نسبة إجمالي استهلاك الطاقة إلى الناتج المحلي الإجمالي. حيث أن انخفاض هذه الكثافة بمرور الوقت هو دليل ملموس على تحسن الكفاءة التقنية وتطور البنية الاقتصادية.
2. **مرونة الطاقة:** وهي مقياس يربط النسبة المئوية للتغير في استهلاك الطاقة، بالنسبة المئوية للتغير في الناتج المحلي الإجمالي. إذا كانت القيمة أقل من الواحد الصحيح، فهذا يشير إلى بداية نجاح عملية فك الارتباط. ويؤكد الباحثون أن القياس يجب أن يشمل أيضاً كثافة الكربون لضمان أن تقليل استهلاك الطاقة لا يتم استبداله بمصادر طاقة أكثر تلوثاً.

الحالة الهندية

حلل البحث بيانات الهند على مدى عقود، ورصد تحولاً مهماً في طبيعة الاقتصاد الهندي، إذ لاحظ أن الهند نجحت بالفعل في تحقيق فك ارتباط نسبي واضح، حيث تراجعت كثافة الطاقة بشكل مستمر منذ تسعينات القرن الماضي. وبين أن سبب هذا النجاح يرجع إلى عاملين:

1. التحول نحو قطاع الخدمات: نمو الاقتصاد الهندي مدفوع بشكل كبير بقطاع الخدمات مثل تكنولوجيا المعلومات والتمويل، وهو قطاع أقل استهلاكاً للطاقة مقارنة بالصناعات الثقيلة.
2. التحسينات التكنولوجية: تبني تقنيات أكثر كفاءة في العمليات الصناعية وتوليد الكهرباء. لكن البحث شدد على أن الوصول إلى فك الارتباط المطلق في دولة نامية مثل الهند يواجه تحديات جسيمة، نظراً للحاجة المستمرة لتوسيع البنية التحتية والتصنيع، بهدف رفع ملايين السكان من خط الفقر.

وأوضح البحث أن الحفاظ على النمو مع تقليل الانبعاثات يتطلب مزيجاً سياسياً يتجاوز الحلول التقنية البسيطة. وفي هذا السياق اقترح ضرورة التركيز على:

1. إصلاح هيكل الطلب عبر تشجيع التحول نحو أنماط استهلاك مستدامة من خلال الحوافز الضريبية.
2. الاستثمار في الابتكار ودعم البحث والتطوير في تقنيات تخزين الطاقة والهيدروجين الأخضر.
3. إعادة تعريف النمو وضرورة التحول من قياس (كمية النمو) إلى قياس (جودة النمو)، بحيث تدرج التكاليف البيئية ضمن الحسابات القومية.

خلص البحث إلى أن فك الارتباط ليس مجرد خيار نظري، بل هو ضرورة وجودية، ويمثل القياس الدقيق الخطوة الأولى للإدارة الناجحة، فما لا يمكن قياسه لا يمكن إدارته. وعمل الباحثون على تقديم خارطة طريق تجمع بين الصرامة الأكاديمية والواقعية السياسية، مؤكدين أن المسار نحو اقتصاد أخضر لا يعني بالضرورة تباطؤاً اقتصادياً، بل يعني إعادة اختراع طريقة إنتاج واستهلاك الثروات.

البحث (11): استخدام نماذج التوازن العام القابلة للحساب في تحليل سياسة الطاقة

Use of Computable General Equilibrium Modelling for Energy Policy Analysis

Suvajit Banerjee and Sanjib Pohit

يبين الباحثان في المقدمة أن إجراء تجارب سياسات الطاقة على أنظمة الطاقة الحقيقية قد يكون أمراً خطيراً ومكلفاً، أو حتى مستحيلاً، ولذلك تم اعتماد النماذج الرياضية Models كأداة منهجية لتحليل سياسات الطاقة. تعمل هذه النماذج على هيكلة مكونات النظام الاقتصادي والطاقي من خلال تحديد مؤشرات ومعايير معينة وتجربتها، إما بتغيير قيمها أو إدخال مكونات جديدة في النظام. وبين البحث أن نماذج التوازن العام القابلة للحوسبة* أصبحت منهجية قياسية للتمارين الاقتصادية التجريبية الموجهة نحو السياسات، نظراً لقدرتها على التقاط التفاعلات المعقدة بين مختلف الجهات المعنية بالاقتصاد (القطاعات الإنتاجية، الأسر، الحكومة، والتجارة الدولية).

تنوع النماذج (Models) وتصنيفاتها في البحث

استعرض الباحثان أنواعاً متعددة من النماذج المستخدمة في نمذجة سياسات الطاقة، وهي:

- **نماذج من الأعلى إلى الأسفل Top-down:** وهي نماذج تعتبر التفاعلات الاقتصادية والسلوكية أساساً للنموذج، بينما تضع تفاصيل تكنولوجيا الطاقة كعناصر ثانوية.
- **نماذج من الأسفل إلى الأعلى Bottom-up:** وهي نماذج تقنية تركز على تفاصيل تكنولوجيا الطاقة، وسعى البحث إلى ربطها بنماذج (من الأعلى إلى الأسفل) لخلق إطار عمل متكامل يجمع بين السلوك الاقتصادي والتفاصيل التكنولوجية.
- **النماذج الساكنة Static:** تجري تحليلاً لفترة زمنية واحدة لمقارنة وضع التوازن الطاقي قبل الصدمة وبعدها دون النظر في مسار الانتقال الزمني.
- **النماذج الديناميكية Dynamic:** تشمل النماذج الديناميكية التكرارية Recursive والنماذج الديناميكية الاستشرافية Forward-looking، وهي تسمح بدراسة آثار السياسات على المدى القصير والمتوسط والطويل، مما يجعلها أكثر واقعية في تصوير تحولات الطاقة.
- **نماذج الاقتصاد المغلق والمفتوح:** حيث تتدرج النماذج من البساطة (اقتصاد مغلق) إلى التعقيد الذي يشمل التجارة الدولية عبر دالة[†] Armington لنمذجة الاستبدال بين السلع المحلية والمستوردة.

* CGE: Computable General Equilibrium، هو نموذج اقتصادي يحاكي عمل مجموعة من الأسواق معاً (وليس سوقاً واحدة) داخل الاقتصاد كله.
† دالة تجميع رئيسية في نماذج التوازن العام القابل للحوسبة، تنظر في أن السلع المتشابهة الاستخدام تختلف في نظر المستهلك حسب بلد المنشأ.

هيكلية الإنتاج ونمذجة الطاقة

أوضح البحث أن نمذجة الطاقة داخل إطار التوازن العام تتطلب هيكلاً إنتاجياً متداخلاً، حيث يتم استخدام دالة خاصة للمكونات التي ترتبط بنسب ثابتة، مثل المدخلات غير الطاقية. ودالة أخرى للسماح بالتبادل بين مصادر الطاقة المختلفة (مثل التبادل بين الفحم، والنفط، والغاز) وبين الطاقة والمدخلات الأولية (العمل ورأس المال). وأفرد البحث مساحة لنمذجة قطاع الكهرباء، حيث يعتمد إنتاج الكهرباء على معايير تقنية وحرارية تم تقسيمها في النموذج إلى قطاعات فرعية تشمل الوقود الأحفوري والطاقة المتجددة بأنواعها، لتحليل إمكانيات التبادل بينها.

قدم البحث الآلية التي عمل من خلالها على البناء البسيط للنموذج العام القابل للحوسبة، ثم إضافة التفاصيل التي تصل به إلى النموذج المعياري، مبيناً أن تأثير النتائج النهائية لهذا النموذج بأي صدمة متعلقة بسياسة الطاقة، ترتبط بهيكل الإنتاج المتداخل للسلع الطاقية وغير الطاقية الذي يستخدم لتحديد إمكانيات التبادل بين أنواع المدخلات المختلفة*، علاوة على معاملات المرونة التي تستخدم لتحديد مدى سهولة إجراء التبادل بين المدخلات†. وقد توسع الباحثان في عرض النتائج والفرص التي توفرها هذه النماذج في تحليل قضايا الطاقة المعاصرة، ومن أبرزها:

- **تقييم سياسات الكربون:** القدرة على تحليل الآثار الماكرو-اقتصادية لفرض ضرائب الكربون أو تعديلات حدود الكربون، وكيف تؤثر هذه الأدوات على هيكل الانبعاثات والنمو الاقتصادي.
 - **إمكانات استبدال الطاقة:** كشف البحث عن إمكانيات استكشاف فرص استبدال الطاقة في قطاعات الصناعة والخدمات اللوجستية والبناء، مع الأخذ في الاعتبار قيود التكنولوجيا والموارد المتاحة.
 - **إصلاح دعم الطاقة:** توفر النماذج أداة قوية لتقييم أدوار دعم الطاقة، وإصلاح الأسعار، ومعالجة فقر الطاقة، ومدى مساهمة هذه السياسات في تحسين كفاءة استخدام الطاقة.
 - **التنبؤ بالانبعاثات المستقبلية:** تساعد النماذج في عرض اتجاهات استخدام الطاقة وانبعاثات غازات الدفيئة مستقبلاً، ودور التشجير، واستكشاف فرص احتجاز الكربون وتخزينه.
- خلص البحث إلى أن نماذج التوازن العام القابلة للحوسبة تمثل أداة لا غنى عنها لصناع القرار، فهي لا تكفي بتحليل الكفاءة الاقتصادية فحسب، بل تمتد لتشمل تحليل العدالة في توزيع الآثار الناتجة عن تحولات الطاقة، مما يساعد في صياغة سياسات توازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة.

* مثلاً: هل يمكن للمصنع استبدال النفط بالغاز؟

† مثلاً: إذا ارتفع سعر النفط 10%، فكم سيقبل استخدامه ويزيد استخدام الفحم؟

البحث (12): أدوات السياسة لتعزيز الطاقة المتجددة في الهند: تقييم نقدي**Policy Instruments Promoting Renewable Energy in India: A Critical Appraisal***Gopal K. Sarangi*

أشار الباحث إلى أن قطاع الطاقة في الهند يمر بمرحلة انتقال عميقة مدفوعة بضرورات فصل العلاقة بين المناخ والطاقة، وتلبية الطلب المتزايد، وتحقيق أمن الطاقة. وقد وضعت الهند أهدافاً طموحة تشمل الوصول إلى صافي الصفر الكربوني بحلول عام 2070، وزيادة حصة الوقود غير الأحفوري إلى 50% من سعة التوليد بحلول عام 2030. وأكد البحث أن القطاع الخاص يلعب الدور المهيمن في هذا التحول، حيث يمتلك أكثر من 90% من أصول الطاقة المتجددة في البلاد، مما يجعل أدوات السياسة الحكومية المحرك الأساسي (Lubricant) لتحفيز هذه الاستثمارات.

صنف البحث الأدوات السياسية المستخدمة في الهند إلى عدة نماذج تختلف باختلاف طبيعتها وأهدافها، حيث أشار إلى:

- **الأدوات التنظيمية:** وتشمل تعرفه التغذية الكهربائية والتزامات شراء الطاقة المتجددة التي تلزم الكيانات بتوفير نسبة محددة من استهلاكها من مصادر نظيفة.
- **الأدوات المالية والضريبية:** التي تتضمن الاستهلاك المتسارع، والحوافز القائمة على التوليد، والإعفاءات الضريبية، وتمويل فجوة الجدوى (VGF)*، والقروض الميسرة.
- **الأدوات المرتكزة على السوق:** وتتمثل في آلية شهادات الطاقة المتجددة، وتداول الطاقة الخضراء، والمناقصات التنافسية (Competitive Bidding)[†] التي أصبحت النموذج المهيمن مؤخراً.
- **الأدوات المعلوماتية:** التي تهدف إلى تقليل فجوة المعلومات وزيادة الوعي بالتقنيات الجديدة.

ثم استعرض البحث تطور هذه الأدوات عبر ثلاث مراحل زمنية رئيسية:

- **المرحلة الأولى (1993-2010):** مرحلة الدعم العام المباشر، حيث اعتمدت الحكومة بشكل كبير على الحوافز المالية والضريبية التي شكلت عبئاً على الموازنة العامة دون تحقيق تسارع كبير في الإنتاج.
- **المرحلة الثانية (2010-2016):** مرحلة انتقالية شهدت مزيجاً بين الدعم العام وآليات السوق، مثل إدخال نظام شهادات الطاقة المتجددة وعروض المناقصات للطاقة الشمسية.
- **المرحلة الثالثة (2016 حتى الآن):** مرحلة سيادة آليات السوق المكثفة، حيث أصبحت المناقصات

* منحة حكومية تغطي الفارق بين تكلفة المشروع وإيراداته المتوقعة لجعل مشاريع الطاقة المتجددة مربحة اقتصادياً.
† اختيار مطوري مشاريع الطاقة المتجددة من خلال منافسة على أقل سعر لإنتاج الكهرباء.

التنافسية الأداة الأساسية لتحديد الأسعار وتخصيص السعة، مما أدى إلى تحول جذري في اقتصاديات القطاع.

ثم عرض الباحث النتائج التي حققتها سياسات تعزيز الطاقة المتجددة في الهند، وبين أن من أبرزها نقطة كفاءة التكلفة، حيث أثبتت المناقصات التنافسية أنها أكثر فاعلية من حيث التكلفة مقارنة بتعرفة التغذية الثابتة، إذ ساهمت في خفض التعرفة بنسبة تصل إلى 60% في بعض الحالات. كما نجحت السياسات في جذب استثمارات ضخمة من القطاع الخاص بلغت نحو 16.5 مليار دولار في الفترة بين 2023 و2024، مدفوعة بتدفق رأس المال العالمي نحو القطاعات الخضراء. وكشف التقييم النقدي أن نظام المناقصات التنافسية، رغم كفاءته، بدأ يهشم المشاريع الصغيرة التي لا تستطيع المنافسة على قدم المساواة مع الشركات الكبرى في السباق السعري. كما لاحظ البحث وجود تداخل بين الأدوات المختلفة*، مما يتطلب إعادة تصميم حزم السياسات لضمان التكامل بدلاً من التعارض.

خلص البحث إلى أن الطاقة المتجددة في الهند تعامل كسلعة ذات نفع عام، مما يبرر التدخل الحكومي المستمر لتصحيح إخفاقات السوق وضمان استقرار الإمدادات.

البحث (13): التزام الهند في (COP26): كيف تساهم أدوات تنفيذ السياسات في تحسين الحوكمة المناخية

India's Commitment at COP26: How Policy Implementation Instruments Matter for Better Climate Governance *Santap Sanhari Mishra*

استهل الباحث دراسته بتحليل الالتزامات التي أعلنتها الهند في مؤتمر الأطراف (COP26) في غلاسكو، والتي أشار إليها المؤلف بمصطلح الأكاسير الخمسة (five elixirs) موضحاً أن هذه الالتزامات تهدف إلى مواجهة التحديات المناخية من خلال أهداف زمنية محددة لعام 2030، وتتضمن:

1. رفع قدرة الطاقة من المصادر غير الأحفورية إلى 500 جيجاوات.
2. تلبية 50% من احتياجات الطاقة من مصادر متجددة.
3. خفض انبعاثات الكربون المتوقعة بمقدار مليار طن.
4. خفض كثافة الكربون في الاقتصاد إلى نسبة تقل عن 45%.
5. الوصول إلى صافي الصفر الكربوني بحلول عام 2070.

* تم استعراضها في بداية هذا البحث.

ورأى الباحث أن النجاح في تنفيذ هذه الأهداف يعتمد بشكل أساسي على اختيار (أدوات تنفيذ السياسات) المناسبة، كونها الرابط العملي بين النوايا السياسية والتطبيق الفعلي. كما استعرض البحث مجموعة من النماذج والأطر النظرية التي تفسر كيفية اختيار أدوات السياسة العامة، موضحاً أنها لا تخرج عن ثلاثة نماذج، هي:

- نهج الموارد (Resource Approach): الذي يركز على كيفية استخدام الحكومة لمواردها (سواء كانت تنظيمية، أو مالية، أو معلوماتية) لتحقيق النتائج المرجوة.
- نهج الاستمرارية (Continuum Approach): الذي يصنف الأدوات بناءً على مستوى تدخل الدولة، حيث تتراوح من الأدوات الطوعية (منخفضة الإكراه) إلى الأدوات الإلزامية (عالية الإكراه).
- نهج تصميم السياسات التركيبي (Synthetic Policy Design Approach): وهو النموذج الذي تبناه الباحث، حيث يدمج بين نهجي الموارد والاستمرارية لتشكيل مزيج من السياسات يراعي الجدوى السياسية والقيود الاقتصادية.

وعرض الباحث النتائج من خلال اقتراح أدوات تنفيذية محددة لكل التزام مناخي، وذلك وفقاً للآتي:

- **الالتزام الأول (500 جيجاوات طاقة نظيفة):** اقترح البحث إنشاء سلطة تنظيمية موحدة ومفوضة لكافة مصادر الطاقة المتجددة، مع تفعيل نموذج (الفيدالية التنافسية) لتشجيع الولايات على التنافس في تطوير قدرات الطاقة النظيفة.
- **الالتزام الثاني (50% طاقة متجددة):** أكدت النتائج على ضرورة تطبيق (أكواد بناء خضراء) إلزامية للمباني الحكومية والخاصة، واستخدام الأدوات المعلوماتية لدمج مفاهيم الطاقة النظيفة في المناهج الدراسية لضمان وعي مجتمعي طويل الأمد.
- **الالتزام الثالث (خفض مليار طن من الكربون):** شدد البحث على أهمية الانتقال السريع نحو النقل الكهربائي، واقترح تقديم حوافز سوقية مثل إعفاء ضريبي كامل للمركبات الكهربائية حتى عام 2030، مع الاستثمار في تكنولوجيا الهيدروجين الأخضر.
- **الالتزام الرابع (خفض كثافة الكربون):** اقترح الباحث تبني نظام (تداول حصص الطاقة - EQT) في الصناعات الثقيلة، واستخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة الاستهلاك، وتفعيل سياسات صارمة للتخلص من المركبات القديمة الملوثة.
- **الالتزام الخامس (صافي الصفر بحلول 2070):** توصل البحث إلى ضرورة تبني تقنيات متقدمة مثل اصطياد وتخزين ثاني أكسيد الكربون CCS، والنقاط الكربون المباشر من الهواء وتخزينه DACS،

مع مراعاة أن بعض التقنيات مثل احتجاز الكربون وتخزينه من الطاقة الحيوية BECCS قد لا تلائم الهند نظراً لمحدودية الأراضي وتعارضها مع الأمن الغذائي. خلص البحث إلى أن مواجهة أزمة المناخ تتطلب مجموعة متكاملة من الأدوات تجمع بين الإجراءات الإلزامية، والحوافز السوقية، والجهود الطوعية، مع ضرورة ربط هذه الأدوات بقطاعات الزراعة والنقل والصناعة بشكل شمولي.

تحليل نقدي لضمون الكتاب*

يقدم هذا الكتاب إسهاماً مهماً في أدبيات اقتصاديات الطاقة في سياق الدول النامية، من خلال تركيزه على شبه القارة الهندية بوصفها حالة دراسية تعكس التداخل المعقد بين النمو الاقتصادي، وأمن الطاقة، والاستدامة البيئية. وتكمن إحدى أبرز نقاط قوة الكتاب في الطرح المفاهيمي الذي يؤكد أن أي مصدر للطاقة لا يمكن اعتباره خالياً تماماً من الآثار البيئية، وهو طرح يساهم في نقل النقاش من التوجهات المثالية إلى إطار أكثر واقعية يركز على تحسين كفاءة استخدام الطاقة وإدارة الطلب. وفي هذا السياق، يولي الكتاب أهمية واضحة لمفاهيم كفاءة الطاقة وعمليات التدقيق، مقدماً إياها كمدخل اقتصادي معقول لمعالجة اختلالات العرض والطلب، خاصة في الاقتصادات النامية. ويعد هذا التوجه ذا قيمة تطبيقية، إذ يعيد تعريف توفير الطاقة بوصفه بديلاً وظيفياً لإنتاجها، بما يتسق مع الأدبيات الاقتصادية التي ترى في تقليل الفاقد أحد أكثر المسارات كفاءة من حيث التكلفة. مع ذلك، يلاحظ أن الكتاب، في عدد من أبحاثه، يتبنى إطاراً معيارياً متأثراً بشدة بأجندة التحول نحو صافي الانبعاثات الكربونية، دون أن يقدم معالجة حاسمة للوضع البنوي بين أهداف الاستدامة ومتطلبات التنمية في سياق دولة مثل الهند. إذ يظل السؤال الجوهرى المتعلق بإمكانية تحقيق انتقال طاقي عادل -في ظل الاعتماد الكبير على مصادر طاقة منخفضة التكلفة مثل الفحم- مطروحاً دون إجابة تحليلية كافية. ويبدو أن بعض الطروحات تفترض ضمناً قدرة السياسات العامة على إعادة تشكيل السلوك الاقتصادي بصورة سريعة، وهو افتراض قد لا ينسجم مع القيود الهيكلية التي تواجهها الاقتصادات النامية. لذلك لوحظت في الكتاب رؤية تحليلية راديكالية تتسم بالتطرف ضد الوقود الأحفوري، وهو أمر جعل الكتاب يعكس الجدلية العميقة بين تيار واقعي يرى التحول عملية تدريجية محكومة بالقيود الاقتصادية، وتيار ينظر إلى التحول الطاقي من زاوية ضيقة فيراه ضرورة حتمية تتطلب إجراءات هيكلية فورية. كما يلاحظ أن الكتاب يمنح مساحة واسعة لتقنيات مستقبلية مثل احتجاز الكربون والهيدروجين الأخضر، بوصفها جزءاً من مسار التحول الطاقي، غير أن معالجة هذه التقنيات

*م. تركي حسن حمش.

تظل أقرب إلى الطرح الأكاديمي الاستشراقي منها إلى التقويم الاقتصادي الواقعي، خاصة في ظل محدودية نضجها التجاري وارتفاع تكاليفها الاستثمارية. ومن ثم فإن إدماجها في توصيات السياسات يتطلب قدراً أكبر من التحليل المتعلق بالمخاطر المالية والقدرة المؤسسية على التنبؤ.

من جهة أخرى، يميل الكتاب إلى تناول أمن الطاقة من منظور اقتصادي وتقني داخلي يركز على توازنات العرض والطلب وآليات التسعير، في حين يبقى البعد الجيوسياسي -المتعلق بأمن سلاسل الإمداد والممرات الحيوية- حاضراً بصورة محدودة نسبياً. وعلى الرغم من الإشارات إلى تأثير العوامل الجيوسياسية على الأسواق، إلا أن التحليل لا يتوسع في دراسة نقاط الاختناق الاستراتيجية التي قد تؤثر بشكل مباشر على استقرار الإمدادات، وهو جانب تزداد أهميته في ضوء التقلبات الراهنة في أسواق الطاقة العالمية.

علاوة على ذلك، يبرز في الكتاب نوع من التناقض الواضح المتمثل في توجه يدعو إلى إعادة هيكلة دور الدولة عبر تقليص دعم الوقود الأحفوري مع الدعوة إلى تعزيز الإنفاق على البنية التحتية للطاقة النظيفة! هذا الطرح يثير تساؤلات حول الاستدامة المالية، خاصة في ظل محدودية الموارد العامة في الدول النامية، واحتمال تعارض هذه السياسات مع أولويات قصيرة الأجل تتعلق بأمن الطاقة وتكلفة المعيشة.

رغم هذه الملاحظات، يظل الكتاب مرجعاً لفهم كيفية تفكير الباحثين وصنّاع السياسات في قضايا الطاقة في شبه القارة الهندية (وربما في كل الدول المستهلكة)، لا سيما من خلال عرضه لأدوات السياسات مثل تسعير الكربون، والأطر التنظيمية، وآليات تحسين الكفاءة. كما يوفّر إطاراً تحليلياً يمكن أن تستفيد منه القطاعات المختلفة، بما في ذلك شركات الطاقة التقليدية، في التكيف مع التحولات التنظيمية المتوقعة. ويمكن القول إن الكتاب نجح في رسم ملامح خارطة طريق للتحول الطاقوي، دون بيان الطرق الفعلية على هذه الخارطة، ذلك أن فعاليتها تظل مرهونة بمدى قدرتها على التوفيق بين الطموحات البيئية والقيود الاقتصادية والواقعية الجيوسياسية، ذلك أن أي انتقال أو تحول ناجح في مجال الطاقة ينبغي أن يبنى على الاعتراف بالدور المستمر لمصادر الطاقة التقليدية كشريك في مرحلة التحول، وليس كمنافس ينبغي الاستغناء عنه.

ملاحظة:

مثل كل الكتب المشابهة التي تعتمد على محرر وأكثر من مؤلف، يلاحظ في الكتاب وجود تفاوت في الأسلوب والمنهج، ووجود بعض التكرار في المفاهيم (مثل تعريفات الطاقة والأزمة)، وهو أمر يساهم إيجابياً في عرض مختلف وجهات النظر حول موضوع واحد، لكنه في الوقت نفسه يجعل الكتاب في المجمل معتمداً بشكل كبير على الأدبيات القائمة والأطر النظرية المعروفة لذلك يكون وصفيّاً أكثر منه تحليلياً.

نبذة عن محوري الكتاب

Anindya Bhukta: كاتب لديه اهتمامات عميقة في مجالات متنوعة مثل الاقتصاد، والبيئة، والسياسة، والتاريخ. وقد أثمر هذا الاهتمام عن تأليف ما يقرب من تسعين كتاباً، معظمها باللغة البنغالية. ومن أهم هذه الكتب معجمان باللغة البنغالية، أحدهما في الاقتصاد والآخر في البيئة. وإلى جانب كتاباته الجادة، يشتهر أيضاً بأعماله الأدبية باللغة البنغالية. ورغم أنه يدرس مادة الاقتصاد في مرحلة البكالوريوس ويؤلف كتباً مدرسية في هذا التخصص، إلا أن مجال بحثه يتركز على حقوق الملكية الفكرية، وله عدة كتب في هذا المجال باللغتين البنغالية والإنجليزية.

Somnath Hazra: يقود مبادرات في مجالات الحوكمة البيئية والاجتماعية والمؤسسية، والاستدامة، والحلول القائمة على الطبيعة في الهند. كما يشغل منصب موجه في المعهد الدولي للبيئة والتنمية في لندن، ويتركز عمله على أبحاث الخسائر والأضرار الناجمة عن تغير المناخ. بصفته خبيراً في الاقتصاد البيئي مع خبرة ما بعد الدكتوراه في اقتصاديات المناخ، يتمتع الدكتور Hazra بخبرة تزيد عن 20 عاماً، وقام بتدريس الاقتصاد البيئي في (Jadavpur University) وجامعات أخرى في ولاية بنغال الغربية. تعاون مع منظمات دولية مختلفة، كما تعامل مع شركات هندية في قطاعي الكيماويات والأدوية. وبفضل امتلاكه أكثر من 80 ورقة بحثية حول الاقتصاد البيئي، وتغير المناخ، والاقتصاد الأزرق، والتنمية المستدامة، شارك في العديد من المهام الدولية وساعد الحكومات المحلية في وضع خطط عمل لمواجهة تغير المناخ.



Abstract

Technologies for Converting Waste into Renewable Energy

Dr. Nova Juma

This research examines integrated technologies for converting various waste streams into renewable and clean energy, with the dual objectives of enhancing energy security and mitigating environmental impacts. The study focuses on four principal waste-to-energy pathways: biodiesel production from waste cooking oils, fuel generation through thermal degradation (pyrolysis) of plastic waste, biogas production via anaerobic digestion of organic and animal waste, and hydrogen production from aluminum waste.

Key technical achievements include identifying optimal operating conditions for biodiesel production through transesterification using heterogeneous solid catalysts, and designing laboratory-scale reactors for plastic pyrolysis and anaerobic digestion. The plastic waste pyrolysis process yielded flammable liquid fuels and gases with compositions comparable to petroleum fuels, as well as recoverable mineral oxides. The use of heterogeneous catalysts significantly enhanced heating rates and fuel yields, particularly in the pyrolysis of rubber compared to polyethylene terephthalate.

In parallel, anaerobic digestion of household and animal organic waste produced combustible biogas and valuable organic fertilizer, demonstrating a simple, cost-effective, and environmentally friendly solution adaptable to both mobile and fixed units. The study also highlights the feasibility of using wastewater as a water source and as a provider of anaerobic bacteria, especially in remote areas. Seasonal operational optimization was proposed using simple solar collectors to maintain fermentation temperatures.

Additionally, the research successfully demonstrated clean hydrogen production through the oxidation of aluminum waste using hydrochloric acid, with high-efficiency recovery of aluminum oxide. The recovered aluminum oxide was identified as a valuable by-product that can be reused as a catalyst in biodiesel production or catalytic plastic pyrolysis, enhancing circular economy outcomes.

Overall, the results confirm that fuels produced from waste—biodiesel, plastic-derived fuels, biogas, and hydrogen—meet relevant technical and environmental standards and can partially substitute conventional fossil fuels, particularly in the transportation and energy sectors. The study concludes with policy-oriented recommendations emphasizing the development of enabling infrastructure, promotion of small and medium-sized renewable energy projects, support for research and development linked to national industrial capabilities, and encouragement of green investments across all waste categories.

Abstract

Renewable energies and their potential role in the global energy transition process

Taher Abdel Salam Al-Zaytouni

Today's global energy sector is undergoing an accelerated structural transformation. The policy options driving its current and foreseeable future include energy efficiency and productivity, fossil fuel conversion, carbon capture and storage, renewable energy expansion, and the share of nuclear energy in the energy mix. The wide range of potential portfolios of these options are being thoroughly evaluated on an ongoing basis in terms of their contribution to supporting development on the one hand, and their role in facilitating the transition to a sustainable approach to energy production and consumption on the other hand.

And given the important role that renewable energies can play in this area, this study will focus primarily on renewable energies and their potential role, among the collection of the available alternatives, in the global energy transition agenda. The study addresses this topic through five main chapters, in addition to the conclusion and recommendations.

The first chapter deals with developments in using renewable energies globally and in Arab countries, as well as the Arab investments in renewable energies, the second chapter deals with modern technologies for the production of renewable energies and cost trends in renewable energy technologies, the third chapter reviews the future prospects for renewable energies in terms of the features of the global transformation in the energy sector and its main indicators and future expectations for the demand for primary energy sources, the fourth chapter is dedicated to national and international policies, and their role in promoting the deployment of renewable energy, while the fifth chapter deals with the challenges and difficulties facing the wider use of renewable energies, the study concluded with the conclusion and the following recommendations:

- OPEC member countries have huge investment opportunities in the renewable energy sector, as in the case of oil and gas sector, due to huge resources and strong growth in domestic energy demand. Some of these countries face a real challenge due to the pressure on their budgets resulting from the trade-off between investing large sums in these two sectors, and investment needs in other economic sectors to achieve sectoral balance for development, but investing in more renewable energy in the domestic demand mix means freeing up more oil and gas for exports and creating more new jobs in wages in the short term, and promoting sustainability in the longer term. Therefore, countries facing this challenge should seriously consider the vital role of strategic planning in achieving clear and sustainable goals and providing a comprehensive roadmap aimed at directing investments and projects towards specific paths. The role of strategic planning should not be limited to setting goals, but should include designing clear programs and precise implementation procedures (including, in this context, possible legislative reforms to enhance investment attractiveness), allowing periodic measurement of progress and identifying areas for improvement.
- There is a strong need to modernize electric utilities and networks in operation in some countries with weak utilities and networks. Renewable energy sources, primarily wind and solar energy, will not be able to bring the desired transformation unless electricity utilities are strong, financially sustainable, and qualified to attract the necessary investments to modernize networks and meet increasingly complex needs, as renewable energy differs from fossil energy in that solar and wind energy depend on whether factors and change accordingly from one season to another, and sometimes from one minute to another, so modernizing the existing infrastructure may include adapting it to these changes. The sector also needs to direct more investment to manage larger amounts of distributed energy sources, such as rooftop solar panels, as customers increasingly use them to power their homes while selling the surplus back to utilities.
- The overall environmental and social impacts of Renewable energy technologies need to be carefully considered for the mineral extraction and processing activities involved in the deployment of the green technologies, which, if not properly managed, may hinder the achievement of climate and related sustainable development goals.
- The concept of international cooperation in the integration of renewable energies into the global energy system must move from high-level understandings to the level of practical application, and work in the form of technical partnerships and joint operational task forces, in a way that brings together the real international players in the various stages of the renewable energy industry supply chains to work together to achieve one goal: finding and applying real solutions to the real challenges that constitute the technical and cost barriers that restrict the industrialization of the renewable energy industry at all stages of its supply chains.
- The study recommends the preparation of detailed maps of the global supply chains for the renewable energy industry, showing the countries or regions eligible for localization of content and value addition, to achieve diversification in the distribution of sources and production, and regional supply chains.

However, the research also identified critical challenges. Dust accumulation reduced panel efficiency by 20% monthly, necessitating biweekly robotic cleaning using drones equipped with rotating brushes. Additionally, thermal losses escalated in summer, with panel temperatures exceeding 50°C, diminishing efficiency by 8–10%. To mitigate this, the study introduced a hybrid cooling system combining passive air ventilation (via elevated mounting structures) and active water-cooling loops, which stabilized temperatures at 35–40°C and improved efficiency by 12%. Economic analyses revealed an initial investment of \$1.2 million for a 1 MW system, with a 6–7-year payback period under current diesel prices (\$0.80/L). However, government subsidies, such as Saudi Arabia's National Renewable Energy Program (NREP), could shorten this to 4 years by covering 30% of installation costs.

The study's findings underscore the viability of solar hybridization as a strategic investment for the oil and gas sector. Beyond cost savings, the system enhances operational reliability by reducing unplanned downtime by 30%, as evidenced by uninterrupted pump operation during six simulated grid outages. Furthermore, it aligns with Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 13 (Climate Action), while supporting corporate ESG (Environmental, Social, and Governance) targets. For instance, a station adopting this model could achieve LEED certification or comply with ISO 50001 energy management standards, bolstering its market reputation.

Despite these advantages, barriers to adoption persist. High upfront costs of lithium-ion batteries (40% of total system expenses) and a shortage of technicians trained in hybrid energy systems remain significant hurdles. To address these, the study advocates for Energy Performance Contracts (EPCs), where third-party investors fund installations in exchange for a share of long-term energy savings. It also recommends partnerships with technical universities to develop specialized training programs in solar-hybrid system maintenance.

Looking forward, the research highlights emerging opportunities to expand this model. For example, excess solar energy could produce green hydrogen via electrolysis, providing a carbon-neutral fuel for backup generators or heavy machinery. Additionally, AI-driven predictive maintenance platforms could further optimize performance by analyzing real-time data from IoT sensors to forecast equipment failures or efficiency dips.

This study positions solar-hybrid systems as a linchpin for modernizing the oil and gas industry's energy infrastructure. By mitigating outage risks, slashing emissions, and future-proofing operations against regulatory shifts, the model exemplifies how traditional industries can harmonize profitability with planetary stewardship.

Abstract

Flat-Plate Solar Collector System to Supply Energy to Gas Reinjection Stations During Power Outages.

Dr. Mahdi Goucem

The global oil and gas industry faces mounting pressure to balance operational reliability with environmental sustainability, particularly in critical infrastructure such as gas reinjection stations. These facilities are essential for maintaining reservoir pressure and optimizing hydrocarbon recovery, yet their dependence on conventional power sources—such as diesel generators and centralized grids—exposes them to significant risks during power outages. Sudden electricity interruptions disrupt lubrication and cooling systems, leading to catastrophic mechanical failures, including thermal deformation of turbine shafts and bearing warping, which can halt operations for weeks and incur multimillion-dollar repair costs. Compounding these challenges are escalating environmental regulations and global commitments to reduce carbon emissions under frameworks like the Paris Agreement. This research proposes a transformative solution: integrating a flat solar collector system hybridized with battery storage to ensure uninterrupted power supply, enhance operational resilience, and align with sustainability goals.

The study focuses on designing, simulating, and field-testing a solar-diesel hybrid energy system tailored for gas reinjection stations in arid environments, such as those in the Middle East and North Africa (MENA), where extreme temperatures, frequent sandstorms, and high solar irradiance coexist. The system employs LR5-72HTH-600M photovoltaic panels, selected for their high efficiency (22.3% under standard test conditions) and durability in harsh climates. These panels are arranged in 21 parallel strings, each containing 26 panels, to achieve a total capacity of 328 kW. The configuration ensures optimal voltage (1,052 V) and current (290 A) outputs, compatible with the SOFAR 350KTX0 inverters, which feature seven independent Maximum Power Point Tracking (MPPT) channels to mitigate efficiency losses from partial shading or dust accumulation. To address the region's environmental challenges, the panels are mounted at a 29° tilt angle and oriented southward to maximize annual solar absorption, a design validated through 3D solar path simulations using tools like PVsyst and Helioscope.

A cornerstone of the system is its 500 kWh lithium-ion battery bank, engineered to provide backup power during grid failures or nighttime operations. The batteries are managed via an intelligent energy storage system (ESS) that prioritizes load-critical equipment, such as lubrication pumps and circulation fans, while optimizing charge/discharge cycles to extend battery lifespan. Field tests conducted over 12 months at a gas reinjection station in Saudi Arabia demonstrated the system's ability to generate 1,450 MWh of annual energy, offsetting 85% of the station's diesel consumption. This resulted in a 25% reduction in operational costs (equating to \$160,000 in annual savings) and a 480-ton annual reduction in CO₂ emissions—equivalent to removing 104 gasoline-powered vehicles from roads.

Contents

Articles

Flat-Plate Solar Collector System to Supply Energy to Gas Reinjection Stations During Power Outages. 7

Dr.Mahdi Goucem **Abstract 7**

Renewable energies and their potential role in the global energy transition process 55

Taher Abdel Salam Al-Zaytouni **Abstract 9**

Technologies for Converting Waste into Renewable Energy 135

Dr. Nova Juma **Abstract 10**

Reports

Quarterly coverage of the latest developments in new and renewable energies, energy transition issues 255

Maged Amer

Book Review

Economics of the energy Crisis Environment, Policy and Security in the Indian Subcontinent 313

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.

2. Articles should not exceed 40 pages (including text, tables, and figures) excluding the list of references. The full text of the article should be sent electronically as a Word document.
3. Figures, maps, and pictures should be sent in a separate additional file in JPEG format.
4. “Times New Roman” should be used with font size 12. Line spacing should be 1.5. Text alignment should be “justified”.
5. Information sources and references should be referred to/enlisted in a clear academic method.
6. When citing information from any source (digital, specific vision, or analysis), plagiarism should be avoided. Such information should be rephrased by the researcher’s own words while referring to the original source. For quotations, quotation marks (“...”) should be used.
7. It is preferred to write the foreign names of cities, research centres, companies, and universities in English not Arabic.
8. The researcher’s CV should be attached to the article if it was the first time he/she cooperates with the journal.
9. Views published in the journal reflect those of the authors and do not necessarily represent the views of OAPEC. The arrangement of the published articles is conditioned by technical aspects.
10. Authors of rejected articles will be informed of the decision without giving reasons.
11. The author of any published article will be provided with 5 complementary copies of the issue containing his/her article.

**Articles and reviews should be sent to:
The Editor-in-Chief, Oil and Arab Cooperation Journal, OAPEC**

**E-mail : oapec@oapecorg.org
oapecmedia@oapecorg.org
www.oapecorg.org**

PUBLICATION RULES

DEFINITION AND PURPOSE

OIL AND ARAB COOPERATION is a refereed quarterly journal specialized in oil, gas, and energy. It attracts a group of elite Arab and non-Arab experts to publish their research articles and enhance scientific cooperation in the fields relevant to the issues covered by the journal. The journal promotes creativity, transfers petroleum and energy knowledge, and follows up on petroleum industry developments.

RESEARCH ARTICLES

The journal welcomes all research articles on oil, gas, and energy aiming at enriching the Arab economic literature with new additions.

BOOK AND RESEARCH REVIEWS

The journal publishes articles presenting analytical reviews on books or studies published on oil, gas, and energy in general. These reviews work as references for researchers on the latest and most important petroleum-industry-related publications.

REPORTS

They tackle a conference or seminar attended by the author on the condition that they are relevant to oil, gas, and energy. Also, the author should obtain the permission of the institution that delegated or sponsored him/her to attend that event allowing him/her to publish their article in our journal. The report should not exceed 10 pages including figures, charts, maps, and tables if available.

RESEARCH CONDITIONS

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



OIL AND ARAB COOPERATION

Editor - in - Chief

Eng. Khalid Al-Otaibi

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

All Correspondences should be directed to:
Editor-in-Chief of Oil and Arab Cooperation Journal



OIL AND ARAB COOPERATION





ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES
OAPEC

OIL & ARAB COOPERATION



Volume 53 - 2026 - Issue 196

Articles

- Flat-Plate Solar Collector System to Supply Energy to Gas Reinjection Stations During Power Outages.
Dr. Mahdi Goucem
- Renewable energies and their potential role in the global energy transition process
Taher Abdel Salam Al-Zaytouni
- Technologies for Converting Waste into Renewable Energy
Dr. Nova Juma

Reports

- Quarterly coverage of the latest developments in new and renewable energies, energy transition issues
Maged Amer

Book Review

- Economics of the energy Crisis
Environment, Policy and Security in the Indian Subcontinent
Eng. Torki Hasan Hemsh