منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)
ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES (OAPEC)

THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES
A RECOGNIZED INDEPENDENT CENTRE OF THE UNIVERSITY OF OXFORD

UNIVERSITY OF OXFORD

تطور الطاقة النووية:
القدرات الحالية والآفاق المستقبلية

The Evolution of Nuclear Energy:
Current Capabilities and Future Prospects

إعداد:

عدنان شهاب الدين،
زميل أبحاث زائر أول، معهد أكسفورد لدراسات الطاقة.

H-Holger Rogner،
باحث فخري، المعهد الدولي لتحليل النظم التطبيقية (IIASA).

Robert J. Budnitz،
مختبر لورانس بيركلي الوطني (متقاعد)

Charles McCombie،
شركة McCombie للاستشارات

ترجمة وعرض

المهندس تركي حسن حمش
خبير أول بترول - أوابك

1. رسالة الورقة

تقدم هذه الورقة البحثية رؤية متوازنة وواقعية لمستقبل الطاقة النووية، حيث تؤكد أنها ليست حلاً سحرياً، لكنها عنصر أساسي في معادلة الطاقة العالمية. وتبين أن نجاح الطاقة النووية يعتمد على معالجة التحديات الاقتصادية والتنظيمية والاجتماعية، إضافة إلى تطوير نماذج تمويل وتقنيات مبتكرة.

ومن منظور صناعة الطاقة عموماً، تمثل الطاقة النووية فرصة لإعادة تشكيل القطاع وليس مجرد منافس، خاصة في ظل التحول العالمي نحو اقتصاد منخفض الكربون*.

2. النظرة العامة

تشهد الطاقة النووية عودة قوية إلى واجهة مزيج الطاقة العالمي، مدفوعة بثلاثة عوامل رئيسية: أمن الطاقة، إزالة الكربون، والطلب المتزايد على الكهرباء. وقد التزمت 38 دولة بمضاعفة القدرة النووية العالمية ثلاث مرات بحلول عام 2050، مما يعكس تحولاً استراتيجياً في السياسات الطاقية.

3. الوضع الحالي بالأرقام

يواجه قطاع الطاقة النووية تحدي استبدال وتحديث جزء كبير من قدراته الحالية خلال العقود القادمة:

413 مفاعلاً نووياً قيد التشغيل عالمياً.

377 جيجاوات قدرة مركبة.

توفر الطاقة النووية نحو 10% من الكهرباء العالمية.

أكثر من 70% من المفاعلات موجودة في الدول المتقدمة.

متوسط عمر المفاعلات الحالية يتجاوز 36 عاماً.

4. الفجوة المستقبلية

الطاقة النووية تعد مكوناً أساسياً في أي مزيج طاقة مستقبلي موثوق، لأن العالم ليس على المسار الصحيح لتحقيق الحياد الكربوني بحلول 2050، في ظل نمو سريع في الطلب على الكهرباء، ومحدودية الاعتماد الكامل على الطاقة المتجددة، والحاجة إلى مصادر طاقة مستقرة.

5. مسارات التوسع الرئيسية

تمديد عمر المفاعلات القائمة (LTO) لما بعد العمر التصميمي، وهو أمر أقل تكلفة، ويحافظ على القدرة

* المترجم

أبريل 2026

المقال صدر في الموقع الإلكتروني لمعهد أكسفورد لدراسات الطاقة وقد تم ترجمته إلى اللغة العربية بإذن من المعهد

الحالية، وهناك تأثير محدود على التوسع.

بناء مفاعلات كبيرة (LRs) تتميز بقدرة عالية، لكن التكلفة تصل إلى 7- 16 مليار دولار للمحطة، وهناك مخاطر تأخير أو تجاوز للتكاليف.

بناء المفاعلات النمطية الصغيرة (SMRs)، وهي تتميز بقدرة تتراوح بين 20- 300 ميجاوات، وهناك أكثر من 100 مشروع عالمياً لتطويرها، وهي ذات مرونة عالية وتطبيقات متعددة، لكنها لا تزال في مرحلة عدم اليقين التجاري.

6. التحديات الرئيسية

1. التكاليف والمخاطر: ارتفاع تكلفة المشاريع الأولى، وعدم ضمان تحقيق وفورات الحجم أو التكرار، والاعتماد الكبير على الدعم الحكومي.
2. تآكل المعرفة: بسبب قلة المشاريع مما تؤدي إلى فقدان الخبرات، وهذا يعني أن كل مشروع جديد يصبح كأنه مشروع لأول مرة، بينما الدول التي تبني باستمرار تحقق خفضاً في التكاليف.
3. سلاسل الإمداد: هناك حاجة إلى عشرات الآلاف من الكفاءات الجديدة، مقابل محدودية الموردين المتخصصين.
4. الوقود النووي: وهنا تظهر تحديات في إنتاج وقود عالي التخصيب منخفض التركيز HALEU (9- 20%)، إضافة إلى ضرورة الاستثمار في البنية التحتية للتخصيب.
5. النفايات النووية: وأبرز تحدياتها تأخر تطوير المستودعات الجيولوجية، وارتفاع التكاليف خاصة للدول الجديدة في هذا المجال.

7. التحول التكنولوجي

يشهد القطاع تحولاً نحو المفاعلات النمطية الصغيرة SMRs وتطبيقاتها الصناعية، واستخدام الذكاء الاصطناعي في التشغيل والصيانة، إضافة إلى تطوير تصاميم أكثر أماناً وكفاءة. لكن هذا التحول يتطلب تحديث القواعد التنظيمية، وإدارة المخاطر السيبرانية.

8. النماذج التمويلية

تشمل العديد من النماذج، وجميعها من حيث المبدأ تهدف إلى تقليل المخاطر وجذب الاستثمار الخاص*:

* تم شرح النماذج من قبل المترجم

- الشراكة بين القطاعين العام والخاص PPP: وهي اتفاقية طويلة الأجل بين جهة حكومية وشركة من القطاع الخاص، حيث يتولى الطرف الخاص تمويل وتصميم وتنفيذ وتشغيل المشاريع (مثل الطرق أو المستشفيات) مقابل دفعات من الحكومة أو رسوم من المستخدمين، مع توزيع المخاطر بين الطرفين.
- عقود الفروقات CfD: عبر آلية لدعم الاستثمار في الطاقة، تضمن للمستثمر سعراً ثابتاً (سعر التنفيذ) للكهرباء. إذا كان سعر السوق أقل من هذا السعر، تدفع الحكومة الفرق للمستثمر، وإذا كان أعلى، يرد المستثمر الفرق للحكومة، مما يوفر استقراراً مالياً للمشاريع الكبرى.
- نموذج الأصول المنظمة RAB: نموذج تمويلي يستخدم غالباً في البنية التحتية الحصرية (مثل شبكات الكهرباء). يسمح للمستثمر بتحصيل عائد مالي من المستخدمين بمجرد بدء العمل في المشروع (حتى قبل اكتماله)، بناءً على قيمة الأصول التي استثمرها، مما يقلل من تكلفة التمويل.
- نموذج البناء والتملك والتشغيل BOO: اتفاقية يقوم فيها القطاع الخاص ببناء المشروع وتملكه بالكامل وتشغيله بشكل دائم دون الالتزام بنقل الملكية إلى الحكومة لاحقاً. يحصل المستثمر على أرباحه من خلال بيع الخدمات أو المنتجات مباشرة.

9. الفرص الاستراتيجية

الطاقة النووية توفر فرصاً في مجال إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون، ودعم الصناعات الثقيلة، وتحلية المياه، وتزويد المناطق النائية بالطاقة.

10. الاستنتاجات الرئيسية

1. الطاقة النووية ضرورية لتحقيق أهداف المناخ، لكنها ليست كافية وحدها.
2. التوسع يتطلب استثمارات ضخمة وإصلاحات تنظيمية.
3. المفاعلات النمطية الصغيرة تمثل فرصة كبيرة لكنها تحمل مخاطر تجارية عالية.
4. نجاح القطاع يعتمد على استمرارية المشاريع لتجنب تآكل المعرفة.
5. التحدي الأكبر هو تحقيق التوازن بين التكلفة والموثوقية والابتكار.

استعراض الورقة

الموجز

تغيرت النظرة العالمية للطاقة النووية بشكل كبير في السنوات القليلة الماضية، حيث انتقلت من آراء غير محبذة أو رافضة في الغالب لهذا النوع من الطاقة، إلى وجهات نظر مؤيدة ومتفائلة بقوة، وذلك في معظم بلدان العالم سواء المتقدمة منها أو النامية. ينعكس هذا التحول في الدعم المتزايد لإعلان مضاعفة القدرة النووية ثلاث مرات بحلول عام 2050، وهو الإعلان الذي أيدته في البداية 21 دولة في مؤتمر (COP28)، واتسع منذ ذلك الحين ليشمل 38 دولة. إلا أن العديد من التحديات المهمة التي قد تؤخر أو تعيق مساهمة الطاقة النووية في أهداف الطاقة والأمن الشاملة، فضلاً عن أهداف المناخ العالمية، لا تزال تلوح للعيان.

تشمل هذه التحديات التنافسية الاقتصادية، وجاهزية سلاسل التوريد، وقضايا دورة الوقود وإدارة النفايات، والقدرة التنظيمية والمؤسسية، والحاجة إلى الحفاظ على أطر قوية للأمان والأمن والضمانات. وتكتسب هذه التحديات أهمية خاصة مع نشر تقنيات جديدة مثل المفاعلات النمطية الصغيرة (Small Modular Reactors) المعروفة بالاختصار (SMRs)، وغيرها من المفاعلات المتقدمة.

تبحث هذه الورقة في العوامل الاقتصادية والمؤسسية والتقنية الرئيسية التي ستشكل الانتشار المستقبلي للطاقة النووية. كما تستعرض الوضع الحالي للتقنيات والبرامج النووية، وتحدد القضايا الجوهرية التي قد تؤثر على وتيرة وحجم التوسع النووي، وتسلط الضوء على المجالات التي يمكن أن يدعم فيها التحليل الإضافي قرارات السياسة والاستثمار. وتولي اهتماماً خاصاً بالقضايا الواقعة عند تقاطع التكنولوجيا والسياسة والحوكمة والأسواق، وهي مجالات غالباً ما يتم التركيز عليها بشكل أقل في برامج البحوث النووية ذات الطابع التقني الصرف. كما تستعرض الورقة التحديات الرئيسية وتحدد الأسئلة الأساسية التي تستحق مزيداً من الاهتمام لمعالجة هذه التحديات.

1. مقدمة

تعززت القوة الدافعة المتجددة للطاقة النووية من خلال التطورات الدولية الممتدة من مؤتمر (COP28) إلى (COP30) وما بعدهما، مما توج بتشكيل تحالف متنامٍ يضم 38 دولة التزمت بمضاعفة القدرة النووية العالمية ثلاث مرات بحلول عام 2050. لقد عادت الطاقة النووية للظهور كركيزة مركزية في المناقشات المتعلقة بتحول الطاقة، والاستدامة، والأمن. وبعد عقود من الركود الناجم عن التكاليف الباهظة، والمخاوف المتعلقة بالسلامة، والمعارضة الشعبية، شهدت السنوات الأخيرة تحولاً ملحوظاً في المواقف العالمية. إن الاهتمام بتوسيع الطاقة النووية يمر الآن بأعلى مستوياته منذ البدايات الأولى لتطوير هذه التكنولوجيا، مع تركيز خاص على المفاعلات النمطية الصغيرة وتصاميم المفاعلات المتقدمة. ورغم هذا الزخم المتجدد، لا تزال هناك تحديات جسيمة قد تحد أو تعيق مساهمة الطاقة النووية في أهداف أمن الطاقة، وكذلك في خفض انبعاثات غازات الدفيئة، والمساهمة في تحقيق أهداف المناخ العالمية. تصف هذه الورقة هذه التحديات وتحدد الأسئلة الرئيسية التي تستحق مزيداً من الاهتمام.

يتضمن هيكل الورقة ما يلي:

- يتناول القسم 2 التحديات الاقتصادية والتقنية الرئيسية التي تؤثر على توسع الطاقة النووية، بما في ذلك القضايا المتعلقة بالتمويل، وسلاسل التوريد، ومخاطر النماذج الأولى من نوعها FOAK، والدور المتطور للمفاعلات النمطية الصغيرة.
- يناقش القسم 3 الجوانب السياساتية والتنظيمية والمؤسسية، بما في ذلك التكيف التنظيمي لتقنيات المفاعلات المتقدمة والدور المحتمل للرقمنة والذكاء الاصطناعي. كما يراجع القسم 3 اعتبارات الأمان والأمن والضمانات وعدم الانتشار المرتبطة بتصاميم المفاعلات الجديدة ونماذج النشر الناشئة.
- يتطرق القسم 4 إلى تحديات دورة الوقود وإدارة النفايات المشعة، بما في ذلك التخلص الجيولوجي ومفاهيم دورة الوقود الناشئة.
- يبحث القسم 5 في القضايا المؤسسية الشاملة مثل التواصل مع الجمهور، وتحديات الحوكمة في الدول الوافدة حديثاً إلى المجال النووي، وتطوير القوى العاملة.
- يتناول القسم 6 خيارات النشر الاستراتيجية التي تواجه الحكومات والمستثمرين عند الاختيار بين المفاعلات النمطية الصغيرة، أو المفاعلات الكبيرة، أو النهج الهجين.
- يختتم القسم 7 بتلخيص المجالات التي يجب معالجتها للمضي قدماً في النشر النووي ويشير إلى تحليلات أكثر تفصيلاً قيد التنفيذ.

1.1 السياق العالمي: الطاقة النووية وتحول الطاقة

يؤكد تقرير (Climate Action Tracker) لعام 2025 وتحليلات أخرى أن العالم ليس على المسار الصحيح حالياً لتحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام 2050. إن تلبية أهداف اتفاق باريس للمناخ تتطلب نهجاً واقعياً يعالج الركائز الثلاث لتحدي الطاقة: الاستدامة، والأمن والأمان، والقدرة على تحمل التكاليف. توفر الطاقة النووية كهرباء منخفضة الكربون وقابلة للتحكم والتوزيع (Dispatchable)، مما يكمل مصادر الطاقة المتجددة ويعزز موثوقية النظام. وهذا يرتبط مع تصاعد الطلب على الكهرباء بسبب النمو السريع للمركبات الكهربائية، وكهربة الصناعة، وانتشار مراكز البيانات لدعم الذكاء الاصطناعي، والنمو الواسع المستمر في استخدام الكهرباء.

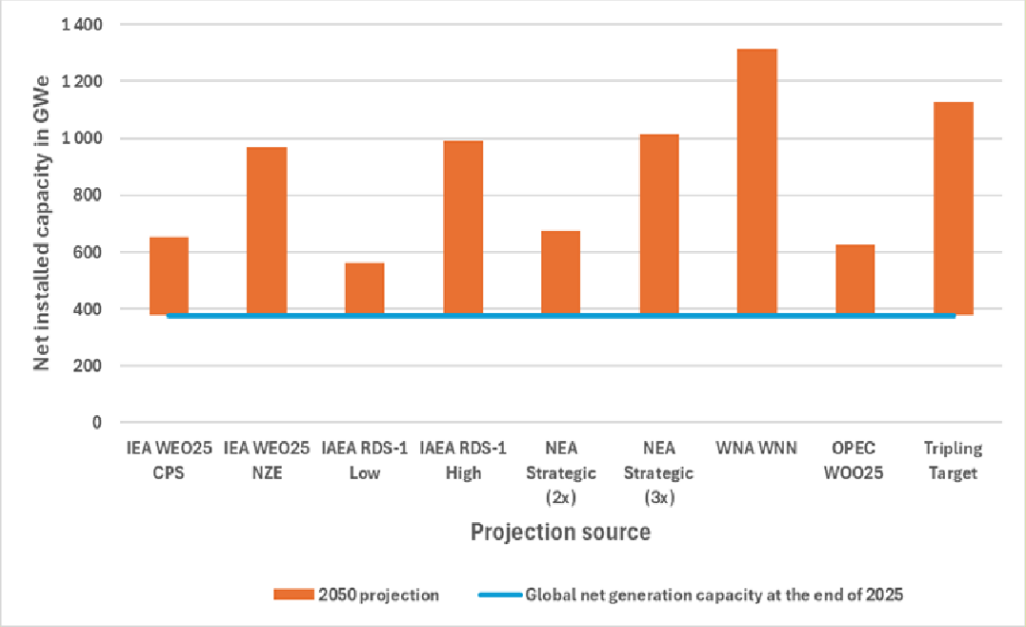
وانعكاساً لهذه الضرورة الملحة، تشير سلسلة من التقييمات الدولية الكبرى المنشورة في عامي 2024-2025 إلى اهتمام متسارع بنشر الطاقة النووية على نطاق واسع. وفي نهاية عام 2025، كان هناك 413 مفاعلاً تعمل في جميع أنحاء العالم بقدرة إجمالية تبلغ 377 جيجاوات كهرباء، مما يوفر ما يقرب من 10% من الكهرباء العالمية. يوجد أكثر من 70% من المفاعلات في الاقتصادات المتقدمة، ولكن متوسط عمرها يتجاوز 36 عاماً، مما يستلزم استثمارات ضخمة في تمديد فترات تشغيلها.

تظهر أحدث توقعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية طويلة المدى مراجعة تصاعدية كبيرة في القدرة النووية العالمية، حيث تقترب سيناريوهات الحالة العليا الآن من مضاعفة القدرة المركبة ثلاث مرات تقريباً بحلول عام 2050. وبالمثل، يؤكد تقرير وكالة الطاقة الدولية الصادر في يناير 2025 الطاقة النووية بأنها تدخل حقبة جديدة، ويدعو إلى توسع سريع في القدرة النووية لدعم أهداف إزالة الكربون وأمن الطاقة على حد سواء. بالتوازي مع ذلك، سلطت وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية الضوء -من خلال مبادرتها (خارطة طريق نحو النووي الجديد) لعام 2025- على الزخم السياسي المتزايد والاهتمام الاستثماري بتسريع البرامج النووية الجديدة في كل من الدول المتقدمة والدول الوافدة حديثاً*. تتفاوت توقعات المساهمة المحتملة للطاقة النووية في جميع أنحاء العالم، الصادرة عن هذه المنظمات وغيرها، بشكل كبير، لأن هناك عوامل كثيرة تدخل في وضع مثل هذه التوقعات. ويظهر هذا التباين الواسع بوضوح في الشكل (1)، الذي يعرض توقعات قدرة الطاقة النووية بموجب سيناريوهات متعددة وضعتها منظمات مختلفة. ويسلط الشكل الضوء على اختلاف جوهري في التوقعات، يتراوح ما بين مضاعفة القدرة النووية العالمية مرتين أو ثلاث مرات وأكثر بحلول عام 2050. ويبين الشكل (2) مثالاً واحداً على افتراضات النشر المحددة التي تؤثر على هذه التوقعات.

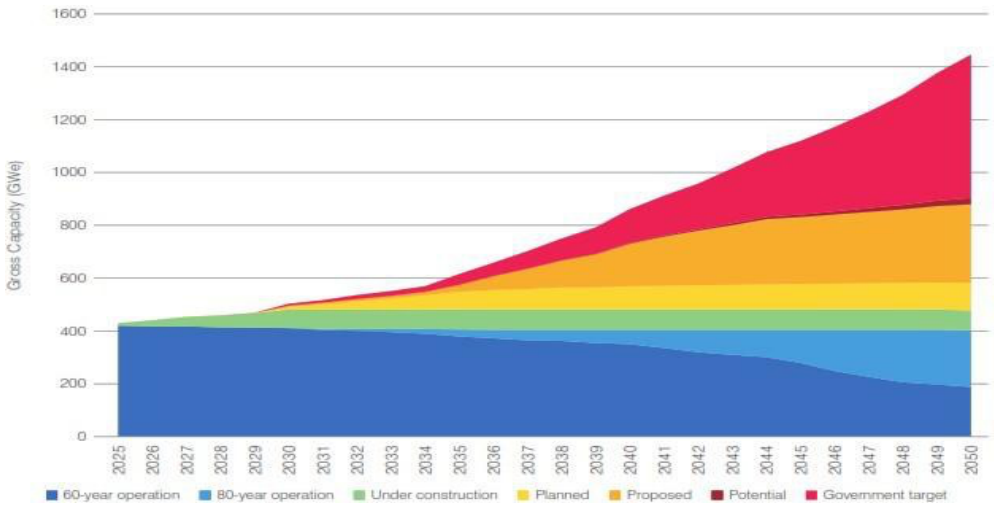
* الدول الوافدة حديثاً (New Comers) هي الدول التي لا تمتلك مفاعلات نووية عاملة حالياً، ولكنها شرعت فعلياً في التخطيط لبناء أول محطة طاقة نووية لديها، أو بدأت في مراحل التنفيذ والإنشاء. المترجم.

لا يسمح نطاق هذه الورقة بإجراء تقييم مفصل للتوقعات العديدة، بل ينصب تركيزها الأساسي على مناقشة القضايا الاقتصادية والتقنية والمجتمعية التي قد تؤثر على معدل النمو المحتمل للطاقة النووية الجديدة.

الشكل 1: توقعات القدرة الصافية لتوليد الطاقة النووية لعام 2050 بوحدة جيجاوات كهرباء من قبل منظمات مختلفة لعام 2050



الشكل 2: القدرة النووية العالمية 2025-2050 (إجمالي جيجاوات كهرباء)



2.1 الفرص والدوافع للتوسع النووي

تكمن وراء الزخم المتجدد للطاقة النووية عدة عوامل متضافرة:

- ارتفاع الطلب على الكهرباء، لا سيما في قطاعات الصناعة، والمركبات الكهربائية، ومراكز بيانات الذكاء

الاصطناعي، بالإضافة إلى النمو الإجمالي البسيط في الاقتصادات النامية.

- المخاوف المتزايدة بشأن أمن الطاقة في ظل الاضطرابات الجيوسياسية.
- الاعتراف بالفوائد البيئية والصحية للطاقة النووية مقارنة بالوقود الأحفوري.
- إدراك المشكلات المتعلقة بتنفيذ نظام شبكة كهرباء مستقر يعتمد بشكل أساسي على المصادر المتجددة.
- زيادة فرص التمويل والشراكة، بما في ذلك استثمار شركات التكنولوجيا في اتفاقيات شراء الطاقة المرتبطة بالمجال النووي.
- المزايا المحددة للمفاعلات النمطية الصغيرة، بما في ذلك تحسين الأمان، والنشر النمطي الذي يقلل من التكاليف الرأسمالية الأولية وبالتالي يساعد في التمويل، وملاءمتها للشبكات الصغيرة أو التطبيقات الصناعية.
- الاعتراف الشعبي بالنقاط المذكورة أعلاه، والإقرار بأنها دوافع صحيحة لزيادة الطاقة النووية.
- اعتبار الطاقة النووية ركيزة للتحول نحو الطاقة النظيفة، فهي مصدر قابل للتحكم ومنخفض الانبعاثات يكمل المصادر المتجددة المتقطعة.

في أي نقاش حول مستقبل الطاقة النووية، يجب إدراك حدوث تحول كبير في الأولويات خلال العقد الماضي. فبينما تعد المفاعلات العاملة في جميع أنحاء العالم اليوم كلها تقريباً من النوع الذي تصفه الصناعة (بالمفاعلات الكبيرة)، والتي تتميز بإنتاج كهربائي يتراوح بين 600 و1400 ميجاوات، فقد اتجه تطوير تصاميم مفاعلات الطاقة النووية المتقدمة (ANPR) الجديدة عالمياً في السنوات الأخيرة بشكل مكثف نحو المفاعلات النمطية الصغيرة. والمقصود بتعبير(نمطية) هو وصف مخطط للتصنيع والنشر تنتج فيه المكونات الرئيسية للمفاعل بشكل متسلسل في بيئة المصنع، ثم تجمع في الموقع لإنشاء المفاعل. ويمكن استخدام عدة وحدات من هذه المفاعلات الصغيرة معاً لتوليد مستويات طاقة كهربائية تعادل ما تولده اليوم وحدة كبيرة واحدة. ورغم أن الصناعة النووية العالمية تعمل أيضاً على تطوير ونشر بعض المفاعلات المتقدمة الكبيرة الجديدة، إلا أن التركيز على المفاعلات النمطية الصغيرة يتجلى في وجود أكثر من 100 مشروع لتطوير هذه المفاعلات اليوم.

يتعلق تحول جوهري آخر بريادة السوق واتجاهات البناء، مع انتقال الهيمنة بشكل متزايد نحو الصين وروسيا، اللتين تستحوذان الآن على غالبية المفاعلات قيد الإنشاء حالياً.

3.1 خيارات التوسع النووي

هناك ثلاث استراتيجيات رئيسية لتوسيع الحصة السوقية للطاقة النووية، تخدم كل منها أسواقاً مختلفة ولها تداعيات متميزة على الاستثمار وسلاسل التوريد.

أولاً: تمديد تراخيص المفاعلات الحالية من خلال التشغيل طويل الأمد. تعتمد هذه الطريقة منخفضة التكلفة للحفاظ على التوليد النووي الحالي على محطات الطاقة النووية القائمة. وهي تواجه معارضة شعبية أقل، وغالباً ما تنظر إليها المجتمعات المستضيفة للمفاعلات نظرة إيجابية. ويجب أن يبقى في الحسبان أن التشغيل طويل الأمد يحافظ فقط على قدرة التوليد أو يزيدها قليلاً (حتى لو خضعت جميع المفاعلات العاملة حالياً لهذا الإجراء).

ثانياً: بناء مفاعلات كبيرة جديدة (LRs). يحتاج بناء المفاعلات الكبيرة الجديدة تكاليف رأسمالية أولية عالية يصعب تمويلها، وتستغرق وقتاً طويلاً للتنفيذ، وتواجه تحديات تنظيمية، ودعم شعبي غير مؤكد. أدت هذه التحديات إلى تأخيرات وتجاوزات في الميزانية في الولايات المتحدة وأوروبا (Vogtle في الولايات المتحدة)، (Hinkley Point C في المملكة المتحدة)، (Olkiluoto في فنلندا و(Flamanville في فرنسا). بالرغم من ذلك، فإن الموردين من الصين وروسيا وكوريا الجنوبية لديهم سجل جيد في إنجاز المشاريع في الوقت المحدد وضمن الميزانية بسبب مشاريع البناء المستمرة لديهم. من جهة أخرى، تؤدي ندرة وتباعد تنفيذ المشاريع النووية المحلية إلى تراجع الخبرات والمعرفة عبر كامل المنظومة النووية، مما يجعل هذه المشاريع أقرب في طبيعتها إلى مشروعات النماذج الأولى أو ما يسمى (الأول من نوعه)*.

ثالثاً: نشر المفاعلات النمطية الصغيرة، التي تتراوح أحجامها من 20 إلى أكثر من 300 ميجاوات كهربائي، وتوفر ميزات مبتكرة، وتعد بتعزيز أمان التشغيل والمرونة من خلال توفير الكهرباء والخدمات غير الكهربائية (مثل تدفئة المناطق أو الحرارة الصناعية لتطبيقات الحرارة عالية الدرجة). وبما أنها تقنية ناشئة، لم يتم نشر المفاعلات النمطية الصغيرة بعد في بيئة سوق تنافسية. كما أن معظم موردي هذه المفاعلات ليس لديهم خبرة سابقة في البناء. ورغم أن إجمالي الإنفاق الرأسمالي لكل مفاعل أقل وبالتالي يسهل تمويله، إلا أنه من المتوقع أن تكون تكلفة الكيلووات كهرباء في النماذج الأولى في المفاعلات النمطية الصغيرة أعلى بكثير من نظيرتها في المفاعلات الكبيرة.

وكما ذكر أعلاه، تعمل الصناعة النووية في جميع أنحاء العالم على تعزيز الجهود لتطوير ونشر عدة مفاعلات كبيرة متقدمة جديدة بالإضافة إلى العديد من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة. لكن التوقعات تظل غير مؤكدة، فليس من الواضح عدد المفاعلات النمطية الصغيرة التي سيتم نشرها في نهاية المطاف على مدى العقدين المقبلين، أو عدد المفاعلات الكبيرة المتقدمة التي سيتم نشرها.

إن خصائص هاتين الفئتين مختلفة تماماً في نواحٍ عديدة. ويهدف الجدول أدناه إلى رصد تلك الاختلافات بطريقة تدعم الموضوعات المحددة التي سيتم تناولها في النص اللاحق.

* يتميز بتكاليف أعلى، ومخاطر أكبر، وتأخيرات محتملة، والحاجة لإعادة التعلم من البداية عندما تبني دولة ما مفاعلاً كل 20 سنة مثلاً. المترجم

السمة	المفاعلات النمطية الصغيرة (SMRs)	مفاعلات الطاقة النووية المتقدمة الكبيرة (ANPRs)
الاقتصاديات	رأس مال أولى أقل لكل مفاعل، ولكن تكاليف رأسمالية أعلى لكل كيلووات كهربائى (على الأقل فى البداية)، مخاطر النماذج الأولى (FOAK)، اقتصاديات الوفرة القائمة على النمطية.	اقتصاديات الحجم، تكاليف رأسمالية مرتفعة، جداول زمنية طويلة للتنفيذ، سلاسل توريد راسخة.
الأمان	أمان سلبي (Passive) معزز، احتمالات وقوع حوادث أقل، مخزونات إشعاعية أصغر، عواقب حوادث أقل حدة.	أنظمة قوية، ولكنها أكثر تعقيداً، نطاق أوسع لأثر الحادث.
الأمن	ثغرات محتملة في حال نشرت في مواقع نائية عديدة.	مواقع مجمعة ذات بروتوكولات أمنية راسخة.
الضمانات والانتشار	بعض التصاميم تتطلب وقود (HALEU)، مخاوف محتملة بشأن الانتشار النووي.	ضمانات راسخة لوقود اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU).
إدارة النفايات	تدفقات نفايات أصغر، ولكنها أكثر تنوعاً، تخطيط محدود للمراحل النهائية (Back-end).	تدفقات نفايات أكبر، ولكنها معروفة الخصائص جيداً، تخطيط قائم للتخلص الجيولوجي.

يتمثل التحدي الذي يواجه أي برنامج وطني في تحديد المزيج الأمثل بين التشغيل طويل الأمد، والمفاعلات الكبيرة الجديدة، والمفاعلات النمطية الصغيرة لتحقيق توسع نووي سريع، مع مراعاة كيفية تكامل كل منها مع أنظمة الطاقة المتطورة واحتياجات التخزين.

4.1 تحديات التوسع النووي

على الرغم من النظرة الأكثر تفاؤلاً، توجد تحديات جسيمة يجب معالجتها:

- **الاقتصاد:** تشمل المخاوف ارتفاع التكاليف الرأسمالية، ومخاطر النماذج الأولى، والشكوك حول ما إذا كانت (اقتصاديات الوفرة) للمفاعلات النمطية الصغيرة ستتحقق فعلياً. إن ضمان التنافسية من حيث التكلفة يتطلب دعماً تمويلياً. ومن غير المتصور أن يتم تسويق جميع تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة العديدة المقترحة حالياً، وقد يتراجع حماس المستثمرين مع فشل الشركات في تصاميمها وانسحابها من السوق.
- **الأمان:** رغم أن جميع المفاعلات الحديثة، بما في ذلك المفاعلات النمطية الصغيرة، تشتمل على ميزات أمان معززة، إلا أن تحديات ثقة الناس بها لا تزال قائمة، وتشمل القضايا التنظيم القوي، والتواصل الشفاف، والأداء التشغيلي المثبت لهذه المفاعلات.
- **الأمن:** يثير النشر الواسع النطاق في بيئات مواقع متنوعة مخاوف أمنية، بما في ذلك التخريب المحتمل أو سوء استخدام المواد، لا سيما في الدول الوافدة حديثاً للمجال.

- **الضمانات والانتشار:** إن التصاميم المتقدمة التي تستخدم وقوداً بتخصيب يورانيوم أعلى من المفاعلات الكبيرة الحالية، أو تلك التي تتضمن إعادة المعالجة، تزيد من مخاطر الانتشار النووي، وهو ما يجب معالجته من خلال ضمانات دولية قوية.
- **دورة الوقود وإدارة المراحل النهائية:** تظل الحلول طويلة الأمد للوقود المستنفد والنفايات عالية المستوى تحدياً حرجاً. لم يولِ العديد من موردي المفاعلات النمطية الصغيرة اهتماماً كافياً لقضايا المراحل النهائية، وتواجه البلدان الوافدة تكاليف باهظة للتخلص الجيولوجي من النفايات ما لم يتم تنفيذ حلول مشتركة أو حلول قائمة على استعادة النفايات.
- **أمن الوقود:** يفرض ضمان توافر الوقود النووي عدة تحديات. ورغم وجود يورانيوم خام كافٍ على مستوى العالم، فإن تطوير الموارد وضمان توافرها الشامل قد يمثل تحدياً. كما أن ضمان قدرة تخصيب كافية عالمياً لدعم النمو الكبير سيتطلب استثمارات كبيرة، وقد يتفاقم هذا الوضع إذا طلبت العديد من المفاعلات الجديدة ما يسمى باليورانيوم عالي التخصيب منخفض التركيز، أي المخصب بنسبة 19-20% بدلاً من نطاق 5% المستخدم في الغالبية العظمى من المفاعلات العاملة اليوم.
- **سلسلة التوريد وتطوير القوى العاملة:** قد يمثل عدم وجود عدد كافٍ من المصنعين للمعدات الخاصة بالصناعة النووية عنق زجاجة رئيسياً أمام التوسع السريع. كما أن توفير عشرات الآلاف من العمال الجدد اللازمين لإدارة توسع كبير سيتطلب التزاماً عالمياً بتوسيع برامج التعليم العالي والتدريب على المستوى التقني.

2.توسيع الطاقة النووية: تحديات الاقتصاد والتمويل

1.2 النهج السابقة الراسخة التي ينظر إليها كمخاطر اقتصادية عالية

تاريخياً، كان الدافع وراء بناء محطات طاقة نووية أكبر باستمرار هو (اقتصاديات الحجم)، حيث تنخفض التكاليف لكل وحدة قدرة (كيلووات) مع زيادة حجم المحطة. تتحدى المفاعلات النمطية الصغيرة هذا النهج من خلال السعي وراء (اقتصاديات الوفرة)، أي خفض التكلفة والتعلم من خلال الإنتاج المتسلسل لتصاميم موحدة في بيئة المصنع. كما تقدم بعض تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة تصميماً أبسط من المفاعلات الكبيرة الحالية، وهو ما يتوقع أن يوفر في التكلفة الرأسمالية.

والسؤال الرئيسي هو ما إذا كان بإمكان هذين النهجين إكمال بعضهما البعض. فعلى سبيل المثال، تعرقلت محاولة فرنسا في الثمانينات والتسعينات للجمع بين الحجم والوفرة من خلال بناء سلسلة ممتدة من المفاعلات الكبيرة بنفس التصميم، وذلك بسبب مجموعة من الأحداث الخارجية. وشملت هذه الأحداث تحولات اقتصادية كلية عقب انهيار أسعار النفط العالمية، مما أدى إلى انخفاض الطلب على

الكهرباء وتباطؤ الحاجة إلى بناء محطات جديدة، وتغيرات سياسية محلية أدت إلى تأخيرات وعدم اتساق في الموافقات على المشاريع، وإعادة هيكلة تنظيمية داخل الصناعة النووية المحلية، وهو ما أدى إلى زيادة التعهيد الخارجي، وفقدان المعرفة، وإعادة الهندسة بدلاً من التكرار. كما شهد العالم تغيرات تنظيمية بعد حادثتي (ثري مايل آيلاند في الولايات المتحدة) و(تشيرنوبيل في روسيا)، مما تسبب في تأخيرات البناء وظهور تعديلات مكلفة في التصميم. قطعت هذه الأحداث إيقاع برامج البناء الموحدة وأعاقت عملية التعلم. وادعت إحدى الدراسات أن هذا أدى إلى تعلم سلبي. وفي المقابل، أظهر بناء كوريا الجنوبية لأربعة مفاعلات من طراز (APR-1400) في (براكة) بدولة الإمارات العربية المتحدة آثاراً واضحة للتعلم، مما قلل التكلفة ووقت البناء للوحدات اللاحقة.

في نهاية المطاف، بدلاً من النظر إليهما كقوى متنافسة، ينبغي النظر إلى اقتصاديات الحجم والوفرة كقوى متكاملة يمكن دمجها بمرور الوقت لجعل الطاقة النووية أكثر فعالية من حيث التكلفة. واليوم، تقوم عدة دول بتنفيذ أو تخطيط المزيد من المفاعلات الكبيرة، ولدى الكثير منها برامج طموحة لتطوير المفاعلات النمطية الصغيرة، بينما يسعى بعضها إلى اتباع الخيارات الثلاثة جميعاً لتوسيع الطاقة النووية.

2.2 تخفيف مخاطر النماذج الأولى من نوعها (FOAK)

تؤثر عقبات التنفيذ والتكلفة الخاصة بالنماذج الأولى على جميع التقنيات المبتكرة تقريباً ولا يمكن تجاهلها. يتطلب تصميم وتطوير المفاعلات النمطية الصغيرة استثمارات ضخمة من القطاع الخاص، وستمنع عقبة النماذج الأولى تسويق معظم التصاميم قيد التطوير حالياً. يحدث هذا عندما يكون طلب السوق غير كافٍ لإنتاج جميع التصاميم بالكميات والوتيرة اللازمة لتحقيق اقتصاديات الوفرة. ويتمثل العامل الرئيسي في توليد طلب كافٍ للوحدات الأولى في تأمين طلبيات متعددة من عملاء فرديين، حيث يدرس صناع القرار في عدة بلدان تقديم طلبيات متعددة للمفاعلات النمطية الصغيرة لتعزيز أنظمة الكهرباء لديهم بطريقة مستدامة وفعالة من حيث التكلفة. ومن المثير للاهتمام كذلك ظهور مراكز البيانات كثيفة استهلاك الطاقة، والتي تتطلب طاقة آمنة على مدار الساعة، ولديها القدرة المالية للالتزام بوحدات متعددة من تصميم واحد للمفاعلات النمطية الصغيرة.

هناك أيضاً قضايا تتعلق بسلسلة التوريد، إذ بافتراض وجود طلبيات قيد التنفيذ، فإن جاهزية سلسلة التوريد وقيودها تحدد مدى سرعة انخفاض تكاليف النماذج الأولى عبر تأثيرات التعلم والوفرة. وعلى العكس من ذلك، فإن التباعد الزمني بين طلبيات التصميم نفسه يؤثر على رغبة المستثمرين في سلسلة التوريد في الاستثمار. إنها معضلة (البيضة والدجاجة) الكلاسيكية والمستقلة عن أي تصميم محدد للمفاعل.

3.2 أمن الطاقة، قيمة النظام، وفرص السوق الناشئة

كانت خيارات إمداد الكهرباء تصنف تقليدياً حسب التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE)، والتي تقارن تكاليف التوليد لكل كيلووات ساعة باستخدام معاملات ثابتة إلى حد كبير على مدى العمر الافتراضي. في هذا الإطار، كان يتم التعامل مع الطلب كعامل خارجي، حيث تحدد المرافق الأسعار من خلال مراجعات دورية، دون أن يكون للمستهلكين أي دور في ذلك. كانت تكاليف النظام أقل اعتماداً على نوع التوليد وبالتالي لم تؤثر على التصنيفات. أما اليوم، فإن تكاليف الطاقة بالجملة (Whole Sale)، والتي تتباين بشكل حاد حسب الوقت من اليوم والموسم، تعد أكثر صلة من متوسط التكلفة المستوية للكهرباء.

لا يقتصر الأمر على أن تقنيات التوليد المختلفة تؤثر على تكاليف الطاقة بالجملة بشكل مختلف فحسب، بل إن الحصة المتزايدة للأشكال المتقطعة من التوليد في العديد من النطاقات التنظيمية* تضخم تحدي توفير كهرباء موثوقةعلى مدار الساعة. تتطلب الأنظمة الموثوقة حالياً توليداً قابلاً للتحكم، وإدارة للطلب، وتخزيناً للطاقة الفائضة، وكل ذلك يتم تقييمه على مستوى النظام الكامل حيث لا يمكن تجنب بعض المخاطر المتبقية. ويدفع بعض العملاء، مثل مشغلي الشبكات، علاوات مقابل ضمان الموثوقية على مدار الساعة. وغالباً ما يذهب المستخدمون كثيفو استهلاك الكهرباء، مثل مراكز البيانات وشركات التقنية العالية، إلى أبعد من ذلك من خلال تركيب أنظمة توليد فائضة خلف العداد (Behind-the-meter) وبيع أي فائض من الكهرباء إلى الشبكة.

من حيث التطبيقات والأسواق، تتمتع المفاعلات النمطية الصغيرة بوضع جيد لتلبية مجموعة متنوعة من احتياجات الطاقة. وبينما يظل توليد الكهرباء المرتبطة بالشبكة سوقاً عالمية رئيسية، هناك اهتمام متزايد بتطبيقات متنوعة جذرياً، لا سيما في المجالات التي يصعب إزالة الكربون منها بطرق أخرى. وتشمل هذه التطبيقات توفير الكهرباء والحرارة الموثوقة خارج الشبكة للمناطق النائية مثل عمليات التعدين، والحرارة عالية الدرجة للصناعات الثقيلة مثل إنتاج الكيماويات والأسمدة، وإنتاج الهيدروجين، وتحلية المياه، أو الدفع البحري لاستبدال وقود السفن كثيف الكربون. ويمكن توليد العديد من خدمات الطاقة هذه من خلال التوليد المشترك.

4.2 تمويل المفاعلات النمطية الصغيرة

تتطلب المفاعلات الكبيرة رأس مال مكثفاً للغاية، حيث تتراوح تكلفتها (حسب الحجم) بين 7 و16 مليار دولار لكل محطة في أمريكا الشمالية وأوروبا (تشير أحدث التقارير إلى تقديرات أعلى بكثير للمحطات قيد الإنشاء في المملكة المتحدة).

* هي المناطق التي تطبق فيها جهة تنظيمية معينة (مثل هيئات تنظيم الكهرباء) قوانينها وقواعدها الفنية والمالية.

تشبه هذه التكاليف ظروف النماذج الأولى في البلدان التي قامت ببناء عدد قليل من المفاعلات الكبيرة أو لم تبنِ أي منها خلال العقود الماضية. وفي المقابل، حققت البلدان ذات الخبرة المستمرة في البناء، مثل الصين وروسيا وجمهورية كوريا، تكاليف بناء أقل محلياً وفي أسواق التصدير. عادة ما تتلقى المشاريع النووية دعماً مالياً عالياً يصل إلى 80% من التكاليف بضمانات سيادية أو وكالات ائتمان التصدير. تشمل أساليب التمويل التقليدية التمويل من الميزانية العمومية للشركات، وهو الأسلوب الذي تتبعه شركات الشركات الكبيرة بفضل ملاءتها المالية التي تتيح لها تمويل المشاريع ذاتياً، بالإضافة إلى الدعم الحكومي المباشر وغير المباشر، أو الجمع بين هذه الأساليب.

تهدف نماذج التمويل الأحدث إلى توفير يقين بشأن الأسعار وتمكين استرداد التكاليف الرأسمالية على فترات ممتدة. وتشمل هذه النماذج* الشراكات بين القطاعين العام والخاص (PPP)، وعقود الفروقات (CfD)، ونماذج قاعدة الأصول المنظمة (RAB)، والاتفاقيات الثنائية بين الدول التي تقدم قروضاً أو ضمانات أو تسليم مشاريع بنظام (تسليم المفتاح). توفر عقود الفروقات استقراراً في الأسعار على المدى الطويل من خلال ضمان سعر ثابت أو نطاق سعري للكهرباء، مما يحمي المستثمرين من تقلبات السوق. والشراكات بين القطاعين العام والخاص هي ترتيبات تعاقدية طويلة الأجل بين الجهات الحكومية وشركات القطاع الخاص لتمويل وبناء وتشغيل البنية التحتية العامة. ويسمح نموذج (RAB) للمستثمرين بتحقيق عائد خلال مرحلة البناء من خلال رفع التعريفة، وبالتالي خفض التكلفة الإجمالية لرأس المال عبر تقليل مدفوعات الفائدة.

تتطلب المفاعلات النمطية الصغيرة بقدرات تتراوح بين 20-300 ميجاوات رأس مال أولي أقل وتسمح بتمويل نمطي وتدريجي. يتيح حجمها الأصغر الجمع بين دعم الائتمان العام، والأسهم الخاصة، والتمويل المؤسسي. وغالباً ما تستخدم مشاريع المفاعلات النمطية الصغيرة المبكرة تقاسم التكاليف بين الحكومة والصناعة. ويختار بعض العملاء نماذج التمويل من قبل المورد أو نماذج (البناء والتملك والتشغيل - BOO)، حيث يمول الموردون البناء ويشغلون المحطة حتى يستردوا استثماراتهم من خلال مبيعات الطاقة طويلة الأجل. وتعتمد الدول النامية بشكل متكرر على تسليم المشاريع بنظام (تسليم المفتاح)، حيث يتحمل الموردون مخاطر التصميم والتنفيذ، وغالباً ما تستخدم الصين وروسيا هياكل (تسليم المفتاح) لمشاريع التصدير. حتى الآن، يبدو أن ترتيبات تمويل المفاعلات النمطية الصغيرة تدعم في الغالب تصميماً يمكنه التغلب على عقبة النماذج الأولى المالية. ومع أن معظم الأموال المعنية هي تقديرات تقريبية، إلا أن التعرض الرأسمالي (حجم المخاطرة) لكل كيلووات كهربائي أعلى بكثير من الوحدة النمطية للمفاعل الكبير. ومع ذلك، من المفترض أن تؤدي فلسفة المفاعلات النمطية الصغيرة إلى خفض التكاليف مع اكتمال المزيد من الوحدات.

* تم شرح الفروقات بين هذه النماذج سابقاً من قبل المترجم

3. التحديات التنظيمية والتقنية في نشر المفاعلات

1.3 السياسة والتنظيم

يعد تنظيم محطات الطاقة النووية تخصصاً ناضجاً في جميع النطاقات التنظيمية التي تشغل محطات نووية تقريباً، والتقنيات الناشئة -مثل العديد من المفاعلات النمطية الصغيرة ودورات المبرد/الوقود الجديدة بشكل عام- تفرض تحديات رقابية جديدة. تضمن الرقابة التنظيمية الفعالة احتفاظ المرخص لهم بمسؤولياتهم تجاه الأمان، وضمان الجودة، والإشراف على المقاولين والمقاولين من الباطن. وقد تم تبني عدة ممارسات تنظيمية رئيسية على نطاق واسع، منها:

- إطار تنظيمي قائم على الأداء ومبني على تقييم المخاطر، يركز في التفتيش والرقابة على الأنشطة ذات الأهمية القصوى للأمان. على سبيل المثال، تؤكد (عملية الرقابة على المفاعلات) التابعة لهيئة الرقابة النووية الأمريكية (NRC) على عمليات التفتيش حيث تكون المخاطر المحتملة في أعلى مستوياتها.
- تظل الجهة التنظيمية هي المسؤول الأول والأخير عن الرقابة على المقاولين، حتى في الحالات التي يسند فيها حامل الترخيص العديد من المهام إلى جهات خارجية. إذ يجب أن يظل حامل الترخيص هو المرجع الفني للتصميم، والمحافظ الكلي على الكفاءات الأساسية اللازمة للمشروع.
- استخدام المعايير والتوجيهات المعترف بها دولياً (مثل معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) ومعايير (ISO) والتبادل بين الأقران من المنظمين.

مع ظهور المفاعلات النمطية الصغيرة، والتصنيع النمطي، وأنظمة القياس والتحكم الرقمية، وسلاسل التوريد العالمية، يجب أن تتكيف الرقابة التنظيمية مع مجالات جديدة. تغطي القدرات الجديدة أو الموسعة لدعم الرقابة التنظيمية لمحطات الطاقة النووية من الجيل القادم عدة مجالات مختلفة. ويشمل ذلك تطوير أطر نماذج (ملفات الأمان) المخصصة للمفاعلات النمطية الصغيرة والمواقع متعددة الوحدات، بما في ذلك معالجة الأنظمة المشتركة وأسباب الإخفاق الشائعة. فعندما يضم موقع ما عدة وحدات نمطية متطابقة أو شبه متطابقة، فإن احتمال حدوث (إخفاقات ذات سبب مشترك) والحاجة إلى (أنظمة مشتركة) تفرض إجراء تعديلات على آلية الرقابة، مثل تغيير وتيرة التفتيش أو تعديل معايير تأهيل الوحدات المتعددة. كما يتطلب الأمر توحيد متطلبات تأهيل أنظمة القياس والتحكم الرقمية عبر النطاقات التنظيمية، ويشمل ذلك طرق ضمان البرمجيات، والأمن السيبراني، وإدارة التحديثات، وترخيص الترقيات.

وفيما يتعلق بأنظمة القياس والتحكم الرقمية وضمان البرمجيات، فإن الاستخدام المتزايد للمكونات التجارية الجاهزة (COTS)، وتحديثات البرامج، والمعدات الرقمية في المحطات النووية يتطلب من المنظم تقييم الأمن السيبراني، ودورة حياة البرمجيات، والتقادم، ونزاهة سلسلة التوريد. يجب على

المنظمين أيضاً تحديد مقاييس للرقابة على سلسلة الموردين، بما في ذلك مؤشرات الأداء الرئيسية، وأطر التتبع، وتكرار مراجعة المقاولين من الباطن، لضمان احتفاظ المرخص لهم بكفاءة كافية للإشراف على شبكات التوريد الدولية المعقدة. ويعد بناء القدرات أمراً حيوياً للدول الوافدة حديثاً، والتي قد تستورد في البداية الخبرة التنظيمية ويجب عليها وضع معايير مرجعية للتوظيف، والهياكل التنظيمية، والميزانيات، ومناهج التدريب، وخطط التفتيش للمجموعات المتعددة من المفاعلات النمطية الصغيرة. إن التوحيد الدولي لأطر الترخيص من شأنه أن يسهل نشر المفاعلات النمطية الصغيرة عبر الحدود. كما تبرز الحاجة لمراجعة النهج المختلفة لترخيص الابتكار، حيث إن الجداول الزمنية القصيرة المتوقعة لتنفيذ المفاعلات النمطية الصغيرة لن تكون قابلة للتحقيق ما لم يتم تقصير عملية الترخيص التقليدية التي تستغرق سنوات عديدة. ولحسن الحظ، هناك جهود جارية بالفعل في جميع أنحاء العالم لفحص كيف يمكن أن يكون ترخيص هذه المفاعلات مختلفاً.

3.2 جوانب الأمان والأمن وعدم الانتشار لتصاميم المفاعلات المتقدمة الجديدة

تعد قضايا الأمان، والأمن، وعدم الانتشار، والضمانات اعتبارات أساسية لنشر الطاقة النووية، وتظل بنفس القدر من الأهمية لتصاميم المفاعلات المتقدمة كما هي بالنسبة للمفاعلات التقليدية العاملة حالياً.

الهدف الأساسي لأنظمة أمان المفاعلات هو تقليل احتمالية وعواقب الحوادث التي قد تلحق الضرر بالمرافق وتتسبب في تسربات إشعاعية تؤثر على العاملين، والسكان القريبين، والممتلكات، والبيئة. أما أنظمة الأمن فتهدف إلى تقليل مخاطر وآثار الأفعال الضارة المتعمدة -مثل التخريب أو سرقة المواد النووية- من قبل أفراد أو مجموعات تسعى لإحداث اضطراب أو دمار. وتسعى برامج عدم الانتشار والضمانات إلى منع تحويل المواد النووية من المفاعل أو من مرفق دورة الوقود لاستخدامها في برامج الأسلحة النووية من قبل حكومات أو فاعلين غير حكوميين.

ورغم تنفيذ هذه الأنظمة بنجاح عامة منذ بدايات استخدام الطاقة النووية، فإن التغيرات التكنولوجية والاقتصادية والديموغرافية السريعة يمكن أن تتحدى فعاليتها واستقرارها. وبينما تعد قضايا الأمان والأمن وعدم الانتشار والضمانات قضايا متمايزة، إلا أنها مترابطة، فميزات التصميم، والممارسات التشغيلية، والضوابط الإدارية غالباً ما تخلق تآزراً فيما بينها، ويدعم نهج الأمان القوي بشكل كبير فعالية المجالات الثلاثة الأخرى. ومع ذلك، يتطلب الأمن وعدم الانتشار أيضاً حماية ضد الأفعال المتعمدة سواء من قبل حكومة أو مجموعة تسعى للانتشار النووي أو الإرهاب.

يعد التحليل والتقييم الشامل للمخاطر ضرورياً لجميع المجالات الأربعة لتقليل احتمالية الفشل

وعواقبه. يجب أن تبدأ هذه التقييمات أثناء تصميم المحطة وتستمر طوال فترة التشغيل والإدارة طويلة الأمد للمواد المشعة. ويمكن أن تكون العملية معقدة، لا سيما لتصاميم المفاعلات المتقدمة بسبب حداثتها وخبرتها التشغيلية المحدودة. وتشمل أمثلة التحديات منع سرقة المواد النووية لاستخدامها في الأسلحة أو القنابل القذرة، وتخفيف مخاطر مثل التخريب أو الأعمال الإرهابية التي تنطوي على إطلاق إشعاعي متعمد.

تستخدم العديد من المفاعلات المتقدمة المقترحة -بما في ذلك المفاعلات الكبيرة والمفاعلات النمطية الصغيرة- تقنيات ودورات وقود مشابهة لمفاعلات الماء الخفيف (LWRs) الكبيرة الحالية، بينما يقدم البعض الآخر مناهج أقل اختباراً مثل مفاعلات الملح المصهور، والمفاعلات المبردة بالرصاص، ومفاعلات الحصى (Pebble-bed)، ومفاعلات النيوترونات السريعة المبردة بالغاز، وتصاميم الأنابيب الحرارية. كما تستخدم مفاعلات معينة يورانيوم عالي التخصيب، أو تتضمن إعادة معالجة الوقود في الموقع أو عن بعد، أو تتطلب النقل الآمن لقلب المفاعل بالكامل. وتستوجب هذه الاختلافات إعادة تقييم دقيقة لأطر الأمان والأمن والضمانات وعدم الانتشار الحالية التي وضعت أصلاً لمفاعلات الماء الخفيف الكبيرة، لضمان استمرار فعاليتها وتحديد التعديلات المطلوبة.

يجب أن يأخذ تقييم أمان المفاعلات الكبيرة المتقدمة والمفاعلات النمطية الصغيرة في الاعتبار النطاق الكامل لسيناريوهات الظروف غير الطبيعية والحوادث التي قد تقع. كما أن نشر وحدات صغيرة متعددة، أحياناً في مواقع متفرقة أو مدمجة في مرافق صناعية، يفرض تحديات أمان تختلف عن تلك المرتبطة بالمفاعلات الكبيرة المنفردة. وقد تحتاج أطر الأمن القائمة للمحطات النووية الكبيرة، بما في ذلك الحماية المادية والأمن السيبراني، إلى التكيف مع المفاعلات المتقدمة، لا سيما عند نشرها في مواقع نائية، أو مواقع صناعية، أو تجميعها بأعداد كبيرة في مكان واحد. وقد يكون هذا مهماً بشكل خاص للتطبيقات البحرية والمفاعلات القابلة للنقل أو المفاعلات الدقيقة (Microreactors). وتعد اعتبارات الضمانات وعدم الانتشار مهمة أيضاً للمفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات المتقدمة، لأن بعض المفاهيم تستخدم وقوداً بمستويات تخصيب أعلى أو أشكال وقود مختلفة، مما قد يتطلب تعديلات في نهج الضمانات، ومحاسبة المواد، وأنظمة التفتيش.

من ناحية أخرى، توفر تصاميم المفاعلات الجديدة فرصة لدمج (الضمانات من خلال التصميم) منذ المراحل الأولى، وتضمين ميزات الحماية مباشرة في مفهوم المفاعل، وهو أمر كانت مفاعلات الماء الخفيف القديمة تدمجه لاحقاً في الغالب.

بالنسبة لكل من هذه المجالات، يجب الإجابة على سؤالين محوريين: هل تظل المناهج الحالية كافية للتقنيات الجديدة؟ وإذا لم تكن كذلك، فما هي التعديلات المطلوبة لإدارة المخاطر الناشئة بفعالية؟

ولحسن الحظ، يجري حالياً جهد عالمي منسق لمعالجة كل هذه القضايا بين معاهد البحوث الحكومية والخاصة، ومطوري المفاعلات، والوكالات التنظيمية في العديد من الدول الكبرى.

3.3 أدوار الذكاء الاصطناعي

يتمتع الذكاء الاصطناعي بالقدرة على دعم صناعة الطاقة النووية طوال دورة حياة البنية التحتية النووية بأكملها وكذلك في الأنشطة التنظيمية. تعد أنظمة الطاقة النووية هياكل معقدة للغاية وكثيفة البيانات، فحجم التوثيق والمراجعات وعمليات التحقق وتقييمات الأداء في نمو مستمر. يمكن للذكاء الاصطناعي معالجة وتحليل كميات هائلة من البيانات بسرعات تفوق القدرات البشرية بكثير. لذا، يبدو أن الشراكة بين الذكاء الاصطناعي وأنظمة الطاقة النووية واعدة، حيث تعزز (دون أن تحل محل) الأنشطة الهندسية والتخطيطية وأنشطة الأمان التقليدية من مرحلة التصميم الأولي إلى مرحلة إخراج المحطة من الخدمة (Decommissioning). يمكن للذكاء الاصطناعي نمذجة ومحاكاة تصاميم المفاعلات الجديدة، والمساعدة في إجراء تحليلات الأمان، ودعم إدارة نشر البنية التحتية النووية. كما تتيح (التوائم الرقمية) المدعومة بالذكاء الاصطناعي للمهندسين والمشغلين أن يكونوا أكثر فعالية وكفاءة في محاكاة سلوك المحطة، واختبار السيناريوهات غير الطبيعية، وتعزيز التدريب. وأثناء البناء، يمكن للذكاء الاصطناعي تحديد مخاطر التكلفة والجدول الزمني، وتحسين ضمان الجودة من خلال فحص اللحامات والهياكل القائم على الرؤية الحاسوبية، وتحسين إعداد سلاسل التوريد النووية المعقدة، وكل ذلك يقلل من التكاليف والجداول الزمنية.

يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي خلال العمليات، للصيانة التنبؤية والكشف عن الانحرافات في الوقت الفعلي من خلال تحليل كميات كبيرة من بيانات الاستشعار. ويمكن أن يؤدي ذلك إلى تحسين الموثوقية وتقليل الانقطاعات غير المخطط لها مع ضمان بقاء البشر مسيطرين على القرارات الحاسمة المتعلقة بالأمان. كما يمكن للذكاء الاصطناعي المساعدة في تحسين تتبع الأحمال من خلال التنسيق مع التوليد المتجدد والتخزين، وكذلك في التنبؤ بالسوق وتحسين الإيرادات. وطوال دورة حياة الوقود، يمكن للذكاء الاصطناعي تعزيز أداء الوقود، وتحسين استراتيجيات إعادة التحميل، وتقوية الضمانات ومحاسبة المواد عبر التعرف على الأنماط. وفي التنظيم الرقابي للأمان، يمكن للذكاء الاصطناعي المساعدة بطرق مماثلة، ولكن مع تركيز إضافي على استخدام قدراته في التفهم والبحث في قواعد بيانات الأمان واستيعاب البيانات التشغيلية المعقدة، وإن كان ذلك تحت توجيه بشري.

ومع أن فوائد دمج الذكاء الاصطناعي مع المجال النووي تبدو وفيرة، إلا أن هناك مخاطر جديدة يجب مراعاتها. تحتاج نماذج الذكاء الاصطناعي إلى تدريب، ويمكن أن تؤدي البيانات رديئة الجودة أو غير

المكتملة أو المتحيزة، أو التحقق غير الكافي، إلى تنبؤات أو قرارات غير دقيقة ذات عواقب وخيمة محتملة. بالإضافة إلى ذلك، قد يتجاوز الذكاء الاصطناعي بيانات التدريب الخاصة به ويتصرف بشكل غير متوقع. كما أن زيادة دمج الذكاء الاصطناعي تزيد من مخاطر التهديدات السيبرانية، التي قد تضر بعملية التعلم الآلي أو أنظمة الأمان. وقد يؤدي الاعتماد المفرط على الذكاء الاصطناعي إلى تدهور المهارات البشرية والوعي بالمواقف، لا سيما خلال الأحداث النادرة أو المتطرفة حيث يكون الحكم البشري حاسماً.

ومع تقدم الذكاء الاصطناعي وتزايد تطبيقه على الأنظمة المعقدة، أصبح من الصعب أكثر فأكثر تفسير مخرجات أنظمة الذكاء الاصطناعي، حتى بالنسبة لمبتكر الخوارزمية، وأصبح من المستحيل تقريباً فهم كيف وصلت الخوارزمية إلى نتيجة معينة. ويمتلك الذكاء الاصطناعي القابل للتفسير (الذي يتبنى الشفافية والقابلية للتفسير والمساءلة) القدرة على تخفيف هذه المشكلة من خلال جعل عمليات صنع القرار ونتائجه قابلة للتتبع والفهم. ورغم أن التحكم البشري المباشر إلزامي للقرارات المتعلقة بالأمان -لأن المسؤولية النهائية يجب أن تقع دائماً على عاتق البشر- فإن دمج الذكاء الاصطناعي مع أنظمة الطاقة النووية يمكن أن يوفر فوائد كبرى من حيث الكفاءة التشغيلية والأمان في جميع أنحاء النظام.

وفي ضوء ما سبق، يجب أن يسبق استخدام الذكاء الاصطناعي تقييم دقيق للفوائد والقيود المحتملة لاستخدامه في كل جانب من جوانب دورة حياة المحطة النووية. ومن المهم أيضاً في العمليات النووية المدعومة بالذكاء الاصطناعي أن يكون هناك اهتمام دائم بالأمان من خلال التحقق القائم على الإشراف البشري. وأخيراً، هناك حاجة على مستوى الصناعة والعالم لتطوير أطر للحوكمة، والقابلية للتفسير، والأمن السيبراني للذكاء الاصطناعي في جميع الأنشطة النووية، ويجب أن يشمل ذلك التركيز على وضع نماذج حوكمة تحدد المسؤولية والحدود القانونية لاستخدام الذكاء الاصطناعي.

4.دورة الوقود وإدارة النفايات المشعة

تظل إدارة الوقود المستنفد والنفايات المشعة واحدة من أكثر التحديات المستمرة التي تواجه الطاقة النووية. ورغم أن المفاهيم التقنية للتخلص طويل الأمد خضعت للدراسة لعدة عقود، إلا أن التنفيذ أثبت بطئه وتعقيده من الناحية السياسية. ويؤدي ظهور مفاهيم مفاعلات جديدة، لا سيما المفاعلات النمطية الصغيرة، إلى إدخال شكوك إضافية تتعلق بدورات الوقود، وتدفقات النفايات، واستراتيجيات التخلص منها.

4.1 تطوير مفهوم التخلص الجيولوجي

اتفق الخبراء في وقت مبكر جداً على أن الوقود المستنفد نفسه، أو النفايات عالية الإشعاع الناتجة عن

معالجته، يمكن التخلص منها بأمان في تكوينات جيولوجية عميقة ظلت مستقرة لملايين السنين. وتطور هذا المفهوم لاحقاً، حيث خضعت تصاميم مفصلة للدراسة لإنشاء مستودعات جيولوجية عميقة تستخدم مزيجاً من الحواجز الهندسية والجيولوجية لعزل النفايات المتخلص منها عن البيئة البشرية للفترات الطويلة جداً اللازمة لاضمحلال إشعاعها بشكل كافٍ.

استند المبرر الأصلي إلى الإدراك بأن التطور المستقبلي للمستودع الجيولوجي العميق لا يمكن تقييمه إلا إذا كانت البيئة التي سيبنى فيها مستقرة عبر الأزمان الطويلة جداً التي تظل فيها النفايات تشكل خطراً. وهذا يعني أن العلماء اعتقدوا أنهم قادرون على تقييم تطور هذه التكوينات على مدى فترات تصل إلى 100,000 عام على الأقل. ورغم أن الجيولوجيين يدرسون روتينياً تكوينات أقدم بكثير (تصل إلى مئات الملايين من السنين)، إلا أنه لم تكن هناك تحديات تقنية أخرى حتى ذلك الحين قد نظرت صراحة في مثل هذه الأطر الزمنية. وفي الآونة الأخيرة، وسع علماء المناخ آفاق تقييماتهم الزمنية بشكل كبير، ولكن في بيئة سطحية أكثر ديناميكية.

طور الخبراء في التخلص الجيولوجي العميق مفاهيم تقنية تجمع بين حواجز الأمان الهندسية والطبيعية، إلى جانب منهجيات تقييم الأمان التي أنتجت تقديرات كمية للتسربات المحتملة من المستودعات الجيولوجية العميقة تحت مجموعة واسعة من السيناريوهات. ومع ذلك، أعرب العديد من العلماء وأفراد الجمهور عن شكوكهم بشأن قوة هذه التقديرات. واستجابت الجماعة النووية إلى حد كبير بشكل دفاعي بدلاً من أن تكون استباقية، كما يتضح من سلسلة الآراء الجماعية الصادرة عن خبراء من وكالة الطاقة النووية (NEA) والوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA). ففي عام 1985، جرى التأكيد على أن العزل طويل الأمد للنفايات عالية المستوى أو الوقود المستنفد سيلبي أهداف الأمان، وفي عام 1991، زعم الخبراء أنهم يفهمون كيفية تحليل الأمان على المدى الطويل، وفي عام 1995، أكدوا أن التخلص الجيولوجي العميق مبرر أخلاقياً وبيئياً. وبالنظر إلى الماضي، من الواضح أن تقديم تسلسل هذه الآراء بترتيب مختلف كان من الممكن أن يكون أكثر فعالية.

لا يزال الجدل مستمراً حول بعض الأسس التقنية والأخلاقية والمجتمعية والفلسفية التي يقوم عليها مفهوم التخلص الجيولوجي العميق، مع إعادة طرح أسئلة مثيرة للاهتمام. هل الأجيال الحالية ملزمة بتنفيذ المستودعات الجيولوجية العميقة قريباً لتلبية متطلبات العدالة بين الأجيال، أم يمكن تخزين النفايات لقرون على السطح؟ وهل المبالغ الكبيرة التي تنفق اليوم على الأعمال المتعلقة بهذه المستودعات تعكس بشكل صحيح مخاوف العدالة داخل الجيل الواحد؟ وهل تساعد مناقشة الأطر الزمنية التي تصل لمئات الآلاف من السنين في الفهم العام أم تعيقه؟ وهل معايير الأمان الصارمة للغاية (مثل الجرعات القصوى المسموح بها البالغة 0.1 مللي سيفرت/سنة) مبررة؟ وكيف تقارن بمعايير المخاطر الأخرى؟

4.2 الوضع الحالي للتخلص الجيولوجي

تظل الحلول طويلة الأمد للوقود المستنفد والنفايات عالية المستوى تحدياً حرجاً. ولم يول العديد من الموردين المحتملين للمفاعلات النمطية الصغيرة الجديدة اهتماماً كافياً لقضايا المراحل النهائية، حيث تواجه البلدان الوافدة تكاليف باهظة للتخلص الجيولوجي ما لم يتم تنفيذ حلول مشتركة أو حلول قائمة على استعادة النفايات. فمنذ بدايات الطاقة النووية، كان هناك ميل في مجتمع الخبراء النوويين للتقليل من شأن التحديات التقنية -وبدرجة أكبر التحديات المجتمعية- لتطوير وتنفيذ التقنيات اللازمة للإدارة والتخلص قصير وطويل الأمد من النفايات المشعة.

هناك بعض الأسباب الواقعية لهذا التأجيل في تنفيذ المستودعات، فلأن الوقود المستنفد يجب تبريده على السطح لعدة عقود قبل التخلص منه تحت الأرض، ولأن المرافق اللازمة لهذا التخزين أرخص وأبسط من المستودع العميق، لم يكن العمل على تنفيذ التقنيات اللازمة في المراحل النهائية لدورة الوقود يمثل أولوية قصوى. إنما من الناحية العملية، كان لغياب القبول الشعبي والسياسي لمشاريع المستودعات الجيولوجية العميقة تأثير أكبر في عرقلة التقدم نحو التنفيذ. واليوم، يبدو أن العناصر المطلوبة للوصول إلى حل مقبول للمستودع الجيولوجي العميق هي الثقة في الأمان التشغيلي وطويل الأمد (الذي يتضمن تحليلاً معقداً للسلوك المستقبلي على المدى الطويل)، والاتفاق على موقع محدد، والكفاءة الهندسية للبناء، وضمان التمويل الكافي. وقد تجاوزت بضع دول -بما في ذلك فنلندا والسويد وفرنسا- هذه العقبات إلى حد كبير وهي قريبة من بناء مستودعات جيولوجية عميقة. وقد شهدت دول أخرى كثيرة انتكاسات كبيرة في برامج التخلص الخاصة بها، وليس لديها اليوم سوى رؤى لمستقبل بعيد لتنفيذ هذه المرافق المكلفة للغاية. ومن الأمثلة على ذلك عام 2065 في التشيك، و2050 في ألمانيا، و2070 في إسبانيا، و2130 في هولندا، و2075 في المملكة المتحدة، بينما لا تملك دول أخرى، بما فيها الولايات المتحدة، أي مواعيد متوقعة على الإطلاق.

4.3 تحديات المراحل النهائية لنشر المفاعلات النمطية الصغيرة

توجد قضايا ملحة في المراحل النهائية تؤثر على النمو المحتمل للطاقة النووية. وكما حدث في الصعود الأصلي للطاقة النووية في السبعينيات، جرى إهمال القضايا المرتبطة بإدارة النفايات المشعة نوعاً ما في الموجة الحالية من الحماس للطاقة النووية. ولا يكاد يوجد أي تصميم من بين أكثر من 70 تصميماً مقترحاً للمفاعلات النمطية الصغيرة قد أشار بشكل مهم إلى إدارة النفايات. وفي وقت لاحق، بدأ بعض المطورين المحتملين في معالجة هذه القضية، أحياناً بتقديرات متفائلة بشأن جدوى تقليل، أو حتى القضاء على، بعض النفايات طويلة العمر الأكثر إشكالية.

بالنسبة للتصاميم القائمة على دورة وقود مفاعلات الماء الخفيف الحالية، قد يكون تكييف مفاهيم معالجة وإدارة النفايات الحالية مباشراً نسبياً. لكن حتى بالنسبة لهذه المفاعلات، لابد من دراسة تقنيات المناولة والتعبئة والتخلص. أما بالنسبة لدورات الوقود الجديدة الأكثر غرابة، وخاصة مفاعلات الملح المصهور، فهناك تحديات أصلية يجب مواجهتها. وفي كل الأحوال، في بعض سيناريوهات الطاقة النووية العالمية المستقبلية المقترحة، قد تنتج النفايات المشعة بأشكال متنوعة في مواقع عديدة متفرقة حول العالم، وسيتعين إدارتها بأمان وأمن. إن الكثير من العمل المطلوب القيام به بشأن دورة وقود المفاعلات النمطية الصغيرة وقضايا إدارة النفايات هو ذو طبيعة تقنية بحتة، ولكن نظراً للجدل الشعبي والسياسي المتكرر حول التحديات طويلة الأمد المعنية، فإن القضايا الاستراتيجية مهمة أيضاً. ومن الأمثلة على التحدي التقني ذو المكون المجتمعي القوي تحديد استراتيجية لاختيار مواقع المفاعلات النمطية الصغيرة الجديدة، سواء في البلدان التي تمتلك مفاعلات كبيرة قائمة (مثل مشاركة الموقع نفسه) أو في الدول النووية الوافدة حديثاً (ربما في مواقع نائية).

4.4 جدوى المستودعات متعددة الجنسيات

المستودع متعدد الجنسيات (MNR) هو مرفق للتخلص يقع في بلد واحد ويكون مستعداً لقبول النفايات المشعة الناتجة في بلد آخر. يمكن أن تغطي نماذج هذه المستودعات المرافق المشتركة التي يتم البدء فيها من خلال شراكة بين دول مختلفة، أو من خلال مزود خدمة تجاري. وكما ثبت على مدى العقود الماضية، فإن البرامج الوطنية للمستودعات الجيولوجية العميقة صعبة التنفيذ ومكلفة، ومن ثم فإن فرصة تجنب هذا العبء أو تقاسمه قد تكون موضع ترحيب لأي دولة مسؤولة عن مثل هذه النفايات. كما أن التوقعات العالية للمفاعلات النمطية الصغيرة، إذا تحققت، قد تؤدي أيضاً إلى انتشار محطات نووية صغيرة بتوزيع جغرافي أوسع في مجموعة من الدول، وهنا قد تصبح مفاهيم المستودعات متعددة الجنسيات أكثر أهمية. وربما تشمل التطورات المستقبلية مبادرات تجارية من قبل مزودي خدمات التخلص أو عروضاً من الدول الموردة للمفاعلات النمطية الصغيرة لاستعادة الوقود أو حتى قلب المفاعل بالكامل. إن التداعيات التقنية لقبول الوقود النووي المستنفد من المفاعلات النمطية الصغيرة في برنامج تخلص قائم هي نفسها تقريباً سواء للمستودع الوطني أو متعدد الجنسيات. وإذا اهتم العديد من المستخدمين المحتملين بتقنية معينة من المفاعلات النمطية الصغيرة، فقد يسهل ذلك قرار نشرها إذا كان يجري البحث عن حل تخلص مشترك.

5. القضايا المؤسسية والشاملة

5.1 التواصل بشأن المخاطر والفوائد

يعد التواصل الفعال بشأن المخاطر أمراً أساسياً للحفاظ على الثقة العامة، وضمان الدعم السياسي، وتأمين الاستقرار طويل الأمد للبرامج النووية. ويكتسب هذا الأمر أهمية خاصة مع المشاريع النووية الجديدة، ولا سيما التقنيات الحديثة أو عمليات النشر الأولى من نوعها للمفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات المتقدمة الكبيرة، والتي تقدم أنظمة ذات تاريخ تشغيلي محدود، وأنماط مواقع غير تقليدية، وتطبيقات صناعية جديدة.

وفقاً لوكالة الطاقة النووية، غالباً ما تواجه مثل هذه المشاريع تدقيقاً شعبياً مكثفاً، واستجابات عاطفية، وعدم تماثل في المعلومات. كما أن عدم إلمام الجمهور بهذه التقنيات، والذي تضخمه منظومات وسائل التواصل الاجتماعي والمعلومات المضللة المولدة بواسطة الذكاء الاصطناعي، يزيد من مخاطر سوء الفهم والمعارضة المنظمة. كما تتفاقم في البلدان الوافدة حديثاً تحديات التواصل بسبب الخبرة المؤسسية المحدودة والمعرفة الأساسية المنخفضة بالتقنيات النووية. لذا، يلزم إجراء دراسة متأنية للمشهد الإعلامي المتطور لضمان أن يكون التواصل بشأن المخاطر عاملاً مسهلاً، وليس عائقاً، أمام نشر الأنظمة النووية الناشئة.

في هذا المقام تؤكد وكالة الطاقة النووية أن التواصل بشأن المخاطر يجب أن يكون تفاعلياً، وموثوقاً، ومستجيباً لمخاوف أصحاب المصلحة بدلاً من كونه مجرد نشر للمعلومات في اتجاه واحد. وتجد الأبحاث التجريبية أن تصورات الجمهور لمخاطر الطاقة النووية ترتبط بقوة بعوامل مثل الثقة في المؤسسات، والمنفعة المتصورة، والخبرة السابقة مع الحوادث النووية، والقرب الجغرافي من المحطات. كما يوضح إطار (التضخيم الاجتماعي للمخاطر) أن الطريقة التي تنقل بها معلومات المخاطر ويتم التوسط فيها يمكن أن تضخم أو تضعف الاستجابات الشعبية بما يتجاوز حجم الخطر التقني، لا سيما في السياقات التي تتميز بضعف الثقة المؤسسية وفجوة المعلومات الكبيرة.

تطرح تصاميم المفاعلات النووية الجديدة، مثل مفاعلات الملح المصهور، ومفاعلات التوليد ذات الطيف السريع، والمفاعلات التي تستخدم دورات وقود جديدة، تحديات تواصل محددة. إن عدم إلمام الجمهور بهذه التقنيات -نظراً لخبرتها التشغيلية المحدودة- يمكن أن يؤدي إلى انخفاض الثقة وزيادة التأثر بالتصورات الخاطئة أو المعارضة. ويتطلب تقديم أخطار معقدة، مثل كيمياء الملح المصهور، أو أنظمة التبريد بالرصاص، أو حرائق الصوديوم، ترجمة دقيقة إلى لغة غير تقنية دون تبسيط مفرط أو التسبب في إنذار غير مبرر. كما أن المحطات متعددة الأغراض التي تدمج الطاقة النووية مع تحلية المياه، أو إنتاج الهيدروجين، أو الحرارة الصناعية توفر فوائد تتجاوز توليد الكهرباء التقليدي، وهي فوائد قد

تكون أقل وضوحاً للجمهور العام. وفي الوقت نفسه، يستوجب المشهد الإعلامي المتطور استراتيجيات استباقية لنشر معلومات علمية وتقنية قابلة للتحقق، ومواجهة المعلومات المضللة، والحفاظ على المصداقية.

5.2 النشر في الدول الوافدة حديثاً: التحديات المؤسسية والتنظيمية والبنية التحتية

سوف يتضمن التوسع العالمي المتوقع للطاقة النووية بشكل متزايد دولاً وافدة ذات خبرة مؤسسية وتنظيمية وتقنية محدودة. وعلى عكس الدول النووية الراسخة، يجب على الدول الوافدة بناء جزء كبير من بنيتها المؤسسية من الصفر، وغالباً بالتوازي مع مفاوضات الموردين وأنشطة البناء.

علاوة على ذلك، فإن الطبيعة النمطية ومرونة اختيار المواقع للمفاعلات النمطية الصغيرة تسمح بوجود أساطيل مفاعلات أكثر توزيعاً وأحياناً في مواقع نائية، وربما عبر مناطق متعددة أو مواقع صناعية. وهذا يثير تحديات جديدة تتعلق بتكرار التفتيش، وتنفيذ الضمانات، ولوجستيات نقل الوقود، والاستعداد للطوارئ، والتواصل بشأن المخاطر العابرة للحدود. كما تبرز مخاوف تتعلق بالحوكمة والسيادة عندما يقوم موردون أجانب بتشغيل المرافق بموجب نماذج (البناء والتملك والتشغيل) أو الاتفاقات بين الدول.

كما تواجه الدول الوافدة تحديات صعبة في بناء منظمات رقابية قادرة على الإشراف على مفاعلات متعددة أو عمليات نشر نمطية. فالمفاعلات النمطية الصغيرة المنشورة في مجموعات أو مواقع مشتتة تتطلب استراتيجيات تفتيش مكيفة وكفاءات تنظيمية جديدة. ويجب على هذه الدول وضع قوانين نووية حديثة، وأنظمة للمسؤولية القانونية، وأنظمة إدارة الطوارئ، ومتطلبات الأمن السيبراني، وأطر الحماية المادية. إن الاعتماد على التصنيع الأجنبي ومحدودية القدرة التصنيعية المحلية يوجدان نقاط ضعف في إمدادات الوقود، وتسليم المكونات، وضمان الجودة. عملياً، تواجه العديد من الأمم التي تنوي زيادة إنتاجها من الطاقة النووية هذه المخاطر، لكنها تمثل تحدياً خاصاً للوافدين الجدد.

قد تعتمد الدول الوافدة بشكل متزايد على ترتيبات تعاقدية مثل (البناء والتملك والتشغيل - BOO)، أو (البناء والتملك والتشغيل ونقل الملكية - BOOT)، أو الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP) لتمويل مشاريع البنية التحتية النووية. وتثير هذه النماذج أسئلة مهمة بشأن السيادة، والالتزامات التعاقدية طويلة الأجل، والسيطرة على القرارات الحاسمة المتعلقة بالأمان. يمكن لهذه الترتيبات أن تمحو الحدود التقليدية بين المنظم والمشغل والمورد، لا سيما عندما تحتفظ الكيانات الأجنبية بالسيطرة التشغيلية طويلة الأمد.

ويمكن للتعاون الإقليمي أن يقلل التكاليف ويسرع الجاهزية من خلال تجميع الخبرات التنظيمية، وموارد التفتيش، وخدمات دورة الوقود. وقد تشمل النهج المشتركة برامج تدريب موحدة، ومعايير تنظيمية

عامة، وحلولاً إقليمية لإدارة النفايات، وأطر عمل منسقة للاستعداد للطوارئ. كما تتطلب مواقع المفاعلات القريبة من الحدود الوطنية تنسيقاً معززاً بين الدول المتجاورة. وأخيراً، يظل نقص الطواقم الماهرة عائقاً رئيسياً أمام الكثير من الدول الوافدة، حيث يتطلب النشر المستدام للطاقة النووية تخطيطاً طويل الأمد للتعليم والتدريب والاحتفاظ بالمعرفة.

6. القرارات الاستراتيجية لنشر المفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات الكبيرة المتقدمة

تواجه الدول والمرافق والجهات الفاعلة الخاصة قرارات معقدة بشأن نشر المفاعلات النمطية الصغيرة، أو المفاعلات الكبيرة المتقدمة، أو مزيج منهما. وتعتمد هذه القرارات على مسارات التكلفة، ونضج سلسلة التوريد، والجاهزية التكنولوجية، ومرونة الموقع، وتوافر القوى العاملة، وأهداف خفض الانبعاثات، والقدرة التمويلية. وقد بدأ الفاعلون في القطاع الخاص، لا سيما مشغلو مراكز البيانات والمستهلكون الصناعيون الكبار، في التأثير بالفعل على مسارات النشر من خلال الاختيار المبكر للتكنولوجيا واتفاقيات شراء الطاقة.

تؤثر الهيكلية الاقتصادية لكل بلد، وقاعدتها الصناعية، ونظامها المالي، وثقافتها التنظيمية بقوة على مدى ملاءمة الطاقة النووية وجدوى المشاريع. وقد اعتمدت العديد من الحكومات استراتيجيات بناءً على معايير اختيار مختلفة تعكس الأولويات الوطنية (التي غالباً ما تفضل التصاميم المحلية)، والقدرة التنظيمية، والهيكل الصناعي، كما في حالات المملكة المتحدة، وبولندا، والسويد، وكندا. إن دمج المفاعلات النمطية الصغيرة مع المفاعلات الكبيرة المتقدمة أو تمديد عمر الأساطيل الحالية قد يعزز مرونة النظام في ظل مسارات الطلب وإزالة الكربون المختلفة. ومن بواعث القلق أن الإعلانات عن مشاريع جديدة غالباً ما تبدو متجاوزة لما يمكن لسلاسل التوريد الحالية والمؤسسات التنظيمية وقدرات الموردين تقديمه.

7. استنتاجات

لقد عادت الطاقة النووية للظهور كخيار بارز في النقاشات العالمية حول أمن الطاقة، وموثوقية نظام الكهرباء، وإزالة الكربون. وتشير التقييمات الدولية الأخيرة إلى أن القدرة النووية ستتوسع بشكل كبير بحلول منتصف القرن، رغم تباين التوقعات. وكما أظهرت هذه الورقة، فإن القضية الأساسية ليست ما إذا كانت الطاقة النووية قادرة على المساهمة في تحول الطاقة، بل تحت أي ظروف يمكن أن يحدث نشرها بنطاق ملموس.

تظل العوامل الاقتصادية مركزية، فالمفاعلات الكبيرة لا تزال تواجه تكاليف رأسمالية عالية جداً وفترات بناء طويلة، بينما يتعين على المفاعلات النمطية الصغيرة إثبات أن التصنيع النمطي والنشر المتسلسل

يمكن أن يحقق خفض التكاليف وتخفيف المخاطر المالية المتوقعين. كما ستؤثر قدرة سلسلة التوريد، والوصول إلى الوقود المناسب، وتوافر الأفراد المهرة بقوة على وتيرة المضي قدماً في المشاريع الجديدة. وستلعب أطر الحوكمة والأطر المؤسسية دوراً حاسماً بنفس القدر، إذ يجب أن تتطور أنظمة الترخيص والرقابة التنظيمية والثقة العامة لاستيعاب تصاميم المفاعلات ونماذج النشر الجديدة، مع الحفاظ على المعايير العالية للأمان والأمن والضمانات. إن إدارة الوقود المستنفد والنفايات المشعة تظل واحدة من أكثر التحديات طويلة الأمد تعقيداً، وسيتطلب التقدم فيها استمرار التطوير التقني، وأطراً تنظيمية مستقرة، وقبولاً شعبياً وسياسياً مستداماً.

ختاماً، تشير هذه الاعتبارات مجتمعة إلى أن مستقبل الطاقة النووية سيعتمد على التوفيق الناجح بين التكنولوجيا، والاقتصاد، والحوكمة، والقبول المجتمعي. إن معالجة التحديات المناقشة في هذه الورقة تتطلب عملاً تحليلياً مستمراً ودراسات مستفيضة، وينوي المؤلفون البناء على هذا التحليل في ورقة لاحقة تحدد المجالات الممكنة لدعم اتخاذ قرارات مدروسة بشأن النشر المستقبلي للتقنيات النووية المتقدمة.

يلخص الجدول التالي أهم المحاور والتحديات والمقترحات التي تضمنتها الورقة*

المحور	أبرز الأرقام	التحديات	المقترحات
الوضع الحالي	413 مفاعل، 377 جيجاوات، 10% من الكهرباء	تقادم المفاعلات (36 سنة)	تمديد العمر + استبدال تدريجي
التوسع المستقبلي	38 دولة تستهدف مضاعفة القدرة 3 مرات	فجوة كبيرة في التنفيذ	تسريع الاستثمار النووي
مفاعلات نمطية صغيرة	أكثر من 100 مشروع، 20-300 ميغاوات	عدم النضج التجاري	دعم المشاريع التجريبية
المفاعلات الكبيرة	7- 16 مليار دولار للمحطة	تأخيرات وتكاليف عالية	تحسين إدارة المشاريع
مشاريع لأول مرة	تكلفة عالية ومخاطر	تكرار المشاريع محدود	طلبات متعددة لنفس التصميم
سلاسل الإمداد	حاجة لعشرات الآلاف من العمال	نقص الموردين	تطوير القدرات الصناعية
الوقود	HALEU (19- 20%)	نقص التخصيب	استثمارات طويلة الأجل
التمويل	80% بضمانات حكومية	مخاطر عالية	نماذج PPP وCfD
النفايات	تحديات التخزين	تكاليف مرتفعة	حلول دولية مشتركة
التطبيقات	الهيدروجين، التحلية، الصناعة	عدم وضوح السوق	تطوير نماذج أعمال جديدة

* المترجم