

استشراف الطاقة النووية المدنية في الدول العربية في أفق 2040: الجاهزية والمفاضلة بين الخيارات وآفاق التكامل الإقليمي

Forecasting Civil Nuclear Energy in Arab Countries by 2040: Readiness, Trade-offs, and Prospects for Regional Integration

المُعَرِّف الرقمي DOI
<https://doi.org/10.31430/CIAS1059>

القبول Accepted
2025-12-02

التعديل Revised
2025-12-01

التسلم Received
2025-11-01

ملخص: تبحث الدراسة في مستقبل الطاقة النووية المدنية في البلدان العربية حتى عام 2040 وما يرتبط بها من جاهزية مؤسسية وتمويلية وتنظيمية عالية لإدارة السلامة والأمن والوقود والنفائات والطوارئ. وتعتمد منهجًا مركبًا يجمع بين مسح الاتجاهات، وتحليل محركات التغيير واللايقين، وبناء سيناريوهات على محورين حاكمين، هما: مستوى الجاهزية الوطنية، واستقرار البيئة الإقليمية/الجيوسياسية. وتقتترح "شاشة قرار" بعشرة أسئلة معيارية، لتحويل النقاش من تفضيل نظري لتقنية بعينها إلى مفاضلة قابلة للتطبيق. وتخلص إلى أن الخيار النووي في العالم العربي سيظل حتى عام 2040 خيارًا "مشروطًا"، ومحدود الانتشار، ومرجّحًا في الدول ذات الجاهزية العالية، أو في حالات تطبيقات غير كهربائية محددة (تحلية/حرارة صناعية).

كلمات مفتاحية: الطاقة النووية المدنية، المفاعلات الصغيرة المعيارية، الأمن السيبراني، التكامل العربي، السيناريوهات.

Abstract: The study examines the future of civil nuclear energy in Arab countries through 2040 and the associated high institutional, financial, and regulatory readiness required to manage safety, security, fuel, waste, and emergencies. It adopts a combined methodology integrating trend analysis, the assessment of drivers of change and uncertainty, and scenario building based on two governing axes: national readiness levels and regional/geopolitical stability. It proposes a ten-question "decision matrix" to shift the debate from a theoretical preference for a specific technology to a practical, applicable choice. It concludes that the nuclear option in the Arab world will remain a "conditional" and limited choice through 2040, most likely in highly prepared countries or for specific non-electric applications (desalination/industrial heat).

Keywords: Civilian Nuclear Energy, Small Modular Reactors, Cybersecurity, Arab Integration, Scenarios.

مقدمة: لماذا "استشراف" الطاقة النووية عربياً؟

يشهد نظام الطاقة العالمي انتقالاً مركّباً، ما بين سياسات مناخية تتجه إلى تخفيض الانبعاثات، وطلب كهربائي متصاعد بفعل الرقمنة والذكاء الاصطناعي، وضغوط أمن الإمداد بعد أزمات جيوسياسية متكررة. وفي هذا السياق، تُطرح الطاقة النووية بوصفها مصدراً منخفض الكربون للكهرباء القادرة على العمل على نحو مستمر؛ إذ توفر نحو 9 في المئة من كهرباء العالم من قرابة 440 مفاعلاً لتوليد الكهرباء في نحو 31 دولة، وتسهم بأكثر من 20 في المئة من كهرباء العالم، أيضاً، ذات الكربون المنخفض⁽¹⁾.

ومع ذلك، فليست الطاقة النووية تقنيةً معزولة عن سياقها المؤسسي والسياسي والاقتصادي؛ فهي مسار استثماري يمتد عقوداً، ويحمل الدولة التزامات طويلة الأمد في السلامة والأمن وإدارة النفايات والوقود، ويستدعي ثقةً مجتمعية وتنظيماً صارماً. وفي المنطقة العربية، تتضاعف أهمية استشراف الطاقة النووية بسبب تباين الدول في حجم الشبكات والموارد المالية، واختلاف مخاطر الاستقرار، وتفاوت الحاجة بين دول مُصدرة للهيدروكربونات ودول مستوردة للطاقة، ووجود محددات خاصة، مثل شح المياه في بعض البلدان.

ولمعالجة هذه الإشكالات، تبني الدراسة على إطارٍ استشرافيٍ يساعد على توصيف المشهد العالمي للتقنيات والوقود (هما في ذلك الاندماج النووي)، وبناء "إطار جاهزية نووية مدنية" واضح بأبعاد أربعة، وتطوير "إطار مفاضلة" عملي بين النووي وحزمة البدائل، وإبراز دور التعاون والتكامل العربيين في خفض المخاطر والتكلفة، واستعراض سيناريوهات المسار النووي العربي حتى عام 2040، وتقديم توصيات سياسات "لا يُندم عليها".

تبدأ الدراسة بتقديم المنهجية القائمة على الاستشراف وحدودها (المبحث الأول)، ثم تنتقل إلى الأسس النظرية والسياق العلمي (المبحث الثاني)، ثم تستعرض وضع الطاقة النووية اليوم، عالمياً وعربياً (المبحث الثالث)، وتناقش المفاضلة بين النووي والبدائل، لا سيما بالنظر إلى الاستدامة (المبحث الرابع)، ثم تعرض سيناريوهات أربعة للمسار النووي العربي حتى عام 2040 (النهضة النووية المنضبطة، والركود النووي والنمو المتسارع للطاقة المتجددة، والشتاء النووي العربي، والتقدم التكنولوجي المشروط) (المبحث الخامس)، وتخلص أخيراً إلى توصيات سياساتية وخريطة طريق "لا يُندم عليها" (المبحث السادس).

أولاً: منهجية الدراسة وحدودها

1. المنهجية الاستشرافية

تعتمد الدراسة منهجاً مركّباً يجمع بين مسح الاتجاهات: رصد التحولات التكنولوجية (المفاعلات الصغيرة المعيارية، والوقود المتقدم، والرقمنة/ الأمن السيبراني، والاندماج)، والتحولات الاقتصادية

1 World Nuclear Association, "Nuclear Power in the World Today," 18/2/2026, accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2Gd>

(التمويل، وسلاسل الإمداد)، والتحولات التنظيمية (معايير السلامة والأمن والضمانات)، وتحليل محركات التغيير: المناخ وسياسات خفض الانبعاثات، وأمن الطاقة، وشح المياه، وتمويل البنية التحتية، والدَّين العام، والمخاطر الجيوسياسية، والرأي العام، إضافة إلى تحديد الالايقينات الحاكمة، على مستوى "الجاهزية النووية المدنية" وطنياً، وعلى مستوى استقرار البيئة الإقليمية/ الجيوسياسية (هما في ذلك المخاطر الأمنية والسيبرانية).

وقد جرى بناء سيناريوهات 2040: وفق المصفوفة (2×2) التي تجمع بين المحورين السابقين، مع مؤشرات مبكرة (Signposts) لكل سيناريو؛ وذلك استناداً إلى "منهجية المعام" للوكالة الدولية للطاقة الذرية (Milestones Approach)، بوصفها إطاراً معيارياً لتقييم البنية التحتية النووية، والتي تؤكد معالجة 19 قضية بنية تحتية على مراحل متدرجة⁽²⁾.

تركز الدراسة على الطاقة النووية المدنية لإنتاج الكهرباء، وبعض التطبيقات غير الكهربائية (تحلية/ حرارة صناعية)، ولا تقدّم نموذج كمية تفصيلية لكل دولة على حدة. ويجعل أفق 2040 بعض التقنيات "قيد التطور" (خصوصاً الاندماج والوقود المتقدم) موضع تحليل احتمالي، وليس يقينياً. ولذلك تُقدّم النتائج بوصفها أطر قرار وسيناريوهات مرجّحة، لا تنبؤات قطعية. ويُركز تحليل السيناريوهات القائم على الجاهزية والاستقرار الجيوسياسي على رصد أوجه عدم اليقين الأساسية، ولكنه يُخفي أبعاداً إضافية تُؤثر جوهرياً في النتائج. ويُحدد هذا القسم أربع فئات من عدم اليقين العميق الذي يصعب قياسه كمياً، ولكنه مع ذلك يُؤثر على نحو حاسم في مسارات التسليح النووي في العالم العربي.

2. منحنيات تعلّم التكنولوجيا ومسارات الابتكار

تُظهر تكاليف التكنولوجيا النووية ديناميات تعلّم غامضة تختلف عن نظرية منحني الخبرة التقليدية. ففي حين تُظهر تقنيات الطاقة المتجددة انخفاضاً ثابتاً في التكاليف، بنسبة تراوح بين 15 و 40 في المئة لكل مضاعفة للقدرة التراكمية (هما يتوافق مع معدلات التعلّم الملحوظة في مختلف الصناعات التحويلية)، أظهرت تكاليف إنشاء المحطات النووية "تعلّماً سلبياً" في العديد من السياقات، حيث تزداد التكاليف الفعلية مع مرور الوقت، على الرغم من الخبرة المتراكمة. وتعكس هذه المفارقة تفاعل عدة عوامل، لا سيما التشديد التدريجي لمتطلبات السلامة في أعقاب الحوادث، وزيادة التعقيد التنظيمي ومدة الترخيص، وتآكل القدرات الإنشائية المتخصصة خلال فترات انخفاض النشاط، وتحديات إدارة المشاريع في إدارة التصميم الأولى من نوعها.

ويتمحور الغموض الذي يكتنف وضع الدول العربية بشأن إذا ما كانت تقنيات الجيل القادم (المفاعلات المعيارية الصغيرة، والمفاعلات المتقدمة) ستُحدث تغييراً جذرياً في هذا النمط، من خلال التمييز والتصنيع، في المصانع والتوحيد القياسي، أم أنها ستعيد إنتاج ديناميات تصاعد التكاليف التاريخية. ويرى مؤيدو المفاعلات المعيارية الصغيرة أن البناء القائم على التصنيع، وتقليل العمالة في الموقع، وتقصير

2 IAEA, "Milestones Approach (Infrastructure Development)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2sd>

جداول البناء، والنشر التدريجي الذي يُقلل تكاليف التمويل، سيُغيّر الوضع الاقتصادي تغييرًا جذريًا. وفي المقابل، يُشير المتشككون إلى أن تكاليف رأس المال لكل كيلواط للوحدات الأصغر حجمًا أعلى بطبيعتها، وأن عدم نضج سلسلة التوريد للوقود المتقدم (وخاصة اليورانيوم العالي التخصيب) يُؤدي إلى نقاط ضعف، وأن مخاطر الريادة في هذا المجال لا تزال كبيرة حتى مع الإنتاج في المصانع.

وبالنسبة إلى صنّاع القرار العرب، يُؤدّد هذا الأمر حالةً من عدم اليقين لا يمكن تبديدها بشأن الالتزام بالتقنيات الناضجة الحالية (مع قبول التكاليف المعروفة والخصائص التشغيلية)، أو تأجيل التقنيات التي لم تنضج بعد (ما يُعرّضنا لتكاليف الفرص البديلة وتخفيضات الانبعاثات الضائعة). ويتفاقم عدم اليقين بشأن التوقيت بسبب ادّعاءات الموردّين حول جداول النشر التي تُثبت تاريخيًا أنها متفائلة بفارق يُراوح بين 3 و7 سنوات. وبذلك تتمثّل مقاربتنا في اعتبار توقّعات الموردّين بمنزلة الحد الأقصى للأداء المحتمل، وتطبيق علاوات المخاطر على عمليات النشر الأولى من نوعها، والحفاظ على المرونة، من خلال استثمارات مؤسسية قابلة للعكس، مع مراقبة نتائج عروض التكنولوجيا على مستوى العالم.

3. الاقتصاد السياسي المحلي وتوزيع الربح

تُنشئ المشاريع النووية ديناميات اقتصادية سياسية مميزة تؤثر بدرجة كبيرة في نجاح تنفيذها، لكنها عصية على النمذجة الرسمية. فالالتزام الذي يمتدّ عقودًا عديدة، والذي تتطلّبه البرامج النووية، يجعلها عرضة للتقلبات السياسية، وتغيّر الأنظمة، وتحولات الأولويات المالية. وعلى عكس مشاريع الطاقة المتجددة التي يمكن تنفيذها تدريجيًا بعوائد سريعة نسبيًا، تتطلب الطاقة النووية إرادة سياسية مستدامة، عبر دورات سياسية متعددة أو انتقالات قيادية. ويتطلّب ذلك آليات لحماية إدارة المشروع من التدخل السياسي القصير الأجل.

وتتفاقم مشكلات استغلال النفوذ وعلاقات الوكالة في السياقات النووية، نتيجةً لعدم تماثل المعلومات (حيث يحدّ التعقيد التقني من قدرة الرقابة)، وتركّز العلاقات مع الموردّين (غالبًا ما تكون اتفاقيات ثنائية بين الحكومات)، وغموض ترتيبات التمويل (وكالات ائتمان الصادرات، والقروض السيادية)، وطول الفترة الزمنية بين الالتزامات والنتائج. وتخلق هذه الخصائص فرصًا لاستغلال النفوذ، ما قد يؤدي إلى تضخيم التكاليف، أو تشويه اختيار التكنولوجيا، أو المساس بمتطلبات السلامة والأمن.

ومن جهةٍ أخرى، تشير الدراسات المتعلقة بـ "لعنة الموارد" إلى أن الدول التي تتمتع بعائدات وفيرة من المحروقات تواجه تحديات حوكمة خاصة في إدارة مشاريع البنية التحتية الضخمة. ومن المفارقات أن ثروة النفط والغاز تُوفّر القدرة المالية للاستثمار في الطاقة النووية، لكنّها قد تُضعف الآليات المؤسسية اللازمة للرقابة الفعالة. ويصبح العامل الحاسم هو قوة المؤسسات مقارنةً بحجم العائدات المستثمرة. فالدول التي تتمتع بشفافية قوية في عمليات الشراء، ورقابة تشريعية فعّالة، وهيئات تنظيمية مستقلة، وصحافة حرة، تواجه مخاطر حوكمة أقل من تلك التي تكون فيها هذه الآليات ضعيفة أو خاضعة لسيطرة جهات أخرى.

ويشكل القبول الاجتماعي بُعدًا آخر من أبعاد الاقتصاد السياسي يتسم بدرجة عالية من عدم اليقين. وتختلف المواقف العامة تجاه الطاقة النووية اختلافاً كبيراً بين المجتمعات العربية، وقد تتغير جذرياً في أعقاب حوادث مماثلة في أماكن أخرى (ما يُعرف بـ "تأثير فوكوشيما" Fukushima Effect). وتشير بيانات استطلاعات الرأي المحدودة من المنطقة إلى تباين كبير، حيث تُظهر بعض الدول تأييداً واسعاً للطاقة النووية، في حين تُظهر دول أخرى معارضة شديدة أو تردداً عميقاً. وتشمل محددات القبول الثقة بالحكومة والمؤسسات التنظيمية، وإدراك المخاطر والمواقف الثقافية تجاه المخاطر التكنولوجية، والقيم البيئية والقلق بشأن المناخ، والتوقعات الاقتصادية المتعلقة بالوظائف وتكاليف الطاقة، واستراتيجيات التواصل والشفافية في صنع القرار.

وتتطلب البرامج النووية الناجحة "موافقة مجتمعية" تتجاوز مجرد الموافقة التنظيمية الرسمية، لتشمل قبولاً شعبياً حقيقياً. ويُعدّ هذا تحدّيًا كبيراً، لا سيما في ظل محدودية مشاركة المجتمع المدني، وغياب المشاركة العامة في تقييمات الأثر البيئي، وغموض عمليات صنع القرار. ولا يقتصر الشك على إذا ما كان الرأي العام الحالي يؤيد الطاقة النووية، بل يتعداه إلى كون الآليات المؤسسية متوافرة لبناء هذه الموافقة المجتمعية طوال دورة حياة المشروع الممتدة عقوداً، والحفاظ عليها.

4. تصميم سوق الكهرباء والتطور التنظيمي

تتأثر اقتصاديات الطاقة النووية بدرجة كبيرة بهيكل السوق والتصميم التنظيمي، وهما جانبان تتسم فيهما الدول العربية بتفاوت كبير وتطور مستمر. ويوفّر نظام تنظيم تكلفة الخدمة التقليدي، حيث تسترد شركات الطاقة التكاليف إضافةً إلى عائد منظم على رأس المال، ظروفًا أكثر ملاءمة للاستثمار النووي ذي رأس المال الكثيف مقارنةً بأسواق الجملة التنافسية التي يواجه فيها المنتجون مخاطر تقلبات الأسعار. ومع ذلك، ينطوي نظام تنظيم تكلفة الخدمة على مخاطره الخاصة المتمثلة في تضخيم التكاليف، والمبالغة في الرسوم، واستغلال الجهات التنظيمية.

ويُثير التوجه العالمي نحو تحرير أسواق الكهرباء، ودمج الطاقة المتجددة، وآليات السوق لضمان كفاية الموارد، حالةً من عدم اليقين بشأن القدرة التنافسية للطاقة النووية. ففي أسواق الطاقة فحسب، تواجه الطاقة النووية تحديات في كفاية الإيرادات خلال فترات ارتفاع نسبة استخدام الطاقة المتجددة، عندما تقترب أسعار الجملة من الصفر فترات طويلة. ويمكن أن توفّر أسواق القدرة وآليات الموثوقية التمويل اللازم لزيادة القدرة الإنتاجية، إلا أن تفاصيل تصميمها (معايير المزاد، ومنهجيات ائتمان القدرة، ومتطلبات الأداء) هي التي تحدّد على نحو أساسي جدوى الطاقة النووية.

وبالنسبة إلى الدول العربية التي تمرّ بمرحلة انتقالية من احتكارات متكاملة رأسياً إلى هياكل أكثر توجّهاً نحو السوق، يُعدّ تسلسل الإصلاحات أمراً بالغ الأهمية. فالالتزام بهياكل احتكار الطاقة النووية الخاضعة للتنظيم يخلق مخاطر الأصول العالقة إذا ما أدّى تحرير السوق لاحقاً إلى جعل المشاريع غير مجدية اقتصادياً. وفي المقابل، يؤخر انتظار نضوج هياكل السوق نضوجاً كاملاً للعمل المناخي، وقد يُفوّت فرص نقل التكنولوجيا،

وبناء القدرات. ومن المرجح أن تتضمن الاستراتيجية المثلى مناهج هجينة تفصل بين توليد الطاقة التنافسي ونقلها الخاضع للتنظيم، وتُطبّق عقودًا انتقالية للفروق أو اتفاقيات شراء الطاقة لإدارة مخاطر الاستثمار النووي، وتُصمّم آليات للقدرات تُقيّم سمات الموثوقية من دون تمييز على أساس التكنولوجيا.

5. صرامة سياسة المناخ ومسارات تسعير الكربون

تتحسّن الجدوى الاقتصادية للطاقة النووية على نحو ملحوظ في ظل سيناريوهات ارتفاع أسعار الكربون، إلا أن الدول العربية تُظهر تقدّمًا محدودًا نحو تسعير الكربون على نحو صريح على الرغم من التزاماتها المتزايدة في مجال المناخ. وتركّز معظم المساهمات المحددة وطنيًا بموجب اتفاقية باريس على توسيع نطاق الطاقة المتجددة، وكفاءة الطاقة، بدلًا من التسعير الشامل للكربون. وتواجه دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، خصوصًا، قيودًا سياسية واقتصادية خاصة في تسعير الكربون، نظرًا إلى اعتمادها الاقتصادي على صادرات المحروقات واستهلاك الطاقة المحلي المدعوم.

وإضافة إلى ذلك، يتمحور الغموض حول إذا ما كانت سياسات المناخ ستتطور نحو تسعير الكربون بكفاءة اقتصادية، أم ستظل تركّز على التفويضات والإعانات الخاصة بتقنيات محددة، أم ستفشل تمامًا في فرض قيود صارمة على الانبعاثات. وفي ظل سيناريوهات ارتفاع أسعار الكربون، تصبح الطاقة النووية أكثر تنافسية من توليد الطاقة الأحفورية من دون أي قيود، حتى مع الأخذ في الاعتبار تجاوزات التكاليف. أما في ظل سيناريوهات انخفاض أسعار الكربون، فتُهيمن توليفات الطاقة المتجددة مع التخزين على نحو متزايد لأسباب اقتصادية بحتة. ويتفاعل مسار الدبلوماسية المناخية الدولية، والتحالفات السياسية المحلية حول إصلاح دعم الطاقة، والتقدم التكنولوجي في البدائل لتحديد المسار الذي سيتحقق.

تتفاعل فئات عدم اليقين الأربع هذه على نحو غير خطي مع محوري السيناريو الخاصين بالاستعداد والاستقرار الجيوسياسي. ويؤثر التعلم التكنولوجي في متطلبات الاستعداد، ويشكّل الاقتصاد السياسي تطوير الاستعداد والاستجابة للصدّات الجيوسياسية، ويؤثر تصميم السوق في الجدوى المالية بغض النظر عن تكاليف التكنولوجيا، وتُغيّر سياسة المناخ المشهد التنافسي في جميع السيناريوهات.

ومن ثمّ، يستدعي إدراك هذه الشكوك العميقة التواضع المعرفي في التنبؤ، مع تسليط الضوء على قيمة الاستراتيجيات المرنة والقابلة للتكيف التي تحافظ على الخيارات المتاحة مع زوال الشكوك.

ثانيًا: الأسس النظرية والسياق العلمي

تستند هذه الدراسة إلى ثلاثة تقاليد بحثية مترابطة: نظرية التحول الطاقوي، ومنهجيات استشراف المستقبل القائمة على السيناريوهات، والأدبيات الناشئة حول الطاقة النووية في السياقات النامية. ويضع هذا القسم منهجنا التحليلي ضمن هذه الحوارات الأكاديمية، مع توضيح كيفية إسهام إطار عملنا في توسيع المعرفة الحالية.

1. تحولات مجال الطاقة والأنظمة الاجتماعية التقنية

تؤكد الدراسات المتعلقة بتحويلات الطاقة أن نشر التكنولوجيا يجري ضمن "أنظمة اجتماعية تقنية" لا تقتصر على البنية التحتية المادية فحسب، بل تشمل أيضًا الأطر التنظيمية، وممارسات المستخدمين، وشبكات الصيانة، والمعاني الثقافية⁽³⁾. وتمثل الطاقة النووية نظامًا اجتماعيًا تقنيًا بالغ الصعوبة، نظرًا إلى متطلباتها من رأس مال بشري متخصص، واستقرار مؤسسي طويل الأمد، ولوائح سلامة شاملة. ويظهر التحليل المقارن لتحويلات الطاقة الوطنية أن التحويلات الناجحة تتطلب عادةً ما بين 25 و60 عامًا، وتعتمد على نحو حاسم على الاستمرارية السياسية، والقبول الشعبي، والمؤسسات القادرة على التكيف⁽⁴⁾؛ وهي تحديدًا أبعاد عدم اليقين التي تُسلط هذه الدراسة الضوء عليها في السياقات العربية. ويفترض إطار "إدارة الانتقال" (Transition Management) أن تغيير نظام الطاقة يمرّ بأربع مراحل: ما قبل التطوير (حيث تظهر التقنيات المبتكرة)، والانطلاق (حيث يتسارع التغيير الهيكلي)، والاختراق (حيث يحدث تحول ملموس)، والاستقرار (حيث يجري الوصول إلى توازن جديد)⁽⁵⁾. وبالنظر إلى الطاقة النووية العربية، فإن معظم الدول لا تزال في مرحلة ما قبل التطوير أو المراحل الأولى من الانطلاق، ما يفسّر أن بناء الجاهزية المؤسسية قد يحقق عوائد أعلى من الالتزامات التكنولوجية المبكرة. ويتوافق هذا مع "مزيج السياسات" (Policy Mixes) الذي ينسّق بين أدوات متعددة (التنظيم، والتمويل، وبناء القدرات)، بدلاً من الاعتماد على نشر التكنولوجيا وحده⁽⁶⁾.

2. منهجيات تخطيط السيناريوهات واستشراف الطاقة

تعتمد الدراسة على منهجية السيناريوهات القائمة على إطار "عدم اليقين المزدوج" الذي طوّره شركة "شل" في ممارسات تخطيط السيناريوهات⁽⁷⁾، والذي يُنظّم عمليات الاستكشاف حول نوعين من عدم اليقين الحاسمين، حيث تُحدّد تفاعلهما مسارات مستقبلية متميزة. وفي حين تُركّز سيناريوهات الطاقة التقليدية غالبًا على تكاليف التكنولوجيا، وصرامة السياسات، بوصفهما محورين أساسيين (على غرار سيناريوهات توقعات الطاقة العالمية الصادرة عن وكالة الطاقة الدولية)، فإننا نمنح الأولوية للجاهزية

3 Frank W. Geels, "Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-Level Perspective and a Case-Study," *Research Policy*, vol. 31, no. 8-9 (2002), pp. 1257-1274.

4 Benjamin K. Sovacool, "How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions," *Energy Research & Social Science*, vol. 13 (2016), pp. 202-215.

5 Jan Rotmans, René Kemp & Marjolein van Asselt, "More Evolution than Revolution: Transition Management in Public Policy," *Foresight*, vol. 3, no. 1 (2001), pp. 15-31.

6 Florian Kern & Karoline S. Rogge, "The Pace of Governed Energy Transitions: Agency, International Dynamics and the Global Paris Agreement Accelerating Decarbonisation Processes?" *Energy Research & Social Science*, vol. 22 (2016), pp. 13-17.

7 Peter Schwartz, *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World* (New York: Currency Doubleday, 1991).

المؤسسية والاستقرار الجيوسياسي، باعتبارهما من عوامل عدم اليقين الأكثر جوهرية لنشر الطاقة النووية في السياق العربي. ويعكس هذا الاختيار أن تمارين السيناريوهات الفعّالة ينبغي أن تُحدّد عوامل عدم اليقين التي تُؤثّر على نحو حقيقي في صانعي القرار، ولا يُمكن اختزالها من خلال التنبؤات التقليدية، وتكون قادرة على توليد آثار استراتيجية متميزة نوعياً⁽⁸⁾.

وتتضمن مقاربتنا أيضاً عناصر "اتخاذ القرارات الرشيدة" في ظل حالة عدم اليقين الشديد⁽⁹⁾، الذي يركّز على تحديد الاستراتيجيات التي تُحقّق أداءً مقبولاً في ظل سيناريوهات مستقبلية متعددة محتملة، بدلاً من التركيز على مسار واحد متوقع. وتُجسّد توصيات السياسة "التي لا ندم عليها" هذا المبدأ؛ فالاستثمارات في القدرات التنظيمية، والتعاون الإقليمي، ونشر الطاقة المتجددة، تُحقّق قيمة في جميع السيناريوهات الأربعة، في حين لا يُحقّق بناء محطات الطاقة النووية قيمة إلا في ظل ظروف مُقيّدة. وهذا يُخالف تحليل التكلفة والعائد التقليدي، الذي يفترض توزيعات احتمالية معروفة للنتائج؛ وهو افتراض نادراً ما يكون مُبرّراً في قرارات البنية التحتية التي تمتد عقوداً في المناطق المضطربة.

أما معايير جودة السيناريوهات فتُركّز على المعقولية (الاتساق مع الاتجاهات والقيود المعروفة)، والتميز (ينبغي أن تكون السيناريوهات متميزة حقاً، وليست مجرد تنويعات لموضوع واحد)، والملاءمة (الارتباط بالقرارات التي يواجهها أصحاب المصلحة بالفعل)، والتحدي (ينبغي أن تُوسّع السيناريوهات النماذج الذهنية، لا أن تُؤكد المعتقدات القائمة فحسب)⁽¹⁰⁾. وتُحقّق سيناريوهاتنا الأربعة هذه المعايير من خلال تغطية نتائج تراوح من "نهضة مُتحكم فيها" إلى "شتاء نووي عربي"، مع الحفاظ على تماسك داخلي قائم على منطق سببي واضح يربط بين الجاهزية، والظروف الجيوسياسية، واتجاهات التكنولوجيا العالمية، وخيارات السياسة الإقليمية.

3. الطاقة النووية في الاقتصادات النامية: منظورات مؤسسية

تُشكّل مقارنة المعالم الرئيسة للوكالة الدولية للطاقة الذرية الإطار المعياري السائد لتطوير البنية التحتية النووية؛ إذ تُركّز على الاهتمام المنهجي بتسعة عشر موضوعاً متعلّقاً بالبنية التحتية عبر ثلاث مراحل⁽¹¹⁾. وبينما يستند إطارنا الرباعي الأبعاد للاستعداد إلى هذا الأساس، فإننا نُوسّعه من خلال دمج الأمن السيبراني (الذي تزداد أهميته مع رقمنة المنشآت النووية)، واعتبارات الاقتصاد السياسي (السعي لتحقيق الريع، وجودة الحوكمة، واستمرارية السياسات)، والتحليل الاقتصادي المقارن مع البدائل المتاحة. ويميل

8 Ron Bradfield et al., "The Origins and Evolution of Scenario Techniques in Long Range Business Planning," *Futures*, vol. 37, no. 8 (2005), pp. 795-812.

9 Robert J. Lempert, Steven W. Popper & Steven C. Bankes, *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis* (Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2003).

10 Kees Van der Heijden, *Scenarios: The Art of Strategic Conversation*, 2nd ed. (Chichester: John Wiley & Sons, 2005).

11 Steve Thomas, "The Economics of Nuclear Power: An Update," Heinrich Böll Foundation, 2010, accessed on 21/1/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2AD>

إطار الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى التقييم الذي يركّز على التكنولوجيا، في حين يدمج نهجنا الخيارات النووية ضمن تخطيط أوسع لنظام الطاقة.

وتقدّم دراسات حديثة حول حالة صناعة الطاقة النووية العالمية أدلةً تجريبية على تدهور الجدوى الاقتصادية وطول جداول بناء المشاريع النووية عالميًا، موثقةً تجاوزات في التكاليف بمتوسط 117 في المئة وتأخيرات في الجداول الزمنية تصل إلى 3.5 سنوات للمفاعلات التي اكتمل بناؤها منذ عام 2000⁽¹²⁾. وتتناقض هذه الأدلة مع توقعات المؤردين، وتؤكد أهمية تحليل الحساسية المالية. وبالنسبة إلى صناع القرار العرب، يصبح السؤال الرئيس هو: أفي إمكان المشاريع المنفّذة محليًا تجنّب هذه المشكلات من خلال إدارة مشاريع متميزة أم أنها تعكس خصائص أساسية للبناء النووي المعاصر؟

ويحدّد التحليلات المقارنة لفاعلية التنظيم النووي في الاقتصادات الناشئة ثلاثة عوامل نجاح حاسمة، هي: الاستقلالية التنظيمية الحقيقية عن كلّ من الحكومة والصناعة، والميزانيات الكافية، والوصول إلى الخبرات المتخصصة، والسلطة القانونية لوقف العمليات عند المساس بالسلامة. فالهياكل التنظيمية الرسمية تظل غير كافية في غياب جودة مؤسسية أوسع (سيادة القانون، والقدرة البيروقراطية، ومقاومة التدخل السياسي). وهذا يدعم تأكيدنا على الحوكمة باعتبارها بعدًا من أبعاد الجاهزية، يختلف عن مجرد إنشاء منظمات تنظيمية.

4. الثغرات في المعرفة الحالية ومساهمة هذه الدراسة

على الرغم من الاهتمام المتزايد بالطاقة النووية للتخفيف من آثار التغير المناخي، فإن التحليلات الاستشرافية المنهجية الخاصة بالمنطقة العربية لا تزال قليلة. وتميل الدراسات الحالية إلى الترويج لها من جانب موردي الطاقة النووية وحكوماتهم الراعية، أو معارضتها القاطعة من طرف المنظمات البيئية، من دون أن يوفر أيّ من الاتجاهين تحليلًا متوازنًا ومراعياً للسياق اللازم لاتخاذ قرارات مستنيرة. وغالبًا ما تتعامل نماذج الطاقة الإقليمية (مثل تلك التي تُجرى في إطار جامعة الدول العربية أو مجلس التعاون) مع الطاقة النووية بوصفها مدخلًا خارجيًا بدلًا من كونها قرارًا داخليًا، متجاهلةً قيود الجاهزية أو تكاليف الفرص البديلة.

تسدّ هذه الدراسة هذه الثغرات من خلال توفير إطار عمل متكامل يجمع بين تقييم التكنولوجيا، والتحليل المؤسسي، والاقتصاد المقارن، وتخطيط السيناريوهات، مع الحفاظ على حيادية تحليلية فيما يتعلق بالطاقة النووية في حد ذاتها. ولا تكمن مساهمتنا في تحديد إذا ما كان ينبغي للدول العربية أن تتوجّه نحو الطاقة النووية (وهو سؤال يفتقر إلى إجابات شاملة)، بقدر ما تكمن في توضيح الظروف التي تصبح فيها هذه الطاقة مُجدية، والأساليب التحليلية لتقييم تلك الظروف بدقة. ومن خلال التركيز على الاستثمارات "التي لا يُندم عليها" التي تحافظ على قيمتها عبر مختلف السيناريوهات، نقدّم توجيهات عملية حتى في ظل حالة عدم اليقين الشديد، وهو أمر ضروري لصناع السياسات الذين لا يمكنهم انتظار معلومات كاملة قبل اتخاذ أيّ إجراء.

ثالثاً: أين تقف الطاقة النووية اليوم، عالمياً وعربياً؟

1. السياق العالمي

تُستعاد الطاقة النووية عالمياً لأسباب رئيسية، من أبرزها أنها مصدر منخفض الكربون للكهرباء "الثابتة"، بما يعزّز استقرار الشبكة ويدعم مسارات إزالة الكربون حين لا تكفي المصادر المتقطعة وحدها. ويرتبط الأمر كذلك بأمن الإمداد وتنويع المخاطر؛ إذ يتيح الوقود النووي تخزيناً استراتيجياً أسهل نسبياً من النفط والغاز، على الرغم من استمرار الاعتماد على سلاسل إمداد دولية للتخصيب والتصنيع⁽¹³⁾. وتُضاف إلى ذلك تطبيقات غير كهربائية، مثل تحلية المياه وإنتاج الحرارة الصناعية، وهي تطبيقات تزداد أهميتها في المناطق التي تعاني شحاً مائياً⁽¹⁴⁾. وتشمل الاستخدامات أيضاً إنتاج النظائر المشعّة للأغراض الطبية، فضلاً عن الإسهام في مجالات واسعة من البحث العلمي.

في المقابل، تواجه الطاقة النووية قيوداً تتعلق بتكلفة رأس المال، وحساسية المشروعات للتأخير، والتعقيد التنظيمي، وإدارة الوقود المستهلك والنفايات، ومتطلبات السلامة والأمن والأمن السيبراني. وتفسّر هذه القيود بقاء انتشار الطاقة النووية محكوماً بشروط صارمة، بدلاً من أن يكون خياراً سريعاً أو بسيطاً.

وحتى عام 2040، يُرجّح أن تبقى غالبية مشروعات القوى النووية الجديدة في العالم العربي، إن وُجدت، ضمن تقنيات مفاعلات الماء الخفيف من الجيل الثالث / الثالث+ (Gen III/III+) المعتمدة تجارياً، مثل (PWR/BWR) وما يماثلها، نظراً إلى كونها الأكثر نضجاً من الناحيتين التنظيمية والتشغيلية. أما المفاعلات الصغيرة المعيارية (SMRs) والمفاعلات المتقدمة (Gen IV)، فتعَدّ بمزايها تتصل بخفض مخاطر التمويل أو توسيع الاستخدامات غير الكهربائية، إلا أنّ انتشارها التجاري الواسع لا يزال مرهوناً بتراكم خبرات الترخيص ونضج سلاسل الإمداد، ولا سيما الوقود المتقدم⁽¹⁵⁾.

ويمثّل "مسار الوقود" قراراً سياسياً واقتصادياً لا يقل أهمية عن اختيار المفاعل، لأنه يحدّد درجة الاعتماد الخارجي، ومخاطر الإمداد، ومتطلبات الجاهزية:

✦ اليورانيوم المنخفض التخصيب (LEU)، حتى نحو 5 في المئة من (U-235): يُعدّ الوقود التجاري الأكثر شيوعاً في أسطول المفاعلات العالمي، ويمثّل المسار الأكثر واقعية للوافدين الجدد حتى عام 2040، لأنه الأقل تعقيداً من الناحيتين التنظيمية والتشغيلية⁽¹⁶⁾.

13 Ibid.

14 IAEA, "Nuclear Desalination (Overview and Resources)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2gQ>

15 U.S. Department of Energy, "What is High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU)?" accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2RB>

16 World Nuclear Association, "Uranium Enrichment. Updated 6 Jun 2025," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2mr>

✦ وقود "هاليو" (HALEU)، بنسبة تراوح بين 5 في المئة وأقل من 20 في المئة من (U-235): تتطلبه تصاميم كثيرة من المفاعلات المتقدمة والمفاعلات الصغيرة المعيارية، لكنه يضيف تحديًا استراتيجيًا، لأن إنتاجه التجاري لا يزال محدودًا عالميًا، فضلًا عن تأثره باعتبارات جيوسياسية وسلاسل إمداد حساسة⁽¹⁷⁾.

✦ وقود (TRISO)، وهو وقود قائم على جسيمات مغلفة عالية التحمل: يرتبط غالبًا بمفاعلات الغاز عالية الحرارة (HTGR)، وقد يفتح المجال أمام تطبيقات الحرارة الصناعية والتحلية، لكنه يتطلب خبرات ترخيصية متخصصة، كما أن نطاقه التجاري لا يزال محدودًا حتى الآن⁽¹⁸⁾.

✦ الثوريوم، ووقود (MOX)، وإعادة المعالجة: ترفع هذه الخيارات من تعقيد دورة الوقود ومتطلبات البنية الصناعية والتنظيمية، وتبدو أقرب إلى "رهان" بحثي طويل الأمد، من دون أن تُعد خيارًا واسع الانتشار لمعظم الدول العربية قبل عام 2040⁽¹⁹⁾.

والخلاصة العملية أن تعقد الوقود ودورته يرفعان متطلبات الجاهزية، تنظيميًا وبشريًا وأمنيًا، ويزيدان تبعية الدولة لسلاسل إمداد محددة. لذلك، تميل الخيارات الأكثر واقعية حتى عام 2040 إلى مسار (LEU) مع تقنيات ناضجة، مع مراقبة تطوّر أسواق (HALEU) قبل الإقدام على أي التزام طويل الأمد.

ويختلف الاندماج النووي جذريًا عن الانشطار، أي المفاعلات التقليدية، من حيث الفيزياء والمتطلبات الهندسية. وتشير استراتيجيات حكومية حديثة إلى طموح للوصول إلى "محطة تجريبية/ طيارة" خلال ثلاثينيات هذا القرن، مع توسّع تجاري تدريجي في أربعينياته⁽²⁰⁾. وبناءً على ذلك، من غير المرجح أن يشكّل الاندماج حلًا لإمداد الشبكات العربية بالكهرباء على نطاق واسع قبل عام 2040. غير أن الاستثمار فيه قد يمثّل "استثمارًا معرفيًا" عبر شراكات بحثية، وتوطين قدرات في المواد، والحوسبة، والتحكم، والقياس، وتقنيات التفريغ.

2. خريطة البرامج النووية العربية حتى عام 2025

يُظهر الواقع النووي العربي، حتى عام 2025، أن "القوى النووية" العربية، بمعنى امتلاك محطات كهرباء عاملة، لا تزال محدودة جدًا. وفي المقابل، توجد برامج قوى نووية قيد الإنشاء أو في طور التخطيط،

17 World Nuclear Association, "High-Assay Low-Enriched Uranium – HALEU," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2hf>

18 U.S. Department of Energy, "TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2Xn>

19 World Nuclear Association, "Mixed Oxide (MOX) Fuel," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2uc>; World Nuclear Association, "Processing of Used Nuclear Fuel," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F3cY>; World Nuclear Association, "Thorium," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2FF>

20 U.S. Department of Energy, "Fusion Energy Strategy 2024," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2Mi>

إضافة إلى بنى بحثية، مثل المفاعلات البحثية، في عدد من الدول. ويقدم الجدول (1) خريطة مختصرة، غير شاملة لجميع التفاصيل، لكنها كافية لإظهار التفاوت في مستويات النضج والجاهزية داخل المنطقة.

الجدول (1)

خريطة مختصرة للبرامج النووية العربية حتى عام 2025

الدولة	حالة برنامج قوى نووية حتى عام 2025	أبرز المعالم / المنشآت	ملاحظات مختصرة
الإمارات العربية المتحدة	تشغيل	محطة براكة: 4 وحدات (APR-1400) دخلت الوحدة 4 التشغيل التجاري في 5 أيلول / سبتمبر 2024 ⁽²¹⁾	أول برنامج قوى نووية عربي عامل على مستوى محطات الكهرباء
جمهورية مصر العربية	إنشاء	محطة الضبعة: 4 وحدات (VVER-1200) (تحت الإنشاء) ⁽²²⁾	أول مشروع قوى نووية مصري على مستوى محطات الكهرباء
المملكة العربية السعودية	تخطيط / مقترح	برنامج قوى نووية قيد التطوير المؤسسي والتخطيط ⁽²³⁾	لم يدخل مرحلة إنشاء محطة قوى حتى عام 2025
المملكة الأردنية الهاشمية	لا يوجد برنامج قوى؛ بنية بحثية	مفاعل بحثي وتدريب (JRTR (5 MWth) في الخدمة منذ عام 2016 ⁽²⁴⁾	يركّز على التعليم والبحث وإنتاج النظائر
المملكة المغربية	لا يوجد برنامج قوى؛ بنية بحثية	مفاعل بحثي (TRIGA Mark II (MA R1)) ⁽²⁵⁾	مفاعل بحثي يخضع لبرامج دعم ومراجعة سلامة
الجمهورية الجزائرية	لا يوجد برنامج قوى؛ بنية بحثية	مفاعلان بحثيان: (Es Salam) و (NUR) ⁽²⁶⁾	تطبيقات سلمية/ بحثية وإنتاج نظائر

21 IAEA PRIS, "BARAKAH-4 – Reactor Details – Commercial Operation," 5/9/2024, accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2jy>; IAEA PRIS, "United Arab Emirates: Country Details, Barakah Units List," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F3dp>

22 IAEA PRIS, "Egypt – Country Details (El Dabaa Units 1–4 Under Construction)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F32N>; World Nuclear Association, "Nuclear Power in Egypt. Updated 28 Nov 2025," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2iC>

23 World Nuclear Association, "Nuclear Power in Saudi Arabia," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2zO>; "IAEA Launches Management System Advisory Service to Support the Introduction of Nuclear Power; First Mission to Saudi Arabia," IAEA News, accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F34d>

24 World Nuclear Association, "Nuclear Power in Jordan," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F37r>; Jordan Research and Training Reactor, "FAQ," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2gl>

25 "IAEA Finds Continued Improvement at the TRIGA Mark II Research Reactor in Morocco," IAEA Press Release, accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2qc>

26 IAEA, "Research Reactors in Africa. 2020," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2b7>

رابعاً: المفاضلة بين النووي والبدايل

1. حجر الزاوية للاستدامة: الأبعاد الأربعة للجاهزية النووية المدنية

ليست الجاهزية النووية مجرد قرار شراء أو بناء مفاعل، بل هي منظومة متعددة الأبعاد تتقاطع فيها الحوكمة، والقانون، والتمويل، والسلامة، والأمن، والقدرات البشرية، وسلاسل الإمداد، وإدارة الوقود والنفائات، والاستجابة للطوارئ. وتؤكد منهجية "المعالم" التابعة للوكالة الدولية للطاقة الذرية أن البرنامج النووي يتطلب معالجة منهجية لتسع عشرة قضية بنية تحتية عبر ثلاث مراحل متدرجة⁽²⁷⁾. ويمكن تلخيص الجاهزية النووية في أربعة أبعاد عملية:

أ. الحوكمة والتنظيم والتمويل

✦ يشمل هذا البعد وجود قرار وطني مستقر يتجاوز الدورات السياسية، لأن دورة حياة المشروع تمتد عقوداً. ويتطلب أيضاً هيئة رقابية مستقلة وفعّالة، منفصلة عن الجهة المالكة أو المشغلة، وقادرة على الترخيص والتفتيش والإنفاذ. ويشمل كذلك إطاراً تشريعياً واتفاقيات دولية ذات صلة بالسلامة، والضمانات، والمسؤولية المدنية، والإخطار المبكر، والمساعدة⁽²⁸⁾، إلى جانب توفير تمويل طويل الأجل وخطط لإدارة مخاطر تضخم التكلفة والتأخيرات.

ب. السلامة والأمن والأمن السيبراني

✦ يشمل هذا البعد السلامة النووية (Safety)، أي تصميم المنشآت وتشغيلها بما يهدف إلى منع الحوادث وتقليل آثارها، مع ترسيخ "ثقافة السلامة". ويشمل كذلك الأمن النووي (Security)، أي حماية المواد والمنشآت من الأفعال المتعمدة، مثل السرقة أو التخريب أو الاستهداف. ويضاف إلى ذلك الأمن السيبراني، الذي يركز على حماية أنظمة التحكم الرقمية، والبيانات، وسلاسل التوريد الرقمية. وتوفّر الوكالة الدولية للطاقة الذرية أدلة فنية محددة لتأسيس برامج أمن حاسوبي للمنشآت النووية⁽²⁹⁾.

ج. القدرات البشرية وسلاسل الإمداد، أو مركزية "الملاك الوطني"

✦ يتطلب البرنامج النووي قاعدة وطنية من الكفاءات الهندسية والتشغيلية والتنظيمية والقانونية. ويُعدّ بناء "الملاك الوطني" شرطاً أساسياً لتجنّب الارتهان التشغيلي الطويل الأمد

27 IAEA, *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024).

28 OECD/ Nuclear Energy Agency (NEA), "Convention on Early Notification of a Nuclear Accident (Early Notification Convention)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2vm>

29 IAEA, "Computer Security at Nuclear Facilities (Nuclear Security Series)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2fd>

للخبرات الخارجية، وضمان استدامة المعرفة على الرغم من تغير الحكومات والإدارات. ويرتبط بذلك تطوير سلاسل توريد محلية أو إقليمية، في حدود الممكن، تشمل الخدمات الهندسية، والفحوصات، وضبط الجودة، والتدريب، والمحاكاة، مع الإقرار بأن أجزاء أساسية من دورة الوقود ستظل عالمية الطابع.

د. الوقود والنفائيات والطوارئ

✦ يشمل هذا البعد وضع استراتيجية واضحة للوقود، تتضمن التعاقدات، وتنوع الموردين حيث أمكن، وتوفير مخزون استراتيجي. ويتطلب أيضًا سياسة لإدارة الوقود المستهلك والنفائيات المشعة، تشمل التخزين المرحلي الآمن وخيارات لاحقة مدروسة، فضلًا عن جاهزية للطوارئ عبر خطط استجابة وطنية، وتمرين دورية، وتعاون إقليمي، لأن آثار الحوادث تتجاوز الحدود الوطنية. وتوفر اتفاقيتا الإخطار المبكر والمساعدة إطارًا دوليًا لهذا التعاون.

2. النووي ليس "الحل الافتراضي" الأخضر لكل الدول العربية

يُطرح النووي أحيانًا بوصفه "حلًا مثاليًا" للكهرباء النظيفة، غير أن المقارنة العملية تُظهر أنه مسار شديد الاشتراطات، في حين تقدّم الطاقات المتجددة اليوم ميزة تنافسية متزايدة من حيث التكلفة وسرعة التنفيذ. وتشير بيانات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة إلى أن 91 في المئة من قدرات الطاقة المتجددة التي دخلت الخدمة حديثًا عام 2024 أنتجت كهرباء بتكلفة أقل من أرخص بديل أحفوري جديد، وفقًا لمعيار (LCOE)⁽³⁰⁾. وبذلك، يصبح السؤال العملي: ما الهدف؟ وما تكلفة الفرصة البديلة؟ أتمتلك الدولة جاهزية نووية فعلية، أم أن استثمارها الأجدى حتى عام 2040 يكمن في حزمة بدائل أسرع وأقل مخاطرة؟

يمكن تلخيص المفاضلة الأولية بين: (أ) مسار نووي مدني، يشمل مفاعلًا أو مفاعلات قوى، مع التزامات الوقود والنفائيات والتنظيم؛ و(ب) حزمة بدائل، تشمل الطاقات المتجددة، والتخزين، وتحديث الشبكات والربط، وكفاءة الطاقة، والغاز المنخفض الانبعاثات حيث يلزم. وعلى الرغم من أن لكل مسار تفاصيله المحلية، فإن الفروق العامة غالبًا ما تتمثل في الآتي:

- ✦ التكلفة الرأسمالية: يتطلب النووي استثمارات أعلى، وهو شديد الحساسية للتأخير، بينما تتميز البدائل بإمكانية التنفيذ التدريجي، مع استمرار انخفاض التكلفة في بعض التقنيات⁽³¹⁾.
- ✦ سرعة التنفيذ: يحتاج النووي إلى فترة زمنية أطول بين القرار والتشغيل، في حين تُعد البدائل أسرع تنفيذًا وأكثر قابلية للتجزئة.

30 International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Power Generation Costs in 2024 (Executive Summary 2025), accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2KB>

31 International Renewable Energy Agency (IRENA).

- ✦ المرونة التشغيلية: يوفرّ النووي مصدرًا للحمل الأساسي، بينما تتيح البدائل توليدًا مؤزّعًا، وإدارة للطلب، واستجابة أسرع، إذا اكتملت البنية الشبكية ومنظومات التخزين.
- ✦ الاعتماد على الوقود: يعتمد النووي على سلاسل وقود وخدمات متخصصة، في حين لا تحتاج الطاقات المتجددة إلى وقود، بينما يمثّل الغاز وقودًا انتقاليًا.
- ✦ متطلبات الجاهزية: يفرض النووي متطلبات أعلى كثيرًا في مجالات السلامة، والأمن، والنفايات، والرقابة، بينما تحتاج البدائل أساسًا إلى جاهزية شبكية، وسوقية، وتنظيمية، إضافة إلى سياسات كفاءة فعّالة.

الجدول (2)

مقارنة بين مسار نووي مدني وحزمة بدائل حتى عام 2040 (مؤشرات نوعية)

البعد	الطاقة النووية المدنية	حزمة البدائل (الطاقات المتجددة + التخزين + الشبكات + الكفاءة + الغاز المنخفض الانبعاثات حيث يلزم)
التكلفة الرأسمالية	مرتفعة جدًا وحساسة للتأخير والتمويل	غالبًا أقل وتُنفذ تدريجيًا، وتُميل تكاليف الطاقة المتجددة إلى الانخفاض عالميًا
زمن الإنجاز	طويل (سنوات عديدة من القرار إلى التشغيل)	أسرع وقابل للتجزئة (مشاريع من أشهر إلى سنوات)
المرونة التشغيلية	محدود نسبيًا (مصدر حمولة أساسية)	أعلى (توليد موزع، وإدارة طلب، واستجابة أسرع عند اكتمال الشبكات والتخزين)
الاعتماد على الوقود/ سلاسل الإمداد	اعتماد بنوي على وقود وخدمات وتوريد دولي	الطاقات المتجددة لا تحتاج إلى وقود، بينما يمثّل الغاز وقودًا انتقاليًا؛ مع اعتماد أكبر على سلاسل التصنيع والمواد
متطلبات الجاهزية المؤسسية	عالية جدًا (وتشمل هيئة رقابية مستقلة، ومتطلبات السلامة، والأمن، والأمن السيبراني، وإدارة النفايات، والطوارئ)	عالية ولكن بطبيعة مختلفة، تشمل حوكمة السوق والشبكات، وتنظيم الكفاءة، وتعزيز المرونة التشغيلية
الأثر البيئي (الأرض/ المياه)	أثر محدود نسبيًا في استخدام الأراضي، مع احتياجات تبريد مائية قد تكون مرتفعة بحسب التصميم والموقع	أثر أرضي أوسع لبعض الطاقات المتجددة، وأثر مائي أقل عادةً في التشغيل

ولتحويل المفاضلة إلى إطار قرار عملي، أو "شاشة قرار" (Decision Screen)، تقترح الدراسة عشرة أسئلة معيارية ينبغي الإجابة عنها بوضوح قبل أيّ التزام نووي:

- ✦ ما الهدف الأساسي؟ أهو توفير كهرباء ثابتة، أم تحلية المياه، أم إنتاج حرارة صناعية، أم مجرد تنويع مصادر الطاقة؟
- ✦ هل يسمح حجم الشبكة باستيعاب وحدة كبيرة بأمان، من حيث المرونة، والاحتياطي، والربط؟

- ✦ ما القدرة التمويلية للدولة، وما مخاطر الدين العام على مدى 10 سنوات إلى 20 سنة؟
 - ✦ هل توجد هيئة رقابية مستقلة وكفاءات كافية، أو خطة واقعية لبنائها؟
 - ✦ ما تكلفة الفرصة البديلة؟ وماذا يمكن أن يحققه الاستثمار نفسه ضمن حزمة البدائل؟
 - ✦ ما مخاطر الاعتماد الخارجي، سواء في الوقود، أو قطع الغيار، أو الصيانة، أو التأمين، أو إدارة النفايات؟
 - ✦ ما مستوى المخاطر الأمنية والسيبرانية، وما درجة الاستقرار السياسي؟
 - ✦ ما مدى القبول المجتمعي، أو "الترخيص الاجتماعي"، وما خطة التواصل والشفافية؟
 - ✦ هل توجد ضغوط مناخية أو تجارية تستدعي توفير كهرباء منخفضة الكربون من دون انقطاع؟
 - ✦ هل يمكن أن يخفّض التعاون الإقليمي المخاطر والتكلفة، من خلال الربط الشبكي، والطوارئ، والتدريب، والتنسيق التنظيمي؟
- وفي هذا البرنامج البحثي، يمكن التمييز بين ثلاثة أمط من الدول العربية:
- ✦ الدول النفطية/ الغازية ذات القدرة التمويلية: قد تكون الأولوية الأعلى عائداً والأقل مخاطرة هي تسريع نشر الطاقة المتجددة (للتحرير الاقتصادي للوقود وتوفير الغاز للتصدير)، وتحديث الشبكات والربط الإقليمي وإدارة الطلب، مع مسارات إضافية لخفض الانبعاثات (إزالة الكربون، وخفض الميثان، والكفاءة). وفي هذا السياق، يبقى النووي "مشروطاً" بوجود حاجة واضحة إلى كهرباء ثابتة منخفضة الكربون لا تحققها الحزمة السابقة بكفاءة، وبوجود جاهزية تنظيمية وبشرية عالية.
 - ✦ الدول المستوردة للطاقة أو ذات نمو طلب حاد: قد يرتفع ترجيح الخيار النووي إذا توافرت شبكة كبيرة، وتمويل مستقر، ومؤسسات رقابية قوية، واستراتيجية لتقليل الاعتماد على واردات الوقود المتقلبة.
 - ✦ الدول ذات الهشاشة الأمنية/ المؤسسية: تميل هنا كفة البدائل الأسرع والأقل مخاطرة، بينما يكون الاستثمار الأجدى في بناء مؤسسات التنظيم والسلامة والإشعاع والطوارئ والتطبيقات السلمية غير الكهربائية.

3. التكامل العربي والتعاون الإقليمي: لماذا هو رافعة حاسمة؟

تزداد أهمية التكامل العربي لسببين: (أ) أنّ مخاطر النووي، بما في ذلك الطوارئ الإشعاعية، عابرة للحدود، و(ب) أنّ بناء الجاهزية مكلف، ويمكن خفض تكلفته عبر تقاسم الموارد والخبرات. ويمكن تصوّر التكامل عبر أربعة مسارات عملية:

أ. التكامل التنظيمي وبناء الثقة

تمثّل "الشبكة العربية للهيئات الرقابية النووية" (ANNuR) إطاراً قائماً لتبادل الخبرات، وتنسيق المعايير، وتعزيز البنى الرقابية. وقد أنشئت في عام 2010 تحت مظلة الشبكات العالمية التابعة للوكالة الدولية

للطاقة الذرية⁽³²⁾. ويمكن تطوير هذا الإطار عبر مراجعات نظراء إقليمية (Peer Review) في قضايا السلامة، والأمن، والأمن السيبراني، إضافة إلى برامج تدريب مشتركة للمفتشين.

ب. التكامل في الطوارئ والبيئة

تحتاج الدول العربية المتجاورة إلى بروتوكولات مشتركة للإخطار المبكر، وتبادل البيانات البيئية، وتنفيذ تمارين استجابة منسقة، مع الالتزام بالاتفاقيات الدولية ذات الصلة⁽³³⁾.

ج. التكامل الكهربائي والربط الشبكي

يعزز الربط الكهربائي الإقليمي مرونة الشبكات، ويقلل الحاجة إلى احتياطات وطنية كبيرة، ويسهل دمج الطاقة المتجددة المتقطعة، وقد يساهم في جعل خيارات "الكهرباء الثابتة"، سواء أكانت نووية أم غير نووية، أكثر جدوى من الناحية التشغيلية.

د. التكامل في سلاسل الإمداد والتمويل وبناء القدرات

بدلاً من أن تفاوض كل دولة بمفردها، يمكن أن يحسن التنسيق الإقليمي شروط العقود وإدارة المخاطر، وأن يدعم إنشاء مراكز تميز عربية في الهندسة النووية، والأمن السيبراني، وخدمات المحاكاة، والتدريب.

خامساً: سيناريوهات المسار النووي العربي حتى عام 2040

ليس الغرض من السيناريوهات التنبؤ، بل اختبار المسارات المحتملة وبناء سياسات أكثر مرونة. وتستند هذه السيناريوهات إلى محورين: (أ) الجاهزية الوطنية (مرتفعة/ منخفضة)، و(ب) البيئة الإقليمية (مستقرة/ مضطربة).

1. مؤشرات الإنذار المبكر: رصد مسارات السيناريوهات

تكتسب السيناريوهات فائدة عملية عندما تُربط بأنظمة رصد تكشف المسار الذي يتحقق فعلياً. وتُمكن "المؤشرات"، أو علامات الإنذار المبكر، صناع القرار من تتبع تطوّر السيناريو وتعديل الاستراتيجيات قبل اكتماله. ويحدّد هذا المبحث مؤشرات قابلة للملاحظة لكل سيناريو، بما يتيح استجابات سياسية تكيفية.

32 IAEA/ GNSSN, "Overview of Arab Network of Nuclear Regulators (ANNuR) and Its Achievements," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F32p>

33 OECD Nuclear Energy Agency (NEA), "Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency (Convention on Assistance)," accessed on 18/2/2026, at: <https://acr.ps/1L9F2O6>

وتُستنبط مؤشرات الإنذار المبكر من خلال ترجمة العوامل الرئيسة الدافعة إلى التغيير، وأوجه عدم اليقين الحاسمة في إطار السيناريوهات، إلى إشارات يمكن ملاحظتها وقياسها ومراقبتها دوريًا. وتبدأ العملية بتحديد المتغيرات التي تتحكم في الانتقال بين السيناريوهات، وهي: الجاهزية الوطنية، واستقلالية الجهة التنظيمية، والقدرة التمويلية، والموارد البشرية، والأمن السيبراني، وترتيبات الوقود والنفائات، وقبول الجمهور، والاستقرار الإقليمي، وتكاليف التكنولوجيا، وقدرة البدائل التنافسية. ثم يُحوّل كل متغير إلى مؤشر واحد أو أكثر يمكن تتبعه بمرور الزمن، مثل إتمام تقييمات البنية التحتية للوكالة الدولية للطاقة الذرية، واستقلالية ميزانية الجهة التنظيمية، وعدد المتخصصين الوطنيين المرخصين، والتأخيرات أو تجاوزات التكلفة في المشروعات النووية العالمية، واتجاهات تكلفة الطاقة المتجددة والتخزين، والهجمات الإلكترونية على البنية التحتية الحيوية، وشدة الصراعات الإقليمية، وأقساط التأمين، وتفعيل آليات التعاون العربية أو تعليقها. ولا ينبغي قراءة هذه المؤشرات بمعزل عن بعضها البعض، بل ينبغي تجميعها ضمن أماط تكشف التحرك نحو سيناريو محدد. فعلى سبيل المثال، يشير ارتفاع القدرة التنظيمية، واستقرار التعاون الإقليمي، ونجاح نشر المفاعلات النووية الصغيرة، وتوافر تكاليف تمويل قابلة للإدارة، إلى التحرك نحو نهضة نووية خاضعة للرقابة. وفي المقابل، يشير ضعف المؤسسات، وتصادد المخاطر الإقليمية، وارتفاع تكاليف التأمين، والتراجع الأسرع في تكلفة الطاقة المتجددة والتخزين، إلى مسار من الركود أو التراجع النووي. لذلك، ينبغي أن تعمل مؤشرات الإنذار المبكر بوصفها أداة للحوكمة التكيفية، لأنها تتيح لصناع السياسات مراجعة الافتراضات كل ثلاثة أشهر أو سنويًا، وتعديل أولويات الاستثمار، وتأجيل الالتزامات غير القابلة للتراجع عند ارتفاع المخاطر، وتسريع الاستعداد عند ظهور ظروف مواتية.

أ. مؤشرات بُعد الجاهزية

يتجلى التقدّم نحو الجاهزية الوطنية العالية من خلال تطورات مؤسسية قابلة للقياس. وتشمل المؤشرات الإيجابية إنشاء هيئة تنظيمية مستقلة قانونيًا ميزانية مخصصة، بحد أدنى يراوح بين 0.5 و1 في المئة من تكاليف المشروع المتوقعة سنويًا لضمان إشراف فعال، وإتمام المرحلة الأولى من بعثات المراجعة النظرية للوكالة الدولية للطاقة الذرية بنتائج مُرضية في جميع قضايا البنية التحتية التسع عشرة، وتطوير قوة عاملة وطنية تستوفي المعايير المطلوبة، بما يراوح بين 200 و300 موظف مرخص لكل 1000 ميغاواط من القدرة المخططة، إضافة إلى التصديق على الاتفاقيات الدولية الرئيسة، مثل اتفاقية السلامة النووية، والاتفاقية المشتركة بشأن الوقود المستهلك والنفائات المشعة، واتفاقية الإخطار المبكر والمساعدة.

وفي المقابل، تشمل مؤشرات انخفاض الجاهزية عمل الهيئة التنظيمية تحت إشراف وزاري من دون استقلالية في الميزانية، وعدم إتمام تقييمات البنية التحتية، أو التأجيل المتكرر لبعثات مراجعة النظراء، وعدم القدرة على شغل المناصب التنظيمية بمواطنين مؤهلين، بما يفرض الاعتماد على استشاريين دوليين، فضلًا عن عدم التصديق على الأطر القانونية الدولية أو الانسحاب منها. وتقدّم أماط تخصيص الميزانية

مؤشرات بالغة الدلالة؛ فاستمرار تمويل أنشطة الجاهزية قبل بدء المشروع يدلّ على التزام فعلي، في حين تشير تخفيضات الميزانية، أو إعادة توجيه الوكالات النووية نحو مهمات غير ذات صلة، إلى تراجع الأولويات.

ب. مؤشرات البيئة الجيوسياسية

يتجلى الاستقرار الإقليمي من خلال مؤشرات أمنية ومؤسسية على السواء. وتشمل مؤشرات البيئة المستقرة انخفاض وتيرة الحوادث العسكرية العابرة للحدود، وتسوية النزاعات الإقليمية الكبرى، وتفعيل مشاريع الربط الكهربائي الإقليمي عبر اتفاقيات تشغيلية ملزمة، وتنفيذ تدريبات مشتركة ناجحة للاستجابة للطوارئ تتضمن سيناريوهات نووية وإشعاعية عابرة للحدود، فضلاً عن توسيع نطاق عمل الوكالة الوطنية للطاقة النووية من خلال زيادة التمويل وبرامج التعاون التقني.

وفي المقابل، تشمل مؤشرات البيئة المضطربة تصاعد النزاعات الإقليمية وتأثيرها في البنية التحتية الحيوية، والهجمات الإلكترونية التي تستهدف منشآت الطاقة أو أنظمة التحكم، سواء أكانت نووية أم غير نووية، وتعليق مبادرات التعاون الإقليمي أو انهيارها، وفرض عقوبات دولية تؤثر في سلاسل إمداد الوقود النووي أو نقل التكنولوجيا. وتُعدّ مؤشرات سوق التأمين شديدة الحساسية؛ إذ يشير ارتفاع أقساط التأمين على تغطية المخاطر السياسية، وانسحاب شركات التأمين من المشاريع النووية، أو اشتراط ضمانات حكومية، إلى تدهور تصوّرات المخاطر.

ج. مؤشرات التكنولوجيا والسوق

تُشكّل التوجهات التكنولوجية العالمية مسارات قابلة للتطبيق بصرف النظر عن الظروف الإقليمية. وتشمل مؤشرات تحسّن القدرة التنافسية للطاقة النووية نجاح نشر المفاعلات المعيارية الصغيرة ضمن أهداف التكلفة والجدول الزمني، أي استكمال وحدات متعددة ضمن هامش خطأ يبلغ ± 15 في المئة من التكلفة والجدول المتوقعة، وإنشاء سلاسل إمداد تجارية لليورانيوم عالي التخصيب (HALEU) مع تعدّد الموردين، إضافة إلى تباطؤ انخفاض تكلفة الطاقة المتجددة والتخزين أو استقرارها، بحيث تصبح الانخفاضات السنوية أقل من 5 في المئة بدلاً من المعدلات التاريخية التي راوحت بين 10 و20 في المئة. أما مؤشرات تراجع القدرة التنافسية للطاقة النووية، فتشمل استمرار ارتفاع تكلفة مشاريع المفاعلات الجديدة عالمياً، وإلغاء مشاريع المفاعلات المعيارية الصغيرة أو تأجيلها إلى أجل غير مسمى، واستمرار انخفاض تكلفة الطاقة المتجددة والتخزين بنسبة 10 في المئة أو أكثر سنوياً، إضافة إلى تخلي شركات المرافق الكبرى عن برامج بناء المفاعلات النووية الجديدة لمصلحة محافظ استثمارية بديلة.

د. إشارات السيناريو المتكاملة

تتضح مسارات السيناريوهات من خلال مجموعات من المؤشرات، لا عبر إشارات منفردة. ويتطلّب سيناريو "النهضة المدارة" توافر إشارات إيجابية متزامنة تتعلق بالجاهزية، مثل الاستقلالية التنظيمية وتطوير

القوى العاملة، والاستقرار، مثل تقدّم التعاون الإقليمي، والتكنولوجيا، مثل نجاح تجارب المفاعلات النووية الصغيرة واستقرار اقتصاديات الطاقة النووية أو تحسّنها. وفي المقابل، يتجلّى سيناريو "الشتاء النووي" من خلال تراكم إشارات سلبية عبر أبعاد متعددة، مثل وقوع حادثة نووية كبيرة على المستوى العالمي بالتزامن مع تصاعد النزاعات الإقليمية، وتآكل القدرات التنظيمية، والانخفاض الحاد في تكاليف البدائل.

ومن ثمّ، ينبغي لصنّاع القرار إنشاء أنظمة رصد رسمية لتتبع هذه المؤشرات على أساس ربع سنوي، مع تحديد عتبات مسبقة لتفعيل مراجعات السياسات. ومن شأن ذلك أن يحوّل السيناريوهات من مجرد تصوّرات مستقبلية إلى أداة عملية لدعم اتخاذ القرار، بما يتيح تصحيح المسار قبل الدخول في التزامات لا رجعة فيها ضمن ظروف متدهورة.

إطار يبيّن سيناريوهات مستقبل الطاقة النووية المدنية في الدول العربية في أفق عام 2040

السيناريو (1): نهضة نووية منضبطة (جاهزية مرتفعة + بيئة مستقرة)

الملامح العالمية: توسع في بناء المفاعلات، وتحسن التمويل، وتقدم تدريجي في ترخيص المفاعلات الصغيرة المعيارية مع تنوع موردي الوقود المتقدم.

التداعيات عربيًا: تزداد جدوى النووي في دول محدودة ذات جاهزية عالية وشبكات كبيرة، وقد تتوسع تطبيقات التحلية/ الحرارة الصناعية. ويصبح التعاون العربي عبر التنظيم والربط والطوارئ "مسرعًا" للثقة وتقليل المخاطر.

السيناريو (2): ركود نووي وغيوم متسارع للطاقة المتجددة (جاهزية منخفضة + بيئة مستقرة)

الملامح العالمية: استمرار تشغيل الأسطول القائم مع تباطؤ الإضافات الجديدة بسبب التمويل ومنافسة المتجددة. **التداعيات عربيًا:** تتجه أغلب الدول إلى حزمة بدائل أسرع (متجددة + تخزين + كفاءة + ربط)، ويبقى النووي محصورًا في البرامج القائمة/ تحت الإنشاء من دون توسع على نطاق واسع.

السيناريو (3): الشتاء النووي العربي (جاهزية منخفضة + بيئة مضطربة)

الملامح العالمية: وقوع حادثة كبيرة أو تصاعد مخاطر أمنية ترفع تكلفة التأمين والتمويل وتشدد شروط الترخيص. **التداعيات عربيًا:** يتراجع خيار بناء محطات قوى جديدة على نحو شبه كامل، وتتقدم أولوية بناء الرقابة والإشعاع والطوارئ والتطبيقات السلمية غير الكهربائية. ويصبح التعاون الإقليمي في الطوارئ والشفافية شرطًا لحماية السكان والبيئة.

السيناريو (4): تقدم تكنولوجي مشروط (جاهزية مرتفعة + بيئة مضطربة)

الملامح العالمية: نجاحات تقنية في المفاعلات الصغيرة المعيارية والوقود المتقدم، مع بقاء معضلات سلاسل الإمداد (خصوصًا HALEU) حساسة جيوسياسيًا، ويدخل الاندماج بوصفه حقلاً بحثيًا واعدًا من دون توسع كهربائي واسع قبل عام 2040⁽³⁴⁾. **التداعيات عربيًا:** تتحسن جدوى المفاعلات الصغيرة المعيارية في دول ذات جاهزية عالية، لكن التوسع يظل مرتهنًا بحل معضلة الوقود، وسلاسل الإمداد، والاستقرار الأمني، والسيبراني. وقد تستثمر بعض الدول في "الدبلوماسية العلمية" للاندماج من دون التزام ببناء محطات اندماجية.

سادسًا: توصيات سياساتية وخريطة طريق "لا يُندم عليها"

توصي الدراسة بحزمة سياسات "لا يُندم عليها" (No-Regret Actions)، تُعزّز أمن الطاقة والمياه في الدول العربية بغضّ النظر عن خيار بناء محطات نووية من عدمه. وتشمل هذه الحزمة بناء الجاهزية المؤسسية، بما في ذلك التنظيم المستقل، والسلامة، والأمن، والأمن السيبراني، والملاك الوطني، وخطط الوقود والنفائات والطوارئ، واعتماد اختبار مفاضلة صارم قبل أيّ التزام مالي كبير، وتحويل التكامل العربي إلى مشروع مؤسسي مستقر عبر التدريب، والمراجعات، وبروتوكولات الطوارئ، والربط الكهربائي، إلى جانب الاستثمار في برامج عربية مشتركة لحلول الماء والطاقة المنخفضة المخاطر، وبناء قدرات بشرية ومعرفية طويلة الأجل. أما الاندماج النووي، فتتترح الدراسة التعامل معه بوصفه استثمارًا معرفيًا وشراكات بحثية، من دون افتراض جاهزيته التجارية الواسعة قبل عام 2040:

- ✦ بناء الجاهزية بغضّ النظر عن قرار "البناء": تعزيز استقلالية الهيئات الرقابية ورفع كفاءتها، واعتماد متطلبات السلامة والأمن ومعاييرهما، بما في ذلك الأمن السيبراني للمنشآت والبنى التحتية الحرجة، والاستثمار الطويل الأجل في الملاك الوطني، ووضع خطط وطنية قابلة للتنفيذ لإدارة الوقود والنفائات والاستجابة للطوارئ.
- ✦ اعتماد "اختبار المفاضلة" قبل أيّ التزام مالي كبير: إلزام أيّ مقترح نووي بمقارنة شفافة ومحكمة مع حزمة البدائل، التي تشمل الطاقة المتجددة، والتخزين، وتحديث الشبكات والربط، وكفاءة الطاقة، والغاز المنخفض الانبعاثات عند الحاجة. وينبغي أن تشمل المقارنة التكلفة الكلية ودورة الحياة، والجدول الزمني ومخاطر التأخير، وتكلفة التمويل وأثرها في الدين العام، وتكلفة الفرصة البديلة، ومخاطر الاعتماد الخارجي أو التبعية في الوقود والخدمات والصيانة.
- ✦ تحويل التكامل العربي إلى مشروع مؤسسي مستقر: تفعيل الأطر الإقليمية القائمة وتعميقها، مثل الشبكة العربية للهيئات الرقابية النووية، وتطوير برامج تدريب مشتركة ومراجعات نظراء، وإقرار بروتوكولات عربية موحدة للطوارئ والإخطار وتبادل البيانات، ودفع مشاريع الربط الكهربائي والسوق الإقليمية للكهرباء بوصفها بنية انتقال طاقي تخدم النووي والبدائل معًا. ويُستحسن أن تُصاغ هذه الترتيبات ضمن قواعد تعاون مستقرة وآليات حوكمة لا تتأثر بتغيّر السياسات القصيرة الأمد، ولا سيما في مجالات الربط الكهربائي، وأمن البنى التحتية الحرجة، والاستجابة للطوارئ.
- ✦ إطلاق "برامج عربية مشتركة" لحلول الماء والطاقة المنخفضة المخاطر: تركيز الجهد الاستثماري والبحثي على سلة حلول عالية العائد وأقل مخاطرة، تشمل الطاقة المتجددة، والتخزين، والشبكات، والتحلية ذات الكفاءة، وكفاءة الطاقة، وإدارة الطلب، مع تنسيق المعايير، والمشتريات، والخبرات على المستوى الإقليمي حيث أمكن.

✦ بناء قدرات بشرية ومعرفية عربية طويلة الأجل: تأسيس مراكز تميز عربية أو تعزيز القائم منها، في مجالات الشبكات والتخزين، والتحلية وتقنيات المياه، والأمن السيبراني للبنى التحتية الحرجة، واقتصاديات الطاقة والنمذجة، إلى جانب إطلاق برامج منح وزمالات، ومختبرات مشتركة، وربط ذلك بمؤشرات أداء قابلة للقياس، مثل عدد المتخصصين المعتمدين، وبرامج التدريب، والمشاريع المشتركة المنشورة أو المطبقة.

✦ التعامل مع الاندماج النووي بوصفه استثماراً معرفياً لا "حلاً قريباً للشبكة": تشجيع شراكات بحثية عربية انتقائية مع البرامج الدولية الرائدة، وبناء قدرات وطنية في المواد المتقدمة، والحوسبة، والتحكم، والقياس، من دون بناء خطط كهرباء وطنية على افتراض دخول الاندماج النووي تجارياً على نطاق واسع قبل عام 2040⁽³⁵⁾.

ويلخص الجدول (3) خريطة الطريق السياساتية هذه:

الجدول (3)

خريطة طريق لسياسات "لا يُندم عليها" حتى عام 2040

المرحلة	الهدف الاستراتيجي	الإجراءات الرئيسة	مؤشرات قابلة للقياس	بوابة القرار
المرحلة الأولى: الاستعداد للتشخيص وفحص الخيارات	تحديد إذا ما كانت الطاقة النووية خياراً مبرراً، وليست مجرد تفضيل سياسي أو تكنولوجي	إجراء تدقيق وطني للاستعداد، وتطبيق "شاشة القرار" المكونة من عشرة أسئلة، ومقارنة الطاقة النووية بمصادر الطاقة المتجددة، والتخزين، وتحديث الشبكة، والكفاءة، والربط الإقليمي، والغاز المنخفض الانبعاثات عند الحاجة إلى ذلك	إنجاز تقرير الاستعداد الوطني، ونشر تقييم مقارن لتكلفة النظام، وتقييم جميع قضايا البنية التحتية التسع عشرة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، وتحديد الثغرات في التمويل والشبكة والوقود والنفائات والطوارئ	لا ينبغي المضي قدماً في أي التزام نووي كبير قبل أن يُظهر الاختبار المقارن أن الطاقة النووية توفر ميزة واضحة على مستوى النظام في ظل افتراضات واقعية للتكلفة والتأخير والمخاطر
المرحلة الثانية: الاستعداد المؤسسي والتنظيمي والأمني	بناء قدرات مفيدة، سواء جرى بناء المفاعلات في نهاية المطاف أم لم يجر	تعزيز الاستقلالية القانونية للهيئة التنظيمية، وتأمين تمويل تنظيمي مستقر، وتطوير أطر السلامة والأمن والأمن السيبراني والضمانات وإدارة النفائات والاستجابة للطوارئ، والتصديق على الاتفاقيات الدولية ذات الصلة أو تفعيلها	إنشاء هيئة تنظيمية مستقلة أو تعزيزها، وميزانية تنظيمية مخصصة، وعدد من المفتشين المدربين والمتخصصين الوطنيين المرخصين، وتدريبات منتظمة على الأمن السيبراني والطوارئ، والتصديق على اتفاقيات السلامة والإخطار المبكر والمساعدة والاتفاقيات المتعلقة بالنفائات	إذا ظل الاستقلال التنظيمي والقدرة على الأمن السيبراني والتأهب للطوارئ ضعيفاً، فينبغي أن تظل السياسة مقتصرة على البحث والتدريب والحماية من الإشعاع والتطبيقات السلمية غير الكهربائية

المرحلة	الهدف الاستراتيجي	الإجراءات الرئيسية	مؤشرات قابلة للقياس	بوابة القرار
المرحلة الثالثة: تعزيز مرونة الطاقة والمياه من خلال بدائل أقل مخاطرة	منح الأولوية للاستثمارات السريعة والمرنة والأقل مخاطرة التي تعزز أمن الطاقة والمياه في جميع السيناريوهات	توسيع نطاق الطاقة المتجددة، وتحديث شبكات النقل والتوزيع، وتطوير التخزين، وتحسين كفاءة الطاقة وإدارة الطلب، والاستثمار في تحلية المياه الفعالة وتكامل المياه والطاقة	زيادة القدرة المتجددة، وسعة التخزين، وتقليل خسائر النقل، وسعة الربط البيني، وتقليل ذروة الطلب، ومؤشرات كفاءة تحلية المياه، وتقليل كثافة الانبعاثات في قطاع الطاقة	لا ينبغي أن يتقدم استخدام الطاقة النووية إلا إذا لم تتمكن البدائل من تلبية احتياجات الموثوقية، أو تحلية المياه، أو إزالة الكربون بتكلفة ومخاطر مقبولة
المرحلة الرابعة: التكامل العربي الإقليمي	تحويل التعاون العربي من تنسيق مؤقت إلى آلية مؤسسية دائمة	تعميق التعاون بين أعضاء الشبكة العربية للهيئات التنظيمية النووية، وتنسيق المعايير التنظيمية، ووضع بروتوكولات طوارئ مشتركة، وإجراء تدريبات إقليمية، وتسريع ربط الكهرباء وترتيبات سوق الطاقة الإقليمية	عدد المراجعات التنظيمية المشتركة، والتدريبات الطارئة المشتركة، وأنظمة تبادل البيانات البينية عبر الحدود، واتفاقيات الربط التشغيلي، وبرامج التدريب المشتركة، ومراكز التميز الإقليمية	إذا تدهور التعاون الأمني الإقليمي والتنسيق في حالات الطوارئ، فينبغي تأجيل التوسع النووي أو حصره في تطبيقات غير توليد الطاقة
المرحلة الخامسة: رأس المال البشري والبنية التحتية المعرفية	إنشاء قاعدة معرفية عربية مستدامة لإدارة الطاقة النووية والتخطيط الأوسع نطاقاً لانتقال الطاقة	إنشاء مراكز عربية متميزة في مجال التنظيم النووي، والأمن السيبراني، ونمذجة الطاقة، والشبكات، والتخزين، وتحلية المياه، والاستجابة للطوارئ، وتمويل الزمالات والمختبرات المشتركة	عدد المتخصصين المعتمدين، وعدد مشاريع البحث المشتركة، وساعات التدريب السنوية، ومراكز المحاكاة التشغيلية، ونماذج أنظمة الطاقة المنشورة، والمشاركة في بعثات مراجعة النظراء الدولية	ينبغي للدول التي لا تستطيع الاحتفاظ بالخبرات الوطنية أن تتجنب الالتزامات التي لا رجعة فيها بشأن المفاعلات، وأن تركز أولاً على بناء القدرات
المرحلة السادسة: المراجعة التكوينية ومراقبة التكنولوجيا حتى عام 2040	المحافظة على المرونة الاستراتيجية مع تطور التقنيات والتكاليف والمخاطر الجيوسياسية	مراقبة نشر المفاعلات النووية الصغيرة، وسلاسل إمداد اليورانيوم العالي التخصيب، وتكاليف بناء المفاعلات النووية، وتكاليف الطاقة المتجددة والتخزين، وأفراط التأمين، والتهديدات السيبرانية، والقبول العام، والاستقرار الإقليمي	لوحة معلومات الإنذار المبكر الفصلية، ومراجعة السيناريوهات السنوية، ومعايير الانحراف عن التكلفة والجدول الزمني، ومؤشرات تنوع إمدادات الوقود، واستطلاعات ثقة الجمهور، واتجاهات علاوة المخاطر والتأمين	يجب المضي قدماً في الخطط النووية، أو إعادة إيقافها مؤقتاً، أو إلغاؤها وفقاً لتجارب محددة مسبقاً، بدلاً من منطوق التكاليف الثابتة. وينبغي أن يبقى الاندماج النووي شراكة بحثية ومعرفية، لا افتراضاً تخطيطياً لإمدادات الكهرباء قبل عام 2040

خاتمة

لا يقدّم هذا التحليل جوابًا ثنائيًا ("نعم"/ "لا") عن سؤال مستقبل الطاقة النووية المدنية عربيًا، بل يضعه ضمن إطار "مشروط" يقوم على جاهزية مؤسسية وبشرية صارمة، ومفاضلة عملية مع البدائل، وبيئة تعاون إقليمي تُقلّل المخاطر والتكلفة. وحتى عام 2040، يُرجّح أن يظلّ النووي محدود الانتشار في المنطقة، في حين تبقى "الاستثمارات التي لا يُندم عليها" في المؤسسات، والحوكمة، والشبكات، والكفاءة، والربط الإقليمي، الرهان الأكثر متانة، أيًا كان المسار التقني المختار.

ويكشف هذا التحليل الاستشرافي أنّ الطاقة النووية في العالم العربي تمثّل تقنية تقع عند مفترق طرق بين الطموح والقيود. فبينما توفّر هذه الطاقة مزايا فعلية لبعض التطبيقات، مثل الكهرباء المستقرة المنخفضة الكربون، والتكامل مع تحلية المياه، وتوفير الحرارة اللازمة للعمليات الصناعية، فإنّ شروط نشرها الفعّال أكثر تقييدًا مما يُعتقد غالبًا. ويظهر إطار الجاهزية الرباعي الأبعاد أنّ امتلاك التكنولوجيا لا يمثّل سوى عنصر واحد ضمن منظومة معقّدة تشمل الحوكمة، والتنظيم، والتمويل، والسلامة، والأمن، والقدرات البشرية، والتأهب للطوارئ. وتواجه الدول التي تفكّر في مسارات الطاقة النووية خيارًا جوهريًا: إمّا بناء جاهزية مؤسسية شاملة قبل الالتزام بالتكنولوجيا، بما يخفّض مخاطر المشروع لكنه يؤخّر خفض الانبعاثات، أو السعي إلى نشرها بوتيرة متسارعة مع بناء القدرات بالتوازي، بما ينطوي على قبول مخاطر أعلى تتعلق بتجاوز التكلفة، أو حوادث السلامة، أو التخلي عن المشروع.

ويتحدّى التحليل المقارن الروايات التبسيطية التي تصوّر الطاقة النووية إما حلًا سحريًا وإما خيارًا منبوذًا. وبدلًا من ذلك، يبرزها بوصفها خيارًا مرتبطًا بالسياق، تتحدّد جدواه من خلال تفاعل خصائص الشبكة، والقدرة المالية، والنضج المؤسسي، وتكلفة الفرصة البديلة مقارنةً بالبدائل المتاحة. وبالنسبة إلى معظم الدول العربية حتى عام 2040، يُرجّح العائد على الاستثمار المعدّل بحسب المخاطر كفة الاستثمارات الموجهة نحو الطاقة المتجددة، وتخزين الطاقة، وتحديث الشبكات، والربط الإقليمي، ليس لأن الطاقة النووية أدنى بطبيعتها، بل لأن هذه البدائل توفّر مزيّجًا أفضل من السرعة، والفاعلية من حيث التكلفة، وقابلية التجزئة، وإدارة المخاطر، في ظل مستويات الجاهزية المؤسسية الحالية. ويُقرّ إطار سياسة "عدم الندم" بأنّ الاستثمارات في القدرات التنظيمية، وثقافة السلامة، والتأهب للطوارئ، والتعاون الإقليمي، تحتفظ بقيمتها بغضّ النظر عن الخيارات التكنولوجية النهائية، بما يخدم أهدافًا أوسع تتعلّق بأمن الطاقة وحوكمتها.

وفي الحصيلة، تتبلور أمام صنّاع السياسات العرب ثلاثة توجهات استراتيجية عند اتخاذ القرارات النووية:

- ✦ أولاً، ينبغي للدول التي تمتلك برامج نووية قائمة أو متقدمة، مثل الإمارات ومصر، أن تمنح الأولوية للتمييز التشغيلي، والحفاظ على المعرفة، وتطوير سلاسل التوريد، مع الإبقاء على إمكانية التوسع استنادًا إلى الأداء المثبت والظروف الاقتصادية المتغيّرة. ويقدم النجاح في هذه

الحالات الرائدة أدلة إقليمية مهمة بشأن التكلفة، والجدول الزمني، والمتطلبات المؤسسية، ضمن الظروف العربية.

✦ ثانيًا، ينبغي للدول التي لا تزال في مراحل الاستكشاف المبكرة أن تعتمد أطرًا واضحة ومتسلسلة لاتخاذ القرار، تفصل بين الاستثمارات التحضيرية القابلة للتراجع، مثل البنية التحتية التنظيمية، والقدرات البشرية، ودراسات الجدوى، وبين الالتزامات التكنولوجية غير القابلة للتراجع، مثل عقود بناء المفاعلات وتجهيز المواقع. ويتيح هذا النهج المرحلي للدول بناء جاهزيتها مع الحفاظ على المرونة اللازمة لإعادة توجيه الموارد نحو بدائل أخرى إذا تراجعت الجدوى الاقتصادية النسبية، أو إذا كان تطوّر الجاهزية أبطأ من المتوقع. وتوفّر معايير العتبة، أيضًا، محفزات لاتخاذ قرارات التقدّم أو إعادة التوجيه.

✦ ثالثًا، ينبغي الارتقاء بآليات التعاون الإقليمي من مجرد تبادل طوعي للمعلومات إلى ترتيبات مؤسسية ملزمة في المجالات التي يحقق فيها العمل الجماعي فوائد واضحة. وتشمل المجالات ذات الأولوية توحيد المعايير التنظيمية للحدّ من عدم اليقين لدى الموردين وتكلفة الترخيص، واعتماد بروتوكولات وتدريبات مشتركة للاستجابة للطوارئ نظرًا إلى آثارها العابرة للحدود، وتنسيق تخطيط الشبكات وربطها بما يتيح توسيع النظام وزيادة مرونته، فضلًا عن إنشاء مرافق بحثية وبرامج تدريبية مشتركة تحقق وفورات الحجم في تنمية رأس المال البشري. وتوفّر الشبكة العربية للهيئات التنظيمية النووية أساسًا مؤسسيًا يحتاج إلى تعزيز في الولاية، والموارد، وآليات الإنفاذ.

ويحدّد هذا التحليل عددًا من الأولويات البحثية لتعزيز فهم تحولات الطاقة النووية في المناطق النامية. فمن شأن الدراسات التجريبية التي ترصد التكلفة الفعلية، والجدول الزمني، ونتائج أداء المشاريع النووية الحديثة في الاقتصادات الناشئة، خارج العالم العربي، أن توفّر أدلة تساعد في اختبار ادعاءات الموردين وتحسين نماذج التكلفة. ثم إنّ التحليل المؤسسي المقارن، الذي يدرس فاعلية الأنظمة، وتطوير ثقافة السلامة، واستراتيجيات الحفاظ على المعرفة ضمن أنظمة سياسية وإدارية متنوعة، يمكن أن يسهم في تطوير مقاربات بناء الجاهزية. وإضافة إلى ذلك، فإنّ نمذجة التقييم المتكامل، التي تدمج الطاقة النووية مع الطاقة المتجددة، والتخزين، وموارد جانب الطلب ضمن سيناريوهات مختلفة لأسعار الكربون وتكلفة التكنولوجيا، من شأنها أن تعمّق فهم المحافظ المثلى للنظام في ظلّ عدم اليقين.

وأخيرًا، لا تزال الأبحاث المتعلقة بديناميات القبول الاجتماعي، واستراتيجيات التواصل مع الجمهور، وآليات إشراك أصحاب المصلحة في صنع القرار النووي محدودة التطور في السياق العربي. لذلك، فإن فهم محددات "الترخيص الاجتماعي"، وآليات تعزيزه أو فقدانه، يؤثر مباشرة في جدوى المشروع، بغضّ النظر عن العوامل التقنية أو الاقتصادية. ومن ثم، ينبغي توسيع نطاق تحليل السيناريوهات لاستكشاف التفاعلات بين قرارات نشر الطاقة النووية وأهداف السياسة الصناعية الأوسع، بما يشمل القدرة التصنيعية المحلية، ونتائج نقل التكنولوجيا، والموقع ضمن سلاسل التوريد النووية العالمية. ومن

شأن هذه المسارات البحثية أن تعزّز الأساس التحليلي لاستشراف مستقبل الطاقة النووية العربية، مع الإقرار بوجود حالات من عدم اليقين يصعب حسمها أو الوصول فيها إلى حلول نهائية.

وفي الحصيلة، يميل هذا التحليل إلى عدم ترجيح البدء ببرامج قوى نووية جديدة، حتى ضمن الاستخدامات السلمية، في عدد كبير من السياقات العربية خلال الأفق القريب، أي حتى عام 2040. ولا يعود ذلك إلى رفض مبدأ الطاقة النووية في حدّ ذاته، بل إلى "محفظة مخاطر" مركّبة تتجاوز البعد التقني. فإنشاء المرافق النووية وتشغيلها يتطلبان بيئة مؤسسية وأمنية تتمتّع بمستوى عالٍ من الاستقرار والقدرة على إدارة المخاطر الطويلة الأجل، بما يشمل استقلالية الجهة الرقابية، وثبات السياسات، واستدامة التمويل، وتوافر كفاءات وطنية مرصّعة، أو "الملاك الوطني"، إضافة إلى وجود منظومة أمن مادي وسيراني متعددة الطبقات، وترتيبات واضحة لإدارة الوقود المستهلك والنفايات والطوارئ.

وفي ظل بيئة إقليمية تتسم بتقلبات جيوسياسية واحتمالات استهداف البنى التحتية الحرجة، تتعاظم متطلبات "الأمن الشامل" للمرافق النووية، وترتفع تكلفة المخاطر، ماليًا وتشغيليًا وسمعيًا، إضافةً إلى أنّ محدودية القدرة على اتخاذ القرار المستقل في بعض الدول، وتذبذب الاستقرار السياسي والأمني، وتفاوت جاهزية المؤسسات، وغياب أطر تعاون عربي ملزمة ومستقرة زمنيًا، كلّها عوامل تُضعف "قابلية الاستدامة" لبرامج القوى النووية مقارنةً بحزمة بدائل أقلّ مخاطرة وأسرع تنفيذًا.

وبناءً على ذلك، تُرجّح الدراسة منح الأولوية، خلال العقدين المقبلين، لاستثمارات ذات عائد أسرع، وتبعية أقل، ومرونة أعلى، مثل التوسع في الطاقات المتجددة، وتعزيز كفاءة الطاقة وإدارة الطلب، وتحديث الشبكات والربط الإقليمي، وتطوير حلول التخزين، وتحسين تقنيات المياه والتحلية، مع توجيه الاستثمار نحو برامج عربية مشتركة في البحث والتطوير وبناء القدرات البشرية والمعرفية. وتُعدّ هذه الاستثمارات "خيارات لا يُندم عليها"، لأنها تعزّز أمن الطاقة والمياه حتى في حال عدم تبني الخيار النووي لاحقًا.

المراجع

- Bradfield, Ron et al. "The Origins and Evolution of Scenario Techniques in Long Range Business Planning." *Futures*. vol. 37, no. 8 (2005).
- Geels, Frank W. "Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-Level Perspective and a Case-Study." *Research Policy*. vol. 31, no. 8-9 (2002).
- IAEA PRIS. "BARAKAH-4 – Reactor Details – Commercial Operation." 5/9/2024. at: <https://acr.ps/1L9F2jy>
- _____. "Egypt – Country Details. El Dabaa Units 1–4 under Construction." at: <https://acr.ps/1L9F32N>
- _____. "United Arab Emirates: Country Details, Barakah Units List." at: <https://acr.ps/1L9F3dp>
- IAEA. "Computer Security at Nuclear Facilities. Nuclear Security Series." at: <https://acr.ps/1L9F2fD>
- _____. "Milestones Approach. Infrastructure Development." at: <https://acr.ps/1L9F2sd>
- _____. "Nuclear Desalination. Overview and Resources." at: <https://acr.ps/1L9F2gQ>
- _____. "Research Reactors in Africa. 2020." at: <https://acr.ps/1L9F2b7>
- _____. *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2024.
- IAEA/GNSSN. "Overview of Arab Network of Nuclear Regulators. ANNuR. and Its Achievements." at: <https://acr.ps/1L9F32p>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). "Renewable Power Generation Costs in 2024. (Executive Summary 2025)." at: <https://acr.ps/1L9F2Kb>
- Kern, Florian & Karoline S. Rogge. "The Pace of Governed Energy Transitions: Agency, International Dynamics and the Global Paris Agreement Accelerating Decarbonisation Processes?" *Energy Research & Social Science*. vol. 22 (2016).
- Lempert, Robert J., Steven W. Popper & Steven C. Bankes. *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. 2003.
- OECD Nuclear Energy Agency (NEA). "Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency. Convention on Assistance." at: <https://acr.ps/1L9F2O6>

- _____. "Convention on Early Notification of a Nuclear Accident. Early Notification Convention." at: <https://acr.ps/1L9F2vm>
- Rotmans, Jan, René Kemp & Marjolein van Asselt. "More Evolution than Revolution: Transition Management in Public Policy." *Foresight*. vol. 3, no. 1 (2001).
- Schneider, Mycle et al. *The World Nuclear Industry Status Report 2019*. Paris: Mycle Schneider Consulting, 2019.
- Schwartz, Peter. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. New York: Currency Doubleday. 1991.
- Sovacool, Benjamin K. "How Long will it Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions." *Energy Research & Social Science*. vol. 13 (2016).
- Thomas, Steve. "The Economics of Nuclear Power: An Update." Heinrich Böll Foundation. 2010. at: <https://acr.ps/1L9F2AD>
- U.S. Department of Energy. "Fusion Energy Strategy 2024." at: <https://acr.ps/1L9F2Mi>
- _____. "TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth." at: <https://acr.ps/1L9F2Xn>
- _____. "What is High-Assay Low-Enriched Uranium. HALEU?" at: <https://acr.ps/1L9F2RB>
- Van der Heijden, Kees. *Scenarios: The Art of Strategic Conversation*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2005.
- World Nuclear Association. "High-Assay Low-Enriched Uranium – HALEU." at: <https://acr.ps/1L9F2hf>
- _____. "Mixed Oxide. MOX. Fuel." at: <https://acr.ps/1L9F2uc>
- _____. "Nuclear Power in Egypt. Updated 28 Nov 2025." at: <https://acr.ps/1L9F2iC>
- _____. "Nuclear Power in Jordan." at: <https://acr.ps/1L9F37r>
- _____. "Nuclear Power in Saudi Arabia." at: <https://acr.ps/1L9F2zO>
- _____. "Processing of Used Nuclear Fuel." at: <https://acr.ps/1L9F3cY>
- _____. "Thorium." at: <https://acr.ps/1L9F2FF>
- _____. "Uranium Enrichment. Updated 6 Jun 2025." at: <https://acr.ps/1L9F2mr>
- _____. "Nuclear Power in the World Today." 18/2/2026. at: <https://acr.ps/1L9F2Gd>