استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2023

تقرير من المدير العام

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

GC(67)/INF/4

استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2023

تقرير من المدير العام

GC(67)/INF/4

طُبِع من قِبَل
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
أيلول/سبتمبر 2023
IAEA/NTR/2023

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

المحتويات

ملخص 5
تصدير من المدير العام 6
موجز جامع 7
ألف- القوى النووية 11
ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية 11
ألف-2- محطات القوى العاملة 14
ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة 16
ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية 19
ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء 20
ألف-4-2- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية والمفاعلات المتناهية الصغر 21
ألف-4-3- المفاعلات السريعة 23
ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية 25
باء- دورة الوقود النووي 27
باء-1- المرحلة الاستهلالية 27
باء-2- المرحلة الختامية 31
جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة 32
جيم-1- الإخراج من الخدمة 32
جيم-2- الاستصلاح البيئي والتصرُّف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية 36
جيم-3- التصرف في النفايات المشعة 38
دال- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل 41
هاء- مفاعلات البحوث ومعجلات الجسيمات والأجهزة النووية 47
هاء-1- مفاعلات البحوث 47
هاء-2- معجلات الجسيمات 50
هاء-3- الأجهزة النووية 52
واو- الأغذية والزراعة 54
واو-1- التصدي السريع للأزمات في مجال سلامة الأغذية 54

واو-2- التطورات في مجال تشعيع الأغذية: زيادة استخدام المصادر الآلية واستحداث تكنولوجيا جديدة قائمة على الحزم الضعيفة 58
زاي- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية 64
زاي-1- التطورات في مجال استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في التشخيص العلاجي .. 64
حاء- الصحة البشرية 67
حاء-1- استخدام الذكاء الاصطناعي في رسم معالم الأورام وتخطيط العلاج الإشعاعي 67
طاء- البيئة البحرية 72
طاء-1- الملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة 72
طاء-2- استخدام المقتفيات الإشعاعية المستحدثة للدورات المائية في المحيطات من أجل تحسين فهم ونمذجة انتقال الملوثات والتغيُّرات في المحيطات والمناخ 75
المرفق 80

ملخص

- تلبيةً لطلبات الدول الأعضاء، تُعدُّ الأمانة كلَّ عام استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية وتُصدره في تقرير بعنوان *استعراض التكنولوجيا النووية*. ويَرِدُ مرفقاً بهذه الوثيقة التقريرُ الخاص بالعام الحالي، والذي يسلط الضوء على أبرز *المستجدَّات في عام 2022*.

- يتناول استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2023 المجالات المختارة التالية: القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والإخراج من الخدمة، والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة، وتطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل، ومفاعلات البحوث، ومعجِّلات الجسيّمات والأجهزة النووية، والأغذية والزراعة، والنظائر المشعة والتكنولوجيات الإشعاعية، والصحة البشرية، والبيئة البحرية.

- وقد قُدِّمت مسودة هذا الاستعراض إلى مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس 2023 ضمن الوثيقة GOV/2023/3. وأُعدَّت الصيغة النهائية في ضوء المناقشة التي جرت في مجلس المحافظين، وكذلك في ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

تصدير من المدير العام

تؤدي التكنولوجيات النووية دوراً مهمًّا في التصدي للعديد من أشدِّ التحديات التي تواجهنا إلحاحاً، سواء استُخدمت في إنتاج الطاقة الموثوقة المنخفضة الكربون أو لمعالجة المسائل المتصلة بالأغذية والصحة والمياه والبيئة.

وفي عام 2022، أدَّى اقتران أزمة المناخ العالمية بالاضطرابات في أسواق الطاقة إلى تجديد الاهتمام بين صفوف الدول الأعضاء بقدرة القوى النووية على الإسهام في الوصول بصافي الانبعاثات إلى مستوى الصفر وضمان أمن إمدادات الطاقة. وفي الوقت نفسه، هناك عدد متزايد من البلدان التي تستخدم التكنولوجيات النووية في التطبيقات غير الكهربائية، بما في ذلك حماية موارد المياه، وتنمية الزراعة الذكية مناخيًّا، وإنقاذ الأرواح من خلال تحسين علاج السرطان.

وفي دورة عام 2022 من مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (مؤتمر المناخ، COP27)، التي عُقدت في شرم الشيخ بمصر، أشرفت الوكالة على أول جناح على الإطلاق يُخصَّص لعرض فوائد التكنولوجيات النووية في التخفيف من حدة تغير المناخ ورصد آثاره والتكيف معها. وإلى جانب ذلك، فبغية مواصلة تحسين فهم إمكانات القوى النووية في إزالة الكربون من الطاقة بما يتجاوز توليد الكهرباء، أُطلقت في مؤتمر المناخ COP27 مبادرة تسخير الذرة من أجل عالمٍ خالٍ من الانبعاثات. وسوف تستند الوكالة إلى هذه الجهود من أجل مواصلة التفاعل مع الدول الأعضاء والمجتمع الدولي بصورة أعم بشأن الدور المهم الذي تؤديه الطاقة النووية وتطبيقاتها السلمية في التصدي لأزمة المناخ خلال الدورة الثامنة والعشرين لمؤتمر المناخ (COP28)، المزمع عقدها في دبي بالإمارات العربية المتحدة.

وعلى مدى عقود، كانت العلوم والتكنولوجيات النووية على قدر المسؤولية في مساعدة البلدان على تلبية احتياجاتها الإنمائية. ومما لا شك فيه أنَّه يمكن الاستعانة بها لتحقيق المزيد وفي عدد أكبر من المجالات. ويسلِّط *استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2023* الضوء على أبرز التطورات التي شهدها مجال التكنولوجيا النووية في عام 2022، ومن ثَمَّ سيساعد الدول الأعضاء على اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن اتخاذ المسلك المناسب من أجل التصدي للتحديات الراهنة والمستجدة.

الشكل- التصدير-1- المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، يلقي كلمة أثناء دورة عام 2022 من مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (مؤتمر المناخ COP27)، الذي عُقد في شرم الشيخ بمصر.

موجز جامع

1- للعام الثاني على التوالي، نقَّحت الوكالة بالزيادة توقعاتها السنوية للنمو المحتمل في القوى النووية في العقود المقبلة، تجسيداً للتحول الذي شهده الحوار العالمي حول الطاقة والبيئة في خضم الشواغل المتزايدة إزاء أمن الطاقة وتغيُّر المناخ. وقد يؤدي الانتشار المتزايد لمصادر الطاقة المتجددة المتقطعة إلى عدم استقرار الشبكات الكهربائية، وهو ما يمكن تعويضه بالاستعانة بمحطات القوى النووية لتوفير إمدادات مستقرة من الطاقة النظيفة. وقد رفعت الوكالة توقعاتها في الحالة المرتفعة إلى 873 غيغاواط في عام 2050، بزيادة قدرها 10% مقارنة بسيناريو الحالة المرتفعة في العام السابق. وتبعاً لمستوى التحول لاستخدام الكهرباء على الصعيد العالمي، يمكن أن تبلغ حصة القوى النووية ما يصل إلى 14% من مزيج توليد الكهرباء في عام 2050، بما يمثِّل زيادة كبيرة مقارنة بالحصة الحالية البالغة 9,8%.

2- وفي نهاية عام 2022، كانت القدرة التشغيلية العالمية على توليد القوى النووية تبلغ ما مجموعه 393,8 غيغاواط (كهربائي) توفِّرها 438 من المفاعلات العاملة في 32 بلداً. وخلال عام 2022، وُصِّل بالشبكة الكهربائية ما يزيد على 7,4 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة في خمسة بلدان. ووفقاً للتقارير التي قدمتها البلدان المعنية إلى الوكالة، فقد أنتج أسطول مفاعلات القوى النووية قرابة 2486,8 تيراواط-ساعة من الكهرباء القابلة للتوريد المنخفضة الانبعاثات.

3- وقد أدَّت أزمة الطاقة في عام 2022 إلى تعليق تنفيذ بعض القرارات بشأن عمليات إغلاق المفاعلات، مما حدا بالجهات المشغلة والهيئات الرقابية إلى تنفيذ إجراءات لضمان الأمان والموثوقية في التشغيل الطويل الأجل. ويشكِّل الطلب المستمر والمتزايد على توليد الكهرباء بطرق مأمونة ونظيفة وموثوقة وفعالة من حيث التكلفة حافزاً قويًّا يدفع الجهات المشغلة لتمديد العمر التشغيلي لمحطات القوى النووية بعدة عقود من خلال تحديث المحطات وتحسين المعدات والنظم الرئيسية لدعم التشغيل الطويل الأجل.

4- ومن بين الدول الأعضاء التي أعربت عن اهتمامها بالأخذ بالقوى النووية، والبالغ عددها 50 دولة عضواً، هناك 24 دولة في مرحلة سابقة لاتخاذ القرار ولا تزال تنفِّذ أنشطة تخطيطية. أمَّا البلدان الستة والعشرون المتبقية فتسعى إلى بدء الأخذ بالقوى النووية. وبحلول عام 2035، قد يزيد عدد البلدان المشغلة بنسبة تقترب من 30% بانضمام ما بين 10 و12 بلداً آخر إلى صفوف البلدان المشغلة لمحطات قوى نووية والبالغ عددها حاليًّا 32 بلداً. وهذا الطلب المتزايد على الأخذ بالقوى النووية يتطلب إرساء البنية الأساسية النووية الملائمة.

5- ولا تزال المفاعلات المبرَّدة بالماء تؤدِّي دوراً جوهريًّا في الصناعة النووية التجارية، وهي تستأثر حاليًّا بنسبة تفوق 95% من مجمل مفاعلات القوى المدنية العاملة في العالم. وتركِّز الجهود العالمية لتطوير تكنولوجيا القوى النووية على نشر المفاعلات المتقدمة، لا سيما المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية (المفاعلات النمطية الصغيرة)، وكذلك على التوسُّع في استخدام القوى النووية ليشمل التطبيقات غير الكهربائية مثل تدفئة الأحياء السكنية وإنتاج الهيدروجين وتحلية مياه البحر.

6- ويُعدُّ التوليد المشترك للكهرباء والحرارة لأغراض التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية تكنولوجيا موثوقة ومثبتة الفاعلية يتزايد الاهتمام بها حول العالم كما تتزايد إمكانات تسويقها وتطويرها. وتنظر عدَّة بلدان

في إنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء أو الحرارة المستمدة من المفاعلات النووية، وكذلك في تحلية مياه البحر.

7- ومن التطورات التكنولوجية التي تجذب اهتمام واضعي الخطط والسياسات في مجال الطاقة أنَّ هناك مجموعة متعددة من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة الأولى من نوعها التي يُتوقع توافرها ونشرها بحلول عام 2030. ونتيجة لذلك، هناك عدَّة بلدان مستجدة أدرجت المفاعلات النمطية الصغيرة ضمن التكنولوجيات التي تعمل على دراستها أو تواصل رصد التطورات في هذا المجال. وهناك ما يزيد على 80 من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة من الخطوط التكنولوجية الرئيسية في مراحل مختلفة من التطوير والنشر في 18 دولة عضواً. وهناك جهود كبيرة جارية على مستوى القطاع الصناعي وعلى مستوى الهيئات الرقابية من أجل تيسير تطوير التصاميم والنشر المبكر، بما في ذلك من خلال منصة الوكالة المعنية بالمفاعلات النمطية الصغيرة ومبادرة التنسيق والتوحيد في المجال النووي.

8- ومع بلوغ القدرات الحاسوبية وأدوات تحليل البيانات درجة عالية من التطوُّر، يشرع قطاع الصناعة النووية في الأخذ بالتقنيات القائمة على الذكاء الاصطناعي وتقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق، من أجل تجديد نظم التشغيل ونظم الصيانة القصيرة الأجل والطويلة الأجل وكذلك تقنيات التصنيع المتقدمة. وهناك طائفة متنوعة من التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا قواعد البيانات المتسلسلة على طول سلسلة الإمداد بالقوى النووية في جميع مراحلها.

9- وبالإضافة إلى علوم الاندماج النووي التجريبية، تعمل الدول الأعضاء على التعجيل بتطوير تكنولوجيا الاندماج النووي مع ظهور الاندماج في القطاع الخاص وما ترتب على ذلك من زيادة كبيرة في رأس المال المستثمر فيه وفي الإنجازات المتحققة مؤخراً، فضلاً عن التقدم المحرز في مشاريع الاندماج الدولية والوطنية الواسعة النطاق. وقد شهد مجالا النمذجة القائمة على الذكاء الاصطناعي لديناميات البلازما والتحكم الآني في تجارب الاندماج تحسناً كبيراً في كفاءتهما، مما يتيح مساراً للتعجيل بالوصول إلى تحقيق الاندماج النووي.

10- وقد تحقق تقدُّم جيد في عمليات البلازما الأولى في مشروع إيتير. وفي حزيران/يونيه 2022، بلغ المشروع معلماً بارزاً باكتمال تنفيذه بنسبة 77%. بيد أنَّه من المتوقع أن تشهد خطة العمل الأصلية حالات تأخير بسبب تأثير جائحة كوفيد-19 والتحديات التقنية مثل الحاجة لإصلاح بعض المكونات الرئيسية.

11- وأدَّت الزيادة المستدامة في سعر التسليم الفوري لليورانيوم إلى إعادة تنشيط صناعة إنتاج اليورانيوم، وهناك مجموعة متعددة من المنتجين الأساسيين الذي يسعون لاستئناف عملياتهم التي كانت موضوعة قيد الرعاية والصيانة بسبب انخفاض سعر التسليم الفوري. وفي ضوء الإشارات الإيجابية التي شهدها سوق اليورانيوم في العامين السابقين، فإنَّ أنشطة الاستكشاف آخذة في الازدياد.

12- ويتراكم الوقود النووي المستهلك قيد الخزن بمعدل يقارب 7000 طن من الفلزات الثقيلة سنويًّا على مستوى العالم، في حين يقترب الرصيد المخزون من 000 320 طن من الفلزات الثقيلة. وفيما يخصُّ البلدان التي لديها برامج قوى نووية راسخة وتسعى إلى الأخذ باستراتيجيات قائمة على دورات الوقود المفتوحة، تظلُّ التحديات الرئيسية تتمثل في الحاجة إلى سعة إضافية لتخزين الوقود النووي المستهلك وزيادة مدَّة التخزين قبل التخلص. وفي حالة البلدان التي تسعى للأخذ باستراتيجيات قائمة على دورة مغلقة للوقود النووي، يمكن إعادة معالجة الوقود النووي المستهلك وإعادة تدويره لاستخدامه في إنتاج الوقود مجدداً.

13- وتؤدي التكنولوجيات الرقمية دوراً متزايد الأهمية في النهوض بمشـــاريع إخراج المرافق النووية من الخدمة من خلال التمكين من تحسين التخطيط والتنفيذ، بما في ذلك تحسين عملية تصور سيناريوهات الإخراج من الخدمة، سواء من جانب الجهات المشغلة أو من جانب الجهات المعنية الخارجية. ويجري استكشاف استخدام تقنيات الواقع المعزز والافتراضي لدعم أنشطة الإخراج من الخدمة وتدريب الجهات المشغلة.

14- ويشهد مجال الاستصلاح البيئي اتجاهاً ناشئاً نحو توسيع نطاق مفهوم الحد من الأضرار ليشمل القيمة الإجمالية للمواقع الملوثة. ويمثل الاستصلاح أيضاً مرحلة بالغة الأهمية من عمليات التعدين في إطار اقتصاد دائري لأنه يتيح الفرصة لإعادة تأهيل الموقع للأغراض الإنتاجية مستقبلاً.

15- واستمر في عام 2022 إحراز تقدم ملموس في مجال التصرف في النفايات المشعة، لا سيما فيما يتعلق بالنهوض ببرامج المستودعات الجيولوجية العميقة ومواصلة النشر المأمون لتكنولوجيات التمهيد للتخلص.

16- وتزايدت عمليات إعادة المصـــادر المهملة القوية الإشـــعاع إلى الموردين لأغراض إعادة تدويرها والتخلص منها. ومن المقرر إزالة أكثر من 30 مصدراً من المصادر القوية الإشعاع من أكثر من اثنتي عشرة دولة عضـــوًا في عام 2023. وفي حين أنَّ بلداناً عديدة قد أحرزت تقدماً فيما يتعلق بالتصـــرف في المصـــادر المشعة المختومة المهملة، فإنَّ التخلص من هذه المصادر لا يزال يمثل تحدياً، لا سيما في البلدان ذات البرامج النووية الأصغر.

17- واستمر تزايد الاهتمام العالمي بمفاعلات البحوث. وبالإضافة إلى مفاعلات البحوث العاملة البالغ عددها 233 مفاعلاً، كان هناك 11 مفاعلاً قيد التشييد. وقد أوشكت نسبة مفاعلات البحوث العاملة لمدة 40 عاماً على الأقل على بلوغ 70%. وتنظر بعض المنظمات المشغلة لمفاعلات البحوث الكثيفة الاستخدام في تمديد عمر تلك المفاعلات النشط إلى ما بين 80 و100 عام.

18- وما فتئت تطبيقات الذكاء الاصـــطناعي الأوســـع نطاقاً تُحدِثُ ثورةً في عالم فيزياء الطاقة العالية. ومع رفع مستوى معجِّلات الهدرونات بما يتيح بلوغ درجات سطوع أعلى، يتزايد عدد الجسيمات التي تنتج عن كل تصادم. ونتيجة لذلك، يتعيَّن تشغيل أجهزة الكشف المستخدمة في تتبُّع مسارات الجسيمات بمعدَّلات عدٍّ أعلى، بالنظر إلى احتمال زيادة العدِّ الإشعاعي الناتج عن مستوى الإشعاع الطبيعي، عند دراسة الجسيمات عن طريق استهداف قنوات الاستكشاف النادرة.

19- ويشـهد اسـتخدام الطائرات بلا طيار في الكشـف عن الإشـعاعات ومراقبتها اتجاهاً متأثراً ببارامترات جديدة تميل إلى زيادة الحمولة وتحقيق مســـتويات أعلى من الأمان وفترة الصـــلاحية للتحليق والمقاومة ودقّة التوجيه. وقد ظهرت أنواع جديدة متاحة تجاريًّا من الطائرات بلا طيار لأغراض الكشف عن الإشعاعات وقياس طيف أشعة غاما توفِّر حلاًّ شاملاً لرسم الخرائط الإشعاعية ولتطبيقات أخرى.

20- وقد أبرزت الأزمات والطوارئ الأخيرة، مثل جائحة كوفيد-19 والنزاعات والكوارث الطبيعية المتصلة بالمناخ، الضعف الذي يشوب الإمدادات الغذائية حول العالم في الظروف الضاغطة، كما سلَّطت الضوء على الحاجة إلى زيادة القدرة على الصـــمود عن طريق إصـــلاح نظم مراقبة الأغذية وتحســـين الدعم التقني. وهناك تقنيات تحليلية نووية جديدة وناشئة يمكن تطبيقها لتحليل الأغذية في الميدان للتمكين من التصدي بفعالية للظروف التي تؤثر في إمدادات الأغذية والأمن الغذائي.

21- ويخضع نوع واحد على الأقل من السلع الغذائية للتشعيع في نحو 70 بلداً لتحسين سلامة الأغذية والحفاظ على جودتها وإطالة عمرها التخزيني. ويجري التوسُّع في استخدام التشعيع بالمصادر الآلية، مثل الحزم المنخفضة الطاقة (الإلكترونات الضعيفة أو الأشعة السينية الضعيفة)، بسبب المزايا التي يكفلها من الناحيتين الاقتصادية والعملية. وتسهم هذه التكنولوجيات البديلة في تكميل القدرة المتاحة في مرافق التشعيع بأشعة غاما والتمكين من توسيع نطاق الاستفادة من تشعيع الأغذية.

22- وفي مجال التشخيص العلاجي، يُستخدم نوعان من النويدات المشعة معاً، أحدهما للتشخيص والآخر للعلاج. وقد شهد مجالا التصوير الجزيئي والتطبيقات العلاجية مؤخراً تطورات تتطلب توافر أنواع جديدة إضافية من النظائر المشعة لدى الممارسين الإكلينيكيين. وبفضل التطورات التكنولوجية في مجال إنتاج النويدات المشعة، فإنَّ عدد النويدات المشعة الواعدة في تطبيقات المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية آخذة في الازدياد، مما سيساعد على تحسين نتائج علاج المرضى.

23- وبالنظر إلى أنَّ التريتيوم هو النظير المشع الوحيد في جزيء الماء، فهو يشكِّل أداة قيمة لتتبُّع عمليات دورة الماء ومن ثم المساعدة على تقدير تجدُّد المياه الجوفية وتقييم تعرُّض المياه للتلوث. وبسبب انخفاض مستويات تركيز التريتيوم الحالية في المياه الطبيعية، تتطلب أساليب القياس المعتادة قدراً كبيراً من إثراء المياه بالتريتيوم للحصول على نتائج دقيقة وصحيحة، وهي عملية تستغرق وقتاً طويلاً. وقد استحدثت الوكالة نظاماً جديداً للإثراء بالتريتيوم يبشِّر بإحداث ثورة في قدرة الدول الأعضاء على تحديد تركيز التريتيوم في عينات المياه بمستويات شديدة الانخفاض لأغراض الرصد الهيدرولوجي.

24- وتحتاج نسبة تقارب النصف من جميع مرضى السرطان إلى العلاج الإشعاعي في مرحلة ما. ويمكن للذكاء الاصطناعي أن يوفِّر حلًّا للنقص العالمي في العاملين في مجال الرعاية الصحية. فاستخدام الذكاء الاصطناعي يمكن أن يزيد من الجودة والتوحيد وأن يوفِّر الوقت، لا سيما في مرحلة رسم المعالم، وهي خطوة بالغة الأهمية في العلاج الإشعاعي، يجري خلالها رسم الحدود بين الأعضاء والأنسجة السليمة والورم. ويمكن استخدام الذكاء المختلط، الذي يجمع بين مواطن القوة التي ينطوي عليها كل من الذكاء الطبيعي والذكاء الاصطناعي، في تحديد المعالم الصعبة التي تتطلب التدخل أو الفحص يدويًّا.

25- وهناك إشارات واضحة تنذر بتفشي "جائحة صامتة" من الملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة. والملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة هي مواد كيميائية تُكتشف في البيئة ولكنها ليست خاضعة لبرامج الرصد الرقابية. وعن طريق التقنيات الخاملة لأخذ العينات، يمكن الكشف عن وجود آلاف المواد الكيميائية في البيئة البحرية وتيسير التعرُّف على مركبات كيميائية لم تكن معروفة في السابق. ويمكن للإنجازات الكبيرة التي تحققت في تقنيات أخذ عينات المياه والفحوص التحليلية المتقدمة أن تساعد على مواجهة بعض التحديات التي يفرضها المزيج المعقد من الملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة الموجودة في البيئة البحرية.

26- وتُستخدم المقتفيات الإشعاعية لتتبُّع حركة مياه البحر وفهم النظم البيئية البحرية والساحلية. وهي تمكِّن من رصد الملوثات المشعة وغير المشعة، مثل المواد البلاستيكية الدقيقة والزئبق الميثيلي، وتساعد على التعرُّف على السموم الحيوية وتقدير كميتها في المأكولات البحرية، وتقييم آثار تحمُّض المحيطات في الكائنات المتكلسة، وتقييم عمليات التمثيل الغذائي في ظلِّ ارتفاع درجات الحرارة. وقد أدَّت التطورات الأخيرة في مجال قياس الطيف الكتلي إلى إتاحة إمكانية اكتشاف وتحليل النويدات المشعة الطويلة العمر عند مستويات تركيز منخفضة للغاية.

ألف- القوى النووية

ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية

الحالة

1- للعام الثاني على التوالي، نقَّحت الوكالة توقعاتها السنوية للنمو المحتمل في القوى النووية في العقود المقبلة، تجسيداً للتحول الذي شهده الحوار العالمي حول الطاقة والبيئة في خضم الشواغل المتزايدة إزاء أمن الطاقة وتغيُّر المناخ.

873 غيغاواط
في عام 2050

2- وفي التوقعات الجديدة التي أصدرتها الوكالة بشأن القدرة العالمية على توليد الكهرباء نوويًّا، رفعت الوكالة توقعاتها في الحالة المرتفعة إلى 873 غيغاواط في عام 2050، بزيادة قدرها 10% مقارنة بتوقعاتها في الحالة المرتفعة في العام السابق. وسوف يتطلب تحقيق هذه التوقعات تطبيق التشغيل الطويل الأجل على نطاق واسع فيما يتعلق بالأسطول القائم، فضلاً عن إنشاء بنى جديدة بقدرة تقترب من 600 غيغاواط في العقود الثلاثة المقبلة. وسيقتضي ذلك أن يتمكن قطاع الصناعة من تسليم المنتجات اللازمة في موعدها وضمن حدود الميزانيات المرصودة لها، وتيسير الحصول على التمويل، وإحراز تقدُّم صوب تنسيق المتطلبات الرقابية وتوحيد النُّهج الصناعية. وتكتسي هذه الإجراءات أهمية خاصة في حالة التكنولوجيات الجديدة، مثل المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية (المفاعلات النمطية الصغيرة)، التي يُتوقع أن تؤدي دوراً رئيسيًّا في إزالة الكربون من قطاع الطاقة من خلال توفير الحرارة المنخفضة الكربون أو الهيدروجين المنخفض الكربون للقطاعات التي لا يمكن تحويلها لاستخدام الطاقة الكهربائية.

3- وتبعاً لمستوى التحول لاستخدام الكهرباء على الصعيد العالمي، يمكن أن تبلغ حصة القوى النووية ما يصل إلى 14% من مزيج توليد الكهرباء، مقارنة بالحصة الحالية البالغة 9,8%. أما في الحالة المنخفضة، فسوف تظلُّ القدرة النووية المنشأة بحلول عام 2050 كما هي الآن عند نحو 400 غيغاواط، بيد أنَّ حصة الكهرباء النووية ستتراجع إلى 6,9% بسبب زيادة مساهمة مصادر الطاقة الأخرى.

4- وخلال الدورة السابعة والعشرين من مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (مؤتمر المناخ COP27)، المعقودة في شرم الشيخ بمصر في تشرين الثاني/نوفمبر 2022، أُجريت مناقشات رفيعة المستوى بشأن مساهمة القوى النووية في أمن إمدادات الطاقة وقدرتها على الصمود وتوافرها بتكلفة ميسورة، وكذلك بشأن مساهمتها في نظم الطاقة الخالية من الكربون، من خلال توفير العمود الفقري الأساسي للتمكين من نشر مصادر الطاقة المتجددة (الشكل ألف-1). ولا يزال تمويل الانتقال إلى الطاقة النظيفة يشكِّل تحدياً، لا سيما تمويل المشاريع النووية، بيد أنَّ عام 2022 شهد بعض التطورات الإيجابية في هذا الصدد، مثل إدراج القوى النووية في تصنيف التمويل المستدام بالاتحاد الأوروبي، وفي تصنيفات أخرى مشابهة حول العالم.

تبعاً لمستوى توصيل الكهرباء على الصعيد العالمي، يمكن أن تبلغ حصة القوى النووية

ما يصل إلى 14% من مزيج توليد الكهرباء،

صعوداً من 9,8% حاليًّا.

في الحالة المنخفضة، ستظل القدرة النووية المنشأة

بحلول عام 2050 ثابتة عند نحو **400 غيغاواط،**

لكن حصة القوى النووية من توليد الكهرباء يمكن أن تتراجع إلى 6,9%

الشكل ألف-1- المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، مع غيرد مولر، المدير العام لمنظمة الأمم المتحدة للتنمية الصناعية، وأولغا ألغايروفا، الأمينة التنفيذية للجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا، في فعالية جانبية عقدت خلال مؤتمر المناخ COP27 بعنوان "التفاعل المتبادل بين التكنولوجيات المنخفضة الكربون من أجل إيجاد نظم طاقة خالية من الانبعاثات وقادرة على الصمود". (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الاتجاهات

5- هناك اهتمام كبير ومتزايد بتكنولوجيات المفاعلات المتقدمة والابتكارية، بما يشمل المفاعلات النمطية الصغيرة وتطبيقاتها. وإلى جانب المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء من الحجم الكبير، يُتوقع أنَّ المفاعلات النمطية الصغيرة سوف تستأثر بالجانب الأكبر من الإضافات إلى قدرة التوليد خلال العقود الثلاثة المقبلة من أجل توليد الطاقة المنخفضة الكربون في إطار العمل من أجل التصدي لتغيُّر المناخ وضمان أمن إمدادات الطاقة بأسعار ميسورة. وسيظلُّ القطاع النووي يواجه عدداً من التحديات، بما في ذلك خفض التكاليف وبناء القدرات وتعزيز التنسيق والتوحيد على المستويين الرقابي والصناعي من أجل تحسين التنافسية والتعجيل بنشر قدرات القوى النووية الجديدة. ودعماً للجهود التي تبذلها الدول الأعضاء في هذا الصدد، أطلق المدير العام للوكالة في عام 2022 مبادرة التنسيق والتوحيد في المجال النووي ("مبادرة التنسيق والتوحيد")، التي توفر فرصة فريدة من نوعها لجميع الجهات المعنية بالمجال النووي (أي الحكومات والهيئات الرقابية وقطاع الصناعة) للعمل المتآزر صوب تحقيق الهدف المشترك المتمثل في نشر المفاعلات المتقدمة الآمنة والمأمونة على الصعيد العالمي، مع التركيز على تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة (الشكل ألف-2).

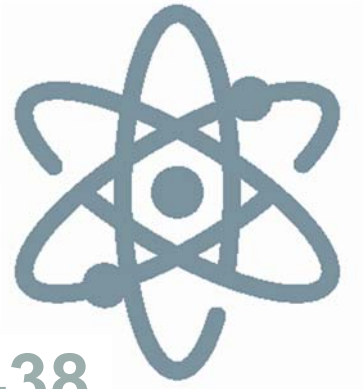
الشكل ألف-2- المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، يفتتح الاجتماع الاستهلالي لمبادرة التنسيق والتوحيد في المجال النووي، الذي عُقد في مقر الوكالة الرئيسي في فيينا بالنمسا في حزيران/يونيه 2022.

6- وفي الوقت الراهن، فمن بين البلدان التي قررت سابقاً البدء مبكراً في التوقف تدريجيًّا عن استخدام القوى النووية، هناك بلدان عديدة تعيد النظر في مواصلة الأخذ بهذا الخيار والسعي للتشغيل الطويل الأجل خلافاً لما هو مخطط له.

ألف-2- محطات القوى العاملة

الحالة

7- في نهاية عام 2022، كانت القدرة التشغيلية العالمية على توليد القوى النووية تبلغ ما مجموعه 393,8 غيغاواط (كهربائي) توفِّرها 438 من المفاعلات العاملة في 32 بلداً. وخلال عام 2020، كان ما يزيد على 22,8 غيغاواط (كهربائي) من إجمالي القدرة العاملة (تُعزى إلى 27 مفاعلاً) في حالة وقف مؤقت للعمليات التشغيلية.

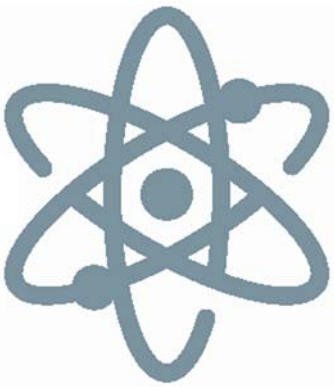


8- وخلال عام 2022، وُصِّل بالشبكة الكهربائية ما يزيد على 7,4 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة، بما يشمل 5,6 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الإضافية في آسيا و1,6 غيغاواط (كهربائي) في أوروبا. ففي الصين، بدأ في عام 2022 تزويد الشبكة بالكهرباء من مفاعلين اثنين، هما: المفاعل Fuqing-6 (بقدرة 1075 ميغاواط (كهربائي)) – وهو ثاني المفاعلات الإيضاحية من طراز Hualong One (HPR1000) في موقع فوكينغ – وكان توصيله بالشبكة في كانون الثاني/يناير، والمفاعل Hongyanhe-6 في مقاطعة لياوننغ – وهو مفاعل ماء مضغوط من الجيل الثالث من طراز ACPR-1000 تبلغ قدرته الإجمالية 1061 ميغاواط (كهربائي) – وكان توصيله بالشبكة في أيار/مايو. وفي جمهورية كوريا، وُصل بالشبكة في حزيران/يونيه مفاعل ماء مضغوط من طراز APR-1400 بقدرة 1340 ميغاواط (كهربائي) في محطة هانول للقوى النووية.

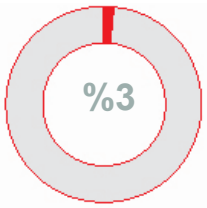
9- ووُصِّل بالشبكة الكهربائية في آذار/مارس مفاعل مورَّد من الصين من طراز HPR1000 في محطة كراتشي للقوى النووية في مقاطعة السند في جنوب باكستان. وبدأ في تشرين الأول/أكتوبر تشغيل الوحدة 3 في محطة براكة للطاقة النووية في الإمارات العربية المتحدة، لتضيف 1345 ميغاواط (كهربائي) من القدرة النووية. ووُصِّل بالشبكة الكهربائية في آذار/مارس في فنلندا مفاعل الماء المضغوط الأوروبي Olkiluoto-3 الذي تبلغ قدرته 1600 ميغاواط (كهربائي).

10- وفي نهاية عام 2022، كان مجموع قدرة المفاعلات قيد التشييد (وعددها 58 مفاعلاً) في 18 بلداً يبلغ 59,3 غيغاواط (كهربائي). وقد ظلَّت القدرة النووية قيد التشييد ثابتة إلى حد كبير في السنوات الأخيرة، إلا في آسيا التي تشهد نمواً مستمراً في هذا الصدد، حيث وُصِّل بالشبكة الكهربائية 55 مفاعلاً بقدرة تشغيلية تبلغ 56,1 غيغاواط (كهربائي) منذ عام 2012.

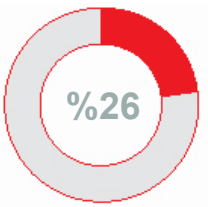
11- ومن مجمل القدرة التشغيلية التي توفرها المفاعلات العاملة حول العالم، هناك نسبة قدرها نحو 66% (258,7 غيغاواط (كهربائي) من 291 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي على 30 عاماً، ونسبة تفوق 26% (101,5 غيغاواط (كهربائي) من 128 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي على 40 عاماً، ونسبة قدرها 3% (11 غيغاواط (كهربائي) من 13 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي على 50 عاماً. وهذا التقادم الذي يشهده أسطول المفاعلات العاملة يبرز الحاجة إلى إنشاء قدرات نووية جديدة أو الارتقاء بالقدرات القائمة لتعويض الحالات المخطط لها للسحب من الخدمة والمساهمة في الاستدامة وأمن الطاقة العالمي والأهداف المتعلقة بتغير المناخ. وتستثمر الحكومات وهيئات المرافق العامة والجهات المعنية الأخرى في برامج التشغيل الطويل الأجل وإدارة التقادم في عدد متزايد من المفاعلات لضمان التشغيل المستدام والانتقال السلس إلى مستويات القدرة الجديدة.



في نهاية 2022، كانت هناك
قدرة إجمالية قدرها
59,3 غيغاواط (كهربائي)
58 مفاعلاً
قيد التشييد
في 18 بلداً



11 غيغاواط (كهربائي)
13 مفاعلاً
قيد التشغيل
لأكثر من 50 سنة



101,5 غيغاواط (كهربائي)
128 مفاعلاً
قيد التشغيل
لأكثر من 40 سنة

258,7 غيغاواط (كهربائي)
291 مفاعلاً
قيد التشغيل
لأكثر من 30 سنة

12- وحتى مع تقادُم الأسطول، تظلُّ مفاعلات القوى النووية العاملة تظهر مستويات عالية من الموثوقية والأداء بصفة عامة. ومُعامل الحمل، الذي يُعرف أيضاً باسم مُعامل القدرة، هو مقدار إنتاج المفاعل الفعلي من الطاقة مقسوماً على إنتاجه من الطاقة في حال تشغيله بمستوى قدرته المرجعي طوال السنة. ويشير ارتفاع قيمة مُعامل الحمل إلى جودة الأداء التشغيلي.

الاتجاهات

13- شـــهدت القدرة على توليد القوى النووية نمواً مطرداً على مدى العقد الماضـــي، بزيادة قدرها 20,3 غيغاواط (كهربائي) بين عامي 2012 و2022. وقد وُصِّل بالشبكة الكهربائية خلال هذه الفترة 68 مفاعلاً بقدرة إجمالية تبلغ 67,8 غيغاواط (كهربائي). وجاء أكثر من 83% من هذه الزيادة في القدرة في آسـيا، التي شـهدت توصـيل 55 مفاعلاً بالشـبكة الكهربائية بقدرة إجمالية تبلغ 56,2 غيغاواط (كهربائي). ووفقاً للتقارير المقدَّمة إلى الوكالة، فقد أنتج أســطول مفاعلات القوى النووية في عام 2022 قرابة 2486,8 تيراواط-ســاعة من الكهرباء القابلة للتوريد المنخفضة الانبعاثات.

14- وقد أدَّت أزمة الطاقة في عام 2022 إلى تعليق تنفيذ بعض القرارات المتعلقة بإغلاق المفاعلات (في بلجيكا والســويد والولايات المتحدة الأمريكية)، مما حدا بالجهات المشــغلة والهيئات الرقابية إلى تنفيذ إجراءات لضمان الأمان والموثوقية في التشغيل الطويل الأجل.

ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة

الحالة

15- من بين الدول الأعضـــاء التي أعربت عن اهتمامها بالأخذ بالقوى النووية، والبالغ عددها 50 دولة عضـــواً، هناك 24 دولة في مرحلة ســـابقة لاتخاذ القرار ولا تزال تنفِّذ أنشـــطة تخطيطية. أمَّا البلدان الســـتة والعشرون المتبقية فتسعى إلى بدء الأخذ بالقوى النووية، وتنقسم إلى فئتين متمايزتين:

- 16 بلداً في مرحلة اتخاذ القرار – وهي البلدان التي تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية، بما في ذلك البلدان التي تجري دراسات جدوى تمهيدية أو تعمل بالفعل على إعداد البنية الأساسية دون أن تكون قد اتَّخذت قراراً بعدُ (إثيوبيا، وإندونيسيا، وإستونيا، وأوغندا، وتايلند، وتونس، والجزائر، وزامبيا، وسري لانكا، والسلفادور، والسنغال، والسودان، والفلبين، وكازاخستان، والمغرب، والنيجر).

- 10 بلدان في مرحلة ما بعد اتِّخاذ القرار – وهي البلدان التي اتخذت قرارها وتعمل على تشـــييد البنية الأساسية، أو وقعت عقداً وستشرع في التشييد في المستقبل القريب أو شرعت فيه بالفعل (الأردن، وأوزبكســـتان، وبنغلاديش، وبولندا، وتركيا، وغانا، وكينيا، ومصـــر، والمملكة العربية الســـعودية، ونيجيريا).

16- وفي بنغلاديش، يجري العمل على تشييد أول محطة للقوى النووية، ومن المقرر تسليم الوقود إلى الموقع في عام 2023، على أن يبدأ التشغيل التجاري للوحدتين في السنوات المقبلة. واستمر في عام 2022 تشييد أربع وحدات في محطة أكويو للقوى النووية في تركيا. ومن المتوقع إدخال الوحدات الأربع في الخدمة في الفترة 2023–2026. وبدأ صبُّ الخرسانة لتشييد الوحدة 1 في محطة الضبعة النووية لتوليد الكهرباء في مصر في تموز/يوليه والوحدة 2 في تشرين الثاني/نوفمبر 2022. وتقدَّمت هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء أيضاً بطلب رخصة تشييد الوحدتين 3 و4 في تموز/يوليه 2021. وتتواصل أعمال تجهيز الموقع للتشييد. وتواصل كلتا المنظمتين الرئيسيتين المعنيتين (أي هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء وهيئة الرقابة النووية والإشعاعية المصرية) العمل على تنمية قدراتهما المؤسسية بناءً على احتياجات البرنامج. وفي بولندا، انتهت عملية اختيار التكنولوجيا والبائع لتشييد مفاعلات ماء مضغوط لتوفير قدرة نووية إجمالية بين 6000 و9000 ميغاواط (كهربائي) بحلول عام 2042.

17- وصدرت في المملكة العربية السعودية مواصفات تقديم العطاءات لشراء أول وحدتين من وحدات محطات القوى النووية بقدرة بين 1000 و1600 ميغاواط (كهربائي). وبدأ الأردن إجراء دراسة جدوى لتحديد التكنولوجيا المفضلة والبائع، ولاتخاذ قرار بالاستثمار في استخدام المفاعلات النمطية الصغيرة لتوليد الكهرباء وتحلية مياه البحر. ويُخطط لإصدار مواصفات تقديم العطاءات لمشروع المفاعلات النمطية الصغيرة في عام 2026. وواصلت غانا العمل على إرساء البنية الأساسية الوطنية لإنشاء برنامج للقوى النووية، بما في ذلك مواصلة تنمية قدرات المنظمات الرئيسية المعنية. ووسعت غانا نطاق خيارات تكنولوجيا المفاعلات التي تدرسها ليشمل المفاعلات النمطية الصغيرة، وقد تلقت ردوداً من خمسة بائعين على طلب إبداء الاهتمام بإنشاء نحو 1000 ميغاواط (كهربائي) من القدرة النووية. ويُعتزم أن يبدأ تشييد أول محطة للقوى النووية في عام 2023 على أن يكون الإدخال في الخدمة في عام 2029. وأعلنت كينيا أنَّها سوف تنظر في تشييد مفاعل بحوث ومفاعلات نمطية صغيرة بدلاً من محطات للقوى النووية من الحجم الكبير. وفي أوزبكستان، بدأت أعمال تحديد خصائص المواقع والترخيص لمحطات للقوى النووية بقدرة إجمالية منشأة قدرها 2400 غيغاواط (كهربائي). ويُعتزم إدخال أول محطة للقوى النووية في الخدمة في الفترة بين عامي 2026 و2030. ووُقعت في عام 2022 ورقة لإبداء الموقف الوطني إزاء إنشاء برنامج للطاقة النووية في الفلبين، بناءً على الدراسة التي أجرتها الحكومة. ومهَّد هذا القرار الطريق أمام إجراء مزيد الدراسات وتقييم الخيارات المتاحة بين المفاعلات الكبيرة الحجم، بما في ذلك إعادة تأهيل محطة باتان للقوى النووية، أو المفاعلات النمطية الصغيرة. وتنظر إستونيا في الاعتماد على المفاعلات النمطية الصغيرة في برنامجها للقوى النووية، وأعدَّت المنظمة المنفذة للطاقة النووية تقريراً مؤقتاً لفائدة الحكومة، قيَّمت فيه الشروط اللازمة لإنشاء برنامج للقوى النووية قائم على المفاعلات النمطية الصغيرة وجدوى ذلك. وفي العديد من هذه البلدان، يمثِّل الأخذ بالقوى النووية في مزيج الطاقة مساهمة كبيرة صوب تحقيق أهدافها فيما يتعلق بالتخفيف من حدة تغير المناخ. وأدرجت مجموعة متعددة من هذه البلدان (الأردن وتركيا ومصر) القوى النووية في مساهماتها محددة وطنياً المقدمة في إطار اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ بمقتضى اتفاق باريس.

18- وفي عام 2022، أوفدت الوكالة بعثة واحدة في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية (خدمة INIR) استضافتها سري لانكا (المرحلة 1). وتلقت الوكالة أيضاً طلبات من إستونيا لاستضافة بعثة في إطار المرحلة 1 من خدمة INIR، ومن كازاخستان لاستضافة بعثة متابعة في إطار المرحلة 1 من خدمة INIR، ومن تركيا لاستضافة بعثة في إطار المرحلة 3 من خدمة INIR. وفي كانون الأول/ديسمبر 2021، تلقت الوكالة طلباً من بنغلاديش لاستضافة بعثة في إطار المرحلة 3 من خدمة INIR، ستُنفَّذ في أوائل عام 2024. وبالإضافة إلى ذلك، هناك 15 دولة عضواً لديها خطط عمل متكاملة نشطة، واستؤنفت الأنشطة في إطارها مع تخفيف القيود المتعلقة بجائحة كوفيد-19.

الاتجاهات

19- بحلول عام 2035، قد يزيد عدد البلدان المشغلة بنسبة تقترب من 30% بانضمام 10–12 بلداً جديداً إلى صفوف البلدان المشغلة لمحطات قوى نووية والبالغ عددها حاليًّا 32 بلداً. وتتطلب هذه الزيادة الكبيرة مواصلة تعزيز جاهزية البنية الأساسية لدى تلك البلدان بدعم من الوكالة لضمان النشر المسؤول.

20- ومن التطورات التكنولوجية التي تجذب اهتمام واضعي الخطط والسياسات في مجال الطاقة أنَّ هناك مجموعة متعددة من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة الأولى من نوعها التي يُتوقع توافرها ونشرها بحلول عام 2030. ونتيجةً لذلك، فهناك عدَّة بلدان مستجدة أخذت المفاعلات النمطية الصغيرة في الحسبان عند النظر في الاعتبارات التكنولوجية أو تواصل رصد التطورات، بما في ذلك بلدان مستجدة مثل الأردن وإستونيا وإندونيسيا وأوغندا وبولندا وزامبيا والسودان وغانا والفلبين وكينيا والمملكة العربية السعودية، وبلدان متوسعة مثل بلغاريا وجنوب أفريقيا والجمهورية التشيكية ورومانيا. والدافع وراء ذلك الاهتمام هو التقدم الذي تشهده تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة والمزايا التي يمكن لتلك المفاعلات أن تكفلها مقارنة بمحطات القوى النووية الكبيرة الحجم، مثل انخفاض التكاليف الرأسمالية الأولية، وإمكانية الاستخدام في الشبكات الكهربائية الأصغر حجماً والتطبيقات غير الكهربائية، وإمكانيات توسيعها عن طريق إضافة وحدات نمطية.

بحلول عام 2035
قد يشهد عدد البلدان المشغلة
زيادة بنسبة قدرها نحو 30%
مع انضمام **10-12** بلداً جديداً
للبلدان المشغِّلة لمحطات القوى النووية.

21- وفي الوقت نفسه، أحرزت الدول الأعضاء العشر التي تستهلُّ برامجها للقوى النووية بالاستناد إلى محطات قوى نووية تطوُّرية تقدُّماً كبيراً في مساعيها، مما يدلُّ على استمرار الاهتمام بتكنولوجيا محطات القوى النووية الكبيرة الحجم. وتفيد الدول الأعضاء باعتزامها استخدام التصميم المرجعي في التشغيل والاستفادة من الخبرات التي اكتسبتها الهيئات الرقابية والجهات المشغلة في بلد المنشأ.

22- وبصرف النظر عما إذا كان برنامج القوى النووية قائماً على محطات القوى النووية الكبيرة الحجم أو المفاعلات النمطية الصغيرة، فإنَّ المسائل المتصلة بالبنية الأساسية للقوى النووية على الصعيد الوطني، بما يشمل متطلبات الأمان النووي والأمن النووي والضمانات، ينبغي أن تُعالج على النحو المناسب.

ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية

الحالة

23- وتركِّز الجهود العالمية لتطوير تكنولوجيا القوى النووية على نشر المفاعلات المتقدمة، بما فيها المفاعلات الابتكارية مثل المفاعلات النمطية الصغيرة، وكذلك على التوسُّع في استخدام القوى النووية ليشمل التطبيقات غير الكهربائية مثل تدفئة الأحياء السكنية وإنتاج الهيدروجين وتحلية مياه البحر. وهناك أيضاً جهات معنية غير تقليدية تبدي اهتماماً واضحاً باستخدام القوى النووية لإزالة الكربون من قطاع الصناعة، لاسيما في الأنشطة الصناعية التي تتسم بكثافة استهلاك الطاقة. وتتطلع الجهات المعنية في بعض أنحاء العالم إلى تشغيل تطبيقات القوى النووية مثل محطات القوى النووية العائمة بنمط التوليد المشترك، واستخدام المفاعلات المتناهية الصغر في التطبيقات ذات الطابع الخاص (في المناطق النائية والجزر الصغيرة، وللحلول محل مولدات الديزل، وما إلى ذلك)، واستغلال القوى النووية في التطبيقات الفضائية. وبالنظر إلى الانتشار المتزايد لمصادر الطاقة المتجددة المتقطعة، مما يتسبَّب في عدم استقرار الشبكات الكهربائية، تكتسب المفاعلات المتقدمة زخماً بوصفها حلًّا نظيفاً لإضفاء المرونة على الشبكات الكهربائية. وأخيراً، فمع تطوُّر القدرات الحاسوبية وأدوات تحليل

البيانات، يشرع قطاع الصناعة النووية في الأخذ بالتقنيات القائمة على الذكاء الاصطناعي، ولا سيما تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق، من أجل تجديد نظم التشغيل ونظم الصيانة القصيرة الأجل والطويلة الأجل.

الاتجاهات

24- بالإضافة إلى الجهود التي تبذلها الدول الأعضاء في تطوير تكنولوجيا المفاعلات المتقدمة، هناك عدد متزايد من الشركات الخاصة والمشاريع الناشئة التي تعمل على تطوير نماذج جديدة للمفاعلات وتجتذب التمويل من القطاعين العام والخاص. وتعتمد هذه الشركات نماذج أعمال ثورية ومنهجيات ابتكارية، مثل استخدام التوائم الرقمية وتقنيات التصنيع المتقدمة وتقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في طائفة واسعة من الأنشطة التي يمكن أن تحدث تحوُّلاً في طريقة تصميم النظم النووية وترخيصها وتشغيلها. وينطوي الذكاء الاصطناعي على إمكانية تحسين إدماج الحسابات والبيانات التجريبية التي تُجمع من تجارب صغيرة النطاق أو من أجهزة الاستشعار أثناء التشغيل. ويتيح هذا الإدماج، في صيغته المثلى، للمتخصصين في الحوسبة العلمية وضع نماذج فيزيائية على درجة غير مسبوقة من الدقة، ويساعد العلماء التجريبيين على التقليل إلى أدنى حد من تكاليف وعدد التجارب التي يجرونها للتحقُّق من النظم الأولى من نوعها. وهو يمكِّن أيضاً مشغِّلي النظم من رصد حالات النظم التي لا يمكن رصدها مباشرة بالأجهزة. ويمكن تطبيق منهجيات وأدوات الذكاء الاصطناعي لإجراء تحليل تنبؤي قائم على علم الفيزياء يمكن استخدامه في الارتقاء بالتصميم والصنع والتشييد إلى المستوى الأمثل، وتحقيق الفعالية في العمليات التشغيلية، وتحسين الصيغ الجديدة من تصاميم المفاعلات، والكشف عن الأعطال بالاستعانة بالنماذج، ووضع نظم التحكُّم المتقدمة. ويمكن للذكاء الاصطناعي أيضاً أن يحقق فوائد إضافية للصناعة النووية من حيث الموثوقية والأمان والكفاءة الإجمالية.

ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء

الحالة

25- ولا تزال المفاعلات المبرَّدة بالماء تؤدِّي دوراً جوهريًّا في الصناعة النووية التجارية، حيث بلغ مجموع أعمارها التشغيلية أكثر من 19 000 سنوات تشغيل المفاعلات، وهي تستأثر حاليًّا بنسبة تفوق 95% من مجمل مفاعلات القوى المدنية العاملة في العالم. ومن بين جميع المفاعلات النووية التي كانت قيد التشييد حتى نهاية عام 2022 والبالغ عددها 57 مفاعلاً، كان هناك 54 مفاعلاً مبرَّداً بالماء الخفيف أو الثقيل. وشملت أهم التطورات التي شهدها عام 2022 في قطاع المفاعلات المبرَّدة بالماء توصيل مفاعلات جديدة بالشبكة الكهربائية في الإمارات العربية المتحدة وباكستان وجمهورية كوريا والصين وفنلندا.

26- وهناك أيضاً أشكال متقدِّمة من المفاعلات القائمة المبرَّدة بالماء قيد النظر والدراسة والتنفيذ بصورة متزايدة في عدَّة بلدان، بهدف النشر التدريجي لدورات وقود متقدِّمة مغلقة جزئيًّا أو كليًّا وتتسم بقدر أكبر من الكفاءة. ولا تزال عدة دول أعضاء تُجري أنشطة بحث وتطوير بشأن المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج. واكتمل

التصميم النظري لكلٍّ من المفاعل الكندي المبرَّد بالماء فوق الحرج، وهو مفهوم لمفاعل قائم على أنابيب الضغط ومهدَّأ بالماء الثقيل، والمفاعل الصيني CSR1000. وفي أوروبا، أُعدَّ المفهوم الخاص بمفاعل الماء الخفيف العالي الأداء، وأُنجزت بالتعاون مع الصين مراحل التخطيط والتصميم والتحليل الخاصة بمرفق لاختبار تأهيل الوقود داخل المفاعلات. وفي الاتحاد الروسي، هناك دراسات مفاهيمية جارية بشأن مفاعلات قوى مبتكرة مبرَّد ومهدَّأ بالماء عند مستويات ضغط فوق حرجية، بما يشمل إمكانية أن يكون قلب المفاعل قائماً على طيف النيوترونات السريعة. وتركِّز التصاميم الجديدة على صيغ صغيرة نمطية من تصاميم المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج، مع التشديد على الأمان والأمن والجوانب الاقتصادية والاستدامة.

27- وتعمل الدول الأعضاء بدأب من أجل تركيز جهودها على تطوير نظم طاقة متكاملة تجمع بين مصادر الطاقة المتجددة – لا سيما الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وكلاهما من المصادر المتقطعة للطاقة – ومحطات القوى النووية لتوفير أحمال الكهرباء الأساسية وتعزيز استقرار الشبكة الكهربائية، وكذلك لأغراض التطبيقات غير الكهربائية.

الاتجاهات

28- تتراوح قدرة المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء الجاري تشييدها حاليًّا بين 1000 و1700 ميغاواط (كهربائي) للوحدة الواحدة، ويُستهدف تحقيق زيادات أكبر في المفاعلات المتطوّرة المبرَّدة بالماء الكبيرة الحجم التي لا تزال في مرحلة التصميم. وهناك اتجاه مستمر بين صفوف الدول الأعضاء نحو تعدُّد الوحدات في الموقع الواحد سواء كانت تلك الوحدات من نوع واحد أو أنواع متعددة من المفاعلات. ومن بين البلدان التي لا يوجد لديها الآن محطات قوى نووية عاملة، ينظر نحو 30 بلداً في تشييد وحدات مفاعلات مبرَّدة بالماء من الحجم الكبير أو الصغير.

29- ويشكِّل الطلب المستمر والمتزايد على توليد الكهرباء بطرق مأمونة ونظيفة وموثوقة وفعالة من حيث التكلفة حافزاً قويًّا يدفع الجهات المشغلة لتمديد العمر التشغيلي لمحطات القوى النووية بعدة عقود من خلال تحديث المحطات وتحسين المعدات والنظم الرئيسية لدعم التشغيل الطويل الأجل.

ألف-4-2- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية والمفاعلات المتناهية الصغر

الحالة

30- وهناك ما يزيد على 80 من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة من الخطوط التكنولوجية الرئيسية في مراحل مختلفة من التطوير والنشر في 18 دولة عضواً. وقد شهدت السنوات الثلاث الأخيرة تحقيق إنجازات كبيرة على صعيد النشر. ووُصلت محطة أكاديميك لومونوسوف العائمة للقوى النووية في الاتحاد الروسي، التي تضمُّ وحدتين نمطيتين من مفاعلات الماء المضغوط من طراز KLT-40S، بالشبكة الكهربائية في كانون الأول/ديسمبر 2019، وبدأ تشغيلها التجاري في أيار/مايو 2020، بقدرة توليد قدرها 70 ميغاواط (كهربائي). وفي الصين، وفي محاولة لتحقيق تكنولوجيا مبتكرة لأول مفاعل فائق الحرارة، وُصِّل المفاعل الإيضاحي

المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع بالشبكة الكهربائية في كانون الأول/ديسمبر 2021، وبلغ المستوى الأولي لقدرته الكاملة البالغ 210 ميغاواط (كهربائي) في كانون الأول/ديسمبر 2022.

31- وفي الأرجنتين، وصل المفاعل CAREM-25، المستند إلى تصميم مفاعل ماء مضغوط متكامل قائم على الدوران الطبيعي، إلى مرحلة متقدمة من التشييد، ومن المتوقع أن يبلغ مستوى الحرجية للمرة الأولى في عام 2026. وبدأ في الصين في تموز/يوليه 2021 تشييد المفاعل ACP100، المعتزم أن يكون مفاعلاً متعدد الأغراض، ومن المخطط أن يبدأ تشغيله التجاري بحلول نهاية عام 2026. ويجري تشييد مفاعل نمطي صغير بالاستناد إلى تصميم المفاعل RITM-200N في ياكوتيا بالاتحاد الروسي؛ وحصل المشروع على الموافقة البيئية ويُتوقع أن يبدأ تشغيله التجاري في عام 2028. وبدأ في آب/أغسطس 2022 تشييد أول محطة عائمة للقوى النووية بالاستناد إلى تصميم المفاعل RITM-200، ويجري العمل في الاتحاد الروسي على تطوير وحدة عائمة محسَّنة لتوليد القوى بالاستناد إلى تصميم المفاعل RITM-400. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، وافقت الهيئة الرقابية النووية في تموز/يوليه 2022 على شهادة الاعتماد الخاصة بتصميم مبدئي لمحطة قوى قدمته شركة NuScale Power. وقدمت الشركة في كانون الأول/ديسمبر 2022 طلب الموافقة على التصميم المعياري لوحدة نمطية معززة القدرة لتوليد القوى ضمن نسق من ست وحدات نمطية، على أن يجري إيضاح ذلك التصميم عمليًّا في مختبر أيداهو الوطني في عام 2029. وتعمل فرنسا على تصميم لمفاعل ماء مضغوط متكامل يحمل اسم NUWARD، لتوليد 340 ميغاواط (كهربائي) من وحدتين منفصلتين قدرة كلٍّ منهما 170 ميغاواط (كهربائي)، بغية التمكين من التشغيل المرن. وسوف يبدأ صب الخرسانة لتشييد أول مفاعل من طراز NUWARD في فرنسا بحلول عام 2030. وقد وقع الاختيار على المفاعل NUWARD ليكون المفاعل النمطي الصغير المستخدم كدراسة حالة في إطار استعراض رقابي أوروبي مشترك مبكر تقوده هيئة الأمان النووي في فرنسا ويشارك فيه المكتب الحكومي للأمان النووي في الجمهورية التشيكية وهيئة الأمان الإشعاعي والنووي في فنلندا. وفي المملكة المتحدة، يجري مكتب الرقابة النووية تقييماً عاماً لتصميم المفاعل النمطي الصغير الخاص بشركة رولز رويس، وهو مفاعل ماء مضغوط ثلاثي الحلقات مصمم لتوليد 470 ميغاواط (كهربائي)، ويُخطط للبدء في التشييد في عام 2026. وهناك أيضاً تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة مستندة إلى تكنولوجيا مفاعلات الماء المغلي القائمة على الدوران الطبيعي. وتعمل الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة وهيئة الأمان النووي الكندية على استعراض رخصة لتشييد تطبيق للتصميم BWRX-300، وهو تصميم لمفاعل بقدرة 300 ميغاواط (كهربائي) يرجع منشؤه إلى الولايات المتحدة الأمريكية، ويُخطط لنشره في محطة دارلنغتون للقوى النووية في أونتاريو بكندا وفي موقع كلينش ريفر في ولاية تينيسي بالولايات المتحدة الأمريكية. وتشير خطة العمل الكندية الخاصة بالمفاعلات النمطية الصغيرة أيضاً إلى اعتزام نشر المفاعل النمطي المتناهي الصغر، وهو مفاعل متناهي الصغر قائم على تكنولوجيا المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز، لإنتاج 15 ميغاواط (حراري) لأغراض التوليد المشترك للكهرباء والحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية في مختبرات تشوك ريفر. وفي جمهورية كوريا، يخضع تصميم المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النظم (مفاعل SMART) بقدرة 110 ميغاواط (كهربائي) لعملية الترخيص للحصول على الموافقة المشتركة على التصميم المعياري بالتعاون مع المملكة العربية السعودية. وبدأ تحالف كوري العمل على تطوير تصميم مفاعل نمطي صغير ابتكاري يعمل بالماء المضغوط بقدرة 170 ميغاواط (كهربائي)، لتحسين الأمان والجوانب الاقتصادية.

32- وتشمل الخطوط التكنولوجية المعتمدة لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة أيضاً مفاعلات الأملاح المصهورة. وهناك مجموعة متعددة من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة التي بلغت مراحل مختلفة من التطوير ويجري العمل عليها في إندونيسيا والدانمرك والصين وفرنسا وكندا وهولندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان.

الاتجاهات

33- ما فتئ الاهتمام يتزايد بين صفوف الدول الأعضاء بالمفاعلات النمطية الصغيرة وتطبيقاتها. وهناك جهود كبيرة جارية على المستويين الصناعي والرقابي من أجل تسير تطوير التصاميم والتبكير بنشرها. ولا تزال الاتجاهات الرئيسية تميل إلى مجالات التكنولوجيا الأكثر نضجاً أو جاهزية، لا سيما فيما يخصُّ المفاعلات المتكاملة المبرَّدة بالماء والمفاعلات النمطية المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز. وحتى عام 2030 تقريباً، ستكون المفاعلات النمطية الصغيرة التي تستخدم هذه التكنولوجيات في صدارة عمليات الترخيص، وتليها تصاميم المفاعلات الابتكارية التي تستخدم مبرِّدات غير الماء. واستمرت في عام 2022 أنشطة تطوير التكنولوجيا المتعلقة بمجموعة فرعية من المفاعلات النمطية الصغيرة تُعرف باسم المفاعلات المتناهية الصغر في الاتحاد الروسي والجمهورية التشيكية وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. وتُصمَّم المفاعلات المتناهية الصغر لتوليد القوى بقدرة أقل تصلُ إلى 10 ميغاواط (كهربائي)، ومن المتوخَّى أن تقدِّم الخطوط التكنولوجية الرئيسية من هذه المفاعلات الحلَّ الأمثل لتوفير التوليد المشترك للحرارة والكهرباء في المناطق النائية والجزر الصغيرة و/أو أن تحل محلَّ مولدات الديزل.

34- وزاد عدد البلدان التي تعمل حاليًّا على تطوير تصاميم مفاعلات بحرية. وتواصل جمهورية كوريا تطوير الوحدة BANDI-60، وهي وحدة عائمة لتوليد القوى قائمة على مفاعل ماء مضغوط للتوليد بقدرة 60 ميغاواط (كهربائي). وتعمل شركة ناشئة في مجال تصميم المفاعلات في الدانمرك على تطوير مفاعلات الأملاح المصهورة الصغير الحجم لإنتاج 100 ميغاواط (كهربائي) تقريباً. وتستهدف المفاعلات النمطية الصغيرة البحرية مصممة أسواقاً ذات طابع خاص، بما يشمل إيصال توزيع الكهرباء والإمداد بالحرارة للمجتمعات المحلية النائية، وتحلية مياه البحر، ونظم الطاقة المختلطة بالتعاون مع قطاعي الصناعة البحرية وبناء السفن.

35- وفي ظلِّ هذا السيناريو الذي يتطور بسرعة بالغة، تعمل منصة الوكالة المعنية بالمفاعلات النمطية الصغيرة، التي أنشأها المدير العام للوكالة في عام 2021، على توفير مجمَّع مركزي موحد للدول الأعضاء وغيرها من الجهات المعنية المهتمة بتطوير المفاعلات النمطية الصغيرة ونشرها والإشراف عليها، حرصاً على أن يكون الدعم المقدم من الوكالة منسَّقاً ومتسقاً، بما في ذلك الدعم المقدم من خلال البوابة الإلكترونية المطلقة حديثاً والخاصة بالمفاعلات النمطية الصغيرة.

ألف-4-3- المفاعلات السريعة

الحالة

36- في عام 2022، كانت هناك خمسة مفاعلات سريعة مبرَّدة بالصوديوم قيد التشغيل في ثلاث دول أعضاء، بواقع ثلاث مفاعلات في الاتحاد الروسي، ومفاعل واحد في الصين، ومفاعل واحد في الهند. وتعمل الهند أيضاً على إدخال مفاعل جديد في الخدمة، هو المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة 500 ميغاواط (كهربائي)، في حين تعمل الصين على تشييد وحدتين من وحدات المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم من طراز CFR-600. وفي حين أنَّ المفاعلات الخمسة العاملة والمفاعلات الثلاثة الجاري تشييدها كلها مبرَّدة بالصوديوم السائل، فإنَّ تكنولوجيا مبرِّدات الفلزات السائلة تجتذب اهتماماً متزايداً، وخصوصاً في مجال المفاعلات النمطية الصغيرة. ويواصل الاتحاد الروسي تشييد المفاعل BREST-OD-300، وهو مفاعل إيضاحي سريع مبرَّد بالرصاص بقدرة 300 ميغاواط (كهربائي) (الشكل ألف-3) ومفاعل البحوث المتعدد الأغراض القائمة على النيوترونات السريعة. وهناك أيضاً عدة تكنولوجيات واعدة قائمة على مبرِّدات أخرى، مثل الهليوم

والأملاح المصهورة، وهي قيد التطوير في عدة بلدان. ومن بين مفاهيم المفاعلات الابتكارية الست التي وضعها المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات، هناك ثلاثة مفاهيم قائمة على نظم المفاعلات السريعة (مبرَّدة بالصوديوم، وبفلز ثقيل سائل، وبالهليوم)، واثنان قائمان على مفاعلات يمكن تشغيلها في طيف النيوترونات السريعة أو المعتدلة السرعة (مبرَّدة بالأملاح المصهورة أو بالماء فوق الحرج).

الشكل ألف-3- موقع المفاعل BREST-OD-300 في أيلول/سبتمبر 2022. (الصورة من: الشركة الحكومية الروسية للطاقة النووية (روزاتوم))

الاتجاهات

37- لا تزال المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم هي الخيار الرئيسي في أفق النشر في الأمد المتوسط؛ ويعمل الاتحاد الروسي على تطوير المفاعل BN-1200 الكبير الحجم بقدرة 1200 ميغاواط (كهربائي)، وتخطط الصين للمفاعل CFR-1000 بقدرة 1 غيغاواط (كهربائي)، وتعمل شركة TerraPower في الولايات المتحدة الأمريكية على تطوير المفاعل Natrium المقترن بتخزين الطاقة في الأملاح المصهورة، والذي يمكن أن تصل قدرته في ذروتها إلى 500 ميغاواط (كهربائي). ويمكن لمفاعل من طراز Natrium أن يحل محل محطة قوى نمطية تعمل بالفحم، كما يمكن تشغيله إلى جانب مصادر أخرى للطاقة المتجددة. وتعمل عدة بلدان على تطوير مفاعلات سريعة مبرَّدة بالرصاص: فهناك مفاعل شركة Westinghouse السريع المبرَّد بالصوديوم بقدرة 450 ميغاواط (كهربائي) في المملكة المتحدة–الولايات المتحدة الأمريكية، ومفاعل الإيضاح الأوروبي المتقدم السريع المبرَّد بالصوديوم (المفاعل ألفريد) بقدرة 120 ميغاواط (كهربائي) في إيطاليا–رومانيا، والمفاعل SEALER-55 في السويد، وعدة تصاميم لمفاعلات سريعة مبرَّدة بالرصاص من نوع المفاعلات النمطية الصغيرة في الصين. وتعمل شركة Newcleo، وهي شركة ناشئة تأسست في إيطاليا–المملكة المتحدة في أواخر عام 2021، على تطوير مفاعلين سريعين مبرَّدين بالرصاص، أحدهما بالغ الصغر (بقدرة 30 ميغاواط (كهربائي)) والآخر صغير (بقدرة 200 ميغاواط (كهربائي)). وفي حين أجلت فرنسا تطوير المفاعل التكنولوجي المتقدم المبرَّد بالصوديوم

لأغراض الإيضاح الصناعي، يتواصل الاضطلاع بأنشطة البحث والتطوير بشأن المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم ودورة الوقود الخاصة بها، وتعمل فرنسا على تطوير مفاعل سريع مبرَّد بالأملاح المصهورة يمكن تشغيله باستخدام دورة وقود قائمة على اليورانيوم–البلوتونيوم. ويضطلع الاتحاد الأوروبي بمشروع SAMOSAFER المعني بالمفاعلات السريعة المبردة بالأملاح المصهورة من أجل تطوير حواجز أمان جديدة وإيضاح فعاليتها لزيادة التحكم في سلوك هذه المفاعلات في ظروف الحوادث العنيفة.

ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

الحالة

نحو 70 من المفاعلات النووية
يجري استخدامها حاليًّا في
التطبيقات غير الكهربائية
بما يعادل أكثر من 2 تيراواط-ساعة
من الطاقة الكهربائية سنويًّا

38- ويُعدُّ التوليد المشترك للكهرباء والحرارة لأغراض التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية تكنولوجيا موثوقة ومثبتة الفاعلية يتزايد الاهتمام بها حول العالم كما تتزايد إمكانات تسويقها وتطويرها، بالنظر إلى أنَّ الحرارة النووية لا يُستخدم منها حاليًّا سوى قدر ضئيل. وفي الوقت الراهن يجري استخدام ما مجموعه نحو 70 مفاعلاً نوويًّا في التطبيقات غير الكهربائية، التي تتألف من مجموعة من الفئات العامة هي تحلية المياه، وتدفئة الأحياء السكنية، والحرارة اللازمة للمعالجة الصناعية، وإنتاج الهيدروجين. ويبلغ المعدل الإجمالي لاستخدام الحرارة النووية في هذه التطبيقات أكثر من اثنين تيراواط-ساعة من مكافئ الكهرباء سنويًّا. ويُستخدم معظم هذه المفاعلات النووية لتوفير التدفئة للأحياء السكنية، ويُستخدم نحو نصفها أيضاً لتوفير الحرارة للمعالجة الصناعية. وهناك نحو عشرة مفاعلات يجري استخدامها حاليًّا لتوفير الطاقة للتحلية النووية، وهناك عدد قليل من المفاعلات بصدد استهلال عمليات إيضاحية لإنتاج الهيدروجين على نطاق تجريبي.

39- واستهلت الصين مؤخراً برنامجاً كبيراً لتطوير استخدام الطاقة النووية في تدفئة الأحياء السكنية، لتنضم بذلك إلى مجموعة المستخدمين القائمين التي تشمل الاتحاد الروسي وأوكرانيا وبلغاريا والجمهورية التشيكية ورومانيا وسلوفاكيا وسويسرا وهنغاريا. وعقب بدء تشغيل شبكة تدفئة الأحياء السكنية الموصلة بمحطة هاييانغ للقوى النووية في مقاطعة شاندونغ في عام 2020، سيؤدي مشروع هونغيانهي، الذي استُهلَّ رسميًّا في عام 2022، إلى تلافي الانبعاثات التي تنتج عن كمية قدرها 100 12 طن من الفحم، فضلاً عن التقليل من انبعاثات الكبريت وثاني أكسيد الكربون والأتربة وأكسيد النيتروجين والرماد. وأُطلق أيضاً مشروع لإيضاح تدفئة الأحياء السكنية في محطة كينشان للقوى النووية في عام 2021 بمقاطعة تشجيانغ، بهدف استخدام الطاقة النووية في تدفئة مساحة قدرها 4 ملايين متر مربع بحلول عام 2025، بما يشمل الجزء الحضري الرئيسي من منطقة هايان وكامل مساحة بلدة شوبو.

40- وهناك عدد من البلدان التي لديها خطط لتنفيذ التحلية النووية، لتنضم إلى مصاف المستخدمين المخضرمين لهذه التكنولوجيا. فهناك عدة وحدات للتحلية يجري تشغيلها في الاتحاد الروسي واليابان باستخدام الطاقة المتأتية من محطات القوى النووية، في حين أنَّ الهند، التي تتمتع بخبرة ممتدة في تشغيل وحدات التحلية بالاقتران مع المفاعلات النووية، تخطط للتوسُّع في قدرات التحلية النووية في السنوات المقبلة.

41- وهناك عدة بلدان تنظر في إنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء أو الحرارة المستمدة من المفاعلات النووية، بما في ذلك الاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والسويد والصين وفرنسا وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. ويجري الاضطلاع بأنشطة للبحث والتطوير بشأن الجمع بين عمليات إنتاج الهيدروجين القائمة على الحرارة المرتفعة والمفاعلات المتقدمة (مثل المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع، الذي بدأ تشغيله مؤخراً في الصين)، وكذلك بين تلك العمليات والأسطول الحالي من المفاعلات. وعلى سبيل المثال، ففي الولايات المتحدة الأمريكية، هناك خمسة مشاريع مختلفة بشأن الجمع بين أجهزة التحليل بالكهرباء ومحطات القوى النووية القائمة؛ منها أربعة مشاريع تنطوي على التوصيل الكهربائي مع أجهزة للتحليل بالكهرباء عند درجات الحرارة المنخفضة، في حين سيعمل مشروع واحد، في محطة Prairie Island للقوى النووية، على استخدام الحرارة النووية لزيادة كفاءة إنتاج الهيدروجين (الشكل ألف-4). ويعتزم الاتحاد الروسي إيضاح إنتاج الهيدروجين النظيف في محطة كولا للقوى النووية، في حين أعلنت فرنسا أنها تهدف، بحلول عام 2030، للبدء في تشييد مفاعل نمطي صغير واستخدام الأسطول النووي القائم لإنتاج الهيدروجين النظيف.

الشكل ألف-4- محطة Prairie Island للقوى النووية في ولاية مينيسوتا بالولايات المتحدة الأمريكية، حيث تعمل شركة Xcel Energy وشركاؤها على نشر مشروع تجريبي لإنتاج الهيدروجين باستخدام جهاز لتحليل البخار المرتفع الحرارة بالكهرباء. (الصورة من: موقع Shutterstock)

الاتجاهات

42- يتزايد الاهتمام حول العالم بما تنطوي عليه الطاقة النووية من إمكانات توفير إمدادات الحرارة فضلاً عن الكهرباء. ويأتي ذلك تجاوباً مع الجهود المبذولة من أجل التصدي لتغير المناخ، وفي وقت تعاني فيه مناطق عديدة في العالم من زيادة تكاليف الوقود الأحفوري. وبالنظر إلى أنَّ معظم الانبعاثات الحالية يرجع منشؤها إلى

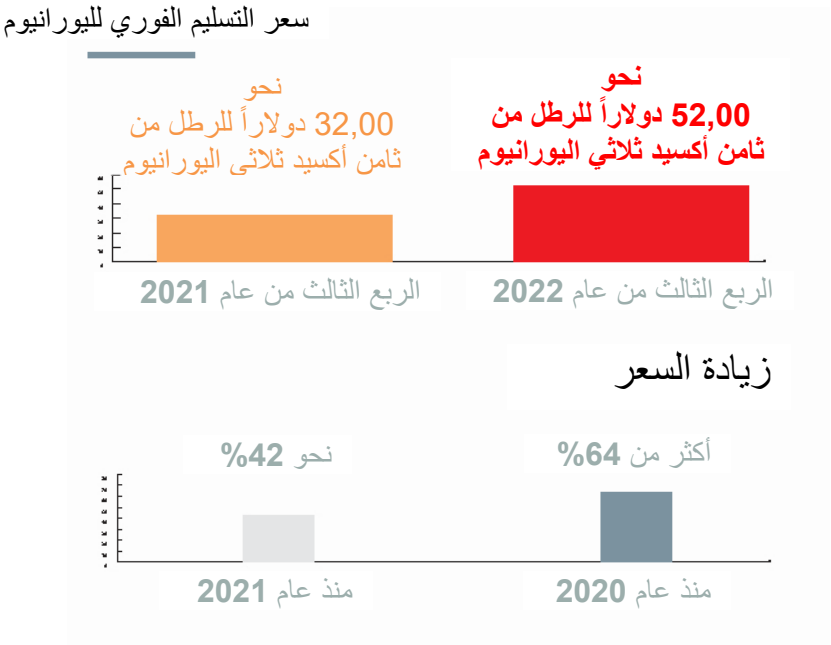
قطاعات غير قطاع توليد الكهرباء، وأنَّ الطاقة المستخدمة في التطبيقات غير الكهربائية تُستمد كلُّها تقريباً من الوقود الأحفوري، تحظى الطاقة النووية باهتمام خاص باعتبارها أحد المصادر المعدودة التي توفِّر كلًّا من الكهرباء والحرارة والخالية من الكربون في الوقت نفسه، والتي يمكن نشرها على نطاق واسع دون قيود جغرافية وتظلُّ متوفرة على مدار الساعة. وبالإضافة إلى ذلك، تطرح المفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات المتناهية الصغر إمكانات مثيرة للاهتمام بسبب صغر حجمها نسبيًّا، بالنظر إلى أنَّ العديد من مراكز الطلب على الحرارة ليست كبيرة بما يكفي بحيث تستفيد بفعالية من كميات الحرارة التي تولدها المحطات من فئة الغيغاواط. وأخيراً، تكفل بعض المفاعلات المتقدمة، مثل المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع، إمكانات فريدة فيما يتعلق بتوفير إمدادات الحرارة بدرجات مرتفعة، والتي يمكن أن تُستخدم بكفاءة بدورها في عدة تطبيقات صناعية.

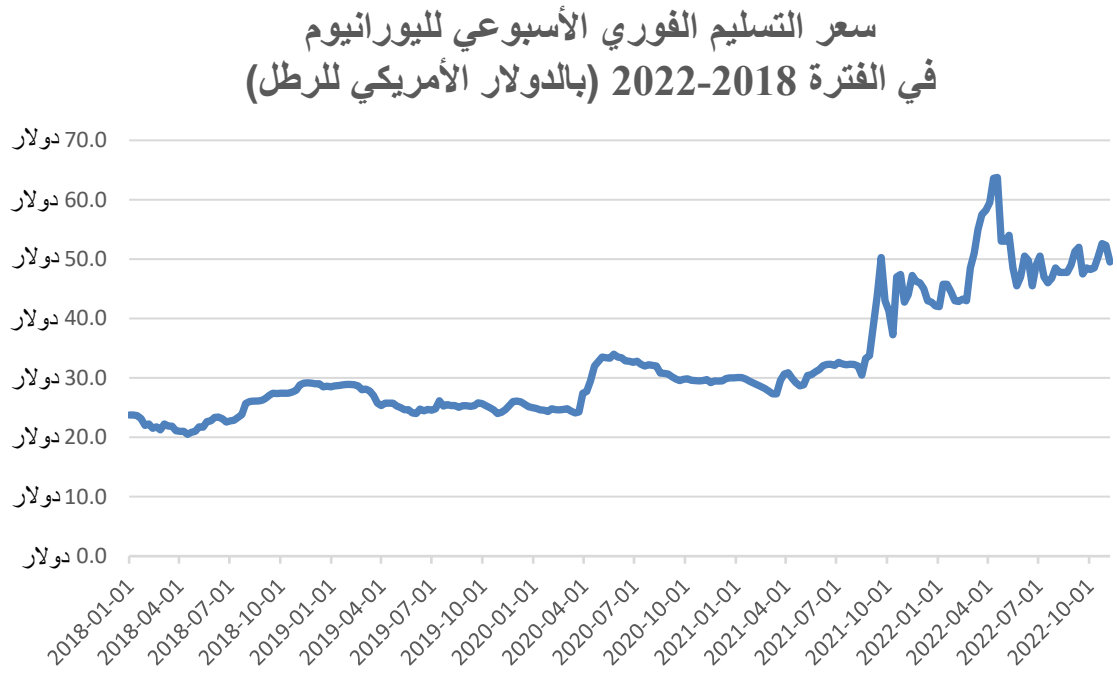
باء- دورة الوقود النووي

باء-1- المرحلة الاستهلالية

الحالة

43- في الربع الثالث من عام 2022، بلغ سعر التسليم الفوري لليورانيوم نحو 52,00 دولاراً للرطل من ثماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم. ويُعدُّ ذلك زيادة كبيرة مقارنة بالربع الثالث من عام 2021 عندما كان سعر التسليم الفوري لليورانيوم نحو 32,00 دولاراً للرطل من ثماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم. وبالإضافة إلى ذلك، فقد ارتفع سعر التسليم الفوري لليورانيوم بنحو 42% منذ عام 2021 وبنسبة تزيد عن 64% خلال العامين الماضيين (الشكل باء-1). وأدَّت الزيادة المستدامة في سعر التسليم الفوري لليورانيوم إلى إعادة تنشيط صناعة إنتاج اليورانيوم، وهناك مجموعة متعددة من المنتجين الأساسيين الذي يسعون لاستئناف عملياتهم التي كانت موضوعة قيد الرعاية والصيانة بسبب انخفاض سعر التسليم الفوري. ويشمل ذلك منجم 'مكارثر ريفر' في كندا ومنجم 'لانغر هاينريش' في ناميبيا.





الشكل باء-1- تطور سعر التسليم الفوري لليورانيوم منذ عام 2018. (المصدر: شركة UxC)

44- أعلنت كازاخستان، البلد الذي يتمتع بأعلى معدلات إنتاج اليورانيوم سنويًّا، أنها ستزيد من إنتاج عمليات النض الموقعي لديها من نحو 70% إلى 90% من القدرة الاسمية. كما أعلن منجم 'هانيمون' في أستراليا عن إعادة تشغيل منجم النض الموقعي ومرفق المعالجة التابعين له. وكان قطاع استكشاف اليورانيوم قد بلغ مستوى متدنياً في عام 2020، حيث شهد إنفاق ما يقرب من 39,2 مليون دولار أمريكي. في ضوء الإشارات الإيجابية التي شهدها سوق اليورانيوم في آخر سنتين، أخذ نشاط الاستكشاف يتزايد، حيث أُنفق نحو 71 مليون دولار أمريكي على استكشاف اليورانيوم في عام 2021.

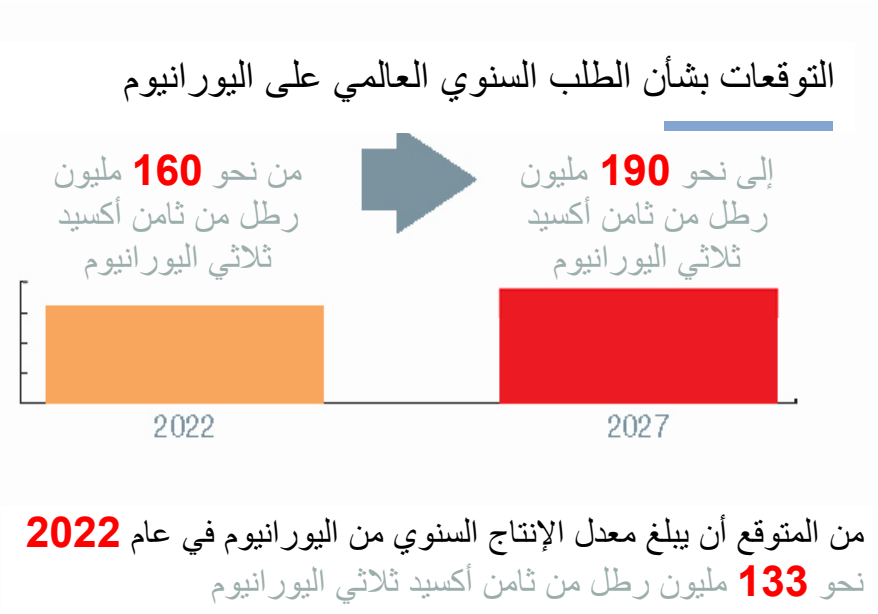
45- ويُعدُّ إنتاج الوقود النووي من التكنولوجيات الناضجة التي شهدت تقدماً مستمراً على مر السنين من خلال الأتمتة والرقمنة، وتقليل توليد النفايات التشغيلية، وتعزيز وقاية العاملين من الإشعاعات. وقد مكَّن ذلك التقدُّم من إدخال تحسينات على الاقتصاديات (تمديد دورات الوقود من 12 شهراً إلى 18 و24 شهراً، وبلوغ معدلات حرق أعلى)، والموثوقية (تقليل الأعطال المتصلة بالوقود، واستحداث تصاميم وقود جديدة لتقليص حجم قوس مجمعة الوقود إلى أدنى حد، وتحسين الأداء أثناء النشاط الزلزالي، والوقود المعزز بمواد مضافة، والتبطين والتغليف بكسوة مزدوجة، وزيادة مقاومة التآكل) والاستدامة (إعادة التدوير وإعادة التدوير المتعددة لوقود مفاعلات الماء الخفيف والمفاعلات السريعة). وفي الوقت الحالي، تُعتبر القدرات القائمة في جميع أنحاء العالم في مجال صنع الوقود النووي كافية لتلبية الطلب المتوقع على القوى النووية.

46- وتوجد في عدة دول أعضاء — بعضها يساهم في المشروع البحثي المنسَّق التابع للوكالة المعنون "Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels" (اختبار ومحاكاة أنواع الوقود المتقدمة التكنولوجيا والمتحملة للحوادث) — برامج بحث وتطوير جارية لنشر أنواع الوقود المتحملة للحوادث والمتقدمة التكنولوجيا وأنواع الوقود الابتكارية، باستخدام تكنولوجيات التصنيع المتقدمة مثل تكنولوجيات التصنيع بإضافة الطبقات (مثل استخدام أجهزة الطباعة الثلاثية الأبعاد لتشكيل كربيد سليكون مناسب للأغراض النووية لاستخدامه في أنواع الوقود المغلفة بكبسولات خزفية دقيقة).

47- وهناك عدة دول أعضاء تعمل بالفعل على إعادة تدوير أنواع الوقود المستعملة في المفاعلات القائمة وتخطط لذلك فيما يخص المفاعلات التي ستُنشأ في المستقبل، في حين توجد لدى بلدان أخرى برامج جارية للبحث والتطوير من أجل إعادة تدوير الوقود أو نشر أنواع وقود ابتكارية لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة. كما أنَّ أعمال البحث والتطوير جارية بشأن أنواع الوقود القائمة على ثاني أكسيد اليورانيوم وعلى خليط أكسيد اليورانيوم وأكسيد البلوتونيوم (وقود موكس) وأنواع الوقود المتقدمة التكنولوجيا لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة المبردة بالماء الخفيف/الثقيل؛ ووقود 'سرمت' لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة المبردة بالماء الخفيف العائمة والبرية؛ وأنواع الوقود النظيري الثلاثي الهيكل لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز/بالأملاح المصهورة/بالأنابيب الحرارية؛ وأنواع الوقود المعدنية أو الخزفية لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة السريعة المبردة بفلز سائل/بالغاز/بالأنابيب الحرارية؛ وأنواع وقود الأملاح المصهورة لأغراض المفاعلات النمطية الصغيرة المبردة بالأملاح المصهورة.

الاتجاهات

48- تشير التوقعات العالمية إلى أنَّ الطلب على اليورانيوم سيرتفع على مدى السنوات الخمس المقبلة من نحو 160 مليون رطل من ثماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم إلى نحو 190 مليون رطل سنويًّا. ومن المتوقع أن يبلغ معدل الإنتاج العالمي لليورانيوم في عام 2022 نحو 133 مليون رطل سنويًّا، مع تعويض الجزء المتبقي من الإمدادات الثانوية الآخذة في الانخفاض باستمرار. وتحسُّباً لمزيد من الزيادات في سعر التسليم الفوري لليورانيوم، من المتوقع أن تسعى إدارات المشتريات التابعة لمحطات القوى النووية إلى شراء ركازة خام اليورانيوم عن طريق عقود الشراء الآجل والعودة مجدداً إلى إبرام عقود طويلة الأجل مع موردي اليورانيوم. وقد يؤدي ذلك إلى زيادات أخرى في سعر التسليم الفوري لليورانيوم، الذي يُتوقع أن يرتفع من نحو 52,00 دولاراً للرطل من ثماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم إلى نحو 65,00 دولاراً للرطل من ثماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم بحلول عام 2027.



49- ومن المتوقع أن تُفتتح في السنوات الخمس إلى العشر المقبلة مناجم يورانيوم جديدة، بما في ذلك في أستراليا والبرازيل وكندا وموريتانيا وناميبيا. ومع ذلك، فالإنتاج المتوقع من هذه العمليات الجديدة لن يكون كافياً لتعويض العجز القائم في الإمدادات، والذي يُعالج حاليًّا عن طريق المصادر الثانوية. ومن هذا المنطلق، يُتوقع أن يزداد نشاط استكشاف اليورانيوم في السنوات المقبلة، بما يشمل مكامن اليورانيوم التقليدية وغير التقليدية على السواء. وبالنظر إلى طول الجدول الزمني اللازم لإنشاء منجم يورانيوم جديد وإدخاله في الخدمة بعد اكتشاف وتوكيد أحد مكامن اليورانيوم (بين 10 سنوات و15 سنة)، فلا بدَّ من استكشاف احتياطيات اليورانيوم الجديدة وتحديدها.

50- وبغية ضمان توافر موارد اليورانيوم في الأسواق عند الحاجة إليها، من شأن إمدادات اليورانيوم في المستقبل أن تستفيد من إنجاز جهود البحث والابتكار في الوقت المناسب لمواصلة تحسين استكشاف اليورانيوم وتطوير تقنيات استخراج جديدة وأكثر فعالية من حيث التكلفة. وفيما يتعلق باستدامة قطاع صناعة اليورانيوم، واستعادة اليورانيوم من الموارد ذات الدرجات الأدنى ومن مكامن اليورانيوم التي تطرح قدراً أكبر من التحديات، لا بدَّ من الابتكار من أجل بدء مرحلة الإنتاج في مكامن اليورانيوم القريبة من تلك المرحلة. ومن أمثلة هذا الابتكار في قطاع صناعة تعدين اليورانيوم في عام 2022 ما تحقق من نتائج إيجابية في دراسات الجدوى الخاصة بإنشاء منجم للنض الموقعي في مكمن مكوَّن من رواسب عالية الجودة من النوع الناشئ عن عدم توافق طبقات الأرض. وبالإضافة إلى ذلك، فإنَّ رفع قيمة اليورانيوم المنخفض الجودة أو الارتقاء به يبشِّر بنتائج واعدة ويزيد من جاذبية المكامن التي كانت تعتبر في السابق غير اقتصادية. ومن الابتكارات المهمة الأخرى أساليب النضِّ البيولوجي التي يجري تطويرها لتطبيقها في استخراج اليورانيوم باستخدام النض الموقعي من مكامنه المكونة من رواسب في الحجر الرملي. وأخيراً، فإنَّ تقنيات النض التكويمي المستخدمة في تطبيقات أخرى في مجال التعدين تبشر بنتائج واعدة فيما يتعلق ببعض عمليات تعدين اليورانيوم.

51- وبعد حادث فوكوشيما داييتشي النووي في عام 2011، تركَّزت جهود العديد من الدول الأعضاء على تحسين أمان أنواع الوقود المستخدمة في أساطيل مفاعلات الماء الخفيف الكبيرة الحجم القائمة وأمان أنواع الوقود المعتزم استخدامها في الأجيال المقبلة من المفاعلات، بما في ذلك المفاعلات النمطية الصغيرة. وتنفِّذ العديد من الدول الأعضاء برامج مكثَّفة لنشر أنواع الوقود المتقدمة التكنولوجيا، تشمل صنع قضبان الاختبارات الأولية ومجمعات الاختبارات الأولية، وفحوصات التشعيع وما بعد التشعيع، وتقييم أداء الوقود، والجوانب الهيدروليكية الحرارية للنظم، ووضع شفرات محاكاة الحوادث العنيفة والتحقق من صحتها.

52- وتوجد لدى بعض الدول الأعضاء خطط لإرساء البنية الأساسية اللازمة لترخيص الوقود دعماً لرفع معدلات الحرق والإثراء إلى ما يتجاوز الحدود الموروثة في أواسط عشرينيات هذا القرن، والتمكين من تشغيل مفاعلات الماء الخفيف القائمة بطريقة مأمونة واقتصادية على مدى دورات مدتها 24 شهراً بمتوسط معدلات حرق أعلى ودون إدخال أي تغييرات مادية على محطات التصنيع وحاويات النقل (أي من خلال الاقتصار على إدخال تغييرات على إجراءات الترخيص). كما أنَّ تلبية الطلب على الصعيدين المحلي والعالمي تتطلَّب اتجاهاً نحو التسويق وتحقيق وفورات في الحجم فيما يتعلق بتكنولوجيات الوقود المتقدمة من خلال ضمان الإنتاج بكميات مستدامة.

53- ومن بين العوامل المحركة الأخرى في مجال تطوير الوقود النووي تصاميم المفاعلات الابتكارية، مثل المفاعلات من الجيل الرابع والمفاعلات النمطية الصغيرة (بدءاً من الصيغ المصغرة من تصاميم وقود مفاعلات الماء الخفيف وصولاً إلى تصاميم وقود الجيل الرابع الجديدة تماماً). والنجاح في نشر جميع أنواع وقود المفاعلات النمطية الصغيرة سيتطلَّب نضج تكنولوجيات إنتاج الوقود بدءاً من مرحلة البحث والتطوير وصولاً إلى مرحلة التصنيع. وبالإضافة إلى ذلك، ستكون ثمة حاجة إلى توافر اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز لتصنيع العديد من مفاهيم الوقود النووي الابتكارية، مثل بعض أنواع الوقود المتقدمة التكنولوجيا وأنواع الوقود الخاصة بالمفاعلات النمطية الصغيرة. وفي الوقت الحالي، لا توجد سلسلة إمداد لإنتاج أنواع الوقود القائمة على اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز إلا في الاتحاد الروسي، على الرغم من أن الولايات المتحدة الأمريكية تخطط لإرساء بنية أساسية خاصة بإنتاج اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز للمفاعلات المتقدمة.

باء-2- المرحلة الختامية

الحالة

54- يتراكم الوقود النووي المستهلك قيد التخزين بمعدل يقارب 7000 طن من الفلزات الثقيلة سنويًّا على مستوى العالم، في حين يقترب الرصيد المخزون من 000 320 طن من الفلزات الثقيلة. وتظل التحديات الرئيسية التي تواجهها البلدان التي لديها برامج قوى نووية راسخة والتي تسعى إلى الأخذ باستراتيجيات قائمة على دورات الوقود المفتوحة متمثلةً في الحاجة إلى سعة إضافية لخزن الوقود النووي المستهلك بالإضافة إلى الحاجة إلى زيادة مدَّة التخزين قبل التخلص (الشكل باء-2).

الشكل باء-2- المشاركون في المشروع البحثي المنسق التابع للوكالة المعنون "تقييم أداء الوقود المستهلك والبحوث المتعلقة به — المرحلة الرابعة" خلال زيارة إلى مرفق الخزن الجديد الجاري تشييده، في إطار جولة تقنية في محطة آتوشا للقوى النووية في الأرجنتين في عام 2019.

55- وفي بعض البلدان، كثيراً ما يُنقَل الوقود النووي المستهلك من مرافق للخزن الرطب إلى مرافق للخزن الجاف بعد انقضاء فترة تبريد أولية. وبسبب توليفة من أوجه الكفاءة التي تحققت في المفاعلات، والتي أدَّت إلى زيادة معدلات حرق الوقود والتعجيل بتفريغ الوقود من المفاعلات المغلقة، تتطلب نظم الخزن الجاف قدرات محسَّنة لإزالة الحرارة. ويتواصل العمل على تطوير مرافق مركزية للخزن المؤقت. ويُعتبر نقل الوقود النووي المستهلك عمليةً روتينيةً في بعض البلدان، والأعمال التحضيرية جارية في بلدان أخرى لدعم حملات النقل في المستقبل. وتُواصل الدول الأعضاء أعمال إزالة وقودها النووي المستهلك ونقله إلى أماكن أخرى في إطار مشاريع إخراج محطات القوى النووية التابعة لها من الخدمة.

56- وقد أوقفت المملكة المتحدة عمليات إعادة المعالجة في تموز/يوليه 2022 مع إغلاق محطة ماغنوكس لإعادة المعالجة، مما أدى إلى انخفاض كبير في القدرة العالمية على إعادة المعالجة. ويتواصل العمل في الاتحاد الروسي وفرنسا والهند على تطوير تكنولوجيات جديدة لإعادة التدوير على نطاق تجاري فيما يخص أنواع الوقود المستخدمة في الأسطول الحالي من المفاعلات وفي المفاعلات المتقدمة. وفي كانون الأول/ديسمبر 2022، اكتمل بنسبة 100% تقريباً تحميل المفاعل BN-800 في الاتحاد الروسي بوقود موكس، في خطوة نحو تنفيذ مفهوم 'دورة الوقود النووي المتوازنة'، الذي يتوخى إعادة معالجة الوقود النووي المستهلك وإعادة تدوير المواد النووية المعاد تنشيطها لتُستخدم كوقود نووي، والتحويل النظيري للأكتينات الثانوية في مفاعلات النيوترونات السريعة. واتُّخذ القرار بتشييد مجمع الطاقة التجريبي الإيضاحي لإعادة معالجة وقود المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص، في سيفيرسك بالاتحاد الروسي، ومن المتوقع أن تبدأ العمليات التشغيلية في عام 2024. وتعمل عدة برامج تابعة لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة على إقامة روابط بين المختبرات الوطنية

والجامعات والمنظمات التجارية من أجل استحداث حلول قابلة للتوسع قائمة على تكنولوجيات مثل إعادة المعالجة المائية والمعالجة الحرارية. وتعمل شركة Terrestrial Energy، وهي الشركة الكندية التي صمَّمت مفاعل الأملاح المصهورة المتكامل، بالشراكة مع المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النووية من أجل تحديد ما إذا كانت عملية المعالجة باستخدام الصخر الاصطناعي التي طوَّرتها هذه المنظمة مناسبةً لتكييف أملاح الوقود المستهلك المتأتي من مفاعل الأملاح المصهورة المتكامل.

الاتجاهات

57- يظل فهم سلوك الوقود النووي المستهلك في مختلف نظم الخزن وآليات التقادم والتدهور في الهياكل والنظم والمكونات الخاصة بالتخزين عنصراً حيوي الأهمية في ضمان استمرار الخزن المأمون للوقود النووي المستهلك ونقله لاحقاً إلى مرافق التخلص أو إعادة المعالجة. وبما أنَّ برامج التخلص من الوقود المستهلك تشهد تقدماً في بعض الدول الأعضاء، سُجِّلت زيادة في عدد الأنشطة التحضيرية، مثل وضع برامج تحديد الخصائص.

58- وتنسِّقُ الوكالة أنشطة بحثية بشأن هذه المسألة بهدف جمع الخبرات التشغيلية المكتسبة والاستنباطات البحثية المتوصل إليها في الدول الأعضاء، والترويج لتقاسم المعلومات. وتكتسي مواصلة بذل هذه الجهود أهمية خاصة بالنظر إلى أنَّ القدر الأكبر من أوجه الكفاءة في المفاعلات تحقق من خلال إنتاج الوقود المستهلك باستخدام أنواع وقود مثراة إلى مستويات أولية أعلى وذات معدلات حرق أعلى، مما يؤدي إلى زيادات في المخرجات الحرارية وكذلك إلى زيادة محتملة في مخاطر تقصُّف الكسوة، مما قد يؤثر في الخطوات اللاحقة من عملية التصرف في الوقود المستهلك.

59- ومع توخي اعتماد تصاميم وقود جديدة لكل من أسطول المفاعلات القائم وتصاميم المفاعلات المتقدمة، بما فيها المفاعلات النمطية الصغيرة، وهو ما قد يؤدي إلى سلوكيات من الممكن أن تكون مختلفة في سياق التصرف في الوقود المستهلك، سيتعيَّن البحث عن حلول ابتكارية في مجال التصرف في الوقود المستهلك للتمكين من نشرها في الوقت المناسب.

60- ورغم الانخفاض العام الذي شهدته القدرة العالمية على إعادة معالجة الوقود المستهلك، هنالك اهتمام متزايد بتطوير التكنولوجيات المتقدمة في مجال إعادة التدوير سواء تعلق الأمر بأنواع الوقود الحالية أو بدعم نشر واستدامة المفاعلات المتقدمة. ويمثِّل تحقيق التكامل بين دورات الوقود الجديدة والمبتكرة ودورات الوقود القائمة هدفاً مهماً من أجل معالجة التحديات الراهنة في توفير إمدادات الطاقة وضمان تطوير القوى النووية على نحو مستدام ومأمون وآمن.

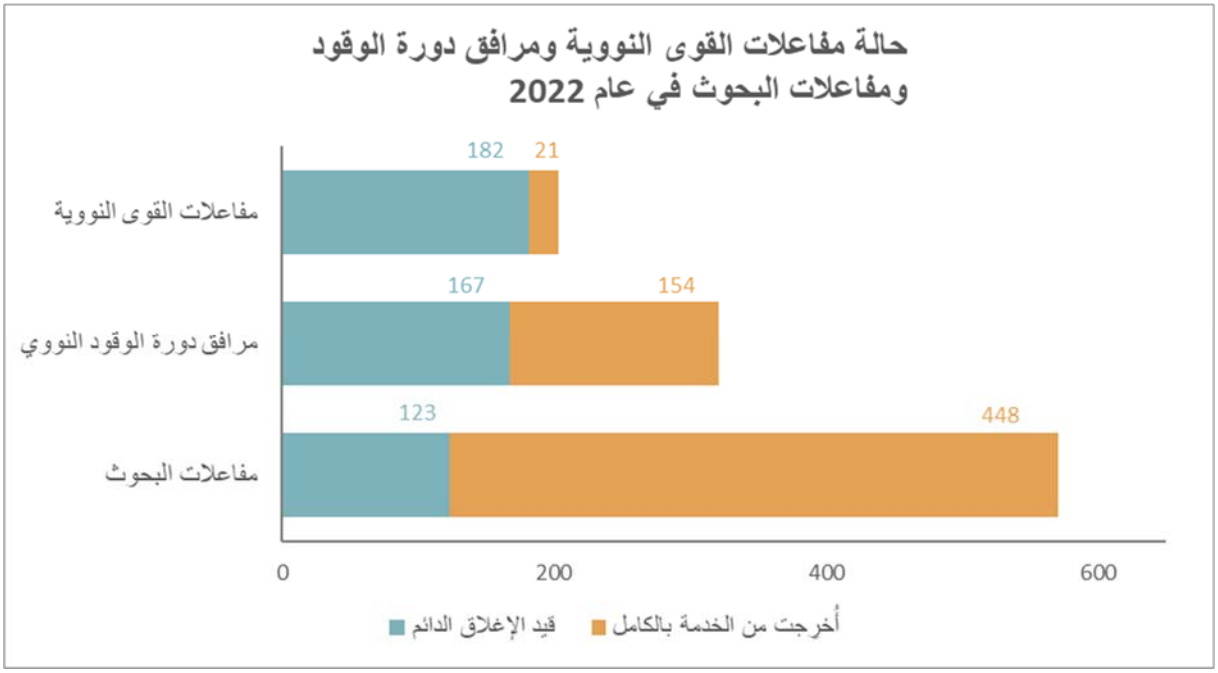
جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة

جيم-1- الإخراج من الخدمة

الحالة

61- خضعت خمسة من مفاعلات القوى للإغلاق الدائم في عام 2022، وهي: المفاعل Doel-3 في بلجيكا، والمفاعلات المبردة بالغاز المتقدمة Hinkley Point B-1 وHinkley Point B-2 وHunterston B-2 في المملكة

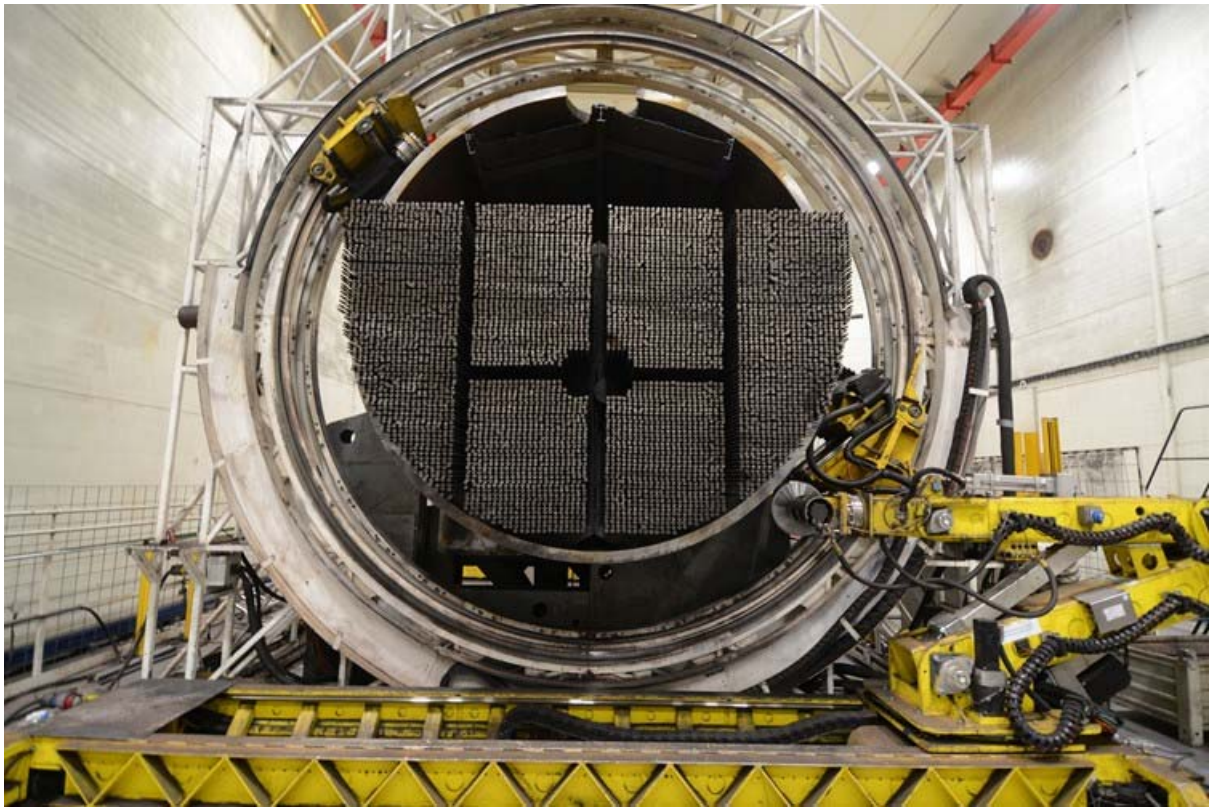
المتحدة، ومفاعل الماء المضغوط Palisades في الولايات المتحدة الأمريكية. وعلى الصعيد العالمي، خضعت 203 من المفاعلات النووية للسحب الدائم من الخدمة، منها 21 مفاعلاً اكتمل إخراجها من الخدمة تماماً. وتوجد أبرز البرامج الجارية لإخراج مفاعلات القوى من الخدمة في ألمانيا، حيث يوجد 27 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا؛ واليابان، حيث يوجد 24 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا؛ والولايات المتحدة الأمريكية، حيث يوجد 28 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا، منها 18 قيد التطويق المأمون و8 يجري العمل حاليًّا على تفكيكها. وأغلقت المملكة المتحدة بشكل دائم 36 من مفاعلاتها المبردة بالغاز من الجيل الأول والجيل الثاني، ومعظم هذه المفاعلات هي الآن في مرحلة ما بعد التشغيل تحضيراً لوضعها قيد التطويق المأمون.



62- ويتواصل تنفيذ أنشطة الإخراج من الخدمة في مواقع مرافق دورة الوقود النووي الرئيسية في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك في عدة مواقع في فرنسا والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. وعلى وجه العموم، ينصبُّ قدر كبير من التركيز حاليًّا على الحد من المخاطر المترتبة على الأخطار الجسيمة، بما في ذلك إزالة النفايات القديمة التي عادة ما تكون مخزَّنة في أحواض أو خنادق خرسانية قبل الشروع في تفكيك المرفق. وفي محطة ماغنوكس لإعادة المعالجة في المملكة المتحدة، تجري الأعمال التحضيرية لأنشطة التنظيف الخاصة بمرحلة ما بعد التشغيل. كما أنَّ هذا الموقع بصدد الانتقال إلى وضع الاسترجاع التشغيلي الكامل من أحواضه وصوامعه القديمة. وتتواصل أعمال إزالة وإعادة تكييف النفايات الموروثة في موقع La Hague بفرنسا، بما في ذلك إزالة نفايات الغرافيت والمغنسيوم القديمة المخزَّنة في صوامع خرسانية وإزالة التلوث من الخلايا التي يبلغ نشاطها الإشعاعي مستويات تقيد أو تمنع وصول البشر إليها. وانتهت أيضاً أعمال تفكيك جميع وحدات قياس البلوتونيوم المغلقة الموجودة في هذا الموقع، مع التركيز حاليًّا على تفكيك معدات المعالجة الرئيسية — أي أوعية الإذابة وأجهزة الخلط والترسيب وأجهزة التبخير.

63- وأُحرز تقدم تقني كبير في مجموعة متعددة من محطات القوى النووية في عام 2022، فعلى سبيل المثال، اكتملت أعمال التقطيع والتعبئة لاثنين من أوعية ضغط المفاعلات واثني عشر من مولدات

البخار ومجموعة أخرى من مكونات الدوائر الأولية في محطة بوهونيتسه V-1 للقوى النووية في سلوفاكيا (الشكل جيم-1)؛ واكتمل تقطيع السدادة الدوارة الكبيرة الحجم في محطة سوبر فينيكس للقوى النووية في فرنسا؛ واكتمل تفكيك قلب المفاعل في محطة فرمونت يانكي للقوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية؛ واكتملت أعمال هدم آخر المباني الكبرى المتبقية ومبنى التربينات في محطة خوزيه كابريرا للقوى النووية في إسبانيا.



الشكل جيم-1- عملية تقطيع مولد بخار في محطة بوهونيتسه V-1 للقوى النووية (الصورة من: شركة القوى النووية والإخراج من الخدمة، سلوفاكيا)

64- وتحقَّق معلم هام في إطار برنامج المرحلة النهائية الخاص بالوكالة اليابانية للطاقة الذرية مع الانتهاء بنجاح من الأجزاء الرئيسية من المرحلة الأولى من أعمال إخراج مفاعل مونجو السريع التوليد من الخدمة؛ ونقل 530 مجمعة وقود من قلب المفاعل وكذلك صهريج تخزين الوقود خارج الوعاء، إلى حوض الوقود المستهلك في تشرين الأول/أكتوبر 2022. واكتملت أعمال إزالة الصوديوم السائب من دائرة المبرِّد الأولية في نيسان/أبريل 2022.

65- وفي 22 تموز/يوليه 2022، وافقت الهيئة الرقابية النووية في اليابان على تعديل خطة التنفيذ المتعلقة بتركيب مرفق تصريف المياه المعالجة باستخدام النظام المتقدم لمعالجة السوائل (نظام آلبس)، والتي قدَّمتها شركة طوكيو للطاقة الكهربائية (شركة تيبكو) في كانون الأول/ديسمبر 2021. ومن المقرر أن تبدأ عملية التصريف في عام 2023، ويجري العمل حاليًّا على تركيب مرافق لازمة للتصريف. وفيما يتعلق باسترجاع حطام الوقود من أوعية المفاعلات، تقرَّر إجراء عملية استرجاع تجريبية من الوحدة 2 أولاً. واكتملت أعمال تصنيع المعدات مثل الأذرع الآلية والمناولات التي ستُستخدم لهذا الغرض (الشكل جيم-2)، وتُبذل حاليًّا جهود بهدف تحسين تشغيل تلك المعدات كما يُجري فحص تفصيلي لمنطقة اختراق وعاء الاحتواء التي ستُركَّب فيها المعدات.

الشكل جيم-2- قاعة اختبار الأذرع الآلية والمناولات التي ستُستخدم في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. (الصورة من: وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة، اليابان)

الاتجاهات

66- تُعرض التوقعات الحالية للوكالة فيما يتعلق بمسار تطور القدرة النووية المنشأة من الآن وحتى عام 2050 في شكل سيناريو لحالة 'المرتفعة' وآخر لحالة 'منخفضة'. وفي حالة سيناريو الحالة المرتفعة، ستُسحب من الخدمة قرابة 25% من القدرة النووية المنشأة حاليًّا وستُمدَّدُ أعمار العديد من المنشآت الأخرى، بالإضافة إلى استهلال برنامج مكثف لبناء منشآت جديدة. أما في سيناريو الحالة المنخفضة، فستُسحب من الخدمة نسبة تصل إلى 75% من القدرة النووية المنشأة حاليًّا، وستعوِّض البنى الجديدة القدرة المفقودة. ولذلك فهناك في الوقت الحالي طائفة واسعة من أوجه عدم التيقُّن بشأن وتيرة عمليات الإغلاق من الآن وحتى عام 2050.

67- وعلى غرار السنوات الأخيرة، فإنَّ عمليات إغلاق المرافق النووية تجري بوتيرة تضاهي تقريباً المعدل الذي يجري به إدخال المرافق الجديدة في الخدمة. وفي حالة محطات القوى النووية، تعود غالبية عمليات

الإغلاق إلى سحب المفاعلات المبردة بالغاز المتقدمة من الجيل الثاني من الخدمة في المملكة المتحدة لأسباب اقتصادية، لأنَّ تكاليف تمديد عمر المرافق لا تبرّرُ الدخل المتوقَّع أن يتدفَّق من مواصلة تشغيل هذه المفاعلات. أمَّا في حالة ألمانيا، فقد أُجِّلت عمليات الإغلاق النهائي للمرافق الثلاثة الأخيرة قيد التشغيل، من نهاية عام 2022 إلى نيسان/أبريل 2023، بسبب أزمة الطاقة الحالية.

68- ورغم حالة عدم التيقُّن التي تحيط بمعدل إغلاق المرافق في المستقبل، فإنَّ عدد المرافق الجاري تفكيكها فعليًّا آخذ في الازدياد، مع وجود اتجاه يميل إلى تفكيك المرافق في وقت مبكر بعد الإغلاق الدائم. وتشمل العوامل التي تؤثر في هذا الاتجاه السياسات الحكومية، ورغبة مالكي المرافق في التقليل إلى أدنى حد من التكاليف المتصلة بصيانة المرافق على مدى فترات طويلة من الزمن، وحالة عدم التيقُّن المحيطة بتكاليف عملية التفكيك النهائي والتصرف في المواد ذات الصلة.

69- وتؤدي التكنولوجيات الرقمية وتطبيقات الواقع الافتراضي والمعزَّز دوراً متزايد الأهمية في المضي قدماً في مشاريع إخراج المرافق النووية من الخدمة من خلال التمكين من تحسين التخطيط والتنفيذ. وتشمل الفوائد المحتملة مجموعة متعددة من مجالات الأنشطة في مرحلة إخراج المرفق النووي من الخدمة، ألا وهي: توفير وسائل محسَّنة لجمع المعلومات وتحليلها وعرضها على النحو اللازم لتخطيط استراتيجيات التفكيك؛ واستخدام الروبوطات لضمان أمان الموظفين؛ وتيسير تدريب الجهات المشغلة من خلال التمكين من محاكاة الأنشطة المخطط لها في إطار بيئة افتراضية ذات مؤثرات واقعية؛ ودعم التحديد الدقيق للنفايات التي ستنشأ في المستقبل ومن ثم تحسين عملية تقدير التكاليف؛ والتمكين من تحسين عملية تصور سيناريوهات الإخراج من الخدمة، سواء من جانب الجهات المشغلة أو من جانب الجهات المعنية الخارجية. وسوف تجلب التكنولوجيات الرقمية معها العديد من الفوائد المحتملة الأخرى لقطاع الصناعة النووية ككلٍّ، مع نقل المعارف المكتسبة في مرحلة الإخراج من الخدمة إلى مصممي محطات القوى النووية ومشغليها وإلى منظمات الدعم التقني.

جيم-2- الاستصلاح البيئي والتصرُّف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية

الاستصلاح البيئي

70- يمكن للاستصلاح البيئي أن يكون عملية بطيئة الوتيرة، ولذلك يتحقق التقدم فيها على نحو مطرد في بعض الحالات. ومع ذلك، لا تزال العقبات أمام التنفيذ تمثل تحدياً. ومنذ عام 1989، انتهى مكتب الإدارة البيئية التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية من أعمال التنظيف في 92 من المواقع القديمة في أنحاء مختلفة من البلاد، كان آخرها مختبر بروكهافن الوطني. ويتبقى من هذه المواقع 15 موقعاً تنطوي على بعض أصعب التحديات وأعلاها تكلفة. كما تتقدَّم الجهود الرامية إلى التغلب على إرث تعدين اليورانيوم في أوروبا وآسيا الوسطى. وقد طُوِّرت تكنولوجيا ناشئة تجمع بين استخدام طائرة بلا طيار وجهاز عالي الحساسية للكشف عن أشعة غاما، وستُنشر هذه التكنولوجيا في المستقبل القريب للمساعدة على تحديد خصائص المواقع الملوثة من جراء العمليات السابقة لتعدين اليورانيوم في آسيا الوسطى. وبغية تلبية الحاجة إلى القوى العاملة متخصصة في مجالي الإخراج من الخدمة والاستصلاح، يعمل اتحادٌ تقوده جامعة بورتو في البرتغال على إعداد برنامج ماجستير في العلوم في مجالي الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي، برعاية برنامج Erasmus+ التابع للمفوضية الأوروبية.

التصرف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية

71- هناك بلدان عديدة تواجه تحديات في التصرف فيما لديها مخلفات مواد مشعة موجودة في البيئة الطبيعية (الشكل جيم-3). ويُلتمس الدعم حاليًّا من أجل إرساء البنية الأساسية اللازمة لتلبية احتياجات تلك البلدان. وتنشأ

اختناقات بسبب عدم وجود سياسات تنظِّم استخدام مخلفات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية والافتقار إلى خيارات للتخلص من هذه المواد عند الإعلان عنها باعتبارها من النفايات. ويمثِّل عدم وجود مختبرات معتمدة في العديد من الدول الأعضاء عقبة أخرى تُفاقِم من التحديات المطروحة فيما يتعلق بنقل هذه المواد للتخلص منها في بلد آخر.

الشكل جيم-3- مخلفات من صناعة تعدين اليورانيوم تحتوي على مواد مشعة موجودة في البيئة الطبيعية.

الاتجاهات

الاستصلاح البيئي

72- يشهد مجال الاستصلاح اتجاهاً ناشئاً نحو توسيع نطاق مفهوم الحد من الأضرار ليشمل القيمة الإجمالية للمواقع الملوثة. ومن خلال إعادة معالجة النفايات الحالية الأقدم، يمكن تجنب الحاجة إلى اتخاذ إجراءات استصلاح مكلفة عن طريق وضع المخلفات في حالة مستقرة بالوسائل الجيوكيميائية والجيوتقنية. وسيؤدي ذلك إلى التقليل من الالتزامات ومن تكاليف الإغلاق النهائي ذات الصلة، وقد يؤدي أيضاً إلى استحداث منتجات "خضراء" قابلة للتسويق. ويمثل الاستصلاح مرحلة بالغة الأهمية من عمليات التعدين في إطار اقتصاد دائري، لأنه يتيح الفرصة لإعادة تأهيل الموقع للأغراض الإنتاجية مستقبلاً. ومن أمثلة ذلك برنامج استُهِل في الولايات المتحدة الأمريكية يخصِّص موارد كبيرة لإنتاج الطاقة النظيفة في أراضي التعدين السابقة، ومن ثمَّ تحويل تلك المواقع إلى مراكز لإنتاج الطاقة النظيفة.

73- وفيما يخصُّ المشاريع الجارية والمستقبلية، من المهم للغاية بدء التخطيط للإغلاق منذ بداية المشروع. ومع ذلك، فإنَّ الاستفادة الكاملة من هذه الفرص على مستوى المواقع تتطلب نموذجاً موسَّعاً للاقتصاد الدائري يقرُّ بالنُّهج القائمة المتبعة لتحقيق الاستدامة مع مراعاة الأبعاد البيئية والاقتصادية والاجتماعية في إطار عملية تشاركية لاتخاذ القرارات. وفي هذا الصدد، هناك اتجاه نحو اعتماد الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لدعم اتخاذ القرارات في الحالات المعقدة كما هو الحال في نطاق الاستصلاح البيئي.

التصرف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية

74- إنَّ مفهوم الدائرية حاضرٌ أيضاً في سياق الأنشطة المتعلقة بالتصرف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية. وهناك صناعات مختلفة تعكف على دراسة العمليات التي يمكن أن تضيف قيمة إلى مخلفات هذه المواد. ومن الأدلة على هذا الاتجاه المتزايد استخدام الجص الفوسفوري في مجال الزراعة كمحسِّن للتربة وكمادة للبناء، واستخدام طين الإلمنيت في مجالي تصنيع الأسمنت التجاري وتصنيع الخزفيات، من بين مجالات أخرى. وستتطلب الاستفادة الكاملة من المخلفات الناتجة عن العمليات الصناعية المتصلة بالمواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية الاستثمار في الابتكار التكنولوجي واعتماد سياسات مناسبة على الصعيد الوطني ومعرفة الرصيد القائم من هذه المواد ووضع آليات تمويل ابتكارية، حتى يمكن تحقيق الاتساق مع خطة التنمية المستدامة لعام 2030.

جيم-3- التصرف في النفايات المشعة

الحالة

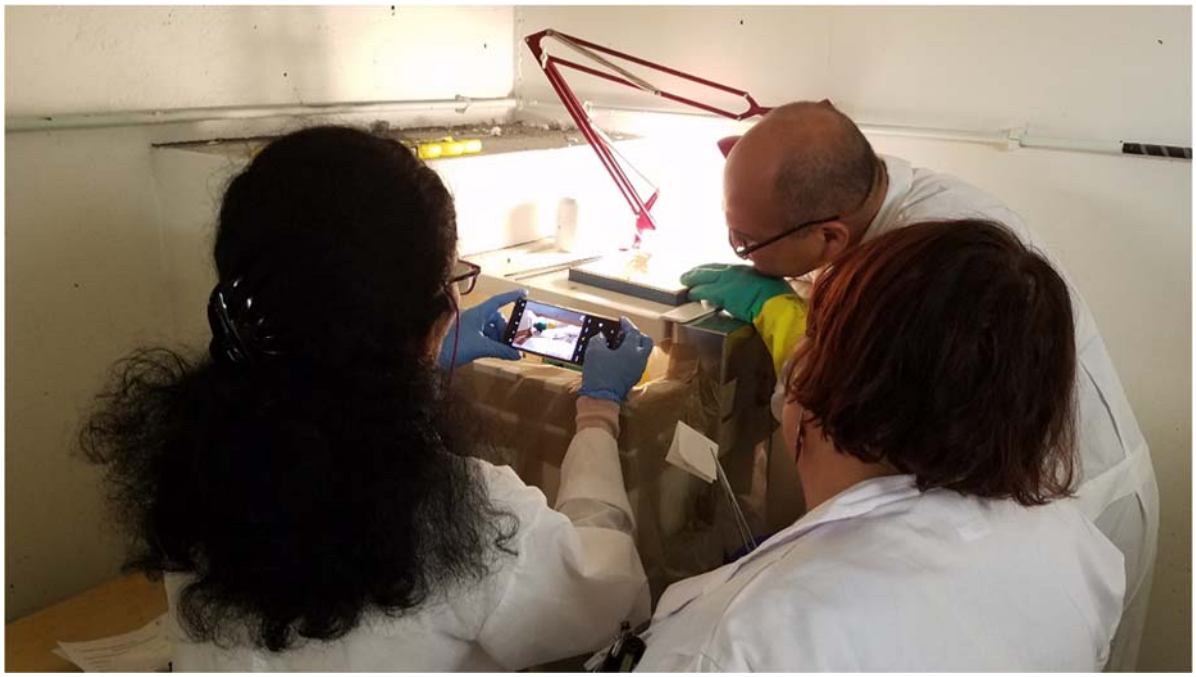
75- شهد عام 2022 استمرار التقدم الملموس في مجال التصرف في النفايات المشعة، لا سيما فيما يتعلق بالنهوض ببرامج المستودعات الجيولوجية العميقة ومواصلة النشر المأمون لتكنولوجيات التمهيد للتخلص.

76- وفي حين أنَّ التكنولوجيات اللازمة لتكييف ومعالجة الغالبية العظمى من تدفقات النفايات المشعة متاحة ويجري تنفيذها، فهناك تحدٍّ مطروح فيما يتعلق بتحديد التقنيات الأنسب سواء من المنظور التقني أو التمويلي. ويتطلب اختيار التكنولوجيا معرفة النفايات وخصائصها والمتطلبات المنطبقة لقبول النفايات، كما يتطلب فهم المتطلبات الرقابية السارية. وقد طوَّرت هيئة الطاقة الذرية الباكستانية قدرات في مجال تحديد خصائص النفايات

الناجمة عن مفاعلات القوى النووية وعن أنشطة الإخراج من الخدمة. وإلى جانب قدرات تحديد الخصائص، هناك تقدُّم في تطوير متطلبات قبول النفايات في مرافق التخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع. ويجري العمل في عدة بلدان لديها أرصدة صغيرة على استحداث حلول مركزية فيما يتعلق بالتصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها. فقد قررت كرواتيا إنشاء مركز للتصرف في النفايات المشعة في تشركيزوفاتس، وأخرجت إستونيا المرفق الموجود لديها من طراز رادون من الخدمة ونقلت جميع النفايات إلى مرافق في موقع بالديسكي.

77- وبعد تنفيذ برنامج شامل لضمان أمان الظروف التشغيلية، استؤنفت في موقع تشرنوبل في أوكرانيا أنشطة معالجة النفايات المشعة والتخلص منها، بعد إغلاق هذه المرافق في شباط/فبراير 2022.

78- ومن خلال المبادرة العالمية التي أطلقتها الوكالة للتصرف في الراديوم-226، وجدت عدة دول أعضاء بالفعل منفذاً للتصرف في مصادر الراديوم المهملة. وفي آيسلندا، خضعت مصادر الراديوم-226 للتكييف لتيسير نقلها لإعادة تدويرها وتحويلها إلى مستحضرات صيدلانية إشعاعية لأغراض العلاج المستهدِف للخلايا السرطانية باستخدام أشعة ألفا (الشكل جيم-4).



الشكل جيم-4- تكييف إبر الراديوم المستهلك في آيسلندا لأغراض إعادة التدوير.

79- وفي عام 2020، أطلقت كندا عملية تواصل شاملة بهدف تحديث سياستها المتعلقة بالنفايات المشعة، وأصدرت في شباط/فبراير 2022 مسودة لوثيقة بعنوان "السياسة المتعلقة بالنفايات المشعة والإخراج من الخدمة" ليعلق عليها الجمهور. وأصدرت كندا في آب/أغسطس 2022 استراتيجيتها الوطنية المتكاملة للتصرف في النفايات المشعة ليعلق عليها الجمهور، مع التركيز على التصرف في النفايات المشعة بطريقة مدروسة، بحيث يوجد حل مخطط له للتخلص من كل مسار من مسارات التدفق في مخزون النفايات الوطني. وأعلنت المختبرات النووية الكندية في أيار/مايو 2022 عن دخول مشروع بورت غرانبي حالة الصيانة والمراقبة الطويلة الأجل، بعد وضع 1,3 مليون طن من النفايات الضعيفة الإشعاع في كومة مصممة هندسيًّا للاحتواء فوق سطح الأرض أُغلِقت في أواخر عام 2021.

80- وشهدت برامج التخلص من النفايات القوية الإشعاع في المستودعات الجيولوجية العميقة عدة تطورات. وانتهت شركة بوزيفا (Posiva) الفنلندية المعنية بالتصرف في النفايات من أعمال الحفر في أول خمسة أنفاق للتخلص تحضيراً للبدء في أعمال التخلص النهائي من الوقود المستهلك بحلول عام 2025. وفي كانون الثاني/يناير 2022، منحت حكومة السويد الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية الإذن بالبدء في تشييد مستودع الوقود المستهلك في فورسمارك وكذلك محطة التغليف في أوسكارشامن. وكشف استطلاع للرأي العام أُجري لاحقاً في موقع بلدية أوستهامار أنَّ 80% من المشاركين في استطلاع الرأي أعربوا عن تأييدهم لتشييد المستودع الجيولوجي العميق، وهي أعلى نسبة موافقة على الإطلاق. وفي إطار مشروع سيجيو (Cigéo) في فرنسا، وُضعت خطط للتقدم بطلب الحصول على رخصة تشييد قبل نهاية عام 2022. وفي الاتحاد الروسي، يُتوقع الانتهاء في عام 2023 من الدراسات المختبرية الكاملة النطاق للكتلة الصخرية لأغراض إنشاء مختبر مستودع جيولوجي عميق في منطقة كراسنويارسك.

81- وفيما يتعلق بتحديد موقع لتشييد مستودع جيولوجي عميق في سويسرا، قدَّمت الجمعية التعاونية الوطنية للتخلص من النفايات المشعة في أيلول/سبتمبر 2022 توصية باختيار موقع في منطقة نوردليش لاغرن (Nördlich Lägern)، وستُقدِّم الجمعية طلب الترخيص في عام 2024. ولا تزال هيئة التصرف في النفايات النووية في كندا تتواصل مع المجتمعات المحلية المتطوعة لاستضافة مستودع جيولوجي عميق، وتعتزم التوصية بموقع للتشييد في عام 2024.

الاتجاهات

82- يتواصل في العديد من الدول الأعضاء استهلال العمل على وضع وصقل السياسات والاستراتيجيات الوطنية للتصرف في النفايات المشعة. وفي حالة الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي، يأتي ذلك بالاتساق مع متطلبات الوفاء بالالتزامات المفروضة بموجب المادة 14-3 من توجيه المجلس الأوروبي 2011/70/Euratom المؤرخ 19 تموز/يوليه 2011.

83- وتزايدت عمليات إعادة المصادر المهملة القوية الإشعاع إلى الموردين لأغراض إعادة تدويرها والتخلص منها. ومن المخطط إزالة أكثر من 30 مصدراً من المصادر القوية الإشعاع من نحو اثنتي عشرة دولة عضواً في عام 2023. وفي حين أنَّ بلداناً عديدة أحرزت تقدماً فيما يتعلق بالتصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة، فإنَّ التخلص من هذه المصادر لا يزال يمثل تحدياً، لا سيما في البلدان ذات البرامج النووية الأصغر حجماً. ومن المتوقع أن تنتهي ماليزيا من المشروع الأول من نوعه للتخلص من المصادر المشعة المختومة المهملة داخل حفر السبر في عام 2023. ويحظى هذا المشروع باهتمام كبير من العديد من الدول الأعضاء التي تتألف أرصدتها أساساً من مصادر مشعة مختومة مهملة. وتنظر كل من بلغاريا وجورجيا وغانا، من بين دول أخرى، في استخدام هذه التكنولوجيا للتخلص مما لديها من هذه المصادر.

84- ولا يزال التقليل إلى أدنى حد من حجم النفايات المشعة يشكِّل أولوية. ولا تزال الممارسة القياسية المعمول بها في قطاع الصناعة حول العالم هي استخدام التكنولوجيات الحرارية والتقليص الفائق لتحقيق خفض كبير في حجم النفايات الصلبة الضعيفة والمتوسطة الإشعاع. وتخضع البوليمرات الجيولوجية حالياً لدراسات مكثفة في الدول الأعضاء لاستخدامها بدلاً من أسمنت بورتلاند العادي. وفي فرنسا، أنشأت هيئة كهرباء فرنسا وشركة فيوليا (Veolia) مشروعا مشتركاً باسم Waste2Glass لمعالجة النفايات غير القوية الإشعاع لتحويلها إلى شكل نفايات زجاجية مستقرة ومستدامة. وفي المملكة المتحدة، أقام موقع هارويل للبحوث شراكة مع شركة

Augean، وهي شـــركة تعمل في مجال التصـــرف في النفايات الخطرة، بهدف تكييف تكنولوجيا لنفث المياه بمستويات ضغط فائقة لإزالة التلوث من أنابيب موقع البحوث المذكور، ومن ثم التمكين من إعادة تدوير الأنابيب بدلاً من التخلص منها باعتبارها من النفايات المشعة.

85- ويتواصل إحراز تقدُّم في مجال التصرف في أرصدة النفايات القديمة. وفي موقع هانفورد في الولايات المتحدة الأمريكية، بدأت للمرة الأولى معالجة النفايات الكيميائية المشعة على نطاق واسع. وهناك ما يزيد على 50 مليون غالون من النفايات المتراكمة منذ خمسينات القرن الماضي والمخزَّنة حالياً في صهاريج تخزين تحت الأرض إلى حين التخلص منها نهائياً. وتعمل هولندا على تشييد مرفق مبنى تخزين جديد متعدد الوظائف لخزن النفايات المشعة القديمة الناشئة عن إنتاج النظائر الطبية. وسيوفر المرفق سعة تخزينية تكفي حتى عام 2050. وفي المملكة المتحدة، بدأت العمليات في إطار برنامج مدته 20 سنة لنقل نفايات بُرادة المغنسيوم الناشئة عن معالجة وقود ماغنوكس من صوامع يبلغ عمقها ستة أمتار إلى حاويات نفايات من الفولاذ المقاوم للصدأ مصمَّمة لهذا الغرض، بهدف نقل تلك النفايات إلى مرفق خزن حديث.

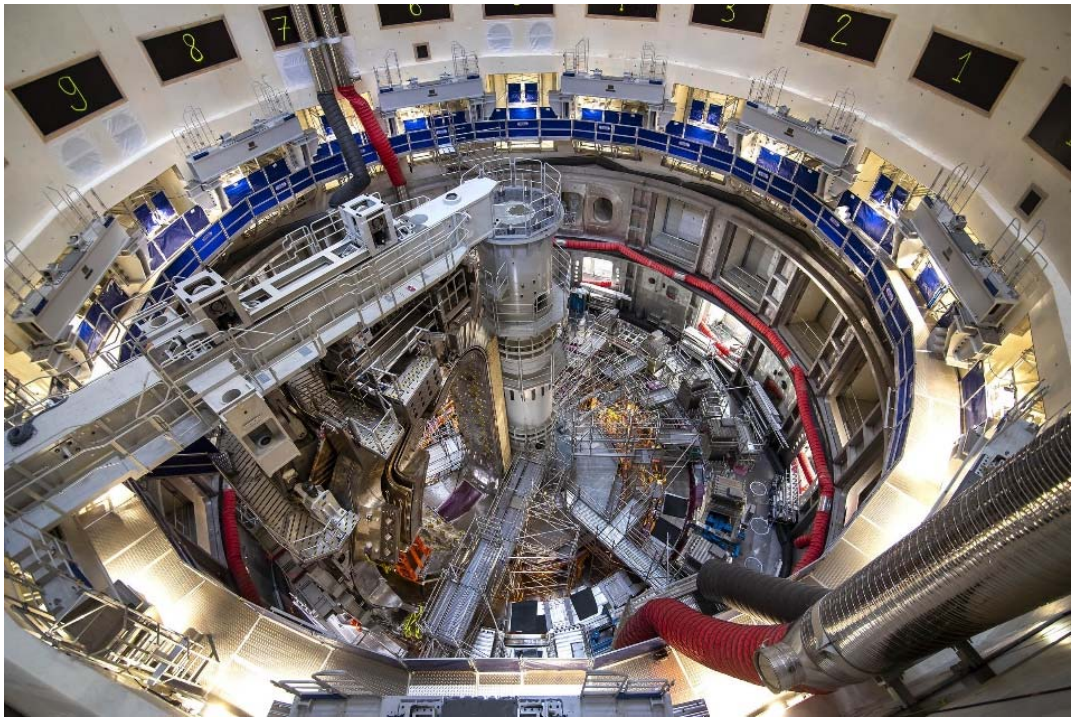
86- وفيما يتعلق بالتعاون الدولي في مجال التصـــرف في النفايات المشـــعة، وُقِّعت مذكرة تفاهم بين شـــركة الكهرباء الوطنية التشيكية في الجمهورية التشيكية وشركة القوى النووية والإخراج من الخدمة في سلوفاكيا من أجل تبادل الخبرات في مجالي تقليل حجم النفايات إلى أدنى حد وإدارة التقادم. وواصلت الرابطة المعنية بالحلول المتعددة الجنسيات للتصـــرف في النفايات المشـــعة، التابعة للمنظمة الأوروبية لتطوير المســـتودعات (إردو)، جهودها الرامية إلى إيجاد حلول متعددة الجنسيات للدول الأعضاء التي لديها أرصدة صغيرة من النفايات الطويلة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع. وواصل البرنامج الأوروبي المشترك المعني بالتصرف في النفايات المشعة تشجيع المشاركين على تعزيز التعاون من أجل التصرف المأمون في النفايات المشعة. وتُواصل منصة الاتحاد الأوروبي التنفيذية المعنية بالتخلص الجيولوجي من النفايات المشـــعة ســـعيها الدؤوب إلى تحقيق ما جاء في تقريرها المعنون "رؤية عام 2025"، وهو أن يبدأ التشغيل المأمون لأول مرافق للتخلص الجيولوجي من الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع وغيرها من النفايات المشعة الطويلة العمر في أوروبا بحلول عام 2025.

دال- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل

الحالة

87- شـهد مشـروع إيتير تحقيق تقدُّم جيد (الشـكل دال-1). وفي حزيران/يونيه 2022، بلغ المشـروع معلماً بارزاً باكتمال تنفيذه بنسبة 77%. واكتمل تشييد المجمَّعة الفرعية الأولى من قطع الوعاء الفراغي، والتي تضمُّ ملفين مغناطيسيين مترابطين خاصين بالمجال الحلقي وعناصر خاصة بالتدريع الحراري، ورُكِّبت في حفرة التوكاماك؛ وتم تسليم القطعة الثالثة من الوعاء الفراغي إلى موقع مفاعل إيتير. واكتملت جميع عناصر الكريوستات بعد الانتهاء من غطائه العلوي. وتحقق تقدُّم كبير على صعيد نظم المحطة: حيث تم تسليم نظام مياه التبريد وصار جاهزاً للإدخال في الخدمة؛ واكتمل تشييد محطة التبريد الفائق، وهي الآن قيد الاختبار الوظيفي؛ ورُكِّبت نسبة 100% من المعدات اللازمة للبلازما الأولى في مباني تحويل الكهرباء للمغناطيسات. بيد أنَّ النتائج التي وردت مؤخراً بناءً على تحليل المكونات الرئيسية الأولى من نوعها في مفاعل إيتير بيَّنت وجود

حاجة إلى إجراء إصلاحات مستفيضة. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل المنظمة المعنية بمفاعل إيتير على معالجة الأسئلة الرقابية التي طرحتها هيئة الأمان النووي في فرنسا.



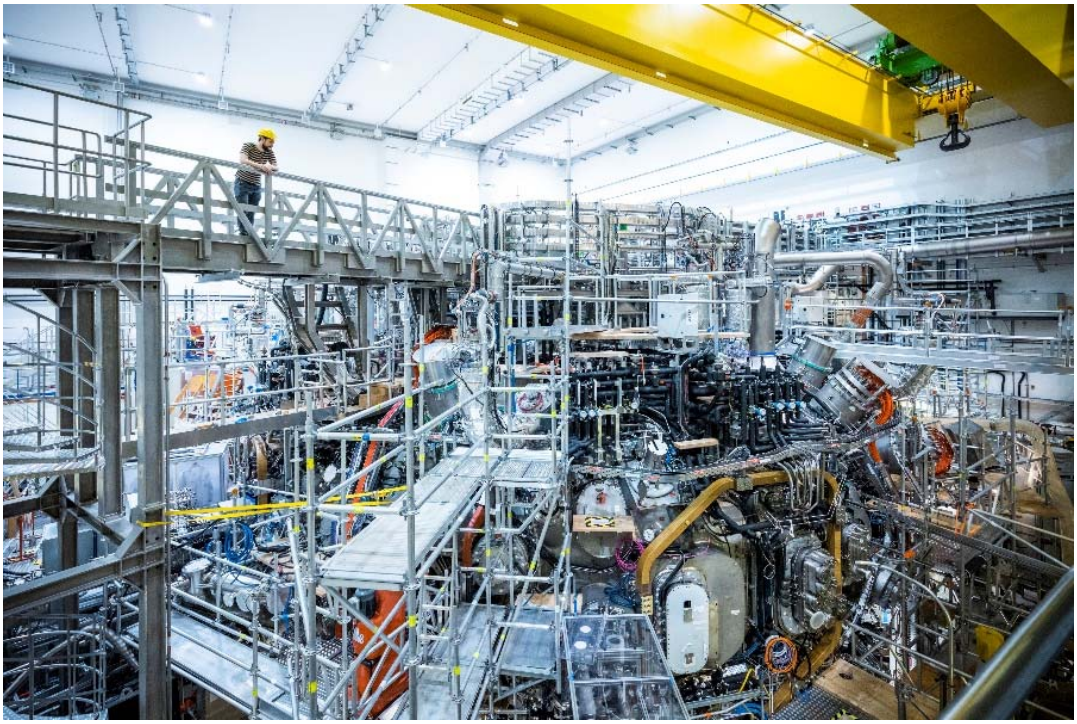
الشكل دال-1- في قلب مبنى التوكاماك بمفاعل إيتير. هذه الحفرة التي يمتد عمقها لثلاثين متراً هي المنصة التي يجري فيها تركيب آلة مفاعل إيتير. ويتقدَّم تجميع المكونات من أعلى إلى أسفل. (الصورة من: المنظمة المعنية بمفاعل إيتير)

88- واستمر التقدُّم في تشكيل الاتحاد الذي سيتولى تشييد المصدر النيوتروني الموجَّه لأغراض محطات قوى الاندماج الإيضاحية في المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية في إسبانيا، ويُعدُّ هذا المصدر النيوتروني مرفقاً حاسم الأهمية في تطوير مواد الاندماج والتحقق منها. وقد اكتمل التخطيط للمشروع، ويجري توفير التمويل لتغطية تكاليف التشييد. وبالمثل، ففيما يخصُّ المشروع الجاري في اليابان والمعني بالتحقق الهندسي وأنشطة التصميم الهندسي لأغراض المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية، استمر إحراز التقدُّم في التصميم الهندسي المتكامل لمحطة المرفق المذكور وفي جمع البيانات اللازمة لاتخاذ القرارات بشأن تشييد المصدر النيوتروني الاندماجي المستقبلي وتشغيله واستغلاله وإخراجه من الخدمة، من خلال الانتهاء من أنشطة التحقق الهندسي من مرافقه الثلاثة الرئيسية، ألا وهي: مرفق الاختبار، ومرفق أهداف الليثيوم، ومرفق المعجل.

89- وقد انقطعت عملية إدخال جهاز التوكاماك JT-60SA في الخدمة في اليابان، بعد بدئها في نيسان/أبريل 2020، بسبب عدم كفاية قدرات عزل الجهد الكهربائي في أحد الملفات المغناطيسية. ويجري إدخال تحسينات على قدرات العزل، ومن المتوقع استئناف الإدخال في الخدمة في أواخر عام 2023.

90- وفي تشرين الأول/أكتوبر 2022، دخل مرفق فندلشتاين X-7 (مرفق W7-X) – وهو المرفق الأكثر تقدُّماً في العالم من نوع أجهزة الستلاريتور، وهو موجود في ألمانيا – مرحلته التجريبية الثانية. واكتمل تماماً

تجهيز مرفق W7-X بمجموعة مبردة بالماء من المكونات المواجهة للبلازما، تتيح إجراء عمليات تفريغ لمدة تصل إلى 30 دقيقة عند مستوى 10 ميغاواط من الحرارة، وهو ما ينبغي أن يكفل تحقيق التشغيل المستمر.



الشكل دال-2- بعد مضاعفة القدرة على توليد الحرارة وإضافة إجراءات جديدة لتشخيص الأخطاء وتجهيز المرفق بأنابيب تبريد يبلغ مجموع أطوالها 6.8 كيلومتراً، بدأ مرفق الستلاريتور W7-X حملته التجريبية العلمية الثانية. (الصورة من: معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما)

91- وأفادت دراسة[1] نُشرت في أيلول/سبتمبر بأنَّ التجارب المضطلع بها في مرفق التوكاماك البحثي المتقدم الفائق التوصيل في جمهورية كوريا قد تمخضت عن نظام لاندماج البلازما يفي بمتطلبات الأداء اللازمة لمحطة قوى، بما في ذلك بلوغ درجة حرارة مرتفعة تتجاوز 100 مليون كلفن وتحقيق مستوى كافٍ من التحكم في أوجه عدم الاستقرار لضمان التشغيل في حالة ثابتة لعشرات من الثواني. وقد عزَّزت هذه النتائج الثقة في تصميم التوكاماك بوصفه مساراً واعداً باتجاه محطات القوى الاندماجية التجارية.

92- وفي 13 كانون الأول/ديسمبر 2022، أعلنت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة عن تحقيق إنجاز علمي تاريخي في مجال طاقة الاندماج. فقد تمكَّن الباحثون في مرفق الإشعال الوطني، الموجود في مختبر لورانس ليفرمور الوطني، من إنتاج نحو 3,15 ميغا جول من طاقة الاندماج مما مجموعه 2,05 ميغا جول مصدرها 192 حزمة ليزرية، ومن ثمَّ تحقيق مكسب صافٍ في جهة الهدف يبلغ نحو 1,5 ميغا جول، للمرة الأولى في تاريخ تجارب الاندماج. وبلغت الطاقة اللازمة لتوليد الحزم الليزرية قرابة 300 ميغا جول.

---

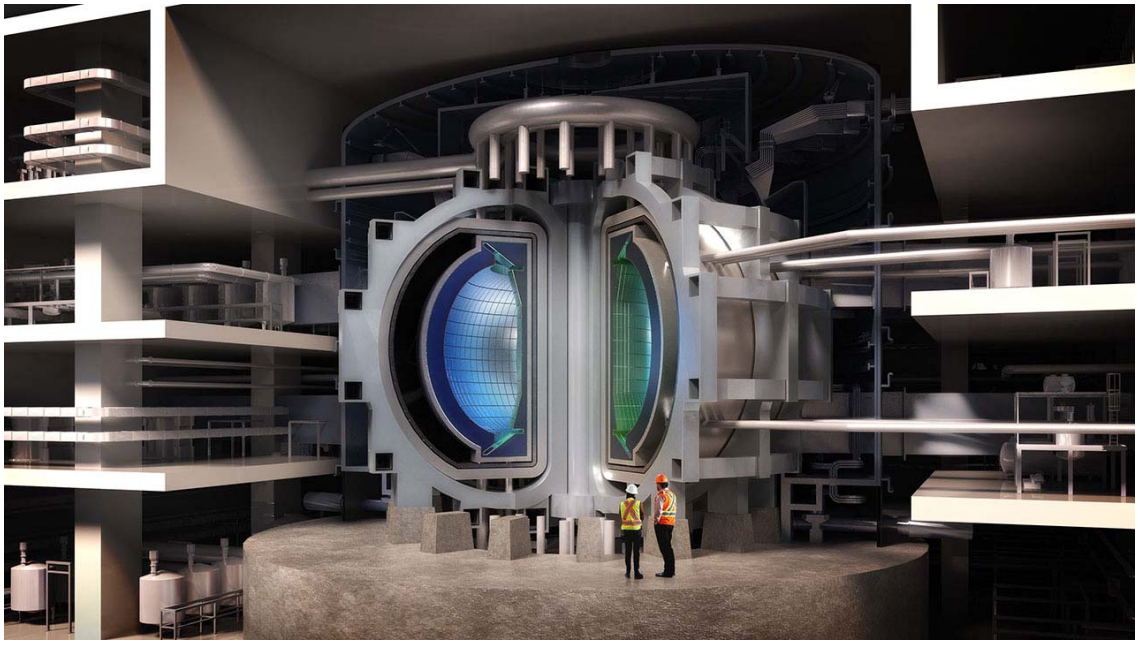
[1] Han, H., Park, S.J., Sung, C. et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions. Nature 609, 269–275 (2022) (الأيونات السريعة تيسِّر تحقيق نظام بلازما للاندماج المستدام المرتفع الحرارة)
https://doi.org/10.1038/s41586-022-05008-1

93- وتواصل فرادى الحكومات والشركات الخاصة وبعض المشاريع المشتركة بين القطاعين العام والخاص العمل على تطوير مفاهيم محطات قوى الاندماج الإيضاحية، والتي تهدف إلى إيضاح إمكانية تحقيق مكسب في صافي الكهرباء من الاندماج (الشكل دال-3). وهناك على الأقل 11 مفهوماً لمحطات قوى الاندماج الإيضاحية في مراحل مختلفة من التطوير في الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان، ويتراوح الموعد المستهدف للانتهاء منها بين عامي 2025 و2055. وفي إيطاليا، استمر التقدم في تشييد مرفق اختبار التوكاماك القائم على المحوّل الحراري، وهو جهاز توكاماك فائق التوصيل مكرَّس لدراسة الحلول القائمة على محولات الحرارة القدامة لأغراض محطات قوى الاندماج الإيضاحية.

الشكل دال-3- يوجد حاليًّا قيد التشغيل أو التشييد أو التخطيط ما يزيد على 130 من أجهزة الاندماج التجريبية التابعة للقطاعين العام والخاص، وهناك عدد من المنظمات التي تدرس تصاميم لمحطات قوى اندماجية إيضاحية. (المصدر: نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج، الوكالة الدولية للطاقة الذرية).

94- وفي تشرين الأول/أكتوبر 2022، أعلنت حكومة المملكة المتحدة المكان المختار – في موقع محطة قوى تعمل بالفحم في وست بيرتون، نوتغهامشاير – لإنشاء محطة قوى الاندماج الإيضاحية الخاصة بها، والتي تحمل اسم "التوكاماك الدائري لإنتاج الطاقة"، والمستهدف الانتهاء منها بحلول عام 2040، والتي تهدف إلى إيضاح إمكانية توليد مكسب في صافي الكهرباء من الاندماج وإنتاج التريتيوم ليُستخدم كوقود لها.

95- وفي تشرين الأول/أكتوبر 2022 أيضاً، أعلنت شركة General Atomics في الولايات المتحدة الأمريكية عن خططها لإنشاء محطة اندماجية تجريبية قائمة على جهاز توكاماك متقدم صغير الحجم ثابت الحالة (الشكل دال-4). وسوف يستند النهج التصميمي إلى مجموعة متقدمة من أجهزة الاستشعار وخوارزميات التحكم والحواسيب العالية الأداء للتحكم في البلازما، وإلى دُثُر توليد مصنوعة من كربيد السليكون لإنتاج التريتيوم، وإلى الموجات الدقيقة لإنتاج الحرارة اللازمة للتفاعلات الاندماجية.



الشكل دال-4- تصور للشكل الداخلي للمحطة التجريبية الاندماجية التابعة لشركة General Atomics.
(المصدر: شركة General Atomics)

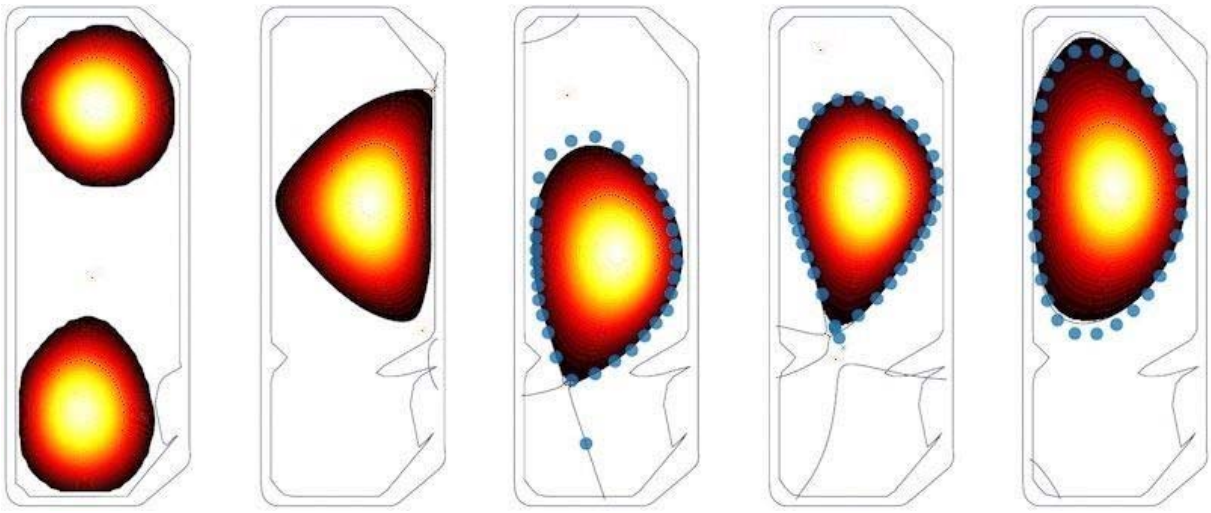
96- واستمرت في عام 2022 الزيادة الباهرة في استثمارات القطاع الخاص. حيث أعلنت شركات القطاع الخاص أنَّها قد اجتذبت قرابة 5 مليارات دولار أمريكي إجمالاً، وأكثر من 3 مليارات دولار أمريكي منذ حزيران/يونيه 2021. وحتى عام 2022، كان عدد هذه الشركات يبلغ 33 شركة في أنحاء مختلفة من العالم، وتحديداً في أستراليا وإسرائيل وألمانيا وإيطاليا والصين وفرنسا وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان (مع استئثار الولايات المتحدة الأمريكية بنسبة تفوق 70%).

الاتجاهات

97- في الولايات المتحدة الأمريكية، شهد مؤتمر قمة البيت الأبيض بشأن وضع رؤية عقدية جريئة للطاقة الاندماجية التجارية، والذي عُقد في آذار/مارس 2022، إطلاق ثلاث مبادرات جديدة، بما في ذلك مبادرة جديدة بشأن الاندماج على نطاق وزارة الطاقة، شملت تعيين منسق رئيسي جديد معني بالطاقة الاندماجية في مكتب وكيل الوزارة لشؤون العلوم والابتكار بوزارة الطاقة في الولايات المتحدة. وانطوت هذه المبادرة على سمة مشتركة هي الإقرار بأنَّ الشراكات بين القطاعين العام والخاص تمثِّل فرصة لتسريع وتيرة البحث والتطوير والإيضاح في مجال الطاقة الاندماجية. ونتيجة لذلك، أطلق مكتب العلوم التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة في أيلول/سبتمبر 2022 إعلاناً عن فرص للتمويل دعا فيه لتقديم الطلبات لبرنامج جديد لتطوير الاندماج قائم على المعالم المرحلية بالشراكة مع القطاع الخاص صوب التصميم الناجح لمحطة اندماجية تجريبية.

98- وقد شهد مجالا النمذجة القائمة على الذكاء الاصطناعي لديناميات البلازما والتحكم الآني في تجارب الاندماج تحسناً كبيراً في كفاءتهما، مما يتيح مساراً للتعجيل بالوصول إلى تحقيق الاندماج النووي. ومن أمثلة ذلك دراسة نُشرت في عام 2022 وأوضحت أنَّ نظم التحكم القائمة على الذكاء الاصطناعي قادرة على إيجاد وصون طائفة واسعة من أشكال وأنساق البلازما في توكاماك TCV في سويسرا عن طريق التلاعب بالملفات

المغناطيسية التسعة عشر الموجودة داخل الجهاز (الشكل دال-5). وفي إطار مشروع بحثي منسق أُطلق مؤخراً، وضعت الوكالة وشركاؤها حالات استخدام وأسساً للمقارنة، وجمعت البيانات ذات الصلة من أجل اختبار تطبيقات الذكاء الاصطناعي في علوم الاندماج على مستوى دولي.



الشكل دال-5- طائفة من الأشكال والأنساق المختلفة للبلازما أنتجها نظام التحكم القائم على الذكاء الاصطناعي. من اليسار إلى اليمين: قطرتان، مثلث سالب، شكل يشبه مفاعل إيتر، ندفة ثلج، بلازما مطوَّلة. (المصدر: شركة DeepMind، والمركز السويسري للبلازما التابع للمعهد الاتحادي السويسري للتكنولوجيا في لوزان).

99- وبالإضافة إلى العلوم التجريبية، تعمل الدول الأعضاء على التعجيل بتطوير التكنولوجيا مع ظهور الاندماج في القطاع الخاص وما ترتب على ذلك من زيادة كبيرة في رأس المال المستثمر فيه وفي الإنجازات المتحققة مؤخراً، فضلاً عن التقدم المحرز في مشاريع الاندماج الدولية والوطنية الواسعة النطاق. وفي هذا السياق، هناك عدة دول أعضاء تنظر في خيارات لوضع إطار أمان وطني مناسب لنظم الاندماج. والمعايير والإرشادات القائمة بشأن أمان تصميم المنشآت النووية، مثل محطات القوى النووية أو المعجلات، لا تتماشى مع خصوصيات محطات القوى الاندماجية ولا تراعي الأخطار المحتملة المرتبطة بها.

100- وفي الوقت الراهن، هناك نحو عشر دول أعضاء تدير مرافق تجريبية مختلفة معنية بالاندماج. وعموماً، فلا ينتج عن تشغيل هذه المرافق سوى كميات محدودة للغاية من المواد المشعة لأغراض إيضاح جدوى المفاهيم المقترحة. وتطبّق الدول الأعضاء المتطلبات المتعلقة بإصدار الأذون والإشراف، بعد تكييفها عند الاقتضاء، بالاستناد إما إلى أطر الوقاية من الإشعاعات أو إلى أطر المرافق/المنشآت النووية من أجل استيعاب أنشطة البحث والتطوير المبكرة بشأن مرافق الاندماج التجارية في المستقبل. وهذا النهج لا يصلح للتطبيق إلا في الأجل القريب، ولا بدَّ من مزيد من التطوير في هذا المجال في المستقبل.

101- وقد أقرت بلدان عديدة بأنَّه سيلزم تحديث الأطر الوطنية القائمة أو وضع أطر وطنية جديدة لاستيعاب التعقيدات الإضافية التي تنطوي عليها مرافق الاندماج التجارية. ويمكن لهذه التعقيدات أن تشمل استخدام أو توليد أرصدة كبيرة من المواد المشعة والظروف التشغيلية المتطرفة (مثل درجات الحرارة المرتفعة، وظروف الخلاء، وتكنولوجيات التبريد بالفلزات السائل)، ومن ثم الحاجة لاستحداث مواد جديدة. وبالإضافة إلى ذلك، فالاندماج

ينطوي على مستويات مختلفة من الأخطار والمخاطر المرتبطة بها بالمقارنة مع عمليات الانشطار، ومن ثمَّ قد يتطلب إطاراً رقابيًّا مكرَّساً. وقد تختلف أيضاً التوقعات المتعلقة بالتحكم في المخاطر والنهج الذي تتبعه الهيئة الرقابية.

102- وفي هذا السياق، يمكن للخبرة المكتسبة على مدى 70 عاماً في مجال مفاعلات الانشطار النووي أن تساعد على تطوير تكنولوجيا الاندماج لإنتاج الطاقة من خلال إقامة أوجه تآزر على صعيد تطوير التكنولوجيا بين مجالي الانشطار والاندماج النوويين.

103- ويرتبط وضع إطار وطني قانوني ومؤسسي ورقابي ملائم للاندماج ارتباطاً جوهريًّا بتطوير هذا النوع الجديد من التكنولوجيا ونشره التجاري في المستقبل. ومن المفهوم جيداً أنَّ التنسيق العالمي في هذا المجال من شأنه أن يدعم نهوض صناعة عالمية في مجال الاندماج وأن يعجِّل بذلك.

هاء- مفاعلات البحوث ومعجلات الجسيمات والأجهزة النووية

هاء-1- مفاعلات البحوث

الحالة

104- في نهاية عام 2022، كان هناك 233 مفاعلًا بحثيًّا عاملًا، بما في ذلك المفاعلات المغلقة مؤقتاً، في 53 بلداً. واستمرت تلك المفاعلات في توفير الحزم النيوترونية وخدمات التشعيع التي لا غنى عنها في مجالات العلوم والطب والصناعة، كما استمرت في المساهمة في التعليم والتدريب. ويُبيّن الجدول هاء-1 في المرفق التطبيقات الأكثر شيوعاً لمفاعلات البحوث.

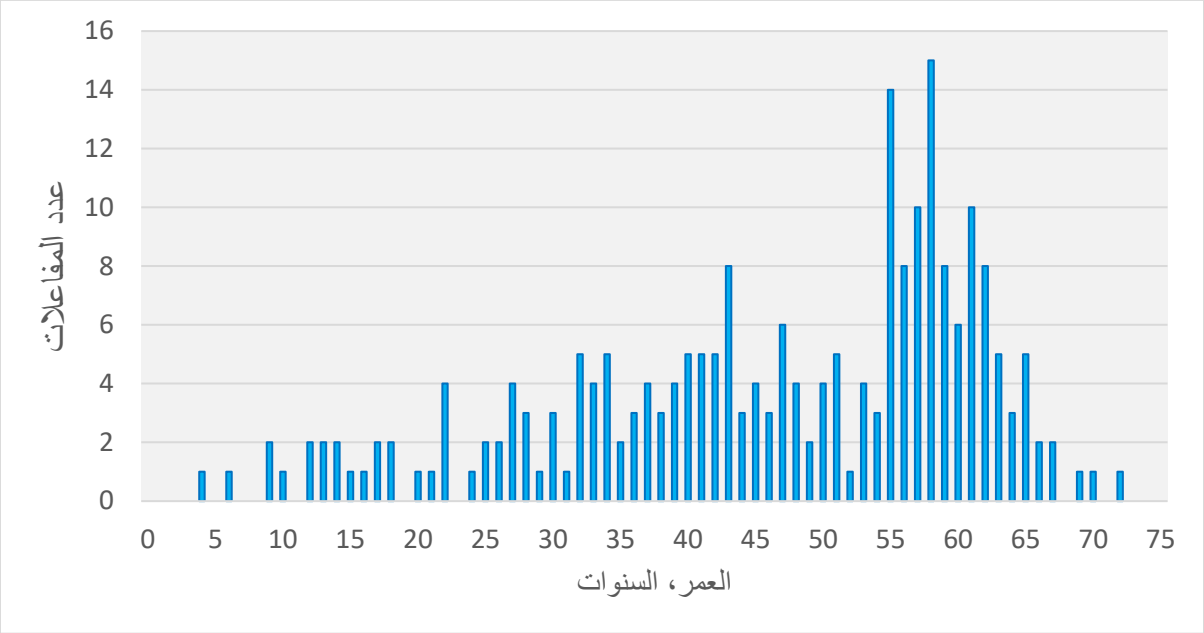
233 من مفاعلات البحوث العاملة في **53** بلداً في نهاية عام 2022

105- وهناك أحد عشر مفاعل بحوث جديد، بما في ذلك مجمعة واحدة دون حرجة ونظام واحد يعمل بواسطة المعجلات، قيد الإنشاء في عشرة بلدان هي: الاتحاد الروسي، والأرجنتين، وأوكرانيا، والبرازيل، وبوليفيا، دولة - المتعددة القوميات، والجمهورية التشيكية، وجمهورية كوريا، والصين، وفرنسا، والمملكة العربية السعودية. وتُوجد خطط رسمية لتشييد مفاعلات بحوث جديدة في أربع عشرة دولة عضواً هي: بلجيكا، و بنغلاديش، وبيلاروس، وتايلند، وجنوب أفريقيا، وزامبيا، والصين، وطاجيكستان، والفلبين، وفييت نام، ونيجيريا، والهند، وهولندا، والولايات المتحدة الأمريكية. وهناك عدد كبير من البلدان التي تنظر في تشييد مفاعلات بحوث، وهي تحديداً إثيوبيا، وأذربيجان، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، ورواندا، والسنغال، والسودان، والعراق، وغانا، والفلبين، وكينيا، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، والنيجر، والهند.

106- واستمرت الجهود الدولية الرامية إلى التقليل إلى أدنى حد من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع المدني. وفي عام 2022، تم تحويل المفاعل IVG.1M في كازاخستان إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء. وحتى اليوم، هناك إجمالاً 108 مفاعلات بحوث ومرافق رئيسية لإنتاج النظائر الطبية إما تمَّ تحويلها من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكَّد أنَّه يجري العمل على إغلاقها. وبحلول نيسان/أبريل 2023، ستكون الأساليب المستخدمة من قبل جميع المنتجين الرئيسيين حول العالم لإنتاج الموليبدينوم-99، وهو أعلى النظائر المشعة الطبية طلباً، خالية من اليورانيوم الشديد الإثراء. وبلغت كمية اليورانيوم الشديد الإثراء التي أُعيدت إلى بلدان منشئها أو جرى التخلص منها بطريقة أخرى من 48 بلداً (وتايوان، الصين) ما مجموعه 6885 كيلوغراماً.

الاتجاهات

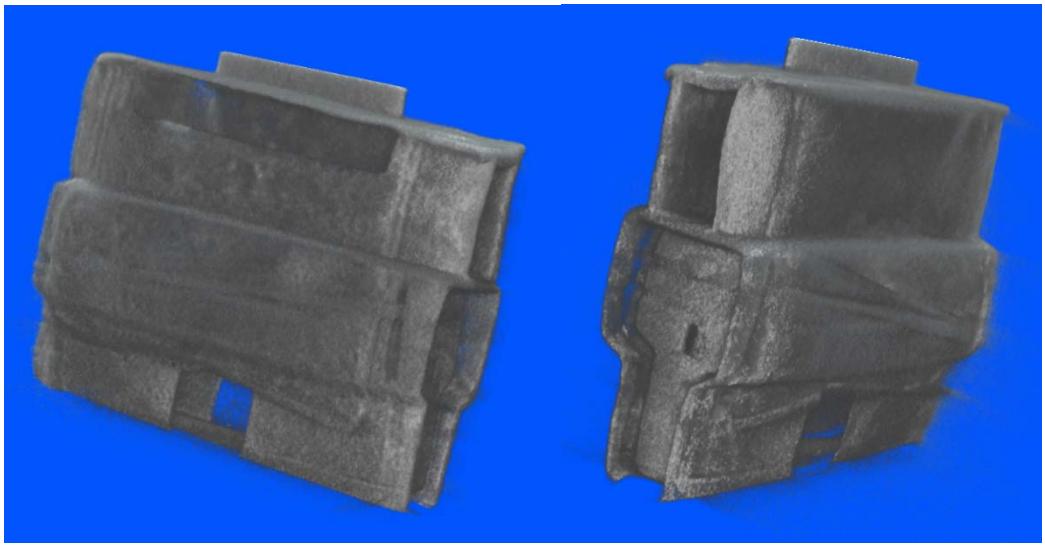
107- تقترب نسبة مفاعلات البحوث العاملة لمدة 40 عامًا على الأقل من 70%. وهناك العديد من المنظمات المشغلة التي وضعت استراتيجيات استباقية وبرامج منهجية لإدارة التقادم والتجديد والتحديث، أو هي بصدد ذلك، من أجل التمكين من مواصلة التشغيل المأمون لمدة 60 عاماً فأكثر. وتنظر بعض المنظمات المشغلة لمفاعلات البحوث الكثيفة الاستخدام في تمديد عمر تلك المفاعلات النشط إلى ما بين 80 و100 عام (الشكل هاء-1). وهناك عدد من العناصر التي صار من المقبول عموماً أن تنطوي عليها هذه البرامج، وهي فحص الهياكل والنظم والمكونات من حيث تأثيرها في أمان التشغيل وموثوقيته؛ وتحديد آليات التدهور وفهمها؛ والكشف عن آثار التقادم ورصدها والتخفيف من حدتها.



الشكل هاء-1- توزيع مفاعلات البحوث العاملة بحسب العمر، تشرين الثاني/نوفمبر 2022.
(المصدر: قاعدة بيانات مفاعلات البحوث التابعة للوكالة الدولية للطاقة الذرية)

108- ويستفيد العديد من البلدان من فرص الوصول إلى مفاعلات البحوث من خلال مبادرات التعاون الدولية والإقليمية، مثل المراكز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث ومختبرات المفاعلات على شبكة الإنترنت.

109- وبعد أن شهدت أنشطة مفاعلات البحوث شيئاً من التراجع بسبب جائحة كوفيد-19، تكثِّف الدول الأعضاء جهودها من أجل زيادة استخدام مفاعلات البحوث العاملة لديها. وفي حين أنَّ عودة إنتاج النظائر المشعة إلى مستويات ما قبل الجائحة إلى عودة الطلب بدوره إلى مستوياته العادية وإعادة إرساء اللوجستيات وخطوط الإمداد الحيوية، فإنَّ التوسُّع في التطبيقات الأخرى يتطلب النظر بعناية في إمكانات النمو وفي القيود التي قد تحدُّ من تلك الإمكانات. وعلى سبيل المثال، فقد أتاحت التطورات الحالية المتعلقة بالتصوير الشعاعي النيوتروني في مفاعلات البحوث الصفرية القدرة أو المنخفضة القدرة وبموَلِّدات النيوترونات إمكانات جديدة للتوسُّع في تطبيق هذه التقنية التي تُستخدم في جملة مجالات منها البحث والتطوير ودراسات التراث الثقافي والتطبيقات الصناعية. وهناك نظم عالية الجودة ومنخفضة التكلفة طُوِّرت أولاً في مرفق هاينتز ماير لايبنتز للبحوث القائمة على المصادر النيوترونية في ألمانيا، وصارت تُنفَّذ الآن في مرافق أخرى. والتُقطت صور مقطعية ثلاثية الأبعاد بفضل نظام التصوير النيوتروني المشيَّد حديثاً في المفاعل VR-1 التابع للجامعة التقنية التشيكية في براغ (الشكل هاء-2). ويعمل هذا المفاعل بقدرة 500 واط، وهو مستوى طاقة أقل مما كان يعتبر في السابق لازماً للتصوير المقطعي النيوتروني. ورُكِّب نظام مماثل في مفاعل البحوث RECH-1 في شيلي، في حين اختُبر بنجاح في مرفق علوم النيوترونات التابع للوكالة والمنشأ حديثاً في زايبرسدورف نظام آخر قائم على مولدات نيوترونات صغيرة الحجم تعتمد على اندماج الديوتيريوم واندماج الديوتريوم والتريتيوم.



الشكل هاء-2- مقطعان عرضيان لقفل قديم من التبت، التُقطا بالتصوير المقطعي في المفاعل VR-1 البالغة قدرته 500 واط التابع للجامعة التقنية التشيكية في براغ (الصورة من: الجامعة التقنية التشيكية في براغ، الجمهورية التشيكية؛ ومركز هاينتز ماير لايبنتز، جامعة ميونيخ التقنية، ألمانيا)

هاء-2- معجلات الجسيمات

الحالة

110- العلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون هو نوع جديد من علاج السرطان يجمع بين استهداف الورم بمستحضر صيدلاني قائم على البورون واستخدام حزمة نيوترونية خارجية. وقد استمر تزايد الاهتمام بتقنية أسر النيوترونات بالبورون في جميع أنحاء العالم، لا سيما بعد الموافقة في اليابان على استخدام هذه التقنية في المرافق القائمة على المعجلات كعلاج إكلينيكي روتيني لحالات الإصابة المتكررة بسرطانات الرأس والعنق غير القابلة للاستئصال (الشكل هاء-3). وهناك بلدان أخرى لديها مرافق بلغت الآن مرحلة متقدمة من التطوير صوب توفير العلاج الإكلينيكي الروتيني باستخدام هذه التقنية، كما هو الحال في هلسنكي بفنلندا وشيامن بالصين، وأُعلن في عام 2022 عن مشاريع جديدة قائمة على المعجلات، بما في ذلك تشييد مرفق ثان في الصين في مقاطعة هاينان، ومرفق في بروكسل ببلجيكا. وهناك الآن أكثر من 20 من المرافق القائمة على المعجلات لتقديم العلاج بهذه التقنية في 11 دولة عضواً في مراحل مختلفة بدءاً من التخطيط وصولاً إلى التشغيل الروتيني، وهناك عدة شركات تقدِّم حلولاً تجارية فيما يتعلق بالمعجلات، والأهداف المستخدمة في إنتاج النيوترونات ومكونات التهدئة، ونظم تخطيط العلاج وضبط وضعية جسد المريض، والمستحضرات الصيدلانية. وفي مجال التواصل الخارجي وبناء القدرات، تعمل الجمعية الدولية للعلاج بأسر النيوترونات بنشاط وتصدر بيانات منتظمة، وتنظم مؤتمراً سنويًّا وفعاليات مكرسة للجيل المقبل من المهنيين المتخصصين في العلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون.

الشكل هاء-3- أحد الطلاب يؤدي دور مريض أثناء ضبط وضعيته تحضيراً لتلقي العلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون خلال دورة تدريبية عُقدت مؤخراً في مركز كانساي الطبي للعلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون، اليابان. (الصورة من: مركز كانساي الطبي للعلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون)

الاتجاهات

111- تتمثل إحدى الاستخدامات الصناعية الرئيسية لمعجلات الإلكترونات المنخفضة الطاقة في تعقيم المنتجات الطبية، بما في ذلك الأجهزة الطبية التي تُستخدم لمرة واحدة. وقد جرت العادة تاريخيًّا على تنفيذ معظم إجراءات التعقيم الإشعاعي باستخدام مصادر أشعة غاما، مثل الكوبلت-60. ومع ذلك، فبسبب محدودية سلسلة الإمداد وشواغل الأمن والأمان المرتبطة باستخدام الكوبلت-60 والتصرف فيه، يسعى العديد من المستخدمين حثيثاً لاستخدام البدائل القائمة على المعجلات. وقد استُخدمت تقنية التعقيم بالحزم الإلكترونية المباشرة طوال سنوات عديدة لمعالجة المنتجات المنخفضة الكثافة بكفاءة. وبالإضافة إلى ذلك، فإنَّ تجهيز معجلات الإلكترونات بجهاز لتحويل الإلكترونات إلى أشعة سينية يكفل توليد الأشعة السينية بمستوى من كثافة التدفق يكفي لأغراض استخدامات صناعية أخرى. ورغم أنَّ هذا الحل يستهلك قدراً مرتفعاً نسبيًّا من الطاقة، فإنه يجمع بين مزايا المعجلات (ارتفاع معدل الجرعات ومن ثم ارتفاع القدرة الإنتاجية) ومزايا مصادر غاما (عمق اختراق المنتج).

112- ولا يزال الهدف الرئيسي لأوساط المستخدمين يتمثل في تطوير معجلات إلكترونات أكثر قوة وموثوقية، وهناك مجموعة متعددة من موردي التكنولوجيا حول العالم يعملون بنشاط في هذا المجال. والطلب مرتفع على الأجهزة المتوافرة حاليًّا كما أنَّ منتجي المعجلات يعملون بكامل طاقتهم لمجاراة هذا الاهتمام المتزايد. وفي الوقت الحاضر، هناك العديد من الشركات التي تقدم حلاً كاملاً (يشمل معجل الإلكترونات، والأهداف المستخدمة في التحويل للأشعة السينية، وهياكل التدريع، والسير الناقل، ونظم التحكم في العمليات، وما إلى ذلك)، غالباً ما يكون من الممكن تعديله ليتناسب مع احتياجات العملاء، مثلاً لتحقيق أعلى قدرة إنتاجية ممكنة، أو لمعالجة منتجات حساسة، أو إتاحة طائفة أوسع من الاستعمالات المتعددة. وتؤدي هذه الجهود الجارية إلى تغيُّر تدريجي في مشهد تكنولوجيات التشعيع، مما يؤدي إلى زيادة في حصة المعجلات من المنتجات والخدمات المتاحة.

هاء-3- الأجهزة النووية

الحالة

113- يتزايد باستمرار عدد ونطاق التطبيقات التي يُستخدم فيها الذكاء الاصطناعي ومشتقاته في مجال الأجهزة النووية. وفي الآونة الأخيرة، بدأ استخدام الذكاء الاصطناعي في الكشف عن الإشعاعات في النطاقات المختلطة لغرض التمييز بين النبضات الناتجة عن الجسيمات المختلفة. ومن الأمثلة النموذجية لذلك التمييز بين إشارات الفوتونات وإشارات النيوترونات في الوماضات البلاستيكية. وتُطبَّق خوارزميات تصنيفية للتمييز بين النبضات بنجاح بعد معالجتها.

114- وعلى صعيد علمي مماثل، فإنَّ علوم الحياة تستفيد بالفعل من تطبيقات الذكاء الاصطناعي. وتتمثَّل إحدى المشاكل العلمية القائمة منذ أمد طويل في فك رموز هياكل تطوي البروتينات بتعيين بنائها البلوري الثلاثي الأبعاد باستخدام الأشعة السينية أو النيوترونات. وبالإضافة إلى أجهزة الكشف المتقدمة التي صارت متوفرة الآن، فقد ركَّزت الأوساط المعنية بالذكاء الاصطناعي، بما فيها البائعون في القطاع الخاص، جهودها على خوارزميات التعلم العميق التي تتنبأ بنجاح بهياكل البروتينات. وفي الآونة الأخيرة، أدَّت التطورات التي شهدتها برمجيات التعلم العميق بالاقتران مع الأدوات المتاحة للعموم إلى تأثير كبير في فهمنا لتطوي البروتيوم البشري وصولاً إلى مستوى المسافات الذرية، ومن المتوقع أن تؤدي هذه التطورات إلى اكتشافات كبرى في السنوات المقبلة.

الاتجاهات

115- وما فتئت تطبيقات الذكاء الاصطناعي الأوسع نطاقاً تُحدِثُ ثورةً في عالم فيزياء الطاقة العالية. فمع رفع مستوى معجلات الهدرونات بما يتيح بلوغ درجات سطوع أعلى، يتزايد عدد الجسيمات التي تنتج عن كل تصادم. ونتيجة لذلك، يتعيَّن تشغيل أجهزة الكشف المستخدمة في تتبُّع مسارات الجسيمات بمعدَّلات عدٍّ أعلى، بالنظر إلى احتمال زيادة العدِّ الإشعاعي الناتج عن مستوى الإشعاع الطبيعي، عند دراسة الجسيمات عن طريق استهداف قنوات الاستكشاف النادرة. ويلزم أن تتعامل خوارزميات إعادة التكوين مع كمية أكبر من البيانات بسبب زيادة حالات الكشف والتجمعات والمسارات. وقد اعتمدت الأوساط المعنية بفيزياء الجسيمات استخدام خوارزميات التعلم الآلي، من أجل ترشيد عملية إعادة تكوين المسارات وتسريع وتيرتها، وكذلك من أجل التقليل إلى أدنى حد من تأثير الخلفية في سوء تحديد المسارات. وقد نظَّمت هذه الأوساط أيضاً مسابقات مفتوحة يُدعى فيها المشاركون إلى إدخال خوارزمياتهم لمعالجة منظومة السطوع الشديد في المصادم الهدروني الفائق الكبر. ويحظى الترشيد في هذا الصدد بأهمية أكبر مع دخول أجهزة الكشف عصر قراءة الإشارات دون تدخل خارجي.

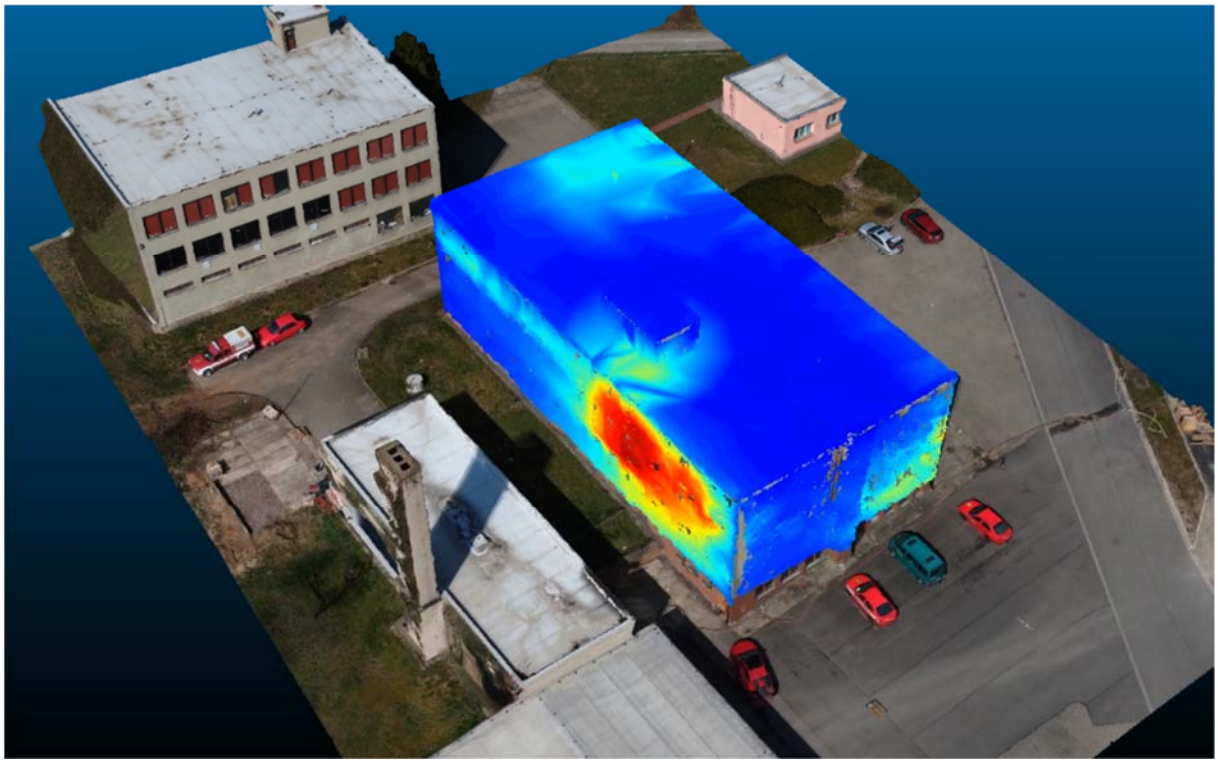
وكما كان الحال في الماضي، تنطوي معظم هذه الابتكارات في مجال فيزياء الجسيمات أيضاً على إمكانات كبيرة من حيث إمكانية تطبيقها في الأجهزة النووية المتقدمة.

116- ويشهد استخدام الطائرات بلا طيار في الكشف عن الإشعاعات ومراقبتها اتجاهاً متأثراً ببارامترات جديدة تميل إلى زيادة الحمولة وتحقيق مستويات أعلى من الأمان وفترة الصلاحية للتحليق والمقاومة ودقة التوجيه. وقد ظهرت أنواع جديدة متاحة تجاريًّا من الطائرات بلا طيار لأغراض الكشف عن الإشعاعات وقياس طيف أشعة غاما توفِّر حلاًّ شاملاً لرسم الخرائط الإشعاعية. ويجري العمل على تطوير حاويات آلية تمكِّن من تشغيل الطائرات بلا طيار تلقائيًّا، ويتيح التحكم عن بعد في المهام المسندة إلى هذه المركبات التنفيذ الآلي للإقلاع والهبوط، وشحن البطاريات أو استبدالها، والوقاية من الظروف الجوية، وغير ذلك من الوظائف. وبفضل الزيادة المستمرة في دقة النظم العالمية لسواتل الملاحة، بدأ التركيز في عمليات المسح ينصب على الفحص الدقيق للأجسام الأصغر حجماً مثل أرصفة التحميل في الموانئ أو الحاويات أو المباني.

117- وقد أفضى استخدام تقنية المضاعفات الضوئية المصنوعة من السليكون في أجهزة الكشف عن الإشعاعات إلى تحسين أداء هذه الأجهزة وتصغير حجمها. وتؤدي المكونات الإلكترونية المدمجة المسؤولة عن تصحيح درجات الحرارة وقراءة الإشارات دوراً هامًّا في تنفيذ تكنولوجيا الطائرات بلا طيار. وصارت نظم الطائرات بلا طيار تحتوي على أجهزة كشف من قبيل الوماضات البلاستيكية، وأجهزة الكشف القائمة على عقيق الغادولينيوم-الألومنيوم-الغاليوم (GAGG)، وكذلك أجهزة الكشف التي تمكِّن من الكشف عن أشعة غاما وعن النيوترونات والقائمة على مزيج كبريتيد الزنك المنشَّط بالفضة وفلوريد الليثيوم-6 (ZnS(Ag)/6LiF) أو على الوماضات من نوع CLYC أو CLLB.

118- ويبدو أنَّ استخدام أجهزة الكشف القائمة على وميض البلاستيك يمثِّل اتجاهاً جديداً. والبلاستيك مادة واعدة من حيث انخفاض وزنه النوعي (بكثافة نحو غرام واحد/سم3)، وتنوع أشكاله، وما يتسم به من حساسية كشف عالية. وباستخدام خوارزميات معالجة الطيف القائمة، يمكن لأجهزة الكشف القائمة على البلاستيك أن تميّز بين النظائر المشعة الاصطناعية والطبيعية المنشأ، أو أن تتعرف على من تحديد النويدات المشعة الأساسية، لاسيما النويدات المشعة الصناعية.

119- واستُحدثت أيضاً نهج جديدة لمعالجة البيانات آنيًّا وتجهيزها بعد المعالجة، بهدف ترشيد الوقت الذي تستغرقه الطائرات بلا طيار في تنفيذ مهام الكشف عن الإشعاعات. فعلى سبيل المثال، تتوفر توليفات تجمع بين أجهزة استشعار الإشعاعات وأجهزة كشف المدى وقياسه بالضوء (أجهزة ليدار)، مما يتيح التصوير بأشعة غاما لإنتاج صور ثلاثية الأبعاد عالية الدقة آنيًّا أو رسم خرائط مزدوجة بأشعة غاما والنيوترونات مع التمييز بينهما. واستخدام كاميرا عالية الدقة لإجراء مسح تصويري ثلاثي أبعاد أو استخدام جهاز ليدار يتيح تطبيق تقنيات إعادة تكوين جبرية لتصحيح المسافات فيما يتعلق بجميع الأسطح ذات الصلة، كما يمكِّن جهاز الكشف من الاستجابة على نحو ثلاثي الأبعاد، على النحو المبيَّن في الشكل هاء-4.



الشكل هاء-4- مثال لعملية رسم خريطة إشعاعية ثلاثية الأبعاد باستخدام طائرات بلا طيار لمبنى يحتوي على مصادر/مواد مشعة. (الرسم التوضيحي من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

واو- الأغذية والزراعة

واو-1- التصدي السريع للأزمات في مجال سلامة الأغذية

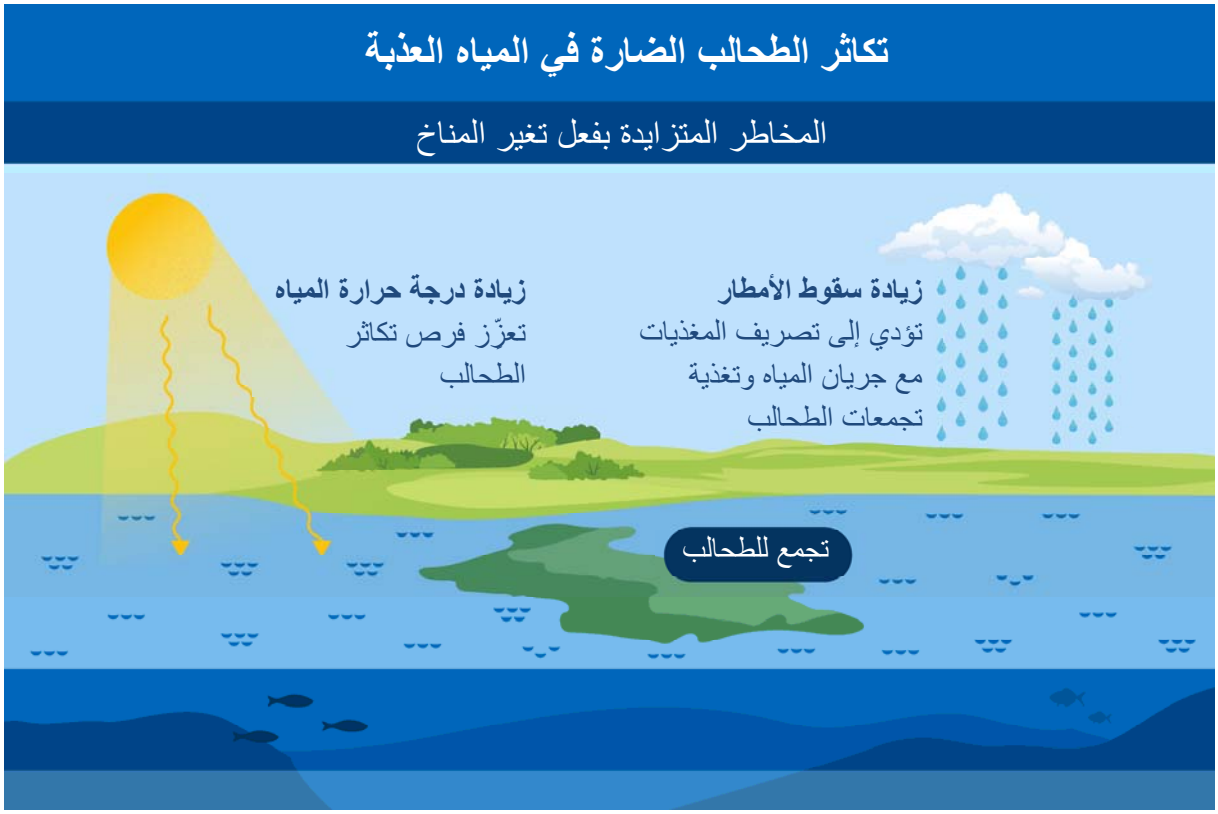
الحالة

120- أبرزت الأحداث الأخيرة، مثل جائحة كوفيد-19 والنزاعات والكوارث الطبيعية المتصلة بالمناخ، الضعف الذي يشوب الإمدادات الغذائية حول العالم في الظروف الضاغطة، كما سلَّطت الضوء على الحاجة إلى زيادة القدرة على الصمود عن طريق إصلاح نظم مراقبة الأغذية وتحسين الدعم التقني. فالأزمات والطوارئ، مثل الظواهر المناخية الشديدة والكوارث الطبيعية والأوبئة والجوائح، تتسبَّب في تعطيل نظم مراقبة سلامة الأغذية، وتُقوِّض سلامة الأغذية والأمن الغذائي، وتتيح فرصاً للغش في الأغذية وارتكاب الجرائم المتعلقة بالأغذية. ولذلك، يُعدُّ تعزيز قدرات التأهب والتصدي السريع في الدول الأعضاء عاملاً أساسيًّا في مواجهة هذه التحديات.

121- وفي العموم، تعتمد نظم مراقبة الأغذية على برامج اختبار مختبرية من مستويين. حيث تُستخدم أساليب اختبار فعالة من حيث التكلفة وعالية الإنتاجية لفحص المنتجات التي أُخذت منها عينات بموجب الخطط الرقابية الوطنية لمراقبة سلامة الأغذية. وفي حال أشارت أي نتائج إلى إمكانية وجود تلوث يفوق المستويات المسموح بها رقابيًّا، فإنَّها تخضع للتحقُّق باستخدام تقنيات أكثر تطوراً واستغراقاً للوقت. وهناك تقنيات نووية تؤدي دوراً

هاماً في هذه الاختبارات، مثل قياس الطيف الكتلي بطريقة التخفيف النظيري وقياسات نسب النظائر المستقرة. وللتأكد من عدم بقاء الأغذية الملوثة في الإمدادات الغذائية، تُوجَّه اختبارات الفحص بحيث تخلص إلى أقل قدر ممكن من النتائج السلبية الكاذبة (أي النتائج التي لا تكشف عن تلوث الأغذية رغم وجوده). ومع ذلك، فبسبب عدم التيقُّن من أداء الأساليب التحليلية وقياساتها، قد تسفر الاختبارات عن نتائج إيجابية كاذبة (أي تصنيف الأغذية غير الملوثة خطأً على أنَّها ملوثة)، مما يؤثر في المنتجين وفي قطاع الأغذية. أما المستوى الثاني – أو الاختبارات التوكيدية – فيحدِّد الأغذية الملوثة تحديداً قاطعاً، ولا يسفر إلا عن قدر قليل للغاية من النتائج الإيجابية الكاذبة. ويوفِّر هذا النوع من النظم الرقابية الحماية لكلٍّ من المستهلكين والمنتجين، ويساعد على تيسير حركة التجارة.

122- ويؤدي تغيُّر الظروف البيئية إلى تحولات في الأنماط الطبيعية للسموم في إنتاج المحاصيل والثروة الحيوانية ومصايد الأسماك. وعلى سبيل المثال، فتغيُّر الظروف المناخية يشجِّع نمو الفطريات المنتجة للسموم الفطرية في مناطق لم تكن تنمو فيها من قبل ولم يسبق للمنتجين فيها أن اضطروا لمراعاة هذا التهديد. ويُرجَّح أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة، بالاقتران مع الزيادة المفرطة في المغذيات، إلى ازدياد وتيرة ومدة تكاثر البكتيريا الزرقاء في العديد من النظم الإيكولوجية المائية، وإلى تراكم الزئبق الميثيلي بيولوجيًّا في أنواع الأسماك التجارية، مما يشكِّل مخاطر إضافية على سلامة الأغذية (الشكل واو-1).



الشكل واو-1- بسبب تغير المناخ، تزداد مخاطر احتواء المأكولات البحرية على السموم الناجمة عن التلوث الذي يُحدثه تكاثر البكتيريا الزرقاء (تكاثر الطحالب الضارة). (الرسم التوضيحي من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، بالاستناد إلى: www.climatecentral.org/climate-matters/harmful-algal-blooms)

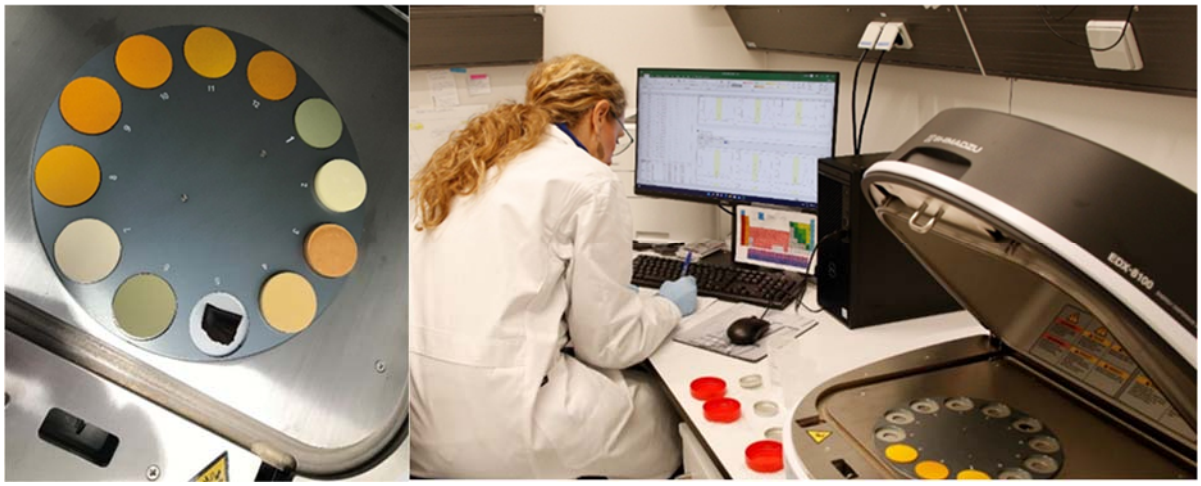
123- ويؤثر تغير المناخ أيضاً في انتشار وتوزيع الآفات ونواقل الأمراض، مما يقتضي تغيير استخدام مبيدات الآفات والعقاقير البيطرية. وقد يشكِّل ذلك مخاطر إضافية إذا بقيت مخلفات من هذه المبيدات والعقاقير عالقة في الأغذية. وكُشف عن وجود علاقة بين استخدام المواد المضادة للميكروبات لعلاج حيوانات المزارع ومقاومة هذه المضادات، مما قد يؤدي إلى نشوء سلالات مقاومة من البكتيريا ومن ثم احتمالية انتقال هذه البكتيريا عن طريق الأغذية الملوثة.

124- وقد تترتب على كل عامل من هذه العوامل، منفرداً أو مع غيره، آثار جوهرية على مختلف عناصر نهج الصحة الواحدة، لا سيما فيما يتعلق بسلامة وأمن إمدادات الأغذية والأعلاف. وتتفاقم هذه الآثار عند تعطُّل نظم المراقبة العادية، وهو ما تجسَّد في تأثير جائحة كوفيد-19، مع أنَّ المرض لا ينتقل عن طريق الأغذية.

الاتجاهات

125- في حالات الطوارئ، عندما تتعطَّل سلاسل الإمداد ويطرأ اختلال على عمل مختبرات ونظم مراقبة الأغذية أو تصبح غير متاحة، تكون الأولوية المطلقة هي ضمان الحفاظ على سلامة إمدادات الغذاء. وللمساعدة على منع تفاقم الأزمة، تُتَّخذ تدابير لحماية صحة المستهلكين ووقاية دوائر الخدمات الصحية من مواجهة المزيد من المشاكل المرتبطة بسلامة الأغذية. ولذلك، يجب في حالات الأزمات أن يتحوَّل التركيز إلى أساليب فحص سريعة وسهلة التنفيذ، للمحافظة على معايير سلامة الأغذية وتحديد مصادر الأغذية الملوثة أو التأكد منها. ويمكن بعد ذلك توجيه الموارد المتاحة نحو التقنيات المتطورة التي توفر المعلومات الضرورية لمعالجة الأزمات وإدارتها.

126- وتُستخدم في الاختبارات السريعة للأغذية تقنياتٌ نووية ونظيرية مختلفة، بالإضافة إلى قياسات التركيب النظيري، إما بمفردها أو بالاقتران مع تقنيات تكميلية. وتعتمد التقنيات التحليلية النووية على بارامترات ثابتة، مثل الكتلة والدوران والعزم المغناطيسي ومستويات الطاقة لنواة الذرة وإلكترونات المدارات الداخلية، وعلى القياسات النظيرية للتكوين من حيث العناصر الكيميائية.



الشكل واو-2- تحليل عينات من الكركم باستخدام مطياف منضدي يعمل بتقنية تشتيت الطاقة بتألق الأشعة السينية للكشف عن العناصر السامة في مختبر سلامة ومراقبة الأغذية التابع للمركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، زايبرسدورف، النمسا. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

127- وأدَّت التطورات الحديثة في تكنولوجيات أشباه الموصلات والتكنولوجيات الفوتونية وغيرها من التكنولوجيات إلى التمكين من التصغير كثيراً من حجم الأجهزة التحليلية، مما أسفر عن إيجاد مجموعة متنوعة من الأجهزة المنضدية والمحمولة باليد والمتنقلة التي يمكن استخدامها لا في المختبر فحسب، وإنما في مراحل مختلفة على طول سلاسل إنتاج الأغذية والإمداد بها. وتدعم هذه الأجهزة تنفيذ تدابير تدخل سريعة أثناء الأزمات من خلال توفير المعلومات اللازمة لاتخاذ القرارات.

128- ومن أمثلة هذه التطورات، استحداث تطبيقات قائمة على تقنية تشتيت الطاقة بتألق الأشعة السينية لإجراء فحوصات سريعة للأغذية للتأكد من توافق المستويات التي تحتوي عليها من المغذيات والمعادن السامة، مثل الرصاص والكادميوم والزرنيخ، تتوافق مع المستويات الرقابية التي حددتها منظمة الصحة العالمية.[2] وهذه التقنية متاحة في شكل أجهزة محمولة باليد أو منضدية (الشكل واو-2) ويمكن استخدامها في الميدان أو في الموقع من قبل مشغلين غير متخصصين. ولا تتطلب هذه التقنية إلا قدراً أدنى من تحضير العينات، ولا تُستخدم فيها كواشف ضارة بالبيئة. وبالاقتران مع أدوات القياس الكيميائي، يمكن توسيع نطاق الأداء التنبؤي لتقنية تشتيت الطاقة بتألق الأشعة السينية ليشمل المسائل المتعلقة بالاحتيال في مجال الأغذية.

129- وتشمل الأمثلة الأخرى تقنية تجمع بين الاستشراب الغازي وقياس طيف حركة الأيونات، يُستخدم فيها مصدر إشعاع منخفض الطاقة من هيدريد التريتيوم. ويمكن استخدام هذه التقنية (الشكل واو-3) للكشف عن بصمات المركبات العضوية المتطايرة الميكروبية، التي تدلُّ على وجود الفطريات، مما يعطي إنذاراً مسبقاً باحتمالية إنتاج السموم الفطرية في الأغذية ويتيح تنفيذ تدابير المراقبة[3]. والتقنية المذكورة قادرة على الكشف عن العديد من الملوثات وبصمات المواد الخطرة الأخرى في الأغذية، بما في ذلك الميثانول، وهو مادة كيميائية يمكن أن توجد في المشروبات الكحولية المغشوشة ويؤدي تناولها إلى تكوين مستقلبات سامة؛ وأكسيد الإيثيلين، وهو مبيد آفات سام كان سبباً في عدة عمليات سحب لمنتجات غذائية ملوثة من أسواق أوروبا منذ عام 2020.

---

[2] Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, Food Chemistry: X 1, Vol. 1 (2019) (استخدام التقنيات القائمة على تألق الأشعة السينية في التقدير الكمي للفلزات الثقيلة في الخضر بحدود كشف منخفضة).

[3] Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS-GC-IMS to detect different stages of *Aspergillus flavus* infection in Xiang Ling walnut, Food Science & Nutrition, Vol. 9, Issue 5 (2021) (تحديد المركبات العضوية المتطايرة باستخدام تقنية HS-GC-IMS للكشف عن مراحل مختلفة من العدوى بفطر *Aspergillus flavus* في الجوز من نوع شيانغ لينغ).

الشكل واو-3- التحليل باستخدام تقنية Headspace-GC-IMS للكشف عن البصمات المميزة لملوثات الأغذية، في مختبر سلامة الأغذية ومراقبتها التابع للمركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، زايبرسدورف، النمسا. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

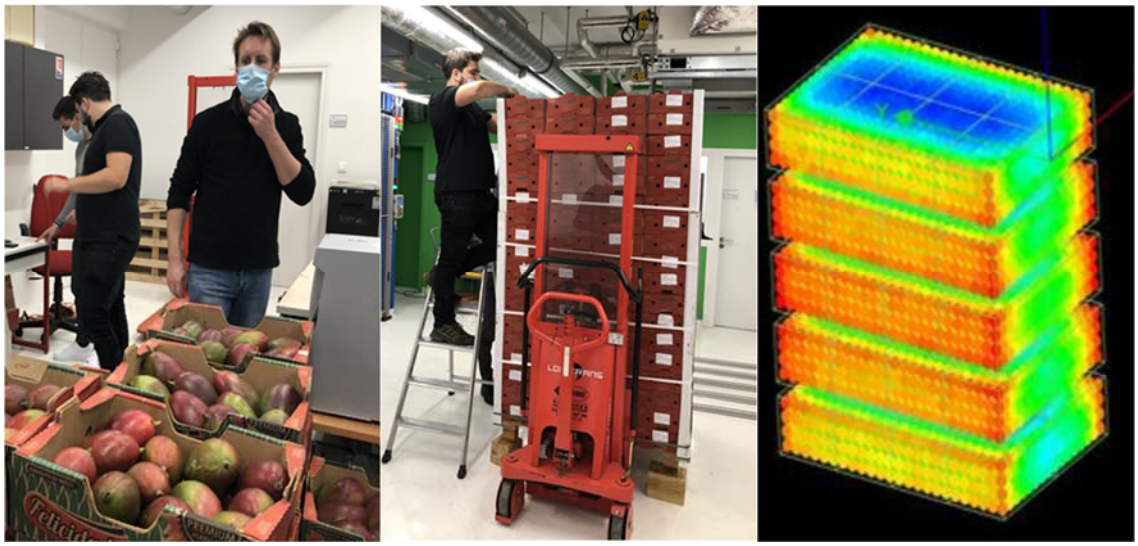
130- وتوفر هذه التقنيات وغيرها من التقنيات التحليلية النووية السريعة، مثل التقنية المنضدية لتنظير الطيف بالرنين المغناطيسي النووي وتحليل النظائر المستقرة بواسطة قياس طيف اضمحلال الرنين، بالاقتران مع أساليب قياس الطيف المتنقلة، وتقنية تحليل أطياف رامان ذات الارتداد السطحي المعزز، وتنظير الطيف بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه، مجموعةً من الأدوات التحليلية القوية. ويشهد استخدام هذه الأدوات في التطبيقات المتعلقة بتحليل الأغذية في الميدان تطورات سريعة، مما سيزيد من القدرة على التصدي بفعالية لحالات الطوارئ أو الأزمات التي تؤثّر في إمدادات الأغذية.

واو-2- التطورات في مجال تشعيع الأغذية: زيادة استخدام المصادر الآلية واستحداث تكنولوجيا جديدة قائمة على الحزم الضعيفة

الحالة

131- تشعيع الأغذية هو أسلوب خالٍ من المواد الكيميائية لتحسين سلامة الأغذية والحفاظ على جودتها وإطالة عمرها التخزيني. والإشعاعات المؤينة، سواءً كانت مؤلفة من فوتونات غاما أو الحزم الإلكترونية أو الأشعة السينية، رفيقة بالأغذية لكنها تقضي على الميكروبات والآفات. ولأن التشعيع لا يسبب ارتفاعاً يُذكر في درجة حرارة الأغذية، فإنَّ تطبيقه بطريقة متحكم فيها لا يضرُّ بالقيمة الغذائية ولا يُحدث تأثيراً كبيراً في مذاق الأغذية أو قوامها أو مظهرها. وفي الأساليب التقليدية لتشعيع الأغذية، تكون الحزم عالية الطاقة وقادرة على الاختراق، وبذلك يمكن تشعيع الأغذية حتى بعد تغليفها؛ حيث تحمي العبوات الأغذية أيضاً من خطر التلوث الخارجي بعد المعالجة.

132- ويُسمح بتشعيع نوع واحد على الأقل من السلع الغذائية في قرابة 70 بلداً، وتخضع الأغذية للمعالجة الإشعاعية روتينيًّا في أكثر من 160 مرفقاً للتشعيع في نحو 50 بلداً (الشكل واو-4). ووفقاً لنموذج الأعمال السائد، تُدار مراكز التشعيع التجاري بوصفها جهات لتقديم خدمات متعددة الأغراض: حيث تعمل على توفير الجرعة المعتمدة من الإشعاعات المؤينة بطريقة متسقة، ضمن نطاق جرعات محدد مسبقاً، لمجموعة من المنتجات لتلبية احتياجات العملاء من قطاعات تشمل الطب والمستحضرات الصيدلانية والأغذية.



الشكل واو-4- خبراء في مرفق لتشعيع الأغذية في فرنسا يُجرون اختبارات للتحقق من أنَّ تطبيق التشعيع بالأشعة السينية على ثمار المانجو المعبأة في صناديق يمكن أن يحقق الجرعة الدنيا المطلوبة للمعالجة الصحيحة من منظور الصحة النباتية (إلى اليسار وفي الوسط). وتوضح خريطة الجرعات التباين في الجرعة الممتصة (إلى اليمين). (الصور من: مركز Aerial، فرنسا)

133- وفي الوقت الراهن، تُعالج المواد الغذائية المشعَّعة جميعها تقريباً في مرافق متخصصة تستخدم أشعة غاما المنبعثة من مصادر قائمة على الكوبالت-60، وهو نظير مشع تنبعث منه فوتونات عالية الطاقة بمستوى 1,17 و 1,33 مليون إلكترون فولط. وتُستخدم أشعة غاما في نحو 90% من جميع المرافق التجارية المعنية بتشعيع الأغذية، بينما تستخدم المرافق الأخرى التشعيع بالمصادر الآلية الذي يُنتج حزم إلكترونات عالية الطاقة مولدة كهربائيًّا (بمستوى طاقة يصل إلى 10 مليون إلكترون فولط) و/أو أشعة سينية (بمستوى طاقة يصل عادةً إلى 5 مليون إلكترون فولط، مع أن بعض البلدان تسمح بمستوى طاقة يصل إلى 7,5 مليون إلكترون فولط). واستثمر نحو 5% من مقدمي خدمات تشعيع الأغذية في قدرات التشعيع بالمصادر الآلية التي تُنتج الحزم الإلكترونية والأشعة السينية، إلى جانب ما لديهم من وحدات التشعيع القائمة على الكوبالت-60. وتتزايد أهمية التنوع في التكنولوجيا المستخدمة مع استمرار نمو الطلب على مصادر الكوبالت، لأنَّ إنتاج الكوبالت-60 يستغرق عدة سنوات. وكما أنَّ تكلفة الكوبالت-60 تتزايد بدورها، لتجعل من الحزم الإلكترونية، وحتى الأشعة السينية، بدائل مغرية للتشعيع، بالإضافة إلى الاهتمام المتزايد بتكنولوجيا الحزم الضعيفة التي تستخدم المصادر الآلية (الشكل واو-5).

134- ومن الأمثلة التي تبرز جيداً فائدة التشعيع حالة الأغذية المجففة مثل التوابل، حيث تستطيع العديد من الميكروبات البقاء على قيد الحياة في الحالة المجففة، بما في ذلك الكائنات الدقيقة المسببة للأمراض المنقولة عبر الأغذية مثل السالمونيلا والبكتيريا العصوية الشمعية وبكتيريا كلوستريديوم بيرفرنجنز.[4] ورغم أنَّ مستويات

[4] *Microbiological hazards in spices and dried aromatic herbs: Meeting report* (Microbiological Risk Assessment Series No. 27, FAO/WHO, Rome, 2022).(الأخطار الميكروبيولوجية في التوابل والأعشاب العطرية المجففة: تقرير اجتماع، العدد 27 من سلسلة تقييم المخاطر الميكروبيولوجية الصادرة عن الفاو ومنظمة الصحة العالمية).

التلوث قد تكون منخفضة، فإضافة التوابل المجففة إلى الطعام يوفر الماء لهذه الكائنات الدقيقة ويضعها في بيئة غنية تستطيع فيها أن تتكاثر وتزدهر بسرعة. ولذلك، تؤدي عمليات المعالجة الرامية لخفض الميكروبات دوراً هامًّا في التقليل إلى أدنى حدٍّ من مخاطر انتشار الأمراض بين المستهلكين ومن الخسائر التجارية بسبب تلف الأغذية. وفي حين أنَّ عمليات المعالجة الحرارية تتسم بالفعالية، فإنَّها تزيل أيضاً المكونات المتطايرة التي تمنح التوابل نكهاتها الفريدة وألوانها الزاهية وروائحها الذكية، كما تُزيل خصائصها المفيدة للصحة. وعلى النقيض من ذلك، فالإشعاعات المؤيّنة تدمِّر الميكروبات المذكورة، لكن تأثيرها ضئيل على التوابل من حيث المكونات التي تكسبها سماتها الحسية وجودتها وفائدتها الصحية. ويمكن أن تؤدي الإشعاعات المؤيّنة أيضاً إلى إبطاء النضج، مما يمنع الإنبات في أغذية مثل الثوم والزنجبيل والبصل والبطاطا.

الشكل واو-5- جهاز لمعالجة الأغذية بالإلكترونات الضعيفة. وتستخدم آلة 'لاتو' مصباحين لإنتاج الإلكترونات المنخفضة الطاقة (المقبضان الأحمران في منتصف الصورة) لمعالجة المكونات المجففة أثناء مرورها عبر تيار من الإلكترونات. ولأن معدل استهلاكها للطاقة أقل بنسبة تصل إلى 80٪ من الأساليب التي تعتمد على البخار، فإنها تقدِّم حلًّا فعالا من حيث التكلفة لتقليل الميكروبات. (الصورة من: شركة Bühler)

135- ولأن الإشعاعات المؤيّنة تمنع الآفات من النمو والتكاثر، فإنها تُستخدم أيضاً لأغراض المعالجة الصحية النباتية وتيسير التجارة عبر الحدود المفروضة بمقتضى الحجر الصحي. فمثلاً، يمكن استخدام الإشعاعات المؤيّنة لضمان منع الآفات المؤثرة اقتصاديًّا، مثل ذبابة الفاكهة وأنواع السوس، من الانتشار وإرساء موطئ قدم لنفسها في مناطق جديدة تبلغها عن طريق التجارة في الثمار والخضروات الطازجة.

136- وتعمل الوكالة ومنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو) على مساعدة الدول الأعضاء (الشكل واو-6) على إرساء خدمات التشعيع الغذائي والتوسع فيها، ومن ثمَّ تقليل الفاقد والمهدر من الغذاء وتسهيل تجارة التوابل المجففة والمأكولات البحرية والفاكهة الطازجة والمجمَّدة على السواء. ومن الأمثلة الحديثة لهذه الجهود، حقَّقت فييت نام صادرات من ثمار المانجو وفاكهة التنين والليتشي الطازجة إلى الولايات المتحدة الأمريكية بقيمة 20 مليون دولار أمريكي سنويًّا، ووسعت نطاق تجارتها مع أستراليا.

الشكل واو-6- في 31 تشرين الأول/أكتوبر 2022، وقَّع المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، والمدير العام للفاو، السيد شو دونيو، مذكرة تفاهم بين المنظمتين بشأن تعزيز التعاون بين الفاو والوكالة في مجال التطبيق السلمي للطاقة النووية في مجال الأغذية والزراعة، في مقر الوكالة الرئيسي في فيينا، النمسا. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الاتجاهات

137- يشكِّل التوسُّع في التشعيع بالمصادر الآلية اتجاهاً ملحوظاً. ويرجع "بزوغ نجم المصادر الآلية" على هذا النحو إلى ما تكفله هذه المصادر من مزايا اقتصادية وعملية في الوقت نفسه. وعلى النقيض من التشعيع باستخدام أشعة غاما، فالمصادر الآلية للإشعاعات المؤيّنة يمكن التحكُّم في إيقافها وتشغيلها، وحثُّ انبعاث الحزم الإشعاعية حسب الحاجة. ولذلك فهي تتجنب المشاكل المرتبطة بالنظائر المشعة من حيث الشراء والأمان والأمن (أثناء نقلها

وتخزينها والتخلُّص منها). ومع أنَّ التشعيع باستخدام أشعة غاما قائم على تكنولوجيا بسيطة وموثوقة وناضجة ستظلّ متاحة على مدى سنين عديدة قادمة، فالتكنولوجيات البديلة تُكمِّل القدرات المتوفرة وتمكِّن من التوسُّع في استخدام تشعيع الأغذية.

138- وعن طريق البحوث المنسقة، دعمت الوكالة الدول الأعضاء في جهودها الرامية إلى تطوير تطبيقات جديدة وعملية لتشعيع الأغذية باستخدام المصادر الآلية.[5] وتشمل أوجه التقدم الجديدة في هذا المجال استحداث أدوات قادرة على محاكاة عملية تشعيع الأغذية والتحقق بسرعة من بارامترات المعالجة المثلى. ونجحت مؤسسات في الصين وفييت نام في تصميم أجهزة جديدة وتصنيعها واختبارها وتركيبها لمساعدة المراكز التجارية للتشعيع باستخدام الحزم الإلكترونية العالية الطاقة على نمذجة وحساب توزيع الجرعات في ظلِّ إعدادات تحميل مختلفة. وتمكِّن هذه الأجهزة من تحديد الإعدادات المثلى مسبقاً، ومن ثمَّ تتيح إجراء اختبارات سريعة في المرافق وبذلك تقلِّل من فترات عدم توافر حزم الأشعة وتحسِّن الإنتاجية في نهاية المطاف. ونجح خبراء من جامعة شينغوا في الصين في تعزيز الاستفادة من هذا المفهوم بالعمل مع شركة NUCTECH للتكنولوجيا من أجل تطوير نسخة تجارية من هذه الأجهزة.[6] وتهدف هذه الأدوات، وغيرها من الأدوات المماثلة التي يجري العمل على تطويرها في أماكن أخرى، إلى تيسير اتباع الممارسات الجيدة وتعزيز الإنتاجية في مرافق التشعيع بأشعة غاما وبالأشعة السينية، وكذلك في مرافق الحزم الإلكترونية.

139- ويُجري الباحثون في جامعة A&M في تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية، وهي أحد المركز المتعاونة مع الوكالة، بحوثاً تركِّز على إيجاد طرق فعالة وسريعة لتقدير جرعة التخفيض العُشري للكائنات العضوية الدقيقة المسببة للأمراض في طائفة من الظروف المختلفة. وجرعة التخفيض العُشري هي جرعة الإشعاع اللازمة للقضاء على فاعلية 90% من المجموع الأصلي للميكروبات الفعالة. ويمكن حساب جرعة التعقيم الفعالة على أساس مضاعفات جرعة التخفيض العُشري. ويُعدُّ هذا النشاط البحثي الممول من الوكالة في جامعة A&M في تكساس مثالاً للكيفية التي يمكن بها للبحوث التطبيقية أن تمضي في اتجاهات جديدة لتلبي الاحتياجات المتغيرة، وهي في هذه الحالة الحاجة إلى تحسين التقنيات التي تساعد على تلافي نقل مسببات الأمراض عن طريق الأغذية، ومن ثمَّ منع تفشي الجوائح المنقولة عن طريق الغذاء.

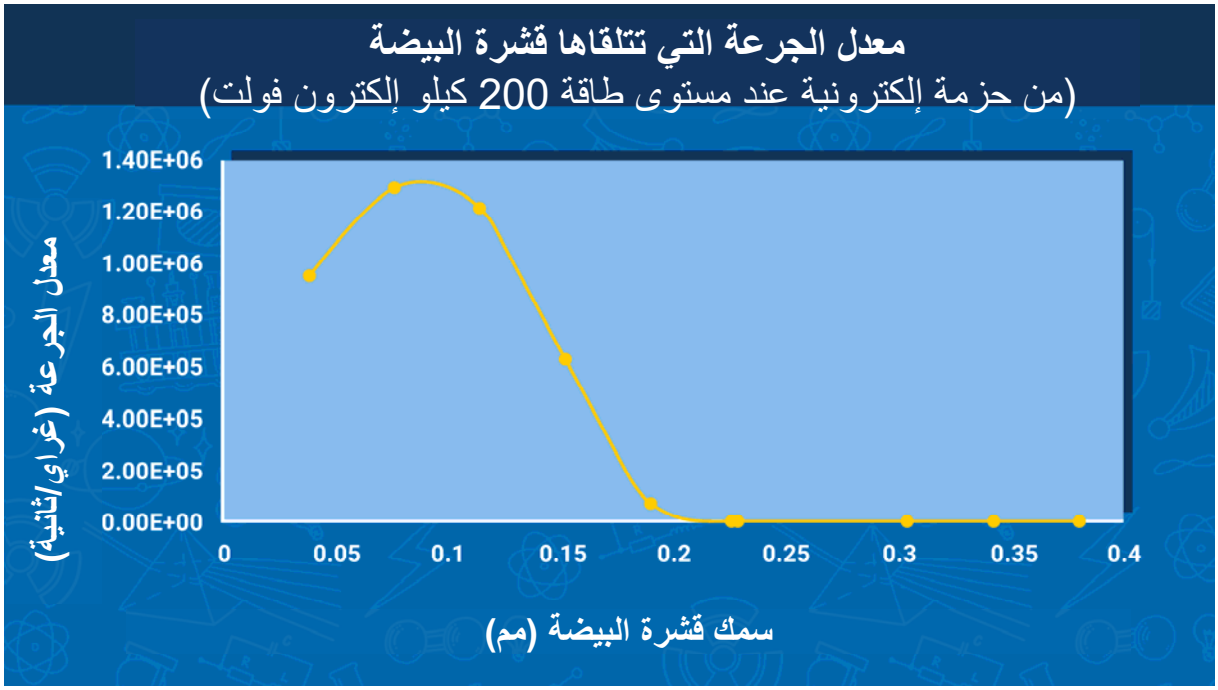
140- ويتعلق أحد الاتجاهات المثيرة للاهتمام في تطوير تقنيات التشعيع بالقدرة على تغيير مستوى طاقة الحزمة وضبطه في الأجهزة القائمة على المصادر الآلية. فمثلاً، يمكن استخدام الحزم منخفضة الطاقة (الإلكترونات الضعيفة أو الأشعة السينية الضعيفة)، التي تُقاس طاقاتها بالكيلو إلكترون فولط، في مصابيح تشعيع صغيرة الحجم نسبيًّا يمكن وضعها بأمان في خزانات أو في أجهزة أخرى. ويتيح ذلك نقل عمليات تشعيع الأغذية إلى داخل المصانع، إذ يمكن تركيب أجهزة الحزم الضعيفة ضمن خطوط إنتاج الأغذية. ولأنَّ الإلكترونات الضعيفة لا تستطيع اختراق الجزء الأكبر من المواد الغذائية، يمكن استخدامها في المعالجة الفعالة للمواد التي تكون الكائنات العضوية الدقيقة موجودة في الغالب على سطحها أو بالقرب منه، مثل قشور البيض الكامل (الشكلان واو-7 وواو-8) ، والقطع الكاملة من لحوم الماشية والدواجن النيئة، والبذور المجففة الكاملة (الأعشاب والتوابل). ويمكن أيضاً استخدام الأشعة السينية الضعيفة في الحالات التي تتطلب تمرير الأشعة خلال كميات صغيرة من المادة الغذائية المعنية.

---

[5] "*Development of Electron Beam and X Ray Applications for Food Irradiation: Final Report of a Coordinated Research Project*" *(تطوير تطبيقات الحزم الإلكترونية والأشعة السينية في مجال تشعيع الأغذية: التقرير النهائي لمشروع بحثي منسَّق)* (الوثيقة التقنية الصادرة عن الوكالة TECDOC-2008، فيينا، 2022)

[6] Qin H., Yang, G., Kuang, S., Wang, Q., Liu, J., Zhang, X., Li C., Han, Z., Li, Y., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 143 13-8 (2018). (تطوير مفهوم الكشف باستخدام الأشعة السينية عن السمك الكتلي للمفردات المشعَّعة بعد المعالجة بالتشعيع بالحزم الإلكترونية).

الشكل واو-7- رسم يوضِّح استخدام الإلكترونات الضعيفة (e-) بمستويات طاقة مختلفة لاختراق قشرة بيضة وصولاً لأعماق مختلفة. والهدف من ذلك هو القضاء على بكتيريا السالمونيلا التي تعلق في الغالب على سطح قشرة البيضة الكاملة أو بالقرب منه. (الرسم التوضيحي من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، استناداً إلى عمل N. Takaoka من المعهد العالي للتكنولوجيا الصناعية، طوكيو، اليابان)



الشكل واو-8- النمذجة باستخدام المحاكاة لتقدير نطاق اختراق الإلكترونات الضعيفة بمستوى طاقة 200 كيلو إلكترون فولط لقشور البيض والتحقق من جدواها في استهداف بكتيريا السالمونيلا على عمق أقل من 0.2 مم. (الرسم التوضيحي من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، بالاستناد إلى عمل Y. Liu و H. Qin و H. Shi من شركة NUCTECH المحدودة، و H. Zhang من جامعة شينغوا، الصين)

141- وتشير البحوث إلى إمكانية استخدام الإلكترونات الضعيفة لتحسين جودة بعض المواد الغذائية، وأنَّ هذه الطريقة تبدو واعدة في تطهير الأسطح والأعماق القريبة منه من الكائنات العضوية الدقيقة. فمثلاً، طوَّرت شركة Bühler المتخصصة في الهندسة الغذائية نظاماً قائماً على السقوط الحر لتمرير المكونات المجففة عبر حزمة من الإلكترونات الضعيفة (بمستوى طاقة أقل من 300 كيلو إلكترون فولط)، وهي طريقة تضمن التحكم في التلوث بالكائنات العضوية الدقيقة وإبقائه عند مستويات مقبولة.[7،8] ومن أمثلة تطوير تقنيات التشعيع بالأشعة السينية الضعيفة لمعالجة الكميات الصغيرة من الأغذية حالة جهاز للتشعيع يوضع داخل خزانة ويُستخدم عادةً لتعقيم الأدوات الطبية، ولكنَّ الباحثون في معهد التكنولوجيا الإشعاعية المتقدمة التابع للمعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية نظروا في إمكانية استخدامه كوسيلة لمعالجة الأغذية. وكان هدف الباحثين هو استخدام تكنولوجيا الحزم الضعيفة المتاحة بالفعل في المستشفيات من أجل توفير أغذية بمعايير صحية مرتفعة للغاية للمرضى الذين يعانون من نقص المناعة، وقد أثبتت هذه التكنولوجيا القائمة على الأشعة السينية المنخفضة الطاقة (160 كيلو إلكترون فولط) أنَّها قادرة على توكيد أنَّ الخضروات الطازجة تفي بهذه المعايير.

142- ويجري حاليًّا تنفيذ مشروع بحثي منسَّق برعاية الوكالة بشأن ابتكار تقنيات قائمة على المصادر الآلية لتشعيع الأغذية بالحزم المنخفضة الطاقة، ويركِّز هذا المشروع على التصدي للتحديات التقنية وتحسين إمكانات التكنولوجيات الجديدة القائمة على الحزم الضعيفة. وكانت بلدان مشاركة في مشاريع للتعاون التقني في منطقتي أفريقيا وآسيا والمحيط الهادئ قد أعربت بالفعل عن اهتمامها بمسألة الجدوى التجارية للتشعيع بالحزم الضعيفة في جميع أنحاء العالم، وعن رغبتها في إثبات هذه الجدوى.

زاي- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية

زاي-1- التطورات في مجال استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في التشخيص العلاجي

الحالة

143- تجمع العوامل التشخيصية العلاجية بين نويدة مشعة لتشخيص السرطان ونويدة مشعة أخرى لعلاجه. ومع أنَّ بعض النظائر المشعة المفردة ينتج عن اضمحلالها انبعاثات مناسبة لتطبيقات التشخيص العلاجي، فالأكثر شيوعاً هو استخدام ثنائيات من النظائر المشعة (الشكل زاي-1).

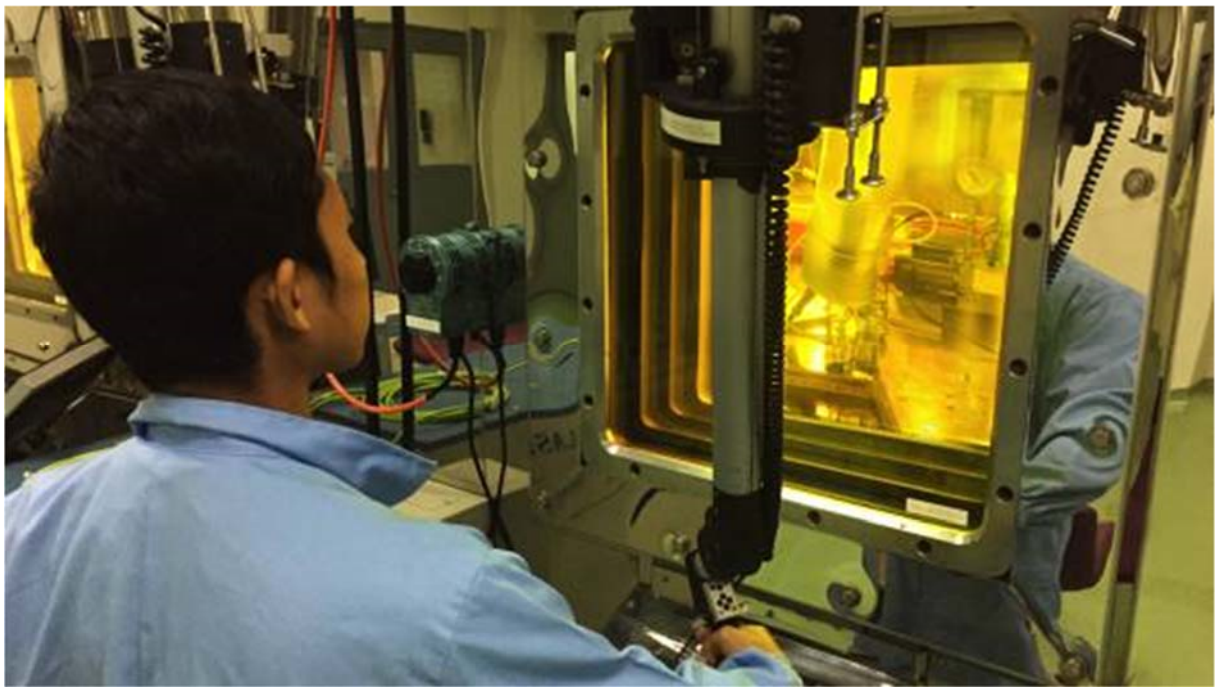
144- ومن الأمثلة التقليدية للعوامل التشخيصية العلاجية المستخدمة في مجال الطب النووي الجمعُ بين انبعاثات غاما من اليود-123 وانبعاثات بيتا من اليود-131 لتشخيص وعلاج اضطرابات الغدَّة الدرقية. وبسبب وفرة الثنائيات المتلائمة من النظائر المشعة التي تصلح للتشخيص والعلاج (مثل العامل التشخيصي الغاليوم-68

---

[7] *Laatu: Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods* (Bühler, 2019). ('لاتو': حل غير حراري لخفض الميكروبات في الأغذية المجففة داخل المصانع).

[8] Schottroff, F., Lasarus, T., Stupak, M., Hajslova, J., Fauster, T., Jäger, H., Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 14 1 (2021) 380-395. (تطهير الأعشاب والتوابل باستخدام التشعيع بأشعة غاما والحزم الإلكترونية المنخفضة الطاقة وتأثيره في خصائص المنتجات بعد التخزين).

والعامل العلاجي اللوتشيوم-177)، أصبحت نُهُج التشخيص العلاجي أكثر شيوعاً خلال العقد الماضي. ولأنَّ اللوتشيوم والغاليوم لهما خصائص كيميائية متشابهة، يمكن للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المصنوعة منهما أن تتطابق أو تتشابه من حيث التصميم الصيدلاني (مركَّب مستخلب وعامل رابط بالناقلات المستهدِفة، بما يشمل طائفة متنوعة من البِبْتيدات والأجسام المضادة والجزيئات العضوية الصغيرة). وتُمكِّن المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي يدخل في تركيبها ناقل يستهدف ورماً محدَّداً موسوم إشعاعيًّا بالغاليوم-68 لأغراض التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني من تشخيص الأورام وتحديد خصائصها داخل الجسم، ومن ثمَّ تسمح بإجراء فحوصات التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، وإثبات فعالية العامل المستهدَف قبل بدء العلاج وتحديد مراحل المرض واختيار المرضى الذين يُمكن علاجهم بالنوع المعني من النويدات المشعة. وعلاج المرضى باستخدام مستحضر صيدلاني إشعاعية قائم على اللوتشيوم-177 وموسوم بالناقل نفسه يتيح التعامل مع حالة مريض السرطان بطريقة شخصية وانتقائية عن طريق مستحضر صيدلاني إشعاعي يستهدف جزيئات محدَّدة.



الشكل زاي-1- يجري إنتاج المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المستخدمة في التشخيص العلاجي في 80 دولة عضواً على الأقل في أنحاء مختلفة من العالم، باستخدام مجموعة متعددة من النظائر المشعة والجزيئات الحاملة.

145- وفي الوقت الراهن، تُستخدم البتيدات ومثبطات الإنزيمات القائمة على الغاليوم-68 واللوتشيوم-177 بنجاح كناقلات لاستهداف أورام الغدد الصماء العصبية وسرطان البروستاتا. ومع ذلك، تظلُّ هناك حاجة لإيجاد قرين تشخيصي أفضل للوتشيوم-177، أي نويدة مشعة تشخيصية ذات خواص كيميائية أقرب مقارنة بالغاليوم-68، كما تظلُّ هناك حاجة إلى ثنائيات جديدة من باعثات ألفا أو بيتا أو إلكترونات أوجيه وعوامل تشخيصية على قدر مناسب من التلاؤم.

الاتجاهات

146- بغية تحقيق الاستفادة الكاملة من ثنائيات التشخيص العلاجي في الطب النووي وتحسين نتائج علاج المرضى، ينبغي الاضطلاع بمزيد من جهود البحث والتطوير بشأن المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية والنظائر المشعة. والهدف من هذه الجهود هو اكتشاف ثنائيات أكثر تلاؤماً من النويدات المشعة، وتحقيق المستوى الأمثل في الأجزاء المستخلبة بزيادة استقرارها، وزيادة عدد الناقلات التي تستهدف جزيئات محدَّدة من خلال التصميم البيولوجي والكيميائي الحيوي.

147- ويمكن إنتاج المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية القائمة على اللوتشيوم-177 سواء 'مع إضافة حامل' أو 'بلا حامل'، وتُصنع هذه المستحضرات حالياً بكلا الشكلين في مفاعلات البحوث. ومنذ عام 2022، يمكن أيضاً إنتاج اللوتشيوم-177 بلا حامل في مفاعلات القوى النووية، باستخدام تكنولوجيا طورتها شركة Framatome ونفذتها كندا للمرة الأولى في محطة بروس للقوى النووية. ولأنَّ العمر النصفي للوتشيوم-177 متوسط، ولأنَّه تنبعث منه جسيمات بيتا المستخدمة في الأغراض العلاجية وجسيمات غاما المستخدمة في التصوير التشخيصي، فهو يؤدي بالفعل دوراً في تطبيقات الطب النووي، وقد مكَّن العديد من الباحثين والعلماء من تطوير مستحضرات صيدلانية إشعاعية جديدة تُستخدم في التشخيص العلاجي. ومع التطوُّرات الأخيرة في مجال الجزيئات المستهدِفة، مثل البيتيدات والجذاذات المناعية والجزيئات الصغيرة، تتواصل في جميع أنحاء العالم الأنشطة والخطط الجديدة فيما يخص تطوير العوامل التشخيصية العلاجية.

148- وقد شقَّت المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المستخدمة في التشخيص العلاجي بالفعل طريقها إلى عيادات علاج السرطان. بيد أنَّ التطورات الأخيرة في مجال التصوير الجزيئي، مثل التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني المدمج مع التصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني المدمج مع التصوير بالرنين المغناطيسي، بالإضافة إلى العلاج المستهدف (باستخدام باعثات ألفا وبيتا)، تتطلب توافر نظائر مشعة إضافية مستجدة حتى تكون متاحة للممارسين الإكلينيكيين. وتجري حاليًّا دراسة ثنائيات جديدة من النظائر المشعة لأغراض تطبيقات التشخيص العلاجي، مثل الجمع بين نظائر التربيوم المشعة وطائفة واسعة من التطبيقات التشخيصية القائمة على التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد والتطبيقات العلاجية (باستخدام باعثات بيتا وألفا). (الشكل زاي-2)

الشكل زاي-2- رسم يوضّح النظائر المشعة التشخيصية العلاجية اللازمة لتحسين تطوير المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. (الرسم التوضيحي من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، بالاستناد إلى عمل F. Rösch، جامعة يوهان غوتنبرغ في ماينتس، ألمانيا)

149- وبفضل التطورات التكنولوجية في مجال إنتاج النويدات المشعة، فإنَّ عدد النويدات المشعة الواعدة في تطبيقات المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية آخذ في الازدياد. إلا أنَّ إيصال نويدة مختارة بفعالية إلى هدف جزيئي داخل الخلية لا يزال يشكِّل تحدياً في تطوير المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. ويلزم وضع تركيبات محسَّنة وتحديد الخصائص تحديداً تفصيليًّا وإجراء تقييمات سابقة للمرحلة الإكلينيكية من أجل تطوير وتطبيق نظم جديدة أكثر كفاءة لإيصال المنتجات التشخيصية العلاجية إلى أهدافها، مع تحسين الحركة الدوائية والتقليل إلى أدنى حدٍّ من الآثار الجانبية.

حاء- الصحة البشرية

حاء-1- استخدام الذكاء الاصطناعي في رسم معالم الأورام وتخطيط العلاج الإشعاعي

الحالة

150- العلاج الإشعاعي هو أحد الأركان الأساسية في علاج السرطان، ويحتاج نحو نصف المرضى المصابين بالسرطان إلى العلاج الإشعاعي في مرحلة ما. وقد شهد العلاج الإشعاعي للأورام تطوُّراً سريعاً في العقود الأخيرة، مع ظهور ابتكارات في أجهزة العلاج الإشعاعي والتصوير الثلاثي الأبعاد وتكنولوجيا المعلومات، بالإضافة إلى زيادة المعارف في مجال بيولوجيا السرطان. ومكَّنت تقنيات التنفيذ الجديدة، وما يرتبط بها من

طرائق التصوير التي يُستخدم فيها الذكاء الاصطناعي، من تقديم العلاج الإشعاعي بدقة عالية وبدرجة مرتفعة من الترشيد، ومن ثمَّ ساهمت في تحسين مكافحة الأورام ورعاية مرضى السرطان. ومن المتوقع أن يؤدي استخدام هذه الأدوات إلى تقليل اختلاف النتائج بين المراقبين وتحقيق وفورات في الوقت للموظفين الإكلينيكيين.

151- وينطوي تسلسل سير العمل في العلاج الإشعاعي على عملية معقدة تتكون من مجموعة خطوات يستغرق كل منها وقتاً طويلاً وتُنفِّذها أفرقة مختلفة من الموظفين، ولكلٍّ منها تأثير في جودة العلاج ومن ثمَّ في نتائج علاج المرضى. ويعاني مجال الرعاية الصحية على الصعيد العالمي من نقص العاملين، بما في ذلك أخصائيو العلاج الإشعاعي للأورام والفيزيائيون الطبيون وفنيو العلاج الإشعاعي. وتوصي الوكالة بوجود أخصائي واحد في العلاج الإشعاعي للأورام لكل 250 حالة سرطان[9]، وهو أمر يصعب تحقيقه واقعيًّا في غالبية الدول الأعضاء في العقود القادمة. ويُمكن أن يُقدِّم الذكاء الاصطناعي حلًّا للطلب المتزايد على الموارد البشرية.

152- ولا تقتصر متطلبات تنفيذ العلاج الإشعاعي على استهداف الورم بدقة، إذ يتطلب أيضاً حماية الأنسجة والهياكل السليمة وتقليل الأضرار والآثار الجانبية إلى أدنى حد. وتُعدُّ عملية رسم المعالم من الخطوات البالغة الأهمية في التحضير للعلاج الإشعاعي، وتنطوي على رسم الحدود بين الأعضاء والأنسجة السليمة والورم. وعادةً ما تُتَّبع في هذه العملية إرشادات توجيهية وأطالس متفق عليها (الشكل حاء-1).

الشكل حاء-1- تدرّب الوكالة المهنيين الصحيين على تقديم خدمات العلاج الإشعاعي والطب النووي، بما في ذلك بالاستعانة بأساليب مبتكرة وفعالة من حيث التكلفة. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

---

[9] *Setting Up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspects* (IAEA, 2008) (وضع برنامج للعلاج الإشعاعي: الجوانب الإكلينيكية والمتعلقة بالفيزياء الطبية والوقاية من الإشعاعات والأمان).

153- وهناك العديد من الأدوات المتاحة أو التي يجري تطويرها حاليًّا لرفع كفاءة عملية رسم المعالم التي تستغرق وقتاً طويلاً، ويشمل ذلك الرسم الآلي للمعالم بالاستعانة بالمعالم المحددة في أطلس مرجعي من أجل تقليل الاختلافات في تحديد المعالم في الحالات المختلفة. وتُستخدم خوارزمية لاختيار الصورة الأكثر شبهاً بصورة المريض، ثم تُستخدم طريقة مطابقة الصور القابلة لإعادة التشكيل لنقل المعالم من الأطلس المرجعي إلى صورة المريض. وفي الآونة الأخيرة، استُخدمت مجموعات كبيرة من البيانات الإكلينيكية المغفلة المصدر التي تحتوي على بيانات عالية الجودة للمعالم المأخوذة من صور المرضى لوضع خوارزميات للتعلم العميق قائمة على الذكاء الاصطناعي.

الاتجاهات

154- يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي كأداة لتعزيز الجودة والتوحيد وتوفير الوقت الذي تستغرقه الخطوات في تسلسل سير العلاج الإشعاعي. وينطوي ذلك على إمكانية توجيه الإشعاعات بقدر أكبر من الأمان والدقة. ويشهد مجال الرعاية الإكلينيكية توسُّعاً سريعاً في استخدام الذكاء الاصطناعي، ومن المتوقع أن يؤدي ذلك إلى تغيير في نهج تخطيط العلاج الإشعاعي ليتحول من عملية معقدة تشارك فيها أفرقة عديدة من المتخصصين إلى عملية مؤتمتة. ومن الضروري تزويد مقدمي الرعاية الصحية بالتدريب اللازم لتطبيق الأنظمة ذات الصلة ورصدها على نحو مأمون. ومن الضروري أيضاً أن يفهم عموم الجمهور المزايا والمخاطر المرتبطة بها.

155- ومن الخطوات الرئيسية في العلاج الإشعاعي الحديث تحديد أحجام الأورام السرطانية المستهدفة والأعضاء المعرضة للخطر ورسم معالمها. وتشهد المفاهيم والمصطلحات الخاصة بتعريف الحجم الإجمالي للورم والحجم الإكلينيكي المستهدَف والأعضاء المعرضة للخطر تطوُّراً مستمراً. ولا تزال الممارسة المعتادة في عملية رسم العالم هي إجراؤها يدويًّا، في حين أنَّ تسلسل سير العمل في عملية رسم المعالم آليًّا يمكن أن يستند إلى أطلس مرجعي ومنهجية قائمة على التعلم العميق. ويعتمد الرسم الآلي للمعالم بالاستناد إلى أطلس مرجعي على 'مكتبة' من ملفات التصوير المقطعي الحاسوبي الجاهزة والمحددة المعالم. والتعلم العميق هو تقنية للتعلم الآلي قائمة على استخدام الشبكات العصبية العميقة لوضع نموذج قادر على التعلم والتحسُّن مع اكتساب الخبرة ومرور الوقت. وهناك حزم برمجية متاحة تجاريًّا للرسم الآلي للمعالم بالاستناد إلى أطلس مرجعي وإلى التعلم الآلي.

156- وفي حين تشير الدراسات إلى أنَّ أداء نظم التقسيم التشريحي الآلية القائمة على التعلم العميق يبدو واعداً، فإنَّ الفائدة الإكلينيكية الفعلية لا تزال غير مدروسة إلى حد كبير. ومن المحتمل أن يظلَّ تحديد المعالم يتطلب التدخل البشري اليدوي للتعديل أو التحقق، وهناك حاجة مستمرة للتثقيف بشأن رسم المعالم والتنفيذ العملي للمبادئ التوجيهية ذات الصلة، بصرف النظر عن التطبيق الإكلينيكي للتقسيم التشريحي الآلي. والقيد الذي يحدُّ من استخدام الذكاء الاصطناعي في عملية التقسيم التشريحي أنَّه يلزم في بعض الحالات أن تستند القرارات إلى ما هو أكثر من المعلومات المستمدة من الصور.

157- ويكمن حلُّ هذه المسألة في استخدام الذكاء المختلط الذي يجمع بين مواطن القوة التي ينطوي عليها كلٌّ من الذكاء الطبيعي والذكاء الاصطناعي في تقسيم الصور المأخوذة بالتصوير المقطعي الحاسوبي إلى الأعضاء التشريحية، وذلك باستخدام خمس وحدات نمطية مختلفة[10]. ويؤدي هذا النهج إلى تحقيق نتائج مماثلة للنتائج التي يحققها الخبراء البشر في رسم المعالم – ولكن مع وفورات كبيرة في الوقت (الشكل حاء-2).

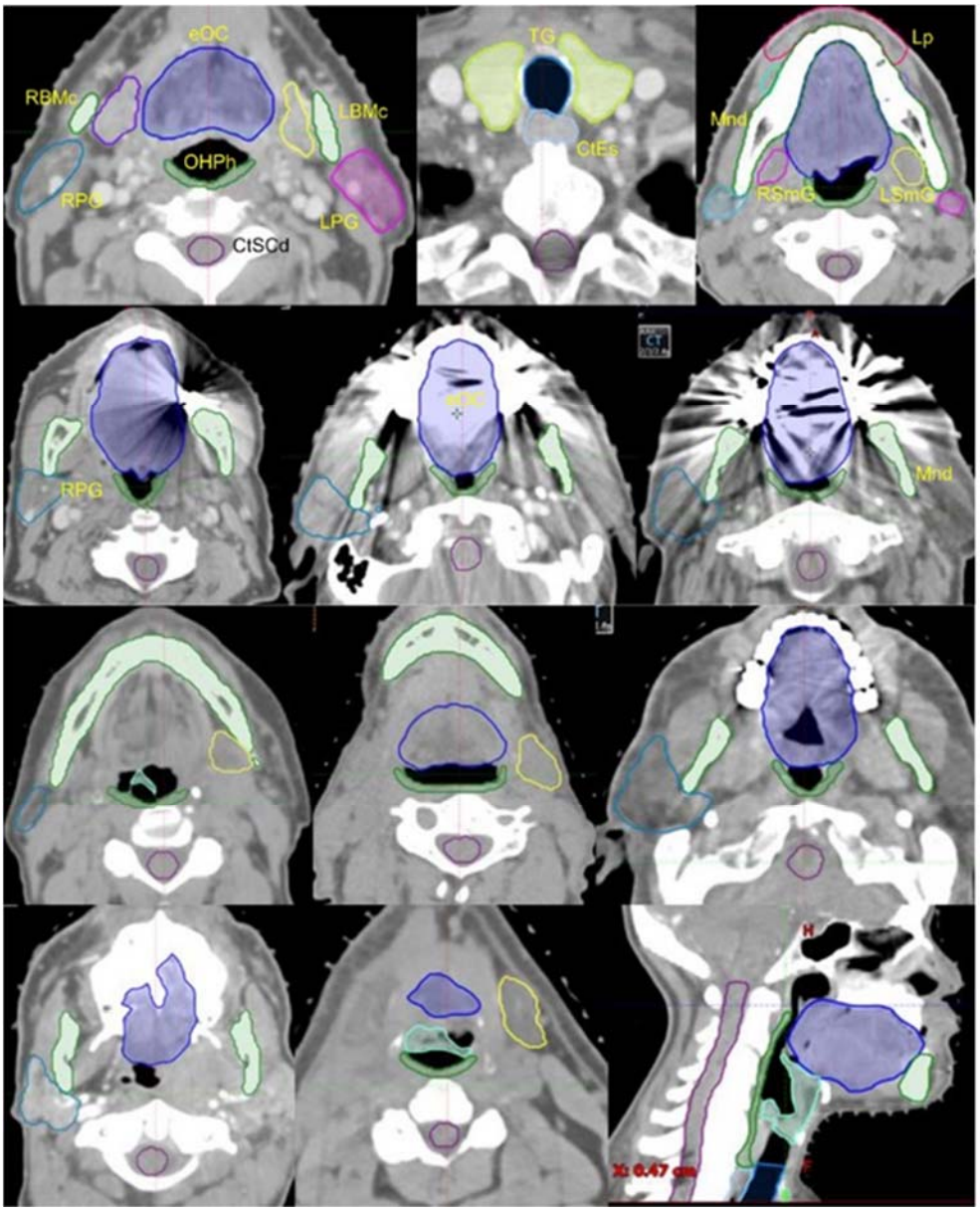
158- وفي استعراض أجرته الوكالة مؤخراً بشأن حالة التكنولوجيا النووية والذكاء الاصطناعي والتحديات والفرص ذات الصلة، سُلِّط الضوء على الحاجة إلى تحديد أدوار ومسؤوليات المهنيين العاملين في مجال العلاج الإشعاعي وتوفير إطار واضح لاختيار التكنولوجيات القائمة على الذكاء الاصطناعي[11] وإدخالها في الخدمة وتنفيذها وتبادل البيانات بشأنها وتوكيد جودتها بصورة مستمرة.

159- وستدعم الوكالة وضع إطار لإرشاد الدول الأعضاء في الأخذ بالذكاء الاصطناعي لأغراض رسم المعالم. وفي إطار هذا الدعم، أُطلق في عام 2022 مشروع بحثي منسق يدرس مدى فعالية تدابير التدخل القائمة على التعلم الإلكتروني في تنمية مهارات رسم المعالم بمساعدة الذكاء الاصطناعي في العلاج الإشعاعي، وخصوصاً في سرطانات الرأس والرقبة. وفي حين تظلُّ هناك شواغل بشأن إمكانية ضياع المعارف القائمة لدى الأطباء والفيزيائيين الطبيين وفنيي العلاج الإشعاعي، فيبدو أنَّ الذكاء الاصطناعي يؤدي إلى تحسين الجودة وتحسين الكفاءة الزمنية. وبالنظر إلى النقص العالمي في العاملين في مجال علاج السرطان، فمن شأن التوسُّع في دور الذكاء الاصطناعي في عملية رسم المعالم أن يكون موضع ترحيب، شريطة إخضاعه للتنظيم الرقابي على النحو المناسب.

---

[10] Udupa J. K., Liu T., Jin C., et al. Combining natural and artificial intelligence for robust automatic anatomy segmentation: Application in neck and thorax auto-contouring, Medical Physics (2022) (الجمع بين الذكاء الاصطناعي والطبيعي من أجل تقسيم تشريحي آلي مُحكم: التطبيق في الرسم الآلي للمعالم في الرقبة والقفص الصدري).

[11] *Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology* (IAEA, Vienna, 2022) (استخدام الذكاء الاصطناعي للتعجيل بنتائج التطبيقات والعلوم والتكنولوجيا النووية).



الشكل حاء-2- مجموعة صور للرقبة أُخذت بالتصوير المقطعي الحاسوبي تبيّن اختلالات الجودة التي يمكن أن تشكِّل تحديات، مثل الشوائب الاصطناعية الخطية وضعف التبائن وتشوُّه الأشكال. وفي مثل هذه الحالات، قد تكون الاستعانة بالذكاء المختلط نهجاً فعالاً في رسم المعالم لأغراض العلاج الإشعاعي.
(الصورة من: مجلة Medical Physics، 2022)

طاء- البيئة البحرية

طاء-1- الملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة

الحالة

160- يُقدَّر أنَّ عدد المواد الكيميائية الاصطناعية المصَّنعة على الصعيد العالمي يفوق 000 140 مادة، وتُستحدث باستمرار مواد كيميائية جديدة بشرية المنشأ. ومن المتوقع أن تتضاعف وتيرة استخدام هذه المواد الكيميائية وكميات إنتاجها ثلاث مرات بحلول عام 2050، مما قد يضرُّ بالنظم الإيكولوجية وصحة الإنسان. ويخضع مجموعة قليلة من هذه المواد الكيميائية، كثيراً ما يُشار إليها بالمواد ذات الأولوية، للرقابة التنظيمية والرصد في البيئة البحرية من جانب الدول الأعضاء. ومع ذلك، فالآثار السُمِّية التي تُرصد في البيئات المائية لا يمكن أن تُعزى لوجود هذه المواد المعروفة ذات الأولوية إلا في جزء صغير منها.[12]

161- وفي هذا السياق، يتزايد القلق بشأن الملوثات التي تشكِّل شواغل ناشئة (الملوثات الناشئة)، وهي المواد التي تُكتشف في البيئة وليست خاضعة لبرامج الإشراف الرقابي. ولا يزال الفهم القائم قاصراً فيما يتعلق بمصير الملوثات الناشئة وآثارها البيولوجية، رغم آثارها الضارة المعروفة أو المشتبه فيها في النظم الإيكولوجية والصحة البشرية. وتشمل هذه الملوثات المواد الملدِّنة ومثبطات اللهب والمواد المفلوَرة 'المضادة للالتصاق' (والتي كثيراً ما يُطلق عليها اسم 'الكيماويات الدائمة') والمبيدات الحشرية والمستحضرات الصيدلانية ومنتجات العناية الشخصية. وتشمل مصادر الملوثات الناشئة في البيئة المائية معالجة مياه الصرف الصحي الصناعية والمنزلية، والسوائل المرتشحة من مدافن النفايات، وجريان المياه السطحية، والسماد الطبيعي والمواد البيولوجية الصلبة المستخدمة في الأراضي الزراعية، والترسبات الجوية (الشكل طاء-1). وتشكِّل المواد التي تدوم لفترة طويلة والتي تتراكم بيولوجيًّا أيضاً في الكائنات الحية ولها خصائص سُمِّية مثار قلق خاص على صحة النظم الإيكولوجية البحرية.

162- وتعمل شعبة مختبرات البيئة البحرية التابعة للوكالة في موناكو على تطوير أساليب تحليلية لاستهداف مركَّبات كيميائية محددة من بين فئات الملوثات الناشئة في مختلف مكونات النظم البحرية مثل مياه البحار والرواسب والكائنات الحية. وعن طريق استخدام مركَّبات مشابهة بنيويًّا لهذه الملوثات الناشئة، بعد وسمها بالنظائر، في جميع مراحل العملية التحليلية، بالاقتران مع تقنيات قياس الطيف الكتلي، يمكن قياس هذه الملوثات بدقة على المستويين الضئيل والبالغ الضآلة. ويُعرف هذا النوع من الأساليب باسم أساليب "التحليل القائم على التخفيف النظيري"، وهي ضرورية في الوقوف على وجود وتوزيع التهديدات الكيميائية المعروفة والناشئة في شبكات الأغذية البحرية والمأكولات البحرية، لا سيما في المناطق غير المدروسة بقدر كافٍ، لتزويد متخذي القرارات بالأدلة العلمية.

---

[12] انظر Brack, W., Klamer, H.J.C., Alda, M.L.D. and Barcelo, D., Effect-directed analysis of key toxicants in European river basins: A review, Environmental Science Pollution Research, Vol. 14(1) (2007) (التحليل الموجَّه بحسب التأثير للمواد السامة الرئيسية في أحواض الأنهار في أوروبا: استعراض).

163- بيد أنَّ العلامات التي تُنذر بتفشي "جائحة صامتة" واضحة وحاضرة. ومما يفاقم مسألة التزايد غير المنقطع لعدد المواد الكيميائية الاصطناعية الجديدة التي تدخل السوق العالمية أنَّ هناك فجوات معرفية فيما يتعلق بالهويات الكيميائية لتلك المواد. وعلاوة على ذلك، ورغم وجود مجموعة متزايدة من الأدلة التي تشير إلى وجود هذه المواد الكيميائية في جميع أنحاء البيئات المائية، فهناك نقص في تدابير الرصد والتقييم والإدارة ذات الصلة.

الشكل طاء-1- هناك عدد متزايد من المواد الكيميائية الاصطناعية الجديدة التي تُطلق في البيئة. ويمكن استخدام التقنيات المبتكرة في مجالي أخذ عينات من المياه والفحص التحليلي لمساعدة العلماء على تحديد وقياس آثار هذه الملوثات في النظم الإيكولوجية وفي الصحة البشرية.

(الرسم التوضيحي من: Rudzhan/stock.adobe.com، عدَّلته الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الاتجاهات

164- يجري العمل على وضع استراتيجيات أكثر شمولاً لرصد الملوثات الكيميائية المعروفة والوقوف على المواد الجديدة التي يُمكن أن تكون ضارة في البيئة البحرية. وعن طريق الجمع بين الأدوات المبتكرة في مجال أخذ عينات من المياه والتقدُّم في تقنيات قياس الطيف الكتلي، يمكن إجراء فحوصات أكثر دقة لعدد كبير من الملوثات المعروفة أو المشتبه فيها وتحديد هوية المواد الكيميائية غير المعروفة.

165- ومع ظهور التقنيات الخاملة لأخذ العينات بوصفها أدوات موثوقة ومُحكمة وفعالة من حيث التكلفة لرصد جودة المياه، صار هناك حلٌّ ذو جاذبية خاصة لمواجهة بعض تحديات التلوث الكيميائي التي تختصُّ بها البيئة المائية. والأجهزة الخاملة لأخذ العينات هي ببساطة أدوات مكوَّنة إما من مادة واحدة، مثل صفيحة من المطاط المصنوع من السيليكون، أو مادة مثبتة خلف أغشية نفَّاذة لتجميع الملوثات الكيميائية عند وضعها في البيئة المائية (الشكل طاء-2).

الشكل طاء-2- أجهزة خاملة لأخذ العينات جاهزة للنشر في البحر.
(الصورة من: مركز علوم البيئة ومصائد الأسماك وتربية الأحياء المائية، المملكة المتحدة)

166- ويمكن للأجهزة الخاملة لأخذ العينات أن تجمع العينات من المسطحات المائية بوتيرة متواصلة على مدى فترات تتراوح بين عدة أيام وعدة أشهر. ويؤدي ذلك إلى مراكمة الملوثات الكيميائية بمعاملات تبلغ عدة آلاف مقارنة بالمستويات التي تُقاس عادة في الماء، مما ييسِّر عملية الكشف في الحالات التي لا تكون فيها العينات ذات الحجم الصغير المأخوذة بالأساليب التقليدية حساسة بدرجة كافية.

167- ومن خلال استخدام النظائر المستقرة في شكل مركَّبات مرجعية معالجة بالديوتيريوم وموسومة بالكربون-13 وتحميلها في الأجهزة الخاملة لأخذ العينات قبل نشرها، يمكن حساب تقديرات كمية دقيقة لأحجام المياه التي أُخذت منها العينات وقياسات مجمَّعة زمنيًّا للملوثات. وتكفل الأجهزة الخاملة لأخذ العينات أيضاً ميزة تتمثل في كونها تأخذ العينة فقط من الجزء الذائب تماماً من المواد الكيميائية في الطور المائي، وبذلك توفِّر تمثيلاً أكثر دقة للملوثات المتوافرة بيولوجيًّا التي قد تمتصها الكائنات الحية. ويمكن أيضاً استخدام هذه الأجهزة كي تستهدف على وجه التحديد الملوثات العضوية التي يُرجَّح أن تتراكم بيولوجيًّا في جميع أنحاء شبكات الأغذية البحرية.

168- وبالاقتران مع أدوات التحليل المتقدِّمة التي تستخدم الفصل الكروماتوغرافي وقياس الطيف الكتلي العالي الاستبانة والعالي الدقة، يمكن للأجهزة الخاملة لأخذ العينات أن تكشف عن وجود آلاف المواد الكيميائية في البيئة البحرية وأن تيسِّر تحديد هوية المركَّبات غير المعروفة من قبل. وتنطوي هذه الأجهزة أيضاً على إمكانية استخدامها كنظم عالية الفعالية للإنذار المبكر بالملوثات الناشئة في البيئة البحرية، ويمكن نشرها في المناطق النائية أو غير المدروسة بقدر كافٍ ونقلها بسهولة إلى المختبرات التحليلية.

169- ويمكن لهذه الطفرات الكبيرة في تقنيات أخذ عينات المياه والفحوص التحليلية المتقدِّمة أن تكون أدوات جديدة قوية في مواجهة بعض التحديات التي تفرضها التوليفات المعقدة من الملوثات الناشئة الموجودة في البيئات البحرية. وستساعد هذه التطورات على سدِّ الفجوات المعرفية بشأن وجود الملوثات الكيميائية البشرية المنشأ وحركتها عبر النظم الإيكولوجية وما يترتب عليها من تأثير في وظائف النظم الإيكولوجية البحرية، للتأكُّد من إمكانية التعامل مع إطلاق هذه الملوثات في البيئة البحرية في أبكر مرحلة ممكنة.

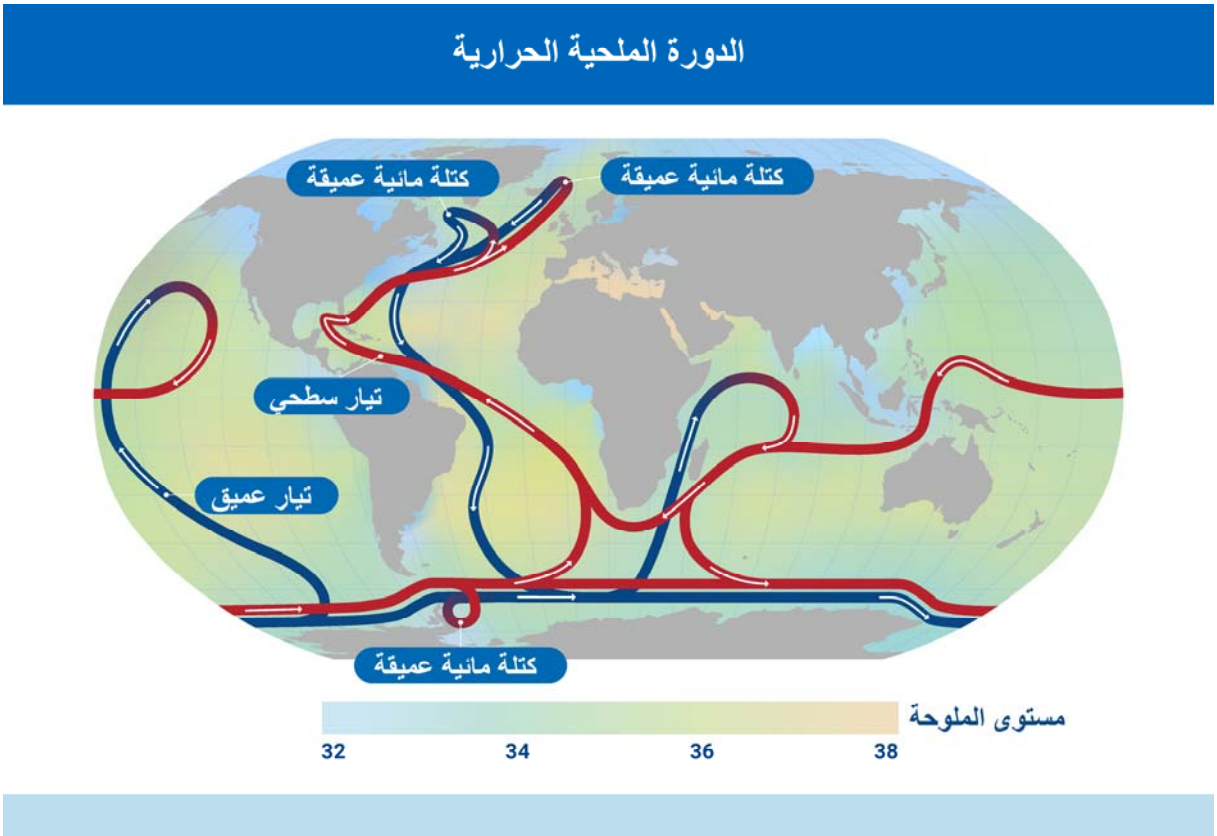
طاء-2- استخدام المقتفيات الإشعاعية المستحدثة للدورات المائية في المحيطات من أجل تحسين فهم ونمذجة انتقال الملوثات والتغيُّرات في المحيطات والمناخ

الحالة

170- هناك مجموعة واسعة من النويدات المشعة التي تُطلق في مياه المحيطات على مدى عدَّة عقود مضت. والتوزيع المكاني والزماني لهذه النويدات المشعة يمكن أن يكون معقدًّا بدرجة كبيرة، لكنه دائماً ما يتعلق بأربع عمليات عامة: دالة الإدخال/المصدر، والاضمحلال الإشعاعي، والكيمياء الحيوية، والعمليات الخاصة بالمحيطات. ولأنَّ النويدات المشعة تتنقل في أرجاء الغلاف الجوي والغلاف المائي عبر عدة مسارات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية، فإنَّ رصد تطور توزيعها في المحيطات يوفِّر معلومات فريدة عن طبيعة وحجم العمليات ذات الصلة.

171- ويجري إطلاق النويدات المشعة ذات المنشأ الاصطناعي في البيئة البحرية منذ أربعينات القرن العشرين عبر أنشطة مختلفة، منها توليد الطاقة النووية وتطوير الأسلحة النووية وإنتاجها واختبارها. وتُسجَّل عمليات إطلاق النويدات المشعة الاصطناعية بدقة بالغة منذ ذلك الوقت، وقد أُجري قدر كبير من البحوث لدراسة انتقالها ومصيرها في البيئة البحرية، ولاستخدامها كمقتفيات لتحسين فهم مختلف العمليات البحرية والمحيطية. ويمكن لهذا الفهم أن يوفِّر الأساس لإجراء تقييمات العواقب الضارة على البيئة أو الصحة البشرية، ولإجراء تقييمات سريعة لتأثير عمليات إطلاق النويدات المشعة في المستقبل – لا سيما عمليات الإطلاق غير المخطط لها.

172- ونظراً للتنوُّع الواسع في الطابعين التاريخي والجغرافي لإطلاق هذه المواد ولاختلاف سلوكها البيئي، فإنَّ كلَّ مقتفٍ يوضِّح جانباً مختلفاً من طيف عمليات النقل عبر المحيطات (الشكل طاء-3). وبفضل هذه السمات، بالاقتران مع مجموعة من الخصائص الجيوكيميائية مثل العمر النصفي وتشابه الجسيمات، تُعدُّ النويدات المشعة ذات المنشأ الاصطناعي أدوات مفيدة للغاية في تحسين فهم أنماط المحيطات وتتبع الملوثات.



الشكل طاء-3- الدورة الحرارية الملحية، المعروفة أيضاً باسم الحزام الناقل المحيطي العالمي، هي آلية مهمة تشكِّل حركة المياه وامتزاجها عبر المحيطات. ويمكن استخدام المقتفيات الإشعاعية لتتبع حركة مياه البحر.
(الرسم التوضيحي من: مرصد الأرض التابع لوكالة ناسا، عدَّلته الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

173- ويؤدي استخدام المقتفيات الإشعاعية عن طريق التقنيات النووية، بما في ذلك حساب الاضمحلال/العدُّ الكتلي والتنشيط بالتفاعلات النووية، دوراً قيّماً أيضاً في فهم النظم الإيكولوجية البحرية والساحلية. وتتيح هذه التقنيات رصد امتصاص الملوثات المشعة وغير المشعة، مثل المواد البلاستيكية الدقيقة والزئبق الميثيلي، وتضخيمها البيولوجي. وتُستخدم هذه التكنولوجيات أيضاً لتحديد منشأ التلوث البحري بالمواد البلاستيكية الدقيقة وتتبُّع مساراته وفهم مصيره من خلال المشاريع المضطلع بها في إطار مبادرة الوكالة لتسخير التكنولوجيا النووية لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية (مبادرة نيوتك لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية). وهي تساعد أيضاً على التعرُّف على السموم الحيوية وتقدير كميتها في المأكولات البحرية، وتقييم آثار تحمُّض المحيطات في الكائنات المتكلسة، وتقييم عمليات التمثيل الغذائي في ظلِّ ارتفاع درجات الحرارة.

174- ومع نمو مجموعات البيانات العالمية، صارت نمذجة النظم الإيكولوجية البحرية نهجاً تحليليًّا مهمًّا في دمج المعارف والبيانات والمعلومات من أجل تحسين فهم طريقة عمل النظم الإيكولوجية وهجرة الملوثات ونقلها. وتؤدي النويدات المشعة الاصطناعية دوراً مهمًّا في المساعدة على اختبار صحة هذه النماذج عن طريق توفير البيانات من قياسات حقيقية تُجرى على أرض الواقع. ويُعدُّ فهم العمليات المسؤولة عن الانتقال في المحيطات أمراً ضروريًّا للتنبؤ بالتأثير البشري في البيئة واتخاذ قرارات سياسية سليمة بشأن الأنشطة المستقبلية.

الاتجاهات

175- كانت القياسات البحرية في بداية عهدها تتَّسم بندرة البيانات، وفي بعض الأحيان، بضعف موثوقيتها. وقد مكَّنت التقنيات المتطورة والتكنولوجيات الجديدة من قياس تركيزات المواد بدِّقة متناهية، ولكنها أدَّت أيضاً إلى مشاكل لوجستية بسبب كبر حجم العينات ومشاكل جسيمة محتملة متعلقة بتبادل الملوثات.

176- وبسبب انخفاض مستوى النويدات المشعة في العينات البيئية عموماً وصغر حجم العينات المتاحة، كان من اللازم استحداث تقنيات تتسم بالكفاءة. وبفضل الانتقال من حساب مستويات الاضمحلال الإشعاعي إلى عدِّ الذرات باستخدام الأساليب القائمة على قياس الطيف الكتلي، مثل قياس الطيف الكتلي باستخدام المعجِّلات وقياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث وقياس الطيف الكتلي بالتأيُّن الرنيني وقياس الطيف الكتلي للأيونات الثانوية وقياس الطيف الكتلي بالتأيُّن الحراري، تحقَّقت نقلة نوعية رئيسية في تكنولوجيا التحليل الإشعاعي.

177- وقد شهد مجال قياس الطيف الكتلي باستخدام المعجلات مؤخراً تطورات كبرى فيما يتعلق بكفاءة الكشف وتحييد النويدات المتساوية الكتل، مما أدَّى أيضاً إلى إتاحة الإمكانية لتحليل مجموعة إضافية من النويدات المشعة الطويلة العمر الموجودة في البيئة بمستويات تركيز منخفضة للغاية (الشكل طاء-4).

الشكل طاء-4- عملية نشر قاطعة عينات متعددة الأذرع لجمع عينات غير مستثارة من الرواسب لأغراض تحليل الملوثات ودلائل تغير المناخ. وتحفظ الرواسب المعلومات بحسب الترتيب الزمني، وتُستخدم المقتفيات الإشعاعية لتحديد تواريخ الأحداث الماضية المدوَّنة في هذه السجِّلات الطبيعية. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

178- وبفضل طول الأعمار النصفية للتكنتيوم-99 واليود-129 واليورانيوم-236 والنبتونيوم-237 والبلوتونيوم-239 والبلوتونيوم-240 فهذه النظائر مهمة في تطبيقات المقتفيات الأوقيانوغرافية التي تساعد على دراسة العمليات التي تنطوي عليها الدورات المائية الكبيرة الحجم. وقد سلَّطت الدراسات المتعلقة بعمليات انتقال الكتل المائية الضوء على اليود-129 واليورانيوم-236 نظراً لطبيعتهما القابلة للذوبان في مياه البحر، ولأنَّ التطورات الجديدة في تقنيات القياس تُمكِّن من الكشف عنهما بمستويات تركيز منخفضة للغاية. وعلى النقيض من تقنيات قياس الطيف الكتلي التقليدية، تُحدِّد نظم قياس الطيف الكتلي باستخدام المعُجِّلات مستويات التركيز بناءً على عينات صغيرة الحجم من مياه البحر بعد تطبيق إجراءات كيميائية بسيطة وسريعة مع كفالة حدود كشف تنافسية للغاية (بنسب ذرية تساوي 10^{-13} أو أقل لليود-129/اليود-127 ولليورانيوم-236/اليورانيوم-238).

179- ولطالما أدَّت تقنيات التحليل الإشعاعي الفائقة الحساسية دوراً رئيسيًّا في العلوم البحرية. وسيؤدي المزيد من التقدُّم في التكنولوجيات الجديدة لعدِّ الذرات المفردة إلى إيجاد فرص لإجراء دراسات علمية جديدة ومثيرة.

180- وتتحقق حاليًّا أوجه تقدُّم واعدة في التقنيات التحليلية الفائقة الحساسية القائمة على الليزر، والكشف عن النظائر الفائقة الندرة للغازات النبيلة، ومصادر الأيونات الموجبة للمُعجِّلات الترادفية، وتكنولوجيات مصائد الأيونات. وسيزيد التقدم المحرز في التكنولوجيات التحليلية من دعم الانتقال من التحليلات الإجمالية للعينات إلى التحليلات النظيرية لمركبات معينة مع الربط بين الأجهزة التحليلية أثناء التحليل. ومن شأن هذه التطورات أن تتيح تكنولوجيا عدِّ الذرات المفردة فيما يخصُّ العديد من النويدات المشعة، مما سيشكِّل إنجازاً كبيراً في التحليل الفائق الحساسية للنويدات المشعة البحرية.

المرفق

الجدول ألف-1- حالة القوى النووية على الصعيد العالمي - 2022[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء المولّدة نوويًّا في عام 2022		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام 2022	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	النسبة المئوية من الإجمالي	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	37	27 727	3	2 700	209,5	19,6	1 447	7
الأرجنتين	3	1 641	1	25	7,5	5,4	97	2
أرمينيا	1	416			2,6	31,0	55	3
إسبانيا	7	7 123			56,2	20,3	368	2
ألمانيا	3	4 055			31,9	5,8	834	8
الإمارات العربية المتحدة	3	4 011	1	1 310	19,3	6,8	4	0
أوكرانيا[هـ]	15	13 107	2	2 070	غ م	غ م	563	6
إيران (جمهورية-الإسلامية)	1	915	1	974	6,0	1,7	11	4
باكستان	6	3 262			22,2	16,2	98	9
البرازيل	2	1 884	1	1 340	13,7	2,5	63	3
بلجيكا	6	4 936			41,7	46,4	324	4
بلغاريا	2	2 006			15,8	32,5	173	3
بنغلاديش			2	2 160				
بيلاروس	1	1 110	1	1 110	4,4	11,9	2	2
تركيا			4	4 456				
الجمهورية التشيكية	6	3 934			29,3	36,7	188	10
جمهورية كوريا	25	24 489	3	4 020	167,5	30,4	644	9
جنوب أفريقيا	2	1 854			10,1	4,9	76	3
رومانيا	2	1 300			10,2	19,3	41	11
سلوفاكيا	4	1 868	2	880	14,8	59,2	184	7
سلوفينيا	1	688			5,3	42,8	41	3
السويد	6	6 937			50,0	29,5	486	0
سويسرا	4	2 973			23,2	36,4	236	11
الصين	54	52 181	20	20 284	395,4	5,0	513	2
فرنسا	56	61 370	1	1 630	282,1	62,6	2 449	0
فنلندا	5	4 394			24,2	35,0	176	2
كندا	19	13 624			81,7	12,9	903	0
مصر			2	2 200				
المكسيك	2	1 552			10,5	4,5	61	11
المملكة المتحدة	9	5 883	2	3 260	43,6	14,2	1 658	9
الهند	19	6 290	8	6 028	42	3,1	594	11
هنغاريا	4	1 916			15,0	47,0	150	2
هولندا	1	482			3,9	3,3	78	0
الولايات المتحدة الأمريكية	92	94 718	2	2 234	772,2	18,2	4 825	9
اليابان	10	9 486	2	2 653	51,9	6,1	2 020	6
المجموع العالمي [ب]،[ج]	**438 [د]**	**393 823 [د]**	**58**	**59 334**	**2 486.6**	**غ م**	**764 19**	**11**

ملحوظة: غ م — غير منطبق.

(أ) المصـــدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة (نظام PRIS) (www.iaea.org/pris) وفقاً للبيانات التي قدمتها الدول الأعضاء حتى نهاية حزيران/يونيه 2023.

(ب) الأرقام الإجمالية تشـــمل البيانات التالية الواردة من تايوان، الصـــين: 3 وحدات عاملة بقدرة إجمالية تبلغ 2859 ميغاواط (كهربائي) وفَّرت 22,9 تيراواط-ساعة من الكهرباء، بما يمثِّل 9,1% من إجمالي مزيج الكهرباء.

(ج) إجمالي الخبرة التشغيلية المذكور يشمل أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (80 عاماً، 8 أشهر) وكازاخستان (25 عاماً، 10 أشهر) وليتوانيا (43 عاماً، 6 أشهر)، والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (239 عاماً، 8 أشهر).

(د) الأرقام الإجمالية تشمل البيانات الخاصة بوحدات ظلَّ تشغيلها قيد التعليق في: الهند (4 وحدات؛ 639 ميغاواط (كهربائي)) واليابان (23 وحدة؛ 193 22 ميغاواط (كهربائي)).

(هـ) لا يشمل إجمالي إنتاج الكهرباء وحدات المفاعلات الأوكرانية لأن البيانات التشغيلية الخاصة بعام 2022 لم تُقدَّم حتى موعد نشر هذا التقرير.

الجدول هاء-1- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على الصعيد العالمي

نوع التطبيق[أ]	عدد مفاعلات البحوث المشاركة[ب]	عدد الدول الأعضاء التي لديها مرافق تُستخدم في هذا الغرض
التدريس/التدريب	161	51
التحليل بالتنشيط النيوتروني	116	50
إنتاج النظائر المشعة	82	41
التصوير النيوتروني	69	37
تشعيع المواد/الوقود	68	26
التشتُّت النيوتروني	44	28
التقويم الجيولوجي	24	21
التحويل (معالجة السليكون)	23	15
التحويل (الأحجار الكريمة)	20	12
العلاج النيوتروني، أساساً أنشطة للبحث والتطوير	15	12
توفير البيانات النووية	16	9
تطبيقات أخرى[ج]	116	34

[أ] يرد وصف لهذه التطبيقات بمزيد من التفصيل في المنشور الصادر عن الوكالة بعنوان *"Applications of Research Reactors"* (تطبيقات مفاعلات البحوث) (العدد NP-T-5.3 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، فيينا 2014).

[ب] من بين مفاعلات البحوث المأخوذة في الحسبان البالغ عددها 233 مفاعلاً (بما يشمل 223 مفاعلاً عاملاً و10 مفاعلات مغلقة بصفة مؤقتة، في كانون الأول/ديسمبر 2022).

[ج] تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها وتجارب التدريع وإنشاء مصادر بوزيترونية ودراسات حرق النفايات النووية.

ياء- قائمة المختصرات

مؤتمر المناخ COP27	مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشـــأن تغير المناخ لعام 2022
كوفيد-19	مرض فيروس كورونا 2019
الفاو	منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة
خدمة INIR	خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية
المفاعلات النمطية الصغيرة	المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية
المفاعل ألفريد	المفاعل الإيضاحي الأوروبي السريع المتقدم المبرَّد بالرصاص
نظام آلبس	النظام المتقدم لمعالجة السوائل
جرعة التخفيض العُشري	جرعة التخفيض العُشري
مرفق KSTAR	مرفق التوكاماك البحثي المتقدم الفائق التوصيل
وقود موكس	خليط الأكسيدين
مبادرة التنسيق والتوحيد	مبادرة التنسيق والتوحيد في المجال النووي
نظام PRIS	نظام المعلومات عن مفاعلات القوى
مرفق STEP	مرفق التوكاماك الكُروي لإنتاج الطاقة

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

Vienna International Centre, P.O. Box 100

1400 Vienna, Austria

الهاتف: 0-2600 (1-43+)

رقم الفاكس: 7-2600 (1-43+)

البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org

www.iaea.org

IAEA

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

23-01479A