منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

دراسة

منظور الطلب المستقبلي على الطاقة في ظل التحول الطاقي

Future Energy Demand Perspective in the Context of Energy Transition

OAPEC Oapec Oapec @OAPEC1 OAPEC1 OAPEC ORG

دولة الكويت - مارس 2025

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

إعداد
م. تركي حسن حمش
خبير بترول/ استكشاف وإنتاج

مراجعة
م. عماد ناصيف مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية

إعتماد
المهندس جمال عيسى اللوغاني
الأمين العام

مقدمة

الطاقة هي شريان الحياة للمجتمع فهي المحفز للنمو الاقتصادي والتنمية الاجتماعية وتحسين نوعية الحياة، وبدونها سيغرق العالم في الظلام والركود. ولا ريب أن الدور المحوري للطاقة في الحضارة الإنسانية واضحٌ كالشمس في رابعة النهار، فقد تطورت طبيعة مصادر الطاقة بشكل كبير منذ القدم، وعلى مدار القرن الماضي هيمن النفط والغاز الطبيعي - والفحم في المقام الأول- على مزيج الطاقة العالمي، وساهمت طاقة الوقود الأحفوري في كل شيء، وانتشلت مئات ملايين البشر من براثن الفقر وأسهمت في تحقيق نمو اقتصادي لم يسبق له مثيل. لكن المخاوف البيئية بدأت تلح بشكل متزايد على أسواق الطاقة، وظهرت التحديات المناخية التي تدعو إلى تخفيض انبعاثات الكربون، كما بدأت المزيد من الأصابع تشير إلى إمكانية نضوب الموارد المتاحة من النفط والغاز. هذه العوامل وغيرها، باتت تحث المجتمعات على البحث عن حلول تسهم في أمن الطاقة وتنويع مصادرها وتحرّي الأنواع الأنظف من بينها. فظهر تعبير "التحول الطاقي" أو تحولات الطاقة، ليشير إلى عملية تغيير اقتصادي واجتماعي عميقين، ولم يكن ذلك بالأمر الجديد كلياً، بل سبقه تطور تدريجي مدفوع بالتقدم التكنولوجي والتحولات السياسية والأولويات المجتمعية المتغيرة. إلا أن الرحلة نحو مستقبل منخفض الكربون تبدو معقدة ومتعددة الأوجه، فهي تنطوي على أهمية إيجاد توازن دقيق بين ضمان أمن الطاقة من جهة، وبين القدرة على تحمل التكاليف والاستدامة من جهة أخرى، وهو ما تجلى في عدة أشكال من بينها الأهمية المتزايدة للعناصر الأرضية الحرجة والنادرة في تشكيل مسار هذا التحول، حيث تتركز سلسلة التوريد لهذه المواد في عدد قليل من البلدان، مما يثير مخاوف مبررة بشأن المخاطر الجيوسياسية والآثار البيئية للاستخدام المتزايد لهذه العناصر. بعبارة أخرى، هناك تحدٍ يتمثل في إدارة التخلص التدريجي من الكربون بمسؤولية وإنصاف، مع نشر بدائل الطاقة النظيفة إن كانت فعلاً قادرة على الحلول مكان الوقود الأحفوري أو مكان جزء كبير منه. ويبقى من الضروري أمام صنّاع القرار في كل المؤسسات تفهم ديناميكيات تحول الطاقة، والدور المحوري للوقود الأحفوري، وأهمية العناصر الحرجة والنادرة، وإدراك أن التعامل مع هذه الشبكة المتداخلة من المفاهيم أمر في غاية الأهمية للتحول إلى اقتصاد الطاقة النظيفة وإمكانية إيصالها إلى الجميع. خاصة وأن تحولات الطاقة تختلف وفقاً للمصالح والموارد المتاحة لكل دولة. ضمن هذا المضمار، تصدر المنظمة هذه الدارسة حول منظور الطلب المستقبلي على الطاقة في ظل التحول الطاقي، والتي تأمل أن يكون فيها من المعلومات ما يعود بالفائدة على الباحثين والمهتمين بالصناعة البترولية بشكل عام.

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

ملخص تنفيذي

تناولت دراسة منظور الطلب المستقبلي على الطاقة في ظل التحول الطاقي، دور العناصر الحرجة والنادرة، والتحديات التقنية والاقتصادية والسياسية والاجتماعية، وتوقعات الطلب المستقبلي على الطاقة.

تحدث الفصل الأول عن مفهوم الطاقة ومفهوم تحول الطاقة، وأسباب التحول الطاقي التي تشمل التغير المناخي، الاستدامة البيئية، الأمن الطاقي، التطور التكنولوجي، والسياسات الحكومية والدولية. كما تناول الفصل دور الحكومات في دفع عجلة التحول الطاقي.

أشار الفصل الثاني إلى أهمية العناصر الحرجة والنادرة في التحول الطاقي، مثل الليثيوم والكوبالت وغيرها، مع الإشارة إلى احتياطيات وإنتاج هذه العناصر وتوزعها الجغرافي، والمخاوف الجيوسياسية والبيئية المرتبطة بها.

تناول الفصل الثالث التحديات التقنية التي تشمل تخزين الطاقة، وكفاءة الطاقة، والشبكات الذكية. كما تطرق إلى التحديات الاقتصادية التي تتطلب استثمارات ضخمة في البنية التحتية والتكنولوجيا، والتحديات السياسية التي تتطلب تعاوناً دولياً وسياسات داعمة، وبيّن بعض التحديات الاجتماعية التي تشمل تغيير سلوكيات الأفراد والمجتمعات وتأثير فقدان الوظائف في قطاعات الطاقة التقليدية.

تحدث الفصل الرابع عن مزيج الطاقة العالمي واستهلاك الطاقة، وتأثير السيارات الكهربائية على استهلاك النفط، وتأثير الذكاء الاصطناعي على زيادة الطلب على الطاقة، ودور النمو السكاني في زيادة استهلاك الطاقة. كما تناول الفصل توقعات الطلب المستقبلي على الطاقة بناءً على سيناريوهات متعددة.

خلصت الدراسة إلى أن التحول الطاقي يتطلب توازناً دقيقاً بين ضمان أمن الطاقة، والقدرة على تحمل التكاليف، والاستدامة، وبينت أن النفط والغاز سوف يشكلان الجزء الأساسي من مزيج الطاقة في المدى المنظور، بحيث لن يقل الطلب عليهما عن 210 مليون بر ميل مكافئ نفط يومياً عام 2050.

Executive Summary

The study addressed the role of critical and rare elements, technical, economic, political, and social challenges, and future energy demand projections.

The first chapter discussed the concept of energy and energy transition, and the reasons for energy transition, which include climate change, environmental sustainability, energy security, technological development, and governmental and international policies. It also covered the role of governments in driving the energy transition.

The second chapter highlighted the importance of critical and rare elements in the energy transition, such as lithium, cobalt, graphite, nickel, manganese, rare earth elements, platinum, and copper. It also discussed the reserves and production of these elements and their geographical distribution, along with the geopolitical and environmental concerns associated with them.

The third chapter addressed technical challenges, including energy storage, energy efficiency, and smart grids. It also covered economic challenges that require substantial investments in infrastructure and technology, political challenges that necessitate international cooperation and supportive policies, and social challenges that involve changing individual and community behaviors and the impact of job losses in traditional energy sectors.

The fourth chapter discussed the global energy mix and energy consumption, the impact of electric vehicles on oil consumption, the effect of artificial intelligence on increasing energy demand, and the role of population growth in increasing energy consumption. It also provided future energy demand projections based on multiple scenarios.

The study concluded that the energy transition requires a delicate balance between ensuring energy security, affordability, and sustainability, and showed that oil and gas will form the core part of the energy mix in the foreseeable future, with demand for them not less than 210 million barrels of oil equivalent per day in 2050.

جدول المحتويات

مقدمة..... ii
ملخص تنفيذي iii
Executive Summary iii
جدول المحتويات v
قائمة الأشكال vii
قائمة الجداول viii
تمهيد..... 9
الفصل الأول 12
الطاقة وتحول الطاقة 12
1-1 الطاقة 13
2-1 مفهوم تحول الطاقة 13
3-1 أسباب الدعوة إلى تحول الطاقة 13
4-1 هل الجميع متوافقون؟ 16
5-1 استهلاك الطاقة كمؤشر على التنمية 18
6-1 دور الحكومات في التحول الطاقي 19
الفصل الثاني 21
دور العناصر الحرجة والعناصر النادرة في التحول الطاقي 21
1-2 العناصر الحرجة 22
2-2 العناصر النادرة 23
3-2 احتياطيات العناصر الحرجة في العالم 24
1-3-2 الليثيوم 25
2-3-2 الكوبالت 26
3-3-2 الغرافيت 27
4-3-2 النيكل 28
5-3-2 المنغنيز 29
6-3-2 العناصر النادرة 30
7-3-2 البلاتين 31
8-3-2 النحاس 32
الفصل الثالث 37
تحديات التحول الطاقي 37
1-3 التحديات التقنية 38
1-1-3 تخزين الطاقة 38

2-1-3 كفاءة الطاقة 39
3-1-3 الشبكات الذكية 40
2-3 التحديات الاقتصادية (كلفة التحول الطاقي) 41
3-3 التحديات السياسية 45
4-3 التحديات الاجتماعية 48
5-3 ألمانيا (مثال عن العلاقة بين التحول الطاقي وبين الطلب على الطاقة) 51
6-3 ذروة إنتاج النفط 62
الفصل الرابع 66
الطلب المستقبلي على الطاقة 66
1-4 مزيج الطاقة 67
4-2 استهلاك الطاقة 68
1-2-4 نمط استهلاك الطاقة تاريخياً 70
3-4 تأثير السيارات الكهربائية على استهلاك الطاقة 72
4-4 تأثير الذكاء الاصطناعي 76
5-4 دور النمو السكاني في الطلب على الطاقة 79
6-4 الطلب المستقبلي- مقارنة التوقعات 81
الخلاصة والاستنتاجات 93
الملحق 1 95
الملحق 2 96
المراجع 97

قائمة الأشكال

الشكل 1: السعات الإضافية السنوية من طاقة المحطات العاملة على الفحم الحجري 16
الشكل 2: السعات الإضافية السنوية من الفحم الحجري بالنسبة للعالم 17
الشكل 3: احتياطيات الليثيوم في العالم عام 2023 25
الشكل 4: تطور إنتاج الليثيوم في العالم 26
الشكل 5: احتياطيات الكوبالت في العالم- نهاية عام 2023 27
الشكل 6: إنتاج الكوبالت من المناجم في العالم عام 2023 27
الشكل 7: احتياطيات الغرافيت في العالم في نهاية عام 2023 28
الشكل 8: إنتاج العالم من الغرافيت عام 2023 28
الشكل 9: احتياطيات النيكل في العالم نهاية عام 2023 29
الشكل 10: إنتاج النيكل في العالم عام 2023 29
الشكل 11: احتياطيات المنغنيز في العالم نهاية عام 2023 30
الشكل 12: إنتاج المنغنيز في العالم عام 2023 30
الشكل 13: احتياطيات العناصر النادرة في العالم نهاية عام 2023 31
الشكل 14: إنتاج العناصر النادرة في العالم عام 2023 31
الشكل 15: احتياطيات البلاتين في العالم نهاية عام 2023 32
الشكل 16: إنتاج العالم من البلاتين عام 2023 32
الشكل 17: احتياطيات النحاس في العام نهاية عام 2023 33
الشكل 18: إنتاج العالم من النحاس عام 2023 33
الشكل 19: العلاقة بين سعر النفط، وعدد العاملين في الاستكشاف والإنتاج في الولايات المتحدة 50
الشكل 20: العلاقة بين إجمالي استهلاك الكهرباء وأسعارها في ألمانيا 52
الشكل 21: القدرة المركبة لتوليد الكهرباء في ألمانيا 54
الشكل 22: الرسوم الإضافية على الطاقة المتجددة في ألمانيا 55
الشكل 23: موعد ذروتي الإنتاج حسب فرضية هوبرت، مقابل الإنتاج الفعلي للعالم 63
الشكل 24: مقارنة إنتاج النفط الأمريكي حسب فرضية هوبرت مع الإنتاج الفعلي 64
الشكل 25: مزيج الطاقة العالمي عام 2023 67
الشكل 26: تغير مزيج الطاقة بين عامي 1978- 2023 68
الشكل 27: استهلاك الطاقة حسب المصدر بين عامي 1800 و 2023 70

الشكل 28: معدل التغير السنوي في استهلاك الطاقة بين عام 1800 و 2023 71
الشكل 29: العلاقة بين النمو السكاني واستهلاك الطاقة 79
الشكل 30: إنتاج الفحم الحجري في العالم 81
الشكل 31: العلاقة بين الناتج المحلي الإجمالي والطلب على الطاقة 84
الشكل 32: استهلاك النفط بالعلاقة مع الناتج المحلي الإجمالي للعالم 85
الشكل 33: استهلاك الغاز بالعلاقة مع الناتج المحلي الإجمالي للعالم 86

قائمة الجداول

الجدول 1: استهلاك الطاقة حسب المصدر في عام 2019 18
الجدول 2: مجموعة العناصر الأرضية النادرة 24
الجدول 3: كمية بعض المواد المستخدمة في عنفة الرياح 35
الجدول 4: الطلب المتوقع للوصول حسب السيناريوهات المعلنة لعدد من العناصر الحرجة- ألف طن 35
الجدول5 : عدد من الوظائف التي قد تفقد نتيجة التحول الطاقي 49
الجدول 6: استهلاك الطاقة في ألمانيا حسب المصدر 58
الجدول 7: توقعات مختلفة لموعد ذروة إنتاج النفط والغاز 64
الجدول 8: التوزع الجغرافي لاستهلاك الطاقة في العالم 70
الجدول 9: مقارنة مبيعات بعض أنواع السيارات الكهربائية على أساس ربعي- سيارة 74
الجدول 10: مقارنة مبيعات بعض أنواع السيارات الكهربائية على أساس سنوي- سيارة 74
الجدول 11: الناتج الإجمالي المحلي وكثافة الطاقة حسب مختلف التوقعات 83
الجدول 12: نسبة مصادر الطاقة في مزيج الطاقة المستقبلي 87
الجدول13 : توقعات استهلاك العالم من الطاقة في عام 2050 88
الجدول14 : توقعات الطلب العالمي على النفط في عام 2050- مليون ب/ي 88

تمهيد

ظهرت منذ فجر التاريخ قوى خفية تحرك دفّته، وبين أهم هذه القوى تألقت الكهرباء التي استطاعت في نحو قرن ونصف تغيير شكل العالم محدثة ثورة هائلة في كل مناحي الحياة، وأصبحت ركيزة أساسية للتقدم البشري في كافة المجالات حتى بات امتلاك الكهرباء بمثابة امتلاك مفتاح التقدم، فمن يمتلكها يمتلك الحاضر والمستقبل، ومدفوعة بخصائصها الفريدة وقابليتها للاستخدام على نطاق واسع، فقد حلت المحركات الكهربائية محل الكثير من المحركات التقليدية، كما ساهمت الإضاءة الكهربائية في تحسين جودة الحياة، وفتحت آفاقاً جديدة للتعلم والمعرفة. بالإضافة إلى ذلك، كانت الكهرباء حجر الأساس لتطوير الاتصالات الحديثة، بدءاً من الهواتف وصولاً إلى شبكات البث الإذاعي والتلفزيوني.

على صعيد آخر، لعبت الكهرباء دوراً حاسماً في الحياة ضمن الظروف المناخية القاسية، حيث ساهم تكييف الهواء في توسيع الرقعة العمرانية في البلدان الحارة، كما سهلت الكهرباء النمو الحضري من خلال تسهيل الحياة في المباني الشاهقة، بفضل المصاعد. وساهم نجاح محطة Pearl Street في مدينة "مانهاتن" في نيويورك في إذكاء موجة من انتشار الكهرباء، فبعد أن بنى العالم المعروف "أديسون" هذه المحطة التي كانت تحتوي على مولد واحد للتيار المستمر عام 1882، أصبح لدى الولايات المتحدة حوالي ألف محطة طاقة مركزية خلال ثمان سنوات فقط أي بحلول عام 1890، وقد استمر ذلك النمو السريع في العقود اللاحقة. وبين عامي 1900 و1930، نما إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة بنحو عشرين ضعفاً تقريباً، وقد سمح هذا التوسع بإيصال الكهرباء إلى عشرات الملايين من الناس لأول مرة.

لكن الكهرباء، مثلها مثل بقية مصادر الطاقة، لا تأتي من العدم، وفي خضم الهجمات التي تعلن بشكل يومي ضد الوقود الأحفوري، وضمن زخم الجدل الدائر حول التغيرات المناخية والذي يتجاهل الأسباب التي تجعل البشرية تستخدم الوقود الأحفوري، لابد من النظر ملياً إلى أن الدول الغنية ربما تكون قادرة على التعامل مع أنماط الحياة الخضراء على أنها نموذج مثالي، بينما يختلف الأمر بالنسبة لباقي دول العالم التي ترى أن الطاقة الموثوقة هي مسألة أكثر أهمية من ذلك. ولئن كان هناك تيار متزايد في هذا المجال، إلا أن العاملين في مجال البحث حول تغير المناخ وسياسة الطاقة، لم ينجحوا بعد في تقييم السياق الكامل لإنتاج الوقود الأحفوري، وقد بالغوا إلى حد كبير في تصوير الآثار الجانبية السلبية له، وقللوا أو تجاهلوا كلياً فوائده، بينما لم يعطوا نفس الأهمية لقدرة البشرية على التكيف مع المناخ، وربما كان ذلك بسبب إطار تقييم غير دقيق أو معايير تحتاج لمزيد من التطوير.

والواقع أنه لطالما دار الجدل حول دور النفط والغاز في الحياة المعاصرة، فمن جهة، ينظر البعض إليهما على أنهما مصدران رئيسيان للتلوث البيئي والاحتباس الحراري، لكن من جهة أخرى، لا

يمكن لمنصفٍ إنكار الدور المحوري الذي لعبه هذان الموردان في دفع عجلة التنمية الصناعية والتطور الحضاري على مر العقود الماضية. إن النظر إلى النفط والغاز بمنظور أحادي الجانب، وإلصاق صفة الشر بهما بشكل مطلق، هو أمرٌ مبالغ فيه وغير دقيق، إذ ساهما ويساهمان في تحسين مستوى المعيشة، وتوفير الطاقة اللازمة لتشغيل المصانع والمواصلات، وتطوير الصناعات الدوائية والبتروكيماوية. كما أن النفط والغاز يوفران فرص عمل لملايين الأشخاص حول العالم، ويدعمان اقتصادات العديد من الدول. هذا التركيز على الآثار السلبية للنفط والغاز على البيئة، وغض الطرف عن الجوانب الإيجابية هو نهج أحادي الجانب لا يمكن أن يؤدي إلى حلول شاملة ومستدامة، فالحقيقة هي أن الانتقال إلى مصادر طاقة متجددة لا يجب أن يعني التخلي عن النفط والغاز، فالتحول إلى ما يسمى بالطاقة النظيفة يتطلب وقتاً وجهداً واستثمارات ضخمة، وسوف تبقى الحاجة إلى النفط والغاز قائمة لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة. كما أن النفط والغاز والوقود الأحفوري عموماً، تلعب دوراً حتى في المرحلة الانتقالية في مسيرة تحول الطاقة، وربما يكون من الأجدى التفكير والعمل على تطوير التقنيات التي تساعد على استخراج النفط والغاز بطرق أكثر كفاءة وأقل ضرراً بالبيئة، بالتوازي مع الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة.

وفي ضوء الطلب المتزايد على الطاقة -سواء بسبب النمو الاقتصادي والبشري، أو بسبب الطلب المتزايد من جهة الذكاء الاصطناعي، يحتاج العالم إلى كل المصادر المتاحة، إذ قدرت أوبك في عام 2024 أن الطلب العالمي على الطاقة سيصل إلى 374 مليون برميل مكافئ نفط في اليوم في عام 2050، ولن تغطي الطاقات المتجددة في أحسن الأحوال أكثر من 24% منها تتضمن 10% من طاقة الكتلة الحيوية، مما يترك 14% فقط لطاقة الشمس والرياح وباقي المصادر المتجددة، بينما سوف تكون حصة النفط والغاز أكثر من 53.2% من مزيج الطاقة (مقابل 54% في عام 2023). لذلك، وعلى الرغم من أهمية التحول الطاقي، إلا أن الاستثمار في قطاع النفط والغاز لا يزال ضرورياً جداً تحت مظلة مستدامة تراعي البيئة وتحميها. ولا شك أن هذه الاستثمارات سوف تساهم في ضمان استقرار أسعار الطاقة، كما أن توجيه جزء منها نحو تطوير تقنيات جديدة في مجال الإنتاج والتكرير سيساعد على زيادة الإنتاجية وخفض التكاليف، فمراكز البحث والتطوير تعمل بكل دأب على تطوير تقنيات أكثر كفاءة في الصناعة البترولية. ومن الهام هنا النظر إلى أن إيرادات النفط والغاز تعتبر مصدراً رئيسياً للدخل الحكومي في العديد من دول العالم، حيث تساهم هذه الإيرادات في تمويل المشاريع التنموية، وتحسين البنية التحتية، وتقديم الخدمات العامة، كما تساهم في خلق فرص العمل وتحفز النمو الاقتصادي من خلال إيجاد سلاسل قيمة جديدة، وتطوير الصناعات المرتبطة بها.

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

ولاشك أنه في وقت يتسم بطرح قضايا عالمية استثنائية، مثل تغير المناخ، والموارد المحدودة، وحوكمة الشركات، أصبحت ضرورة الممارسات المستدامة والمسؤولة واضحة بشكل متزايد. وقد أدت الحاجة الملحة لمواجهة هذه القضايا المعقدة إلى ظهور ثلاثة مفاهيم محورية أصبحت رمزاً للمسعى المشترك لتحقيق مستقبل أكثر عدلا ومسؤولية من الناحية البيئية، وهي: تحول الطاقة، والاقتصاد الدائري، والممارسات البيئية والاجتماعية والحوكمة. وتتقاطع هذه المفاهيم لتشكل منظوراً شاملاً لتعزيز مجتمع عالمي أكثر ازدهاراً. وربما يكون للاقتصاد الدائري القدرة على تعزيز كفاءة استخدام الموارد، وهو بذلك يتشارك مع تحول الطاقة في امتلاكه بذرة تحفيز النمو الاقتصادي، حيث يمثل نقلة نوعية في الأيديولوجية الاقتصادية، من خلال تركيزه على تحسين استغلال الموارد والحد من النفايات واستعادة النظم الطبيعية، وبالتالي تعزيز هيكل اقتصادي أكثر استدامة، ضمن منظومة طاقة شاملة مستدامة. إنما لا مناص من الأخذ بعين الاعتبار أن مستويات الحياة في جميع أنحاء العالم سوف تعتمد على قدرة نظم تحول الطاقة على تقديم نفس الأداء أو أفضل مقارنة بالنظام الحالي الذي يتمتع بالعديد من المزايا الإيجابية.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول(أوابك)

منظور الطلب المستقبلي على الطاقة في ظل التحول الطاق

Future Energy Demand Perspective in the Context of Energy Transition

الفصل الأول

الطاقة وتحول الطاقة

1-1 الطاقة

تعرّف الطاقة من المنظور الفيزيائي بأنها كمية فيزيائية قياسية تمثل القدرة النظريّة لنظام ما على بذل شغل. فهي المفهوم المركزي الذي يفسر التغيرات التي تحدث في الكون، من الحركة الدقيقة للجسيمات دون الذرية، مروراً بالطاقة التي يستمدها الجسم من الغذاء، وصولاً إلى التفاعلات النووية الهائلة التي تشعل النجوم. تاريخياً، اعتمد الإنسان عند ظهوره على الأرض على الشمس للتدفئة، لذلك يمكن القول -مجازاً- أن الطاقة المتجددة كانت أول أشكال الطاقة التي تمت الاستفادة منها. وبذلك، كان التحول الأول للطاقة هو اكتشاف النار وكيفية التحكم بها، فباتت الأخشاب مصدراً إضافياً للطاقة بعد الشمس، بل وربما يمكن اعتبار اكتشاف الإنسان للزراعة نوعاً آخر من تحول الطاقة جعله يستغني جزئياً عن صيد الطرائد ويستمد غذائه والطاقة اللازمة لحياته من مصادر أكثر تنوعاً.

2-1 مفهوم تحول الطاقة

يشير مصطلح "تحول الطاقة" أو الانتقال الطاقي (Energy Transition) إلى عملية تحول مجتمعات بأكملها من الاعتماد على مصادر طاقة سائدة إلى مصادر طاقة أخرى. وهذه الظاهرة ليست حديثة العهد، بل هي سمة من سمات التطور التاريخي للمجتمعات، فقد كان الابتكار والحركة الاقتصادية المحرك الأساسي وراء العديد من التحولات الطاقية السابقة، وهو ما شهدته حقبة الثورة الصناعية في القرن التاسع عشر مثلاً، فمع تزايد الطلب على الطاقة، ظهر تحول جذري نحو استخدام الفحم الحجري كمصدر رئيسي للطاقة. كما أن اختراع محرك الاحتراق الداخلي واكتشاف النفط بكميات تجارية عام 1859 ساهما في تسريع عملية التحول للاعتماد على النفط كمصدر أساسي للطاقة في النقل والصناعة.

3-1 أسباب الدعوة إلى تحول الطاقة

تختلف أسباب التحول الطاقي اليوم في المجمل عن نظيرتها في القرن المنصرم، حيث يسعى العالم إلى التحول من أنظمة الطاقة الأحفورية (الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي) إلى مصادر الطاقة المتجددة مدفوعاً -نظرياً على الأقل- بالحاجة إلى الحد من انبعاثات ما يسمى بغازات الاحتباس الحراري، ومكافحة تغير المناخ، وتعزيز ممارسات الطاقة المستدامة (Jonker& Gomstyn, 2024)[1]. وهو -كما لا يخفى- أمر ينطوي على تغييرات كبيرة في إنتاج الطاقة وتوزيعها واستهلاكها، بهدف إنشاء نظام طاقة أكثر استدامة ومرونة. إلا أن هذا التحول مدفوع من ناحية أخرى بأسباب قد لا تكون معلنة دوماً، مثل التخوف من ندرة الوقود الأحفوري، أو لأسباب جيوسياسية ترى في التحول الطاقي فرصة

للحد من الاعتماد على مصادر طاقة مستوردة من دول أخرى، أو حتى لأسباب سياسية مثل كسب أصوات الناخبين في بعض الأحيان. وربما يكون هذا هو السبب وراء وجود تعاريف أكثر صرامة وتحديداً، مثل تعريف تحول الطاقة بأنه "الانتقال من استخدام الوقود الأحفوري إلى استخدام الطاقات المتجددة كالشمس والرياح مع تبني تخزين الطاقة في البطاريات الكهربائية"(S&P Global, 2020)[2].

ولعل أقدم استخدام لتعبير "تحول الطاقة" ظهر إعلامياً في Christian Science Monitor عام 1981، حيث أوضح مراسل يدعى Richard Critchfield أن حوالي 4000 مندوب من 154 دولة كانوا مجتمعين في العاصمة الكينية "نيروبي" لحضور مؤتمر الأمم المتحدة لمدة أسبوعين حول مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة. وأوضح المراسل أن الغرض من المؤتمر هو تعزيز فهم أفضل لانتقال الطاقة العالمية من النفط إلى مصادر جديدة مثل الطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الشمسية وطاقة الرياح والمحيطات والطاقة الكهرومائية أو الطاقة من الكتلة الحيوية والحطب والفحم والخث* والسجيل الزيتي ورمال القطران (Critchfield, 1981)[3]. ومن الملاحظ أن المقال لم يشر إلى تغير المناخ من قريب أو بعيد، وبدلاً من ذلك، ركز على اعتماد كينيا على الطاقة المستوردة، وإمكانات الطاقة الحرارية الأرضية في البلاد، وما سمّاه "فخ الفقر الكلاسيكي في العالم الثالث" المتمثل في ارتفاع تكاليف النفط وعائدات التصدير الراكدة.

ورغم تعدد الأسباب المعلنة وغير المعلنة للتحول الطاقي، والتي تختلف باختلاف الاهتمامات والمناطق والظروف الموضوعية لكل جهة، إلا أنه يمكن إجمال هذه الأسباب في الأبعاد الاقتصادية والسياسية والبيئية، وهو ما تتبناه الأمم المتحدة على موقعها الرسمي ضمن الإجراءات الحاسمة الواجب العمل عليها بأسرع ما يمكن، وتتلخص تفاصيل هذه الأسباب† فيما يلي (UN, n.d.)[4]:

- **التغير المناخي:**
  - ارتفاع درجات الحرارة: تسبب الأنشطة البشرية، مثل حرق الوقود الأحفوري، زيادة تركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة العالمية.
  - الكوارث الطبيعية: تؤدي زيادة درجات الحرارة إلى ذوبان الجليد وارتفاع مستوى سطح البحر، مما يزيد من تكرار وشدة الكوارث الطبيعية مثل الفيضانات والجفاف.
- **الاستدامة البيئية:**
  - تقليل الانبعاثات: التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح يساعد

* تربة غير متماسكة تتكون بشكل رئيسي من مواد عضوية غير متحللة بشكل كامل، تراكمت في ظروف الرطوبة الشديدة.
† ذكر هذه الأسباب في الدراسة لا يعني بالضرورة أن الباحث أو الأمانة العامة لأوابك تتبناها.

في تخفيض انبعاثات الكربون والملوثات الأخرى، مما يحسن جودة الهواء ويقلل من التأثيرات الصحية السلبية.

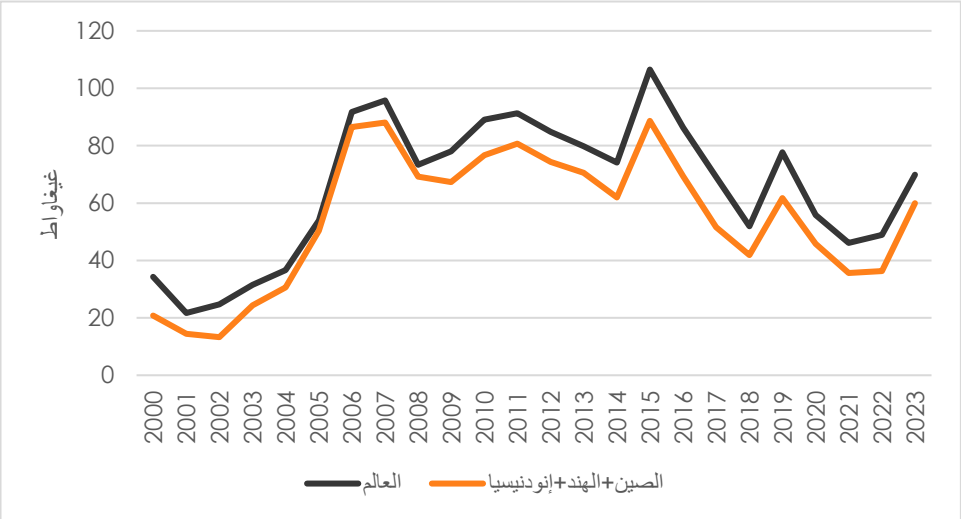
- حماية الموارد الطبيعية: الاعتماد على الطاقة المتجددة يقلل من استنزاف الموارد الطبيعية غير المتجددة مثل النفط والفحم الحجري.

- **الأمن الطاقي:**
  - تنويع مصادر الطاقة: الاعتماد على مصادر متعددة للطاقة يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري المستورد، مما يعزز الأمن الطاقي للدول.
  - استقرار الأسعار: الطاقة المتجددة توفر استقرارًا أكبر في أسعار الطاقة مقارنة بالوقود الأحفوري الذي يتأثر بتقلبات السوق العالمية.
- **التطور التكنولوجي:**
  - تقدم التكنولوجيا: التطورات في تكنولوجيا الطاقة المتجددة، مثل تحسين كفاءة الألواح الشمسية وتخزين الطاقة، تجعلها أكثر فعالية من حيث التكلفة وأكثر جاذبية للاستثمار.
  - الابتكار: الابتكار في مجالات مثل البطاريات وتكنولوجيا الشبكات الذكية يعزز من قدرة الدول على دمج مصادر الطاقة المتجددة في شبكاتها الكهربائية.
- **السياسات الحكومية والدولية:**
  - الاتفاقيات الدولية: اتفاقيات مثل اتفاقية باريس للمناخ تحث الدول على تقليل انبعاثاتها الكربونية والانتقال إلى مصادر الطاقة النظيفة.
  - الحوافز الحكومية: العديد من الحكومات تقدم حوافز مالية وتشريعية لدعم مشاريع الطاقة المتجددة، مما يشجع الشركات والمستثمرين على الدخول في هذا المجال.
- **الفوائد الاقتصادية:**
  - خلق فرص عمل: قطاع الطاقة المتجددة يوفر فرص عمل جديدة في مجالات مثل التصنيع والتركيب والصيانة.
  - التنمية الاقتصادية: الاستثمار في الطاقة المتجددة يمكن أن يعزز التنمية الاقتصادية المحلية من خلال تقليل تكاليف الطاقة وتحسين البنية التحتية.

4-1 هل الجميع متوافقون؟

رغم الأسباب آنفة الذكر عن تحول الطاقة، ومع أن التوجه العام في أغلب الأبحاث العلمية اليوم هو الدفع باتجاه التحول الطاقي وأهميته ومنافعه، إلا أن هناك آراءً أخرى تجد بالكاد فرصة لنقل تصورها عن تحول الطاقة، وهنا يذكر الباحث المتخصص في شؤون الطاقة Robert Bryce أن مفهوم انتقال الطاقة هو في الأساس "غرورٌ غربي"، فالولايات المتحدة ودول أوروبا الغربية تنفق مئات المليارات من الدولارات على برامج مثل قانون خفض التضخم لتمويل بناء الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والبطاريات والهيدروجين بألوانه المختلفة الأزرق والأخضر وغيرها، لكن هذا لا يعني أن باقي العالم سيفعل الشيء نفسه. وبحسب الباحث، لا يوجد دليل على أن الصين والهند مثلاً تمران بتحول في مجال الطاقة، إنما وبدلا من ذلك، تظهر الأرقام أن هذين البلدين يقومان ببناء سعات مذهلة من المحطات الجديدة التي تعمل بالفحم، بل هي أكبر بكثير حتى من مقدار السعة النووية التي يقومان ببنائها. عملياً تؤكد البيانات المنشورة صحة ما ذهب إليه الباحث، إذ بلغت سعة محطات الفحم الحجري في العالم أكثر من 1588 غيغا واط في منتصف عام 2024، منها 1332 غيغا واط (أي 84% من الإجمالي) تتركز في ثلاث دول هي الصين والهند وإندونيسيا. ويضاف إلى هذه الدول كلٌ من الولايات المتحدة واليابان، والتي تبلغ السعات المركبة فيها من محطات الفحم الحجري لتوليد الكهرباء نحو 181.5 غيغا واط، و57.3 غيغا واط على التوالي. ويلاحظ من الشكل 1 أن هذه الدول الثلاث هي الرائدة في العالم من ناحية السعات الإضافية السنوية من سعات الفحم الحجري (Global Coal Plant Tracker, 2024)[5].

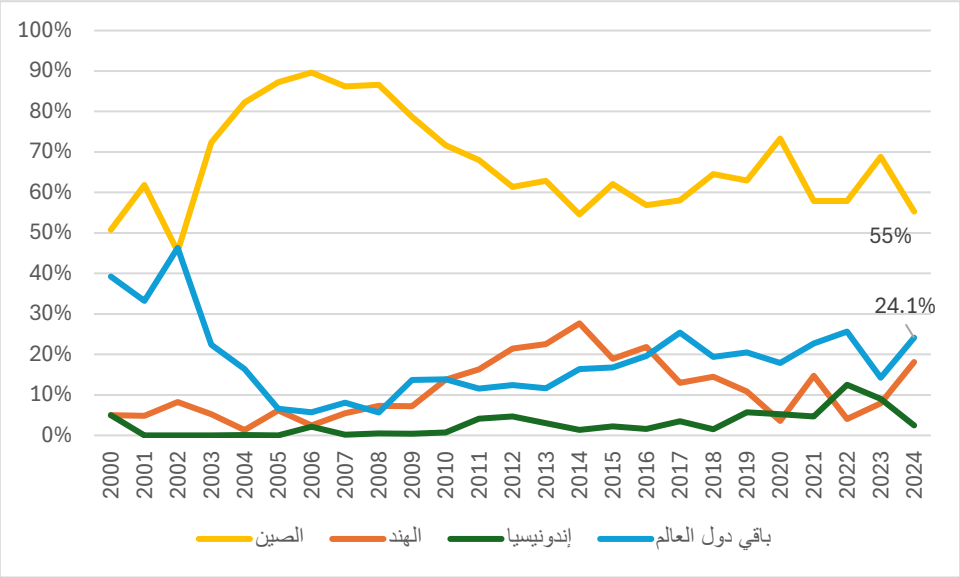
الشكل 1: السعات الإضافية السنوية من طاقة المحطات العاملة على الفحم الحجري



إعداد الباحث بناء على بيانات من: Global Coal Plant Tracker، 2024

ولعل هذه الصورة تكتمل من خلال الشكل 2، الذي يوضح نسبة السعات الإضافية السنوية من طاقة الفحم الحجري من كل من هذه الدول الثلاث بالنسبة لباقي العالم، ويوضح الشكل كذلك أن الصين لوحدها في عام 2024 (حتى شهر يوليو) أضافت أكثر من نصف السعات التي أضافتها كل دول العالم مجتمعة.

الشكل 2: السعات الإضافية السنوية من الفحم الحجري بالنسبة للعالم



إعداد الباحث بناء على بيانات من: Global Coal Plant Tracker، 2024

وهنا لابد من التأكيد على أن التحول الطاقي لا يعني إلقاء الأرقام على عواهنها، فعلى سبيل المثال، وضمن تأكيده على أهمية التحول الطاقي، نشر معهد TWI البريطاني على صفحته الرسمية في مطلع عام 2023، تقديراً للتغييرات اللازمة في مصادر الطاقة للوصول إلى أهداف اتفاقية باريس (COP21- عام 2015) حول الانبعاثات الكربونية والحد من الاحترار إلى ما دون 2 درجة مئوية، مع السعي إلى الحد من الزيادة إلى 1.5° مئوية (TWI, 2023)[6].

رأى المعهد المذكور أنه للوصول إلى هذه الأهداف فإن على العالم أن يخفض استهلاكه من الفحم الحجري بنسبة 95% مقارنة بمستويات الاستهلاك لعام 2019، ويخفض استهلاك النفط بنسبة 60%، ويخفض استهلاك الغاز بنسبة 45%، وكل هذه التخفيضات قد تمنح العالم فرصة 50% فقط لتحقيق أهداف اتفاقية باريس! وسواء كان رأي المعهد في مضمار بيان صعوبة عملية التحول، أو ضمن مجال الدعوة إلى هذا التحول بأي طريقة، فإن الجدول 1 يوضح بيانات الاستهلاك بحسب معهد الطاقة EI في عام 2019، وكمية هذا الاستهلاك التي يجب الوصول إليها بحسب رؤية معهد TWI:

الجدول 1: استهلاك الطاقة حسب المصدر في عام 2019

	الاستهلاك عام 2019 حسب EI إكساجول	الاستهلاك المقترح حسب TWI إكساجول	الفارق إكساجول
النفط	193.03	77.2	115.8
الغاز	140.7	77.4	63.3
الفحم الحجري	156.95	7.8	149.1
المجموع	490.7	162.4	328.2

مصدر البيانات: EI, 2024 و TWI, 2023

أي أن الفارق المبين في الجدول (328.3 إكساجول) يجب تعويضه من مصادر الطاقة المتجددة، لكن النقطة التي لم يشر لها معهد TWI أن استهلاك العالم من مصادر الطاقة المتجددة بلغ عام 2019 نحو 27.6 إكساجول فقط. وبالتالي فإن على العالم أن يضاعف الاستهلاك من مصادر الطاقة المتجددة حوالي 12 مرة حسب بيانات ذلك العام. والواقع أن حصة الطاقات المتجددة من مزيج الطاقة العالمي تتضاعف كل سبع سنوات تقريباً، فلو تم الافتراض (جدلاً) أن استهلاك الطاقة في العالم ثابت عند قيم عام 2019، فإن على العالم أن ينتظر 84 سنة حتى يحقق رؤية معهد TWI*.

1-5 استهلاك الطاقة كمؤشر على التنمية

يمكن النظر إلى استهلاك الطاقة كمؤشر هام يعكس حالة التنمية الاقتصادية والاجتماعية لدولة ما. فكلما زاد مستوى التنمية، زاد الطلب على الطاقة لتلبية احتياجات الصناعة والنقل والخدمات، إذ يرتبط استهلاك الطاقة ارتباطاً وثيقاً بالأنشطة الاقتصادية المختلفة، فزيادة الإنتاج الصناعي على سبيل المثال، تتطلب زيادة في استهلاك الطاقة. كما يدل ارتفاع استهلاك الطاقة عموماً على ارتفاع مستوى المعيشة، حيث يرتبط بانتشار الأجهزة الكهربائية، وهو ما يعتبر بدوره مؤشراً على مستوى البنية التحتية للدولة، مثل شبكات الكهرباء والطرق، ويعني فيما يعنيه وجود حالة متطورة من التقدم التكنولوجي، حيث تتطلب الصناعات الحديثة والخدمات المتقدمة كميات كبيرة من الطاقة. من ناحية أخرى، ربما تكون الدول التي تستخدم تكنولوجيا أكثر كفاءة، بحاجة إلى كميات أقل من الطاقة لتحقيق نفس المستوى من النمو الاقتصادي.

وقد يرتفع استهلاك الطاقة رغم تراجع مستوى النمو، ففي الهند مثلاً بلغ استهلاك الطاقة نحو 900 تيرا

* ذكر تقرير آخر لهيئة تغير المناخ التابعة للأمم المتحدة في عام 2022 أن تحقيق الأهداف المناخية العالمية يتطلّب خفّض استهلاك الفحم على الصعيد العالمي بنسبة 67% بنهاية العقد الجاري، و95% بحلول عام 2050!

واط ساعة عام 2010، وكان معدل النمو الاقتصادي 8.5%، بينما بلغ معدل النمو فيها 7.8% عام 2023، رغم أن إنتاج الكهرباء فيها ارتفع إلى 1819.4 تيرا واط ساعة (IEA, 2024)[7]، وهو ما يمكن أن يعزى إلى تحسن كفاءة الطاقة مثلاً، أو إلى تغيرات في الهيكل الاقتصادي للتحول نحو قطاعات أقل استهلاكاً للطاقة مثل الخدمات والتكنولوجيا.

يشير ما سبق إلى أنه رغم وجود علاقة ملحوظة بين استهلاك الكهرباء وبين النمو الاقتصادي، إلا أن اتجاه هذه العلاقة لا يزال غير واضح تماماً، وربما يكون السؤال الأهم الذي يحتاج إلى إجابة هو: هل يحفز استهلاك الكهرباء النمو الاقتصادي، أم أن النمو الاقتصادي يؤدي إلى زيادة استهلاك الكهرباء؟ وتختلف الآراء حول هذا السؤال، إلا أن مراجعة العديد من الآراء في هذا المجال تشير إلى وجود علاقة تكاملية بينهما، وربما يحفز استهلاك الكهرباء النمو الاقتصادي في الدول الفقيرة أو النامية، بينما يزيد النمو الاقتصادي من الاستهلاك في الدول المتطورة أو الغنية.

1-6 دور الحكومات في التحول الطاقي

تلعب الحكومات دوراً هاماً في دفع عجلة التحول الطاقي، فهي المسؤولة عن وضع السياسات والأطر التشريعية التي تشجع على الاستثمار في مختلف مصادر الطاقة، وتمتلك الحكومات أدوات مختلفة لتحقيق ذلك، مثل فرض ضرائب على الوقود الأحفوري وتقديم حوافز ضريبية للاستثمارات في الطاقة المتجددة، أو فرض ضرائب مرتفعة للحد من استخدام السيارات الشخصية. فعلى سبيل المثال تبلغ كلفة إيقاف السيارة في بعض المناطق ضمن مرآب مطار برلين، حوالي 23 يورو في الساعة الواحدة. ويتقاضى مطار أمستردام الدولي 46.5 يورو مقابل إيقاف السيارة حتى 24 ساعة، وتتراوح كلفة إيقاف السيارة في أي مرآب ضمن مدينة أمستردام الهولندية بين 4.5 - 7.5 يورو في الساعة الواحدة. كما تقدم بعض الدول الدعم المالي المباشر، كمنح وقروض للمشاريع المتعلقة بالطاقة المتجددة والكفاءة الطاقية، مثل نظام شهادات الكهرباء الخضراء في السويد، حيث يعتبر هذا النظام من أهم الأدوات التي تستخدمها السويد لتشجيع إنتاج واستهلاك الكهرباء المتجددة. ويتم من خلاله منح شهادة لكل ميغاواط ساعة من الكهرباء المنتجة من مصادر متجددة، ويمكن للتجار شراء هذه الشهادات لإثبات أن الكهرباء التي يبيعونها نظيفة. كما تقدم الحكومة السويدية حوافز ضريبية للمشاريع التي تستثمر في تقنيات الطاقة المتجددة والكفاءة الطاقية، مثل تركيب الألواح الشمسية وعزل المباني، إذ عادة ما يتم إعفاء معدات الطاقة الشمسية من ضريبة المبيعات التي تبلغ وسطياً 25% على معظم السلع والخدمات. وتقدم العديد من المؤسسات المالية السويدية منحاً وقروضاً بأسعار فائدة مخفضة (2- 5%) للمشاريع

المتعلقة بالطاقة المتجددة والكفاءة الطاقية.

ومن بين الأدوات الأخرى التي تلجأ إليها الحكومات، وضع معايير صارمة للانبعاثات الكربونية من محطات الطاقة والمصانع. فعلى سبيل المثال وضعت وكالة حماية البيئة (EPA) في الولايات المتحدة معايير تهدف إلى حماية الصحة العامة والبيئة من خلال تقليل الملوثات الخطرة (EPA, 2024)[8]، ومن ضمن هذه المعايير ما تشمله اللوائح الجديدة لمحطات الطاقة التي تعمل بالفحم والغاز الطبيعي، والتي تهدف إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير ومن المتوقع أن توفر هذه اللوائح ما يصل إلى 1.38 مليار طن من CO_2 بين عامي 2024 و2047. ومن هذه المعايير على سبيل المثال أن على العنفات الجديدة التي تعمل بالغاز وبعامل سعة يزيد عن 40%، أن تلتقط 90% من غاز ثاني أكسيد الكربون بحلول مطلع عام 2032. بينما لا تخضع لهذا القانون تلك الوحدات التي تلتزم بوقف التشغيل بحلول 1 يناير 2032.

وإذ ليس من أهداف هذه الدراسة الخوض في تفاصيل كل نوع من السياسات الحكومية، فربما يمكن القول في المجمل أن هناك إيجابيات وسلبيات للسياسات الحكومية، فالإيجابيات هي:

- تشجيع الاستثمار في مجال الطاقة المتجددة، وإيجاد فرص عمل جديدة.
- الحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري خاصة في الدول التي لا تنتجه أو أن إنتاجها لا يغطي الطلب فيها.
- قد تعمل هذه السياسات على حماية البيئة من خلال تحسين كفاءة الطاقة، علاوة على جذب الاستثمارات وتوفير تمويل للمشاريع الجديدة.

أما السلبيات فتتجلى في زيادة تكاليف الطاقة على المستهلكين، مما قد يستدعي وجود دعم حكومي مستمر. كما تزيد من تكاليف الإنتاج للشركات، وهو ما قد يعيق النمو الاقتصادي في بعض القطاعات، ويرتب على الحكومة أعباء إضافية غالباً ما يتم تحصيلها على هيئة ضرائب.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الفصل الثاني

دور العناصر الحرجة والعناصر النادرة في التحول الطاقي

2-1 العناصر الحرجة

العناصر الحرجة هي مجموعة من المعادن والمواد التي تلعب دوراً حيوياً في التقنيات الحديثة، بما في ذلك تقنيات الطاقة المتجددة. تكتسب هذه العناصر أهمية متزايدة في سياق التحول الطاقي، حيث يعتمد تطوير ونشر تقنيات الطاقة النظيفة بشكل كبير على توافرها واستدامتها. وقد تثير كلمة "الحرجة" بعض التساؤلات عن هذه العناصر فغالباً ما يتبادر للذهن أنها عناصر نادرة الوجود، لكن الواقع أن هذه واحدة فقط من ترجمات الكلمة الإنكليزية Critical، والتي تعني أيضاً حاسم، أو حساس أو شديد الأهمية.

لذلك ليس من المستغرب أن تحتوي القوائم التي تشير إلى هذه العناصر على معادن شائعة مثل الألمنيوم أو الفولاذ أو الخارصين (الزنك)، وغيرها، فهي بدورها عناصر لا تقل أهمية عن باقي العناصر، وهي بالتالي حرجة تتغير أهميتها حسب نوع الصناعة التي تدخل فيها.

وربما يبدو من الغريب أن تعريف العناصر الحرجة يختلف من جهة لأخرى حسب أهمية هذه العناصر للجهة المعنية، بل وقد يختلف حسب التاريخ كذلك، فعلى سبيل المثال، عرفت وزارة الطاقة الأمريكية العناصر الحرجة في عام 2020 بأنها:

"أي معدن أو عنصر أو فلز أو مادة -باستثناء الوقود- يحددها وزير الطاقة، ويمكن لتعطيل سلسلة توريدها أن يسبب ما لا تحمد عقباه، وتؤدي وظيفة أساسية في واحدة أو أكثر من تقنيات الطاقة، بما في ذلك التقنيات التي تنتج الطاقة وتنقلها وتخزنها وتحافظ عليها" (DoE, 2023)[9].

وقد نشرت وزارة الطاقة الأمريكية بناء على هذا التعريف قائمة تضم 18 عنصراً. ثم حددت وزارة الداخلية الأمريكية قائمة بهذه العناصر (عبر هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية) في عام 2022، لتشمل 50 عنصراً، واستبعدت 5 عناصر من القائمة السابقة*، وأبقت على 13 عنصراً وأضافت لها 37 عنصراً جديداً. والواقع أن العودة إلى هذه القائمة تبين أنها تتضمن ما يسمى بالعناصر الحرجة علاوة على العناصر الأرضية النادرة.

أما الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA, 2021)[10] فتعرّف العناصر الحرجة بأنها: "المواد الأساسية والموارد اللازمة لإنتاج العديد من التقنيات الرئيسية للتحول في مجال الطاقة، حيث تتطلب إزالة الكربون من أنظمة الطاقة كميات كبيرة من المعادن الأساسية بما في ذلك الليثيوم والنيكل والكوبالت والنحاس والعناصر الأرضية النادرة لمنشآت الطاقة المتجددة وحلول التخزين.

* العناصر المشار إليها متضمنة في الملحق رقم 1 من هذه الدراسة.

بينما يتبع برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP, 2024)[11]، نهجاً أكثر بساطة، إذ يعرف العناصر الحرجة بأنها: المكونات المستخدمة في العديد من تقنيات الطاقة النظيفة، مثل النحاس والكوبالت والليثيوم والنيكل.

2-2 العناصر النادرة

العناصر النادرة -كيميائياً- هي مجموعة من سبعة عشر عنصراً معدنياً مبينة في الجدول 2، يتراوح عددها الذري بين 21- 71. تعتبر هذه العناصر أساسية في أكثر من 200 منتج وخاصة المنتجات الاستهلاكية عالية التقنية مثل الهواتف الخلوية، ومحركات الأقراص الصلبة للكمبيوتر، والمركبات الكهربائية والهجينة، والشاشات المسطحة وأجهزة التلفاز، وأنظمة التوجيه، والليزر، وأنظمة الرادار وغيرها.

ورغم تسميتها بالعناصر النادرة، إلا أن هذه العناصر ليست نادرة بالمعنى الحرفي، بل توجد بوفرة في قشرة الأرض، ومع ذلك، نظراً لخصائصها الجيوكيميائية، فإن هذه العناصر عادة ما تكون موجودة بتركيز منخفض في الطبيعة، وهو سبب الإشارة إليها كعناصر نادرة.

وبحسب "منظمة تاريخ العلوم" (SHI, 2019)[12] فقد تمت صياغة مصطلح "العناصر الأرضية النادرة" عندما اكتشف أحد عمال المناجم صخرة سوداء غير عادية في Ytterby في السويد عام 1788، فأُطلق على الخام صفة "نادر" لأنه لم يسبق رؤيته من قبل وأطلق على نفس الخام كذلك صفة: "أرضيّ" لأنه كان المصطلح الجيولوجي الذي يطلق على الصخور التي يمكن إذابتها في الحمض.

وفي عام 1794، أطلق اسم Yttria على هذا العنصر نسبة إلى المدينة التي تم اكتشافها فيها، وبمرور الوقت، استخرجت المناجم حول المدينة صخوراً أسفرت عن اكتشاف أربعة عناصر سميت باسم المدينة، وهي Yttrium، Ytterbium، Terbium، Erbium.

باستثناء عنصري Scandium، وYttrium، تسمى باقي العناصر باسم مجموعة "اللانثانيدات" Lanthanides، وهي عناصر تتشابه في بنية غلاف إلكترونات التكافؤ، وتصنف ضمن العناصر الانتقالية في الجدول الدوري (Foley et al, 2010)[13]، كما تصنف كذلك إلى خفيفة وثقيلة كما هو موضح في الجدول 2.

الجدول 2: مجموعة العناصر الأرضية النادرة

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري	التصنيف	
Scandium	Sc	21		
Yttrium	Y	39		
Lanthanum	La	57	عناصر خفيفة	Lanthanides
Cerium	Ce	58		
Praseodymium	Pr	59		
Neodymium	Nd	60		
Promethium	Pm	61		
Samarium	Sm	62		
Europium	Eu	63		
Gadolinium	Gd	64	عناصر ثقيلة	
Terbium	Tb	65		
Dysprosium	Dy	66		
Holmium	Ho	67		
Erbium	Er	68		
Thulium	Tm	69		
Ytterbium	Yb	70		
Lutetium	Lu	71		

المصدر: إعداد الباحث بناء على الجدول الدوري للعناصر.
العناصر مرتبة حسب العدد الذري

يلاحظ من الجدول السابق أن العناصر النادرة هي معادن فلزية، وهي تتشابه في الخواص، لذلك غالباً ما توجد قريبة من بعضها في التوضعات الجيولوجية، وقد يشار لها باسم "الأكاسيد الأرضية النادرة" لأن معظمها يتم تداوله على شكل أكاسيد.

ويمكن بالتالي القول إن العناصر أو المعادن الحرجة، والمعروفة أيضا باسم العناصر الحرجة للتكنولوجيا*، هي عناصر كيميائية تلعب مع العناصر الأرضية النادرة دوراً حاسماً في التقنيات الحديثة والناشئة.

3-2 احتياطيات العناصر الحرجة في العالم

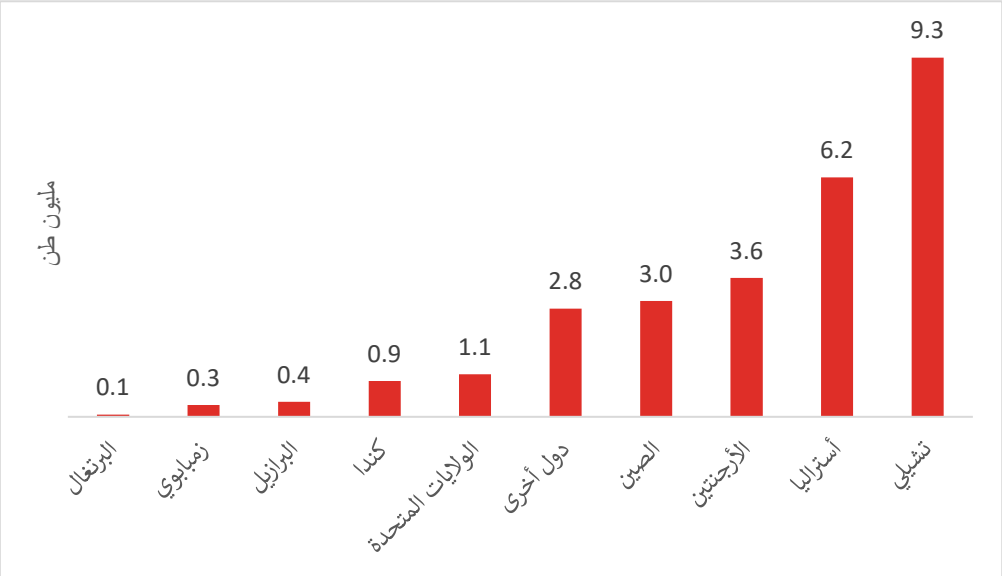
حسب التعريف الوارد آنفاً عن العناصر الحرجة، فمن الصعب تتبعها جميعاً لتقدير احتياطياتها، ذلك أن هذه العناصر تختلف من دولة لأخرى حسب وفرتها أو حسب أهميتها لاقتصاد الدولة، لذلك سيتم التركيز على عدد من هذه العناصر تعتبر الأهم عالمياً لموضوع تحول الطاقة، وهي الكوبالت، والليثيوم، والجرافيت، والنحاس، والمعادن الأرضية النادرة، والبلاتينيوم، والنيكل، والمنغنيز.

* Technology Critical Elements

2-3-1 الليثيوم

قدرت مصادر* الليثيوم في العالم عام 2023 بنحو 105 مليون طن، بينما قدرت الاحتياطيات بحوالي 28 مليون طن (USGS, 2024)[14]، يتوضع معظمها في أربع دول في العالم، هي: تشيلي وأستراليا والأرجنتين والصين، كما هو مبين في الشكل 3.

الشكل 3: احتياطيات الليثيوم في العالم عام 2023

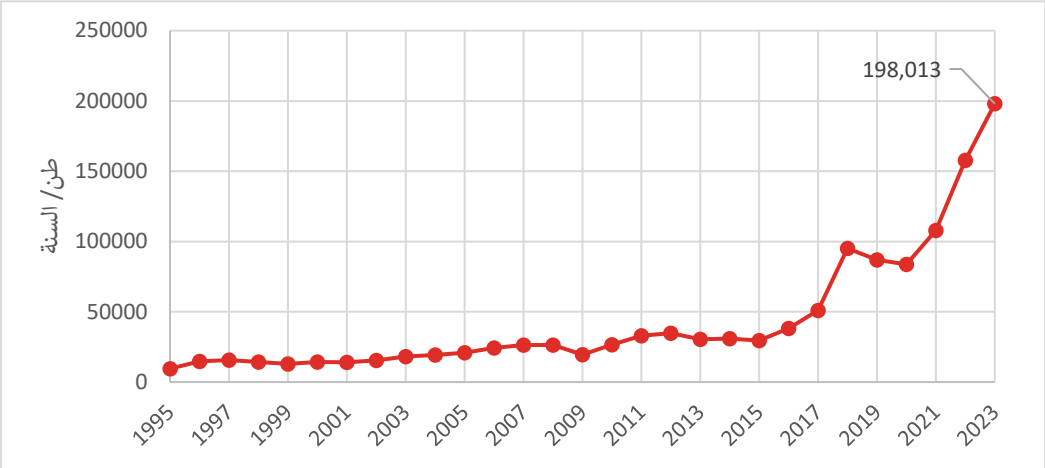


مصدر البيانات: USGS، 2024

أما إنتاج الليثيوم على مستوى العالم، فقد زاد في عام 2023 عن 198 ألف طن (EI, 2024)[15]، ويلاحظ من الشكل 4 الارتفاع الكبير في إنتاج الليثيوم بعد عام 2015، غالباً بسبب انتشار السيارات الكهربائية. وتعتبر أستراليا المنتج الأول في العالم بحصة ناهزت 43.5% في عام 2023، أو ما يقارب 86 ألف طن.

* تميز الجمعية الأمريكية لجيولوجي البترول USGS بين المصادر والاحتياطيات بأن المصادر هي احتياطيات يُفترض وجودها فقط، ولها قيمة حالية أو متوقعة في المستقبل. أما الاحتياطيات في الجزء من الموارد المحددة الذي يلبي معايير فيزيائية وكيميائية دنيا محددة ومتعلقة بعمليات التعدين والإنتاج الحالية، بما في ذلك تلك الخاصة بالدرجة والجودة والسمك والعمق.

الشكل 4: تطور إنتاج الليثيوم في العالم

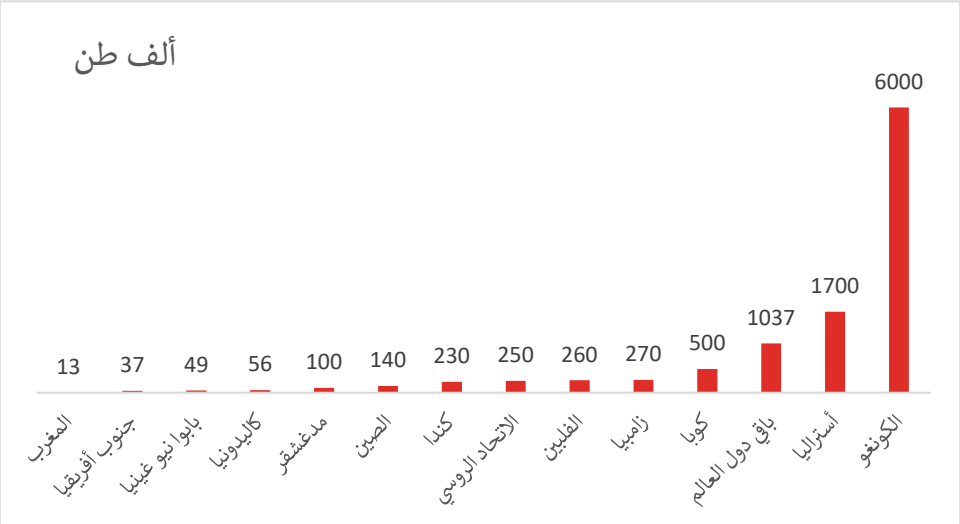


مصدر البيانات: (EI, 2024)

2-3-2 الكوبالت

تبلغ الموارد المحددة من الكوبالت في العالم حوالي 25 مليون طن، توجد الغالبية العظمى منها في رواسب النحاس الطبقية الرسوبية في جمهورية الكونغو الديمقراطية وزامبيا، ورواسب حاملة للنيكل في أستراليا والجزر المجاورة لها وكوبا، كما توجد رواسب كبريتيد النيكل والنحاس النارية في أستراليا وكندا وروسيا والولايات المتحدة. وقد تم تحديد أكثر من 120 مليون طن من موارد الكوبالت في قاع المحيطات الأطلسي والهندي والهادئ. أما احتياطيات الكوبالت فقدرت في عام 2023 بنحو 11 مليون طن، يوجد 72% منها في جمهورية الكونغو وأستراليا، كما هو مبين في الشكل 5 (USGS, 2024)، حيث يلاحظ أن المغرب تمتلك احتياطيات من الكوبالت تقدر بنحو 13 ألف طن، أي نحو 0.1% من احتياطيات العالم.

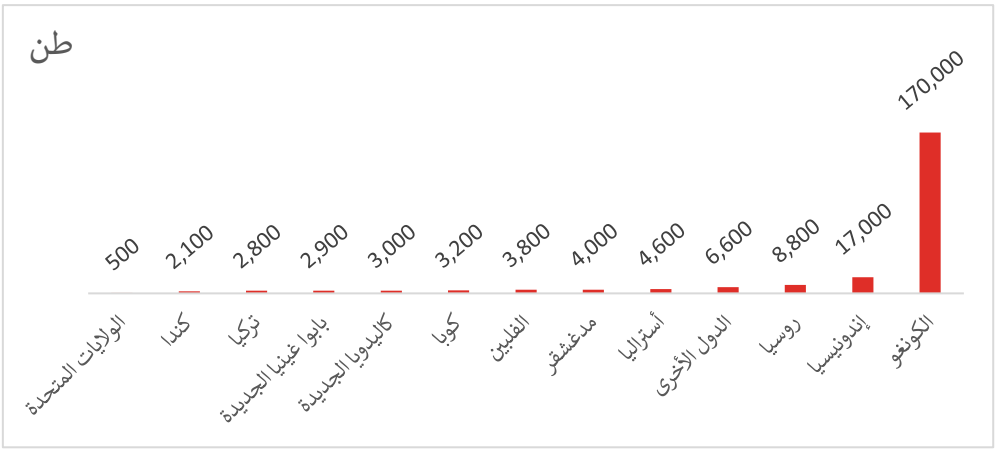
الشكل 5: احتياطيات الكوبالت في العالم- نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

وقدر الإنتاج العالمي من الكوبالت في عام 2023 بحوالي 230 ألف طن، منها 170 ألف طن أنتجتها الكونغو، أي ما يعادل 74% من إجمالي إنتاج العالم، كما هو موضح في الشكل 6.

الشكل 6: إنتاج الكوبالت من المناجم في العالم عام 2023

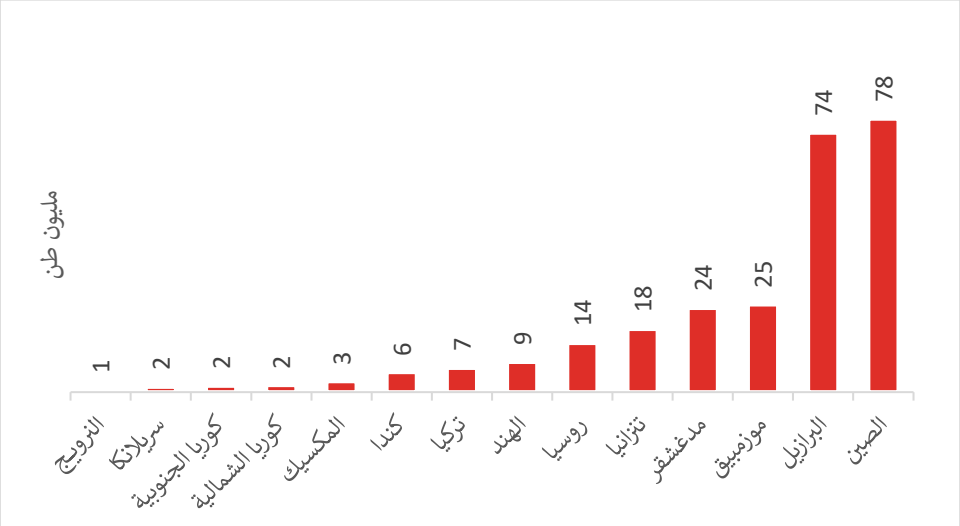


مصدر البيانات: (USGS, 2024)

3-3-2 الغرافيت

تقدر موارد الغرافيت في العالم بنحو 800 مليون طن، أما الاحتياطيات فتناهز 280 مليون طن، يتركز أكثر من نصفها في الصين والبرازيل، كما هو مبين في الشكل 7، علاوة على احتياطيات أخرى لا تظهر في الشكل، وتوجد في الولايات المتحدة وأستراليا وألمانيا وأوكرانيا وفيتنام.

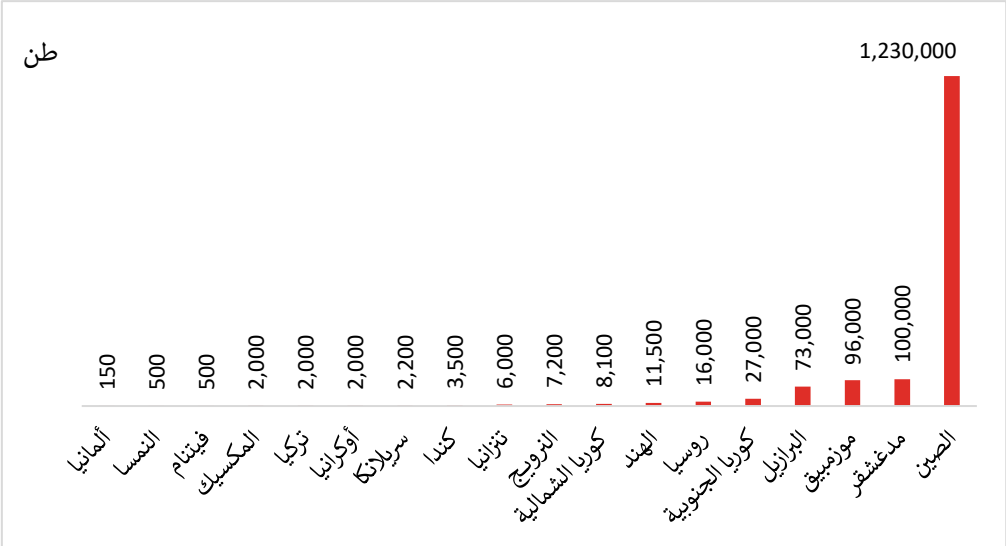
الشكل 7: احتياطيات الغرافيت في العالم في نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

وقدر الإنتاج العالمي من الغرافيت عام 2023 بنحو 1.6 مليون طن، أنتجت الصين منها حوالي 77.5%، كما هو مبين في الشكل 8 :

الشكل 8: إنتاج العالم من الغرافيت عام 2023

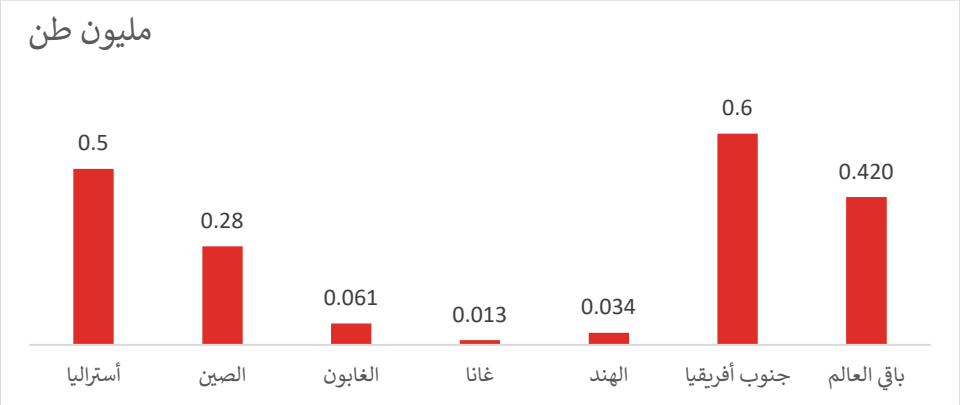


مصدر البيانات: (USGS, 2024)

4-3-2 النيكل

تقدر مصادر النيكل في العالم بأكثر من 350 مليون طن، أما الاحتياطيات فقدرت في نهاية عام 2023 بنحو 145 مليون طن، يتوضع 38% في إندونيسيا، كما هو موضح في الشكل 9.

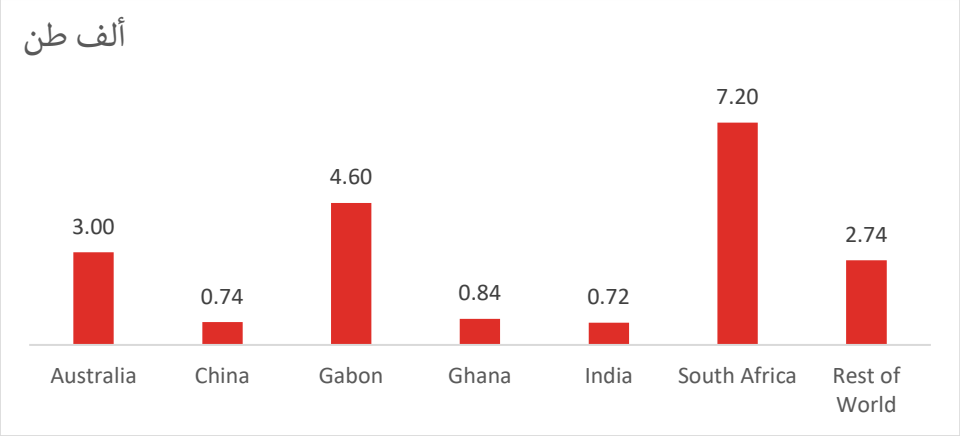
الشكل 9: احتياطيات النيكل في العالم نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

وزاد إنتاج العالم من النيكل عام 2023 عن 3.8 مليون طن، أنتجت إندونيسيا منها أكثر من 47%، كما هو مبين في الشكل 10.

الشكل 10: إنتاج النيكل في العالم عام 2023

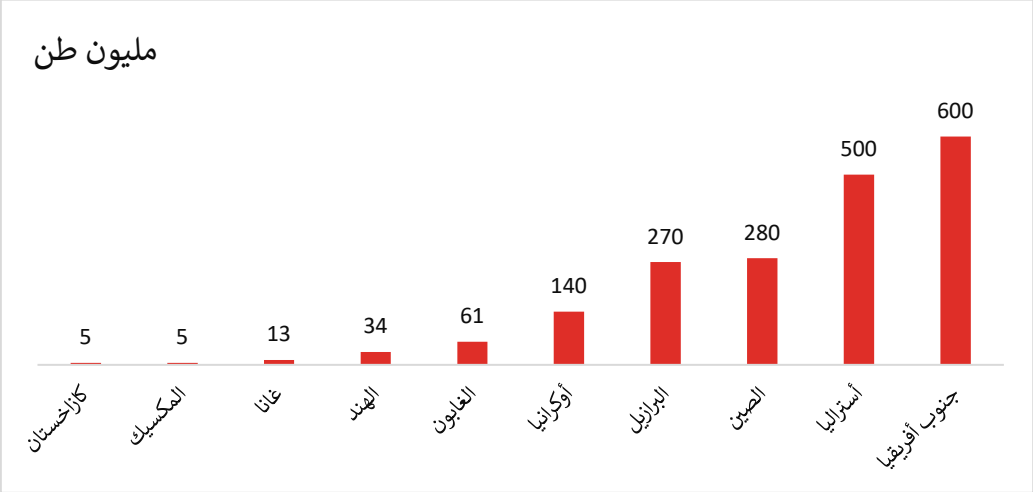


مصدر البيانات: (USGS, 2024)

5-3-2 المنغنيز

قدرت احتياطيات المنغنيز في نهاية عام 2023 بأكثر من 1.9 مليار طن، يوجد أكثر من ثلثها في جنوب أفريقيا، كما هو مبين في الشكل 11:

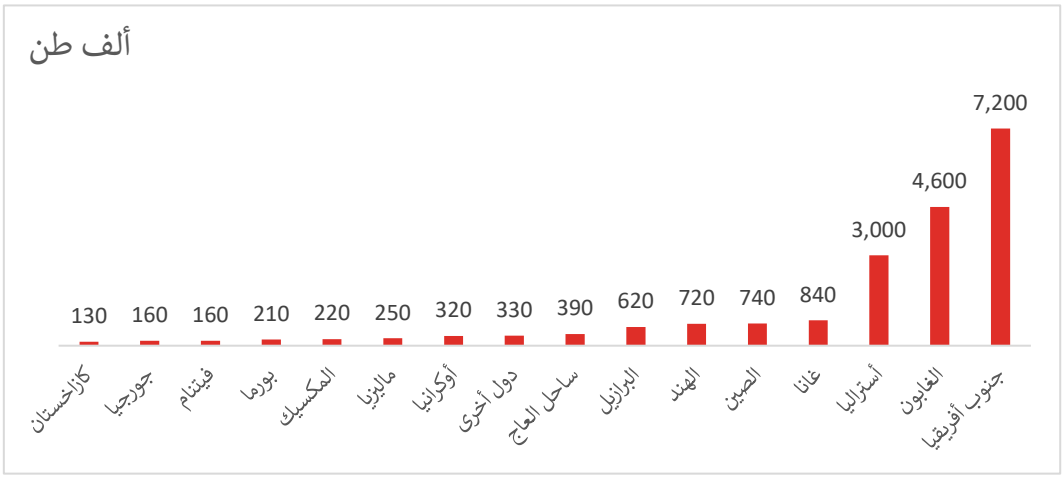
الشكل 11: احتياطيات المنغنيز في العالم نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

أما إنتاج العالم من المنغنيز فناهز 20 مليون طن في عام 2023، منها أكثر من 36% أنتجتها جنوب أفريقيا، كما هو موضح في الشكل 12:

الشكل 12: إنتاج المنغنيز في العالم عام 2023

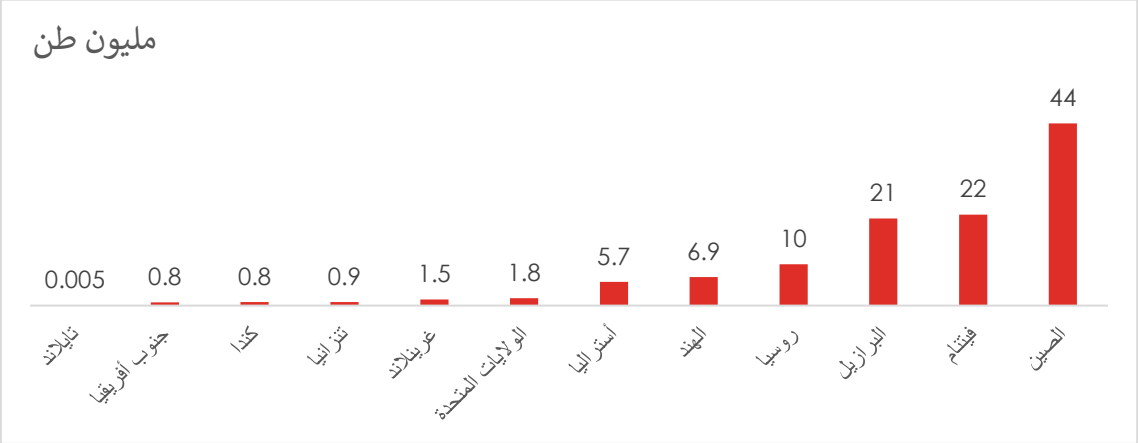


مصدر البيانات: (USGS, 2024)

6-3-2 العناصر النادرة

قدرت احتياطيات العناصر النادرة عام 2023 بأكثر من 115 مليون طن، يوجد أكثر من 38% منها في الصين، تليها فيتنام والبرازيل، كما هو مبين في الشكل 13.

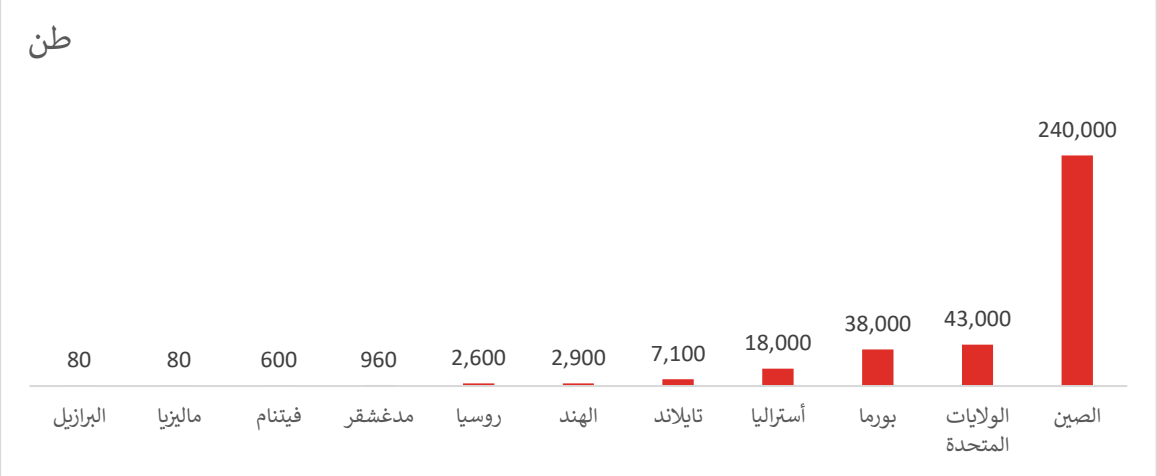
الشكل 13: احتياطيات العناصر النادرة في العالم نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

وتهيمن الصين على إنتاج العالم من العناصر النادرة* بحصة بلغت زهاء 77% في عام 2023، كما هو مبين في الشكل 14.

الشكل 14: إنتاج العناصر النادرة في العالم عام 2023



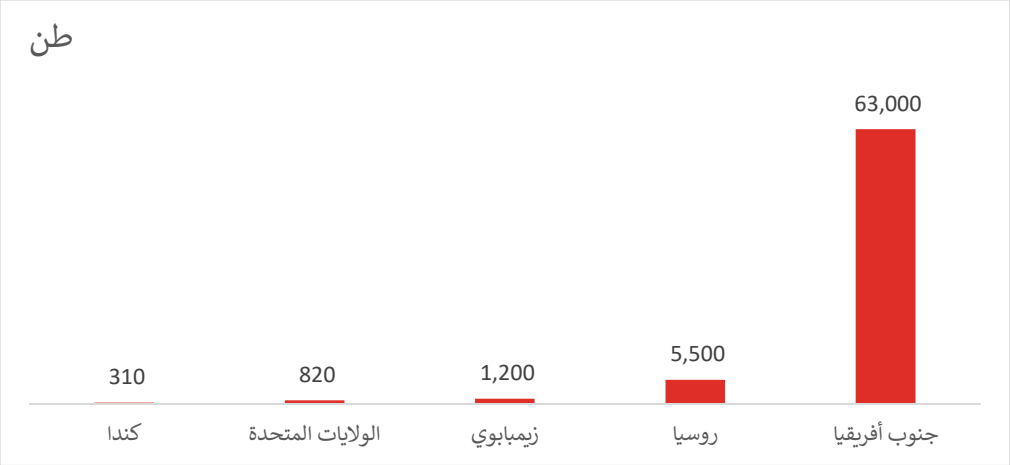
مصدر البيانات: (USGS, 2024)

2-3-7 البلاتين

قدرت احتياطيات العالم من البلاتين في نهاية عام 2023 بنحو 71.6 مليون طن، يتوضع حوالي 88% منها في جنوب أفريقيا، كما هو مبين في الشكل 15.

* يتضمن الملحق 2 جدولاً يوضح إنتاج العناصر النادرة والحرجة في مختلف دول العالم في 2023.

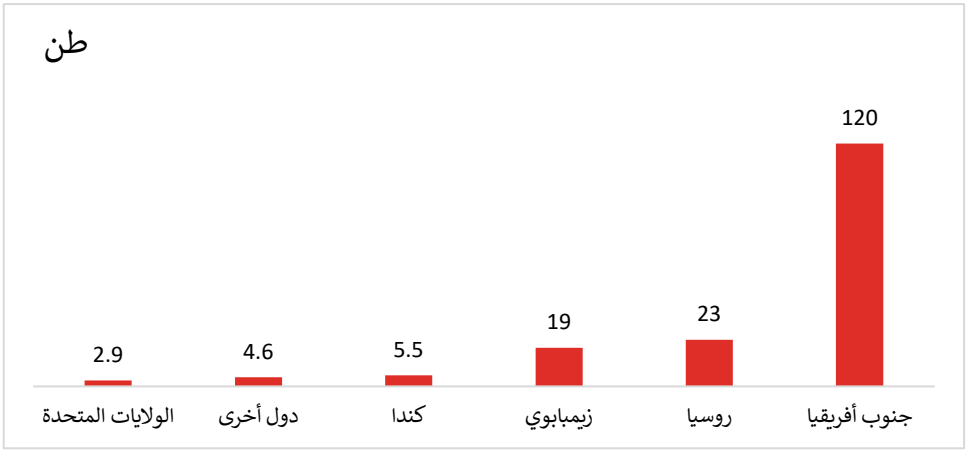
الشكل 15: احتياطيات البلاتين في العالم نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

وقدر إنتاج البلاتين في العالم بحوالي 175 طن في عام 2023، يأتي معظمها من جنوب أفريقيا، كما هو مبين في الشكل 16.

الشكل 16: إنتاج العالم من البلاتين عام 2023

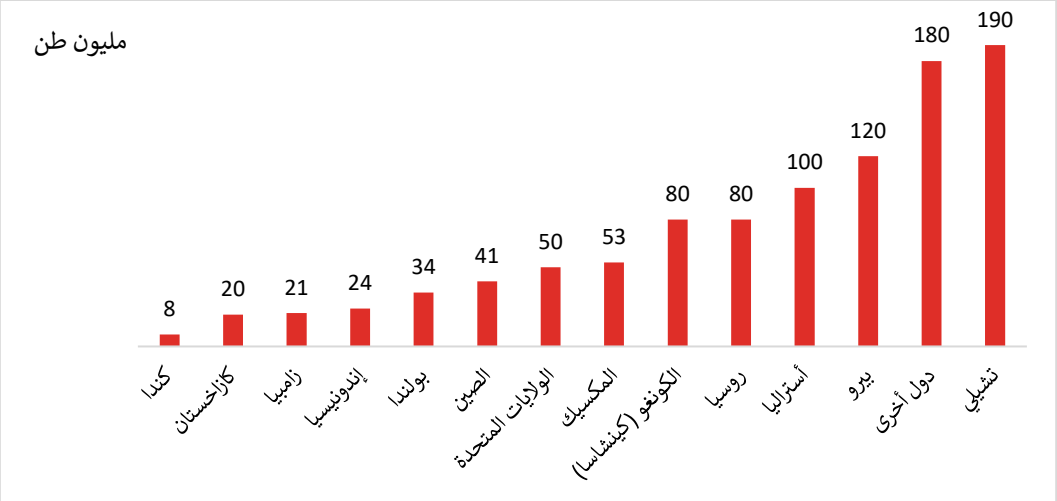


مصدر البيانات: (USGS, 2024)

8-3-2 النحاس

لا توجد تقديرات حديثة دقيقة لموارد النحاس في العالم، وإن كانت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكي قد قدرتها عام 2015 بنحو 2.1 مليار طن، بينما تشير "منظمة النحاس العالمية" إلى أن موارد النحاس تقدر بنحو 5 مليار طن (ICA, 2025)[16] لكن هذا تقدير قديم يعتمد بدوره على تقدير سابق لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكي صدر عام 2014. أما احتياطيات النحاس فقدرت عام 2023 بأكثر من 1 مليار طن، يوجد 31% منها في تشيلي والبيرو ، ويبين الشكل 17 احتياطيات العالم من النحاس:

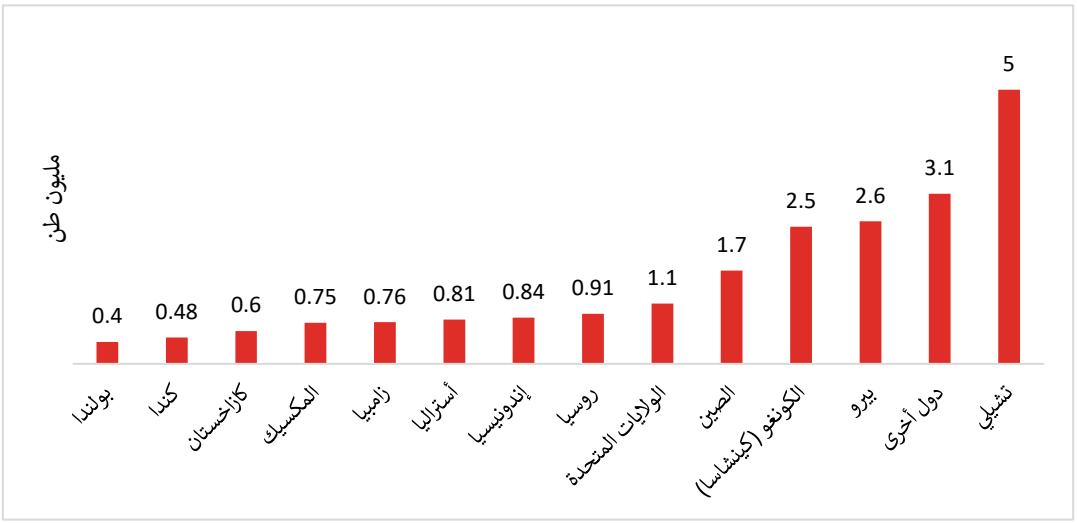
الشكل 17: احتياطيات النحاس في العام نهاية عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

قدر إنتاج العالم من النحاس في نهاية عام 2023 بنحو 22 مليون طن، منها 35% أنتجتها تشيلي والبيرو، كما هو مبين في الشكل 18.

الشكل 18: إنتاج العالم من النحاس عام 2023



مصدر البيانات: (USGS, 2024)

توضح هذه البيانات الموجزة عن احتياطيات وإنتاج بعض العناصر الحرجة، أن وجودها محدود في عدد من دول العالم، وعلى رأسها أستراليا بالنسبة لليثيوم، والصين للغرافيت والعناصر النادرة، وجنوب أفريقيا للمنغنيز والبلاتين والنيكل، وتشيلي التي تعتبر المنتج الأول للنحاس في العالم.

يستخدم حوالي 30% من النحاس المكرر* في إنتاج جميع أنواع الأجهزة والمعدات الكهربائية،

* تعدين النحاس Mining هي الخطوة الأولى لاستخراج الخام من الأرض، أما التكرير Refining فهو الذي يحول الخام إلى معدن النحاس المستخدم في تطبيقات مختلفة.

وحوالي 28% في قطاع البناء، و16% في البنى التحتية و12% في النقل مثل السيارات والشاحنات التقليدية، وكذلك الطائرات.

يقدر أن حوالي 5% من إجمالي الطلب على النحاس يذهب إلى إنتاج المركبات الكهربائية، كما أن الكثير من الليثيوم والجرافيت والنيكل مخصص أيضاً للسيارات الكهربائية. ويستخدم معظم الليثيوم والجرافيت المتاحين على نطاق واسع في البطاريات، بينما يذهب حوالي 16% من النيكل المكرر إلى قطاع بطاريات السيارات الكهربائية، بالإضافة إلى ذلك، يعد المنغنيز من العناصر الأساسية لصنع السيارات الكهربائية، كما أن المنغنيز والسيليكون ضروريان لتكنولوجيا البطاريات. وهناك حاجة إلى السيليكون لصنع الألواح الشمسية والمنغنيز لصنع توربينات الرياح. ويستخدم الزنك على نطاق واسع في التقنيات النظيفة، مثل الألواح الشمسية وعنفات الرياح (Burgering, 2024)[17]

وربما يكون من الهام إيراد شيء من التفصيل حول النحاس *، كونه من أكثر العناصر حيوية ويدخل في صميم مفهوم تحول الطاقة. عُرف النحاس قبل أكثر من 10 آلاف سنة، لكن البشر لم يحتاجوا إليه عبر التاريخ أكثر من حاجتهم إليه حالياً، فقد ارتفع الاستخدام العالمي السنوي للنحاس من 0.5 مليون طن في عام 1900 إلى حوالي 2 مليون طن بعد الحرب العالمية الثانية، ووصل إلى 25 مليون طن عام 2020. وهذا يتوافق مع معدل نمو سنوي مركب بنسبة 3.4% خلال هذه الفترة التي تبلغ 120 عاماً. يرجع هذا الارتفاع جزئياً إلى النمو في عدد سكان العالم بالإضافة إلى النمو في استخدام النحاس للفرد الواحد، ففي عام 1950، كان متوسط الاستخدام السنوي للنحاس المكرر 1.15 كغ للفرد، بينما وصل بحلول عام 2020، إلى 3.25 كغ. وفي ضوء المساعي للوصول إلى صافي الصفر الكربوني تزايد الطلب على النحاس بشكل كبير خاصة للمعدات الكهربائية، حيث قدر مثلاً أن 70% من مبيعات النحاس في عام 2020 كانت لهذه المعدات (ICA, 2023)[18]. وربما يمكن القول إن النحاس مع هيمنته كمياً على العديد من التقنيات النظيفة، سيصبح مقياساً لتحول الطاقة، كما يبدو أن الطلب على النحاس المكرر بدأ يتجاوز المعروض منه. ورغم وفرة احتياطياته تبقى المشكلة في أن قدرة الاستخراج لا تنمو بالسرعة التي ينمو بها الاستهلاك. ويمكن هنا الإشارة إلى أن عنفة ريحية على اليابسة بقدرة 3 ميغا واط تحتاج إلى حوالي 9 طن من النحاس، بينما تحتاج عنفة ريحية في البحر بقدرة 3.6 ميغا واط إلى حوالي 32 طن من النحاس. وهذه بطبيعة الحال ليست أرقاماً مطلقة، بل تتعلق بالتقنية المستخدمة والشركة الصانعة، ويبين الجدول 3 (Mone et al, 2015)[19] مثالاً عن بعض التفاصيل بشيء من الدقة حيث

* ما ينطبق على النحاس ينطبق بشكل عام على باقي العناصر اللازمة للتحول الطاقي، وإن كان ذلك بنسب مختلفة، وبما أن الهدف من الدراسة ليس تحري كل العناصر الحرجة، فقد تم الاكتفاء بالنحاس كمثال على أهمية الطلب والإمداد لهذه العناصر ودورها في تحول الطاقة.

يمكن من خلاله حساب كمية النحاس* اللازمة لكل 1 ميغا واط من قدرة العنفة الريحية وتتراوح بين 1.2- 3 طن تقريباً.

الجدول 3: كمية بعض المواد المستخدمة في عنفة الرياح

الصانع	Micon	Nordex	Micon	Vestas	Vestas	Vestas	Vestas
موديل العنفة	NM52	N-62	NM72	V82 1.65	V90 2.0	V100 2.0	V110 2.0
القدرة الاسمية (ميغا واط)	0.9	1.3	1.5	1.65	2	2	2
المواد اللازمة (كغ/كيلو واط)							
فولاذ	111.2	104.5	110.1	96.3	82.2	83.9	92.2
ألياف زجاجية، بلاستيك	18.8	23.8	20.9	18.2	16.0	14.1	14.2
حديد/ حديد زهر	7.2	17.3	8.7	17.8	20.5	13.3	13.3
نحاس	1.6	1.5	1.2	1.8	0.9	0.6	0.7
ألمنيوم				1.9	2.1	1.7	1.9

مصدر البيانات: مستخلص من Mone et al، 2015.

عموماً، تقدر وكالة الطاقة الدولية (IEA, 2024)[20] أن الطلب على النحاس المكرر بلغ نحو 26 مليون طن في عام 2023، وعلى العالم أن يضاعف تقريباً إنتاجه من النحاس خلال 25 عاماً، حيث يقدر أن يصل الطلب إلى نحو 41 مليون طن في عام 2050 كما هو مبين في الجدول 4. لكن الملاحظ أن بيانات وكالة الطاقة الدولية لا تظهر حجم إنتاج النحاس المتوقع في عام 2050 سواء لسيناريو صافي الصفر الكربوني، أو حتى للمشاريع القائمة أو المعلن عنها، وتصل بتوقعاتها من الإمداد إلى عام 2040 فقط، حيث تقدره بنحو 29.9 مليون طن، أي أنه -وبحسب توقعات الوكالة نفسها- سوف يشهد العالم نقصاً في الإمداد يقارب 9 مليون طن في عام 2040. ويبين الجدول كذلك الفارق بين الطلب والإمداد لعدد من العناصر الحرجة الأخرى غير النحاس.

الجدول 4: الطلب المتوقع للوصول حسب السيناريوهات المعلنة لعدد من العناصر الحرجة- ألف طن

	2021	2023	2040	2050
الطلب على النحاس	24,928	25,855	39,069	40,889
إمداد النحاس	24,973	26,336	29,944	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	45	481	(9,125)	
الطلب على الليثيوم	101	165	1,431	1,728
إمداد الليثيوم	102	176	370	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	1	11	1,061)	
الطلب على النيكل	2,759	3,104	6,386	6,030
إمداد النيكل	589	550	577	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	(2,170)	(2,554)	(5,809)	

* يمكن بنفس الآلية تحري كميات العناصر الحرجة و/أو النادرة اللازمة للمركبات الكهربائية، وألواح الطاقة الشمسية وغيرها من التطبيقات، لكن هذا يقع خارج نطاق الدراسة.

	2021	2023	2040	2050
الطلب على الكوبالت	181	215	472	539
إمداد الكوبالت	176	224	305	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	(5)	9	(167)	
الطلب على الجرافيت	3,920	4,632	17,873	16,352
إمداد الغرافيت	41	45	153	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	(3,879)	(4,587)	(17,720)	
الطلب على العناصر الأرضية النادرة	79	93	176	202
إمداد العناصر الأرضية النادرة	59	76	110	
الفرق بين الإمداد والطلب (2040)	(20)	(17)	(66)	
مصدر البيانات: (IEA, 2024) آخر تحديث كان في 17 مايو 2024.				

ولابد من التنويه إلى أن بعض التحليلات ترى أن سعر النحاس يجب أن يرتفع إلى 15 ألف دولار للطن لجذب الاستثمارات اللازمة لتطوير موارده، بينما تشير البيانات المتاحة حالياً إلى أن السعر يبلغ نحو 9.15 ألف دولار للطن. يبين الجدول السابق كذلك أن تلبية الطلب على هذه العناصر في عام 2050 يحتاج إلى خطوات سريعة تؤمن وجود المصادر وكلفة الاستثمارات اللازمة لتطويرها علاوة على الإطار الزمني، فالطلب على الليثيوم مثلاً في عام 2050، وكما يبدو من الجدول، سوف يزداد بأكثر من عشرة أضعاف.

يبين ما سبق أن العناصر الحرجة والنادرة تلعب دوراً أساسياً في التحول الطاقي العالمي، حيث تدخل في تصنيع مختلف التقنيات في مجال الطاقة المتجددة مثل الألواح الشمسية، وتوربينات الرياح. ويعتبر الليثيوم والنيكل والكوبالت أساسيين في بطاريات المركبات الكهربائية، بينما تستخدم العناصر الأرضية النادرة في تصنيع المغناطيسات الدائمة لتوربينات الرياح ومحركات المركبات الكهربائية.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

الفصل الثالث

تحديات التحول الطاقي

تحول الطاقة هو عملية معقدة تتطلب تغييرات جذرية في كيفية إنتاج واستهلاك الطاقة. يهدف هذا التحول إلى تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري والانتقال إلى مصادر طاقة متجددة. ومع ذلك، يواجه هذا التحول العديد من التحديات التي يمكن تقسيمها إلى عدة مجالات رئيسية: التقنية، الاقتصادية، السياسية، والاجتماعية.

1-3 التحديات التقنية

وهي تحديات متعددة ومعقدة، وتشمل عدة جوانب رئيسية تتعلق بتطوير وتطبيق تقنيات الطاقة المتجددة، مثل:

1-1-3 تخزين الطاقة

يمثل تخزين الطاقة المتجددة تحدياً كبيراً بسبب الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة مثل الشمس والرياح، إذ لا تنتج الألواح الشمسية الكهرباء في الليل وتتراجع كفاءتها بشكل كبير بسبب تراكم الغبار أو في الأيام الغائمة، ولا تعمل توربينات الرياح عندما لا تهب الرياح. لذلك، هناك حاجة إلى تقنيات تخزين فعالة لضمان توفر الطاقة عند الحاجة. ومع أن البطاريات هي الحل الأكثر شيوعاً، ولكنها لا تزال بحاجة إلى تحسينات كبيرة في الكفاءة والتكلفة، إذ تشير البيانات إلى أن ولاية كاليفورنيا على سبيل المثال تمكنت لغاية عام 2024 من بناء منشآت لتخزين 13391 ميغاواط من الكهرباء(CEC, 2024)[21]، لكن الكلفة ناهزت 5 مليار دولار، علماً أن الطاقة المخزنة تمثل استهلاك الولاية لمدة 24 دقيقة فقط.

ضمن هذا المجال تعمل بعض الدول العربية على تطوير تقنيات مختلفة لتخزين الطاقة، ومنها ما أعلنته "هيئة كهرباء ومياه دبي" في الإمارات العربية المتحدة من التخطيط لإنشاء نظام واسع النطاق لتخزين الطاقة باستخدام البطاريات الكهربائية التي يتم إمدادها بالطاقة الكهروضوئية في مجمع "محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية"، ومن بين هذه التقنيات تخزين الطاقة الشمسية حرارياً في الملح المذاب (المنصهر) من خلال توظيف المرايا العاكسة لتركيز ضوء الشمس على برج شمسي، ثم ضخ الملح المنصهر إلى مولد البخار، حيث يقوم بتسخين الماء ويحوله إلى بخار قادر على تحريك عنفات مولد الكهرباء، وهو ما يسمح بإنتاج الكهرباء على مدار الساعة.

وفي مقابلة خاصة ذكر العضو المنتدب والرئيس التنفيذي لهيئة كهرباء ومياه دبي أن كلفة هذا المشروع تصل إلى 15.9 مليار درهم إماراتي (CNBC, 2024)[22]، أي ما يعادل حوالي 4.3 مليار دولار.

كما تعمل الهيئة على تنفيذ محطة كهرومائية بتقنية الطاقة المائية المخزنة في "سد حتا". وستعتمد المحطة في إنتاج الكهرباء على الاستفادة من المياه المخزنة في السد وسد آخر علوي تم إنشاؤه

في المنطقة، وخارج ساعات ذروة الاستهلاك، ستقوم توربينات متطورة تعتمد على الطاقة النظيفة بالعمل بطريقة عكسية لضخ المياه من "سد حتا" إلى السد العلوي وذلك لتخزين الطاقة، وعند الحاجة يتم تشغيل هذه التوربينات لإنتاج الكهرباء (البيان، 2024)[23].

3-1-2 كفاءة الطاقة

تحسين كفاءة تقنيات الطاقة المتجددة هو تحدٍ آخر، فعلى الرغم من التقدم الكبير في هذا المجال، لا تزال هناك حاجة إلى تحسينات مستمرة، فعلى سبيل المثال، ورغم تحسن كفاءة الألواح الشمسية، لكن لا تزال هناك حدود تقنية يجب تجاوزها لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية. وتتراوح كفاءة الألواح الشمسية التجارية حالياً بين 15-22%، أي أن 15- 22% من الطاقة التي يستقبلها اللوح الشمسي تتحول إلى كهرباء، بينما يفقد الباقي على شكل حرارة أو انعكاس.

كما أن لكفاءة الطاقة معنى آخر، هو الاستفادة من الطاقة المتاحة إلى أقصى درجة ممكنة، وهو ما يمكن النظر إليه من خلال مثال بارز في سياق التحول الطاقي هو مشروع تجديد مبنى Empire State في مدينة نيويورك (Harrington & Carmichael, 2009) [24]. حيث خضع هذا المبنى لعملية تجديد شاملة اكتملت في عام 2013، وهدف مشروع التجديد إلى خفض استهلاك الطاقة والبصمة الكربونية للمبنى مع الحفاظ على طابعه التاريخي. شملت التحديثات الرئيسية في المشروع ما يلي:

1. تجديد النوافذ: تم تجديد جميع النوافذ البالغ عددها 6,514 نافذة لتحسين العزل، مما قلل من فقدان الحرارة في الشتاء واكتسابها في الصيف.
2. عزل المشعات: تم تجهيز المشعات بحواجز عاكسة لتوجيه الحرارة مرة أخرى إلى الغرف، مما يحسن كفاءة التدفئة.
3. الإضاءة والتحكم: تم تركيب إضاءة عالية الكفاءة وأجهزة استشعار للحركة لتقليل استهلاك الكهرباء.

وجرى كذلك تنفيذ نظام إدارة مبانٍ متطور لتحسين التدفئة والتبريد والإضاءة بناءً على البيانات الفورية، وقد أسفر مشروع التجديد عن تخفيض كبير في استهلاك الطاقة بلغ 38%، مما وفر نحو 4.4 مليون دولار سنوياً، واسترد المشروع تكاليفه خلال فترة زادت قليلاً عن ثلاث سنوات.

3-1-3 الشبكات الذكية

تمثل الشبكات الذكية أحد الجوانب الإيجابية في مفهوم تحول الطاقة، حيث تلعب دوراً حيوياً في تحسين كفاءة توزيع الطاقة، ودمج مصادر الطاقة المتجددة، وتقليل الانبعاثات الكربونية، لكنها تعتبر في الوقت نفسه من أهم التحديات التقنية في مسار التحول الطاقي.

الشبكة الذكية هي نسخة مطورة من شبكة الطاقة التقليدية، تدمج التكنولوجيا الرقمية والأتمتة لمراقبة تدفق الكهرباء والتحكم في هذا التدفق وتحسينه بدءاً من التوليد وصولاً إلى الاستهلاك. تتميز الشبكات الذكية بالقدرة على الاتصال ثنائي الاتجاه بين مقدمي الخدمات والمستهلكين، مما يسهل إجراء التعديلات والمراقبة في الوقت الفعلي. وتتكون هذه الشبكات من عدادات ذكية لتتبع استهلاك الطاقة في الوقت الفعلي وتوفير البيانات للمستهلك ومقدم الخدمة، مما يتيح اتخاذ قرارات أفضل للطرفين.

تشمل هذه الشبكات -علاوة على العدادات- أجهزة استشعار وأتمتة تكتشف المشاكل المحتملة مثل الانقطاعات وتعمل على معالجتها، مما يضمن استجابة أسرع لتلافيها أو لحلها. وتتضمن كذلك نظم بيانات تكفل التواصل السلس بين جميع مكونات الشبكة، إذ تعمل التحليلات المتقدمة في الشبكة على توظيف البيانات من أجهزة الاستشعار والعدادات الذكية، لتساعد على التنبؤ بالطلب وتحسين توزيع الطاقة (Thompson, 2024) [25]. تساهم هذه الشبكات في تحسين كفاءة الطاقة، وتسهل دمج مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح في الشبكة الكهربائية، مما يعزز من استدامة النظام الطاقي، لكنها في الوقت نفسه تواجه تحديات مختلفة، من أهمها:

- التكلفة: ذلك أن تطوير وتنفيذ الشبكات الذكية يتطلب استثمارات كبيرة في البنية التحتية والتكنولوجيا.
- الأمن السيبراني: مع زيادة الاعتماد على التكنولوجيا الرقمية، تزداد مخاطر الهجمات السيبرانية على الشبكات الذكية.
- التكامل مع الشبكات الحالية: يتطلب دمج الشبكات الذكية مع الشبكات التقليدية تحديثات كبيرة للبنية التحتية الحالية.
- القبول الاجتماعي: يحتاج المستهلكون إلى التكيف مع التقنيات الجديدة وتغيير سلوكياتهم لتحقيق الفوائد الكاملة للشبكات الذكية.

ومن بين الدول التي تستخدم الشبكات الذكية، يمكن الإشارة إلى إيطاليا التي طورت أول وأكبر شبكة ذكية في العالم، حيث تم تزويد أكثر من نصف المنازل بالعدادات الذكية التي تقيس استهلاك الطاقة الفردي وتساعد في تحسين كفاءة استخدام الطاقة (Electronics, 2021) [26].

ويبقى من بين التحديات التقنية كذلك إيجاد طريقة للتكامل مع الشبكات التقليدية القائمة والمصممة للتعامل مع تدفق الطاقة من محطات توليد مركزية كبيرة، وليس من مصادر متجددة موزعة، مما يتطلب تحديثات كبيرة للبنى التحتية القائمة وتطوير تقنيات جديدة لإدارة تدفق الطاقة بشكل فعال. وهو ما شهدته ولاية كاليفورنيا الأمريكية من خلال مشروع لتحديث شبكتها الكهربائية بدأت ملامحه تظهر منذ عام 2009، لكن ذلك التحديث استهلك أكثر من نصف مليار دولار من المساعدات الفيدرالية، علاوة على استثمارات من الشركات زادت عن 5 مليار دولار. ومع أن المشروع يستلزم العمل الدائم على التطوير، إلا أن معظم البنى الأساسية استكملت في عام 2020. وكان من نتائج المشروع رفع قدرة تخزين الكهرباء بمقدار 1.25% بين عامي 2019- 2024 (Newsome, 2024)[27].

إنما كان من نتائج المشروع كذلك ارتفاع كلفة الكهرباء، من 15- 16 سنت/ كيلو واط في عام 2010، إلى 32 سنت/ كيلو واط في عام 2024، ومع أن هناك أسباباً أخرى لهذا الارتفاع، مثل التضخم والأزمة الروسية الأوكرانية وغيرها، إلا أن تبني مصادر الطاقة المتجددة بشكل واسع في كاليفورنيا، وتحديث الشبكة الكهربائية لتتعامل مع هذا التبني، جعل وسطي فاتورة الكهرباء المنزلية في كاليفورنيا تزيد بنحو 29% عن باقي الولايات الأمريكية(Zientara, 2024)[28].

2-3 التحديات الاقتصادية (كلفة التحول الطاقي)

لا ريب أن العديد من القطاعات شهدت دمجاً متزايداً للسياسات البيئية والاجتماعية والحوكمة ضمن إطار التحول الطاقي، ومع ذلك، فإن تحقيق أهداف التمويل المستدام يتطلب في كثير من الأحيان استثمارات كبيرة يمتد تأثيرها إلى ما هو أبعد من الأداء المالي للشركات مثلاً، ليشمل مساهماتها في المجتمع والبيئة والحوكمة الشاملة. ويتطلب تحول الطاقة -كما سبق ذكره- استثمارات ضخمة في البنية التحتية والتكنولوجيا، إذ تشير تقديرات وكالة الطاقة الدولية إلى أن تحقيق أهداف اتفاقية باريس يحتاج إلى استثمارات تزيد عن 4 تريليون دولار سنوياً حتى عام 2030.

تشمل هذه الاستثمارات بناء محطات طاقة جديدة، وتحديث الشبكات الكهربائية، وتطوير تقنيات تخزين الطاقة. وبالطبع فإن تأمين هذه الاستثمارات يشكل تحدياً كبيراً خاصة للدول النامية التي لا تمتلك الموارد المالية الكافية، حيث يقدر أن بلدان الجنوب ستحتاج إلى مضاعفة استثماراتها السنوية في الطاقة النظيفة ثلاث مرات، لتزيد من 770 مليار دولار في عام 2024 إلى 2.2-2.8 تريليون دولار بحلول أوائل عام 2030 (Bandura & Bodin, 2024)[29].

أما الوكالة الدولية للطاقة المتجددة IRENA وفي تقريرها عن منظور التحول الطاقي في عام 2023، فقد

ذكرت أن كلفة الحد من الاحترار العالمي إلى 1.5° مئوية، تحتاج بين عامي 2023 و2050 إلى استثمارات تصل إلى 150 تريليون دولار (IRENA, 2023)[30]. وبتحويل هذه التقديرات إلى مفهوم ملموس، يتبين أن على العالم إنفاق نحو 5.3 تريليون دولار سنوياً للوصول إلى تلك الغاية، أو حوالي 14.7 مليار دولار يومياً. وإذ بلغ متوسط سعر النفط في شهر نوفمبر 2024، حوالي 71.68 دولار للبرميل، فبالتالي على العالم أن ينفق يومياً ما يعادل ثمن 205 ملايين برميل من النفط يومياً لمدة 28 عاماً للوصول إلى هدف الحد من الاحترار العالمي*.

ويرى نفس التقرير أن التحويل الطاقي بات خارج المسار الصحيح، إذ أدت تداعيات جائحة كوفيد-19 والآثار المتتالية للأزمة الأوكرانية إلى تفاقم التحديات التي تواجه المرحلة الانتقالية، حيث يتطلب الحد من الاحتباس الحراري إلى 1.5° مئوية خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 37 مليار طن من مستويات عام 2022 وتحقيق صافي انبعاثات صفرية في قطاع الطاقة بحلول عام 2050. ويتابع التقرير بأن هناك فجوات كبيرة بين النشر الحالي لتقنيات تحول الطاقة والمستويات اللازمة لتحقيق هدف اتفاقية باريس، ويتطلب المسار المتوافق مع 1.5° مئوية تحولاً شاملاً للطريقة التي تستهلك بها المجتمعات الطاقة وتنتجها، إلا أن التعهدات والخطط الحالية أقل بكثير من رؤية مسار الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، ومن المتوقع وجود فجوة انبعاثات تبلغ 16 مليار طن في عام 2050.

أما في تقريرها عن منظور التحول الطاقي في عام 2024، فقد ذكرت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة أن الاستثمارات الفعلية في التقنيات المرتبطة بالتحول الطاقي تجاوزت 2 تريليون دولار، منها 48% في الصين، و17% في الولايات المتحدة، و5% في ألمانيا و4% في المملكة المتحدة و3% في فرنسا. وارتفعت الاستثمارات العالمية بنسبة 17% في عام 2023 مقارنة بعام 2022، حيث قاد الاتحاد الأوروبي النمو وتلته الولايات المتحدة، ويبدو أن ذلك كان مدفوعاً بسياسات مالية أوروبية توسعية، علاوة على قانون خفض التضخم الأمريكي† الذي وضع أدوات لتقنيات انتقال الطاقة والإعفاءات الضريبية والمنح والتخفيضات والمشتريات العامة.

ساعد كل ذلك على موازنة الضغوط على الاستثمارات -على الأقل في الاقتصادات المتقدمة - التي تمارسها السياسات النقدية الانكماشية التي رفعت أسعار الفائدة، ويبقى أن العديد من الاقتصادات الناشئة

* أي أكثر من ضعف إنتاج العالم (نحو 1.2 مليون برميل) من النفط وسائل الغاز الطبيعي يومياً.

† قانون خفض التضخم الأمريكي لعام 2022 هو قانون فيدرالي يهدف إلى تقليل العجز في الميزانية الفيدرالية، وخفض أسعار الأدوية، والاستثمار في إنتاج الطاقة المحلية مع تعزيز الطاقة النظيفة. وقد أصدر الرئيس الحالي دونالد ترامب أوامر تنفيذية تهدف إلى إلغاء أو تعديل العديد من السياسات التي وضعتها إدارة بايدن، بما في ذلك إلغاء بعض اللوائح والسياسات المناخية التي كانت تهدف إلى خفض التكاليف، وأصدر أوامر لتعزيز إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة.

والنامية تواجه صعوبات متزايدة في جذب التمويل، تفاقمت بسبب تقلص القدرة المالية وارتفاع أعباء الديون. وقد اجتذب النقل الكهربائي (بشكل رئيسي السيارات الكهربائية والبنية التحتية للشحن) 634 مليار دولار أمريكي في عام 2023 حيث تضخ معظم الاستثمارات والمبيعات في الصين والولايات المتحدة وألمانيا والمملكة المتحدة. ولكن الأسواق الأسرع نمواً في السنوات الأخيرة كانت الهند وإندونيسيا وتايلاند.

أما في مجال الطاقة المتجددة فقد وصلت الاستثمارات العالمية إلى 570 مليار دولار مقارنة بنحو 448 مليار دولار في عام 2022، أي بزيادة قدرها 27% خلال عام 2023 ، وشملت الأسواق الرئيسية كلاً من الصين والولايات المتحدة والبرازيل والهند وألمانيا. وبلغت الاستثمارات في الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح البرية وطاقة الرياح البحرية 387 و 116 و 30 مليار دولار على التوالي. ويلاحظ أن تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية لا تزال الأكثر تمويلًا، حيث مثلت 68% من الاستثمارات العالمية. في المقابل، انخفضت الاستثمارات العالمية في كفاءة الطاقة - والتي تشمل الإنفاق التدريجي على المعدات الجديدة الموفرة للطاقة أو التكلفة الكاملة للتجديدات في المباني والصناعة والنقل - إلى 323 مليار دولار في عام 2023، أي بانخفاض 6% عن عام 2022 (IRENA, 2024)[31].

وفي نفس المضمار، شهدت الاستثمارات السنوية في سلسلة التوريد العالمية لانتقال الطاقة نمواً ملحوظاً من 46 مليار دولار في عام 2020 إلى 135 مليار دولار في عام 2023، أي ما يمثل تراكمياً 370 مليار دولار، خصص منها ما يقرب من 90% لصناعة معدات مثل الوحدات الشمسية، وعنفات الرياح، والبطاريات، ومحللات الهيدروجين، بينما ذهب الباقي إلى تعدين مستلزمات البطاريات والفلاتر للمواد الحيوية مثل الليثيوم والكوبالت والنيكل. ونظراً لأن قدرة التعدين والتصنيع يجب أن تواكب نشر التقنيات المتعلقة بالتحول الطاقي وخاصة تلك المتوخاة في سيناريو 1.5 درجة مئوية، فإن هذه الاستثمارات تشكل لبنة أساسية لتحول الطاقة.

وبالعودة إلى نقطة التكاليف، وكمثال عن المنظور الذي تتبعه بعض الجهات والمنظمات ضمن مسار التحول الطاقي داعية لتحويل كل شيء للعمل على الكهرباء، يلاحظ مثلاً في الولايات المتحدة أن العديد من هذه الجهات ادعت أن هذا التحول سوف يخفض تكاليف الطاقة، ففي عام 2022، زعم البيت الأبيض أن تحويل كل شيء إلى الكهرباء من شأنه أن يخفض تكاليف الطاقة (The White House, 2022)[32]. وادعت إحدى أغنى المنظمات غير الحكومية المعنية بالمناخ في الولايات المتحدة NRDC*

* مجلس الدفاع عن الموارد الطبيعية، وتبلغ إيراداته السنوية من مختلف المصادر أكثر من 193 مليون دولار.

أن تحويل كل شيء إلى الكهرباء "إذا تم بشكل صحيح" فمن شأنه أن يجلب فوائد كبيرة لمجتمعات العدالة البيئية، بما في ذلك خفض تكاليف الطاقة". لكن لغة الأرقام تبقى الفيصل بين المزاعم وبين الحقائق، فضمن السجل الفيدرالي الذي نشره "مكتب كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة" التابع لوزارة الطاقة الأمريكية في شهر أكتوبر 2024، بينت الأرقام أنه على أساس مكافئ الطاقة، ستكلف الكهرباء المستهلكين في عام 2024 نحو 3.5 أضعاف تكلفة الغاز الطبيعي (Federal Register, 2024)[33]. وقبله بفترة وجيزة، نشرت إدارة معلومات الطاقة الأمريكية منظور "توقعات الوقود لشتاء 2024- 2025" والذي بينت الأرقام الواردة فيه أن الغاز الطبيعي لا يزال أرخص أشكال الطاقة السكنية، وأن الكهرباء هي الأغلى (EIA, 2024)[34]، حيث ستكلف الكهرباء المنزلية حوالي 47 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية بريطانية عام 2024، بينما سيكلف الغاز حوالي 13 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية بريطانية.

ويبدو أن هذا الرقم يتكرر بشكل دوري، فقد كانت كلفة الكهرباء المنزلية ثلاثة أضعاف كلفة الغاز الطبيعي منذ عام 2009، وبين الباحث Robert Bryce المتخصص بشؤون الطاقة، أن المستهلكين في عموم الولايات المتحدة والذين يستخدمون الكهرباء للتدفئة، سوف يدفعون 75% أكثر من أولئك الذين يستخدمون الغاز، أما سكان غرب الولايات المتحدة فسوف يدفعون 87% أكثر للتدفئة ممن يستخدم الغاز الطبيعي، ويرى بالتالي أن النتيجة هنا واضحة: فالجهود الرامية إلى كهربة كل شيء سوف تعني ارتفاع تكاليف الطاقة بالنسبة للفقراء والطبقة المتوسطة، وسوف تعمل على تقليص الأمن الطاقي الأمريكي بسبب التركيز على شبكة طاقة واحدة، وسوف تتطلب هذه الجهود تحميل شبكة كهربائية متعثرة بالفعل تحت الطلب القائم على الطاقة أحمالاً هائلة جديدة. ويرى باختصار أن المنظمات غير الحكومية والسياسيين والناشطين الذين يحاولون حظر الاستخدام المباشر للغاز الطبيعي يدفعون في الواقع إلى فرض ضريبة طاقة رجعية باسم تغير المناخ، وهي الضريبة التي من شأنها أن تلحق الضرر بالمستهلكين ولن يكون لها أي تأثير على الإطلاق على مسار انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية أو تغير المناخ (Bryce, 2024)[35].

إجمالاً، سيتعين على البلدان إنفاق الكثير لبناء بنية تحتية جديدة وتحويل العمليات الصناعية إلى أشكال جديدة من الطاقة وتدريب القوى العاملة لديها. فعلى الرغم من أن العديد من دول الجنوب (ومن بينها الدول العربية) قد التزمت علناً بالاتفاقيات الدولية المتعلقة بتغير المناخ ، إلا أنه من أجل اجتياز مسار تحول الطاقة، سيتعين عليها اتخاذ قرارات يمكن وصفها بأنها صعبة. فإذا اختارت تلك الدول التخفيض التدريجي لصناعات الوقود الأحفوري، فسوف تخسر الإيرادات المالية وتواجه اضطرابات سوق العمل. وبالتوازي مع ذلك، لا تستطيع العديد من البلدان نفسها الحصول على طاقة

موثوقة وبأسعار معقولة، وتواجه تحديات اجتماعية واقتصادية عميقة سيتعين عليها التصدي لها، مثل تدني جودة التعليم والصحة، وربما ارتفاع معدل الفقر، وهي أولويات تتطلب موارد مالية واستثمارات قد لا تمتلكها العديد من البلدان. وتوفر الإيرادات الضريبية مثالا على ذلك. فإذا كان النظام الضريبي والدخل في بلد ما يعتمدان بشكل كبير على عائدات الوقود الأحفوري، فستحتاج الحكومة إلى إيجاد بدائل مالية، وهذا هو الحال في العديد من البلدان في جنوب الكرة الأرضية*، حيث تساهم صناعة الوقود الأحفوري بشكل كبير في الموارد المالية للدول. وفي المقابل، تمول هذه الأموال الخدمات العامة مثل التعليم والصحة والبرامج الاجتماعية والتوظيف الحكومي.

فعلى سبيل المثال شكّل الوقود الأحفوري في "جنوب أفريقيا" 5.5% من إجمالي الإيرادات الحكومية و1.6% من الناتج المحلي الإجمالي للبلاد في عام 2019. وبالمثل، في نفس العام في الهند، شكل الوقود الأحفوري 18% من إجمالي الإيرادات 3.4% من الناتج المحلي الإجمالي للبلاد، بينما تشير الموازنة العامة لدولة الكويت للعام المالي (2024/2023)† مثلاً إلى أن الإيرادات النفطية شكلت أكثر من 88% من إيرادات الدولة (وزارة المالية، 2023)[36]، وشكلت الإيرادات النفطية نحو 62% من إيرادات الموازنة في المملكة العربية السعودية عام 2023 (وزارة المالية السعودية، 2024)[37].

3-3 التحديات السياسية

يتطلب تحول الطاقة تعاوناً دولياً وسياسات داعمة، بحيث تضع الحكومات سياسات تحفز الاستثمار في الطاقة المتجددة وتقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري. وقد تقدم آنفاً في هذه الدراسة أن دور الحكومات يتطلب تنسيقاً بين الدول لضمان تحقيق أهداف المناخ العالمية وتقليل الانبعاثات الكربونية. إلا أن فجوة جديدة ظهرت بين دول الشمال والجنوب متخذة شكل اختلاف حاد بين البلدان المتقدمة والبلدان النامية حول كيفية المُضي قُدُمًا في التحول. ويرى خبير الطاقة Daniel Yergin أن الفجوة الأولى بين الشمال والجنوب ظهرت في سبعينات القرن الماضي وكانت عبارة عن صراع بين البلدان المتقدمة والنامية حول توزيع الثروات، وبخاصة تسعير السلع الأولية والمواد الخام، وقد انحسر هذا الصراع مع قدوم العولمة وتقدُّم التكنولوجيا، حيث أدت العولمة إلى إزالة العديد من الحواجز التجارية بين الدول، وتسهيل التجارة العالمية، وعمل تقدم التكنولوجيا على نقل المعرفة والتقنيات الحديثة إلى الدول النامية. هذا النقل ساعد هذه الدول على تحسين إنتاجيتها وزيادة كفاءتها في استخدام الموارد

* جغرافياً، هناك 90 دولة في جنوب الكرة الأرضية، أما اقتصادياً فيضاف لها العديد من دول أمريكا اللاتينية وآسيا.
† قدرت الإيرادات النفطية في الميزانية على أساس 70 دولار/ البرميل، وحجم الإنتاج 2.676 مليون ب/ي.

الطبيعية. كما ساهمت العولمة في تعزيز التكامل الاقتصادي بين دول الشمال والجنوب من خلال إنشاء شبكات إنتاج عالمية وشركات متعددة الجنسيات. أما الفجوة الجديدة بين الشمال والجنوب فتعكس اختلاف الآراء حول سياسات المناخ والتحول وتأثيرها على التنمية، وتحديد الجهات المسؤولة عن الانبعاثات التراكمية والجديدة ومن الذي يعاني منها. وازدادت الضغوط التي تتعرض لها البلدان النامية جراء صدمات السلع الأولية العالمية الناجمة عن الأزمة الروسية الأوكرانية وارتفاع أسعار الفائدة وما أعقبها من خفض لقيم العملات. ويتابع الخبير Yergin في مقال نشره صندوق النقد الدولي (Yergin, 2022)[38] موضحاً أن التحليل المقارن لسياسات الطاقة في البلدان النامية والمتقدمة بات يظهر وجود فجوة كبيرة في الأولويات والأهداف. فبينما تسعى الدول المتقدمة بشكل متزايد نحو التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة وخفض الانبعاثات الكربونية، تواجه البلدان النامية تحديات متعددة تعيقها عن اتباع نفس النهج. إذ أن أولويات التنمية في البلدان النامية ترتبط بالتنمية الاقتصادية، حيث تعتبر زيادة النمو الاقتصادي وتوفير فرص العمل أولوية قصوى للعديد من هذه البلدان، مما يستدعي الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية مثل الهيدروكربونات لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة ويضاف إلى هذه الأولويات كذلك:

- مكافحة الفقر: حيث تسعى العديد من البلدان النامية إلى تحسين مستوى المعيشة لمواطنيها، وتوفير الطاقة بأسعار معقولة للطبقات الفقيرة، وهو ما يتطلب في كثير من الأحيان استخدام مصادر الطاقة المتاحة محلياً مثل الفحم والكتلة الحيوية.
- الصحة العامة: يعاني العديد من البلدان النامية من مشاكل صحية مرتبطة باستخدام الوقود الصلب في الطهي والتدفئة، مما يؤدي إلى تلوث الهواء داخل المنازل وأمراض الجهاز التنفسي.

ويذكر هنا أن زهاء 970 مليون نسمة في أفريقيا مثلاً يفتقرون إلى إمكانية الطهي باستخدام مصادر موثوقة من الطاقة، مثل غاز البترول المسال LPG، المتاح فقط في المناطق الحضرية، لكن الارتفاع الأخير في أسعار الطاقة جعل من الصعب على نحو 30 مليون نسمة إضافية في القارة الأفريقية تحمل تكاليفه، مما دفع الكثيرين إلى العودة للاستخدام التقليدي للكتلة الحيوية. وهو ما دعا بعض البلدان الأفريقية لتقييم خطط دعم لوقود نظيف للطهي يعتمد على الغاز المنزلي أو على الكهرباء، واستكشاف البدائل المتاحة مثل مواقد الطهي المحسّنة التي تستخدم الكتلة الحيوية. لكن التوفير الشامل للوقود النظيف المناسب بحلول عام 2030 لهذا العدد الكبير من السكان، يعني الحاجة إلى إيصاله لحوالي 130 مليون شخص كل سنة، لذلك تعتبر الأولوية الحالية في أفريقيا هي الوصول الشامل إلى الكهرباء بأسعار معقولة (حمش، 2024)[39].

ويضاف إلى التحديات كذلك موضوع أمن الغذاء المرتبط بالزراعة (وحالات الجفاف الكارثية أحياناً)، حيث ارتفعت أسعار المواد اللازمة لصناعة الأسمدة النيتروجينية (الآزوتية)، وأهم هذه المواد هو الغاز الطبيعي المستخدم في إنتاج الأمونيا واليوريا، إذ تمثل اليوريا حوالي 60% من استهلاك الأسمدة النيتروجينية (IEA, 2022)[40].

وإذ تسعى البلدان النامية إلى تحقيق توازن بين تحقيق التنمية الاقتصادية والاجتماعية وبين حماية البيئة والحد من التغير المناخي، فإنها تواجه صعوبة في تحقيق هذا التوازن بسبب صعوبة في الحصول على التمويل اللازم لمشاريع الطاقة المتجددة والبنية التحتية المرتبطة بها، وذلك بسبب تفضيل المؤسسات المالية الدولية والمستثمرين لمشاريع الطاقة التقليدية ذات العوائد السريعة. كما ترى البلدان النامية أن الدول الصناعية المتقدمة تتحمل المسؤولية الأكبر عن التغير المناخي، وذلك بسبب انبعاثاتها التاريخية العالية من غازات الدفيئة، وهو ما يمكن أن تدعمه لغة الأرقام التي تبين أن انبعاثات مكافئ غاز ثاني أكسيد الكربون في القارة الأفريقية عام 2023، لم تتجاوز 4.4% من إجمالي انبعاثات العالم* مقارنة بأكثر من 9.3% مثلت انبعاثات الدول الأوروبية (EI, 2024).

لذلك تطالب الدول النامية أن تعمل الدول المتقدمة على تقديم الدعم المالي والتكنولوجي لمساعدتها على الانتقال إلى اقتصادات منخفضة الكربون، علاوة على أن العديد من البلدان النامية تعارض التدخلات الخارجية في قراراتها المتعلقة بالطاقة، وتعتبر ذلك انتهاكاً لسيادتها الوطنية، فعلى سبيل المثال أوضح ممثلو الحكومات الأفريقية في قمة المناخ COP 27 ، التي عقدت في مصر في شهر نوفمبر 2022، أنه بالرغم من محاولة العديد من الشركات التركيز على الطاقات منخفضة الكربون، إلا أنه يجب السماح للبلدان في جميع أنحاء أفريقيا بتطوير موارد الوقود الأحفوري للمساعدة في انتشال شعوبها من الفقر.

وبطبيعة الحال تعزز هذا الموقف نتيجة الأزمة الروسية الأوكرانية، وقد صرح مفوض ناميبيا إلى القمة بقوله: "هناك الكثير من شركات النفط والغاز (الأفريقية) موجودة في هذه القمة لأن أفريقيا تريد إرسال رسالة مفادها أننا سنطور جميع موارد الطاقة لدينا لصالح شعبنا لأن قضيتنا الحالية هي فقر الطاقة" (حمش، 2024).

وفي سبتمبر 2022 صوّت البرلمان الأوروبي لإدانة مقترح بإنشاء خط أنابيب نفطي يمتد من أوغندا مروراً بتنزانيا وصولاً إلى المحيط الهندي. وندد البرلمان بالمشروع بحجة أن خط الأنابيب سيكون له أثر ضار

* أكثر من ربع تلك الانبعاثات كانت من دولة "جنوب أفريقيا"

على المناخ والبيئة وحقوق الإنسان! وقد أثارت الإدانة رد فعل غاضب في أوغندا، حيث يعتبر خط الأنابيب بالغ الأهمية للتنمية الاقتصادية، وندد نائب رئيس البرلمان الأوغندي من ناحيته بالقرار الأوروبي واصفاً إياه بأنه "أعلى مستويات الاستعمار الجديد والإمبريالية المعادية لسيادة أوغندا وتنزانيا"، ولا يغيب عن الذهن هنا أن للبرلمان الأوروبي مقراً في فرنسا وفي بلجيكا، حيث يبلغ نصيب الفرد من الدخل حوالي 20 ضعف نصيب الفرد من الدخل في أوغندا (Yergin, 2022).

3-4 التحديات الاجتماعية

يتطلب تحول الطاقة تغييراً في سلوكيات الأفراد والمجتمعات، يوجب على الناس تبني ممارسات أكثر استدامة في حياتهم اليومية، فعلى سبيل المثال يمكن للأفراد تقليل استهلاك الطاقة من خلال استخدام الأجهزة الكهربائية ذات الكفاءة العالية، مثل المصابيح الموفرة للطاقة والأجهزة المنزلية التي تحمل تصنيف كفاءة الطاقة، كما يساهم إيقاف الأجهزة الكهربائية عند عدم استخدامها في خفض استهلاك الطاقة بشكل كبير. ويمكن لوسائل النقل العام أن تساهم في الحد من استخدام الطاقة، لكن هذا بدوره يحتاج إلى تغيير المفهوم الاجتماعي حول النقل في بعض الدول التي تنتشر فيها السيارات الخاصة بشكل كبير، وربما يكون من الصعب التحول إلى وسائل النقل العام عند عدم توفر البنية التحتية اللازمة في هذه الدول. كما قد يحتاج تكيّف المجتمعات مع التغيرات، ظهور حاجة في سوق العمل لتطوير مهارات جديدة تحتاج إلى برامج تأهيلية وتدريبية للعاملين في مجالات مثل تركيب وصيانة الألواح الشمسية أو توربينات الرياح مثلاً. إضافة إلى ما سبق تبرز الحاجة إلى أهمية التوعية والتثقيف حول استهلاك الطاقة من خلال حملات حكومية أو عبر المنظمات غير الحكومية، وقد يحتاج الأمر إلى إدراج موضوعات الطاقة المتجددة والتحول الطاقي في المناهج الدراسية.

في الواقع، تتقاطع كل التحديات السابقة مع بعضها البعض، ومن الصعوبة بمكان الحديث عن أحدها بمعزل عن الآخر، إنما قد يكون من المبرر إدراج تحديات فرص العمل ضمن التحديات الاجتماعية، ذلك أن العمل يعكس جزءاً أساسياً من الهوية الاجتماعية والاقتصادية للأفراد والمجتمعات من خلال تأثيره على الاستقرار الاجتماعي والاقتصاد المحلي لأي دولة. ومثل اضطرابات سوق العمل الناجمة عن العولمة والتغير التكنولوجي، فإن تحول الطاقة قد يلغي فرص عمل قائمة، ويخلق فرص عمل جديدة مع تحويل المهن وأنواع المهارات المطلوبة لها. وإذا تم تقليص حجم صناعة الوقود الأحفوري بشكل كبير، فسوف يفقد العديد من العمال في الصناعة البترولية وظائفهم، وينسحب ذلك على عدد كبير من الصناعات ضمن سلسلة التوريد، حتى تلك التي لا ترتبط بوضوح بإنتاج الطاقة

وتخزينها واستخدامها، مثل الصناعات الرديفة والخدمات التي تقدمها صناعات أخرى للعاملين في الصناعة البترولية*. إنما في الوقت نفسه، سيتم إنشاء وظائف جديدة بتخصصات مختلفة، ويبقى السؤال المطروح إن كانت محصلة الوظائف أعلى أم أقل؟

ترسم بعض التقديرات المبكرة صورة متفائلة، حيث تتفق على أنه بحلول عامي 2030 و2050، سيؤدي التحول إلى الطاقة منخفضة الكربون إلى محصلة وظائف إيجابية، إذ ترى منظمة العمل الدولية أنه من المتوقع أن تولد إزالة الكربون ما يصل إلى 24 مليون وظيفة خضراء بحلول عام 2030، لكن معظمها في آسيا. إنما وفي الوقت نفسه، من المتوقع أن تُفقد نحو 6 ملايين وظيفة، لا سيما في الصناعات كثيفة الكربون، وهكذا توفر هذه التقديرات زيادة صافية قدرها 18 مليون وظيفة†. ومن المتوقع مثلاً أن يفقد 1.7 مليون شخص عملهم في أمريكا لوحدها نتيجة التحول الطاقي، من بينهم 731 ألف يعملون في وظائف مرتبطة بالاستخدام الكثيف للطاقة، مثل معامل صهر الألمنيوم أو معامل الورق وغيرها (O'Donnel, 2023)[41].

يبين الجدول 5، تقديراً أصدرته منظمة العمل الدولية عام 2022 لعدد من الوظائف التي ستفقد نتيجة التحول الطاقي (ILO,2022)[42]، وهو لا يتضمن الوظائف المرتبطة بشكل غير مباشر بالصناعة البترولية.

الجدول5 : عدد من الوظائف التي قد تفقد نتيجة التحول الطاقي

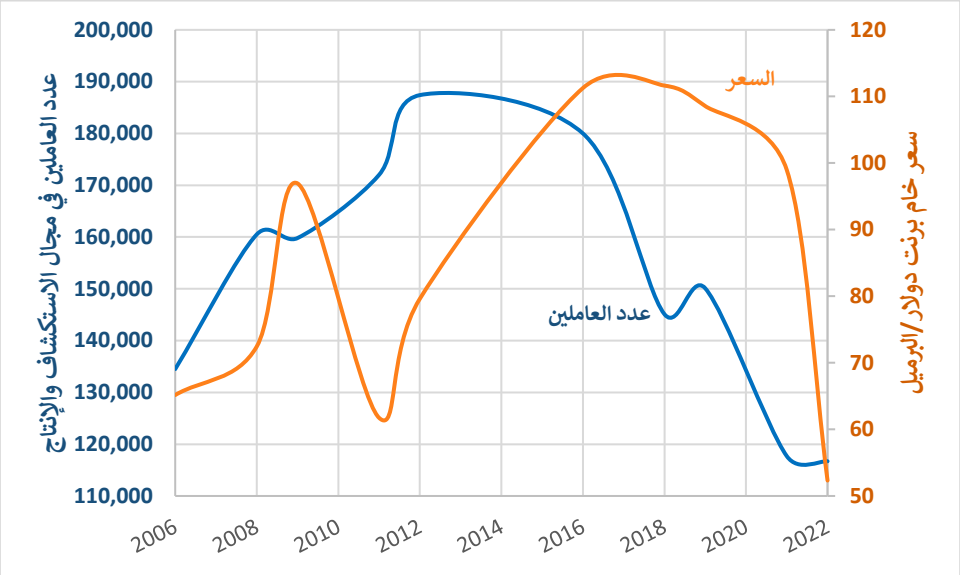
مجال العمل	عدد الوظائف (مليون)
مصافي النفط	1.6-
استخراج النفط الخام والخدمات المتعلقة باستخراج النفط الخام باستثناء المسح الزلزالي	1.4-
إنتاج الكهرباء بالفحم	0.8-
تعدين الفحم والليجنيت واستخراج الخث	0.7-
صناعات خاصة منزلية	0.5-
تصنيع الغاز وتوزيع الوقود الغازي	0.3-
استخراج الغاز الطبيعي والخدمات المتعلقة باستخراج الغاز الطبيعي باستثناء المسح الزلزالي	0.2-
المجموع	**5.5-**
مصدر البيانات: International Labour Organization، 2022	

ولا يمكن تجاوز فكرة أن عدد العاملين في الصناعة البترولية يرتبط بأسعار النفط، خاصة في البلدان التي تعتمد القطاع الخاص لإنتاج النفط والغاز، ويبين الشكل 19 على سبيل المثال، تغير عدد

* على سبيل المثال لا الحصر: صناعات الملابس الحقلية ومعدات الأمان والتموين الغذائي للعمال الحقليين.
† لا تقدم المنظمة أو غيرها أي حلول لمن سيفقدون وظائفهم، حيث ينظر لهم وكأنهم أرقام فقط.

العاملين في مجال الاستكشاف والإنتاج في الولايات المتحدة بين عامي 2006 و2022، بالعلاقة مع تغير أسعار النفط.

الشكل 19: العلاقة بين سعر النفط، وعدد العاملين في الاستكشاف والإنتاج في الولايات المتحدة



إعداد الباحث: بيانات عدد العاملين من:International Labour Organization، 2022، والأسعار من EIA، 2024

إنما لابد من النظر إلى الأمر من زاوية أخرى، فالتأثير الاجتماعي لفقدان الوظائف في القطاعات التقليدية يمكن أن يكون أعمق مما يبدو للوهلة الأولى، فعلى مستوى العائلة، يمثل فقدان الوظيفة خسارة مصدر الدخل الرئيسي مما يمكن أن يؤدي إلى صعوبات مالية كبيرة. هذا التأثير قد يمتد إلى عدم القدرة على تلبية الاحتياجات الأساسية مثل الغذاء، والسكن، والتعليم، ناهيك عن الصحة النفسية، والشعور بانعدام الأمان المالي وفقدان الهوية المهنية. أما على مستوى المجتمعات، فإن فقدان الوظائف في القطاعات التقليدية يمكن أن يؤدي إلى زيادة معدلات الفقر في المجتمعات التي تعتمد بشكل كبير على هذه الصناعات، وقد يضطر الأفراد إلى الهجرة إلى مناطق أخرى بحثاً عن فرص عمل جديدة، مما يمكن أن يؤدي إلى تفكك المجتمعات المحلية، وزيادة التوترات الاجتماعية خاصة إذا لم تكن هناك سياسات فعالة لدعم العمال المتضررين من فقدان وظائفهم.

من جهة أخرى، وبينما تسعى البلدان إلى تعزيز قاعدتها الصناعية وبناء قدرة التصنيع، ستزداد أهمية اكتساب المهارات في هذا المجال، وسوف يكون تطوير سلاسل توريد قوية وضمان تقاسم الفوائد الناتجة بشكل عادل بين البلدان، ولا سيما الأسواق الناشئة والاقتصادات النامية، أمراً بالغ الأهمية لتحقيق انتقال عادل وشامل للطاقة. في واقع الأمر، تواجه العديد من البلدان والصناعات بالفعل نقصاً في المهارات، وهي فجوة من المحتمل أن تتسع مع سعي الدول لتحقيق أهداف طموحة، مثل الهدف

المتمثل في مضاعفة قدرة الطاقة المتجددة. لذلك تبرز الحاجة إلى اتخاذ إجراءات عاجلة لتوسيع نطاق جهود التعليم والتدريب لتلبية احتياجات رأس المال البشري سواء الاحتياجات الحالية أو المستقبلية. مما يعني ضرورة تصميم السياسات والتدابير المتعلقة بالتعليم والمهارات لتناسب الظروف المتنوعة للبلدان والمناطق المختلفة، مع مراعاة المسارات المحددة التي تسلكها والآثار المرتبطة بالتوظيف، بما في ذلك التقنيات والقطاعات ذات الأولوية، وخلق فرص العمل المتوقعة، والأنماط المهنية.

وترى الوكالة الدولية للطاقة المتجددة في هذا المجال، أنه من الضروري بالإضافة إلى معالجة القيود الناشئة عن نقص العمالة الماهرة، أن تتم موازنة الحاجة إلى خلق قيمة محلية واستثمار لسلاسل التوريد الإقليمية بعناية مع تخفيض الحواجز التجارية للسلع والخدمات الحيوية لصناعة الطاقة المتجددة. حيث ترى الوكالة أن هذه الموازنة ستكون أساسية لمنع زيادة اختناقات سلاسل التوريد وضمان بقاء الطاقة المتجددة قادرة على المنافسة من حيث التكلفة كحلٍ وسط لتعظيم الفوائد الاجتماعية والاقتصادية (IREAN, 2024). وهذا ما سوف يتطلب تبني أنظمة إنتاج أكثر تعقيداً بما في ذلك تطوير مراكز التصنيع المحلية والإقليمية، والاستثمار في اكتساب مهارات قوة عاملة تصنيعية حديثة.

5-3 ألمانيا (مثال عن تحديات العلاقة بين التحول الطاقي وبين الطلب على الطاقة)

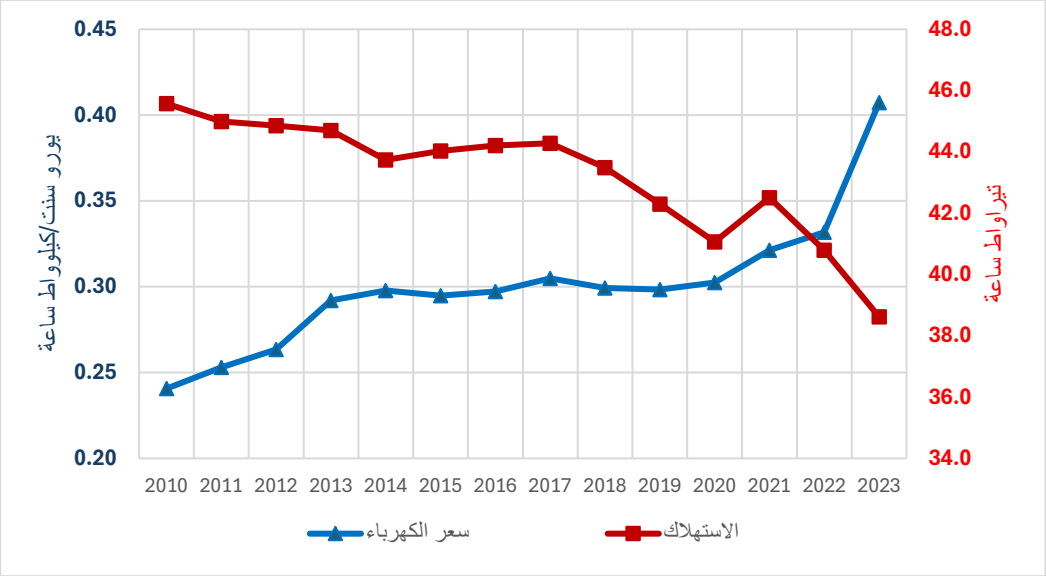
يمكن إيجاز بعض التحديات السابقة عبر النظر في حالة الطاقة عموماً والكهرباء خصوصاً في دولة تعد من بين أبرز الدول التي تحث خطاها على مسار التحول الطاقي، وهي ألمانيا.

يلاحظ أن استهلاك الكهرباء تراجع في ألمانيا بنسبة 15% تقريباً بين عامي 2010 و2023، وربما كان من جملة الأسباب لذلك تطبيق لوائح صارمة لكفاءة الطاقة للمباني والأجهزة والصناعات، وزيادة كفاءة المعدات والعمليات نتيجة التقدم في تقنيات كفاءة الطاقة، وهو ما ارتبط بسلوك المستهلك الذي بات يبني خياراته تجاه المزيد من المنتجات الموفرة للطاقة. لكن ومن جهة أخرى، ساهم ارتفاع أسعار الكهرباء في ألمانيا في تغيرات هيكلية في الاقتصاد الألماني، مثل تراجع الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، وخفض الطلب الإجمالي على الكهرباء، وهو ما يمكن أن يتسبب في فترات تباطؤ اقتصادي تؤدي بدورها إلى المزيد من انخفاض استهلاك الكهرباء حيث تقلل الشركات والأسر من استخدامها للطاقة، وربما يكون كذلك لتوسع تركيبات الطاقة الشمسية على أسطح المنازل دور في الحد ولو جزئياً من الاعتماد على الشبكة العامة، مما يظهر على شكل تراجع في الطلب على الكهرباء.

يبين الشكل 20 علاقة عكسية واضحة بين إجمالي استهلاك الكهرباء في ألمانيا، وبين تغير أسعارها (IEA, 2024)، و (Eurostat, 2024)[43].

وقد بين صندوق النقد الدولي (Chen et al., 2023)[44]، أن ارتفاع أسعار الطاقة بسبب الأزمة الروسية الأوكرانية أدى إلى خفض إنتاج القطاع كثيف الاستهلاك للطاقة* في ألمانيا، على الرغم من أن إنتاج القطاع الأقل استهلاكاً للطاقة صمد بفضل جهود الشركات لتحسين كفاءة الطاقة جزئياً. ولو بقيت أسعار الطاقة مرتفعة في المستقبل المنظور، مقارنة بمستويات ما قبل الأزمة، فهذا سيؤثر سلباً على إنتاجية الشركات وبالتالي سيخفض الناتج المحتمل لألمانيا، وقد يبلغ هذا الانخفاض 1.25% من الناتج المحلي الإجمالي، ويبقى عدم اليقين أمراً قائماً في ظل صعوبة تقدير الحجم النهائي لصدمة أسعار الطاقة والدرجة التي يمكن بها لكفاءة الطاقة المتزايدة التخفيف منها. إلا أن الأسعار المرتفعة سوف تؤثر بالتأكيد على المستهلكين، فقد ذكر استبيان أعدته غرفة التجارة والصناعة الألمانية (DIHK)، أن 75% من المصنّعين في ألمانيا، عملوا على تحميل فائض كلفة الطاقة على المستهلكين (DIHK, 2022)[45].

الشكل 20: العلاقة بين إجمالي استهلاك الكهرباء وأسعارها في ألمانيا



إعداد الباحث بناء على بيانات:
الاستهلاك من: IEA, Monthly electricity data، أكتوبر، 2024.
الأسعار من: Eurostat Data، أكتوبر 2024.

عملياً، وعلى مدى العقدين الماضيين، لم يتم الاحتفال بأي دولة على وجه الأرض أكثر من ألمانيا لجهودها الساعية للتخلص التدريجي من الوقود الأحفوري والطاقة النووية لصالح مصادر الطاقة

* يعرف تقرير السوق الموحدة السنوي للمفوضية الأوروبية لعام 2021، هذه الصناعات بأنها صناعات المواد الكيميائية والصلب والورق والبلاستيك والتعدين والاستخراج والاستغلال والمصافي والأسمنت والخشب والمطاط والمعادن غير الحديدية والزجاج والسيراميك.

المتجددة، بل وقامت بعض الجهات الرسمية من الولايات المتحدة بتمويل رحلات على حساب دافعي الضرائب، حتى يتمكن المشرعون في الولايات المتحدة من التعرف على عجائب نظام الطاقة الألماني، ومنها على سبيل المثال رحلة ترأسها نائب حاكم ولاية مينيسوتا الأمريكية Peggy Flanagan في عام 2019 وضمت 22 مشاركاً لحضور ندوة عن الطاقة المتجددة في ألمانيا (Walz& Flangan, 2019)[46].

وقد أطلقت ألمانيا في العام 2000 برنامجاً يستهدف إزالة الكربون من إمدادات الطاقة الأولية، هذه السياسة ، المسماة Energiewende*، أصبحت متجذرة في التقاليد الألمانية بحيث انعكست في صعود حزب الخضر، ومؤخراً في المعارضة العامة لتوليد الكهرباء النووية. وقد عملت هذه السياسة على تقديم الدعم الحكومي للكهرباء المتجددة المولدة بالخلايا الكهروضوئية وتوربينات الرياح وحرق الوقود الحيوي الناتج عن تخمير المحاصيل والنفايات الزراعية. وجرى تسريع هذه السياسة في عام 2011 عندما دفعت كارثة اليابان النووية في "فوكوشيما" الحكومة الألمانية إلى إصدار أمر بإغلاق جميع محطات الطاقة النووية بحلول عام 2022(Peter Fairly, 2011)[47].

تستند سياسة التحول الطاقي في ألمانيا إلى ركيزتين أساسيتين، هما:

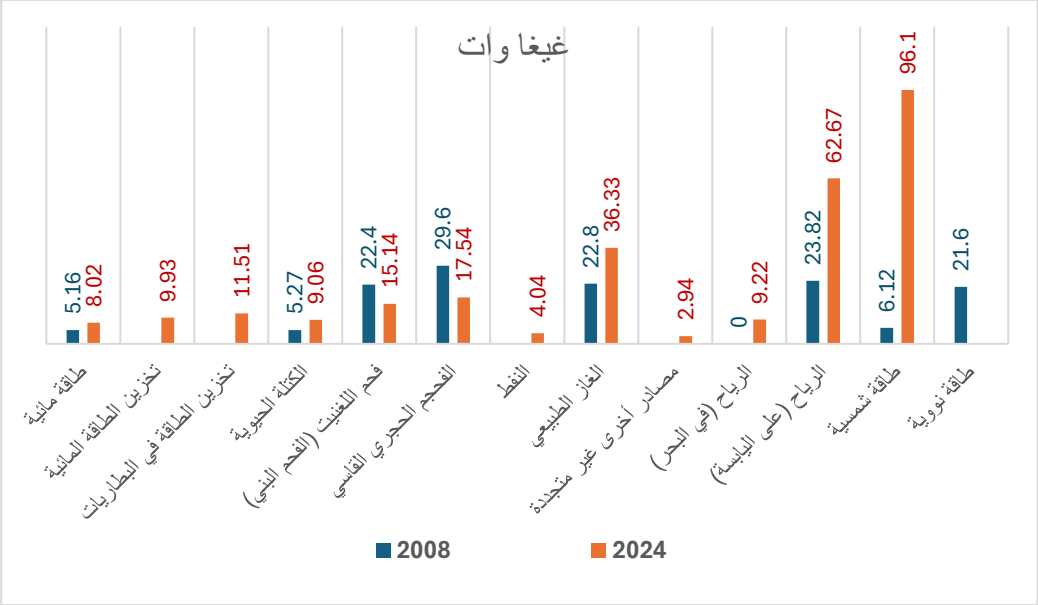
① إغلاق محطات الطاقة النووية.

② الحد من استخدام الوقود الأحفوري عن طريق بناء منشآت الرياح والطاقة الشمسية لتمثل الطاقة المتجددة ما لا يقل عن 80% في مزيج الكهرباء بحلول عام 2030.

وقد أدت المساعي نحو هذه الأهداف إلى زيادة كبيرة في القدرة المركبة لتوربينات الرياح والألواح الشمسية في ألمانيا، حيث تظهر البيانات (Energy Charts, 2024)[48] أن قدرة التوليد المركبة قد تضاعفت فعلاً منذ عام 2008، من 136.3 غيغاواط إلى 277 غيغاواط في عام 2024، كما هو موضح في الشكل 21.

* تعبير ألماني يعني تحول الطاقة.

الشكل 21: القدرة المركبة لتوليد الكهرباء في ألمانيا



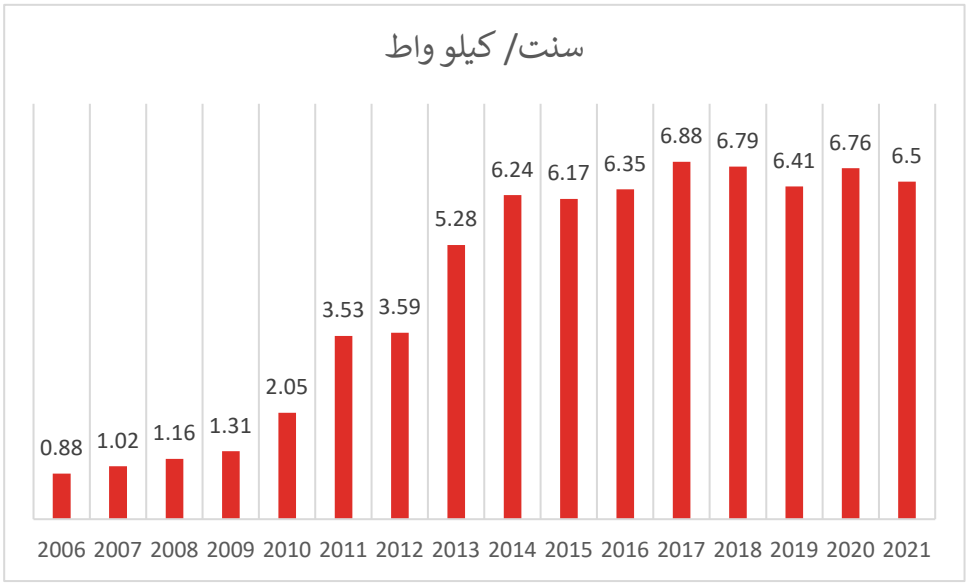
مصدر البيانات:.Energy-Charts، 21، البيانات محدثة لغاية شهر نوفمبر 2024.

وبلغت حصة الكهرباء التي توفرها الطاقة الشمسية والرياح البرية والرياح البحرية شهر نوفمبر 2024 نسبة 17.73 و 22.2 و 5.4% على التوالي. عملياً، شكلت مصادر الطاقة هذه 64% من إجمالي السعة المركبة على الشبكة الألمانية ولكنها ولدت 45% فقط من الكهرباء الألمانية حتى شهر نوفمبر 2024. وبالرغم من هذا النمو الكبير في مصادر الطاقة المتجددة، يشير التقرير السنوي "لمنظمة الأعمال الألمانية لصناعة الطاقة والمياه "BDEW إلى أن ألمانيا في عام 2023 كانت مستورداً صافياً للكهرباء (BDEW, 2024)[49].

في عام 2004 ، ذكر وزير البيئة الألماني أن العبء الذي ستحمله الأسر بسبب الرسوم الإضافية للطاقة المتجددة سيصل إلى حوالي يورو واحد فقط شهرياً (CEW, 2018)[50]. لكن الواقع أن الرسوم الإضافية كانت أعلى من ذلك بكثير، وهو ما يبينه الشكل 22، وتلاحظ منه قفزة في تلك الرسوم بلغ متوسطها حتى عام 2021 نحو 6.4 سنت/كيلو وات (Wehrmann, 2023)[51]. أي أن منزلاً متوسطاً يستهلك حوالي 300 كيلو واط ساعة من الكهرباء شهرياً، كان يدفع أكثر من 19 يورو شهرياً كرسوم إضافية بسبب الطاقة المتجددة، أي تسعة عشر ضعفاً مما أعلنه وزير البيئة سابقاً. وقد أدت التكلفة العالية لهذه الرسوم الإضافية في النهاية إلى التخلص التدريجي منها في يوليو عام 2022. ويتم حالياً دعم مشاريع الرياح والطاقة الشمسية بشكل مباشر من قبل الحكومة، لكن هذا لا يقلل من تكلفة بناء هذه المرافق، بل يحول عبء التكلفة بشكل غير مباشر إلى دافعي الضرائب. ويمكن الإشارة هنا إلى دراسة

نشرت في أواخر عام 2024 وبينت أن الطاقة المستدامة كلفت الحكومة الألمانية 746 مليار دولار بين عامي 2002 و2022، تم إنفاق أكثر من نصفها على إنتاج وتوزيع الطاقة البديلة. وأنفق الباقي على الإعانات والدعم. ورأت الدراسة أن ألمانيا لو أنفقت نصف ذلك المبلغ على الطاقة النووية، لكانت قد حققت تخفيضات أكبر في الانبعاثات مما فعلته من خلال مطاردة سراب الطاقة البديلة بحسب تعبير الباحث (Emblemsvåg, 2024)[52].

الشكل 22: الرسوم الإضافية على الطاقة المتجددة في ألمانيا



مصدر البيانات: Wehrmann، 2023

وكان من بين أحد أسباب ارتفاع أسعار الكهرباء السكنية في ألمانيا أن الشركات الصناعية قد تم إعفاؤها إلى حد كبير من تكاليف التحول الطاقي من خلال الحصول على إعفاءات من دفع الرسوم المستخدمة لتمويل تطوير طاقة الرياح والطاقة الشمسية. لكن تلك الإعفاءات طبقت فقط على كبار الشركات الصناعية، بحيث يحصل هؤلاء المستهلكون الكبار على سعر كهرباء مدعوم قدره 6 سنتات لكل كيلو وات ساعة حتى عام 2030 لما يصل إلى 80% من استهلاكهم للكهرباء، بينما يتوجب على الشركات الصغيرة أن تدفع أسعاراً أعلى بكثير (Wirtschaft, 2023)[53].

وتطل مشاكل عدم استقرار الطاقة المولدة من المصادر المتجددة بين الحين والآخر، لتضيف المزيد من التذبذب في أسعار الكهرباء في ألمانيا، ومنها على سبيل المثال ما شهده الأسبوع الرابع من شهر يناير في عام 2025، حيث انخفضت سرعة الرياح بشكل كبير، مما جعل كميات الكهرباء المولدة من مزارع الرياح في البحر يوم 20 يناير تصل في حدها الأدنى إلى 108.3 ميغا واط، بينما كان من المخطط أن يكون الحد الأدنى 2737 ميغا واط، وانسحب الأمر نفسه على كميات الكهرباء المولدة من طاقة

الرياح على اليابسة حيث بلغ حدها الأدنى 1282 ميغا واط، مقابل 20444 ميغا واط كان مخططاً الحصول عليها (Energy Charts, 2025)[54]، وهذا ما تسبب في وصول وسطي أسعار الكهرباء للمستهلكين إلى 400 دولار/ ميغا واط ساعة، بينما وصل السعر في أوقات الذروة إلى 1000 دولار/ ميغا واط ساعة، وهو أعلى مستوى للأسعار منذ 18 عاماً. وقد تكرر هدوء الرياح ثلاث مرات خلال ذلك الأسبوع، وكان الوقود الأحفوري هو البديل الحاضر لتعويض النقص في توليد الكهرباء.

تشكل صناعات السيارات والكيماويات والصناعات الهندسية الميكانيكية والكهربائية أكبر قطاعات التصنيع الألماني، ويعتمد اقتصاد الدولة بشكل كبير على الصادرات من هذه الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة. وتشير البيانات المتاحة إلى أنه في عام 2023، مثّل القطاع الصناعي 24.3% من الناتج المحلي الإجمالي لألمانيا، بينما مثل قطاع البناء نحو 5.4%. وبلغت نسبة صادرات ألمانيا للسلع المصنعة 48.4%، أي أن نحو نصف السلع المنتجة في ألمانيا تباع في الخارج.

يدعم هذا النموذج القائم على التصدير ما يقرب من 10 ملايين وظيفة تصنيعية في ألمانيا، مما يشكل 24% من القوى العاملة في البلاد. لكن السياسة الطاقية في ألمانيا تهدد هذه الوظائف من خلال جعل الطاقة أكثر تكلفة (Orth, 2023)[55]. فعلى سبيل المثال وفي سبتمبر 2024، أعلنت شركة Volkswagen التي توظف نحو 300 ألف شخص في ألمانيا، أنها ستلغي مجموعة من اتفاقيات العمل، بما في ذلك ضمان الوظائف حتى عام 2029 في ستة مصانع ألمانية*، مما يزيد من احتمال تسريح العمال والإغلاق المحتمل لمنشأتين للتصنيع في ألمانيا، وهو حدث يعتبر الأول من نوعه في تاريخ الشركة (Waldersee, 2024)[56]. في أكتوبر 2023، أعلنت شركة الكيماويات الألمانية العملاقة BASF أنها تخطط لخفض الاستثمار بنسبة 15% تقريباً على مدى أربع سنوات مقبلة (Wilkes,2023)[57]، وأعلنت شركة الكيماويات Lanxess AG أنها ستخفض 7% من قوتها العاملة مع استمرار ارتفاع أسعار الطاقة، وأعلنت شركة صناعة الصلب الألمانية Kloeckner أنها ستخفض 10% من قوتها العاملة في التوزيع الأوروبي. وفي عام 2024، أعلنت شركة Thyssenkrupp AG، أكبر شركة لصناعة الصلب في ألمانيا، أنها ستخفض صناعة الصلب في البلاد بنسبة 20% (Bolotova, 2024)[58].

بينما أعلنت الشركات الألمانية في عام 2023 عن التزامات رأسمالية بقيمة 15.7 مليار دولار في المشاريع الأمريكية، ارتفاعاً من 8.2 مليار دولار في عام 2022. وأعلنت الشركات الألمانية كذلك عن 185 مشروعا في الولايات المتحدة في عام 2023، منها 73 مشروعا في قطاع التصنيع، وكان المشروع

* ضمان الوظائف هو تعهد من الشركة بأن عدداً معيناً من الوظائف سيبقى قائماً لن ينهى قبل فترة معينة.

الأعلى استثماراً (بقيمة 2 مليار دولار) من قبل شركة "Volkswagen للسيارات الكهربائية" Scout Motors في ولاية ساوث كارولينا، ومن المتوقع أن توفر هذه التوسعات في الولايات المتحدة ما يقرب من 7000 وظيفة (Smyth & Nilsson, 2024)[59].

يشير ما سبق إلى أن المبادئ الأساسية للاقتصاد لا تتغير، فعندما يتجاوز الطلبُ العرض، ترتفع الأسعار، ولما كان الاقتصاد الألماني معتمداً بشكل كبير على قطاع التصنيع كمحرك للنمو، فإن ارتفاع أسعار الطاقة سيضر بالصناعة. علاوة على ذلك، من غير المرجح أن تنخفض أسعار الكهرباء في ألمانيا في أي وقت قريب، حيث أن تبني السيارات الكهربائية والتوسع المخطط لإنتاج الهيدروجين من شأنه أن يزيد بشكل كبير من الطلب على الكهرباء في المستقبل، وهو ما سوف يتطلب نمواً كبيراً في قدرة توليد الطاقة التي يجب أن تكون متوافقة مع الطلب.

لذلك يرى البعض أن الرأي السائد في ألمانيا والذي يزعم أن التحول السريع إلى الطاقة المتجددة من شأنه أن يجعل الكهرباء أرخص لأن التكاليف المستوية* للطاقة المتجددة كانت في انخفاض، يبدو بلا أساس (Temzelides, 2024)[60]. ونظراً للقيود المرتبطة بالطاقة المتجددة المتقطعة، فإن الحفاظ على نظام طاقة موثوق يتطلب استثمارات إضافية في مزيج من مصادر الطاقة التي يمكن نقلها للشبكة عند الحاجة مثل الغاز الطبيعي والبطاريات، فضلاً عن البنية الأساسية لنقل مصادر الطاقة الجديدة بكفاءة. ونتيجة لهذا، فإن تكاليف توليد الطاقة المتجددة المستوية لا تشكل سوى جزء بسيط من التكاليف المرتبطة بالانتقال إلى الطاقة المتجددة، فمثلاً يجب أن تكون محطات تخزين البطاريات الكبيرة ومحطات الطاقة التي تعمل بالغاز أو حتى الفحم متاحة ومستغلة عندما ينخفض إنتاج الطاقة المتجددة بسبب تقلبات الطقس، وهو ما يساهم في ارتفاع تكاليف النظام الإجمالية.

ورغم أن البيانات تشير إلى انخفاض استهلاك الوقود الأحفوري في ألمانيا بنحو 24% على مدى السنوات العشر الماضية، ولكن هذا عملياً يتفق إلى حد كبير مع الانخفاض الملحوظ في إجمالي استخدام الطاقة في البلاد.

في المجمل، ورغم كل مشاريع الطاقة المتجددة في ألمانيا، فإن حصة الوقود الأحفوري من إجمالي مزيج الطاقة الألماني عام 2023 بلغت 75% كما هو مبين في الجدول 6.

* Levelized Energy Cost تكاليف الطاقة المستوية أو الموحدة، هي تكلفة إنتاج وحدة واحدة من الطاقة الكهربائية (مثل كيلوواط ساعة) على مدار عمر المشروع بالكامل. وهي هي أداة مفيدة لمقارنة تكاليف توليد الطاقة من مصادر مختلفة، لكن لها حدودها فقد تعطي بيانات غير صحيحة.

الجدول 6: استهلاك الطاقة في ألمانيا حسب المصدر

	2022	2023
النفط	35%	35%
الغاز الطبيعي	23%	24%
الفحم الحجري	19%	16%
الطاقة النووية	3%	1%
الطاقة المائية	1%	2%
الطاقة المتجددة	20%	23%
مصدر البيانات EI، 2024		

على جانب الإنتاج، تعتمد ألمانيا بشكل شبه كامل على الاستيراد لتلبية احتياجاتها من النفط والغاز، لكنها أنتجت عام 2023 أكثر بقليل من نصف الفحم الذي تستهلكه سنوياً، واستوردت الباقي لتوليد الطاقة وإنتاج الصلب. وربما كان من المفارقات أن إغلاق المفاعلات النووية بالكامل في عام 2023 من المرجح أن يبقي محطات الفحم نشطة لبعض الوقت، أو على الأقل حتى يتم تشغيل الطاقة الكافية التي تعمل بالغاز، وهو أمرٌ من شأنه أن يعمل على زيادة اعتماد البلاد الإجمالي على الواردات. كما أصبحت خطوط الأنابيب من النرويج وهولندا بالإضافة إلى الغاز الطبيعي المسال من الولايات المتحدة المصادر الرئيسية لإمدادات الغاز الطبيعي في ألمانيا، وفي حين فرض الاتحاد الأوروبي عقوبات على واردات النفط من روسيا، لم يتم فرض مثل هذا الحظر على تسليم الغاز الطبيعي المسال، ونتيجة لذلك، كانت شحنات الغاز الطبيعي المسال الروسية إلى أوروبا في عام 2023 تسير على قدم المساواة مع تلك القادمة من قطر والجزائر، وبالتالي، استبدل الاتحاد الأوروبي جزئياً غاز خطوط الأنابيب الروسي بالغاز الطبيعي المسال الروسي الأكثر تكلفة، ونظراً لارتباط سوق الغاز ببعضه البعض في الاتحاد الأوروبي، فإن هذا له آثار مباشرة على ألمانيا.

يستند الموقف القوي المناهض للطاقة النووية والوقود الأحفوري الذي يتخذه حزب الخضر وبعض أعضاء الحزب الديمقراطي الاجتماعي الألماني على واحدة أو أكثر من الحجج التالية:

1- الانتقال الكامل والسريع إلى مصادر الطاقة المتجددة ضروري لمكافحة تغير المناخ، الذي يُنظر إليه على أنه تهديد وجودي.
2- الطاقة النووية غير آمنة.
3- الانتقال السريع والكامل إلى مصادر الطاقة المتجددة هو أسرع طريق لتحقيق استقلال الطاقة الألمانية.
4- يدعو المؤيدون غالباً إلى أن تكون ألمانيا رائدة في مجال تكنولوجيا الطاقة المتجددة وأن تقدم

مثالاً أخلاقياً متميزاً للدول الأخرى.

في الواقع لا يمكن إنكار أن ألمانيا دولة فعالة من حيث استخدامها للطاقة، وإن كانت انبعاثاتها من مكافئ غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2e تعتبر الأعلى على مستوى أوروبا ومثلت 1.5% من انبعاثات العالم* في عام 2023 أو ما يمثل 15.6% من الانبعاثات الأوروبية (EI, 2024). وقد انخفضت الانبعاثات الألمانية بنحو 24% على مدار العقد الماضي، مما يعني أن تخفيضات الانبعاثات بكلفة منخفضة قد أنجز بالفعل إلى حد كبير، وبالتالي، فإن الإجراءات التي تتخذها ألمانيا حالياً سيكون لها تأثير ضئيل جداً على الانبعاثات العالمية، في حين أنها قد تفرض تكلفة كبيرة على الدولة. ويرى أستاذ التنمية المستدامة في جامعة Rice الأمريكية Ted Lech-Temzelides أنه من بين المفارقات في الحجج التي تتذرع بها الأحزاب البيئية في ألمانيا أن الطاقة النووية يمكن أن تكون أداة مهمة في مكافحة انبعاثات الكربون، حيث تتمتع الطاقة النووية في ألمانيا بسجل أمان ممتاز، ويخطط العديد من جيران ألمانيا لمواصلة إنتاج الطاقة النووية لعقود قادمة، ومن المقرر أن يتم وضع بعض محطات الطاقة بالقرب من الحدود الألمانية. ومع أن ألمانيا سوف تستمر في استيراد الطاقة من تلك الدول إلا أن المحطات نفسها لن تكون تحت سيطرة السلطات الكهربائية الألمانية (Temzelides, 2024). أما بشأن استقلال الطاقة، فهو مفهوم استمر في الدول المعتمدة على الواردات لعقود، وتم الدفاع عن السياسات الداعمة لمصادر الطاقة المحلية وفقاً لذلك المفهوم، لكن فكرة أن الزيادة السريعة في مصادر الطاقة المتجددة في حد ذاتها يمكن أن تؤدي إلى استقلال الطاقة أمرٌ فيه بعض الإشكال. فالتقطعات في إنتاج الطاقة تتطلب توفر موارد أخرى لموازنة الشبكة، أي أن هناك ضرورة لوجود مصادر طاقة قابلة للتشغيل يمكن الحفاظ عليها عاملة لفترات زمنية طويلة. علاوة على ذلك، فإن جزءًا كبيراً من الطاقة المستخدمة ليس على شكل كهرباء بل على شكل حرارة، وهذا يستبعد قدرة البطاريات على تخزين الطاقة لمعالجة كل المشكلة، على الأقل حتى تتوفر خيارات التخزين طويلة الأمد في البطاريات، وهو أمر لا يبدو قريب التحقيق حتى اليوم.

يبدو أن مجمل ما مرت به ألمانيا من تحولات طاقية أدى إلى رد فعل عنيف تمثل في عدم الرضا الشعبي عن تجربة السنوات الماضية، وهو ما عزز دعم حزب "البديل من أجل ألمانيا" اليميني، والذي يستعد ليكون منافساً قوياً لقيادة ألمانيا في المستقبل، وقد تعالت بالفعل بعض الأصوات محذرة من الخطط الخضراء، ومن بينها كان الانتقاد الذي وجهه وزير المالية الألماني في أواخر عام 2023 للساسة في بروكسل بسبب سعيهم إلى سن قواعد أكثر صرامة للطاقة النظيفة للمباني، محذراً من أن مثل هذه

* أي أن انبعاثات ألمانيا لوحدها تعادل الانبعاثات من عُمان وقطر والإمارات العربية.

الخطط يمكن أن تثير رد فعل عنيف وخطير من الناخبين وتغذي صعود اليمين المتطرف. وفي حديثه إلى صحيفة Politico خلال مقابلة في وزارة المالية في برلين يوم 11 سبتمبر 2023، قال الوزير Christian Lindner: إن الأوروبيين يعانون من الإفراط في التنظيم أو "الروتين في كل مكان". وحث رئيسة المفوضية الأوروبية على "إيقاف مؤقت" لتشريعات الاتحاد الأوروبي الجديدة التي تهدف إلى الحد من انبعاثات غازات الدفيئة خلال فترة الركود الاقتصادي الناجم جزئياً عن ارتفاع تكاليف الطاقة (Burchard &Karnitschnig, 2023)[61].

كما أن العديد من الشركات الألمانية قد أعلنت عن خطط لإغلاق و/ أو نقل جزء على الأقل من عملياتها خارج الاتحاد الأوروبي، وأعلنت شركة BASF للصناعات الكيميائية في مطلع عام 2023 عن تسريح العمال وإغلاق المصانع بسبب ارتفاع تكاليف الطاقة (Associated Press, 2023)[62]. وفي منتصف أكتوبر 2024، أعلنت الحكومة الألمانية أنها ستقدم 17 مليار دولار لشركات طاقة الرياح الألمانية بسبب مخاوف من أن الشركات الصينية تكتسب زخماً منافساً في هذا القطاع، وقد أعلن وزير الاقتصاد الألماني عن الإعانات الجديدة، قائلا: "يجب أن نستمر في تحسين الظروف للحفاظ على تنافسية هذه الصناعة وضمان خلق قيمة مستقبلية داخل ألمانيا وأوروبا، هذه الإجراءات هي خطوة حاسمة". هذه المليارات ستضاف إلى الدعم الحالي للطاقة البديلة، والذي تقدر جامعة "كولونيا" أنه سيكلف 19.3 مليار دولار في عام 2025، وهو ما يزيد بمقدار 2.1 مليار دولار عن المتوقع (Schoellhammer, 2024)[63]. وبعد نحو 10 أيام من إعلان الوزير عن خطة إنقاذ قطاع الرياح ، أعلنت Volkswagen* أنها ستغلق ثلاثة مصانع، وتخفض عشرات الآلاف من الوظائف ، وتخفض أجور عمالها المتبقين بسبب ارتفاع التكاليف وانخفاض الأرباح، وذكر أحد مسؤوليها أن الإغلاق ضروري لأن الشركة لا تجني "ما يكفي من المال مقابل استمرار تكاليف الطاقة بالارتفاع (Nolan, 2024)[64].

ومن الأمثلة الأخرى على ما يجري ضمن مسار التحول الطاقي في ألمانيا، يمكن الإشارة إلى شركة ThyssenKrupp لصناعة الصلب، والتي تبنت خطة لمشروع إنتاج الهيدروجين الأخضر توصلها إلى تصنيع الصلب الأخضر، وبكلفة 3.3 مليار دولار. لكنها أعلنت في أكتوبر 2024 عن خطة لمراجعة فكرة مشروعها وربما إيقافه† بسبب ارتفاع تكاليف الطاقة وانخفاض كلفة المنتجات المنافسة من دول

* أشير سابقاً إلى بعض توجهات هذه الشركة لإغلاق عدد مصانعها ونقل بعض نشاطاتها إلى الولايات المتحدة.

† جرى خلال العام الحالي إيقاف أو التخلي عن العديد من مشاريع الهيدروجين حول العالم بسبب ارتفاع أسعار الطاقة وارتفاع التكاليف والتخوف من الجدوى الاقتصادية، مثل مشروع تصدير الهيدروجين الأخضر من Atlantic Canada إلى ألمانيا، ومشروع Coyote لشركة Fortescue في كولومبيا البريطانية، ومشروع مشترك في استراليا بين Origin Energyو Orica، ومشروع الصلب الأخضر في السويد، ومشروع HyNet في المملكة المتحدة، ومشروع لشركة AquaVentu في ألمانيا، ومحور الطاقة المتجددة الآسيوي في أستراليا، سلسلة توريد الهيدروجين في أستراليا، ومشروع North H2 في هولندا

آسيا(Bryce, 2024)[65].

إن بيئة الأسعار وما يرتبط بها من ضيق اقتصادي في ألمانيا تؤثر على أوروبا بأكملها، ومن الصعب القبول بأن ما يحصل هو نتيجة للأزمة الروسية الأوكرانية، فالأداء الاقتصادي وأسعار الطاقة المرتفعة نسبياً كانا من سمات اقتصادات الاتحاد الأوروبي حتى قبل تلك الأزمة، إذ تشير بيانات البنك الدولي إلى أن متوسط النمو السنوي للناتج المحلي الإجمالي بين عامي 2013- 2021 في كل من الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي وألمانيا ، كانت 2.32، و1.57، و1.23% على التوالي، لذلك لم يكن النمو في ألمانيا أقل من نمو الاتحاد الأوروبي بأكمله فحسب، بل كان أيضاً أقل بكثير من الولايات المتحدة لمدة عقد من الزمان.

6-3 ذروة إنتاج النفط

مع بروز قضية التحول الطاقي والسعي للحد من الانبعاثات الكربونية، تبرز أهمية العودة إلى فرضية هوبرت التي تنبأت بقرب بلوغ ذروة إنتاج النفط، حيث يعد التخوّف من نقص الإمدادات من بين أحد الأسباب التي تجعل العديد من دول العالم تتبنى التحول الطاقي. إن تسليط الضوء على هذه الفرضية، سواء من خلال تأكيد صحتها أو دحضها، أمر بالغ الأهمية عند تناول موضوع التحول الطاقي، فمن ناحية، إذا كانت فرضية هوبرت صحيحة، فهذا يعني أن العالم على أعتاب نقص حاد في إمدادات النفط، مما يستدعي تسريع وتيرة التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة. ومن ناحية أخرى، إذا ثبت خطأ هذه الفرضية، فقد يعني ذلك أن هناك المزيد من الوقت للتخطيط والانتقال إلى اقتصاد يعتمد على الطاقة النظيفة. لذا، فإن البحث في مدى صحة فرضية هوبرت ليس مجرد ترفٍ أكاديمي، بل هو ضرورة حتمية لتحديد المسار الأمثل للتحول الطاقي، وضمان مستقبل مستدام للطاقة.

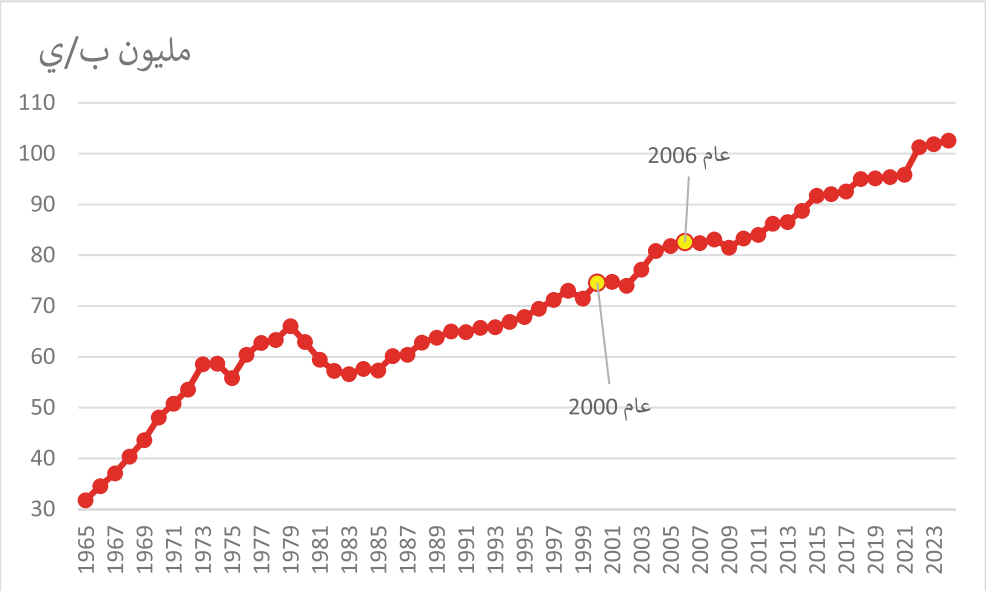
واجهت فرضية هوبرت عدداً كبيراً من الانتقادات، مثل افتراضها وجود كمية محددة من النفط في باطن الأرض، ومنها أن تلك الفرضية لم تأخذ بعين الاعتبار أسعار النفط، وتغيرات الوضع الاقتصادي، والتطورات التقنية، وعدم دقة تقديرات الاحتياطيات الجيولوجية أو المؤكدة، وعدم النظر في المصادر غير التقليدية للنفط، وهو ما يمكن تبيّنه من خلال إنتاج زيت السجيل الأمريكي (النفط الصخري).

ظهرت هذه الفرضية في عام 1956، عندما نشر الجيولوجي الأمريكي هوبرت بحثه المتعلق بذروة إنتاج النفط، معتمداً على أن أفضل سجل لعمليات استثمار الوقود الأحفوري Fossil Fuel هو سجل استثمار الفحم الحجري، حيث توفرت لديه في حينها بيانات عن انتاج الفحم الحجري منذ عام 1860، وقارن هوبرت منحنيات إنتاج الفحم الحجري مع منحنيات إنتاج النفط فوجد بينها تشابهاً من ناحية ارتفاع معدل الإنتاج بشكل أسّي حتى الوصول إلى نقطة دعاها باسم نقطة الانعطاف Inflection Point والتي يتغير عندها اتجاه منحني الإنتاج (Hubbert, 1956)[66]. يشير بحث هوبرت إلى أنه وفي محاولة منه للتنبؤ بالسنة التي سيتغير فيها اتجاه منحني إنتاج النفط، اعتمد على العديد من الافتراضات حول الاحتياطي الجيولوجي النفطي في الولايات المتحدة الأمريكية وفي العالم، والاحتياطيات المتوقع اكتشافها، ومعدل الإنتاج السنوي، كما افترض أن حجم احتياطيات الغاز سواء الأمريكية أو العالمية يمكن تقديرها من خلال معرفة نسبة الغاز إلى النفط (Gas to Oil Ratio) في حال البحث عن ذروة إنتاج الغاز*. ومن خلال تلك البيانات وضع هوبرت أكثر من سيناريو لذروة الإنتاج في الولايات المتحدة وفي

* هذا الافتراض بطبيعة الحال لا يمكن القبول به بشكل مطلق إذ لا يأخذ بعين الاعتبار احتياطيات حقول الغاز الحر.

العالم، لكن الملاحظ أن السيناريو الشائع لمنحني هوبرت كان فقط السيناريو المتطرف Extreme أو سيناريو الحالة القصوى إن صح التعبير، وتوقع في الحالة المعتدلة أن معدل إنتاج النفط الأمريكي لن يزيد عن 7.4 مليون ب/ي في عام 1963. لكن الواقع أن أعلى إنتاج للنفط الأمريكي تجاوز حد 9 ملايين ب/ي في عام 1970. كما توقع هوبرت أن يصل الإنتاج العالمي إلى ذروته في عام 2000، بمعدل 34 مليون ب/ي، لكن البيانات تؤكد أن العالم أنتج بهذا المعدل قبل ذلك بكثير، وذلك بين عامي 1965 و1966. وفي سيناريو آخر توقع هوبرت أن تكون ذروة الإنتاج العالمي من النفط في عام 2006، وهو ما لم يحصل بالطبع. يبين الشكل 23 ذروتي الإنتاج اللتان توقعهما هوبرت، ويبدو جلياً من الشكل أن العالم تجاوز الذروتين ولا تزال معدلات الإنتاج في تزايد مستمر.

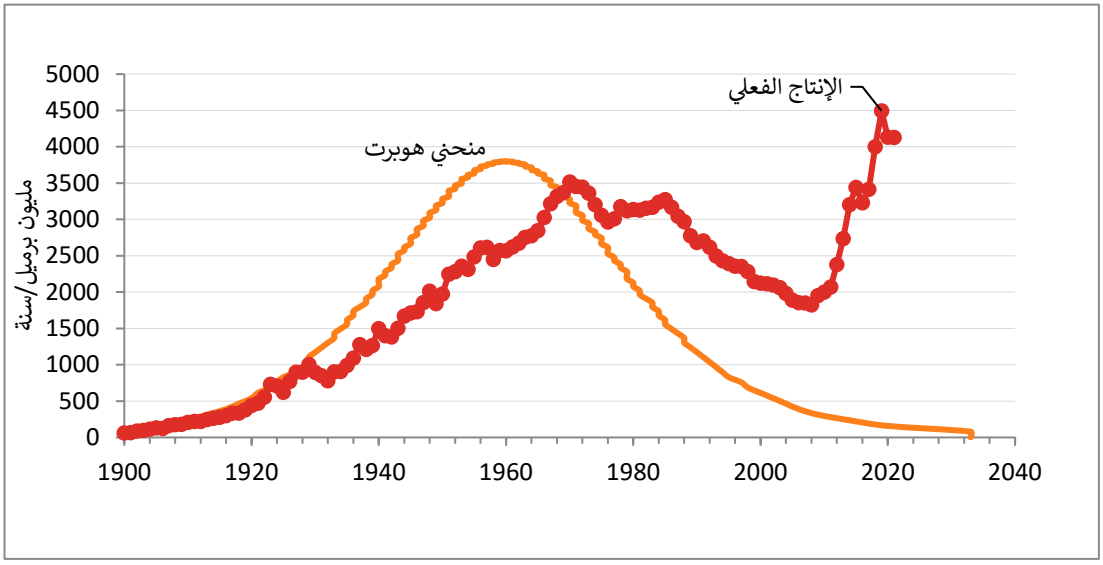
الشكل 23: موعد ذروتي الإنتاج حسب فرضية هوبرت، مقابل الإنتاج الفعلي للعالم



المصدر: بيانات EI، 2024، وأوابك 2025

كما يبين الشكل 24 منحنيات الإنتاج الفعلي للنفط الأمريكي حسب بيانات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA, 2025)[67]، مقارنة مع بيانات منحني هوبرت (Deutsche Bank, 2013)[68]. وقد اعتبر هوبرت أن الاحتياطي الأعظمي للولايات المتحدة قد يكون 150 أو 200 مليار برميل، وبنى فرضيته على ذلك الأساس. لكن منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول، عملت على حساب الإنتاج التراكمي للولايات المتحدة منذ بداية اكتشاف النفط فيها، وحتى نهاية عام 2024، ووجدت أنه زاد عن 252.5 مليار برميل، منها نحو 82 مليار برميل من زيت السجيل (النفط الصخري) أنتجت منذ عام 2000. ولا تزال الولايات المتحدة بحسب تقديرات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية تمتلك ما يزيد عن 48 مليار برميل من الاحتياطيات المؤكدة من النفط(EIA, 2024)[69].

الشكل 24: مقارنة إنتاج النفط الأمريكي حسب فرضية هوبرت مع الإنتاج الفعلي



مصدر البيانات: Deutsche Bank، 2013، وبيانات الإنتاج الفعلي من EIA، 2025

وقد شهد العقدان المنصرمان عدة نقاشات وفرضيات حول ذروة الإنتاج، منها مثلاً ما طرحه الجيولوجي "كولن كامبل" (Campbell, 2013)[70] الذي رأى أن ذروة إنتاج النفط في العالم سوف تكون في عام 2004، وهو ما لم يحصل أيضاً. والواقع أن العديد من الفرضيات طرحت مراراً وتكراراً عن ذروة إنتاج النفط (والغاز كذلك)، لكن أياً منها لم يتحقق. ويبين الجدول 7 بعض التوقعات عن التاريخ المتوقع لذروة إنتاج النفط والغاز حسب العديد من التوقعات (Hughes and Rudolph, 2011)[71].

الجدول 7: توقعات مختلفة لموعد ذروة إنتاج النفط والغاز

العام	الجهة	النوع	الإنتاج الأعظمي مليار برميل	تاريخ الوصول إلى الذروة
1956	Hubbert	نفط تقليدي	1250	حوالي عام 2000 (بمعدل 35 مليون ب/ي)
1969	Hubbert	نفط تقليدي	2100 -1350	1990 (عند 65 مليون ب/ي); 2000 (عند 100 مليون ب/ي)
1972	ESSO	نفط تقليدي	2100	ندرة بشكل متزايد منذ عام 2000
1972	Report: UN Conference	نفط تقليدي	2500	2000
1976	UK DoE	نفط تقليدي		حوالي عام 2000
1977	Hubbert	نفط تقليدي	2000	1996
1977	Ehrlich et al.	نفط تقليدي	1900	2035 إذا كان الإنتاج ثابتا
1978	WEC/IFP	نفط تقليدي	1803	2000
1979	BP	نفط تقليدي		الذروة خلال ال 25 عاما القادمة
1981	World Bank	نفط تقليدي	1900	الذروة (العالم غير الشيوعي): 1985
1992	Meadows et al.	نفط تقليدي	2500 -1800	مطلع القرن 21
1996	Ivanhoe	نفط تقليدي	2000	حوالي عام 2005
1997	Edwards	نفط تقليدي	2836	2010
1997	Laherre` re	كل الموائع	2700	2020
2000	Bartlett	نفط تقليدي	3000 -2000	2010

العام	الجهة	النوع	الإنتاج الأعظمي مليار برميل	تاريخ الوصول إلى الذروة
2002	BGR	نفط تقليدي وغير تقليدي	نفط تقليدي 2670	2004 و 2019 على التوالي
2003	Deffeyes	نفط تقليدي		2017
2003	Bauquis	كل الموائع	3000	2005
2003	Campbell - Uppsala	كل الهيدروكربونات		2020
2003	Laherre` re	كل الموائع	3000	2015
2003	Energyfiles Ltd.	كل الموائع		2016
2003	Energyfiles Ltd.	كل الهيدروكربونات	نفط تقليدي 2338	2020
2003	Bahktiari	نفط تقليدي		2007–2006
2004	Miller, BP	نفط تقليدي وغير تقليدي		2025
2004	PFC Energy	نفط تقليدي وغير تقليدي		2018 (الحالة الأساسية)
2005	Deffeyes	نفط تقليدي		2005

التوقعات مرتبة حسب سنة إصدارها. مصدر البيانات: (Hughes and Rudolph, 2011)

وفي السنوات الأخيرة ظهرت تنبؤات أخرى تتعلق بذروة الطلب هذه المرة، إلا أن حالها لا يزال كحال تنبؤات ذروة الإنتاج. فقد أشار تقرير Citibank عام 2013، والذي حمل عنوان "نمو الطلب العالمي على النفط - النهاية قريبة"، إلى أن الطلب على النفط قد يصل إلى ذروته في وقت أقرب بكثير مما توقعته الأسواق، ومع ذلك، كان الطلب على النفط في عام 2012 أقل من 90 مليون برميل في اليوم، في حين أن الطلب حالياً يزيد عن 100 مليون برميل في اليوم (Al Ghais, 2024)[72].

وسارع البعض في عام 2020 إبّان انتشار جائحة كوفيد-19 للتبشير بان الطلب العالمي على النفط قد بلغ ذروته، وأنه لن يعود إلى سابق عهده أبداً. وبالفعل، تراجعت معدلات إنتاج النفط الخام في عام 2020 بنسبة إجمالية قاربت 6.7% أي بنحو 6.6 مليون ب/ي، لكن معظم هذا التراجع نتج عملياً عن تخفيض الإنتاج الذي التزمت به دول (أوبك +)، إذ تراجع إنتاج أوبك لوحدها بأكثر من 4.6 مليون ب/ي بين عامي 2019 و2020، علاوة على أن انخفاض الأسعار تسبب في تراجع إنتاج زيت السجيل الأمريكي بنحو 370 ألف ب/ي، وخفضت روسيا إنتاجها بحوالي 930 ألف ب/ي. أي أن تراجع الإنتاج في دول أوبك والولايات المتحدة وروسيا مثل حوالي 90% من تراجع إنتاج النفط عام 2020. من جهة أخرى ارتفعت معدلات الإنتاج في العديد من دول العالم بقيمة إجمالية زادت عن 923 ألف ب/ي، فإنتاج البرازيل والنرويج مجتمعتين ارتفع بنحو 0.5 مليون ب/ي. وعموماً، بات من الواضح أن توقعات ذروة الطلب على النفط ليس لها أي موثوقية على المدى القصير والمتوسط.

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

الفصل الرابع

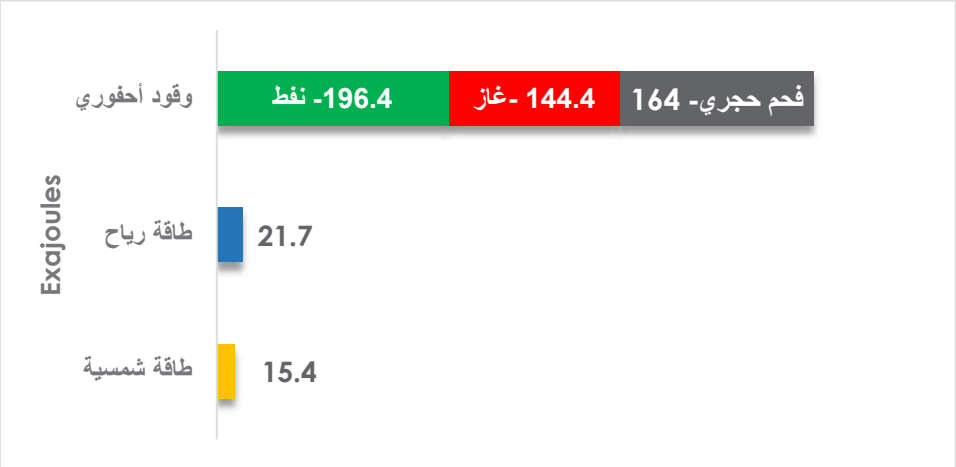
الطلب المستقبلي على الطاقة

1-4 مزيج الطاقة

يعتبر مزيج الطاقة مؤشراً هاماً على حالة الاقتصاد والاستدامة بل والمكانة الجيوسياسية لبلد ما، وهو مؤشر يعكس التوازن بين المصادر المختلفة المستخدمة لتلبية احتياجات الطاقة في الدولة.

يبين الشكل 25 مزيج الطاقة العالمي في عام 2023، ويظهر منه بوضوح أن حجم الطاقة المستخدمة* من الوقود الأحفوري كانت تعادل حوالي 33 ضعفاً من حجم الطاقة الشمسية، وأكثر من 23 ضعفاً من طاقة الرياح. وبتعبير آخر وبحسب بيانات (EI, 2024)، مثلت طاقة الرياح 3.5% من مزيج الطاقة العالمي عام 2023، بينما مثلت الطاقة الشمسية أقل من 2.5%.

الشكل 25: مزيج الطاقة العالمي عام 2023



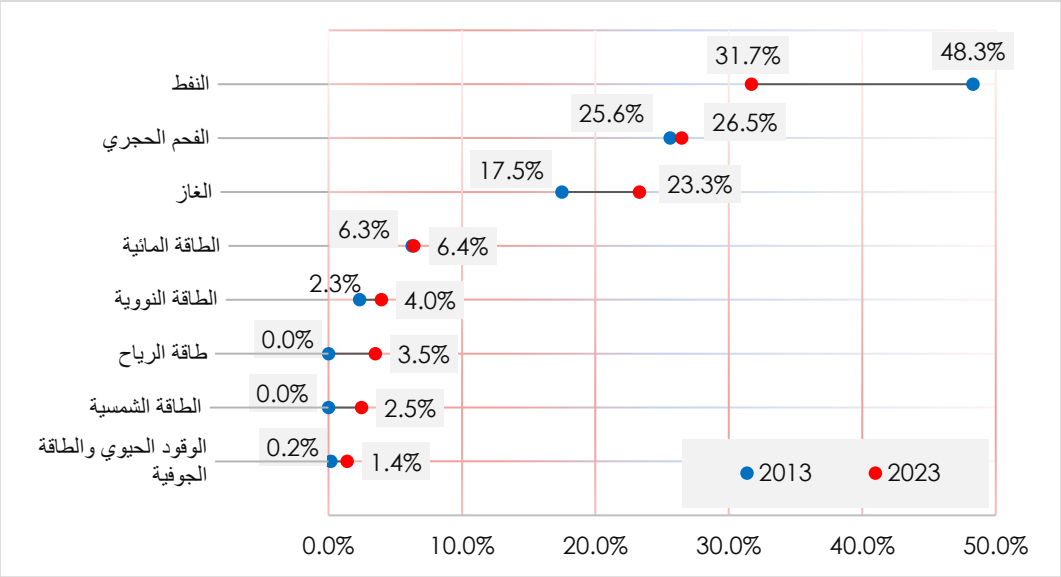
إعداد الباحث بناء على بيانات من: EI Statistical Review of World Energy، 2024

والواقع أن أول ظهور لطاقة الرياح في بيانات مزيج الطاقة العالمي كان في عام 1978، ومثلت رقماً ضئيلاً جداً (0.00001%)، أي أن طاقة الرياح احتاجت إلى أكثر من 45 عاماً حتى وصلت إلى 3.5% من مزيج الطاقة العالمي، وبالمقابل ظهرت الطاقة الشمسية في البيانات الإحصائية في عام 1983 وبدورها احتاجت إلى 41 عاماً حتى بلغت حصتها من مزيج الطاقة العالمي نحو 2.5%. بينما يلاحظ عبر البيانات التاريخية (Ritchie و Rosado، 2024)[73] أن النفط احتاج إلى 6 سنوات فقط حتى زادت حصته في مزيج الطاقة عن 6%، وبلغ الغاز حصة 4% خلال نفس الفترة.

* تستخدم الدراسة تعبير استهلاك الطاقة للإشارة إلى الاستهلاك الأولي للطاقة.

يبين الشكل 26 التطورات التي طرأت على مزيج الطاقة منذ عام 1978 عند أول ظهور للطاقات المتجددة في البيانات العالمية وحتى نهاية عام 2023، ويلاحظ منه بالفعل تراجع حصة النفط والفحم الحجري، في مقابل ارتفاع حصص بقية المصادر، إنما يلاحظ كذلك أن حصة مصادر الوقود الأحفوري خلال نحو نصف قرن من تبني الطاقات المتجددة لم تتراجع إلا بنسبة تقل عن 10% من مزيج الطاقة، ويلاحظ أيضاً أن نسبة الغاز ارتفعت بنحو 5.8%، وهو ما يقارب ارتفاع حصة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح مجتمعتين.

الشكل 26: تغير مزيج الطاقة بين عامي 1978- 2023



مصدر البيانات: تحليل الأرقام المتاحة في Statistical Review of World Energy من EI، 2024.
تم اختيار عام 1978 لأنه أول عام ظهرت فيه بيانات الرياح في مزيج الطاقة العالمي

2-4 استهلاك الطاقة

يمثل الطلب على الطاقة عنصراً محورياً في الاقتصاد العالمي، حيث يتأثر بالتغيرات الاقتصادية، والديموغرافية، والتكنولوجية. وتختلف أنماط الطلب على الطاقة بين الدول والقطاعات بناءً على مستوى التطور الاقتصادي، والموارد المتاحة، والسياسات الطاقية.

عملياً، لا يمكن لأي تصور عن تحولات الطاقة أن يكتمل بدون معرفة كمية الطاقة المستهلكة والتي يمكن أن تستهلك في المستقبل، فهي المآل الذي يدور حوله موضوع التحول برمّته، علاوة على أهمية معرفة مصدر هذه الطاقة حالياً ولاحقاً. وهو ما يعني ضرورة النظر في بعض النقاط المرتبطة بالطاقة عموماً.

يشير استهلاك الطاقة الأولية إلى إجمالي الطاقة من المصادر الخام قبل أي تحويل أو نقل. وهذا يشمل

محتوى الطاقة من الفحم والنفط الخام والغاز الطبيعي وأنواع الوقود الأخرى عند استخراجها من الأرض. أما الاستهلاك النهائي للطاقة فيعبر عن الطاقة التي تصل بالفعل إلى المستخدمين النهائيين بعد خسائر التحويل والنقل والتوزيع. أو بكلمات أخرى، هي الطاقة المستخدمة مباشرة من قبل المستهلكين في الأنشطة اليومية مثل التدفئة والإضاءة والنقل، ويمكن للتبسيط القول إن الطاقة الأولية هي مدخلات الطاقة الخام في النظام، بينما الطاقة النهائية هي ناتج الطاقة القابل للاستخدام الذي يتلقاه المستهلكون. فعلى سبيل المثال ، عندما يتم حرق الفحم في محطة لتوليد الكهرباء، يعتبر محتوى الطاقة في الفحم طاقة أولية، أما الكهرباء التي تصل إلى المستهلك بعد حساب الخسائر في التوليد والنقل، فهي تعبر عن الاستهلاك النهائي للطاقة.

لذلك تعتبر بيانات استهلاك الكهرباء من أهم البيانات التي ينظر لها عند الإشارة إلى الاستهلاك النهائي للطاقة، رغم أنها لم تتجاوز 20.6% من الاستهلاك النهائي للطاقة في عام 2023، وهو ما يمثل زيادة بنسبة 0.3% تقريباً مقارنة بعام 2010. وتشير مؤسسة الأبحاث Enerdata* إلى أنه منذ عام 2020، ظلت حصة الكهرباء في الاستهلاك النهائي العالمي مستقرة على نطاق واسع. أما مقارنة بعام 2010، فقد زادت الكهربة بوتيرة ثابتة في آسيا (+6.6% إلى أكثر من 25%، بما في ذلك +0.2% في عام 2023)، مدفوعة بنمو الاستهلاك في الصين والهند وإندونيسيا وغيرها من دول آسيا، كما تقدمت الكهربة في أمريكا اللاتينية (+3.9% وصولاً إلى 20%)، وخاصة في تشيلي والمكسيك، وتقدمت كذلك في الإمارات العربية المتحدة، وجمهورية مصر العربية. وظلت نسبة الكهربة مستقرة على نطاق واسع في أمريكا الشمالية عند حوالي 22%، وارتفعت في أوروبا (+1% منذ عام 2010 إلى 21%)، على الرغم من نمو قدره 4.5% في هولندا ونمو بمقدار 2.9% في تركيا، وفي أستراليا (23%) وفي أفريقيا (10%). أما في روسيا، فقد انخفضت الكهربة بنسبة 1.4% منذ عام 2010 إلى 13.%، بينما ارتفعت حصة الكهرباء في الاستهلاك النهائي بشكل خاص في النرويج والسويد، وهما دولتان تتمتعان بموارد مائية كبيرة (47% و32% على التوالي) (Enerdata, 2024)[74].

يبين الجدول 8 التوزع الجغرافي لاستهلاك الطاقة في العالم في عام 2023 (EI, 2024)، ويظهر منه التباين الكبير في استهلاك الطاقة بين المناطق، حيث تهيمن آسيا والمحيط الهادئ وأمريكا الشمالية على النسب الكبرى بسبب النمو الصناعي والاستهلاك المرتفع في القطاعات الحيوية مثل الصناعة والنقل. بينما يشهد الشرق الأوسط تركيزاً على التكييف وتحلية المياه، وتبقى أفريقيا الأقل استخداماً للطاقة

* مؤسسة أبحاث مستقلة في مجال الطاقة، تتخذ من فرنسا مقراً رئيسياً لها.

نتيجة للظروف الاقتصادية والتقنية.

الجدول 8: التوزع الجغرافي لاستهلاك الطاقة في العالم

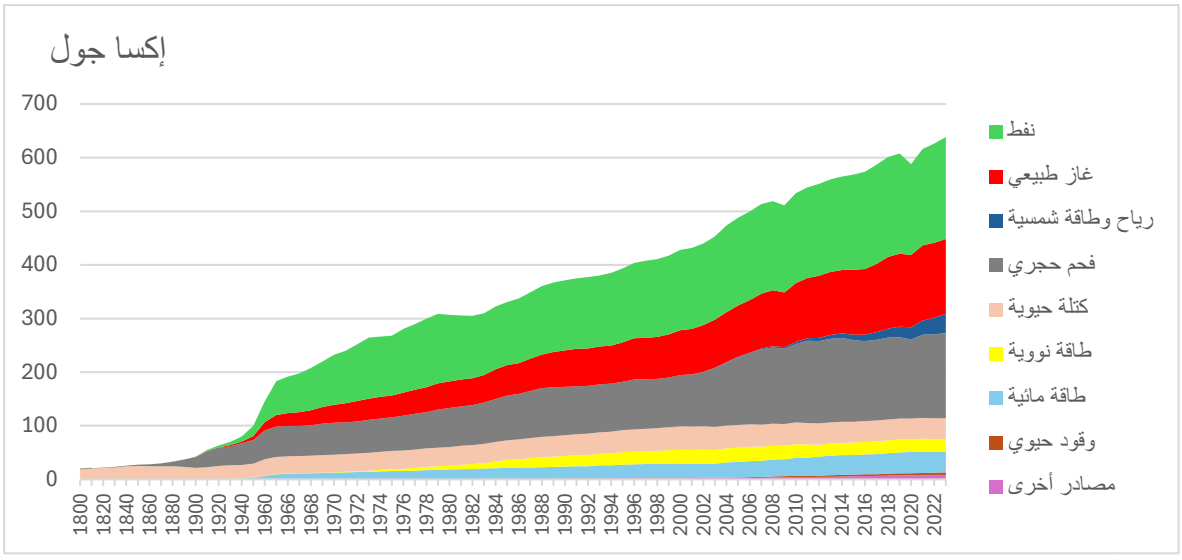
المنطقة	الحصة من الاستهلاك العالمي	أبرز السمات الحالية
آسيا والمحيط الهادئ	%47.1	استهلاك مرتفع بسبب الكثافة السكانية والنمو الصناعي
أمريكا الشمالية	%18.8	استهلاك مرتفع في الصناعة والنقل
أوروبا	%12.6	توجه نحو الطاقة المتجددة
كومونولث الدول المستقلة	%6.6	طلب مرتفع على التدفئة، وانخفاض كفاءة الطاقة
الشرق الأوسط	%6.5	تركيز على التكييف وتحلية المياه
أمريكا الجنوبية والوسطى	%5	توجه نحو الطاقة الكهرومائية
أفريقيا	%3.4	أدنى مستوى استخدام للفرد

مصدر البيانات: EI، 2024

1-2-4 نمط استهلاك الطاقة تاريخياً

يوضح المخطط في الشكل 27 الطلب العالمي على الطاقة منذ مطلع التاسع عشر، ويلاحظ منه أن الاتجاه العام للطلب في تزايد مستمر (Our World in Data, 2024)[75]. كما يلاحظ وجود قفزة نوعية في الاستهلاك بين عامي 1950 و1960، حيث سجل معدل نمو بنسبة زادت عن 46%، وهو أعلى معدل نمو للاستهلاك في التاريخ. يعكس هذا الارتفاع الحاد الطفرة الاقتصادية التي شهدتها العديد من الدول في أعقاب الحرب العالمية الثانية، كما يعكس فعلياً الانتشار الواسع لاستهلاك الهيدروكربونات في تلك الفترة ، والذي يلاحظ منه التزايد المضطرد في استهلاك النفط والغاز(Kretchmer، 2020)[76].

الشكل 27: استهلاك الطاقة حسب المصدر بين عامي 1800 و 2023

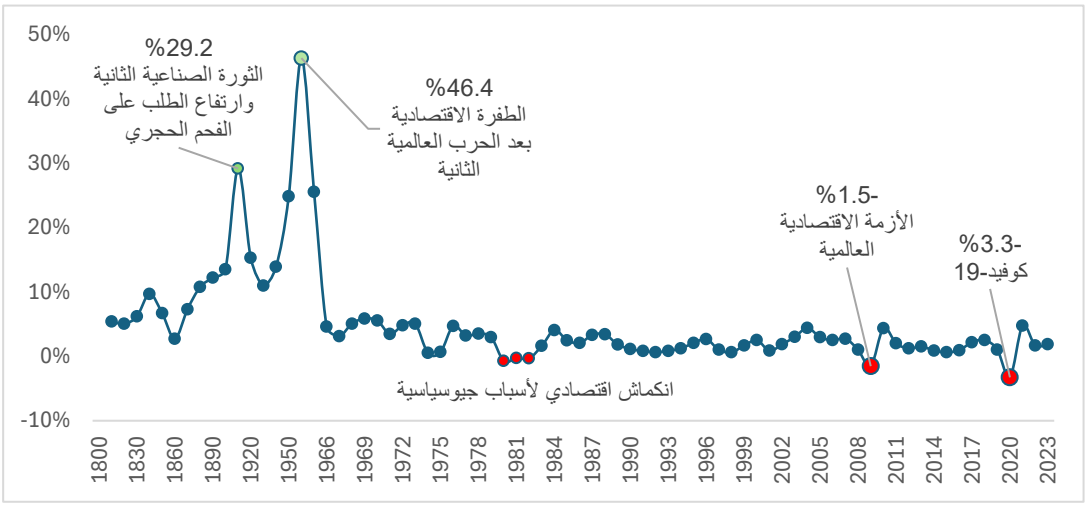


مصدر البيانات: Our World In data، 2024، وEnergy Statistical Review، 2024.

كما أن الشكل يوضح نقطة غاية في الأهمية ضمن مجال التحول الطاقي، وهي المعيار الزمني لعملية التحول، فقد استغرق التحول من استخدام الخشب إلى استخدام الفحم الحجري كوقود صناعي في بريطانيا مثلاً حوالي 5 قرون، إلا أن الخشب والحطب بقيا جزءاً أساسياً من مزيج الطاقة طيلة القرن التاسع عشر كما هو واضح في الشكل، ومع أن النفط اكتشف عام 1859 إلا أن حصته من مزيج الطاقة لم تتجاوز حصة الفحم الحجري إلا في عام 1965، أي بعد أكثر من 100 عام على اكتشافه، وحتى اليوم لا تزيد حصة النفط من مزيج الطاقة العالمي إلا بنحو 5.2% عن حصة الفحم الحجري من هذا المزيج. أما المنظور الحالي لتحول الطاقة، فيراد له أن يتم في نحو 25 عاماً فقط، على أن يتحقق جزء كبير من التحول في عام 2030 (أي خلال 5 سنوات من تاريخ صدور هذه الدراسة) وبحيث يختفي الفحم الحجري من مزيج الطاقة!

ولعل الشكل 28 يبين بعض التفاصيل الأكثر دقة في تغيرات نمو الاستهلاك، إذ يوضح وجود قفزة سابقة حدثت بين عامي 1890 و1910، وهي على الأغلب بسبب الثورة الصناعية الثانية التي تزايد فيها استهلاك الفحم الحجري.

الشكل 28: معدل التغير السنوي في استهلاك الطاقة بين عام 1800 و 2023



مصدر البيانات: Our World In data، 2024، وEnergy Statistical Review، 2024.

كما يبين الشكل 28 كذلك، أنه منذ مطلع السبعينات تقريباً، فإن النمو في الطلب على الطاقة كان دوماً يتزايد على أساس سنوي، باستثناء بضع سنين أثرت فيها بعض الأحداث العالمية على معدلات الاستهلاك وجعلت النمو يتراجع إلى قيم سالبة، مثل جائحة كورونا التي ضربت العالم عام 2020، وتراجع معها معدل النمو إلى (-3.3%) مقارنة بعام 2019. وشهد العالم في الثمانينات فترات من الانكماش الاقتصادي العالمي، مما أدى إلى انخفاض ملحوظ في الطلب على الطاقة بسبب الأزمة النفطية الثانية، حيث

ارتفعت أسعار النفط في أواخر السبعينات وأوائل الثمانينات، وذلك بسبب عدة عوامل، مثل التغيرات الجيوسياسية الإيرانية التي أدت إلى اضطرابات في إنتاج النفط الإيراني، وما تلاها من حرب العراق وإيران التي استمرت لثماني سنوات وتسببت في نقص المعروض النفطي. وقد تسبب ارتفاع أسعار النفط في ارتفاع التضخم وتباطؤ النمو الاقتصادي في العديد من الدول الصناعية، وتمثلت الاستجابة الحكومية والفردية لارتفاع الأسعار في تخفيض استهلاك الطاقة من خلال ترشيد الاستهلاك في الصناعة والمنازل، وتطوير تقنيات أكثر كفاءة في استخدام الطاقة.

وقد أدى ارتفاع أسعار النفط وما رافقه من تضخم إلى دخول الاقتصاد العالمي في فترة من الركود، مما خفض الطلب على الطاقة بشكل عام. وتبع ذلك اتخاذ العديد من الحكومات سياسات اقتصادية تقشفية لمعالجة آثار الأزمة النفطية، مما أدى إلى مزيد من التباطؤ الاقتصادي وانخفاض الطلب على الطاقة أكثر (Yergin, 2008)[77].

3-4 تأثير السيارات الكهربائية على استهلاك الطاقة

في ظل انتشار المركبات الكهربائية في مختلف دول العالم، يظهر إلى الواجهة دوماً تساؤل محقٌ عن مدى تأثير هذه المركبات على استهلاك النفط. وفي هذا المضمار نشر المنتدى الاقتصادي الدولي في عام 2023، تحليلاً يرصد التوجهات المستقبلية للطلب على النفط (WEF, 2023)[78]. وخلص التحليل إلى أن التحول العالمي نحو كهربة قطاع النقل سيؤدي إلى إحلال الطلب على الكهرباء محل الطلب على النفط. واستناداً إلى بيانات الاستهلاك في الولايات المتحدة، حيث تستهلك السيارة التقليدية ما يقرب من 11 برميل مكافئ من النفط سنوياً، أوضح التحليل أن المركبات الكهربائية، وخاصةً الثنائية والثلاثية العجلات المنتشرة في آسيا، قد ساهمت بالفعل في تخفيض الطلب على النفط. ففي عام 2015، أزاحت هذه المركبات ما يقدر بنحو 675 ألف برميل يومياً من الطلب، وارتفع هذا الرقم إلى حوالي مليون برميل يومياً بحلول عام 2021. وقد أشارت دراسة أصدرتها منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول عام 2024 إلى أنه بافتراض صحة هذه الأرقام، فإن النظر فيها يبين أن النمو في استخدام المركبات الكهربائية خلال ست سنوات (من 2015 إلى 2021) أدى إلى خفض الطلب على النفط بمقدار 325 ألف برميل يومياً، أي بمعدل 54 ألف برميل يومياً في كل سنة. وإذا استمر هذا الاتجاه بنفس الوتيرة*، فيمكن أن يؤدي التوسع في استخدام المركبات الكهربائية إلى إزاحة طلب إضافية بحوالي 487 ألف برميل يومياً بحلول عام 2030. وبذلك سيبلغ إجمالي حجم الإزاحة للطلب، المتوقع تحقيقه بحلول

* وهو أمر يتوقع أن يتغير مع تغير توجهات الإدارة الأمريكية الجديدة نحو رفع الدعم عن المركبات الكهربائية.

عام 2030، أقل من 1.5 مليون برميل يومياً. وبطبيعة الحال فإن هذه الكميات سيقابلها نمو في الطلب من جهات أخرى كما سبق ذكره (حمش، 2024).

في المجمل، يمثل الطلب على النفط في مجال النقل البري نحو 55% من إجمالي الطلب في منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بالنسبة للدول في القارة الأمريكية، و47% بالنسبة للدول الأوربية، ونحو 40% من طلب الصين، وعلى الصعيد العالمي خلال الفترة من 2012- 2022، تراوحت نسبة استهلاك النفط في قطاع النقل بين 43% و46% من إجمالي الاستهلاك العالمي (OPEC, 2023)[79].

بعبارة أخرى، يُستهلك ما بين 54% و57% من النفط عالمياً في قطاعات أخرى غير النقل البري الذي يشهد نمواً في استخدام المركبات الكهربائية، وخاصةً في مجال السيارات الشخصية.

ولبحث نفس النقطة من منظور آخر، يمكن الإشارة إلى الصين التي بلغت مبيعاتها 9.5 مليون سيارة كهربائية (وليس مركبة ثنائية أو ثلاثية العجلات) خلال عام 2023، وهذه المبيعات خفّضت الطلب على النفط بمقدار 270 ألف ب/ي فقط (البدر، 2024)[80]. وبحسب قاعدة بيانات وكالة الطاقة الدولية، بلغت مبيعات السيارات الكهربائية والهجينة وتلك العاملة على خلايا الوقود 13.8 مليون سيارة في عام 2023، وبحسب نفس قاعدة البيانات، فإن مجمل السيارات الكهربائية التي كانت موجودة في العالم (Stock) والبالغ عددها 28 مليون سيارة، ساهمت في خفض الطلب على النفط بمقدار 710 آلاف ب/ي. أي أن كل سيارة ساهمت وسطياً في خفض الطلب بمقدار 0.03 ب/ي، ويمكن بالتالي الافتراض بأنه حتى لو بلغ عدد السيارات المباعة 62 مليون سيارة في عام 2035، فهذا يعني تخفيضاً في الطلب بحدود 1.5 مليون ب/ي. وبالتالي، حتى في حالة افتراض تحول جميع المركبات البرية في العالم إلى استخدام الطاقة الكهربائية، سينخفض الطلب على النفط في هذا القطاع، لكنه لن يتوقف بشكل كامل، نظراً لاستمرار استخدامه في القطاعات الأخرى (حمش، 2024).

وهنا لابد من التنويه إلى أن سوق السيارات الكهربائية قد لا تكون في أفضل حالاتها في الفترة الأخيرة، فعلى سبيل المثال أعلنت شركة Ford الأمريكية في مطلع شهر فبراير عام 2025 أنها خسرت 5.1 مليار دولار في أعمالها في مجال المركبات الكهربائية في عام 2024، منها 1.4 مليار دولار من الخسائر التشغيلية خلال الربع الرابع من ذلك العام لوحده، وبررت الشركة ذلك بأن حجم إيراداتها انخفض بسبب "ضغط التسعير وديناميكيات السوق التنافسية". وقد بلغت مبيعات فورد 30,176 مركبة كهربائية في الربع الرابع من عام 2024، و 97,865 مركبة للعام بأكمله (Kelley Blue Book, 2025)[81]. وبالتالي فإن Ford قد خسرت نحو 46,394 دولاراً لكل مركبة كهربائية باعتها في الربع الرابع، و 52,113 دولاراً لكل مركبة كهربائية باعتها في عام 2024. وكانت الشركة قد أعلنت سابقاً عن خسائر بسبب مبيعات السيارات

الكهربائية بقيمة 2.2 مليار دولار عام 2022، و 4.7 مليار دولار عام 2023. كما أنها تتوقع أن تبلغ خسائرها 5 مليار دولار في عام 2025، وبالتالي فمن المرجح بحلول نهاية عام 2025، أن تصل خسائر Ford بسبب أعمالها في مجال السيارات الكهربائية إلى حوالي 17 مليار دولار. وتبين التقارير أن مبيعات السيارة الكهربائية الأشهر للشركة، وهي Ford F-150 Lightning قد تراجع خلال الربع الرابع 2024 بأكثر من 10% مقارنة بالربع الرابع من عام 2023. وهو شيء لم تختص به شركة Ford لوحدها، بل يمكن ملاحظته في مبيعات العديد من الشركات الأخرى، كما هو مبين في الجدول 9، ويلاحظ من الجدول أن الأنواع التي تراجعت مبيعاتها هي غالباً من الماركات الثمينة.

الجدول 9: مقارنة مبيعات بعض أنواع السيارات الكهربائية على أساس ربعي- سيارة

الصانع	الربع الرابع		التغير
	2023	2024	
Hyundai	68	5	%92.6-
VW	10,634	1,808	%83-
Mercedes	13,782	4,379	%68.2-
Lexus	2,875	1,316	%54-
Volvo	3,095	1,817	%41-
Genesis	2,042	1,603	%21-
Audi	7,411	6,594	%11-
BMW	14,374	13,876	%3.5-
Rivian	14,231	14,183	%0.3-

مصدر البيانات: Kelley Blue Book, 2025

ويلاحظ كذلك تراجع المبيعات حتى على أساس سنوي لبعض طرازات السيارات، كما هو مبين في الجدول 10.

الجدول 10: مقارنة مبيعات بعض أنواع السيارات الكهربائية على أساس سنوي- سيارة

الصانع	العام		التغير
	2023	2024	
Toyota	1,722	245	%86-
Volvo	14,038	5,393	%62-
VW	37,789	18,183	%52-
Mercedes	47,582	28,154	%41-
Hyundai	105	77	%27-
Porsche	7,855	6,486	%17-
Audi	25,039	23,152	%8-
Tesla	671,616	633,762	%6-
Genesis	6,403	6,239	%3-

مصدر البيانات: Kelley Blue Book, 2025

لكن من الهام التنويه إلى أن هناك طرازات أخرى* ارتفعت مبيعاتها، لتكون الحصيلة الكلية ارتفاع عدد المركبات الكهربائية المباعة بنحو 7.2% بين عامي 2023 و2024. ويلاحظ من مراجعة عدد السيارات الكهربائية المباعة أن بعض وسائل الإعلام قد تعمد لتضخيم الواقع عبر استخدام النسب فقط وغض النظر عن الأرقام الفعلية، فعلى سبيل المثال يمكن القول إن مبيعات Jaguar من السيارات الكهربائية ارتفعت بنسبة 525% بين الربع الرابع من عام 2023 والربع الرابع من عام 2024، لكن الواقع أن حجم المبيعات الفعلي كان 1081 سيارة فقط في الربع الرابع من عام 2024، وهو رقم منخفض جداً يمثل أقل من 0.3% (ثلاثة بالألف) من عدد السيارات الكهربائية المباعة في العالم في ذلك الربع.

وربما يمكن أن يلمح في نفس المضمار -من ناحية التأثير على مبيعات السيارة الكهربائية وبالتالي تأثيرها المتوقع على الطلب على الطاقة- أن تغيّر الإدارة الأمريكية قد يؤدي إلى تغييرات سريعة في سياسات السيارات الكهربائية الأمريكية، فقد أصدر الرئيس الأمريكي دونالد ترامب أمراً تنفيذياً بعنوان "إطلاق العنان للطاقة الأمريكية"، مفاده تفكيك اللوائح والأهداف التي تهدف إلى تسريع اعتماد المركبات الكهربائية. وقد سبق أن ركّزت أجندة المركبات الكهربائية في عهد الرئيس جو بايدن وبشكل كبير على لوائح صارمة حول عدة نقاط منها أنه تم تكليف شركات صناعة السيارات بالتأكد من أن 30- 56% من مبيعات السيارات الجديدة يجب أن تكون كهربائية بحلول عام 2032. وهدفت الإجراءات إلى إجبار شركات صناعة السيارات على الاستثمار في تكنولوجيا السيارات الكهربائية وإنتاجها. وتضمن سياسات الرئيس بايدن حوافز لتشجيع مشاركة المستهلكين والمصنعين في التحول إلى المركبات الكهربائية، مثل:

- المزايا الضريبية: إذ جعلت الإعفاءات الضريبية الفيدرالية المركبات الكهربائية في متناول المستهلكين.
- الاستثمار في البنية التحتية: تم تخصيص صندوق بقيمة 7 مليارات دولار أمريكي لتوسيع شبكة شحن المركبات الكهربائية.
- دعم التصنيع: شجعت الحوافز الشركات على بناء مصانع السيارات الكهربائية ومصانع البطاريات الأمريكية.

بينما عكست الأوامر التنفيذية الجديدة للرئيس ترامب كل ذلك، حيث ألغت هدف وصول مبيعات المركبات الكهربائية إلى 50% في عام 2030، وتم توجيه الوكالات الاتحادية لإعادة النظر في معايير

* بالنسبة لسيارة Tesla على سبيل المثال، تراجعت مبيعات ثلاثة طرازات منها، وهي: S، X، Y، بينما ارتفعت مبيعات Tesla Model 3. وتفصيل ذلك بالنسبة لكل نوع من السيارات يقع خارج حدود هذه الدراسة.

الانبعاثات الصارمة التي تم فرضها سابقاً، علاوة على إيقاف مؤقت للتمويل الاتحادي للبنية التحتية لشحن المركبات الكهربائية، مما قد يؤدي إلى تعطيل توسيع شبكة الشحن في البلاد والتأثير على إمكانية وصول المستهلكين إلى المركبات الكهربائية، حيث تتطلب الولايات المتحدة أكثر من 1.2 مليون جهاز شحن عام، وترقيات كبيرة للشبكة لدعم الطلب المتوقع بحلول عام 2030.

ويرى البعض أنه من المتوقع أن يؤدي الانعكاس الأخير للسياسة إلى إعادة تشكيل مشهد السيارات الكهربائية بشكل كبير على مستوى الولايات المتحدة (Stella Nolan, 2025)[82]. فعلى المدى القصير، قد تحدث زيادة في المبيعات حيث يندفع المستهلكون لشراء المركبات الكهربائية قبل إلغاء الإعفاءات الضريبية الفيدرالية. بينما من جهة أخرى، فإن غياب هذه الحوافز يمكن أن يجعل المركبات الكهربائية أعلى تكلفة، مما قد يؤدي إلى انخفاض بنسبة 27% في المبيعات السنوية. أما على المستوى الإقليمي، فمن المحتمل أن تظهر تفاوتات إقليمية، حيث قد تستمر الدول التي تلتزم بمعايير انبعاثات أكثر صرامة في اعتماد ثابت للمركبات الكهربائية، بينما يتخلف الآخرون عن الركب. وبالنسبة لشركات صناعة السيارات، يمكن أن تؤدي التغييرات إلى تحولات في السوق ، حيث من المحتمل أن تعزز الشركات القائمة مثل Tesla حصتها في السوق، بينما قد تكافح الشركات الأصغر من أجل المنافسة.

عموماً، شكلت الطاقة الكهربائية 20.6% من استهلاك الطاقة في العالم حسب النوع عام 2023، مقابل 17.6% عام 2010(Enerdata, 2023)[83]، أي بفارق بلغ 3%. وهو ما ترافق مع النمو في الطلب على السيارات الكهربائية. لكن هذا لا يعني أن ثلاثة عشر عاماً من انتشار السيارات الكهربائية هي السبب الرئيسي في زيادة الطلب على الكهرباء، فضمن هذا الفارق كانت هناك زيادة في الطلب على الكهرباء من القطاعات الصناعية والسكنية والخدمات وغيرها.

4-4 تأثير الذكاء الاصطناعي

يبرز الذكاء الاصطناعي كمصدر أساسي لزيادة الطلب على الطاقة، ورغم أنه قد يبدو للوهلة الأولى أن الذكاء الاصطناعي بتطبيقاته المتعددة التي تهدف إلى زيادة الكفاءة وتقليل الاستهلاك، يساهم في تخفيض الطلب على الطاقة، إلا أن الواقع أكثر تعقيداً من ذلك. فالذكاء الاصطناعي بحد ذاته يولد طلباً متزايداً على الطاقة لعدة أسباب، من بينها:

1- الخوارزميات: حيث تتطلب خوارزميات التعلم العميق المستخدمة في الذكاء الاصطناعي قدرات حوسبية هائلة، مما يستدعي إنشاء مراكز بيانات ضخمة تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، وبالتالي معالجة كميات هائلة من البيانات عبر أجهزة كمبيوتر قوية.

2- إنترنت الأشياء: يساهم الذكاء الاصطناعي في انتشار أجهزة "إنترنت الأشياء"، وهو ما يرفع من عدد الأجهزة المتصلة بالإنترنت. ومع دمج الذكاء الاصطناعي في السيارات الكهربائية ذاتية القيادة، تبرز الحاجة **إلى** قدرات حوسبية عالية لتشغيل أجهزة الاستشعار والتحكم، مما يزيد بدوره من استهلاك الطاقة.

3- العمليات الصناعية: يضاف إلى ما تقدم تحسين العمليات الصناعية **التي** يساهم الذكاء الاصطناعي في زيادة كفاءتها مما يؤدي إلى زيادة الإنتاج، ويدفع الذكاء الاصطناعي نمو الاقتصاد الرقمي، مما يزيد من الطلب على الخدمات الرقمية التي تتطلب بدورها المزيد من الطاقة (حمش، 2024).

لقد شهد الذكاء الاصطناعي توسعاً سريعاً في الآونة الأخيرة، وزادت العديد من شركات التكنولوجيا البارزة دعمها للذكاء الاصطناعي بشكل كبير في عام 2023، متأثرة بالإطلاق الناجح لتطبيقات مثل ChatGPT وغيره. يثير هذا التطور المتسارع جدلاً حول استهلاك الكهرباء والتأثير البيئي المحتمل لمراكز الذكاء الاصطناعي والبيانات. وتعتبر مرحلة تدريب النموذج اللغوي أكثر المراحل استهلاكاً للطاقة الكهربائية، حيث يتم في هذه المرحلة تغذية نموذج الذكاء الاصطناعي بمجموعات بيانات كبيرة وتدريبه على الاستجابة للمتغيرات وتوجيه سلوك النموذج للاستجابة لها. وقد قدرت دراسة صدرت عن جامعة Cornell في عام 2022، أن نموذج BigScience من شركة Hugging Face وهو نموذج كبير مفتوح الوصول ومتعدد اللغات (BLOOM) استهلك 433 ميغاوات ساعة من الكهرباء أثناء مرحلة التدريب (Luccioni et al., 2022)[84]، بينما استهلك نموذج GPT-3 نحو 1287 ميغاوات ساعة من الكهرباء.

وقد أشارت شركة الأبحاث SemiAnalysis إلى أن شركة Open AI تتطلب عدداً كبيراً جداً من الخوادم ووحدات معالجة الرسومات لدعم Chat GPT خلال ما يسمى مرحلة الاستنتاج أو مرحلة استخدام التطبيق (Patel & Ahmad, 2023)[85]، بحيث أن الطلب على الطاقة الكهربائية فيها يبلغ 564 ميغاوات ساعة يومياً، أي ما يعادل استهلاك أكثر من 19 ألف منزل* في الولايات المتحدة يومياً، كما أن الأبحاث حول الشركة العملاقة Google بينت أن التعلم الآلي Machine Learning يستهلك نحو 15% من إجمالي الطاقة الكهربائية التي تستهلكها الشركة (Patterson et al., 2023)[86].

ومن المتوقع مثلاً أن تنمو احتياجات الطاقة لمراكز البيانات إلى حوالي ثلاثة أضعاف السعة الحالية بحلول نهاية العقد ، حيث تتراوح حالياً بين 3 و4 % من إجمالي الطلب على الطاقة في الولايات المتحدة

* تقدر إدارة معلومات الطاقة الأمريكية أن وسطي استهلاك المنزل في أمريكا يقارب 10791 كيلوواط ساعة من الكهرباء سنوياً.

على سبيل المثال، بينما يمكن أن تصل إلى 11- 12% في عام 2030 (Green et al, 2024)[87].

تقدر وكالة الطاقة الدولية أن مراكز البيانات والعملات المشفرة والذكاء الاصطناعي استهلكت حوالي 460 تيراواط ساعة من الكهرباء على مستوى العالم في عام 2022، وهو ما يمثل حوالي 2% من إجمالي الطلب العالمي على الكهرباء. وتتطلب الكمية المتزايدة باستمرار من البيانات الرقمية توسيع وتطوير مراكز البيانات لمعالجتها وتخزينها، حيث يأتي الطلب على الكهرباء في مراكز البيانات بشكل رئيسي من الحوسبة التي تستهلك 40% من إجمالي الطلب، ويتطلب التبريد لتحقيق كفاءة معالجة مستقرة حوالي 40% أخرى، أما النسبة المتبقية البالغة 20% فتستهلك في معدات تكنولوجيا المعلومات الأخرى المرتبطة بباقي العمليات (IEA, 2024)[88]. وتتوقع الوكالة أن يتراوح استهلاك الكهرباء العالمي لمراكز البيانات والعملات المشفرة والذكاء الاصطناعي ما بين 620 و 1050 تيراواط ساعة* في عام 2026، وهذا يعادل زيادة تتراوح بين 160 تيراواط ساعة إلى 590 تيراواط ساعة من الطلب على الكهرباء في عام 2026 مقارنة بتوقعات الوكالة عام 2022. ولوضع هذه الزيادة الكبيرة في التوقعات في صورة ملموسة يمكن مقارنتها مع استهلاك الكهرباء في السويد الذي بلغ نحو 140 تيراواط ساعة عام 2024، واستهلاك ألمانيا الذي بلغ 540 تيراواط ساعة عام 2024.

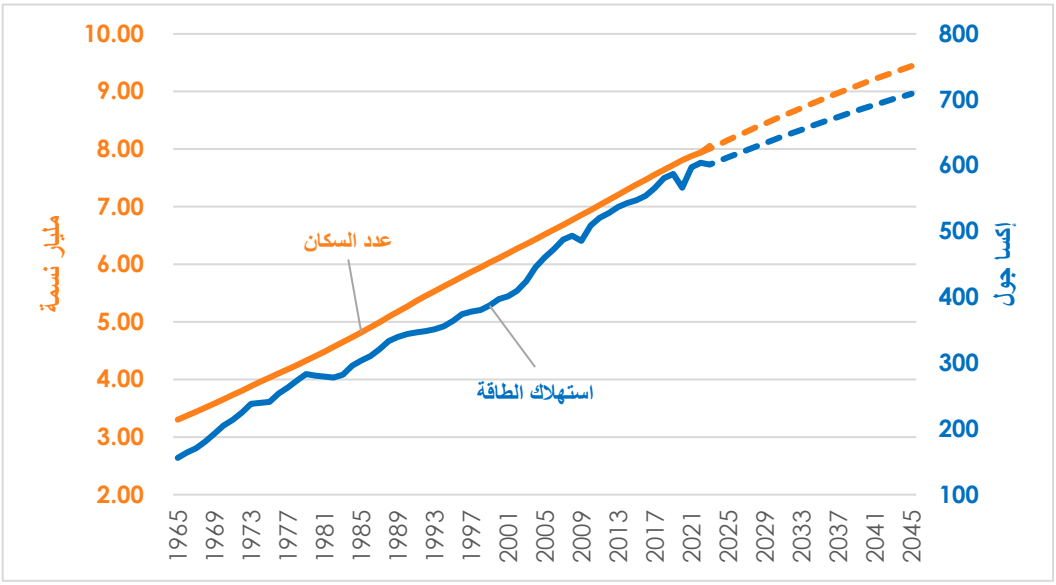
لا يمكن عملياً تجاهل حقيقة حاجة مراكز البيانات إلى طاقة كهربائية مستمرة وثابتة لا يمكن للطاقات المتجددة أن توفرها بسبب طبيعتها المتقطعة المرتبطة بالظروف الجوية. فعلى سبيل المثال، وفي منتصف شهر مارس 2024 تعرضت منشأة Fighting Jays للطاقة الشمسية في Houston في الولايات المتحدة إلى زخات من البرَد أعطبت ألواح الطاقة الشمسية، وأخرجت المحطة التي تبلغ استطاعتها 350 ميغاوات عن العمل (IER, 2024)[89]. وفي شهر أبريل 2024، تسببت الرياح في عاصفة صيفية، في تعطيل تشغيل محطة Omkareshwar في الهند، وهي أكبر محطة طاقة شمسية عائمة في العالم، حيث بعثرت الرياح ألواح الطاقة الشمسية (HTNews, 2024)[90]. وفي سبتمبر 2024، عطلت الرياح العاتية العمل في مزرعة Wenchang لطاقة الرياح في الصين وتسببت في أضرار لستِ عنفات ريحية على الأقل (Yihe, 2024)[91]. وتسببت العواصف كذلك في تدمير عنفتين في مزرعة رياح في Iowa في الولايات المتحدة في شهر مايو 2024 (Murphy, 2024)[92].

* تعادل نحو ثلاثة أضعاف استهلاك إيطاليا من الكهرباء بحسب بيانات Eurostat.

5-4 دور النمو السكاني في الطلب على الطاقة

يؤدي ازدياد عدد السكان إلى نمو متزايد في الطلب على الطاقة للاستخدامات اليومية، خاصة وأن النمو المتزايد للسكان يعني في الكثير من الحالات الانتقال نحو المدن وما يرافق ذلك من ازدياد الطلب على النقل والخدمات بمختلف أنواعها. ولو تم تحليل العلاقة بين النمو السكاني والطلب على الطاقة اعتماداً على البيانات التاريخية لنحو ستين سنة كما هو موضح في الشكل 29، فيمكن وفقاً لهذا النموذج وضع تقدير عام للطلب المتوقع على النفط في عام 2045. تشير بيانات الأمم المتحدة إلى أن عدد سكان العالم تجاوز 8 مليار نسمة في عام 2023، ومن المتوقع أن يتراوح العدد بين 8.88- 9.95 مليار عام 2045، بينما يبلغ التقدير الوسطي نحو 9.4 مليار عام 2045. أي أنه في حالة التقدير الوسطي، هناك نحو 1.4 مليار نسمة سيضافون إلى سكان العالم، أو ما يقارب 18% زيادة عن عددهم في عام 2023.

الشكل 29: العلاقة بين النمو السكاني واستهلاك الطاقة



مصدر البيانات: UN, World Population Prospects 2024. Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2024

وبالتالي من المتوقع أن يشهد العالم زيادة كبيرة في استهلاك الطاقة، فاعتماداً على عامل النمو السكاني فقط، سوف يحتاج العالم إلى نحو 750 إكساجول من الطاقة في عام 2045، أي ما يعادل 336 مليون

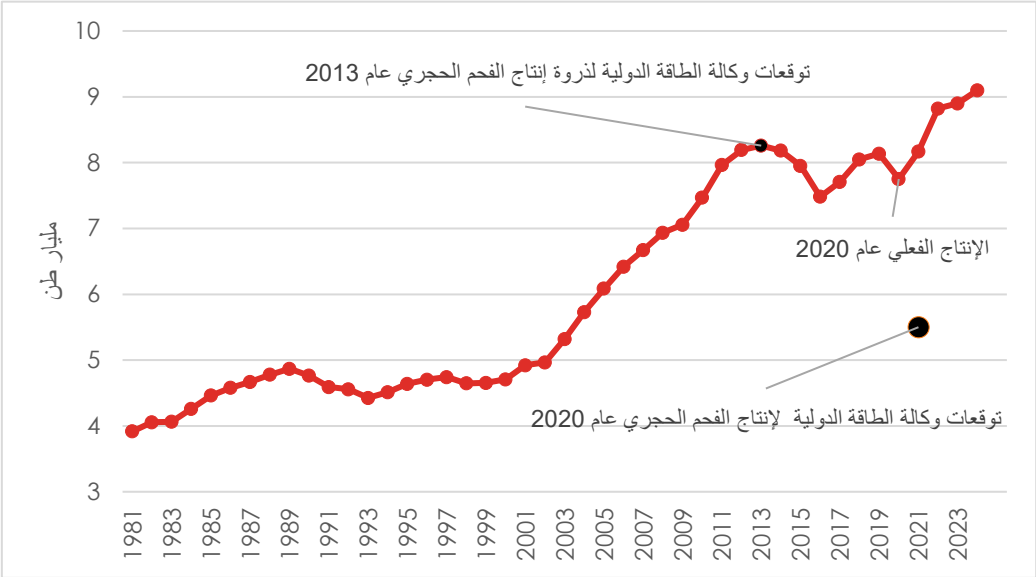
برميل مكافئ نفط في اليوم، وبإضافة باقي العوامل، يمكن القول إن العالم سوف يحتاج إلى 818 إكساجول* من الطاقة عام 2050. ومن المتوقع أيضاً أن يمثل النفط 27% من مزيج الطاقة في عام 2045 على الأقل، وبالتالي فإن الاستهلاك المتوقع من النفط سيكون بحدود 91 مليون برميل من النفط يومياً†. ومع ذلك، فإن هذه التقديرات تعتبر متحفظة حيث لم تأخذ بعين الاعتبار عوامل أخرى مثل النمو الاقتصادي، والتي من شأنها أن تؤدي بدورها إلى زيادة الطلب بشكل أكبر. ولو أخذت باقي العوامل بعين الاعتبار، مثل النمو في الناتج المحلي الإجمالي المشار له فيما سبق، وتغير السياسات وغيرها، فيمكن القول إن الطلب على النفط لن يقل عن **110** مليون برميل في اليوم‡ في عام 2045 (حمش، 2024)[93].

وفيما يخص الغاز الطبيعي، ترى منظمة أوبك أن الطلب على الغاز سوف يصل إلى **87** مليون ب م ن/ي§ في عام 2045، أي ما يقارب 5398 مليار متر مكعب سنوياً، وهو ما يزيد عن 35% من استهلاك عام 2023 الذي بلغ 4010 مليار متر مكعب (OGJ، 2023)[94].

من ناحية أخرى، ترى وكالة الطاقة الدولية (IEA, 2023)[95] أن الطلب على الفحم سوف يتراجع في عام 2050 إلى 3465 مليون طن، مقارنة بالاستهلاك الذي قدره معهد الطاقة (EI, 2024)[96] بنحو 5597 مليون طن عام 2023. ويقدر أن إنتاج الفحم الحجري بلغ أعلى مستوى له في عام 2024 بأكثر من 9 مليار طن (أوابك، 2025)[97]، داحضاً بذلك تنبؤات وكالة الطاقة الدولية التي كانت قد رأت أن الطلب على الفحم الحجري بلغ ذروته عام 2013 حين وصل إنتاجه إلى نحو 8.3 مليار طن، متوقعة أن ينخفض الإنتاج إلى نحو 5.5 مليار طن في عام 2020، لكن الواقع أن الإنتاج في ذلك العام تجاوز 7.7 مليار طن برغم أزمة كوفيد-19، وتجاوز الإنتاج حد 8.8 مليار طن في عام 2023 (EI, 2024). ويبين الشكل 30 تطور إنتاج الفحم الحجري في العالم، والفارق الكبير بين الواقع وبين تنبؤات وكالة الطاقة الدولية.

* حسب تقديرات مبسّطة من معد الدراسة.
† من الهام التنويه إلى أن تنامي الطلب لا يعني بالضرورة توفر ما يكفي من الطاقة لسد هذا الطلب، ففي بعض الدول التي لا تمتلك المصادر المحلية الكافية من الطاقة، قد يؤدي النمو السكاني المتسارع إلى تزايد البطالة وانخفاض القوة الشرائية، مما قد يعني تراجع النمو الاقتصادي.
‡ هذه التوقعات تعبر عن رأي الباحث والتي قدرها اعتماداً على النمو السكاني وعلى النمو المتوقع في الناتج الإجمالي العالمي، وعلى نموذج نمو الطلب العالمي على النفط خلال الستين عاماً الماضية.
§ بر ميل مكافئ نفط في اليوم.

الشكل 30: إنتاج الفحم الحجري في العالم



مصدر البيانات: EI، 2024، وتقرير الأمين العام السنوي، أوابك 2025

ومن الهام النظر إلى أن الصين والهند استهلكتا 69.4% من إجمالي الفحم الحجري المستهلك عام 2023، منها 56% استهلكتها الصين لوحدها، وهو ما يعادل حوالي 11 ضعف استهلاك دول أوروبا مجتمعة، وأكثر من 10 أضعاف استهلاك دول أمريكا الشمالية. وقد ارتفع استهلاك الصين بين عامي 2013 و2023، بما يقارب 324 مليون طن، وارتفع استهلاك الهند خلال نفس الفترة بحوالي 258 مليون طن. تولد الصين نحو ثلث حاجتها من الكهرباء باستخدام الفحجم الحجري، بينما تولد الهند ثلاثة أرباع طاقتها الكهربائية من الفحم الحجري. وبشكل عام، يعتبر توليد الكهرباء المحرك الأول للطلب على الفحم الحجري، حيث تستهلك محطات توليد الكهرباء ثلثي الطلب العالمي (Bryce، 2024)[98].

6-4 الطلب المستقبلي- مقارنة التوقعات

تعمل العديد من المعاهد والمؤسسات بل ومعظم الشركات على وضع تصور أو منظور مستقبلي للطلب على الطاقة، وذلك لعدة أسباب هامة، منها:

- المساعدة على اتخاذ قرارات استراتيجية بشأن الاستثمارات في البنية التحتية للطاقة، وتطوير التقنيات، وتنويع المصادر .
- يمكن للمؤسسات ضمان وجود إمدادات كافية من الطاقة لتلبية احتياجات المستهلكين والقطاعات الاقتصادية المختلفة في المستقبل.
- تحديد فرص تحسين كفاءة استخدام الطاقة وتقليل الهدر، مما يساهم في توفير التكاليف والحد

من الأثر البيئي.

- تقييم الآثار الاقتصادية المحتملة، مثل تأثير أسعار الطاقة على الصناعات والمستهلكين، وتأثير السياسات الحكومية المتعلقة بالطاقة.
- يساعد التخطيط بناءً على تصور مستقبلي للطلب على الطاقة في تحقيق أهداف الاستدامة، ويمكن أن يحفز فهم التحديات المستقبلية على الابتكار التكنولوجي في مختلف المجالات.

لكن العديد من هذه التوقعات، وخاصة تلك التي تصدرها الشركات الكبرى، تحمل صبغة إعلامية ترضي التوجه العام للمتلقين (كدعاة البيئة مثلاً) بينما تعمل الشركات على سيناريوهات مختلفة تحقق مصالحها. وهو ما أشار له الدكتور أنس الحجي بقوله "توقع الشركة الأميركية هو فقط للعلاقات العامة.. ولإرسال رسائل معينة للسياسيين"(بدر، 2024)[99]

وبطبيعة الحال تختلف هذه التوقعات من جهة لأخرى كونها تتعلق غالباً بالفلسفة الشاملة للجهة التي تعدها، حيث تعكس من المقدمة ما يمكن توقعه من التقرير سواء بالنسبة للحكومات أو للمستثمرين.

فعلى سبيل المثال، ذكر سعادة الأمين العام لمنظمة **أوبك** في مقدمة تقرير عام 2024 عن (منظور النفط لعام 2050) أن: "ما تؤكده التوقعات هو أن الحلم الخيالي للتخلص التدريجي من النفط والغاز لا علاقة له بالحقيقة، إذ يشكل النفط والغاز مجتمعين أكثر من 50% من مزيج الطاقة اليوم، ومن المتوقع أن يشكلا نفس النسبة في عام 2050". ويتابع بالقول: "يبلغ إجمالي متطلبات الاستثمار حتى عام 2050 في مجال النفط لوحده 17.4 تريليون دولار. ويتعين على جميع صانعي السياسات وأصحاب المصلحة العمل معاً لضمان مناخ مواتٍ للاستثمار على المدى الطويل، مناخ يناسب المنتجين والمستهلكين، فضلا عن البلدان المتقدمة والنامية" (OPEC, 2024)[100].

بينما قال المدير التنفيذي لوكالة الطاقة الدولية في مقدمة تقرير توقعات الوكالة الصادر عام 2024: "يعزز التحليل الوارد في توقعات هذا العام قناعتي الراسخة بأن أمن الطاقة والعمل المناخي يسيران جنبا إلى جنب، ولا يحتاج العالم إلى الاختيار بين ضمان إمدادات طاقة موثوقة ومعالجة أزمة المناخ". ويتابع بالقول: "أحث صناع القرار في جميع أنحاء العالم على استخدام هذا التحليل لفهم كيفية تغير مشهد الطاقة ... ويجب على صانعي القرار تسريع تحول الطاقة النظيفة لأن الكهرباء النظيفة هي المستقبل" (IEA, 2024)[101].

أما في مقدمة توقعات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية، فيقول مدير الإدارة في المقدمة: " إن توقعاتنا توفر معياراً مفيداً لصانعي القرار في جميع أنحاء العالم" ويتابع بالقول" نتوقع أن يتم تعديل الطلب المتزايد على الطاقة من خلال انخفاض كثافة الطاقة **حيث** سيتم استخدام طاقة أقل لكل وحدة

من النشاط الاقتصادي، ومن خلال انخفاض كثافة الكربون المدفوعة إلى حد كبير بالانتشار واسع النطاق للطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء" (EIA, 2023)[102].

ومن بين أهم العوامل المؤثرة على الاستهلاك/ الطلب كما ذكر سابقاً كل من النمو السكاني، والنمو الاقتصادي، وبالطبع سعر الطاقة وكثافتها، وحتى انبعاثات الكربون التي باتت تحتل حيزاً من برنامج التوقعات، لذلك تشكل الافتراضات حول التطور المستقبلي لهذه العوامل مسار الطلب المتوقع على الطاقة والانبعاثات المقابلة. ونظراً لعدم اليقين حول العوامل المؤثرة على الطلب، تتضمن هذه التوقعات سيناريوهات مختلفة تعكس عوامل عدم اليقين، كما باتت تعكس التغيرات المرتبطة بالخطط المستقبلية لتحول الطاقة. فعلى سبيل المثال، وضعت أوبك توقعاتها على أساس أن عدد سكان الأرض عام 2023 بلغ 8.1 مليار نسمة، وسوف يصل إلى 9.7 مليار نسمة عام 2050، بينما اعتمدت وكالة الطاقة الدولية على أن عدد السكان كان 8 مليار نسمة عام 2022، وسيصل إلى 8.5 مليار نسمة عام 2030، و9.7 مليار نسمة عام 2050. واعتمدت إدارة معلومات الطاقة الأمريكية على أن العدد كان 7.9 مليار نسمة عام 2022، وسوف يبلغ 9.6 مليار نسمة عام 2050. أما توقعات الناتج الإجمالي المحلي، وكثافة الطاقة، حسب التوقعات المختلفة، فيلخصها الجدول 11 :

الجدول 11: الناتج الإجمالي المحلي وكثافة الطاقة حسب مختلف التوقعات

المعيار	أوبك	وكالة الطاقة الدولية	إدارة معلومات الطاقة
متوسط نمو الناتج الإجمالي المحلي السنوي	2.9% بين 2023- 2050	2.6% بين 2023- 2050	2.6% بين 2022- 2050
كثافة الطاقة العالمية سنوياً	(-2%) بين 2023- 2050	(-1.85%) بين 2023- 2050	(-1.46%) بين 2023- 2050
مصدر البيانات: (OPEC, 2025)، (IEA, 2024)، (EIA, 2023)			

ويلاحظ كذلك أن أوبك تنظر في ثلاثة سيناريوهات، هي: الحالة المرجعية، والسيناريو القائم على التكنولوجيا، وسيناريو النمو العادل. بينما تدور توقعات وكالة الطاقة الدولية حول ثلاثة سيناريوهات، هي: سيناريو السياسة المعلنة، وسيناريو التعهدات المعلنة، وسيناريو صافي الصفر الكربوني بحلول عام 2050. وبدون الخوض في التفاصيل الكثيرة، يمكن الإشارة إلى أن أوبك تعتقد أن التكنولوجيا سيكون لها دور هام في الطلب العالمي من ناحية تحسين الكفاءة وخفض التكاليف، بينما تراهن وكالة الطاقة الدولية على أن تكاليف التكنولوجيا النظيفة ستستمر في الانخفاض بحيث تكون بيئة الاستثمار قابلة لاستيعاب أقوى لمشاريع الطاقة النظيفة، أما إدارة معلومات الطاقة فتقر بالدور المساهم للتكنولوجيا في الحد من استهلاك الوقود الأحفوري عموماً، لكنها تعترف أيضاً بأن السياسات الحالية غير كافية

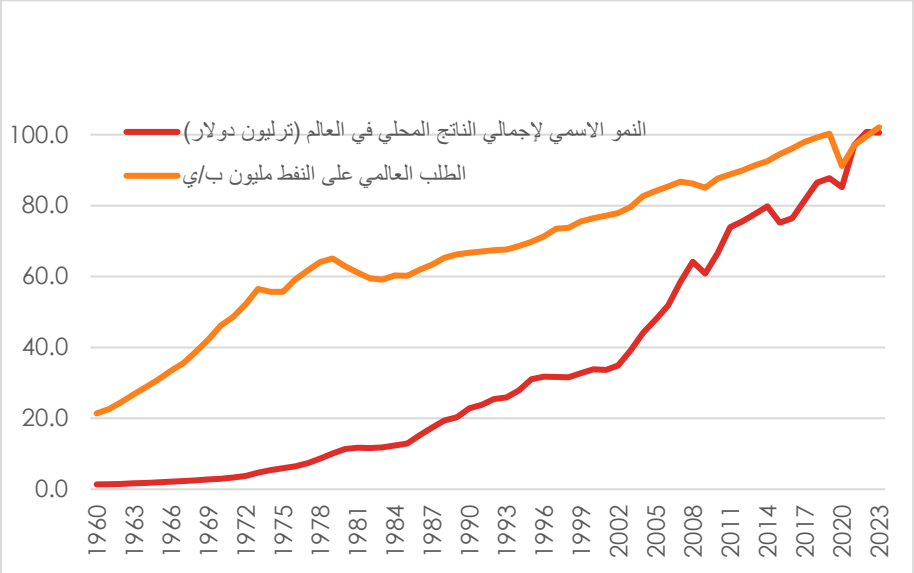
لخفض انبعاثات قطاع الطاقة العالمي.

عملياً، يلاحظ وجود العديد من الاختلافات في المعايير وآلية النظر إليها ومعالجتها، وبالتالي مخرجاتها. لكن الشيء المشترك هو أن مختلف الهيئات تتفق على أن الطلب العالمي على الطاقة في تزايد مستمر، وهو أمر سيكون مدفوعاً بشكل رئيسي بنمو الاستهلاك في الاقتصادات النامية ومن أهمها دول آسيا، علاوة على النمو المجتمعي الطبيعي في كل دول العالم.

ويبقى الخلاف الرئيسي بين المعاهد المختلفة هو في شكل الطاقة المستقبلي. أو بكلمات أخرى: ما هو مصدر الطاقة الذي سوف يلبي النمو على الطلب؟

وقد أشير آنفاً إلى أنه -وعلى وجه الإجمال- فإن تتبع بيانات الاستهلاك يشير إلى أن متوسط معدل نمو الاستهلاك السنوي من الطاقة خلال نصف قرن (منذ عام 1974 وحتى اليوم) بلغ 1.8%. وهي فترة ربما تكون كافية لوضع تصور عن معدل النمو، مع استبعاد الفترات التي شهدت قفزات كبيرة تجعلها (إحصائياً) فترات أو نقاطاً شاذة. يبين الشكل 31 الطلب على الطاقة بالعلاقة مع الناتج المحلي الإجمالي، ويظهر فيه أن الناتج المحلي الإجمالي العالمي أبدى تسارعاً ملحوظاً في النمو بعد السبعينيات، وهذا ما يعكس التوسع الاقتصادي، ثم ظهرت تراجعات في النمو في أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات (الأزمة النفطية 1979)، وكذلك في فترات الركود الاقتصادي في أواخر التسعينيات والأزمة الاقتصادية في عام 2008.

الشكل 31: العلاقة بين الناتج المحلي الإجمالي والطلب على الطاقة

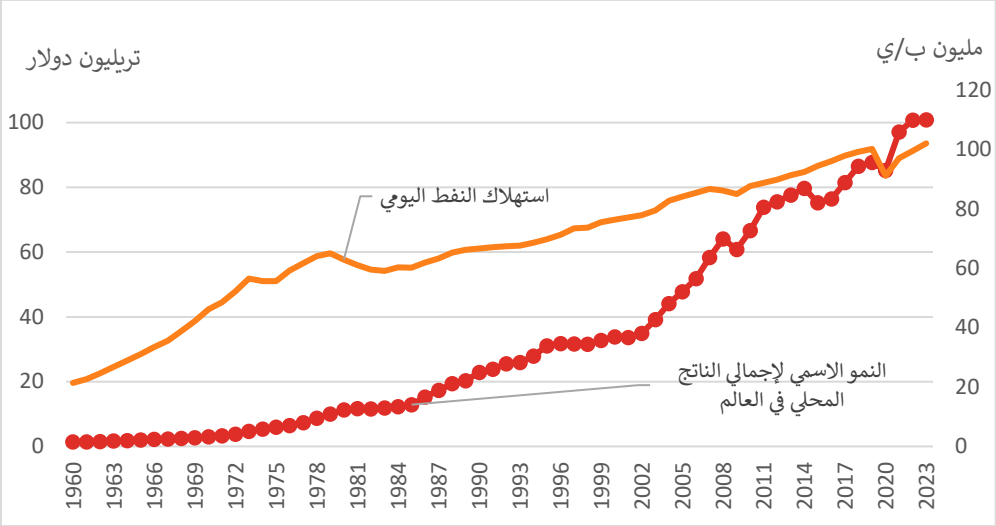


المصدر: إعداد الباحث بناء على بيانات من: UN, World Population Prospects 2022. Energy Institute Statistical Review of World Energy, World Bank, OPEC, 2023

ويلاحظ من الشكل كذلك وجود زيادات ملحوظة في الطلب على النفط مع تسارع ملحوظ في العقود الأخيرة، وهو ما يشير إلى تزايد الاعتماد على النفط كمصدر رئيسي للطاقة، لكن وبالرغم من تزايد الطلب، إلا أن التغيرات في الأسعار والسياسات قد تؤثر بشكل مؤقت على هذا النمو (كما هو الحال في فترات الركود الاقتصادي العالمية، أو فترة جائحة كورونا مثلاً في عام 2020)، كما يبين الشكل وجود زيادة كبيرة في الطلب على النفط في العقدين الأخيرين، وهو على الأغلب بسبب النمو الصناعي في الدول الكبرى، بالإضافة إلى ازدياد حركة النقل العالمي وازدياد استهلاك الطاقة.

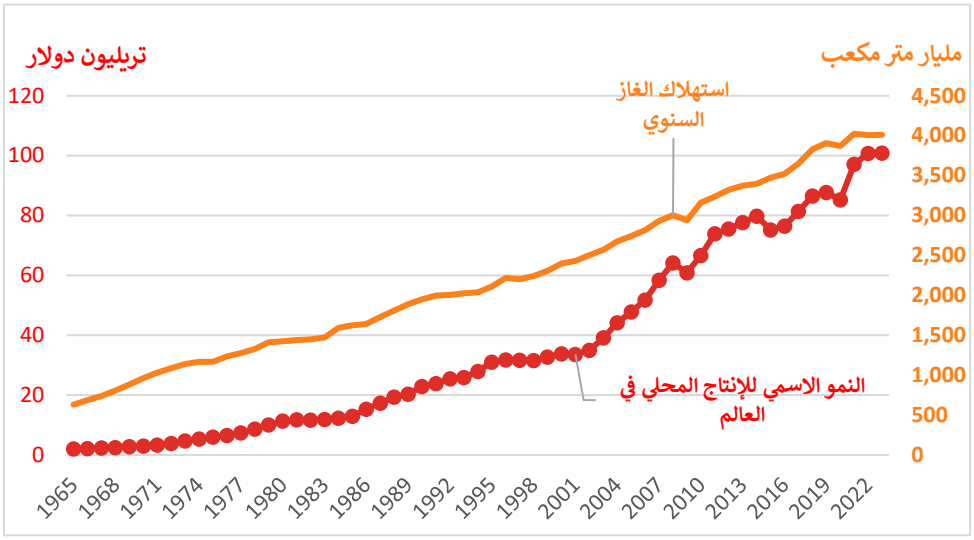
وبطبيعة الحال فإن الناتج المحلي الإجمالي ليس المؤشر الوحيد على رفاهية الدولة، إذ تلعب عوامل أخرى مثل توزيع الدخل ونوعية الحياة والخدمات الاجتماعية والاستدامة البيئية أدواراً حاسمة في تقييم التنمية والازدهار الشاملين للبلد. لكن قياس النمو الاقتصادي من خلال الناتج المحلي الإجمالي يحدد القيمة الإجمالية لجميع السلع والخدمات المنتجة داخل حدود البلد خلال إطار زمني محدد. ويمكن القول إن هناك رابطاً بين النمو الاقتصادي وزيادة الطلب على النفط، لكن هذا الرابط بدأ يظهر فيه شيء من التباين في السنوات الأخيرة، مما يعكس الاتجاه نحو تحسين الكفاءة الطاقية من جهة، ونزعات التحول إلى مصادر طاقة أكثر تنوعاً. ولمزيد من التفصيل، يمكن من خلال الشكلين 32 و33 ملاحظة نمط واضح بين استهلاك النفط والغاز بالعلاقة مع نمو الناتج المحلي الإجمالي للعالم GDP، ويلاحظ منهما الارتباط بين هذه العوامل، فارتفاع الناتج المحلي مرتبط باستهلاك النفط والغاز، كما أن استهلاك الطاقة يعكس بدوره إلى حدٍ ما حالة التنمية كما تقدم سابقاً.

الشكل 32: استهلاك النفط بالعلاقة مع الناتج المحلي الإجمالي للعالم



إعداد الباحث اعتماداً على بيانات من: UN, World Population Prospects 2022. Energy Institute Statistical Review of World Energy, World Bank, OPEC, 2024

الشكل 33: استهلاك الغاز بالعلاقة مع الناتج المحلي الإجمالي للعالم



إعداد الباحث اعتماداً على بيانات من: UN, World Population Prospects 2022. Energy Institute Statistical Review of World Energy, World Bank, OPEC, 2024

يشير منظور قديم نسبياً للبنك الدولي إلى أن الناتج الإجمالي العالمي سيناهز 135 تريليون دولار في عام 2050 (WB, 2006)[103]. لكن مؤسسات مالية أخرى رأت مؤخراً أن الناتج المحلي العالمي سيبلغ 227.9 تريليون دولار في عام 2050 (Goldman Sachs, 2023)[104]، أي أنه سيتضاعف مرتين وربع عن الناتج المحلي العالمي في عام 2023، والذي بلغ 100.9 تريليون دولار.

أما منظمة أوبك (OPEC, 2023)[105]، فترى أن النمو السنوي في الناتج المحلي العالمي سوف يكون 3% بين عامي 2022 و2045، وبتطبيق هذه النسبة على الناتج المحلي العالمي لعام 2022، فسوف يكون إجمالي الناتج المحلي العالمي في عام 2024 بحدود 193.3 تريليون دولار، ولو بقيت النسبة على حالها حتى عام 2050، فسوف يتجاوز الناتج المحلي الإجمالي العالمي 224 تريليون دولار.

يبين الجدول 12 النسب المئوية لمزيج الطاقة حسب مختلف التوقعات (حمش، 2022)[106] حتى عام 2045، ويلاحظ منه أن حصة النفط والغاز في عام 2045 لن تقل عن 49% حسب رؤية إدارة معلومات الطاقة الأمريكية*.

* إدارة معلومات الطاقة الأمريكية تغير هذه النسبة بشكل دوري

الجدول 12: نسبة مصادر الطاقة في مزيج الطاقة المستقبلي

الجهة	مصدر الطاقة	2025	2045
BP	نفط	36%	29%
	غاز	25%	26%
	فحم حجري	25%	19%
	الوقود الأحفوري	**86%**	**74%**
	نفط+ غاز	**61%**	**55%**
	باقي المصادر	**14%**	**26%**
OPEC	نفط	31%	28%
	غاز	23%	24%
	فحم حجري	24%	17%
	الوقود الأحفوري	**79%**	**70%**
	نفط+ غاز	**54%**	**53%**
	باقي المصادر	**21%**	**30%**
EIA	نفط	27%	24%
	غاز	22%	20%
	فحم حجري	23%	21%
	الوقود الأحفوري	**72%**	**65%**
	نفط+ غاز	**49%**	**45%**
	باقي المصادر	**28%**	**35%**

المصدر: حمش، 2022.

يشير تتبع التوقعات السابقة للطلب العالمي على الطاقة، إلى أن منظمة أوبك كانت دوماً الجهة الأكثر دقة في توقعاتها، ومردّ ذلك هو واقعيتها وتفّهمها العميق لأسواق النفط بالدرجة الأولى، وأسواق الطاقة عموماً، علاوة على أن احتياطياتها وإنتاجها من النفط يمثلان الحصة الأكبر ضمن الصناعة البترولية، مما يجعلها تركز على المنحى العملي بعيد الأجل في تقديراتها للطلب العالمي.

وتقدر أوبك أن الطلب العالمي على النفط في الحالة المرجعية سيرتفع بنحو 17.9% عن معدلات عام 2023.

يوضح الجدول 13 توقعات استهلاك الطاقة عالمياً في عام 2050، بينما يبين الجدول 14 توقعات الطلب العالمي على النفط في عام 2050.

الجدول13 : توقعات استهلاك العالم من الطاقة في عام 2050

	استهلاك الطاقة الأولي إكساجول
أوبك	**830**
وكالة الطاقة الدولية	**722**
إدارة معلومات الطاقة	**902**
مصدر البيانات: OPEC: 2024 World Oil Outlook 2050 BP: Energy Outlook 2050 EIA: International Energy Outlook 2023 IEA: World Energy Outlook 2024	

الجدول14 : توقعات الطلب العالمي على النفط في عام 2050- مليون ب/ي

	2050
أوبك	**120.1**
BP	**77**
وكالة الطاقة الدولية	**97**
إدارة معلومات الطاقة	**110**
مصدر البيانات: OPEC: 2024 World Oil Outlook 2050 BP: Energy Outlook 2024 EIA: International Energy Outlook 2023 IEA: World Energy Outlook 2024	

يلاحظ من الجدول 14 وجود فارق كبير بين التوقعات خاصة من قبل BP، هذا الفارق يفترض أن يعكس نظرة صارمة من قبل BP نحو التحول الطاقي رغم أن الأرقام في الجدول هي للحالة المرجعية التي اعتمدتها الشركة في منظورها المستقبلي، وليست لحالة صافي الصفر الكربوني التي قدرت الشركة فيها أن الطلب على النفط لن يتجاوز 28 مليون ب/ي (BP, 2024)[107]، وهي في الغالب نظرة تحمل في مضمونها توجهات غير واقعية. والواقع أن هذه التوقعات صدرت في شهر يوليو عام 2024، ثم واجهت BP انتقادات شديدة لتراجع عن أهدافها في إزالة الكربون، فقد سبق لها أن قدمت 10 أهداف جديدة، بما في ذلك تحولها إلى شركة طاقة خالية من الانبعاثات بحلول عام 2050. ومع ذلك ، بحلول أوائل عام 2023، خفضت الشركة أهدافها لخفض الانبعاثات بنسبة 40% بحلول عام 2030 إلى 25% فقط. وفي أكتوبر من نفس العام، صدرت إفادات تبين أن BP تخطط للتخلي عن قيودها على إنتاج الوقود الأحفوري، والعودة للاستثمار في النفط والغاز في العديد من المناطق الجديدة ، بما في ذلك الشرق الأوسط وخليج المكسيك.

وهنا لابد من التنويه إلى أن وكالة الطاقة الدولية IEA تمثل محوراً يعنى بمصالح المستهلكين (في

أوروبا على وجه الخصوص) وتعمل على وضع تصورات مستقبلية حول الطلب على الطاقة والمصادر المتوقعة، ولكنها بدأت منذ العقد الماضي تميل إلى اتخاذ مواقف متطرفة من موضوع البيئة وتغير المناخ، كان أكثرها تطرفاً الدعوة إلى التوقف تماماً عن الاستثمار في مجال الوقود الأحفوري، وذلك ضمن* "خارطة الطريق للوصول إلى انبعاثات صفرية في عام 2050"، والتي أصدرتها وكالة الطاقة الدولية في شهر أيار/مايو 2021، وأشارت الوكالة في تلك الخارطة إلى أن تعهدات الحكومات بشأن المناخ - حتى لو تم تحقيقها بالكامل - هي أقل بكثير مما هو مطلوب للوصول إلى انبعاثات صفرية من غاز ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2050. وتبنت الوكالة في خارطتها نموذجاً أكثر صرامة يهدف إلى خفض الانبعاثات بنسبة 38% عن مستويات عام 2021 بحلول عام 2030. ورأت أن ذلك يمكن أن يتم دون التأثير على استقرار إمدادات الطاقة وبقائها بأسعار معقولة. وبينت وكالة الطاقة الدولية أنه لتحقيق أهدافها، يجب أن تبلغ السعة السنوية المركّبة من الطاقة الشمسية 630 غيغاواط في عام 2030، بينما يجب أن تبلغ السعة المركّبة من طاقة الرياح 390 غيغاواط في نفس العام. لكن أزمة الغاز التي بدأت في أوروبا أواخر أكتوبر عام 2021، بيّنت أن ميزان الطاقة لم يكن عملياً في صالح دعوات الوكالة، فمثلاً يتوقع الاتحاد الأوروبي أن يوفر الهيدروجين ما يتراوح بين 20% و25% من إجمالي طاقته بحلول عام 2050، ومع أن الهيدروجين يشكل محور تركيز النشاط والطموح الأوروبي، فإن بيانات المفوضية الأوربية توضح أنه يوفر أقل من 2% من هذه الطاقة (EU, 2023)[108]، أي أن الاتحاد الأوروبي يطمح إلى رفع حصة الهيدروجين بنحو 12 ضعفاً في غضون 25 عاماً. ويمكن الإشارة هنا أيضاً إلى استراتيجية وطنية طموحة وضعتها تشيلي في عام 2020، تهدف إلى قيامها بإنتاج الهيدروجين الأخضر الأرخص في العالم بحلول نهاية العقد الحالي، والدخول إلى قائمة أكبر ثلاثة بلدان مصدِّرة له على مستوى العالم بحلول عام 2040، لكن المفارقة هي أن تشيلي حتى تاريخ نشر هذه الدراسة لا تنتج أي هيدروجين أخضر على مستوى صناعي†.

عملياً، لا يمكن تجاهل الدور المتذبذب الذي تلعبه وكالة الطاقة الدولية في التنبؤات المختلفة، وهو ما يستدعي المزيد من التفصيل حول مواقفها، إذ باتت في السنوات الأخيرة تعبر عن توجه سياسي أكثر مما هو واقعي، ويذكر هنا أن معالي وزير الطاقة السعودي الأمير عبد العزيز بن سلمان، ذكر ضمن جلسة حوارية في منتدى قطر الاقتصادي: "إن الوكالة الدولية للطاقة أثبتت أن لديها موهبة خاصة هي أن تكون

* Roadmap to Net Zero Emission by 2050

† الهيدروجين الأخضر ينتج من تحليل المياه باستخدام كهرباء مولدة من مصادر الطاقة المتجددة.

مخطئة باستمرار"(العربية، 2025)[109].

ويلاحظ أنه لا تكاد تنقضي فترة قصيرة إلا وتخرج الوكالة بتقرير يعرضها لانتقادات بسبب اتخاذها مواقف متناقضة بشأن النفط وتحول الطاقة، فقد أكدت الوكالة مراراً وتكراراً على ضرورة التصدي لتغير المناخ وتحقيق الانبعاثات الصفرية الصافية، كما ورد في "خارطة الطريق لصافي الصفر الكربوني بحلول عام 2050"، والذي حاولت من خلاله تسليط الضوء على أهمية الحاجة إلى الابتعاد عن الوقود الأحفوري، والاستثمار بكثافة في مصادر الطاقة المتجددة.

ثم نشرت الوكالة على موقعها الرسمي، مقالاً يبدو (ظاهرياً) من خلال عنوانه بأنها باتت تعي أكثر الدور الهام الذي يلعبه النفط في التحول الآمن للطاقة، فقد كان العنوان الصريح للمقال المنشور في شهر مارس 2024: "سيكون التركيز القوي على أمن النفط أمراً بالغ الأهمية طوال فترة التحول إلى الطاقة النظيفة" (Graham and Atigui, 2024)[110]. ويدغدغ المقال بعض المشاعر البترولية حين يذكر ما نصّه: "إن التركيز الدائم على أمن النفط هو نتيجة للحاجة المستمرة لتشغيل السيارات والشاحنات والسفن والطائرات، وكذلك لإنتاج البتروكيماويات اللازمة لتصنيع عدد لا يحصى من العناصر".

ولا ريب أن الوكالة تعلم منذ تأسيسها قبل نصف قرن بالأهمية البارزة للنفط كوقود وكلقيم لصناعة البتروكيماويات، إلا أن طرح هذه الرسالة التي تبدو إيجابية حول أهمية النفط، ترافق في نفس المقال مع القول بأن "الاستهلاك العالمي للنفط وصل إلى مستوى قياسي في عام 2023، ومن المتوقع أن يضعف الاعتماد على النفط بشكل أكبر في أجزاء كثيرة من العالم في السنوات المقبلة. وتبشر الوكالة بأن التحول إلى اقتصاد الطاقة النظيفة يتسارع مع ارتفاع مبيعات السيارات الكهربائية، وتحسن كفاءة استخدام الطاقة، والتقدم السريع لتقنيات الطاقة النظيفة الأخرى، وترى بالتالي أن ذروة الطلب العالمي على النفط تلوح في الأفق قبل نهاية هذا العقد، أي خلال خمس سنوات فقط.

في الواقع إن رسالة وكالة الطاقة الدولية حول أهمية النفط ليست وليدة اليوم، إذ أصدرت الوكالة في أبريل عام 2023، تقريراً بعنوان "المسار الموثوق إلى 1.5 درجة مئوية (IEA, 2023)[111]" ، وتضمن فيما تضمنه الإجراءات الرئيسية اللازمة للبقاء في مدار هدف اتفاقية باريس للحد من ارتفاع درجة حرارة الأرض، وذكرت وكالة الطاقة الدولية في ذلك الحين أن السؤال الرئيسي الذي يجب طرحه هو: "ما الذي يجب القيام به الآن لتعزيز العمل -على المدى القريب- لوضع العالم على مسار موثوق به، يتوافق مع هدف أن لا يزيد الاحترار العالمي عن 1.5 درجة مئوية في عام 2100". وبطبيعة الحال، فعند الإشارة إلى الإضافات من الطاقة المتجددة يكون القصد الفعلي للوكالة بشكل أساسي الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وقد بين ذلك التقرير أربعة توجهات شكلت أسس المسار الذي اقترحته الوكالة، ولعل من أهم

تلك التوجهات ضرورة أن تتضاعف السعة المضافة من الطاقات المتجددة ثلاث مرات عن مستويات 2022 بحلول عام 2030، لتصل إلى حوالي 1200 جيجاوات سنوياً، وهو ما يمثل في المتوسط 90% من قدرة التوليد الجديدة كل عام. ثم نشرت الوكالة في شهر سبتمبر 2023، تحديثاً لذلك التقرير، حمل عنواناً يتضمن تناقضاً جلياً، إذ كان العنوان: "لقد ضاق المسار نحو الحد من الاحتباس الحراري العالمي بما لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية، لكن نمو الطاقة النظيفة يبقيه مفتوحاً" (IEA, 2023)[112] وكان من ضمن النقاط البارزة في التحديث أن مبيعات سيارات الشحن المتوسطة والثقيلة ذات الانبعاثات الصفرية لابد أن تصل إلى حصة سوقية تبلغ حوالي 35% في عام 2030، ويجب كذلك أن تصل مبيعات السيارات الكهربائية في نفس الفترة إلى حصة سوقية تبلغ حوالي 67%. أي أن الحصة السوقية لمبيعات السيارات الكهربائية يجب أن تتضاعف قرابة 5 مرات خلال 7 سنوات، إذ أن حصتها السوقية -بحسب التقرير نفسه- لم تتجاوز 14% من المبيعات في عام 2022. وبطبيعة الحال لا تنسى الوكالة أنه للوصول إلى هذه الحصة السوقية، فلابد من فرض معايير جديدة حول غاز ثاني أكسيد الكربون، وتطبيق حظر إنتاج سيارات محركات الاحتراق الداخلي ، وبالتأكيد زيادة الحوافز الحكومية والاستثمار في البنية التحتية لشواحن السيارات.

إن التاريخ القريب يؤكد أن مواقف وكالة الطاقة الدولية تتغير باستمرار، ففي عام 2017 مثلاً، أصدرت الوكالة تحذيراً من أن الإمدادات العالمية قد لا تتمكن من مواكبة الطلب بعد عام 2020 إذا لم يتفق العالم على مشاريع بترولية جديدة في أقصر وقت ممكن، وطلبت من المستثمرين العمل فوراً على إيجاد وتطوير المزيد من الإمدادات النفطية، وذكرت حرفياً أن قطاع النفط والغاز في سيناريو السياسات الجديدة يتطلب استثماراً تراكمياً يبلغ حوالي 21 تريليون دولار بين عامي 2017 و 2040، ثلاثة أرباعه في قطاع الاستكشاف والإنتاج، لذلك يتعين أن يبلغ متوسط الإنفاق الرأسمالي في هذا القطاع حوالي 640 مليار دولار كل عام لتجنب أي اختلالات محتملة بين العرض والطلب، و يأخذ هذا الرقم في الاعتبار الحاجة إلى تلبية الطلب المتزايد على النفط والغاز مع تعويض الانخفاضات الأساسية في مصادر الإنتاج الحالية (IEA, 2017)[113]. ثم عادت في عام 2021 لتطلب من العالم أن يتوقف عن الاستثمار في ميدان الاستكشاف والإنتاج نهائياً، وذكرت حرفياً: لتحقيق صافي انبعاثات صفرية بحلول عام 2050، يجب ألا يكون هناك أي استثمار جديد في إمدادات النفط والغاز(IEA, 2021)[114].

وبعد الأزمة الروسية الأوكرانية، والخوف من تعثر إمدادات الغاز الروسي، ارتفع نداء الوكالة مجدداً ليبين أهمية ضخ استثمارات جديدة في مجال استكشاف وإنتاج الغاز الطبيعي نظراً لأهمية هذه المشاريع في تلبية الطلب المتزايد على الطاقة. ولا شك أن للموقف الأخير للوكالة أسباب مختلفة، ربما

كان بعضها مرتبطاً بالانتخابات في بعض الدول بعد تراجع شعبية الأحزاب التي تدعم التحول الطاقي على حساب ارتفاع أسعار الطاقة، لكن المرجح أن السبب الرئيسي كان التحركات الاحتجاجية الكبيرة من المزارعين في مختلف دول أوروبا والتي تعترض على النتائج المتوقعة من موقف وكالة الطاقة الدولية من التحول الطاقي، فقد بدأت تحركات المزارعين في أوائل عام 2022 في عدة دول أوروبية، كان أبرزها فرنسا، حيث نظم المزارعون، احتجاجات واسعة النطاق ضد خطط الحكومة لفرض ضريبة على الكربون والأسمدة، وتجمع الآلاف من المزارعين في شوارع باريس ومدن أخرى، مطالبين بإعفاءات من الضريبة. ثم انتقلت تلك التحركات في مارس 2023، إلى ألمانيا حيث احتج المزارعون على خطط الحكومة لحظر استخدام بعض المبيدات الحشرية لأسباب بيئية، معتبرين أن هذه الخطوة ستضر بإنتاجهم، فنظموا احتجاجات في برلين ومدن أخرى، مطالبين الحكومة بتقديم بدائل فعالة للمبيدات الحشرية. وفي مطلع عام 2024 تسببت آلاف الجرارات الزراعية في إصابة وسط مدينة برلين بالشلل، حيث احتج المزارعون من جميع أنحاء ألمانيا بسبب ارتفاع التكاليف وخطة الإلغاء التدريجي لدعم الوقود الزراعي. وتحرك المزارعون في هولندا في مايو 2023، محتجين ضد خطط الحكومة لتقليل انبعاثات النيتروجين من الزراعة، مطالبين الحكومة بتعويضات عن الخسائر التي قد يتكبدونها نتيجة لهذه الخطط. وقد انتشرت هذه الاحتجاجات إلى دول أوروبية أخرى، مثل: إيطاليا، وإسبانيا، وبولندا، والمملكة المتحدة، حيث تسببت محاولة الابتعاد عن الوقود الأحفوري واستبداله -ولو جزئياً- بالطاقات المتجددة، إلى ارتفاع كبير في أسعار الكهرباء أدى إلى تراجع أرباح المزارعين، وترافق ذلك مع تخفيض الدعم الحكومي للوقود المستخدم في المعدات الزراعية، وفرض ضرائب متزايدة على الكربون. كما احتج المزارعون على التعقيدات البيروقراطية المتعلقة بالامتثال للوائح البيئية في أوروبا، بينما يواجهون صعوبة في التنافس مع الواردات الغذائية الرخيصة من البلدان ذات اللوائح الأقل صرامة.

وبالرغم من التجاهل الإعلامي النسبي لهذه التحركات، إلا أنها كما يبدو نجحت في لفت الانتباه إلى التحديات التي تواجه القطاع الزراعي في ظل التحول الطاقي، خاصة فيما يتعلق بزيادة أسعار الطاقة وتأثيرها على تكاليف الإنتاج. ويبدو كذلك أن هذا ما دفع وكالة الطاقة الدولية إلى إعادة تقييم مسار التحول الطاقي، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثيره على القطاعات الأخرى، وخاصة من ناحية ارتباطه بالأمن الغذائي، إذ بدأت الوكالة منذ عام 2022 في التأكيد على أهمية ضمان الأمن الغذائي كجزء من عملية التحول الطاقي، مع مراعاة احتياجات القطاع الزراعي، ويظهر أنها باتت مجبرة على اتخاذ نهج أكثر توازناً، يراعي -ولو إعلامياً- إيجاد حلول تناسب مصالح الجميع.

الخلاصة والاستنتاجات

- نظام الطاقة (أيُّ طاقة) هو كيان مادي تطور عبر عصور طويلة، ويشمل البحث عن الموارد وإنتاجها وتحويلها ونقلها إلى المستهلك النهائي بشكل مستدام ومقابل تكلفة معقولة، وبالتالي فليس من المنطقي الحديث عن سيناريوهات التحول بشكل مبسّط وكأن الأمر هو مجرد اتخاذ قرار بالتحول من شكل إلى آخر من أشكال الطاقة، فهناك ملايين الأصول ما بين معدات وعمليات ونظمٍ تتكامل مع بعضها البعض مكونة ما يسمى نظام الطاقة. كما أن الكهرباء -كناتج عن التحول إلى مصادر الطاقة البديلة- مثلت أقل من 21% من استهلاك الطاقة حسب النوع في العالم عام 2023، وترى وكالة الطاقة الدولية أنه قد يبلغ نحو 30% في عام 2025، أي أنه سيزداد بحوالي 9% فقط.
- التحول الطاقي بحاجة إلى بنية تحتية هائلة، وسلاسل إمداد معقدة، وتكاليف باهظة يصعب تقديرها، علاوة على حاجته إلى موارد كبيرة من العناصر الحرجة والنادرة. والسيناريوهات المتشددة عن أهمية التحول الطاقي في فترة وجيزة لا تأخذ بعين الاعتبار الإمكانية الفعلية لتأمين هذه الموارد، بل إن الواقع الملموس يظهر أنه من شبه المستحيل تأمين الكميات الكافية من هذه الموارد لتحقيق السيناريوهات المتشددة. كما لا تبين السيناريوهات المختلفة من الذي سيغطي الأعباء المالية المطلوبة. إضافة إلى ذلك ورغم أن بعض الدول مثل كازاخستان وأستراليا والولايات المتحدة وفيتنام تعمل على زيادة إنتاجها وتطوير تقنياتها في مجال سوق العناصر الحرجة والنادرة، إلا أن الصين تهيمن فعلياً على حصة كبيرة من هذا السوق في العالم، وهذا يمنح الصين نفوذاً اقتصادياً كبيراً، ويجعل الدول الأخرى تعتمد بشكل كبير على وارداتها من هذه العناصر، مما يمكن أن يُعقّد جهود التحول الطاقي، خاصة إذا قررت الصين تقييد صادراتها أو رفع أسعارها. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي ذلك إلى تأخير أو زيادة تكلفة مشاريع الطاقة المتجددة في الدول الأخرى.
- غالباً ما يتم تجاهل حقيقة أن مليارات البشر يعيشون في فقر طاقي حالياً، وأن التحول الطاقي لن يحسّن من وضعهم بل قد يزيدهم بؤساً على بؤس. وفي المقابل توجد دول يستطيع أفرادها تحمل كلفة التحول الطاقي، وإن كانوا سوف يعانون من ارتفاع أسعار الطاقة. فمع أن أسعار الكهرباء انخفضت في عام 2024 بنسبة 20% مقارنة بعام 2023 في العديد من دول العالم مثل الولايات المتحدة، والاتحاد الأوروبي، والمملكة المتحدة، إلا أن هذا الانخفاض كان بسبب تراجع كلفة الطاقة عموماً في العالم، لكن أسعار الكهرباء لم ترجع في تلك الدول إلى مستوياتها قبل انتشار جائحة كوفيد-19.
- طرح الكثيرون توقعات مختلفة لذروة الإمداد، لكنها لم تتحقق حتى اليوم، ويبدو أن توقعات ذروة الطلب تتبع نفس المسار حالياً، خاصة وأن العديد من الجهات لم تنفذ تعهداتها المناخية، أو ألغتها

بالكامل، كما تراجعت حوافز السيارات الكهربائية أو ألغيت في عدد من دول العالم. من ناحية أخرى يتم تجاهل الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة وانخفاض كفاءة ألواح الطاقة الشمسية.

- تشير البيانات والمعايير المتاحة حالياً إلى أن الطلب على الطاقة قد يصل إلى حوالي 818 إكساجول في عام 2050، يشكل النفط والغاز 53% منها على الأقل. وبالتالي فإن الطلب على النفط والغاز سوف يستمر في النمو في المدى المنظور، ويتوقع أن يصل إلى 120 مليون برميل يومياً في عام 2025، وبحيث يمثل النفط أكثر من 29% من مزيج الطاقة العالمي. بينما يتوقع أن يصل الطلب على الغاز إلى 15 مليار متر مكعب يومياً أي ما يعادل نحو 90 مليون برميل مكافئ نفط في اليوم تعادل حوالي ربع مزيج الطاقة العالمي.
- تلبية الطلب العالمي المتوقع على النفط في عام 2050 يحتاج إلى متابعة ضخ الاستثمارات في الصناعة البترولية، وهي ليست أرقاماً زهيدة أبداً، وتقدر بما يزيد عن 17 تريليون دولار. مما يعني ضرورة تعزيز التخطيط المالي للدول المنتجة وتشجيع رؤوس الأموال على الاستثمار في هذا المجال من خلال توضيح الصورة الفعلية للطلب العالمي على النفط بمنأى عن التوجهات الإعلامية المتحيزة.

الملحق 1

قائمة المواد الحرجة حسب وزارة الدفاع الأمريكية في عام 2020

aluminum	ألمنيوم	lithium	ليثيوم
carbide	كربيد	magnesium	مغنيسيوم
cobalt	كوبلت	neodymium	نيوديميوم
copper	نحاس	nickel	نيكل
dysprosium	ديسبروسيوم	platinum	بلاتين
fluorine	فلور	praseodymium	براسوديميوم
gallium	جاليوم	silicon	سليكون
graphite	الجرافيت	steel	فولاذ
iridium	إريديوم	terbium	تربيوم

قائمة المواد الحرجة حسب وزارة الداخلية الأمريكية، والمحدثة لغاية عام 2023

aluminum	ألمنيوم	hafnium	هفنيوم	samarium	ساماريوم
antimony	أنتموني	holmium	هلميوم	scandium	سكانديوم
arsenic	زرنيخ	indium	إنديوم	tantalum	تنتالم
barite	الباريت	iridium	إريديوم	tellurium	تيلوريوم
beryllium	بيريليوم	lanthanum	لنثانوم	terbium	تربيوم
bismuth	بزموث	lithium	ليثيوم	thulium	الثوليوم
cerium	سيريوم	lutetium	لوتيتيوم	tin	قصدير
cesium	السيزيوم	magnesium	مغنيسيوم	titanium	تيتانيوم
chromium	كروم	manganese	منغنيز	tungsten	تنجستين
cobalt	كوبلت	neodymium	نيوديميوم	vanadium	فاناديوم
dysprosium	ديسبروسيوم	nickel	نيكل	ytterbium	الإيتربيوم
erbium	إربيوم	niobium	نيوبيوم	yttrium	الايتريوم
europium	يروبيوم	palladium	بلاديوم	zinc	خارصين
fluorspar	فلورسبار	platinum	بلاتين		
gadolinium	جدولينيوم	praseodymium	براسوديميوم		
gallium	جاليوم	rhodium	روديوم		
germanium	جرمانيوم	rubidium	روبيديوم		
graphite	الجرافيت	ruthenium	روتينيوم		

إنتاج العناصر النادرة وبعض العناصر الحرجة في عام 2023، ويلاحظ منه أن الإنتاج الرئيسي من بعض العناصر محصور بدول محددة، وهو ما يدعو العديد من الدول إلى التخوف من احتكار المنتجين لهذه العناصر وتذبذب سلسلة الإمداد.

العناصر النادرة		الكوبالت		نيكل		بلاتين		منغنيز		نحاس		غرافيت		ليثيوم	
ألف طن		ألف طن		ألف طن		طن		ألف طن		ألف طن		ألف طن		الف طن	
240	الصين	170	الكونغو	7.2	جنوب أفريقيا	120	جنوب أفريقيا	7200	جنوب أفريقيا	5000	تشيلي	1230	الصين	86	أستراليا
43	الولايات المتحدة	17	إندونيسيا	4.60	غابون	23	روسيا	4,600	الغابون	2600	بيرو	96	البرازيل1	56.5	شيلي
38	بورما	9	روسيا	3	أستراليا	19	زيمبابوي	3000	أستراليا	2500	الكونغو	94	موزمبيق	33	الصين
18	أستراليا	4.6	أستراليا	0.84	غانا	5.5	كندا	840	غانا	1700	الصين	82.4	الهند 2	9.6	الأرجنتين
7	تايلاند	4	مدغشقر	0.74	الصين	2.9	الولايات المتحدة	740	الصين	1100	الولايات المتحدة	55.2	مدغشقر	4.9	البرازيل
2.90	الهند	3.8	الفلبين	0.72	الهند	4.6	دول أخرى	720.00	الهند	840	إندونيسيا	27.7	تركيا	3.4	زيمبابوي
3	روسيا	3.2	كوبا	2.74	دول أخرى			620	البرازيل	810	أستراليا	16	روسيا	0.6	الولايات المتحدة
1	مدغشقر	3	كاليدونيا					390	ساحل العاج	7000	دول أخرى	6.5	النرويج	0.4	البرتغال
0.6	فيتنام	2.9	بابوا نيو غينيا					320	أوكرانيا			3.5	كندا	3.6	دول أخرى
0.08	البرازيل	2.8	تركيا					250	ماليزيا			2.2	سريلانكا		
0.08	ماليزيا	2.1	كندا					220	المكسيك			2	المكسيك		
		1	الولايات المتحدة					210	بورما			2	أوكرانيا		
		6.6	دول أخرى					160	جورجيا			50.8	دول أخرى		
								160	فيتنام						
								130	كازاخستان						
								330	دول أخرى						
353.3	العالم	229.3	العالم	19.8	العالم	175	العالم	19890	العالم	21550	العالم	1668	العالم	198	العالم

تم تجميع البيانات من عدة مصادر بينها (USGS, 2024)، و (EI, 2024)

المراجع

[1] Gomstyn, A., & Jonker, A. (July, 2024). *What is an energy transition*? IBM: https://www.ibm.com/think/topics/energy-transition

[2] S&P Global. (February, 2024). *What is Energy Transition?* https://www.spglobal.com/en/research-insights/market-insights/what-is-energy-transition

[3] Critchfield, R. (1981). Kenya paradox: Western technology, African tradition. Christian Science Monitor: https://www.csmonitor.com/1981/0807/080747.html

[4] UN. (n.d.). Climate Action. United Nations: https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition

[5] Global Coal Plant Tracker. (July, 2024). Global Energy Monitor: https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/

[6] TWI. (2023). TWI. *What is Carbon Capture and Storage (CCS) and How Does it Work?:* https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-carbon-capture-and-storage

[7] IEA. (September, 2024). Monthly Electricity Statistics. International Energy Agency: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics

[8] EPA. (2024, April 25). *Final Carbon Pollution Standards to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Power Plants*. Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/cps-presentation-final-rule-4-24-2024.pdf

[9] Department of Energy. (April, 2023). What Are Critical Materials and Critical Minerals? Energy Department: https://www.energy.gov/cmm/what-are-critical-materials-and-critical-minerals

[10] IRENA. (November, 2021). *Critical Materials*. International Renewable Energy Agency: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Critical-materials

[11] UNEP. (2024). *Critical Minerals*. United Nations Environment Programme: https://www.unep.org/topics/energy/renewable-energy/critical-minerals

[12] SHI. (October, 2019). *History and Future of Rare Earth Elements*. Science History Institute: https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-rare-earth-elements/history-future/

[13] Keith R. Long, Bradley S. Van Gosen, Nora K. Foley, Daniel Cordier. (2010*). The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States—A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective*. Scientific Investigations Report 2010–5220.

[14] U.S. Geological Survey. (2024). Mineral Commodity Summaries 2024. https://doi.org/10.3133/mcs2024

[15] Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) – with major processing by Our World in Data. "*Lithium production" [dataset]*. Energy Institute, "Statistical Review of World Energy" [original data]. Retrieved December 4, 2024 from https://ourworldindata.org/grapher/lithium-production

[16] International Copper Association. (January, 2025). *Copper Demand and Long-Term Availability*. https://internationalcopper.org/sustainable-copper/about-copper/cu-demand-long-term-availability/

[17] Casper Burgering (September, 2024). ESG Economist - *Copper Remains Very Essential in Energy Transition*. ABN- Amro Group Economics. https://www.abnamro.com/research/en/our-research/esg-economist-copper-remains-very-essential-in-energy-transition

[18] International Copper Association. (March, 2025). *Copper-The Pathway to Net Zero*. https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/02/ICA-GlobalDecarbonization-202301-Final-singlepgs.pdf

[19] Christopher Mone et al. (2015). *2015 Cost of Wind Energy Review*. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Technical Report, NREL/TP-6A20-66861, Revised May 2017.

[20] IEA. (17 May 2024). Critical Minerals Data Explorer. Total supply & demand for key minerals. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer

[21] CEC (California Energy Commission). (October, 2024). *California Energy Storage System Survey*. California Energy Storage System Survey

[22] CNBC عربية. (سبتمبر، 2024). *الرئيس التنفيذي لهيئة كهرباء ومياه دبي لـ CNBC عربية: لدينا اليوم أكبر مشروع بالعالم لتخزين الطاقة بقيمة 15.9 مليار درهم*. الرئيس التنفيذي لهيئة كهرباء ومياه دبي لـ CNBC عربية: لدينا اليوم أكبر مشروع بالعالم لتخزين الطاقة بقيمة 15.9 مليار درهم

[23] صحيفة البيان. (2024, 1 8). كهرباء دبي تعتمد تقنيات تخزين تعزز أمن الطاقة النظيفة. الإمارات العربية المتحدة، أبو ظبي. https://www.albayan.ae/uae/news/2024-01-08-1.4796714

[24] Harrington, E., & Carmichael, C. (2009). *Project Case Study: Empire State Building*. RMI: https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/Buildings_Retrofit_EmpireStateBuilding_CaseStudy_2009.pdf

[25] Thompson, M. (26 September 2024). The Role of Smart Grids in A Sustainable Energy Future. Sigma Earth: https://sigmaearth.com/the-role-of-smart-grids-in-a-sustainable-energy-future/

[26] Electronics. (16 August 2021). Technology trends in the use of smart grids. Electronics Go: https://electronics-go.com/articles/smart-grid-in-power-technology-trends/

[27] Newsome, G. (24 August 2024). California receives more than half a billion dollars in federal funds to improve power grid. Governor Gavin Newsom: https://www.gov.ca.gov/2024/08/06/california-receives-more-than-half-a-billion-dollars-in-federal-funds-to-improve-power-grid/

[28] Zientara, B. (May, 2024). Why California electricity bills are so high and what you can do about it. Solar Reviews: https://www.solarreviews.com/blog/average-electric-bill-in-california

[29] Bandura, R., & Bodin, C. (4 November 2024). Is the Global Workforce Ready for the Energy Transition? Center for Stratigic and International Studies: https://www.csis.org/analysis/global-workforce-ready-energy-transition

[30] IRENA. (2023). World Energy Transition Outlook 2023. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_summary_2023.pdf

[31] IREAN. (2024). World Energy Transition Outlook 2024.

[32] The White House. (14 December 2022). Readout of the White House Electrification Summit: Achieving Our Climate and Equity Goals. https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/12/14/readout-of-the-white-house-electrification-summit-achieving-our-climate-and-equity-goals/

[33] Federal Register. (17 October 2024). *Energy Conservation Program for Consumer Products: Representative*

[34] U.S. Energy Information Administration. (9 October 2024). *Short-Term Energy Outlook, Winter Fuels Outlook 2024- 25*. https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/perspectives/2024/10-winterfuels/article.php#casetab4

[35] Robert Bryce. (20 October 2024). Electrifying Everything Means Higher Energy Costs For Consumers. These DOE Numbers Prove It (Again). Substack. https://robertbryce.substack.com/p/electrifying-everything-means-higher

[36] وزارة المالية في دولة الكويت. (2023). *الموازنة العامة للدولة للسنة المالية 2023/ 2024*. متاح على: https://mof.gov.kw/MofBudget/PDF/Budget24-23.pdf

[37] وزارة المالية في المملكة العربية السعودية. (فبراير، 2024). *تقرير أداء الميزانية الفعلي لنهاية العام المالي 2023*. متاح على: https://mof.gov.sa/financialreport/2023/Documents/END-Bud-A%202023%20F2.pdf

[38] Yergin, D. (2022, December). Bumbs in the Energy Transition. International Monetary Fund: https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2022/12/bumps-in-the-energy-transition-yergin

[39] تركي حمش. (2024). *دور القارة الأفريقية كمحور ناشئ للصناعة البترولية*. نظمة الاقطار العربية المصدرة للبترول، مجلة النفط والتعاون العربي، مجلد 51، العدد 189.

[40] IEA. (2022). Africa Energy Outlook 2022. World Energy Outlook Special Report. https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2022

[41] O'Donnell Erin. (December, 2023*). Preparing for the Energy Transition*. Harvard Magazine. Preparing for the Energy Transition | Harvard Magazine

[42] International Labour Organization. (December, 2022). The future of work in the oil and gas industry. Technical meeting on the future of work in the oil and gas industry, (Geneva, 28 November-2 December 2022). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40ed_dialogue/%40sector/documents/publication/wcms_859846.pdf

[43] Eurostat. (October, 2024). Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). Eurostat Data Browser: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204__custom_13317316/default/table?lang=en

[44] Chen, Y., Lan, T., Mineshima, A., & Zhou, J. (24 July 2023). Impact of High Energy Prices on Germany's Potential Output. International Monetary Fund: https://www.imf.org/en/Publications/selected-issues-papers/Issues/2023/07/24/Impact-of-High-Energy-Prices-on-Germanys-Potential-Output-536837

[45] DIHK. (2022). Economy in the wake of the energy crisis. Deutschen Industrie- und Handelskammer: https://www.dihk.de/resource/blob/85180/d470886b713e87107dc6781cfa2f5c7e/download-economic-survey-fall-2022-data.pdf

[46] Office of Governor Tim Walz and Lt. Governor Peggy Flangan (July, 2019). *Lieutenant Governor Flanagan to Lead Minnesota Delegation at Renewable Energy Seminar in Germany*. News room, Press release: https://mn.gov/governor/newsroom/press-releases/?id=1055-92545&utm_source=substack&utm_medium=email

[47] Peter Fairly. (October, 2011). *Germany Folds on Nuclear Power, Berlin's decision to shut down reactors means tough energy choices ahead*. IEEE Spectrum. https://spectrum.ieee.org/germany-folds-on-nuclear-power

[48] Energy Charts. (November, 2024). *Net installed electricity generation capacity in Germany*. https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=en&c=DE&year=-1&legendItems=ez9&utm_source=substack&utm_medium=email

[49] BDEW. (June, 2024). *The Energy Supply 2023 – Annual Report of BDEW – UPDATE*.

[50] Clean Energy Wire. (June, 2018). *How much does Germany's energy transition cost?* Journalism for Energy Transition. https://www.cleanenergywire.org/factsheets/how-much-does-germanys-energy-transition-cost?utm_source=substack&utm_medium=email

[51]Benjamin Wehrmann. (January, 2023). *What German households pay for electricity?* Clean Energy Wire, Journalism for Energy Transition. https://www.cleanenergywire.org/factsheets/how-much-does-germanys-energy-transition-cost?utm_source=substack&utm_medium=email

[52] Emblemsvåg, Jan. (2024). *What if Germany had invested in nuclear power? A comparison between the German energy policy the last 20 years and an alternative policy of investing in nuclear power*. International Journal of Sustainable Energy, 1 43(1), 2355642. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786451.2024.2355642

[53] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (May, 2023). *Wettbewerbsfähige Strompreise für die energieintensiven Unternehmen in Deutschland und Europa sicherstellen*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/W/wettbewerbsfaehige-strompreise-fuer-die-energieintensiven-unternehmen-in-deutschland-und-europa-sicherstellen.pdf?__blob=publicationFile&v=6&utm_source=substack&utm_medium=email

[54] Energy- Charts. (23 January2025). *Public net electricity generation in Germany in week 4 2025*. https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?c=DE&source=public

[55] Martin Orth. (July, 2023). *Germany as an industrialized country – the main facts*. Dutchland.de. https://www.deutschland.de/en/topic/business/germanys-industry-the-most-important-facts-and-figures

[56] Victoria Waldersee. (September, 2024). Volkswagen scraps decades-old job guarantees, paving way for lay-offs. Reuters. https://www.reuters.com/business/autos-transportation/german-union-ig-metall-receives-notice-cancellation-volkswagen-labour-agreements-2024-09-10/

[57] William Wilkes. (October, 203). *BASF Cuts Highlight Deepening Gloom in Germany Economy*. https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-10-31/basf-heralds-german-industrial-retrenchment-with-investment-cuts

[58] Julia Bolotova. (April, 2024). *Thyssenkrupp to cut steel output in Germany by around 20%.* Fast Markets. https://eurometal.net/thyssenkrupp-to-cut-steel-output-in-germany-by-around-20/

[59] Jamie Smyth and Patricia Nilsson. (February, 2024*). German companies flock to US with record pledges of capital investment.* Financial Times. https://www.ft.com/content/bca7837a-6ac4-4ed1-ab73-18fbdfa5f1da

[60] Ted Loch-Temzeledis. (August, 2024). *So Much for German Efficiency: A Warning for Green Policy Aspirations*? Rice University, Baker Institute for Public Policy. https://www.bakerinstitute.org/research/so-much-german-efficiency-warning-green-policy-aspirations

[61] Hans von der Burchard and Matthew Karnitschnig. (12 September 2023). *Germany's Lindner blasts EU over 'enormously dangerous' green plans*. Politico. https://www.politico.eu/article/germany-finance-minister-christian-lindner-eu-dangerous-green-plans-clean-energy/

[62] Associated Press. (24 February 2023). *Germany's BASF to shed 2,600 jobs in cost-cutting drive*. https://apnews.com/article/basf-se-germany-business-98a44b0766efea7c85ce0da22a30d827

[63] Ralph Schoellhammer. (26 October 2024). Germany's Mittelstand is collapsing. UnHerd. https://unherd.com/newsroom/the-backbone-of-german-industry-is-collapsing/

[64] Stella Nolan. (29 October 2024). *How Cost and Demand Challenges are Impacting Volkswagen*. EV Magazine. https://evmagazine.com/mobility/volkswagen-slows-production-amid-challenges

[65] Robert Bryce. (15 October 2024). *The Hydrogen Bust Is Here*. Substack. https://robertbryce.substack.com/p/the-hydrogen-bust-is-here

[66] M. King Hubbert. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuel*. Presented before the spring meeting of the southern district, Division of Production, API, Plaza Hotel, San Antonio, Texas, March 7-8-9 1956. Publication no 95, Shell Development Company, Texas.

[67] Energy Information Administration. (February, 2025). *US. Field Production of Crude oil*. https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/leafhandler.ashx?n=pet&s=mcrfpus2&f=m

[68] Deutsche Bank. (January, 2013). Oil *Markets Research: A Guide to the Oil & Gas Industry*. https://www.wallstreetoasis.com/files/DEUTSCHEBANK-AGUIDETOTHEOIL%EF%BC%86GASINDUSTRY-130125.pdf

[69] Energy Information Administration. (April, 2024). U.S. Crude Oil and Natural Gas Proved Reserves, Year-end 2022. https://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/

[70] Campbell Colin. (2013). *Campbell's Atlas of Oil and Gas Depletion*. Second edition, Springer. doi:10.1007/978-1-4614-3576-1.

[71] Larry Hughes and Jacinda Rudolph. (May, 2011). *Future world oil production: growth, plateau, or peak?* Current Opinion in Environmental Sustainability, Elsevier. DOI 10.1016/j.cosust.2011.05.001.

[72] Haitham Al Ghais/ OPEC Secretary General. (17 January 2024). *A history of 'unrealized' peaks*. https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/7288.htm

[73] Ritchie, H., & Rosado, P. (January, 2024). *Energy Mix*. Our World in Data: https://ourworldindata.org/energy-mix

[74] Enerdata. (2024). *Share of electricity in total final energy consumption*. World Energy and Climate Statistics 2024: https://yearbook.enerdata.net/electricity/share-electricity-final-consumption.html

[75] Our World in Data. (2024). *Energy Mix*. https://ourworldindata.org/energy-mix

[76] Harry Kretchmer. (2020). *How US energy consumption has changed since independence*. World Energy Forum. How US energy consumption has changed since independence - chart of the day | World Economic Forum (weforum.org)

[77] Daniel Yergin. (2008). *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money & Power*. Free Press; Reissue edition.
[78] WEF. (2023, May). Electric vehicles: an analysis of adoption and the future of oil demand. World Energy Forum: https://www.weforum.org/stories/2023/05/electric-vehicles-adoption-impact-oil-demand/

[79] OPEC. *World Oil Outlook 2045*. 2023. https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm

[80] أحمد البدر. (3 يناير 2024) *هل يتأثر الطلب على النفط بانتعاش السيارات الكهربائية؟ أنس الحجي يجيب*. منصة الطاقة. https://attaqa.net/2024/02/03/%D9%87%D9%84-%D9%8A%D8%AA%D8%A3%D8%AB%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D9%84%D8%A8-%D8%B9%D9%84%D9%89-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7-%D8%A8%D8%A7%D9%86%D8%AA%D8%B9%D8%A7%D8%B4-/%D8%A7%D9%84%D8%B3%D9%8A%D8%A7

[81] Kelley Blue Book. (January, 2025). *Electric Vehicles Sales Report, Q4*. https://www.coxautoinc.com/wp-content/uploads/2025/01/Q4-2024-Kelley-Blue-Book-EV-Sales-Report-revised.pdf?utm_source=substack&utm_medium=email

[83] Ener data Yearbook. (2023). *The share of electricity in final energy consumption*. Share of electricity in total final energy consumption

[84] *Luccioni, A.S., Viguier, S., and Ligozat, A.-L. (2022). Estimating the Carbon Footprint of BLOOM, a 176B Parameter Language Model. Preprint at arXiv.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02001.

[85] SemiAnalysis. (2023). *The Inference Cost of Search Disruption – Large Language Model Cost Analysis*. https://www.semianalysis.com/p/the-inference-cost-of-search-disruption

[86] David Patterson et al, (July, 2022). *The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink*. Computer. https://storage.googleapis.com/pub-tools-public-publication-data/pdf/3f06b8dbb0abc8ab6fbccde0bc37647ae012956c.pdf

[87] Alastair Green et al. (September, 2024). *How Data Centers and the Energy Sector can Sate AI's Hunger for Power*. McKinsey & Company. Data centers and AI: How the energy sector can meet power demand | McKinsey

[88] International Energy Agency. (2024). *Electricity 2024, Analysis and Forecast to 2026*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/18f3ed24-4b26-4c83-a3d2-8a1be51c8cc8/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf

[89] IER (April, 2024). *Hailstorm Cripples Solar Panel Facility in Texas*. https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/hail-storm-cripples-solar-panel-facility-in-texas/

[90] HT News Desk (April, 2024). *Storm damages world's largest floating solar plant in Madhya Pradesh's Khandwa.* https://www.hindustantimes.com/india-news/storm-damages-worlds-largest-floating-solar-plant-in-madhya-pradeshs-khandwa-101712918754443.html

[91] Xu Yihe (September, 2024). *'Super typhoon' devastates wind farm on Chinese coast*. https://www.rechargenews.com/wind/super-typhoon-devastates-wind-farm-on-chinese-coast/2-1-1706161?zephr_sso_ott=rmxlqb

[92]Sean Murphy (May, 2024). Wind towers crumpled after Iowa wind farm suffers rare direct hit from powerful twister. AP News. https://apnews.com/article/tornado-iowa-wind-farm-turbines-feb9913c3d53915ffa420e277af4bb6d

[93] تركي حمش. (2024). *السيارات الكهربائية، الواقع والآفاق*. أوابك: https://oapecorg.org/media/a900e179-c669-4f08-94a0-c157af5e2e9c/-2083813345/%D8%AF%D8%B1%D8%A7%D8%B3%D8%A7%D8%AA%20%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%86%D8%B8%D9%85%D8%A9/2024/%D8%AF%D8%B1%D8%A7%D8%B3%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D8%B3%D9%8A%D8%A7%D8%B1%D8%A7%D8%AA%20%D8%A7%D9%84%D9%83%D9%87%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D9%8A%D9%94%D9%8A%D8%A9/%D8%A7%D9%84%D8%B3%D9%8A%D8%A7%D8%B1%D8%A7%D8%AA%20%D8%A7%D9%84%D9%83%D9%87%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D9%8A%D9%94%D9%8A%D8%A9%20.pdf

[94] OGJ. (2023). *OPEC forecasts global oil demand to reach 116 million b/d in 2045*. Oil and Gas Journal: https://www.ogj.com/general-interest/economics-markets/article/14300012/opec-forecasts-global-oil-demand-to-reach-116-million-b-d-in-2045

[95] IEA. (2024). *World Energy Outlook 2023*. https://www.iea.org/weo/

[96] Energy Institute. (2024). Statistical Report of World Energy.

[97] أوابك. (2025). تقرير الأمين العام السنوي 51.

[99] أحمد البدر. (أغسطس، 2024). *أنس الحجي: تقرير إكسون موبيل غير واقعي.. وتوقعات "السيارات الكهربائية" مستحيلة*. منصة الطاقة. https://attaqa.net/2024/08/29/%D8%A3%D9%86%D8%B3-%D8%A7%D9%84%D8%AD%D8%AC%D9%8A-%D8%AA%D9%82%D8%B1%D9%8A%D8%B1-%D8%A5%D9%83%D8%B3%D9%88%D9%86-%D9%85%D9%88%D8%A8%D9%8A%D9%84-%D8%BA%D9%8A%D8%B1-%D9%88%D8%A7%D9%82%D8%B9%D9%8A/

[100] OPEC. (2024) *World Oil Outlook 2050*. Foreword by HE. Haitham Al Ghais, Secretary General. https://publications.opec.org/woo

[101] IEA. (2024). *World Energy Outlook*. Foreword by Dr Fatih Birol, Executive Director. https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf

[102] EIA. (2023). *International Energy Outlook 2023*. Foreword by Joseph DeCarolis, Administrator of the U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2023_Narrative.pdf

[103] World Bank (2006). *The Road to 2050*. https://documents1.worldbank.org/curated/en/192421468341095824/pdf/360210rev0The0Road0to0205001PUBLIC1.pdf

[104] Goldman Sachs. (2023). *Global Economics Analyst. The Path to 2075 — Capital Market Size and Opportunity (Daly/Gedminas)*. https://www.gspublishing.com/content/research/en/reports/2023/06/08/50ccfb98-b82c-4ba6-976d-d541f83239be.html

[105] OPEC. (2023). *World Oil Outlook 2045*. Interactive version. https://woo.opec.org/chapter.php?chapterNr=1766&tableID=2977

[106] تركي حمش(2022). دور حقول البترول الناضجة في تلبية الطلب العالمي على الطاقة. أوابك. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.oapecorg.org/media/7e1c78b5-9564-448d-983d-2bb1f5ef73af/-1817491292/Oil%2520%40%2520Arab%25202023/181-185/184.pdf&ved=2ahUKEwjz3KK17fuJAxXihP0HHc9rA18QFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw0sSB3KDgcSZARH1D_Nj-WY

[107] British Petroleum. (July, 2024). BP Energy Outlook, 2024 Edition. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf

[108] European Commission. (2023). *Hydrogen*. EU: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

[109] العربية نت. (2023/5/23). وزير الطاقة السعودي: توقعات وكالة الطاقة سبب معظم تقلبات أسواق النفط. https://www.alarabiya.net/aswaq/oil-and-gas/2023/05/23/%D9%88%D8%B2%D9%8A%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%B3%D8%B9%D9%88%D8%AF%D9%8A-%D8%AB%D9%84%D8%A7%D8%AB%D8%A9-%D8%A3%D9%87%D8%AF%D8%A7%D9%81-%D9%84%D9%80-%D8%A3%D9%88%D8%A8%D9%83-%D9%87%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D9%8A%D9%82%D8%B8%D8%A9-%D9%88%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%A8%D8%A7%D8%AF%D8%B1%D8%A9-%D9%88%D8%A7%D9%84%D8%AA%D8%AD%D9%88%D8%B7

[110] Ronan Graham and Ilias Atigui. (March, 2024). A strong focus on oil security will be critical throughout the clean energy transition. EIA. https://www.iea.org/commentaries/a-strong-focus-on-oil-security-will-be-critical-throughout-the-clean-energy-transition

[112] IEA. (September, 2023). The path to limiting global warming to 1.5 °C has narrowed, but clean energy growth is keeping it open. https://www.iea.org/news/the-path-to-limiting-global-warming-to-1-5-c-has-narrowed-but-clean-energy-growth-is-keeping-it-open

[113] IEA. (**2017**). World Energy Outlook 2017. https://iea.blob.core.windows.net/assets/4a50d774-5e8c-457e-bcc9-513357f9b2fb/World_Energy_Outlook_2017.pdf

[114] IEA. (2021). *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)