IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6

مجلس المحافظين
المؤتمـــــر العـــام

نسخة مخصصة للاستخدام الرسمي فقط

توزيع عام
عربي
الأصل: الإنكليزية

حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي لعام ٢٠٢١

تقرير من المدير العام

IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6
٣٠ آب/أغسطس ٢٠٢١

مجلس المحافظين
المؤتمـــــر العـــام

توزيع عام
عربي
الأصل: الإنكليزية

نسخة مخصصة للاستخدام الرسمي فقط

البند ١٨ من جدول الأعمال المؤقت للمؤتمر
(الوثيقة GC(65)/1 وإضافتها Add.1)

حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي لعام ٢٠٢١

تقرير من المدير العام

ملخص

- طلب المؤتمر العام في قراره GC(50)/RES/13 من الأمانة أن تقدِّم كلَّ سنتين تقريراً شاملاً يتناول حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي، وذلك بدءاً من عام ٢٠٠٨. وطلب المؤتمر العام في قراره GC(60)/RES/12، الصادر في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦، من الأمانة أن تواصل نشر التقرير المعنون "حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي" كلَّ أربع سنوات، ابتداء من عام ٢٠١٧. ويستجيب هذا التقرير لقرار المؤتمر العام GC(60)/RES/12.

حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي لعام ٢٠٢١

تقرير من المدير العام

ألف- الطاقة النظيفة من أجل المناخ والتنمية: السياق الاجتماعي والاقتصادي

ألف-١- السياق المتغير

١- طرأت على المستويين الوطني والدولي تطورات كبيرة تُبرز دور القوى النووية في التخفيف من حدة تغير المناخ وتحقيق التنمية المستدامة، منذ صدور التقرير عن حالة القوى النووية وآفاقها على الصعيد الدولي لعام ٢٠١٧ (الوثيقة GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8). ويسلِّط هذا القسم الضوء على بعض أهم هذه التطورات التي تؤثِّر في حالة القوى النووية وآفاقها.

ألف-١-٢- التطورات الدولية

٢- هناك اعتراف عالمي متزايد بأنَّ ضمان حصول الجميع على خدمات الطاقة الحديثة الموثوقة والمستدامة بتكلفة ميسورة (الهدف ٧ من أهداف التنمية المستدامة) هو أمرٌ حاسم الأهمية لبلوغ جميع أهداف التنمية المستدامة الستة عشر الأخرى تقريباً. وتدعو أهداف التنمية المستدامة، التي اعتمدها قادة العالم في أيلول/سبتمبر ٢٠١٥، جميع البلدان إلى حشد الجهود حتى عام ٢٠٣٠ من أجل القضاء على جميع أشكال الفقر ومكافحة أوجه انعدام المساواة والتصدي لتغيُّر المناخ. وتمضي هذه الجهود يداً بيدٍ مع استراتيجيات رامية إلى بناء النمو الاقتصادي وتلبية الاحتياجات الاجتماعية، بما فيها التعليم والصحة والحماية الاجتماعية وإيجاد فرص العمل، مع التصدي لتغيُّر المناخ وحماية البيئة. ووفقاً لإدارة الشؤون الاقتصادية والاجتماعية التابعة للأمم المتحدة التي تضطلع بمهام الأمانة فيما يتعلق بأهداف التنمية المستدامة، فإنَّ الهدف ٧ له أهمية حاسمة في تحقيق معظم أهداف التنمية المستدامة الأخرى "من القضاء على الفقر عن طريق النهوض بالصحة والتعليم وتوفير المياه والتصنيع إلى التخفيف من حدة تغير المناخ". وقد أكَّدت الوكالة الدولية للطاقة، التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، النقطة نفسها مراراً، وصرَّحت في آذار/مارس ٢٠١٨ بأنَّ "الطاقة تحتلُّ موقع القلب العديد من أهداف التنمية المستدامة — من توسيع نطاق الحصول على الكهرباء إلى تحسين أنواع الوقود النظيفة المستخدمة في الطهي، ومن تقليل الإهدار في دعم الطاقة إلى كبح جماح الآثار القاتلة لتلوُّث الهواء التي تودي بحياة الملايين حول العالم قبل الأوان".

٣- وتتراوح التقديرات بشأن كمية ثاني أكسيد الكربون التي أمكن فعليًّا تلافي انبعاثها باستخدام القوى النووية في السنوات الخمسين الماضية بين ٧٠ غيغا طن و ٧٨ غيغا طن، بحسب التكنولوجيات التي كانت ستُنشر ما لم تُشيَّد محطات القوى النووية. وحساب كمية الانبعاثات التي أمكن تلافيها عن طريق الأسطول المُنشأ حاليًّا هو أمرٌ معقد، لأنَّ بدائل القوى النووية يمكن أن تتفاوت بين استخدام الغاز وحده إلى استخدام مزيج من الغاز والمصادر المتجددة. وفي الفترة بين عامي ١٩٧٠ و٢٠١٠، كانت البدائل الواضحة للقوى النووية هي

النفط والفحم أولاً ثم الغاز في وقت لاحق. وتمكَّنت البلدان التي نشـــرت القوى النووية على نطاق واســـع، مثل فرنســـا والســـويد، من إزالة الكربون من مزيج الطاقة الخاص بها في غضـــون فترة تتراوح بين عقدين وثلاثة عقود. وفي عام ٢٠١٩، اســتأثرت القوى النووية بحصــة قدرها ١٠,٤٪ من إنتاج الكهرباء في العالم، بما يعادل ٢٦٥٧ تيراواط-ســاعة من الكهرباء المنخفضــة الكربون. وكان توليد الكمية نفســها من الكهرباء باســتخدام الغاز سيؤدي إلى انبعاث ما يقارب ١,٥ غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون. وتشير تحليلات دورات أعمار تكنولوجيات توليد الكهرباء إلى أنَّ القوى النووية تُعدُّ واحدة من أقل التكنولوجيات من حيث كثافة انبعاثات الكربون، شأنها في ذلك شـــأن طاقة المياه وطاقة الرياح. ولا تزال القوى النووية أحد الخيارات الرئيســية لإزالة الكربون من قطاع الكهرباء على مدى العقود المقبلة، إلى جانب مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة مثل طاقة الرياح والخلايا الفلطائية الضوئية الشمسية (الخلايا الشمسية).

تأثير الكربون

المساهمة النووية

ساعدت القوى النووية	٧٠ غيغاطن - ٧٨ غيغاطن	طيلة السنوات
على تلافي انبعاث	من ثاني أكسيد الكربون	الخمسين الماضية.

٤- وهناك تقدُّم مطرد في الاعتراف بالدور الكبير الذي تؤديه القوى النووية في التخفيف من حدة تغير المناخ وتحقيق التنمية المســـتدامة. وقد اضـــطلعت منظمات وطنية ودولية عديدة بتحليل الاحتياجات فيما يتعلق بإزالة الكربون من نظم الطاقة بما يتوافق مع تحقيق أهداف اتفاق باريس؛ وتدعو معظم الســـيناريوهات التي وضـــعتها هذه المنظمات إلى زيادة كبيرة في القدرة العالمية على توليد القوى النووية، بما في ذلك جميع السيناريوهات التوضيحية الأربعة التي أوردتها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (الهيئة المعنية بتغير المناخ) في منشورها الصادر في عام ٢٠١٨ بعنوان *Special Report on Global Warming of 1.5°C* ("التقرير الخاص عن كبح الاحترار العالمي عند مستوى ١,٥ درجة مئوية"). وبالفعل فإنَّ جميع الســيناريوهات الأربعة التي وضـــعتها الهيئة المعنية بتغير المناخ تدعو إلى زيادة القدرة على توليد القوى النووية بنســـبة بين ٦٠٪ و٥٠٠٪ بحلول عام ٢٠٥٠، حتى يمكن تحقيق الهدف المتمثِّل في كبح الاحترار العالمي عند مستوى ١,٥ درجة مئوية. وفي الوقت نفســـه، يتزايد النظر إلى القوى النووية باعتبارها خياراً مهمًّا لتمكين العالم النامي من تلبية الطلب المتزايد على الطاقة وتحسين مستويات المعيشة دون زيادة انبعاثات غازات الدفيئة. ووفقاً لسيناريو التنمية المستدامة الذي وضعته الوكالة الدولية للطاقة في منشورها المعنون World Energy Outlook 2019 ("توقعات الطاقة في العالم لعام ٢٠١٩")، فهناك حاجة لتوسُّع كبير في اســتخدام القوى النووية يتجاوز أســواقها التاريخية إلى بلدان مســتهلة، بما يشــمل بلداناً نامية، ويتجاوز أيضــاً قطاع توليد الكهرباء لكي تُتاح للعالم فرصــة معقولة لبلوغ الأهداف المتعلقة بتغير المناخ وتحقيق أهداف التنمية المستدامة الأخرى المرتبطة بالطاقة.

سيناريوهات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ

المساهمة النووية

لبلوغ هدف ١,٥ درجة مئوية، ٤ سيناريوهات وضعتها الهيئة المعنية بتغير المناخ

تدعو إلى زيادة القدرة بنسبة ٦٠-٥٠٠٪ بحلول ٢٠٥٠.

٥- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، نظَّمت الوكالة مؤتمرها الدولي الأول بشأن تغير المناخ ودور القوى النووية. واجتذب المؤتمر أكثر من ٥٠٠ مشارك من ٧٩ دولة عضواً و١٧ منظمة دولية، وجمع للمرة الأولى بين رؤساء المنظمات الدولية الرئيسية المعنية بالطاقة وتغير المناخ (اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، والهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، والوكالة الدولية للطاقة، وإدارة الشؤون الاقتصادية والاجتماعية التابعة للأمم المتحدة) لمناقشة دور القوى النووية في التصدي للاحترار العالمي. وفي سياق الموجز الختامي لأعمال المؤتمر، قال رئيس المؤتمر السيد ميخائيل شوداكوف، نائب المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية ورئيس إدارة الطاقة النووية، إنَّ القوى النووية لها دور رئيسي في إزالة الكربون من قطاع الطاقة لتحقيق الأهداف المتعلقة بتغير المناخ، لكن سيلزم وضع سياسات تمكِّن من الاستفادة من إمكانياتها الكاملة.

٦- وحذَّرت الوكالة الدولية للطاقة، في تقريرها الصادر في أيار/مايو ٢٠١٩ بعنوان *Nuclear Power in a Clean Energy System* ("القوى النووية في إطار نظام للطاقة النظيفة")، من أنَّ عدم اتخاذ القرارات في الوقت المناسب بشأن القوى النووية سوف يؤدي إلى ارتفاع تكاليف الانتقال إلى الطاقة النظيفة كم سيزيد كثيراً من صعوبة بلوغ الأهداف المتعلقة بالوصول بصافي الانبعاثات الكربونية إلى مستوى الصفر. وكرَّرت الوكالة الدولية للطاقة النقطة نفسها في تقريرها التاريخي الصادر في أيار/مايو ٢٠٢١ بعنوان *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* ("الوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر بحلول عام ٢٠٥٠: خريطة طريق لقطاع الطاقة العالمي")، والذي يبيّن مساراً ممكناً للقضاء على انبعاثات غازات الدفيئة عالميًّا بحلول منتصف القرن. ويتوقع التقرير المذكور أن تتضاعف القدرة النووية على توليد الكهرباء بحلول عام ٢٠٥٠، ليصل معدَّل التوصيل بالشبكة الكهربائية إلى نحو ٣٠ غيغاواط سنويًّا في بعض السنوات، وذلك رغم تراجع طفيف في إجمالي حصة القوى النووية من إنتاج الكهرباء العالمي لتصل إلى ٨٪ في عام ٢٠٥٠. وبحسب المسار المتوخَّى في هذا السيناريو للوصول إلى صافي انبعاثات صفري، فإنَّ بقية مزيج الكهرباء في عام ٢٠٥٠ تغلب عليها مصادر الطاقة المتجددة، لا سيما الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. غير أنَّ الوكالة الدولية للطاقة أوضحت في تقرير صدر مؤخراً بعنوان *The role of critical minerals in clean energy transitions* ("دور المعادن الحيوية في عمليات الانتقال إلى الطاقة النظيفة")، أنَّ التكنولوجيات المستخدمة في طاقة الرياح والطاقة الشمسية وفي البطاريات تعتمد اعتماداً كبيراً على معادن حيوية يمكن أن تؤدي المسائل المتعلقة بتوافرها إلى إبطاء نشر هذه التكنولوجيات. أمَّا القوى النووية فهي من التكنولوجيات المنخفضة الكربون الأقل اعتماداً على المعادن، شأنها في ذلك شأن القوى الكهرمائية.

٧- ودعت مبادرة الطاقة التابعة لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، في تقرير نشرته في أيلول/سبتمبر ٢٠١٨، إلى زيادة كبيرة في القدرة العالمية على توليد القوى النووية لبلوغ الأهداف المتعلقة بتحقيق صافي

انبعاثات صفري. وفي سبيل تحقيق هذه الزيادة، حدَّد التقرير السياسات التي من شأنها أن تكفل للقوى النووية فرصاً متكافئة للمنافسة مع سائر تكنولوجيات الطاقة المنخفضة الكربون، وكذلك الخطوات اللازمة لخفض تكلفة مشاريع البنية النووية الجديدة. وعلى غرار تقرير الوكالة الدولية للطاقة، خلصت دراسة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا إلى أنَّه دون مساهمة القوى النووية القابلة للتوريد سيكون الانتقال إلى الطاقة النظيفة أكثر تكلفة بكثير وسيكون تحقيقه أكثر صعوبة.

٨- ووفقاً لتقرير اشتركت في إعداده الوكالة الدولية للطاقة ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، وصدر في كانون الأول/ديسمبر ٢٠٢٠ بعنوان *Projected Costs of Generating Electricity*، فإنَّ تمديد العمر التشغيلي لمحطات القوى النووية القائمة هو الاستثمار الأكثر فعالية من حيث التكلفة في مجال توليد الكهرباء المنخفضة الكربون. وأشار التقرير إلى أنَّه في حين أنَّ القوى الكهرمائية يمكن أن تقدِّم مساهمات مماثلة بتكلفة مشابهة، فإنَّها تظلُّ متوقفة إلى درجة كبيرة على الموارد الطبيعية المتاحة في فرادى البلدان.

٩- ووفقاً لتقرير أصدرته لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا في آذار/مارس ٢٠٢١، فإنَّ الطاقة النووية هي "أداة لا غنى عنها" لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، وهي تؤدي دوراً حيويًّا في توفير الطاقة بتكلفة ميسورة والتخفيف من حدة تغير المناخ والقضاء على الفقر واستئصال الجوع وتحقيق النمو الاقتصادي وإتاحة كلٍّ من الابتكار الصناعي والمياه النظيفة. ويمكن للطاقة النووية الموثوقة أن تشكِّل جزءاً حاسم الأهمية نظم الطاقة الخالية من الكربون في البلدان التي تسعى إلى تحقيق الأهداف المتعلقة بتغير المناخ وأهداف التنمية المستدامة، حسبما جاء في التقرير الذي صدر بعنوان *Application of the United Nations Framework Classification for Resources and the United Nations Resource Management System: Use of Nuclear Fuel Resources for Sustainable Development – Entry Pathways* ("تطبيق تصنيف الأمم المتحدة الإطاري للموارد ونظام الأمم المتحدة لإدارة الموارد: استخدام موارد الوقود النووي لأغراض التنمية المستدامة – مسارات الاستهلال").

١٠- وفي تقييم تقني صدر في آذار/مارس ٢٠٢١، ذكر مركز البحوث المشترك، وهو الجهة المعنية بالعلوم والتكنولوجيا في المفوضية الأوروبية أنَّه لا يوجد دليل "ذو أساس علمي على أنَّ الطاقة النووية تضرُّ بالصحة البشرية أو بالبيئة أكثر من غيرها من تكنولوجيات إنتاج الكهرباء [المنخفضة الكربون] المشمولة بالفعل في التصنيف [الخاص بالاتحاد الأوروبي] باعتبارها أنشطة تدعم التخفيف من حدة تغير المناخ". وقد أُجري التقييم فيما يتعلق بمعايير "عدم التسبُّب في أضرار كبيرة" المنصوص عليها في "لائحة التصنيف" الخاصة بالاتحاد الأوروبي، والتي ترسي إطاراً لتيسير الاستثمارات المستدامة وستكفل في نهاية المطاف أساس التوسُّع في الاستثمارات في الطاقة المنخفضة الكربون في جميع بلدان الاتحاد الأوروبي. واستشهد مركز البحوث المشترك في تقريره ببيانات من عام ٢٠١٦ تبيّن أنَّ القوى النووية تحقِّق نتائج جيدة للغاية في التقييمات التي تُجرى لآثارها الصحية مقارنة بغيرها من مصادر الطاقة، وذلك بناءً على العبء الإجمالي للأمراض المقاس بسنوات العمر المعدَّلة بمراعاة الإعاقة، أي معبَّراً عنه بمجموع السنوات المفقودة بسبب اعتلال الصحة أو الإعاقة أو الوفاة المبكرة.

١١- وتترك الاستثمارات في مصادر الطاقة النظيفة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة النووية تأثيراً في الناتج المحلي الإجمالي يزيد بضعفين إلى سبعة أضعاف على تأثير الإنفاق على المصادر الأحفورية مثل الغاز والفحم والنفط، وذلك وفقاً لورقة عمل نشرها صندوق النقد الدولي في آذار/مارس ٢٠٢١ بعنوان *Building Back Better: How Big Are Green Spending Multipliers?* ("إعادة البناء بطريقة أفضل: ما حجم

مُضاعِفات الإنفاق الأخضر؟"). وذكرت ورقة العمل أنَّ القوى النووية تُنتِج الأثر الاقتصادي المُضاعِف الأعلى بين جميع مصادر الطاقة النظيفة، وأضافت أنَّ القوى النووية توجِد فرص عمل أكثر بنسبة ٢٥٪ لكلِّ وحدة كهرباء مقارنة بطاقة الرياح، وأنَّ العاملين في القطاع النووي يتقاضون أجوراً تفوق بمقدار الثلث ما يتقاضاه العاملون في قطاع صناعة الطاقة المتجددة.

الاستثمارات في الطاقة النظيفة

تترك تأثيراً في الناتج المحلي الإجمالي أكبر بما يعادل

x ٧-٢

من الإنفاق على المصادر الأحفورية مثل الغاز والفحم والنفط.

باء- القوى النووية اليوم

١٢- في نهاية عام ٢٠٢٠، كانت القدرة العالمية الإجمالية على توليد القوى النووية تبلغ ٣٩٢,٦ غيغاواط (كهربائي)[١]، تولِّدها ٤٤٢ من مفاعلات القوى النووية العاملة في ٣٢ بلداً. وقد أثبتت البلدان قدرتها على التكيُّف مع جائحة مرض فيروس كورونا (كوفيد-١٩) عن طريق اتخاذ تدابير فعالة تنمُّ عن ثقافة تنظيمية راسخة. وفي بداية تفشي الجائحة في أوائل عام ٢٠٢٠، أنشأت الوكالة شبكة الخبرات المكتسبة في مجال تشغيل محطات القوى النووية في ظل جائحة كوفيد-١٩، بغية تقاسم المعلومات بشأن التدابير المتخذة للتخفيف من حدَّة الجائحة وتأثيرها في تشغيل محطات القوى النووية. ولم يُفِد أيٌّ من البلدان التي لديها محطات قوى نووية عاملة، والبالغ عددها ٣٢ بلداً، بتسبُّب الجائحة في وقوع أيِّ حادث تشغيلي كان له تأثير في تشغيل محطات القوى النووية على نحو مأمون وموثوق.

في نهاية عام ٢٠٢٠،

كانت القدرة العالمية على توليد القوى النووية تبلغ **٣٩٢,٦** **غيغاواط (كهربائي)**

يوفِّرها **٤٤٢** من مفاعلات القوى النووية العاملة

في **٣٢** بلداً.

[١] الغيغاواط (الكهربائي) الواحد هو مقدار من القوى الكهربائية يعادل ألف مليون واط. وجميع البيانات المتعلقة بمفاعلات القوى النووية مستمدَّة من التقارير المقدَّمة إلى نظام المعلومات عن مفاعلات القوى الذي تتعهدَّه الوكالة الدولية للطاقة الذرية، حتى ١ حزيران/يونيه ٢٠٢١.

١٣- ووفَّرت القوى النووية في عام ٢٠٢٠ ما مجموعه ٢٥٥٣,٢ تيراواط‌ـساعة من الكهرباء المنتجة بلا انبعاثات من غازات الدفيئة، بما يمثل نحو ١٠٪ من إجمالي توليد الكهرباء على الصعيد العالمي وزهاء ثلث الإنتاج العالمي من الكهرباء المنخفضة الكربون.

١٤- ووُصِّل بالشبكة الكهربائية نحو ٥,٥ غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة المستمدة من خمسة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط، كما يلي: ١١١٠ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Belarusian-1 في بيلاروس، و١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Tianwan-5 و١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) في المفاعل Fuqing-5 في الصين، و١٠٦٦ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Leningrad 2-2 في الاتحاد الروسي، و١٣٤٥ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل براكة-١ في الإمارات العربية المتحدة. ويشكِّل تدشين المفاعلَيْن Belarusian-1 في بيلاروس وبراكة-١ في الإمارات العربية المتحدة باكورة توليد الكهرباء نوويًّا في هذين البلدين.

١٥- وبدأ في عام ٢٠٢٠ التشغيل التجاري لأول مفاعل نمطي صغير متقدِّم ومحطة القوى النووية العائمة الوحيدة في العالم، وهي محطة أكاديميك لومونوسوف، التي تقع قبالة ساحل المحيط المتجمد الشمالي في الاتحاد الروسي وتضمُّ وحدتين تتألف كلٌّ منهما من مفاعل نمطي صغير من طراز KLT-40S بقدرة ٣٥ ميغاواط (كهربائي).

١٦- وعلى الصعيد العالمي، استأثرت المفاعلات من الأنواع المهدَّأة والمبرَّدة بالماء الخفيف بنحو ٨٩,٥٪ من قدرة القوى النووية العاملة؛ في حين بلغت حصة المفاعلات من الأنواع المهدَّأة والمبرَّدة بالماء الثقيل ٦٪؛ والمفاعلات من الأنواع المبرَّدة بالماء الخفيف والمهدَّأة بالغرافيت ٢٪ بينما بلغت المفاعلات من الأنواع المبرَّدة بالغاز ٢٪. وتُعزى النسبة المتبقية، وقدرها ٠,٥٪ لثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلز سائل يبلغ مجموع قدرتها ١,٤ غيغاواط (كهربائي).

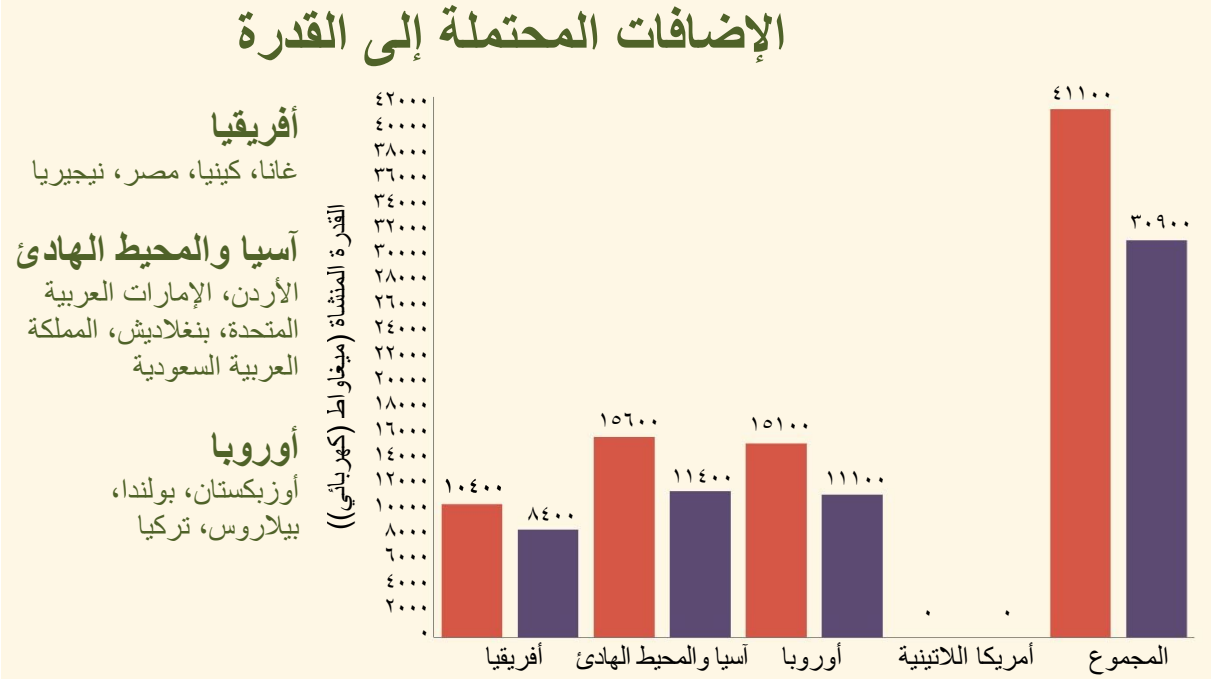
١٧- وخلال عام ٢٠٢٠، أسفرت عمليات إنهاء الخدمة عن فقدان ٥,٢ غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية، إثر الإغلاق الدائم لستة من مفاعلات القوى النووية، وهي: المفاعل Fessenheim-1 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٨٨٠ ميغاواط (كهربائي)) والمفاعل Fessenheim-2 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٨٨٠ ميغاواط (كهربائي)) في فرنسا، والمفاعل Leningrad-2 (وهو مفاعل مبرَّد بالماء الخفيف ومهدَّأ بالغرافيت بقدرة ٩٢٥ ميغاواط (كهربائي)) في الاتحاد الروسي، والمفاعل Duane Arnold (وهو مفاعل ماء مغلي بقدرة ٦٠١ ميغاواط (كهربائي)) والمفاعل Indian Point-2 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٩٩٨ ميغاواط (كهربائي)) في الولايات المتحدة الأمريكية. أمَّا المفاعل Ringhals-1 (وهو مفاعل ماء مغلي بقدرة ٨٨١ ميغاواط (كهربائي)) في السويد فقد أُغلق في آخر يوم من عام ٢٠٢٠، بعد أكثر من ٤٦ سنة في الخدمة.

١٨- وعلى وجه الإجمال، شهد العقد الأخير اتجاهاً للنمو التدريجي في قدرة القوى النووية، بما في ذلك إضافة نحو ٢٣,٧ غيغاواط (كهربائي) من القدرة الجديدة بفعل إنشاء مفاعلات جديدة أو إدخال تحسينات على المفاعلات القائمة. وشهد توليد القوى النووية نموًّا مطرِّداً ليرتفع بنسبة تزيد على ٦٪ منذ عام ٢٠١١.

١٩- ومن أصل المفاعلات الجاري تشييدها حاليًّا، والبالغ عددها ٥٢ مفاعلاً، هناك ٩ مفاعلات في بلدان مستهلة. وأعرب ما مجموعه ٢٨ بلداً عن اهتمامها بالقوى النووية، وهي الآن تفكِّر في الأخذ بها ضمن مزيج الطاقة لديها أو تخطِّط لذلك أو تتَّخذ إجراءات فعلية في هذا الصدد. وتشارك ٢٤ دولة عضواً أخرى في أنشطة الوكالة المتعلقة بالبنية الأساسية النووية أو تشارك في مشاريع تخطيط الطاقة من خلال برنامج التعاون التقني. وهناك ما بين عشر دول أعضاء واثنتي عشرة دولة عضواً تخطِّط لتشغيل محطة للقوى النووية بحلول الفترة

٢٠٣٠-٢٠٣٥، بما يمثِّل زيادة محتملة قدرها نحو ٣٠٪ في عدد البلدان المشـــغِّلة. وأعربت عدَّة دول مســـتهلة أيضـــاً عن اهتمامها بتكنولوجيا المفاعلات النمطية الصـــغيرة، وهي تحديداً الأردن وإســـتونيا وبولندا والســـودان وغانا وكينيا والمملكة العربية الســـعودية، وكذلك دول متوسِّـــعة مثل جنوب أفريقيا. وتوفِّر الوكالة، بالاســـتناد إلى نهج المعالم المرحلية البارزة الخاص بها، خدمة الاســـتعراض المتكامل للبنية الأســـاســـية النووية لكلٍّ من البلدان المســـتجدة والبلدان التي توسِّـــع برنامجها للقوى النووية، للمســـاعدة على التأكد من أنَّ البنية الأســـاســـية اللازمة لاستخدام القوى النووية على نحو مأمون وآمن ومستدام قد أُرسيت ويجري تنفيذها بطريقة مسؤولة ومنظَّمة.

٢٠- ولا تزال خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية واحدة من خدمات الوكالة المرغوبة، حيث تدعم الدول الأعضـــاء في اســـتعراض حالة بنيتها الأســـاســـية النووية والوقوف على الثغرات بطريقة منهجية ومتكاملة. وقد أُوفِدت في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية حتى الآن ٣٢ بعثة إلى ٢٢ دولة عضواً.



جيم- آفاق القوى النووية

٢١- تشير عمليات نمذجة السيناريوهات المتوافقة مع أهداف اتفاق باريس لعام ٢٠١٥ في مجملها إلى أنَّ القوى النووية عنصر بالغ الأهمية في نجاح الجهود الرامية لإزالة الكربون من قطاع الكهرباء، عن طريق توفير مصدر موثوق ومنخفض الكربون لتزويد الشبكة الكهربائية بالقوى على مدار الساعة. ومع الزيادة العالمية في الطلب على الكهرباء لتلبية احتياجات سكان العالم وضمان إمكانية حصولهم على الكهرباء بحلول عام ٢٠٥٠، فضلا عن ارتفاع مستوى التحوُّل لاستخدام الكهرباء في الاقتصاد، سيكون من الضروري تحقيق زيادة كبيرة في توليد الكهرباء المنخفضة الكربون. وفي حين أنَّ الجانب الأكبر من هذا التوليد سوف توفِّره المصادر المتجددة المتغيرة، مثل طاقة الرياح والخلايا الشمسية، فسوف تحافظ الطاقة النووية على حصتها العالمية التي تتراوح بين ٨ و١٠٪ لتوفِّر المرونة اللازمة والقابلية للتوريد على النحو الذي تتطلبه نظم الكهرباء المنخفضة الكربون. وتشير توقعات الوكالة في الحالة المرتفعة حتى عام ٢٠٥٠ إلى زيادة القدرة النووية المنشأة إلى ٧١٥ غيغاواط (كهربائي)، رهناً بالتوسُّع في التشغيل الطويل الأجل للأسطول القائم، بالإضافة إلى ٥٠٠ غيغاواط (كهربائي) من مشاريع البنية الجديدة التي ستُشيَّد على مدى ثلاثة عقود. وتشير التقديرات في الحالة المنخفضة إلى أنَّ القدرة العالمية على توليد الكهرباء نوويًّا سوف تتراجع بنسبة ٧٪ لتبلغ ٣٦٣ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠، بما يمثِّل حصة قدرها ٦٪ من مجمل توليد الكهرباء في العالم، مقارنة بنحو ١٠٪ في عام ٢٠١٩. ومع ذلك، فحتى في الحالة المنخفضة تشير التقديرات إلى تشييد عدد كبير من محطات القوى النووية الجديدة، مع افتراض أنَّ نحو ثلث مفاعلات القوى النووية القائمة ستنتهي خدمته بحلول عام ٢٠٣٠، في حين ستضيف المفاعلات الجديدة نحو ٨٠ غيغاواط (كهربائي) من القدرة. وبين عامي ٢٠٣٠ و٢٠٥٠، يُتوقع أنَّ إضافات القدرة من المفاعلات الجديدة سوف تكون معادلة تقريباً للقدرة المفقودة بسبب إنهاء الخدمة.

توقعات الوكالة في الحالة المرتفعة

زيادة القدرة النووية المنشأة إلى **٧١٥ غيغاواط (كهربائي)**

رهناً بالتشغيل الطويل الأجل للأسطول القائم، بالإضافة إلى **٥٠٠ غيغاواط (كهربائي)**

من البنية الجديدة التي ستُشيَّد خلال ثلاثة عقود.

٢٢- وتنظر الحكومات حول العالم في الأخذ بحزم للإنعاش الاقتصادي بغية التعافي من تأثير جائحة كوفيد-١٩. وتشكِّل هذه التدابير فرصة فريدة للتوفيق بين الاستثمارات العامة والاحتياجات المتعلقة بالانتقال إلى الطاقة النظيفة. ولذلك يُولى الانتباه الآن للآثار التي تترتب على الاستثمارات في التكنولوجيات الخضراء. وقد نشر صندوق النقد الدولي في آذار/مارس ٢٠٢١ ورقة عمل تبيّن أنَّ الاستثمارات في التكنولوجيات الخضراء تترك تأثيراً في الناتج المحلي الإجمالي الوطني أكبر من تأثير الاستثمارات في الأصول ذات الصلة بالوقود الأحفوري. وبالإضافة إلى ذلك، فإنَّ تأثير الاستثمارات في البرامج النووية هو الأكبر على الإطلاق (أي أنَّها تُنتج القيمة الأعلى لمُضاعف الناتج المحلي الإجمالي) مقارنة بالاستثمارات في أي تكنولوجيا خضراء أخرى. وقد أجرت الوكالة تحليلاً على صعيد الاقتصاد الكلي تبيَّن منه أنَّ مشاريع القوى النووية تؤدي إلى إيجاد عدد مرتفع من فرص العمل المجزية، وأنَّ لها آثاراً أخرى إيجابية في الاقتصاد.

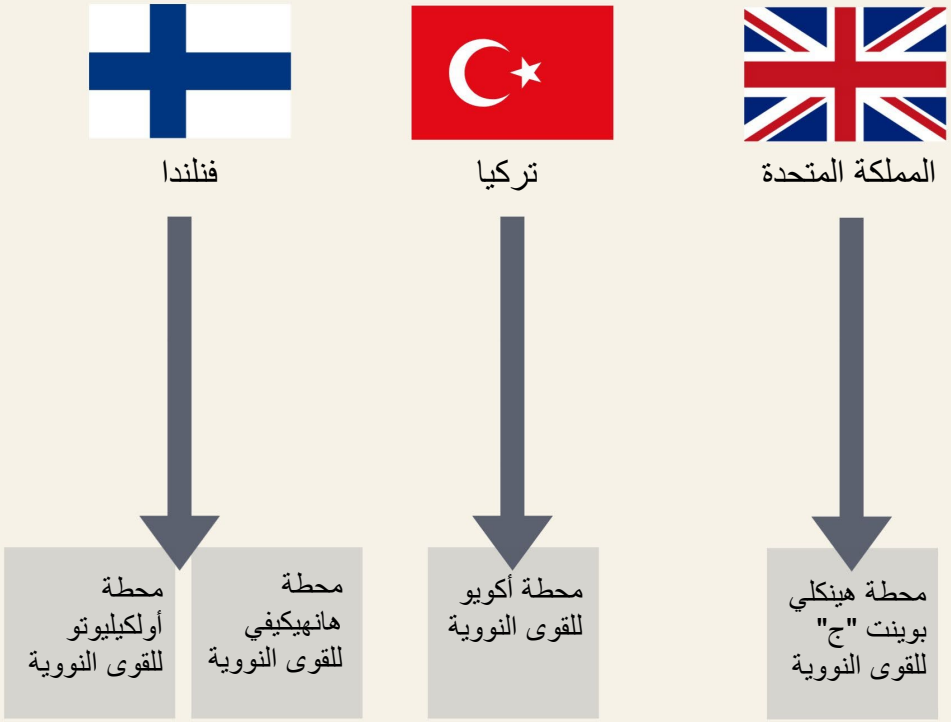
دال- العوامل المؤثِّرة في نشر القوى النووية في المستقبل

دال-١- تخصيص الأموال والتمويل

٢٣- ينطوي إنشاء محطة جديدة للقوى النووية على تكاليف رأسمالية ضخمة يمكن أن تمثِّل نحو ثلاثة أرباع التكلفة الإجمالية المعدَّلة للكهرباء النووية. وتُسدَّد هذه الالتزامات المرتبطة بسعر الفائدة على مدى فترة عمر المحطة، ويقابلها الدخل المتأتي من الكهرباء التي تنتجها المحطة. بيد أنَّ المشاريع التي تتَّسم بدرجة مرتفعة من كثافة رأس المال تكون حساسة للتغيُّرات في أسعار الفائدة ولطول فترة التشييد، وكذلك لطبيعة أوجه عدم التيقُّن التي ينطوي عليها المشروع. وقد وُضعت مجموعة متنوعة من نماذج التمويل الممكنة لمعالجة بعض أوجه عدم التيقُّن، وخصوصاً مخاطر السوق التي قد تواجهها الجهات القائمة على تطوير المشروع — والجهات المقدِّمة للتمويل — أثناء مرحلة التشغيل من دورات أعمار المحطات. ويمكن التخفيف من هذه المخاطر من خلال إرساء ترتيبات — يمكن أن تكون مدعومة من حكومة البلد المستضيف للمحطة — تكفل شراء القوى التي تنتجها المحطة، كليًّا أو جزئيًّا، بسعر مضمون. وقد كان للترتيبات من هذا القبيل دور محوري في تطوير مشاريع منها محطتا أولكيليوتو وهانهيكيفي للقوى النووية في فنلندا، ومحطة أكويو للقوى النووية في تركيا، ومحطة هينكلي بوينت "ج" للقوى النووية.

ترتيبات الأسعار المضمونة

لشراء كل القوى التي تنتجها محطة للقوى النووية أو جزء منها



٢٤- وهناك عدد من الأساليب الممكنة للتخفيف من المخاطر التي تواجهها محطات القوى النووية في المراحل الأسبق من دورة عمرها — أي المخاطر المتعلقة بالتأخُّر في التشييد وما يترتب عليه من تجاوز التكاليف المقرَّرة، ومن هذه الأساليب على سبيل المثال أن تقدِّم الحكومة المضيفة ضمانات سيادية مباشرة للجهات المقرضة، أو الاتفاق مع بائعي النظم النووية لتوليد البخار على أن يحصلوا على حصص في أسهم ملكية المشروع. وقد أُخذ بهذا الخيار الأخير في مشروع محطة براكة للطاقة النووية في الإمارات العربية المتحدة، حيث حصلت شركة كوريا للقوى الكهربائية على حصة قدرها ١٨٪ في أسهم ملكية شركة نواة للطاقة وشركة براكة الأولى؛ وفي مشروع محطة هانهيكيفي للقوى النووية في فنلندا، حيث حصلت الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" التابعة للاتحاد الروسي على حصة قدرها ٣٤٪؛ وفي مشروع محطة هينكلي بوينت "ج" في المملكة المتحدة، حيث حصلت مؤسسة الكهرباء الفرنسية والمجموعة الصينية العامة للقوى النووية على حصتي الثلثين والثلث في ملكية المشروع، على التوالي. ومؤخراً، شهدت مشاريع البنية الجديدة في بلدان مستهلة ومتوسعة مثل إيران وباكستان وبنغلاديش وبيلاروس ومصر وهنغاريا اختيار البلد البائع والحكومة المضيفة إبرام اتفاقات بين الحكومات تشتمل على تقديم قروض حكومية.

٢٥- وقد تكون للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم مزايا مقارنةً بالمفاعلات الكبيرة الحجم، ومن هذه المزايا قصر المدَّة اللازمة لتشييدها، وأنَّ تكلفتها الرأسمالية الأولية أقل، وأنَّها قابلة للاستخدام في الشبكات الكهربائية الصغيرة، وأنَّها تنطوي على إمكانية توسيعها بإضافة وحدات نمطية إليها لتلبية الطلب تدريجيًّا. ويمكن

أن تؤدي هذه المزايا إلى إعادة النظر في النماذج المالية المستخدمة حاليًّا فيما يخصُّ محطات القوى النووية الكبيرة الحجم. ويمكن للنجاح في إجراء التجارب الإيضاحية للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية في العقد المقبل أن يشجِّع المزيد من البلدان المستهلَّة على النظر في الأخذ بها. ويبدي المستثمرون من القطاع الخاص اهتماماً متزايداً بتطوير تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة وإيضاحها ونشرها.

٢٦- ويتعلق أحد الالتزامات المهمة الأخرى بالتكاليف التي تنشأ في نهاية العمر التشغيلي للمرفق، مثل التكاليف المرتبطة بإخراج المرفق من الخدمة والتصرف الطويل الأجل في النفايات القوية الإشعاع. وكما في حالة التكاليف التي تُدفع مقدَّماً، ينبغي توفير مخصَّصات من الدخل التشغيلي للتعامل مع تكاليف "المرحلة الختامية" من هذا النوع. ويمكن أن تشكِّل هذه التكاليف نسبة تصل إلى ١٠٪ من التكلفة الإجمالية المعدلة للكهرباء النووية. وعادةً ما تنصُّ التشريعات المنظمة لاستخدام الطاقة النووية على متطلبات بشأن تنحية مبالغ لتغطية تكاليف المرحلة الختامية خلال مرحلة كسب الإيرادات من العمر التشغيلي للمحطة. وهناك العديد من النُّهج المختلفة التي تُتَّبع في هذا الصدد، بدءاً من إلزام الجهات المالكة برصد مخصصات مناسبة في دفاتر الشركة، إلى الإلزام بتحويل الأموال ذات الصلة إلى منظمة مستقلة تتولى المسؤولية عن إدارة تلك الأموال والصرف منها في نهاية المطاف من أجل تغطية التزامات المرحلة النهائية.

دال-٢- أسواق الكهرباء والسياسات ذات الصلة

٢٧- تشمل التطورات الرئيسية التي شهدتها أسواق القوى العالمية منذ عام ٢٠١٧ تواصُل نشر كميات كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة ذات التكاليف المتناقصة (في حالة طاقة الرياح والخلايا الشمسية)، وانتقال الطلب على الكهرباء من البلدان الأعضاء في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي إلى البلدان غير الأعضاء في تلك المنظمة بسبب زيادة التحوُّل لاستخدام الكهرباء في العديد من القطاعات، وحدوث زيادة كبيرة في تسعير الكربون نتيجة للسياسات ذات الصلة، وإدخال تغيرات على مخططات تداول الانبعاثات. وإلى جانب وضع "التصنيفات" أو، بصفة أعمَّ، المعايير البيئية والاجتماعية والمتصلة بالحوكمة فيما يخصُّ الاستثمارات المستدامة، وزيادة التزام الدول الأعضاء بتحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول منتصف القرن، فقد أصبحت أصول الفحم بمثابة عبء ثقيل وصارت المؤسسات المالية تسعى لأن تنأى بنفسها عن الاستثمار في الحكم. وتواصل نمو توليد القوى النووية ليصل في عام ٢٠١٩ إلى ثاني أعلى مستوياته على الإطلاق. وفي عام ٢٠٢٠، أدَّت حالات الإغلاق بسبب جائحة كوفيد-١٩ إلى هزَّة في الأسواق؛ وعلى مدى عدَّة أشهر شهد الطلب تراجعاً كبيراً وشهد التوليد باستخدام الوقود الأحفوري تراجعاً أكبر لصالح التكنولوجيات ذات التكاليف الهامشية المنخفضة مثل مصادر الطاقة المتجددة والطاقة النووية. وقد عادت الانبعاثات الآن إلى سابق عهدها مع التعافي الاقتصادي. وبالإضافة إلى التركيز على التقليل من الانبعاثات الكربونية، يتعيَّن على واضعي السياسات أن يعالجوا الاحتياجات المتعلقة بتأمين الإمدادات ونوعية الهواء والقدرة على الصمود.

٢٨- وينبغي أن يكون لاتفاق باريس تأثير إيجابي في الأخذ بالقوى النووية إذا ما زاد الاعتراف بإمكانات القوى النووية باعتبارها مصدراً للطاقة المنخفضة الكربون. ويبيِّن كلٌّ من *"التقرير الخاص عن كبح الاحترار العالمي عند مستوى ١,٥ درجة مئوية"*، الصادر في عام ٢٠١٨ عن الهيئة المعنية بتغير المناخ، والمنشور المعنون *"الوصول بصافي الانبعاثات إلى الصفر بحلول عام ٢٠٥٠: خريطة طريق لقطاع الطاقة العالمي"*، الصادر مؤخراً عن الوكالة الدولية للطاقة، أنَّ معظم المسارات المُفضية إلى تحقيق صافي انبعاثات صفري تشمل القوى النووية، مع مضاعفة القدرة على توليد الكهرباء نوويًّا في العقود الثلاثة المقبلة. ورغم أنَّ المساهمات المحددة وطنيًّا المتوخَّاة في إطار اتفاق باريس قد حُدِّثت مؤخراً، فلا يبدو حتى الآن أنَّها تشير إلى

حدوث تحوُّل في الدعوة إلى مساهمة القوى النووية في الاستراتيجيات الوطنية بشأن التخفيف من حدة تغير المناخ. ومع ذلك تشكِّل قضية تغير المناخ حافزاً في بعض البلدان لدعم مواصلة تشغيل محطات القوى النووية أو جزءاً من الأساس المنطقي لبرامج البنية الجديدة. ومن بين الإمكانات الواضحة التي تنطوي عليها القوى النووية قدرتها على الإسهام في إزالة الكربون من القطاعات "الصعبة الخفض" – أي التي لا يمكن تحويلها إلى استخدام الكهرباء بسهولة. ومن الممكن أن يصبح إنتاج الحرارة المنخفضة الكربون أو الهيدروجين المنخفض الكربون من الأسطول الحالي ومن المفاعلات المتقدمة عنصراً أساسيًّا في نجاح البلدان في تحقيق أهدافها بشأن صافي الانبعاثات الصفري، شريطة أن تصبح التكنولوجيا اللازمة لذلك مجدية من الناحية التجارية خلال العقد المقبل أو نحو ذلك. وفي الوقت الراهن، يظلُّ من المهم إلى أقصى درجة تعزيز الدور الذي تؤديه القوى النووية في إنتاج الكهرباء المنخفضة الكربون، وكذلك الحرارة إلى حد ما، من خلال التشغيل الطويل الأجل للأسطول القائم وإنشاء المحطات النووية الجديدة.

٢٩- وتشير توقعات الوكالة حتى عام ٢٠٥٠ إلى أنَّ تحقيق أهداف اتفاق باريس سيتطلب على الأقل مضاعفة مستويات القدرة الحالية على توليد القوى النووية بحلول عام ٢٠٥٠، وهو ما يتفق مع توقعات الوكالة الدولية للطاقة. وسوف يكون للأخذ بسياسات مؤاتية في مجال الطاقة وتوفير الحوافز في سوق الكهرباء من أجل تشجيع الأخذ بجميع أنواع الحلول المنخفضة الكربون، بما في ذلك القوى النووية، دورٌ جوهري في تحفيز الاستثمارات في القوى النووية، كما سيؤدي ذلك إلى الحد من المخاطر وخفض تكلفة التمويل. ويُعدُّ هذا ضروريًّا لضمان نشر القوى النووية في الوقت المناسب للإسهام في التخفيف من حدة تغير المناخ. وبموازاة ذلك، من الضروري الاعتراف بما توفِّره القوى النووية من حيث تأمين الإمدادات والموثوقية والقدرة على التنبُّؤ، وكذلك بمساهمتها في تعزيز قدرة البنى الأساسية للطاقة على الصمود في مواجهة تغير المناخ. ويكتسي ذلك أهمية خاصة بالنظر إلى بيئة الكهرباء التي باتت تعتمد على كميات متزايدة من تكنولوجيات الطاقة المتجددة المتغيرة، مثل طاقة الرياح والخلايا الشمسية. ومن أمثلة السياسات المتَّبعة مؤخراً التي تؤكِّد أهمية دور أسواق الكهرباء في تطوير القوى النووية: دراسة الأخذ بآلية عقود تعويض الفرق بين السعرين أو آلية قاعدة الأصول الخاضعة للرقابة في المشاريع النووية الجديدة لتأمين العائدات الاستثمارية في المملكة المتحدة، أو التشريعات التي سُنَّت لتوفير أنواع مختلفة من الدعم في عدَّة ولايات في الولايات المتحدة الأمريكية (نيويورك وإيلينوي وكونيتيكت ونيوجيرسي وأوهايو) تقديراً لتوليد الكهرباء المنخفضة الكربون نوويًّا ولدعم محطات القوى النووية القائمة.

دال-٣- القدرة على الصمود

٣٠- في شباط/فبراير ٢٠٢١، صاحبت العاصفة الشتوية في أمريكا الشمالية حالات انقطاع للكهرباء بسبب توليفة من العوامل، مما أبرز أهمية وجود نظم طاقة تتَّسم بالقدرة على الصمود. ومن المتوقع أنَّ الاحترار العالمي سوف يتسبب في زيادة وتيرة وقوع الظواهر الجوية المتطرفة وتعاظم شدتها. ويمكن أن تتراوح هذه الظواهر من العواصف الشتوية إلى الفيضانات أو موجات الحرارة الشديدة ونوبات الجفاف، ويمكن أن تؤثِّر في الأصول المستخدمة في التوليد وكذلك في البنية الأساسية للشبكات الكهربائية. وفي حين أفاد القطاع النووي[٢] بعدد متزايد من حالات الانقطاع المتصلة بالأحوال الجوية على مدى العقود الماضية، فإنَّ هذه الانقطاعات لم تسفر إلا عن فقدان قدرٍ محدود من القدرة على التوليد نظراً لأنَّ محطات القوى النووية مصمَّمة للعمل بأمان وكفاءة في الظروف الجوية المتطرفة.

---

[٢] نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة الدولية للطاقة الذرية.

٣١- وقد وُضعت تدابير محدَّدة للتكيُّف موضع التنفيذ في عدَّة محطات تُعتبر الأكثر عرضة لاحتمالات الفيضانات أو فقدان كفاءة التبريد نتيجة لموجات الحرارة ونوبات الجفاف. ومع ذلك، وفي حين لا ينقطع تخصيص الاستثمارات لضمان أعلى مستويات الأمان، فإنَّ تنفيذ تدابير للتكيُّف لا تستهدف سوى تحسين أداء المحطة في الأحداث المناخية أو عدم تنفيذ تدابير من هذا القبيل هو أمرٌ يتوقف على العائدات الاستثمارية المتوقعة. ويتعيَّن على هيئات المرافق العامة أن تتَّخذ هذا القرار الاقتصادي عن طريق تقدير تكلفة التكيُّف والعائد المتوقع بناءً على الفترة المتبقية من عمر المحطة والأرباح التي ستتأتى من تحسين الأداء/التوليد في المحطة. وللسعر الذي يمكن أن تُباع به القوى في أسواق الكهرباء دورٌ رئيسي في هذا الصدد – وقد أوجدت الأسعار المنخفضة لبيع الكهرباء بالجملة والتي سادت في العقد الأخير في أسواق أوروبا وأمريكا الشمالية ظرفاً غير مؤاتٍ للاستثمارات في التكيُّف على النحو المذكور. وفيما يخصُّ مشاريع البناء الجديد، تؤخذ في الحسبان أيضاً عند تنفيذ أنشطة تحديد المواقع وتحديد حجم المعدات المخاطر المحتملة للأحداث المناخية التي يمكن أن تقع خلال القرن.

٣٢- وخلال فترات الإغلاق بسبب جائحة كوفيد-١٩، ركَّزت الإجراءات التي اتَّخذتها الدول الأعضاء على ضمان سلامة الموظفين ورفاههم من خلال العمل الفوري من أجل التقليل إلى أدنى حد من خطر انتشار الجائحة، مع الحفاظ على استمرارية الأعمال وعلى مستويات كافية من الأمان والأمن والاستدامة في محطات القوى. ولم تُفِد أي دولة عضو بالاضطرار إلى إغلاق أي مفاعل من مفاعلات القوى النووية بسبب الآثار ترتبت على جائحة كوفيد-١٩ فيما يتعلق بالقوى العاملة فيه أو الخدمات الضرورية لتشغيله مثل سلاسل الإمداد. وقد طبَّقت الهيئات الرقابية على وجه العموم نهجاً متدرّجاً خلال الجائحة، وعدَّلت نطاق عمليات التفتيش الرقابي أو غير الرقابي بناءً على أهميتها من حيث الأمان. وقد تلقت الوكالة تقارير عن تأثيرات انقطاع تشغيل محطات القوى النووية في ٢٦ دولة من بين ٣٢ دولة عضواً لديها محطات قوى نووية عاملة. وفي بعض الحالات، أمكن تقليص نطاق الانقطاعات عن طريق إلغاء الأعمال غير الأساسية للتقليل إلى أدنى حد من عدد الموظفين الخارجيين الذين يحضرون إلى الموقع. وفي حالات أخرى، جرى تمديد فترات الانقطاع لكي يتسنى تنفيذ العمل بوتيرة أبطأ لمراعاة قيود التباعد الجسدي. وشهدت حالات أخرى تأجيل انقطاعات بأكملها إلى العام التالي. وسيتكشَّف تأثير الجائحة الكامل على مدى العام القادم على الأقل مع تعديل خطط الانقطاعات المقبلة لاستكمال الأعمال المؤجَّلة.

دال- ٤- المفاعلات المتقدمة والتطبيقات غير الكهربائية

٣٣- تحقَّقت خطوات ملموسة في تطوير تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة، شملت جميع الخطوط التكنولوجية الرئيسية ونطاقات القدرة وفئات الاستخدام وأنواع النشر. وتشمل أهم العوامل التي تدفع قدماً بتطوير تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة أنَّ هذه المفاعلات تتطلَّب مستوى أقل من الاستثمار الرأسمالي وفترات تشييد أقصر، كما تتَّسم بالمرونة من حيث مواقعها وبإمكانية تطبيقها في طائفة واسعة من الاستخدامات، بما في ذلك الاستعاضة بها عن محطات القوى العاملة بالوقود الأحفوري بعد إخراجها من الخدمة، بالإضافة إلى قدرتها على العمل في إطار نظام طاقة واحد بالتكامل مع مصادر الطاقة المتجددة والتطبيقات غير الكهربائية، مثل إنتاج الحرارة المنخفضة الكربون والهيدروجين المنخفض الكربون.

٣٤- وقد نُشر أول مفاعل نمطي صغير في وحدة بحرية عائمة لتوليد الكهرباء في الاتحاد الروسي، ويجري تشغيله تجاريًّا منذ أيار/مايو ٢٠٢٠ بقدرة تبلغ ٧٠ ميغاواط (كهربائي). وفيما يتعلق بالمفاعلات النمطية الصغيرة البرية، يجري الآن استكمال الاختبارات الوظيفية الساخنة لأول مفاعل نمطي مرتفع الحرارة مبرد بالغاز، بهدف توصيله بالشبكة الكهربائية مع اقتراب نهاية عام ٢٠٢١ في الصين. ومن الأمثلة الأخرى المفاعل

النمطي الصغير من نوع مفاعلات الماء المضغوط المتكاملة الذي وصلت أعمال تشييده إلى مرحلة متقدمة (٧٥٪) في الأرجنتين، والذي يُستهدف بدء تشغيله وإيصاله لحالة الحرجية في عام ٢٠٢٤ بقدرة متوقعة تبلغ ٣٠ ميغاواط (كهربائي).

٣٥- ومن المتوقع أنَّ المفاعلات النمطية الصغيرة سوف تكتسب القدرة على المنافسة التكنولوجية من خلال الوصول بتشييدها إلى درجة عالية من النمطية للتقليل من التكاليف وتقصير فترات التشييد، مع التركيز على نهج اقتصادي قائم على "الإنتاج التسلسلي" بدلاً من نهج "وفورات الحجم" المتَّبع في حالة المفاعلات الكبيرة. ويوجد حاليًّا ٧٢ تصميماً لمفاعلات نمطية صغيرة بمستويات متنوعة من الجاهزية التكنولوجية[٣]، منها ٢٥ تصميماً من المخطَّط لإيضاحها بحلول عام ٢٠٣٠. وفي حال تهيئة بيئة مؤاتية تماماً للنشر على الصعيد العالمي، بما في ذلك دورة الوقود النووي، فمن الممكن أن تسهم المفاعلات النمطية الصغيرة بنحو ١,٦ غيغاواط (كهربائي) إضافية من القدرة. بيد أنَّه لا يزال يتعيَّن على المفاعلات النمطية الصغيرة أن تتغلب على المشاكل التي تواجه النشر وأن تصل إلى مستوى التنافسية التجارية، وهو أمر يتطلب استيفاء عدَّة شروط، وهي: إيضاح الأمان والأداء التشغيلي للمفاعلات الأولى من نوعها المنطوية على تصاميم وتكنولوجيات جديدة، واستمرارية الطلبات، والتنافسية التجارية في مواجهة البدائل، وإرساء سلسلة إمداد راسخة، وتوافر دورات الوقود الملائمة لأحجام المفاعلات، ووجود مخططات تمويل فعالة؛ ويجب أن توضع الأطر الرقابية (مسارات الترخيص) اللازمة من خلال المواءمة. وينبغي وضع البنية الأساسية النووية الملائمة من أجل إرساء الحوكمة المسؤولة فيما يتعلق بهذه العملية المتوقعة للنشر المتسلسل على نطاق أوسع في الأسواق الجديدة.

يوجد حالياً

٧٢ تصميماً لمفاعلات نمطية صغيرة بمستويات متنوعة من الجاهزية التكنولوجية،

منها

٢٥ تصميماً لمفاعلات نمطية صغيرة مخطط لنشرها بحلول عام ٢٠٣٠

٣٦- وتشمل التكنولوجيات الناشئة أيضاً المفاعلات المتناهية الصغر التي يتراوح نطاق قدرتها بين ١ ميغاواط (كهربائي) و٢٠ ميغاواط (كهربائي)، والتي يمكن أن توفِّر الكهرباء للمناطق الصناعية النائية أو غير الموصَّلة بالشبكة الكهربائية، وأن تكفل القدرة على الصمود لنظم القوى، وأن تكون بديلاً للديزل، وأن تُنشر في الأسواق التي ليست ملائمة حتى للمفاعلات النمطية الصغيرة "العادية".

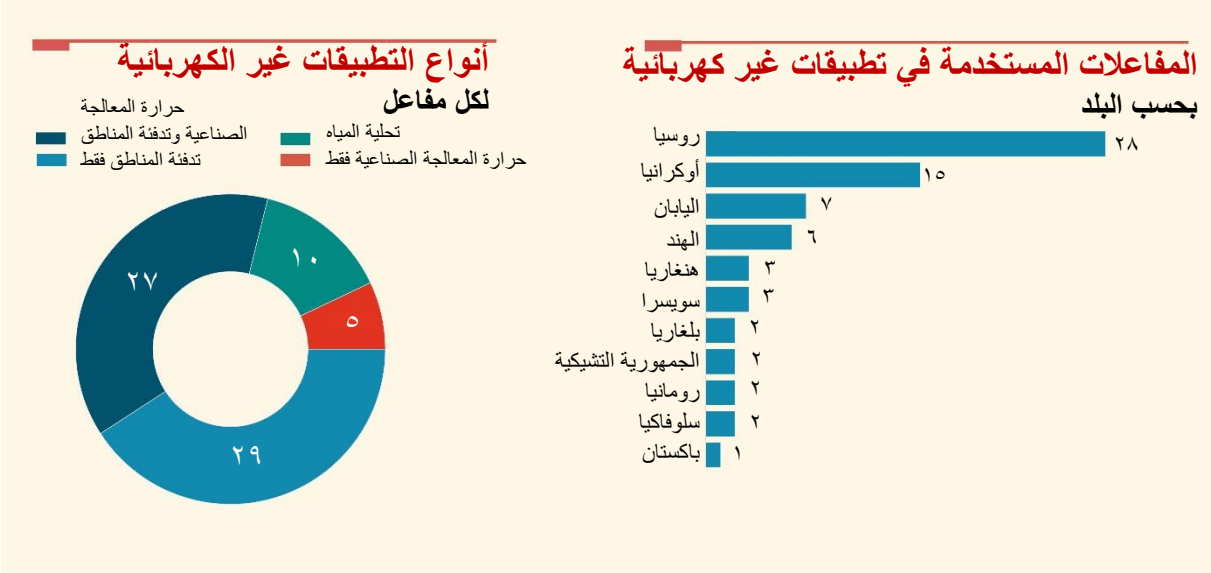
٣٧- وهناك خمسة مفاعلات سريعة قيد التشغيل بالفعل، منها: مفاعلان عاملان (BN-600 وBN-800) ومفاعل تجريبي (BOR-60) في روسيا، والمفاعل التجريبي السريع التوليد في الهند، والمفاعل التجريبي السريع في الصين. وفي الاتحاد الروسي، بدأت في حزيران/يونيه ٢٠٢١ أعمال تشييد المفاعل السريع

[٣] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).
("أوجه التقدُّم المحرز في تطوير تكنولوجيات المفاعلات النمطية الصغيرة: جزء تكميلي للإصدار الذي نشرته الوكالة بشأن نظام المعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدمة").

BREST-OD-300، الذي سيكون أول مفاعل للطاقة النووية المدنية يُبرَّد بالرصاص. فنظراً لأنَّ الرصاص لا يتفاعل مع الهواء والماء، يمكن تبسيط تصميم المفاعل بحيث يكون أكثر اقتصادية مقارنة بسائر المفاعلات السريعة. والمفاعل الذي تبلغ قدرته ٣٠٠ ميغاواط هو جزء من مشروع Proryv ("بروريف")، الذي يهدف إلى إيضاح التشغيل المستقر في موقع واحد للمنشآت اللازمة لدورة وقود نووي مغلقة بالكامل. وإذا ما تكلَّل هذا الجهد بالنجاح، فسوف يشكِّل خطوة مهمة في المساعي الرامية إلى مواصلة تطوير الطاقة النووية، بتوفير قدر أكبر من الاستدامة عن طريق إعادة تدوير الوقود وتقليل الأثر من حيث النفايات. وهناك أيضاً بلدان أخرى تحرز تقدُّماً في هذا المجال. فعلى سبيل المثال، تعكف الصين على تشييد مفاعلين سريعين إيضاحيين وتعتزم نشر مفاعلات سريعة تجارية في نهاية المطاف. وتعكف الهند على الانتهاء من إدخال مفاعلها النموذجي السريع التوليد المبرَّد بالصوديوم في الخدمة، وهو الأول من بين عدَّة مفاعلات سريعة صناعية يخطط لها ذلك البلد. وأعلنت شركة TerraPower عن تشييد أول مفاعلاتها النووية من الجيل المقبل، وهو المفاعل ناتريوم، في الموقع الذي كانت تحتله إحدى المحطات العاملة بالفحم التي أُخرجت من الخدمة في ولاية وايومنغ. وتُجري اليابان دراسات جدوى ضمن برنامجها لتعزيز الابتكار في مجال الطاقة النووية (برنامج NEXIP) في إطار المرحلة الأولى من خريطة الطريق الاستراتيجية لتطوير المفاعلات السريعة.

٣٨- وتتواصل الابتكارات في تكنولوجيا المفاعلات المبرَّدة بالماء في أعقاب حادث فوكوشيما، وذلك فيما يتعلق بمجالات الأمان وتكنولوجيا التشييد والجوانب الاقتصادية. وتشتمل نظم الأمان المدمجة في تصاميم المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء الموجودة اليوم على سمات سلبية لا تعتمد على الطاقة الكهربائية وتحتوي على مخزونات أكبر من المياه، مما يتيح إطالة فترات التحمُّل إلى عدَّة أيام بدلاً من عدَّة ساعات في حال وقوع ظروف غير مخطط لها، من قبيل انقطاع التيار الكهربائي في المحطة لفترة ممتدة. ومن المزايا الأخرى للمفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء أنَّها تُنتج كميات أقل من النفايات، وتستخدم الوقود بكفاءة أعلى، وتتسم بقدر أكبر من الموثوقية ومقاومة الانتشار وإمكانية الإدماج في التطبيقات الكهربائية وغير الكهربائية. ويجري في عدد من الدول الأعضاء تطوير مفاهيم لمفاعلات فوق حرجية مبردة بالماء تحسِّن الكفاءة الحرارية والجوانب الاقتصادية، بوصفها امتداداً منطقيًّا لتصاميم مفاعلات الماء المضغوط والماء المغلي المتقدمة، مما يسلِّط الضوء على مزايا هذا التصميم فيما يتعلق بالجوانب الاقتصادية والأمان والتكنولوجيا.

٣٩- وأدَّت الحاجة إلى إزالة الكربون من قطاع الحرارة والقوى إلى زيادة الاهتمام باستخدام الطاقة النووية لا في توليد الكهرباء فحسب وإنما أيضاً في تطبيقات أخرى غير كهربائية تتطلَّب استخدام الطاقة بكثافة، مثل تحلية مياه البحر وتدفئة الأحياء الساكنة والحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية وتركيب الوقود الاصطناعي (بما في ذلك إنتاج الهيدروجين). وهناك إمكانية كبيرة للاستفادة من الحرارة النووية التي تنتجها المفاعلات التقليدية، والتي يُلفظ ما بين ٦٠-٧٠٪ منها إلى البيئة في شكل حرارة مبدَّدة. ويمكن إعادة استخدام هذه الحرارة المبدَّدة بطريقة التوليد المشترك، أي إنتاج القوى الكهربائية والحرارة أو منتجات مستمدة من الحرارة في الوقت نفسه. وعلى سبيل المثال، ففي نهاية عام ٢٠٢٠ بدأت محطة هاييانغ للقوى النووية بمقاطعة شاندونغ بالصين في توفير التدفئة للمنطقة المجاورة لها، ويُتوقَّع أن يؤدي ذلك إلى تلافي استخدام ٢٠٠ ٢٣ طن من الفحم سنويًّا، ممَّا يعني خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما مقداره ٠٠٠ ٦٠ طن.



٤٠- ويتزايد الاهتمام بإنتاج الهيدروجين من الطاقة النووية في العديد من البلدان، بما يشمل الاتحاد الروسي وبولندا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. وسوف يتوقف تنفيذ إنتاج الهيدروجين نوويًّا في الواقع العملي على ظروف السوق من حيث الأسعار والمنافسين والطلب الإجمالي والتوزُّع الجغرافي للاستهلاك. وفي سياق التدابير السياساتية المتصلة بالمناخ، سوف تنشأ فرصة كبيرة لإنتاج الهيدروجين نوويًّا إذا ما اتُّخذت إجراءات فعالة (من خلال الضرائب) لثني المنتجين عن استخدام عملية إعادة تشكيل الميثان بالبخار.

٤١- والطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة هما الخياران الرئيسيان لتوليد القوى المنخفضة الكربون. وتستفيد نظم الطاقة المختلطة التي تجمع بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة (نظم الطاقة الهجينة) من المزايا التي يكفلها كلٌّ من الخيارين وطريقة تشغيلهما لتوفير الكهرباء على نحو موثوق ومستدام وميسور التكلفة للشبكة الكهربائية، والطاقة المنخفضة الكربون للقطاعات الأخرى. وباستخدام هذه الصيغة المتكاملة التي تجمع بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة، يمكن إنتاج الحرارة والكهرباء وغيرهما من منتجات الطاقة أو الخدمات المتعلقة بها، وتخزينها حسب الاقتضاء. وبالإضافة إلى توليد الكهرباء، يمكن لنظم الطاقة الهجينة أن توفِّر الطاقة اللازمة لمجموعة متعددة من التطبيقات، مثل إنتاج الهيدروجين أو المواد الهيدروكربونية، وتدفئة الأحياء السكنية أو تبريدها، واستخراج موارد النفط في المرحلة الثالثة (الاستخراج المعزَّز)، وتحلية مياه البحر أو المياه المالحة، وتطبيقات الحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية، بما يشمل التوليد المشترك، وإنتاج الفحم السائل والتكرير، وتركيب مواد التلقيم الكيميائية. بيد أنَّه حتى يمكن إنشاء نظام طاقة هجين يعمل على أكمل وجه ويربط بإحكام بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة، يتعيَّن التصدي لعدد من الثغرات القائمة وسدُّها، بما في ذلك تحقيق المستوى المطلوب من الأمان في نظام الطاقة الهجين بما يماثل على الأقل مستوى الأمان الحالي في محطات القوى النووية القائمة بذاتها؛ وتنمية رأس المال البشري اللازم لتشغيل هذه النظم وصيانتها؛ والتفاعل بين نظام الطاقة الهجين وسوق الكهرباء والتنظيم الرقابي للشبكة الكهربائية؛ ومستوى الجاهزية التكنولوجية لنظام الطاقة الهجين، والذي يتوقف إلى حد كبير على مستوى الجاهزية التكنولوجية لكلِّ نظام فرعي ولمخططات الربط والتشغيل.

٤٢- وعلى مدى السنوات السابقة، شهدت تكنولوجيا الاندماج خطوات تقدُّم كبرى أدَّت إلى زيادة مستوى مشاركة القطاع الخاص وإيجاد فرص عمل جديدة. ويمضي العمل بوتيرة مطردة في مفاعل إيتير الذي يمثِّل

خطوة حاسمة الأهمية على الطريق إلى تحقيق هدف تسخير طاقة الاندماج. وسوف تُقطع أشواط كبيرة في السنوات الخمس المقبلة وحتى عام ٢٠٣٥ الذي يُتوقع أن يشهد تحقيق مفاعل إيتير لهدفه النهائي: إيضاح إمكانية توليد طاقة الاندماج. وفيما عدا التحديات المتعلقة بفيزياء البلازما، تتعلق التحديات الرئيسية التي تواجهها مفاعلات الاندماج بمجالي تطوير المواد التي ستُستخدم في هياكل مصدر الحرارة (المواد المواجهة للبلازما) وتصميم نظم التبريد للكفاءات العالية. وربما لا يكون الاندماج المصدر الذي سيمدنا بالطاقة في الغد القريب، لكنه قد يكون حلًّا يؤتي ثماره في نهاية القرن. ومن شأن نقل الخبرات التي تراكمت على مدى ٧٠ عاماً من استخدام طاقة الانشطار في الأغراض السلمية إلى تكنولوجيا الاندماج المقبلة أن يكفل التآزر بين مصدرين للطاقة النووية يمكن أن يوفِّرا الطاقة المستدامة للأجيال التالية.

دال-٥- استدامة الوقود ودورات الوقود الابتكارية

٤٣- بحلول عام ٢٠٤٠، يُتوقع أن تتراوح الاحتياجات العالمية السنوية من اليورانيوم بين ٦٤٠ ٥٦ و٢٢٥ ١٠٠ طن من اليورانيوم، بحسب عدد محطات القوى النووية الجديدة التي ستُشيَّد وحالات تمديد أعمار المحطات القائمة. وهكذا فوفقاً لتوقعات الوكالة في سيناريو الحالة المنخفضة، يتعيَّن أن يبقى المستوى السنوي لإمدادات اليورانيوم العالمية كما كان في عام ٢٠١٩. أمَّا في سيناريو الحالة المرتفعة، فيلزم أن يزيد الإنتاج السنوي من اليورانيوم بنحو ٠٠٠ ٤١ طن. وتتطلب هذه الزيادة قدراً كبيراً من أنشطة التنقيب والابتكارات، كما تتطلب استحداث مناجم يورانيوم جديدة.

بحلول عام ٢٠٤٠، يُتوقع أن تتراوح **الاحتياجات العالمية السنوية من اليورانيوم** بين

٦٤٠ ٥٦ – ٢٢٥ ١٠٠ طنًّا

بحسب عدد محطات القوى النووية الجديدة التي ستُشيَّد وتمديد أعمار المحطات القائمة.

٤٤- ومنذ عام ٢٠٠٩، كان الإنتاج الأولي من مناجم اليورانيوم العاملة يعادل في المتوسط ٨٧٪ من الطلب العالمي. وكان الفارق بين الطلب والإنتاج يُعوَّض من الإمدادات الثانوية الآخذة في النضوب ببطء منذ عام ٢٠١٠. ومن المتوقع أنَّ موارد اليورانيوم في العديد من المناجم الرئيسية سوف تُستنفد بحلول أواسط عقد الثلاثينات من هذا القرن. وقد تكون الفجوة بين الطلب والعرض أكبر من أن تكفي لسدِّها العمليات الجارية للعناية بالمناجم وصيانتها، وزيادة الإنتاج في المرافق القائمة، والانتهاء من تطوير المشاريع التي وصلت إلى مراحل متقدمة. وبالنظر إلى أنَّ الفترة التي يستغرقها تشييد منجم جديد وإدخاله في الخدمة تبلغ في المتوسط ١٥-٢٠ عاماً، فهناك حالة من القلق في أوساط الصناعة بشأن أمن الإمدادات في الأمد المتوسط إلى البعيد. ويمكن للأحداث الاستثنائية، مثل جائحة كوفيد-١٩، أن تتسبَّب في زيادة الضغط على الإمدادات: ففي عام ٢٠٢٠، على سبيل المثال، علَّق عدد من كبار منتجي اليورانيوم عملياتهم أو خفَّضوا مستوى الإنتاج بدرجة كبيرة. ونتيجة لذلك، تراجعت إمدادات اليورانيوم الأولية من المناجم العاملة ليصل الإنتاج العالمي إلى نحو ٥٠٠ ٤٦ من اليورانيوم. ويمثِّل ذلك نحو ٧٨٪ من الطلب العالمي على اليورانيوم في وقتها، مما زاد من الضغط على إمدادات اليورانيوم الثانوية من أجل تلبية الطلب على اليورانيوم لاستخدامه كوقود نووي.

٤٥- ولا يزال التحسين المستمر للتكنولوجيا، بما يشمل المواد وأنواع الوقود النووي المتقدِّمة، يحظى بأهمية محورية في نجاح الصناعة النووية. وأهم الدوافع التي تحرّك مجال هندسة الوقود النووي هي زيادة هوامش الأمان التشغيلي للوقود، وخفض تكاليف التشغيل والصيانة في محطات القوى النووية، والتقليل إلى أدنى حد من إنتاج النفايات النووية، عن طريق تطوير أنواع جديدة من الوقود لتُستعمل في الأجيال الحالية والمقبلة من محطات القوى النووية، وكذلك عن طريق إعادة تدوير المواد النووية.

٤٦- ويجري العمل على تطوير أنواع وقود قائمة على تكنولوجيا متقدمة في إطار تكنولوجيات نظم الوقود البديلة من أجل مواصلة تعزيز الأمان والتنافسية والجوانب الاقتصادية في محطات القوى النووية التجارية لأغراض تصاميم المفاعلات الحالية والمقبلة. ولأنَّ أنواع الوقود القائمة على تكنولوجيا متقدمة التي يجري تطويرها في أوروبا والاتحاد الروسي والولايات المتحدة الأمريكية تُصنع من مواد جديدة، سواء فيما يتعلق بالوقود أو بالكسوة، فإنَّها تتطلب في بعض الأحيان مستويات مرتفعة من إثراء اليورانيوم-٢٣٥ لتعويض التراجع في الشفافية النيوترونية لمادة الكسوة المستخدمة في تلك الأنواع من الوقود. ولذلك فإنَّ هناك أنواع وقود قائمة على اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز، أي اليورانيوم المثرى بنسبة أكبر من ٥٪ ولكن أقل من ٢٠٪، قيد الإنتاج والتطوير والاختبار. ولزيادة أوجه الاستفادة الاقتصادية، يجري العمل أيضاً على زيادة معدلات الحرق التي يتمُّ عندها تفريغ الوقود وتمديد دورات تشغيل الوقود في محطات القوى النووية، وهو ما يتطلب أيضاً زيادة مستويات الإثراء باليورانيوم-٢٣٥. بيد أنَّ مفاهيم الوقود الجديدة المتسمة بمعدلات حرق أعلى سوف يكون لها تأثير في بعض جوانب المرحلة الختامية من دورة الوقود، مثل نقل الوقود وعمليات التصرف في الوقود المستهلك (من الخزن إلى التخلص مروراً بإعادة المعالجة). وهناك حاجة إلى استثمارات كبيرة لتشييد وترخيص مرافق المفاعلات الأولى من نوعها اللازمة لنشر أنواع الوقود المتقدمة.

٤٧- وبالنظر إلى تعدد أنواع المفاعلات النمطية الصغيرة (حيث تشمل على سبيل المثال مفاعلات الماء الخفيف والمفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز والمفاعلات السريعة ومفاعلات الأملاح المصهورة)، يجري العمل على تطوير أنواع وقود تقليدية واستحداث أنواع جديدة لهذه المفاعلات تختلف، على سبيل المثال، من حيث التصميم والأنساق الهندسة ومستويات الإثراء. وفيما يتعلق ببعض أنواع المفاعلات النمطية الصغيرة، يستند تصميم أنواع الوقود وصُنعها إلى تكنولوجيات معروفة، بيد أنَّ هذه الأنواع قد تتطلَّب الإثراء بتركيزات مرتفعة مما يُعرف باليورانيوم الضعيف الإثراء (أنواع الوقود القائمة على اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز، أي المحتوية على اليورانيوم-٢٣٥ المثرى بنسبة أعلى من ٥٪ وأقل من ٢٠٪).

٤٨- ويُعتبر إغلاق دورة الوقود النووي من الدوافع الرئيسية لكفالة استدامة القوى النووية. ويمكن استخلاص المادة الانشطارية من الوقود النووي المستهلك لإنتاج وقود جديد. وتُعتبر إعادة معالجة أنواع الوقود القائمة على أكسيد اليورانيوم وإعادة تدوير اليورانيوم والبلوتونيوم ممارسة صناعية متبعة اليوم في مفاعلات الماء الخفيف، رغم قلة عدد مفاعلات الماء الخفيف المرخَّص لها حاليًّا باستخدام الوقود المعاد تدويره. وثمَّ تقدُّم يتحقَّق في مجال إعادة تدوير البلوتونيوم لعدَّة مرات في أنواع الوقود REMIX وCORAIL وMIX. وسوف تمكِّن أنواع الوقود المعاد تدويرها من الانتقال إلى استراتيجيات قائمة على إعادة تدوير البلوتونيوم لعدَّة مرات في المفاعلات السريعة، ومن ثمَّ زيادة الفعالية في استخدام الموارد الطبيعية والتقليل من عبء النفايات الناتجة. وسيلزم تخصيص استثمارات كبيرة لدعم تنفيذ تكنولوجيات إعادة التدوير لعدة مرات على النطاق الصناعي.

دال-٦- التخلص من النفايات المشعة

٤٩- تُعدُّ القدرة على توفير الحلول اللازمة لجميع الخطوات التي تنطوي عليها عملية التصرف في النفايات المشعة، بما فيها التخلص من هذه النفايات، ركيزة أساسية وعامل تمكين رئيسي في الاستمرار في استخدام التكنولوجيات النووية على نحو مستدام. وبالاستناد إلى الخبرات والتطورات التي تراكمت على مدى عقود في جميع أنحاء العالم، تعمل البرامج الوطنية على الاستفادة من التكنولوجيات المجرَّبة المثبتة من أجل تنفيذ حلول فعالة ومأمونة وآمنة، ومقاوِمة للانتشار في الحالات المنطوية على مواد نووية، في جميع خطوات التصرف في النفايات المشعة. وتفضي جميع هذه الخطوات إلى التخلص من النفايات المشعة، الذي أُنشئت له مرافق عديدة يجري تشغيلها في مختلف أنحاء العالم فيما يتعلق بالنفايات ذات مستويات الإشعاع الضعيفة جداً والضعيفة والمتوسطة.

٥٠- وفيما يتعلق بالنفايات القوية الإشعاع، والتي تشمل الوقود المستهلك إذا أُعلن عنه باعتباره من النفايات، فقد تكوَّنت على الصعيد الدولي مجموعة من المعارف المتعمِّقة عنها من خلال برامج متعدِّدة للتخلص الجيولوجي العميق. وكما يتبيَّن من بعض برامج المستودعات الجيولوجية العميقة الرائدة على الصعيد العالمي، فقد شهد العقد الماضي تحقيق تقدُّم كبير في عدَّة برامج وطنية صوب التخلص من النفايات القوية الإشعاع – وهو معلم بارز قال عنه المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية السيد غروسي إنَّه "يغيّر قواعد اللعبة"، في إشارة لسياق فنلندا بالتحديد. وقد شارفت البرامج الوطنية الأكثر تقدُّماً على إصدار توصية رسمية بتحديد موقع التخلص (كندا وسويسرا)، أو هي بصدد إعداد نُهُج التشييد والتشغيل الصناعي لمرفق التخلُّص الجيولوجي العميق الخاص بها (فرنسا والسويد)، أو تعكف على إعداد طلب الترخيص لوضع الوقود المستهلك في مرفق قيد التشييد (فنلندا). وهناك مجموعة واسعة من هذه البرامج الوطنية تعمل حاليًّا على الاستفادة من إطار عملٍ مشترك للبحث والتطوير والإيضاح العملي - وهو المنصة التكنولوجية لتنفيذ التخلص الجيولوجي من النفايات المشعة - من أجل مواصلة إحراز تقدُّم صوب تحقيق الأداء الأمثل في عملية التخلص الجيولوجي العميق من النفايات القوية الإشعاع والتوسُّع فيها وصولاً إلى النطاق الصناعي.

حالة برامج التخلّص الجيولوجي

فنلندا

إعداد طلب الترخيص لوضع الوقود المستهلك في مرفق قيد التشييد

فرنسا

السويد

إعداد نُهُج التشييد والتشغيل الصناعي لمرفق للتخلُّص الجيولوجي العميق

كندا

سويسرا

برامج وطنية متقدمة شارفت على إصدار توصية رسمية بتحديد موقع للتخلُّص

٥١- وبغية مواصلة التمكين من التصرف بفعالية وفي الوقت المناسب في النفايات المشعة التي ستنشأ في المستقبل، تعمل الدول الأعضاء على تحسين تقديراتها لجميع دوافق النفايات التي تنجم على الصعيد الوطني من جميع تطبيقات التكنولوجيا النووية ووضع نُهُج متكاملة بشأن المسؤوليات الوطنية في مجال التصرف في النفايات المشعة. وينطوي النهج المتكامل على آمال كبيرة بشأن التقليل من التكاليف المرتبطة بالمسؤوليات المتعلقة بالتصرف في النفايات المشعة – بما يتفق تماماً مع نهج "بقاء التعرض للإشعاعات عند أدنى حد معقول" المدمج في جميع الخطوات، مع السعي إلى تحقيق المستوى الأمثل في استخدام الموارد وتوفير رؤية واضحة للتخطيط في الأمدين القريب والبعيد. وتشير تجارب الدول الأعضاء إلى أنَّ تطوير وتنفيذ حلول التصرف في النفايات ومقاصدها النهائية المتمثلة في التخلص من هذه النفايات هو أمر ممكن. ومع ذلك، ففي العديد من الحالات تظلُّ هناك تحدياتٌ نابعة من الممارسات الوطنية السابقة والمشاكل التاريخية الموروثة. ويتسبَّب عدم اكتمال قوائم الجرد وسوء توصيف النفايات في عرقلة الاستمرار في معالجة النفايات بفعالية وتقييد الخيارات المتاحة للتخلُّص على النحو المناسب. وقد أفضى سوء تقدير الموارد في الماضي إلى الحؤول دون تنمية القدرات وتطوير المرافق، في حين عزَّزت الممارسات السابقة في مجال التخلُّص من الفكرة العامة التي ترى أنَّ التصرف في النفايات المشعة "أمر غير ممكن". وأدَّى ذلك إلى تكوين تصورات سلبية عن التخلص من النفايات، مما جعل متخذي القرارات يتردَّدون في قبول هذه المسؤولية ووضع إطار عمل وطني واضح لتنفيذ الحلول على النحو السليم.

دال-٧- الإخراج من الخدمة

٥٢- في حين كان التفكيك المؤجل هو الخيار الغالب بين مالكي المرافق خلال العقود السابقة فيما يتعلق بالاستراتيجية المعتمدة للإخراج من الخدمة، فقد بدأت الكفة تميل لصالح اتباع نهج قائم على التفكيك الفوري. وبالإضافة إلى ذلك، يتزايد تقديم المواعيد المحدَّدة لبدء التفكيك النهائي للمحطات التي أُنهيت خدمتها، مع تغيير الاستراتيجية المعتمدة في عدد من الحالات من التفكيك المؤجل إلى التفكيك الفوري. ويرجع هذا التغيير إلى الرغبة في الحدِّ من أوجه عدم اليقين بشأن تكاليف الإخراج من الخدمة.

٥٣- وبالنظر إلى أنَّ الإخراج من الخدمة ينطوي على تحويل المرافق غير الضرورية إلى حالة مأمونة سلبية، فإنَّ القدرة على المضي قُدماً في تنفيذ المشاريع تتوقف إلى حد كبير على توافر الموارد المالية ووجود نظام ملائم للتصرف الطويل الأجل في الوقود المستهلك والنفايات المشعة. ورغم أنَّه لا يوجد حتى الآن أيُّ مرفق عامل للتخلص النهائي من الوقود المستهلك، يمكن خزن الوقود المستهلك بأمان في أحواض للخزن أو في مرافق للخزن الجاف، ولذلك ففي العديد من المحطات المغلقة نهائيًّا شُيِّدت مرافق للخزن الجاف بجوار موقع المرفق النووي للتمكين من التقدُّم في تنفيذ عمليات التفكيك والهدم.

٥٤- وفيما يتعلق بالمواد غير المستعملة التي تنشأ من عملية الإخراج من الخدمة، فهناك نسبة كبيرة من هذه المواد يكون مستوى نشاطها الإشعاعي غير ذي شأن، بحيث يمكن في كثير من الأحيان إعفاؤها من التحكم الرقابي (تبعاً للنظام القانوني الوطني) وإعادة استخدامها في أغراض أخرى. ويؤدي هذا النهج الغرض المنشود بنجاح في بلدان عديدة، ولكن ليس في جميع البلدان. وتشمل الحالات التي لا ينجح فيها حين يتسبَّب عدم القبول العام بإعادة استخدام مواد مأخوذة من مرافق نووية، بصرف النظر عن مستوى نشاطها الإشعاعي، في الحؤول دون إعادة استخدام هذه المواد أو تدويرها. وبالنظر إلى أنَّ هذه الأنشطة لا تنطوي على أي خطر يُذكر، تُعتبر هذه الحالات غير مثالية من المنظور العلمي والتقني.

دال-٨- تنمية الموارد البشرية: الجيل المقبل

٥٥- يُعدُّ اجتذاب الموظفين ذوي المهارات والاحتفاظ بهم لضمان وجود قوة عاملة كفؤة في جميع مراحل دورة عمر المرفق النووي من أكبر التحديات التي تواجه الأوساط النووية. بيد أنَّ آفاق التمتع بمستقبل وظيفي طويل الأجل في جميع مراحل دورات عمر المرافق والمنظمات النووية تجعل من العمل في القطاع النووي خياراً جذَّاباً. وبالإضافة إلى ذلك، توفر الحياة المهنية في المجال النووي أيضاً العديد من الفرص للانخراط في عمل يعود بالفائدة على المجتمع، مثل توفير الطاقة النظيفة والمياه النظيفة، أو مساعدة البلدان على تحقيق التنمية الاجتماعية والاقتصادية.

٥٦- وتطرح الشواغل بشأن احتمالية عدم توافر الموظفين المؤهلين تحديات تختلف باختلاف البلدان. ويتمثَّل أحد التحديات التي تواجهها مشاريع البنية النووية الجديدة بوجه خاص في تحديد الخبرات ورأس المال البشري اللازمين للمشروع وتنميتهما، بالنظر إلى قلة هذه المشاريع ووجود فاصل زمني بينها يصل إلى عدَّة سنوات في كثير من الأحيان (باستثناء الاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين واليابان). ويجري الآن تطبيق نُهُج مبتكرة، مثل التعلُّم الرقمي والمختلط، لتيسير الحصول على التدريب والتعليم وبناء القدرات في المجال النووي لفائدة الأجيال الجديدة من القوة العاملة النووية في كلٍّ من البلدان المشغلة والمستهلة. وفيما يخصُّ البلدان التي تتوسَّع في برامجها للقوى النووية، يكمن التحدي في توسيع نطاق برامجها التعليمية والتدريبية القائمة لتوفير القوة العاملة المؤهلة المطلوبة حالما تنشأ الحاجة إليها.

٥٧- ويمكن للبلدان التي تخطِّط لتوريد تكنولوجيا الطاقة النووية أن تدعم البلدان المتلقية في الوفاء باحتياجاتها الوطنية من الموارد البشرية عن طريق نقل القدرات اللازمة لإرساء البنية الأساسية للتعليم والتدريب. وقد ثبتت بالفعل فائدة التعاون بين البلدان المشغلة والبلدان المستهلة في سدِّ الفجوة بينهما من حيث الخبرات.

٥٨- وفي إطار مشهد عالمي متغيّر، يواجه اجتذاب أصحاب المواهب والاحتفاظ بهم في المجال النووي تحديات أخرى بسبب الابتكار التكنولوجي وزيادة القدرة على التنقُّل والمعطيات الديموغرافية المتطورة. وفي الوقت نفسه، يجري تطبيق نُهُج تكنولوجية مبتكرة، مثل التعلُّم الرقمي والمختلط، لتيسير الحصول على التدريب والتعليم وبناء القدرات في المجال النووي لفائدة الأجيال الجديدة من القوة العاملة النووية في كلٍّ من البلدان المشغلة والمستهلة.

دال-٩- الترخيص/الأطر الرقابية/النُّهج

٥٩- من العوامل التي تدعم تهيئة بيئة تمكِّن من الأخذ بالطاقة النووية أو التوسُّع فيها بطريقة مأمونة وآمنة ومستدامة الدورُ الذي تضطلع به الحكومات في وضع السياسات والبرامج والأطر القانونية المناسبة لبرامج القوى النووية. وتتطلب جميع مصادر الطاقة المنخفضة الكربون وضع سياسات محدَّدة لدعم نشرها. وينبغي تجسيد هذه السياسات في النظم القانونية والمؤسسية والرقابية الوطنية، بهدف كفالة بيئة مستقرة يمكن التنبؤ بها، وتعظيم أثر هذه السياسات إلى أقصى حد ممكن.

٦٠- وفي الوقت الراهن، تنظِّم نشرَ الطاقة النووية على الصعيد العالمي منظومة قانونية دولية راسخة. وبالنظر إلى أنَّ الطاقة النووية تؤدي دوراً مهمًّا في التخفيف من حدة تغير المناخ، فإنَّ المسائل من قبيل تعزيز التنسيق الرقابي أو نماذج الأعمال المتبعة في عمليات النشر الجديدة يمكن أن تؤخذ في الحسبان في الابتكارات الرامية إلى إقامة مستقبل أنظف وأكثر استدامة.

٦١- ويتطلب ترخيص محطات القوى النووية إجراء تقييم مستفيض لتصميم المحطة وخصائصها التقنية من حيث الأمان والأمن والضمانات. وتستخدم البلدان معايير الأمان وإرشادات الأمن النووي التي تضعها الوكالة لدعم عمليات وضع أطرها الرقابية الوطنية. ويُعتبر التعاون الدولي بمعناه الواسع عنصراً بالغ الأهمية في نقل المعارف والحصول على الكفاءات على النحو اللازم لوضع الأطر الرقابية الوطنية وتطبيقها، ومن ثم التعجيل بالنشر.

٦٢- ويُعدُّ إرساء البنية الأساسية التمكينية والإطار القانوني والرقابي النووي ذي الصلة المطبَّق حاليًّا على المفاعلات النووية من الحجم الكبير في البلدان المستهلة في الوقت المناسب عاملاً حاسم الأهمية في التعجيل بتهيئة السوق للاستعداد لنشر المفاعلات النمطية الصغيرة.

٦٣- وتتَّسم الأدلة والعمليات الرقابية القائمة بشأن تقييم التكنولوجيات المتقدمة من قبيل المفاعلات النمطية الصغيرة بأنَّها ليست مواكبة للواقع، بل هي غير موجودة بعدُ في بعض الأحيان. وفي المستقبل، سيكون من المفيد استخدام منهجيات مُحكمة ومحايدة تكنولوجيًّا للاستعراض الرقابي، من أجل التقليل إلى أدنى حدٍّ من الوقت الذي يتطلبه اعتماد تكنولوجيات المفاعلات النووية الجديدة وتسويقها تجاريًّا. وفي جميع الأحوال، سيتعيَّن على الهيئات الرقابية والجهات القائمة على تطوير التكنولوجيا أن تعمل سويًّا من أجل تيسير الاعتراف باعتماد تصاميم هذه المفاعلات الأولى من نوعها وإيضاحها، بحيث يكون المسار صوب تشييدها وتشغيلها مأموناً ومبسَّطاً، مع ضبط التكاليف للوصول إلى مستوى التنافسية عند النشر. وفي الوقت الراهن، تستضيف الوكالة محفل الرقابيين المعنيين بالمفاعلات النمطية الصغيرة وتعكف على استعراض معايير الأمان من حيث قابليتها للتطبيق وفقاً لنهج محايد تكنولوجيًّا عند التفكير في المفاعلات النمطية الصغيرة.

دال-١٠- تصوُّرات الجمهور

٦٤- في حين أنَّ الطاقة النووية يمكن أن تساعد على معالجة بعض القضايا العالمية الملحة، لا تزال التصورات الخاطئة عن القوى النووية تؤثِّر في قبول الجمهور لها ووضع السياسات المتعلقة بها. ولا تزال التصورات العامة عن الفوائد والمخاطر المرتبطة بالقوى النووية هي العوامل الأكثر تأثيراً في قبول الجمهور، لا سيما الشواغل المتعلقة بالمخاطر الإشعاعية والتصرُّف في النفايات والأمان والانتشار. وحيث إنَّ الرأي العام يؤدي دوراً رئيسيًّا في تحديد السبل التي تختار الحكومات انتهاجها لإنتاج الطاقة، فإنَّ فهم آراء أصحاب المصلحة ومستوى وعيهم ومعرفتهم فيما يتعلق بالقوى النووية يُعدُّ عنصراً حاسم الأهمية في وضع السياسات وفي نجاح أيِّ برنامج للقوى النووية. وإرساء علاقات قوية وإيجابية وطويلة الأمد مع أصحاب المصلحة هو أحد العوامل الرئيسية فيما يخصُّ برامج القوى النووية، سواء كانت قائمة أو مستجدة أو مزمعة.

٦٥- وتشير التجربة إلى أنَّ إشراك أصحاب المصلحة في عمليات اتخاذ القرارات، بما يشمل الفئات التي ليس لها دور مباشر في اتخاذ القرارات، يمكن أن يساعد على تعزيز ثقة الجمهور في تطبيقات العلوم والتكنولوجيا النووية. ويشمل ذلك إجراء حوار مفتوح وشفاف يُرسي الثقة المتبادلة فيما بين الفئات المتعددة من أصحاب المصلحة، من الصناعة النووية والمؤسسات الحكومية إلى وسائل الإعلام والمجتمعات المحلية والمنظمات غير الحكومية. وفي حين يساعد هذا التفاعل على إرساء الوعي والفهم فيما يتصل بجميع جوانب دورة الوقود النووي، من تعدين اليورانيوم وحتى التصرف في الوقود المستهلك والنفايات المشعة، فإنَّه يتيح أيضاً الفرصة لأصحاب المصلحة حتى يعربوا عن شواغلهم ويؤثروا في القرارات التي تؤثِّر في مجتمعاتهم.

٦٦- وقد شهدت برامج القوى النووية القائمة تطوير وسائل مفتوحة ومتيسرة لإشراك أصحاب المصلحة، وصار الأخذ بهذه الاستراتيجيات هو العرف السائد في العديد من المجالات عند تحديد مواقع مرافق التصرف في النفايات وإنشائها. وتسير برامج القوى النووية الجديدة على الدرب نفسه. وبالفعل، فإنَّ إشراك أصحاب المصلحة هو واحد من تسع عشرة مسألة متعلقة بالبنية الأساسية يتناولها نهج المعالم المرحلية البارزة الذي وضعته الوكالة، وهو عبارة عن عملية مُحكمة من ثلاث مراحل لإرساء البنية الأساسية اللازمة لأي برنامج للقوى النووية.

٦٧- ومن شأن التواصل مع أصحاب المصلحة في وقت مبكر وبوتيرة متكررة بشأن المسائل الجوهرية أن يدعم أيضاً تطوير ونشر التكنولوجيات الجديدة، مثل المفاعلات النمطية الصغيرة، عند تقييم البلدان لجدوى الأخذ بتلك التكنولوجيات كخيار لإنتاج الكهرباء المنخفضة الكربون والتطبيقات غير الكهربائية. ويمكن لتجارب البلدان، سواء المشغلة أو المستهلة، وللدروس المستفادة من نشر التكنولوجيات القائمة أن تسهم في نجاح التكنولوجيات النووية الجديدة.

٦٨- وختاماً، فإنَّ تحسين فهم أصحاب المصلحة بفئاتهم المتعددة للدور المهم الذي تؤديه القوى النووية في كفالة الاستقرار للشبكات الكهربائية، وخصوصاً في الحالات التي تضمُّ فيها الشبكة حصصاً كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة، يمكن أن يفضي إلى تعزيز ثقة الجمهور في القوى النووية. ويمكن للجمع بين القوى النووية ومصادر الطاقة المتجددة في إطار نظم الطاقة الهجينة أن يسهم إسهاماً كبيراً في التقليل من انبعاثات غازات الدفيئة مع توفير مصدر كهرباء موثوق لأغراض التنمية الاجتماعية والاقتصادية، ومن ثم معالجة الشواغل التي تهمُّ فئات عديدة من أصحاب المصلحة. وعن طريق تعزيز تقدير أصحاب المصلحة لإمكانية استخدام الطاقة النووية في تحلية مياه البحر وإنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون وتوليد الحرارة لتدفئة المباني ولأغراض التطبيقات الصناعية، يمكن أيضاً النهوض بدعم الجمهور لهذا المصدر للطاقة المنخفضة الكربون، ومن ثم التوسع في إمكانية مساهمته في العمل المناخي وفي التنمية المستدامة.

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

www.iaea.org

International Atomic Energy Agency
PO Box 100, Vienna International Centre
1400 Vienna, Austria
الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
البريد الالكتروني: Official.Mail@iaea.org

21-01962A