# استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2024

## تقرير من المدير العام

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
*تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية*

GC(68)/INF/4

# استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2024

# تقرير من المدير العام

**GC(68)/INF/4**

**طُبِع من قِبَل**
**الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا**
**في أيلول/سبتمبر 2024**
**IAEA/NTR/2024**

# المحتويات

الملخص ..... 5

تصدير من المدير العام ..... 7

موجز جامع ..... 9

ألف- القوى النووية ..... 15
ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية ..... 15
ألف-2- محطات القوى العاملة ..... 16
ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسعة ..... 19
ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية ..... 23
ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبردة بالماء ..... 24
ألف-4-2- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية
والمفاعلات المتناهية الصغر ..... 25
ألف-4-3- المفاعلات السريعة ..... 30
ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية ..... 32

باء- دورة الوقود النووي ..... 34
باء-1- المرحلة الاستهلالية ..... 34
باء-2- المرحلة الختامية ..... 39

جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرّف في النفايات المشعة ..... 42
جيم-1- الإخراج من الخدمة ..... 42
جيم-2- الاستصلاح البيئي والتصرّف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية ..... 45
جيم-3- التصرّف في النفايات المشعة ..... 47

دال- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل ..... 52

هاء- مفاعلات البحوث، ومعجّلات الجسيمات، والأجهزة النووية ..... 62
هاء-1- مفاعلات البحوث ..... 62
هاء-2- معجّلات الجسيمات ..... 66
هاء-3- الأجهزة النووية ..... 69

واو- البيانات الذرية والنووية ..... 71

زاي- الذكاء الاصطناعي في مجال القوى النووية ودورة الوقود النووي ..... 72

حاء- الصحة البشرية ..... 73
حاء-1- التقييم غير الجراحي لوظيفة الجهاز الهضمي في الأمعاء:
اختبار النَّفَس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 ..... 73
حاء-2- ضمان الجودة: التطورات الجديدة في التشعيع الداخلي ..... 77

حاء-3- رؤية داخل القلب: الدور الحاسم للتصوير النووي في الكشف
عن الداء النشواني القلبي ..... 81
طاء- الأغذية والزراعة ..... 84
طاء-1- تكنولوجيات التشعيع لتطوير اللقاحات: تطبيقات التكنولوجيات
النووية للوقاية من الأمراض المعدية التي تصيب الثروة الحيوانية ..... 84
طاء-2- الجمع بين التكنولوجيا النووية لجهاز استشعار نيوترونات
الأشعة الكونية وصور الاستشعار عن بُعد لإدارة المياه الزراعية ..... 86
ياء- النظائر المشعة والتكنولوجيا الاشعاعية ..... 90
ياء-1- نظم إيصال جديدة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تستهدف الخلايا ..... 90
ياء-2- استخدام تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية والمستنقعات الاصطناعية
لمعالجة مياه الصرف الناتجة عن التعدين ..... 93
كاف- الهيدرولوجيا النظيرية ..... 97
كاف-1- تعقب عمليات دورة المياه: التطورات الجديدة في تحليل التريتيوم ..... 97
لام- البيئة البحرية ..... 100
لام-1- استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين رصد التلوُّث بالمواد البلاستيكية
الدقيقة في المحيطات والبحوث المتعلقة به ..... 100
المرفق ..... 104
قائمة المختصرات العربية والإنكليزية ..... 107

## الملخص


- 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 يسلِّط الضوء على أبرز المستجدات في عام 2023.

- يتناول استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2024 المجالات المختارة التالية: القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والإخراج من الخدمة، والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة، وتطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل، ومفاعلات البحوث، ومعجلات الجسيمات والأجهزة النووية، والبيانات الذرية والنووية، واستخدام الذكاء الاصطناعي في مجال القوى النووية ودورة الوقود النووي، والصحة البشرية، والأغذية والزراعة، والتكنولوجيا النظيرية والإشعاعية، والهيدرولوجيا النظيرية، والبيئة البحرية.

- وقد عُرضت المسوَّدة على مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس 2024 ضمن الوثيقة GOV/2024/2. وأُعِدَّت الصيغة النهائية في ضوء المناقشة التي أجراها 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.

وقد شهدنا في عام 2023 استمرار الاهتمام الكبير بالقوى النووية، سواء من أجل تحقيق الأهداف المناخية أو لمواجهة التحدي المتمثل في توفير الطاقة الآمنة بتكلفة ميسورة، مع قيام العديد من الدول الأعضاء بمراجعة سياساتها المتصلة بالطاقة النووية. وفي الدورة الثامنة والعشرين لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (مؤتمر المناخ COP28)، التي عُقدت في دبي بالإمارات العربية المتحدة، عقدت الوكالة سلسلة من الفعاليات في الجناح الذي نظمته بعنوان Atoms4Climate (تسخير الذرة من أجل المناخ) لتوضيح الكيفية التي يمكن أن تقدم بها القوى النووية مساهمة كبيرة في إنتاج الهيدروجين وإزالة الكربون من القطاعات التي يصعب إزالته منها، ومن ثم دعم التعجيل بإزالة الكربون. وأقرت عشرات الدول الأعضاء البيان الذي أصدرته الوكالة بشأن القوى النووية في 1 كانون الأول/ديسمبر 2023، والذي شدد على أن الوصول بصافي الانبعاثات إلى مستوى الصفر يحتاج إلى القوى النووية. وكان ذلك قد تأكد قبل بضعة أشهر في الصيغة المحدثة من خريطة الطريق نحو تحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام 2050 الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة، والتي تتوقع زيادة القدرة النووية بأكثر من الضعف بحلول عام 2050، وهو ما يتفق مع توقعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية في الحالة المرتفعة والصادرة في أيلول/سبتمبر 2023. وبالإضافة إلى ذلك، فخلال مؤتمر المناخ COP28، صدر إعلان من أكثر من 20 بلداً ينادي بمضاعفة القدرة النووية ثلاث مرات بحلول عام 2050، ويدعو المصارف الإنمائية الإقليمية والمؤسسات المالية الدولية إلى إدماج الطاقة النووية في سياسات الإقراض المعمول بها لديها، مع التشديد على الحاجة لتأمين سلاسل الإمداد اللازمة لتكثيف نشر التكنولوجيات النووية. وبالتعاون مع شركائنا، ونتيجة لجهودنا وعزيمتنا في السنوات السابقة، وللمرة الأولى منذ بداية عقد مؤتمرات قمة المناخ في عام 1995، اختتم مؤتمر المناخ COP28 أعماله بإنجاز كبير. ففي أول عملية تقييم عالمي تُجرى بمقتضى اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، بموافقة 198 بلدا موقعا، ذُكرت الطاقة "النووية" صراحة لأول مرة بين التكنولوجيات المنخفضة الانبعاثات اللازم الأخذ بها لتحقيق تخفيضات كبيرة وسريعة في انبعاثات غازات الدفيئة.

وفي الوقت نفسه، يتزايد عدد البلدان التي تستخدم التكنولوجيات النووية في تطبيقات في غير مجالات القوى، بما في ذلك تعزيز الأمن الغذائي، والتصدي لآثار تغير المناخ، وحماية البيئة من التلوث، وتحسين رعاية مرضى السرطان وغيره من الأمراض المهددة للحياة. وكما يُبرز هذا التقرير، فإن الوكالة تواصل الابتكار في هذه المجالات الرئيسية وغيرها من خلال عمل مختبرات التطبيقات النووية التابعة لها في النمسا وموناكو، ومشاريعها البحثية المنسقة، وشراكاتها مع مؤسسات البحوث الرائدة في جميع أنحاء العالم. وفي العديد من مجالات أنشطة البحث والتطوير التي تضطلع بها الوكالة، يتزايد استخدام الذكاء الاصطناعي للمساعدة على دفع عجلة الابتكار، وهو اتجاه سيستمر في النمو.

والبحث العلمي والبيانات العلمية هما أساس اتخاذ القرار بطريقة مدروسة، ولذلك تبحث الوكالة باستمرار عن الفرص التي يمكن فيها لأنشطة البحث والتطوير التي تضطلع بها أن تساعد البلدان على الاستفادة إلى أقصى حد من العلوم والتكنولوجيات النووية لحماية وتحسين صحة ورفاه شعوبها. وبعد أن أطلقت الوكالة مبادرة العمل المتكامل لمكافحة الأمراض الحيوانية المصدر (مبادرة زودياك)، ومبادرة استخدام التكنولوجيا النووية لمكافحة

التلوث بالمواد البلاستيكية، ومبادرة أشعة الأمل، ومع تزايد انعدام الأمن الغذائي على الصعيد العالمي في عام 2023، أطلقت الوكالة ومنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة مبادرة مشتركة بعنوان Atoms4Food (تسخير الذرة من أجل الغذاء)، لدعم البلدان في تعزيز الأمن الغذائي وأمن التغذية باستخدام التقنيات النووية، بما في ذلك من خلال الزراعة الذكية مناخيا وما استُحدث في مختبراتنا من الممارسات المحسنة لإدارة الموارد المائية.

*الشكل- تصدير- 1- المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، أثناء إلقاء كلمته في مؤتمر المناخ COP28 في دبي بالإمارات العربية المتحدة. (الصورة من: الوكالة)*

وعلى مدى عقود، كانت العلوم والتكنولوجيات النووية أدوات مهمة في مساعدة البلدان على تلبية احتياجاتها الإنمائية. ومما لا شك فيه أنَّه يمكن الاستعانة بها لتحقيق المزيد من النجاح، وفي عدد أكبر من المجالات. ويسلِّط استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2024 الضوء على بعض أبرز التطورات التي شهدها مجال التكنولوجيا النووية في عام 2023، بغية مساعدة الدول الأعضاء على اتخاذ قرارات مدروسة في تصديها للتحديات الراهنة والمستجدة.

# موجز جامع

1- للسنة الثالثة على التوالي، رفعت الوكالة سقف توقعاتها السنوية للنمو المحتمل في قدرات القوى النووية خلال العقود المقبلة، مما يؤكد تجدد الاهتمام بالقوى النووية في سياق أزمات أمن الطاقة وتغير المناخ، فضلاً عن تزايد الطلب على التحول لاستخدام الكهرباء والحاجة إلى إيجاد بدائل للوقود الأحفوري لتوفير الحرارة والهيدروجين بهدف إزالة الكربون من قطاعي الصناعة والنقل. ورفعت الوكالة توقعاتها في الحالة المنخفضة إلى 458 غيغاواطاً في عام 2050، بما يمثل زيادة كبيرة قدرها 55 غيغاواطاً مقارنة بتوقعات الحالة المنخفضة لعام 2022. وارتفعت التوقعات في الحالة المرتفعة إلى 890 غيغاواطاً في عام 2050، مقارنة بتوقعات الحالة المرتفعة في العام السابق التي كانت تبلغ 873 غيغاواطاً، وبما يمثل زيادة قدرها 175 غيغاواطاً مقارنة بتوقعات عام 2020.

2- وحتى كانون الأول/ديسمبر 2023، كانت القدرة التشغيلية العالمية على توليد القوى النووية تبلغ 371,5 غيغاواطاً (كهربائياً) يوفرها 413 مفاعلاً في 31 بلداً. وبالإضافة إلى ذلك، ظلّ عدد من المفاعلات يُولِّدُ 21,3 غيغاواطاً (كهربائياً) (25 مفاعلاً) من القدرة التشغيلية المرخصة قيد وقف التشغيل المؤقت وذلك على مدار العام. وخلال عام 2023، تم توصيل عدد من المفاعلات يُولِّد 5 غيغاواطات (كهربائية) من قدرات القوى النووية الجديدة (5 مفاعلات) بالشبكة الكهربائية، وتمت استعادة 1,6 غيغاواطاً (كهربائياً) إضافيًّا من خلال مفاعلين اثنين كانا في السابق قيد وقف التشغيل المؤقت وأُعِيدَ توصيلهما بالشبكة الكهربائية. وتُشير التقارير الواردة من الدول الأعضاء إلى أنَّ أسطول محطات القوى النووية العالمي ولَّد حوالي 2515,2 تيراواط-ساعة من الكهرباء القابلة للتوريد المنخفضة الانبعاثات[1]. وفي نهاية عام 2023، كان مجموع قدرة المفاعلات قيد التشييد (وعددها 59 مفاعلاً) في 17 بلداً يبلغ 61,1 غيغاواطاً (كهربائياً). ومن مجمل القدرة التشغيلية التي توفرها المفاعلات العاملة حول العالم، هناك نسبة قدرها نحو 67% تُستَخدمُ منذ أكثر من 30 عاماً. وخلال الفترة نفسها، أسفرت عمليات إيقاف تشغيل عدد من المفاعلات بشكل دائم (5 مفاعلات) عن فقدان 6 غيغاواطات (كهربائية) من القدرة النووية.

3- وهناك حاليا نحو 50 من البلدان المهتمة بإضافة القوى النووية إلى مزيج الطاقة لديها. ومن بين هذه البلدان، هناك 27 بلداً في مراحل مختلفة من استهلال وتنفيذ برنامجه الوطني للقوى النووية. وبحلول عام 2035، قد يزيد عدد البلدان المشغلة بنسبة تقترب من 30% بانضمام 10–12 بلداً جديداً إلى صفوف البلدان المشغلة لمحطات قوى نووية مقارنة بعدد هذه البلدان البالغ حاليًّا 31 بلداً. ويتطلب هذا الاهتمام المتزايد إرساء البنية الأساسية النووية الملائمة.

4- وظلَّت المفاعلات المبردة بالماء هي التكنولوجيا السائدة في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. ويرجع التركيز العالمي على تطوير تكنولوجيات القوى النووية إلى الحاجة إلى التعجيل بنشر المفاعلات المتقدمة، بما في ذلك المفاعلات النمطية الصغيرة (المفاعلات النمطية الصغيرة). ويركِّز الاتجاه الحالي في تطوير المفاعلات النمطية الصغيرة على تحسين الجوانب الاقتصادية وسمات الأمان والقابلية للتوسع. وقد ازداد اهتمام الدول الأعضاء بمحطات القوى النووية العائمة والمفاعلات المتناهية الصغر، وبتطبيقاتها، وتعكف عدة

[1] لا يشمل إجمالي إنتاج الكهرباء وحدات المفاعلات الأوكرانية لأن البيانات التشغيلية الخاصة بعام 2023 لم تُقدَّم حتى موعد نشر هذا التقرير.

بلدان حاليا على وضع تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة بحرية لاستخدامها في محطات القوى النووية العائمة.

5- ويُعدُّ استخدام الطاقة النووية في التطبيقات غير الكهربائية، بما في ذلك تدفئة الأحياء السكنية وتحلية المياه والإمداد المباشر بالحرارة لمختلف العمليات الصناعية، من التكنولوجيات التي أثبتت جدواها، حيث يُستخدم في هذه التطبيقات حاليا 65 مفاعلا عاملا في عدة دول أعضاء، في حين أن هناك العديد من الدول الأعضاء الأخرى التي تبدي اهتماما متزايدا بهذا الخيار.

6- وفيما يتعلق بالمفاعلات السريعة، انصب التركيز على تحسين تدابير الأمان عن طريق إدماج نظم خاملة للإغلاق واستكشاف أنواع مختلفة من المبردات، لا سيما في سياق تصاميم المفاعلات الابتكارية. ويعتمد نشر النظم النيوترونية السريعة في الأجل المتوسط على المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم بوصفها الخيار المفضل.

7- وقد أثبت البحث والتطوير في مجال تنفيذ الذكاء الاصطناعي إمكاناته بخصوص كفاءة تحسين التصميم الأساسي لقلب المفاعل في تطبيقات مفاعلات القوى وتطبيقات المفاعلات النووية المتقدمة. كما أنه من شأن هذا البحث والتطوير تحسين الأمان والكفاءة التشغيلية والفعالية من حيث التكلفة والمساعدة في الوقت نفسه على تيسير تطوير التكنولوجيات النووية المتقدمة.

8- وفي مجال طاقة الاندماج، تتزايد الاستثمارات التي تتلقاها الشركات التابعة للقطاع الخاص التي يهدف العديد منها إلى العمل بصورة مستقلة على تطوير الأجهزة البحثية والإيضاحية الخاصة بها. وفي الوقت نفسه، بدأت تتكون شراكات بين القطاعين العام والخاص في مجال الاندماج، مما يجسد النمو العام في التمويل المقدم لطاقة الاندماج، والذي شهد زيادة سنوية قدرها 6,21 مليارات دولار أمريكي في عام 2023 (ارتفاعا من 4,8 مليارات دولار أمريكي في عام 2022). كذلك تشهد صناعة الاندماج زيادة في التنوع من الناحية الجغرافية، حيث بلغ عدد الشركات النشطة في هذا المجال 43 شركة في 12 بلداً. كما بدأت الهيئات الرقابية والمشرّعون في معالجة التحديات والفرص المرتبطة بالطاقة الاندماجية.

9- وواصل مجلس إدارة المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير)، وهو الهيئة الإدارية للمنظمة المعنية بمفاعل إيتير (منظمة إيتير)، النظر في خطط إيتير المنقحة التي تنطوي على تغيير مادة البطانة الداخلية للمفاعل من البريليوم إلى التنغستن. وبالإضافة إلى ذلك، واصلت منظمة إيتير وضع الصيغ النهائية للاستراتيجيات وعقود الموردين لإصلاح المكونات الرئيسية، مع مواصلة التفاعل مع هيئة الأمان النووي الفرنسية. وفي عام 2023، تمكَّن الباحثون في مختبر لورانس ليفرمور الوطني الأمريكي من تكرار إشعال طاقة الاندماج لثلاث مرات على الأقل وهو الإنجاز الذي تحقق من قبل في مرفق الإشعال الوطني في كانون الأول/ديسمبر 2022.

10- ووفقا للمنشـــور المعنون Uranium 2022: Resources, Production and Demand (اليورانيوم في عام 2022: موارده وإنتاجه والطلب عليه) (الكتاب الأحمر لعام 2022)، تقدِّر التوقعات أن الطلب على اليورانيوم سيصل بحلول عام 2030 إلى ما بين 960 60 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المنخفض) و 592 76 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المرتفع)، وبحلول عام 2040 إلى ما بين 040 63 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المنخفض) و 272 108 طنا من اليورانيوم (سـيناريو الطلب المرتفع). وهناك عدد من المناجم المخطط لها والمحتملة في 19 بلدا، والتي يمكن، في حال بدء تشغيلها في الفترة بين عامي 2023 و2040، أن تسهم في الوصـــول بالقدرة الإنتاجية الاســـمية العالمية إلى 138 77 طنا من اليورانيوم ســـنويا. وفقا للكتاب الأحمر لعام 2022، فقد شـــهد الإنفاق على الاســـتكشـــاف والتطوير حول العالم ارتفاعاً طفيفاً في عام 2021 بنحو 2,8 مليون دولار أمريكي، بعد انخفاض قدره 2 مليار دولار أمريكي في الفترة بين 2014 و2020.

11- وفي العقد المقبل، ســـتواجه صـــناعة إنتاج الوقود النووي طلبا متزايدا في جميع قطاعات الوقود النووي بمختلف أنواعه، بسبب النمو الذي تشهده برامج التشييد في البلدان المخضرمة والمستهلة على السواء، وفي ضـــوء الأهداف الطموحة الرامية إلى تطوير أنواع جديدة من الوقود، بما في ذلك الأنواع اللازمة للمفاعلات النمطية الصـــغيرة والمفاعلات المتقدمة. ويحتاج إنتاج اليورانيوم الضـــعيف الإثراء الأعلى درجة (اليورانيوم +LEU)، وتحديداً اليورانيوم المنخفض الإثراء العالي التركيز (اليورانيوم HALEU)، إلى معالجة المسائل المتعلقة بالأمان والأمن، بدءا من استحداث عملية ترخيص جديدة وتحديث اللوائح وحتى إرساء البنية التحتية المصممة خصيصاً لسلاسل الإمداد بهذا النوع من الوقود.

12- ويتراكم الوقود النووي المســـتهلك قيد التخزين بمعدل يقارب 7000 طن من الفلزات الثقيلة ســـنوياً على مستوى العالم، وتجاوز حجم المخزون 000 300 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 لخزن الوقود النووي المستهلك وزيادة مدَّة الخزن قبل التخلص.

13- وعلى الصعيد العالمي، خضع 210 من المفاعلات النووية للسحب الدائم من الخدمة. وما زال عدد المرافق قيد التفكيك الفعلي يتزايد، مع الاتجاه إلى تفكيك المرافق في وقت مبكر بعد الإغلاق الدائم. وسيكون للتكنولوجيات الرقمية دور متزايد الأهمية في تســـريع وتيرة عمليات الإخراج من الخدمة، بما في ذلك اســـتخدام الروبوطات المتنقلة في مسح الهياكل للكشف عن حالتها المادية والإشعاعية.

14- وهناك اتجاه عالمي إلى اعتماد مبادئ وممارســـات الإدارة المتكاملة للنفايات المشـــعة، مما يســـاعد على تحســـين عملية معالجة النفايات إلى الحد الأمثل، بدءا من إنتاج النفايات وحتى التخلص منها. وتؤدي الإدارة المتكاملة للنفايات إلى تبسـيط العمليات والتخفيف من المخاطر البيئية وتعزيز التصـــرف المســـؤول في النفايات المشعة. وبالإضافة إلى ذلك، فهناك اتجاه متزايد نحو اعتماد التسلسل الهرمي للنفايات المشعة بهدف التقليل من حجم النفايات المشـعة التي تصـل إلى مرافق التخلص، ومن ثم الحفاظ على هذه المرافق بوصـفها أصـول قيّمة طويلة الأجل.

15- وفي نهاية عام 2023، كان عدد المفاعلات البحثية العاملة، بما فيها المفاعلات قيد الإغلاق المؤقت، يبلغ 243 مفاعلا في 54 بلداً. وبالإضـــافة إلى ذلك، فهناك 11 مفاعل بحوث جديد، بما في ذلك نظام واحد قائم على معجل جسيمات، قيد التشييد في 14 دولة عضوا، وهناك 14 دولة عضوا لديها خطط رسمية لتشييد مفاعلات بحوث جديدة. وقد دفع التقادم التدريجي لأسـطول مفاعلات البحوث في جميع أنحاء العالم المشـغِّلين والرقابيين نحو اعتماد تقنيات ومنهجيات جديدة لتقييم ظروف تشغيل مفاعلات البحوث من أجل مواصلة التشغيل المأمون.

16- وتعتمد الدراسات العلمية التفصيلية على عدد النيوترونات التي يمكن إنتاجها وإتاحتها للباحثين من خلال مصدر نيوتروني. ولذلك، بالإضافة إلى مفاعلات البحوث، واصل العلماء والمهندسون تطوير جيل جديد من مصادر النيوترونات القائمة على معجِّلات الجسيمات وتكنولوجيا أهداف التشظي.

17- وتؤدي معجِّلات الجسيمات دوراً رئيسيًّا في التصوير دون الخلوي والتشعيع لعلاج السرطان. ولأغراض التشخيص الطبي، تُستخدم بانتظام مجموعة واسعة من تقنيات التصوير مثل الموجات فوق الصوتية والتصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغناطيسي. ومع التطور المتزايد في تقنيات المعالجة بالحزم الأيونية وحزم الأشعة السينية، صار من الممكن تركيز الحزم الأيونية أو حزم الأشعة السينية إلى مستوى نانومتري، مما يسمح باستحداث أساليب جديدة للتصوير المتعدد الأطياف يمكن تطبيقها في التصوير الطبي وفي تصوير القطع الفنية.

18- وتُستخدم مصفوفات المداخل القابلة للبرمجة الميدانية بشكل متزايد كجزءٍ لا يتجزأ من نظم الحصول على بيانات أجهزة الكشف الإشعاعي. وتؤدي هذه المصفوفات مجموعة واسعة من الأغراض، بداية من تحديد بارمترات الحصول على بيانات أجهزة الكشف الإشعاعي وتدفق/توجيه البيانات، وصولاً إلى تمييز متقدِّم للإشارات أو حتى إعادة بناء الحدث بالكامل. والخوارزميات المنشورة لمعالجة البيانات هي صلب تأدية الوظائف الأكثر صعوبة، سواءً التقليدية أو القائمة على الذكاء الاصطناعي.

19- وتستثمر دول أعضاء مختلفة موارد إضافية في مفاعل إيتير للحصول على بيانات عالية الجودة بشأن تفاعلات أشعة غاما. والتطبيقات الرئيسية لهذه البيانات هي الاستكشاف النشط بالنيوترونات، والتقديرات الأكثر دقة للحرارة المتولِّدة عن أشعة غاما في تدريع مفاعلات الانشطار وأجهزة الاندماج، والابتكارات في التطبيقات الفضائية.

20- وأحد أكثر الأسئلة إلحاحاً في مجال التغذية في مجال الصحة العامة هو لماذا لا يزال الأطفال في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل يعانون من قصر قاماتهم بالنسبة لأعمارهم على الرغم من تدخلات الصحة العامة المتعددة. ويتزايد شيوع الإصابة بالاختلال الوظيفي المعوي البيئي بين الأطفال الذين يعيشون في بيئات غير صحية في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط. ودعمت الوكالة تحسين استخدام أسلوب غير تدخلي قائم على اختبار التنفس لقياس هضم السكروز بوصفه مؤشراً على وظائف الأمعاء الدقيقة لاكتشاف الإصابة بالاختلال المذكور، وهو أسلوب يمكن استخدامه في جميع الفئات العمرية. وللحصول على نتائج أكثر شمولية، يمكن تطبيق هذا الاختبار جنباً إلى جنب مع اختبارات أخرى لتغطية الجوانب الأخرى من الخلل الوظيفي المعوي البيئي غير هضم السكروز.

21- وسرطان عنق الرحم هو رابع أكثر أنواع السرطان شيوعاً بين النساء في أنحاء العالم. ويُعدُّ التشعيع الداخلي مكوناً حيوي الأهمية في العلاج الإشعاعي الذي يؤدي دورا محوريا في مكافحة هذا المرض، وهو يتطلب ضبطاً بالغ الدقة لتجنب إحداث آثار ضارة بسبب نقصان الجرعة أو زيادتها. وتعمل الوكالة حاليا على وضع منهجية جديدة لمراجعة قياس الجرعات من أجل تحسين جودة العلاج بالتشعيع الداخلي. وتعمل الوكالة أيضاً على سد الفجوة المتزايدة في التعليم والتدريب في مجال التشعيع الداخلي في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط، وهي فجوة تتفاقم بسبب التعقيد المتزايد للتكنولوجيا ونقص معدات التدريب. وتستخدم الوكالة أداة فعالة من حيث التكلفة قائمة على الواقع الافتراضي للتغلب على القيود المادية والجغرافية واللوجستية من أجل تمكين المستخدمين من التمرُّن على التشعيع الداخلي. ومن خلال الجمع بين عمليات مراجعة قياس الجرعات وأدوات التعليم المبتكرة، تتبع الوكالة نهجا شاملا لتعزيز قدرات مهنيي الرعاية الصحية المشاركين في إجراءات التشعيع الداخلي.

22- وشهدت البحوث الطبية والاستراتيجيات العلاجية مؤخرا تطورات تبشر بعصر جديد من الأمل للمرضى المصابين بالداء النشواني القلبي. والأدوية الابتكارية التي تستهدف الآليات الأساسية لترسب بروتين الأميلويد إلى جانب أدوات التصوير التشخيصي المُحسَّنة مثل علاج أمراض القلب بالأساليب النووية قد مكَّنت مقدمي الرعاية الصحية من التدخل في وقت مبكر وبشكل أكثر فعالية. ومن خلال تقنيات التصوير المتقدمة، يتيح طب القلب النووي الكشف عن الداء النشواني القلبي بدقة وتمييزه عن اضطرابات القلب الأخرى. واتسام هذه التقنيات بأنها غير جراحية يجعلها ذات قيمة خاصة لتقييم الداء النشواني القلبي بشكل شامل، مما يساهم بدوره في علاج الحالة في الوقت المناسب وبدقة.

23- وغالباً ما تُمثِلُ اللقاحات نهجاً فعالاً من حيث التكلفة للوقاية من الأمراض التي تصيب حيوانات المزارع، والتي يمكن أن تتسبب في خسائر اقتصادية فادحة حول العالم. وقد تجدد مؤخرا الاهتمام باستخدام التشعيع لإنتاج اللقاحات بفضل أجهزة التشعيع الجديدة التي يمكن أن توفر جرعات إشعاعية دقيقة في فترات أقصر، ووجود فهم أفضل للجهاز المناعي مما يتيح تقييماً أكثر فعالية لاستجابات التطعيم. وقد مكَّن التقدم التقني من استخدام الحزم الإلكترونية وغيرها من طرق التشعيع لوقف نشاط مسببات الأمراض، مما سمح بالتحول عن استخدام المواد المشعة لإنتاج لقاحات مشععة.

24- وهناك ثلاثة مليارات شخص يعيشون في مناطق زراعية ويعانون من مستويات مرتفعة أو بالغة الارتفاع من ندرة المياه، ومن شأن تغير المناخ أن يزيد الحال سوءاً. وتُستخدم الآن تكنولوجيا أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية بالاقتران مع صور الاستشعار عن بعد العالية الدقة لرصد رطوبة التربة على نطاق مساحات شاسعة من الأراضي أو على مستوى مستجمعات المياه. وهذه التكنولوجيا لديها القدرة على إحداث ثورة في الاستشعار عن بُعد للري الذكي مناخيًّا، مما سيحسِّن بشكل كبير حصول متخذي القرارات والمجتمعات الزراعية على المعلومات الأساسية. وتفتح هذه التكنولوجيا المجال أيضاً أمام تطبيقات بحثية بيئية محتملة، مثل تحليل الاتجاهات السائدة في رطوبة التربة، ونمذجة الإنتاجية المحصولية للمياه، ورصد التغيرات في توافر المياه في الأراضي الرطبة والتنبؤ بالجفاف، وتوفير البيانات لدعم سياسات التكيف مع تغير المناخ.

25- وتوفر المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية طريقة مأمونة وفعالة لإيصال النويدات المشعة إلى الأعضاء أو الأنسجة أو الأهداف الخلوية للأغراض تشخيصية أو العلاجية. ويمكن إعطاء المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية بالاقتران مع نهج الاستهداف المسبق أو العلاجات المركبة للعلاج الكيميائي أو المحسسات الإشعاعية. وتنطوي النهج الموجهة مسبقاً على إحداث طفرة في استراتيجيات العلاج التشخيصي، بما يمكن من استخدام نويدات مشعة ذات أعمار نصفية قصيرة، ومن ثم التقليل من احتمال تعرض الأنسجة السليمة للإشعاع. وتجري دراسة مستفيضة لنظم الإيصال النانوية، بما في ذلك النظم النانوية التشخيصية العلاجية، بهدف تعزيز أمان العقاقير وفعاليتها. ولذلك، من المتوقع أن توفِّر نظم إيصال الجسيمات النانوية فوائد عديدة، بما في ذلك تحسين تركيز النويدات المشعة العلاجية عند الهدف مع تقليل الآثار الجانبية.

26- وتمثل المستنقعات الاصطناعية بديلا فعالا من حيث التكلفة وصديقا للبيئة لمحطات معالجة مياه الصرف التقليدية، نظرا لانخفاض استهلاكها من الطاقة وبنيتها التحتية الميكانيكية البسيطة. وهي مناسبة لمعالجة جميع أنواع مياه الصرف، بما في ذلك مياه الصرف الناتجة من صناعة التعدين. ومع ذلك، هناك حاجة إلى تحسين فهم كيفية عملها المعقدة من حيث الهيدروديناميات لتحقيق المستوى الأمثل في عمليات المعالجة. وتجري الوكالة بحوثا بشأن استخدام تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية لوضع بروتوكولات ومبادئ توجيهية للمستنقعات الاصطناعية وللتحقق من صحة نماذج تدفق المياه فيها؛ وتحسين الأداء الهيدروليكي للمستنقعات الاصطناعية بهدف استصلاح مياه الصرف الناتجة من قطاع التعدين؛ وتحقيق الكفاءة المثلى في إزالة الملوثات في المستنقعات الاصطناعية؛ والتنبؤ بالاستجابة الديناميكية للمستنقعات في مجموعة متنوعة من الظروف.

27- التريتيوم هو النظير المشع الوحيد المدمج في جزيء الماء، مما يجعله أداة تعقب قيّمة لعمليات دورة المياه. ونظرا لقصر العمر النصفي للتريتيوم، فإنه يُستخدم أساساً لتقدير تجدُّد المياه الجوفية وتقييم مدى تأثرها بالتلوث. ونتيجة لانخفاض تركيز التريتيوم في المياه الطبيعية في الوقت الحالي، أصبح قياس محتوى التريتيوم تحديًّا من الناحية التقنية. ومن أجل الحصول على نتائج صحيحة ودقيقة للتطبيقات الهيدرولوجية، يلزم إثراء المياه بمستوى مرتفع من التريتيوم. وقد طورت الوكالة نظاما مبتكرا للإثراء بالتريتيوم باستخدام غشاء إلكتروليتي بوليمري وأخضعته لاختبارات مستفيضة، ويبشر هذا النظام بإحداث ثورة في قدرة البلدان على تحديد تركيز التريتيوم في عينات المياه البيئية بمستويات شديدة الانخفاض لأغراض الرصد والإنذار الهيدرولوجي والإشعاعي على حدٍ سواء.

28- ويبرز الذكاء الاصطناعي كأداة أساسية في مجال تحديد هوية المواد البلاستيكية الدقيقة. ورغم التقدم الذي تحقق في فهم التلوث البحري بالمواد البلاستيكية، لا يزال تحديد كميات وخصائص المواد البلاستيكية الدقيقة أمراً عسيراً. ويمثل استخدام الذكاء الاصطناعي لخوارزميات التعلُّم الآلي لكشف تعقيدات البوليمرات المتدهورة في البيئة البحرية نقلة نوعية. ويوفِّر الذكاء الاصطناعي، من خلال سرعته في التحليل الطيفي، إلى جانب قدرته على محاكاة العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لتوليد أطياف من البوليمرات المتدهورة، أداة أساسية لتحسين تحديد هوية المواد البلاستيكية الدقيقة.

# ألف- القوى النووية

## ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية

### الحالة

1- للسنة الثالثة على التوالي، رفعت الوكالة سقف توقعاتها السنوية للنمو المحتمل في قدرات القوى النووية خلال العقود المقبلة، مما يؤكد تجدد الاهتمام بالقوى النووية في سياق أزمات أمن الطاقة وتغير المناخ، فضلاً عن تزايد الطلب على التحول لاستخدام الكهرباء والحاجة إلى إيجاد بدائل للوقود الأحفوري لتوفير الحرارة والهيدروجين بهدف إزالة الكربون من قطاعي الصناعة والنقل.

2- ورفعت الوكالة سقف توقعاتها في الحالة المنخفضة إلى 458 غيغاواطاً في عام 2050، بما يمثل زيادة كبيرة قدرها 55 غيغاواطاً مقارنة بتوقعاتها في الحالة المنخفضة في عام 2022. ورُفعت التوقعات في الحالة المرتفعة إلى 890 غيغاواطاً في عام 2050، مقارنة بتوقعات الحالة المرتفعة في العام السابق التي كانت تبلغ 873 غيغاواطاً، وبما يمثل زيادة قدرها 175 غيغاواطاً مقارنة بتوقعات عام 2020. وسوف يتطلب تحقيق ذلك تطبيق التشغيل الطويل الأجل على نطاق واسع فيما يتعلق بالأسطول القائم، فضلاً عن إنشاء بنى جديدة بقدرة تزيد على 600 غيغاواط في العقود الثلاثة المقبلة. وإلى جانب البرامج الطموحة لإنشاء البنى الجديدة، يُعدُّ التشغيل الطويل الأجل للأسطول الحالي عنصرا بالغ الأهمية في تحقيق توقعات الحالة المرتفعة. ويمكن للتطورات التكنولوجية الجديدة، بما فيها المفاعلات النمطية الصغيرة (المفاعلات النمطية الصغيرة) وغيرها من أنواع المفاعلات المتقدمة، أن تؤدي دورا مكملا للمفاعلات الكبيرة الحجم من خلال توفير فرص لنشر القوى النووية لتلبية الاحتياجات المختلفة والتغلب على القيود (كما في حالة البلدان التي لديها شبكات كهربائية صغيرة أو تطبيقات غير موصلة بالشبكة الكهربائية، فضلا عن التطبيقات غير الكهربائية). ومع ذلك فالمتوقع هو أن الجزء الأكبر من التوسع النووي المرتقب سوف يتحقق عن طريق المفاعلات الكبيرة الحجم.

**890 غيغاواطاً**

**في عام 2050**

3- وهناك اختلافات وديناميات إقليمية في الطريقة المتوقعة لتطوير القدرة النووية في كل من الحالتين المرتفعة والمنخفضة. ويُعدُّ التعاون الدولي عاملا أساسيا في التصدي للتحديات التي تواجه تطوير الطاقة النووية ونشرها، ومنها تنسيق المتطلبات الرقابية والتوحيد، وكذلك التخلص النهائي من النفايات المشعة. ويظل التمويل أيضا يشكل تحديا يتعين معالجته.

### الاتجاهات

4- هناك اهتمام كبير ومتزايد بتكنولوجيات المفاعلات المتقدمة والابتكارية، بما يشمل المفاعلات النمطية الصغيرة وتطبيقاتها. وفي حين يُتوقع أن تستأثر المفاعلات المتقدمة المبردة بالماء من الحجم الكبير بالقسط الأكبر من التوسع في القدرة النووية على مدى العقود القادمة، فمن المتوقع أيضاً أن تؤدي المفاعلات النمطية الصغيرة دورا رئيسيا في المساعدة على إزالة الكربون من القطاعات التي يصعب إزالته منها، فضلا عن توفير الطاقة المنخفضة الكربون في الأسواق التي يمكن أن تحل فيها هذه المفاعلات محل محطات الوقود الأحفوري

ذات الحجم المماثل. 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.

5- وفي الوقت الراهن، ومن بين البلدان التي قررت سابقاً البدء مبكراً في التوقف تدريجياً 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[2]

### الحالة

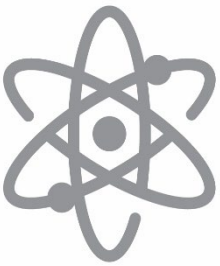
6- حتى كانون الأول/ديسمبر 2023، كانت القدرة التشغيلية العالمية على توليد القوى النووية تبلغ 371,5 غيغاواطاً (كهربائياً) يوفرها 413 مفاعلاً في 31 بلداً. وخلال عام 2023، كان ثمة عدد من المفاعلات بإمكانه توليد قدرة إضافية مرخصة للتشغيل تبلغ 21,3 غيغاواطاً (كهربائياً) (25 مفاعلاً) قيد وقف التشغيل المؤقت. ويشمل ذلك 4 مفاعلات في الهند يبلغ صافي قدرتها الإجمالية 639 ميغاواطاً (كهربائياً) و21 مفاعلاً في اليابان يبلغ صافي قدرتها الإجمالية 633 20 ميغاواطاً (كهربائياً). كما أُعِيدَ تشغيل مفاعلين اثنين في اليابان (تاكاهاما-1 وتاكاهاما-2) بعد أن كانا قيد وقف التشغيل المؤقت منذ عام 2011.

7- وفي عام 2023، كان هنالك 418 مفاعل قيد التشغيل بقدرة إجمالية تبلغ 377,6 غيغاواطاً (كهربائياً)، ولكن لم تُبلِغ الوكالةَ عن إنتاجها من الكهرباء سوى 403 مفاعلات بقدرة إنتاج مشتركة تبلغ 364,48 غيغاواطاً (كهربائياً). وقد أُبلِغَ في عام 2023 بإنتاج إجمالي قدره 515,2 2 تيراواط–ساعة، وهو ما يمثل زيادة طفيفة بنسبة قدرها 1% مقارنة بعام 2022.[3] وتصدَّرت قائمة أكبر ثلاثة منتجين للكهرباء الولاياتُ المتحدة الأمريكية صاحبة أكبر أسطول في العالم، حيث أبلغت توليدها ما نسبته 30% (742,4 تيراواط-ساعة) من إجمالي الكهرباء المنتجة المبلغ عنها، تلتها في ذلك الصين التي أبلغت توليدها ما نسبته 16% (406,5 تيراواط-ساعة) من هذا الإجمالي والتي تُواصِلُ منذ 4 أعوام توليد قدر أكبر من الكهرباء النووية مقارنة بفرنسا، ثم فرنسا التي

[2] مصدر البيانات: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة (نظام PRIS) (www.iaea.org/pris) وفقاً للبيانات التي قدمتها الدول الأعضاء حتى نهاية تشرين الثاني/نوفمبر 2023.

[3] لا يشمل إجمالي إنتاج الكهرباء وحدات المفاعلات الأوكرانية لأن البيانات التشغيلية الخاصة بعام 2023 لم تُقدَّم حتى موعد نشر هذا التقرير.

أبلغت توليدها ما نسبته 16% (323,8 تيراواط-ساعة) من هذا الإجمالي.



في نهاية عام 2023، كانت القدرة التشغيلية العالمية على توليد القوى النووية تبلغ ما مجموعه

**377,6** غيغاواطاً (كهربائياً)

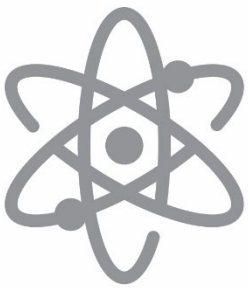
تولّدها

**418** من المفاعلات العاملة

في **31** بلداً

8- وفي عام 2023، وُصِّلَت بالشبكة الكهربائية في خمس دول أعضاء مختلفة خمسة مفاعلات تعمل بالماء المضغوط بقدرة إجمالية تبلغ 5 غيغاواطات (كهربائية). حيث وُصِّل بالشبكة الكهربائية في الصين في 10 كانون الثاني/يناير المفاعل Fangchenggang-3 وهو المفاعل الأول من أصل مفاعلين إيضاحيين اثنين من طراز Hualong One (HPR1000) يجري تشييدهما في موقع Fangchenggang. وفي سلوفاكيا، وُصِّلَ بالشبكة الكهربائية في 31 كانون الثاني/يناير المفاعل Mochovce-3 وهو مفاعل مبرد ومهدأ بالماء من طراز V-213 يبلغ صافي قدرته الكهربائية 440 ميغاواطاً (كهربائياً). وفي الولايات المتحدة الأمريكية، وُصِّلَ بالشبكة الكهربائية في 31 آذار/مارس المفاعل Vogtle-3، وهو مفاعل من طراز AP1000 (يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1117 ميغاواطاً (كهربائياً)). وفي بيلاروس، وُصِّلَ بالشبكة الكهربائية في 13 أيار/مايو المفاعل Belarusian-2، وهو مفاعل مبرد ومهدأ بالماء من طراز V-491 (يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1100 ميغاواط (كهربائي)). وفي جمهورية كوريا، وُصِّلَ بالشبكة الكهربائية في 21 كانون الأول/ديسمبر المفاعل Shin-Hanul-2، وهو مفاعل من طراز APR-1400 (يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1340 ميغاواطاً (كهربائياً)). وخلال عام 2023، بدأ التشغيل التجاري بالنسبة إلى جميع هذه المفاعلات باستثناء مفاعلي Mochovce-3 وShin-Hanul-2.

9- وفي نهاية عام 2023، كان مجموع قدرة المفاعلات قيد التشييد (وعددها 59 مفاعلاً) في 17 بلداً يبلغ 61,1 غيغاواطاً (كهربائياً). وخلال العام، بدأت أعمال التشييد فيما يتعلق بستة من مفاعلات القوى النووية التي تعمل بالماء المضغوط، في الصين وفي مصر، بقدرة إجمالية تبلغ 6,8 غيغاواطات (كهربائية). وفي الصين، بدأت في عام 2023 أعمال تشييد أربعة مفاعلات من طراز CAP1000 – المفاعل Haiyang-4 (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1161 ميغاواطاً (كهربائياً))، والمفاعل Lianjiang-1 (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1224 ميغاواطاً (كهربائياً))، والمفاعل Sanmen-4 (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1163 ميغاواطاً (كهربائياً))، والمفاعل Xudabu-1 (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1000 ميغاواط (كهربائي))، بالإضافة إلى وحدة مفاعل من طراز HPR1000 هو Lufeng-6 (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1116 ميغاواطاً (كهربائياً)). وفي مصر، بدأت في 3 أيار/مايو أعمال تشييد وحدة الضبعة 3 التي تتضمن مفاعلاً مبرداً و ومهدأ بالماء من طراز VVER-1200 (يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1200 ميغاواط (كهربائي)).



في نهاية عام 2023، كان مجموع قدرة المفاعلات قيد التشييد وعددها

59 مفاعلاً

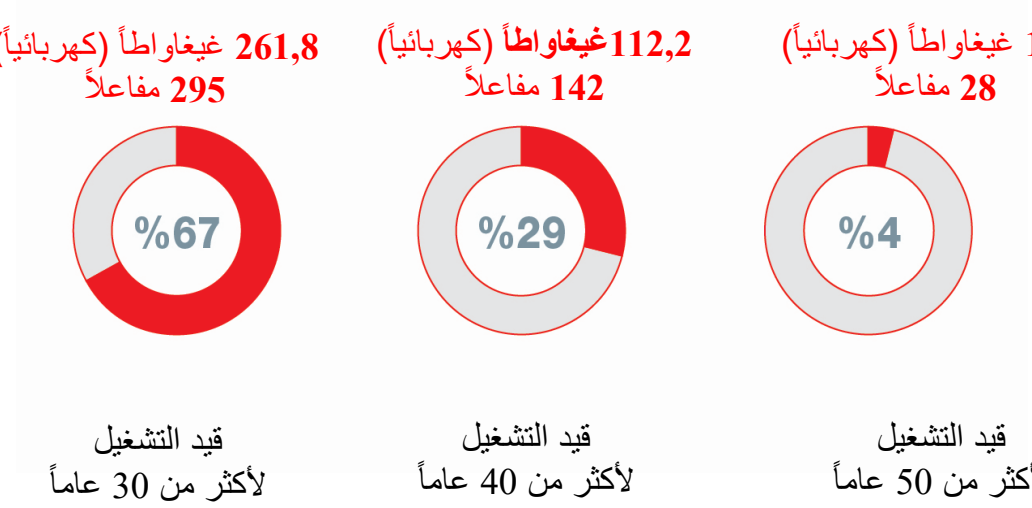
في 17 بلداً

يبلغ

61,1 غيغاواطاً (كهربائياً)

10- ومن مجمل القدرة التشغيلية التي توفرها المفاعلات العاملة حول العالم، هناك نسبة قدرها نحو 67٪ (261,8 غيغاواطاً (كهربائياً) من 295 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي على 30 عاماً، ونسبة تفوق 29٪ (112,2غيغاواطات (كهربائية) من 142 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي على 40 عاماً، ونسبة قدرها 4٪ (17,5 غيغاواطاً (كهربائياً) من 28 مفاعلاً) توفرها مفاعلات يزيد عمرها التشغيلي

على 50 عاماً. وهذا التقدم الذي يشهده أسطول المفاعلات العاملة يبرز الحاجة إلى إنشاء قدرة تشغيلية على توليد القوى النووية جديدة أو الارتقاء بالقدرة 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 التقدم في عدد متزايد من المفاعلات لضمان التشغيل المستدام والانتقال السلس إلى مستويات القدرة الجديدة.




11- وحتى مع تقادم 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. وفي عام 2023، بلغ متوسط مُعامل القدرة العالمي 87,74%. وكانت مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط المفاعلات الأفضل أداء منذ عام 2013، بمتوسط مُعامل قدرة عالمي بلغ 89,3% و82,7% على التوالي.

12- وعلى مدى عام 2023، تم إيقاف تشغيل عدد من المفاعلات بشكل دائم (5 مفاعلات) مما أسفر عن فقدان 6 غيغاواطات (كهربائية) من القدرة النووية. ففي بلجيكا، تم في 1 شباط/فبراير إيقاف تشغيل المفاعل Tihange-2 (وهو مفاعل ماء مضغوط يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1008 ميغاواطات (كهربائية))، وأعقب ذلك إيقاف تشغيل المفاعل Kuosheng-2 (وهو مفاعل ماء مغلي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 985 ميغاواطاً (كهربائياً)) في تايوان بالصين في 14 آذار/مارس. أما آخر ثلاثة مفاعلات عاملة في ألمانيا – وهي مفاعل Emsland (مفاعل ماء مضغوط يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1335 ميغاواطاً (كهربائياً))، ومفاعل Isar-2 (مفاعل ماء مضغوط يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1410 ميغاواطات (كهربائية))، ومفاعل Neckarwestheim-2 (مفاعل ماء مضغوط يبلغ صافي قدرته الكهربائية 1310 ميغاواطات (كهربائية)) فقد تم إيقاف تشغيلها في 15 نيسان/أبريل وذلك بعد اثني عشر عاماً من بدء هذا البلد تنفيذ سياسته المتعلقة بالتوقف تدريجياً عن استخدام القوى النووية.

**الاتجاهات**

13- في نهاية عام 2023، بلغت الخبرة التشـــغيلية التراكمية على مســـتوى العالم على مدار 69 عاماً أكثر من 19751 من ســـنوات تشـــغيل المفاعلات، من 647 مفاعلاً بقدرة إجمالية بلغت 497,9 غيغاواطاً (كهربائياً) في 35 بلداً. وظلَّت الزيادة في القدرة على توليد القوى النووية عند مســتوى ثابت على مدى العقد الماضـــي، مع توصيل قدرة نووية إضافية تبلغ 69,8 غيغاواطاً (كهربائياً) بالشبكة الكهربائية وذلك منذ بداية عام 2013. وجاء أكثر من 79% من هذه الزيادة في القدرة في آسيا، التي شـهدت خلال الفترة نفسـها توصـيل 54 مفاعلاً بالشـبكة الكهربائية بقدرة إجمالية تبلغ 55,4 غيغاواطاً (كهربائياً) .وتتبوأ الصـــين مكان الصـــدارة فيما يخص معدل النمو في المنطقة، حيث أنها وصـلت قدرة نووية جديدة تبلغ 40,02 غيغاواطاً (كهربائياً) بالشـبكة الكهربائية وذلك منذ بداية عام 2013.

## ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسعة

**الحالة**

14- وهنـاك حـاليـا نحو 50 من البلدان المهتمـة بـإضـــــافـة القوى النوويـة إلى مزيج الطـاقـة لـديهـا دعمـاً للتنميـة الاقتصـــــادية والاجتماعية على المســـتوى الوطني. ومن بين هذه البلدان، هناك 27 بلداً في مراحل مختلفة من استهلال وتنفيذ برنامجه الوطني للقوى النووية.

15- وهنالك سبعة عشرة بلداً في مرحلة اتخاذ القرار – وهي البلدان التي تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية لكنها لم تتخذ قراراً بعدُ (إثيوبيا، وإندونيســـيا، وإســـتونيا، وأوغندا، وتايلند، وتونس، والجزائر، وزامبيا، وســـري لانكا، والسلفادور، والسنغال، والسودان، والفلبين، وكازاخستان، والمغرب، ومنغوليا، والنيجر). وقد أجرت معظم هذه البلدان بالفعل دراســـات جدوى تمهيدية لإطلاع صـــناع القرار على فوائد القوى النووية وكذلك الاحتياجات والمتطلبات اللازمة لنجاح برامج القوى النووية. وهناك بلدان أخرى اســـتهلت برنامجها بالفعل وتعمل الآن على إنشاء آليات تنسيق وطنية ووضع خرائط طريق للبرنامج.

16- وهنالك عشـرة بلدان في مرحلة ما بعد اتِّخاذ القرار – وهي البلدان التي اتخذت قرارها وتعمل على تشـييد البنية الأسـاسـية، أو وقعت عقداً وستشـرع في التشـييد في المستقبل القريب أو شـرعت فيه بالفعل. ومن بين هذه البلدان، بدأت بنغلاديش وتركيا ومصـــر بالفعل في تشـــييد أولى محطات القوى النووية لديها. واختارت بولندا التكنولوجيا التي ســـتأخذ بها ووقعت عقدا مع البائع. وكان كلٌّ من الأردن وأوزبكســـتان وغانا وكينيا والمملكة العربية السعودية ونيجيريا بصدد العمل على إعداد أو تقييم العطاءات الخاصة بأول محطة للقوى للنووية.

17- وفي بنغلاديش وتركيا، تم تسليم الوقود النووي الطازج الخاص بالوحدة الأولى في كل بلد إلى الموقع في تشرين الأول/أكتوبر 2023 ونيسان/أبريل 2023، على التوالي، مع التخطيط لبدء التشغيل التجاري للوحدة الأولى في أواخر عام 2024 في بنغلاديش وفي أوائل عام 2025 في تركيا. وبدأ صب الخرسانة لتشييد وحدة الضبعة 3 (التي تتضمن مفاعلاً مبرداً ومهدأ بالماء من طراز VVER-1200) في مصر في أيار/مايو 2023. وأصدرت هيئة الرقابة النووية والإشعاعية المصرية رخصة تشييد وحدة الضبعة في 4 في آب/أغسطس 2023، وتتواصل عمليات تجهيز الموقع لبدء التشييد. وفي بولندا، انتهت عملية اختيار التكنولوجيا والبائع لتشييد مفاعلات ماء مضغوط لتوفير قدرة نووية إجمالية مركبة بين 6000 و9000 ميغاواط (كهربائي) بحلول عام 2042. وفي المملكة العربية السعودية، يُتوقع الانتهاء من اختيار الجهة البائعة لتكنولوجيا محطة القوى النووية في عام 2025، على أن تدخل الوحدة الأولى في الخدمة في عام 2036.

18- وفي نهاية عام 2023، كان مجموع قدرة المفاعلات قيد التشييد (وعددها 59 مفاعلاً) في 17 بلداً يبلغ 61,1 غيغاواطاً (كهربائياً)، بما في ذلك 6 مفاعلات بقدرة إجمالية تبلغ 6,7 غيغاواطات (كهربائية) بدأت أعمال تشييدها خلال عام 2023. كما استهلت الصين أعمال تشييد أربعة مفاعلات من طراز CAP1000 (مفاعل Haiyang-4، ومفاعل Lianjiang-1، ومفاعل Sanmen-4، ومفاعل Xudabu-1) وكذلك أعمال تشييد الوحدة 6 التي تتضمن مفاعلا من طراز HPR1000 وذلك في محطة Lufeng للقوى النووية بقدرة إجمالية تبلغ 5,7 غيغاواطات (كهربائية). وفي هنغاريا، تجري الأعمال التحضيرية لمشروع باكس-2 لتشييد مفاعلين مبردين ومهدأين بالماء من طراز V-527. ومن المقرر صب الخرسانة لتشييد المفاعل Paks-5 في نهاية عام 2024.

*الشكل- ألف- 1- التقى المدير العام رافائيل ماريانو غروسي معالي الوزير يافيش عثمان، وزير العلوم والتكنولوجيا في بنغلاديش، في اجتماع ثنائي عُقد على هامش دورة المؤتمر العام العادية السابعة والستين في فيينا، في 25 أيلول/سبتمبر 2023.*
*(المصدر: الوكالة)*

19- ويخطط الأردن لإصدار مواصفات تقديم العطاءات لمشروع مفاعل نمطي صغير لإنتاج الكهرباء وتحلية مياه البحر في عام 2026. ووسعت غانا نطاق اختيارها لتكنولوجيات المفاعلات ليشمل المفاعلات النمطية الصغيرة، وتعمل حاليا على استعراض الاقتراحات المقدمة من خمس جهات بائعة محتملة لإنشاء قرابة 1000 ميغاواط (كهربائي). ويُخطط لأن يكون الإدخال في الخدمة في عام 2029. وأعلنت كينيا أنَّها تنظر في تشييد مفاعل بحوث وكذلك مفاعلات نمطية صغيرة ومحطات 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.

20- ولا تنظر إستونيا إلا في تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة لأغراض برنامجها للقوى النووية. وأُوفدت في تشرين الأول/أكتوبر 2023 بعثة في إطار المرحلة 1 من خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية (خدمة INIR) لاستعراض حالة البنية الأساسية. وخلصت البعثة إلى أن إستونيا قد أجرت تقييما شاملا لاحتياجاتها من البنية الأساسية للقوى النووية بحيث تتمكن الحكومة من اتخاذ قرار بشأن إطلاق برنامج للقوى النووية من عدمه. وخلال البعثة، زار خبراء الوكالة غرفة الإعلام العام في شركة Fermi Energia في كوندا، والتي أُنشئت بهدف التواصل مع المجتمع المحلي في أحد المواقع المحتملة (الشكل ألف-2). ومن المتوقع أن يصدر في عام 2024 قرار من الحكومة بشأن ما إذا كانت ستمضي قدما في إنشاء البرنامج.

*الشكل- ألف-2- غرفة الإعلام العام في مقر شركة Fermi Energia في كوندا باستونيا، والتي تُستخدم لتعريف عموم الجمهور بإمكانات الطاقة النووية. تشرين الأول/أكتوبر 2023. (المصدر: الوكالة)*

21- واختارت كازاخستان موقعا لتشييد محطة القوى النووية الأولى لديها وأعلنت أنها ستجري استفتاء في عام 2024 لاتخاذ قرار بشأن المضي قدما في تشييدها. واستضافت كازاخستان أيضا في آذار/مارس 2023 بعثة متابعة في إطار المرحلة 1 من خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية (خدمة INIR) التابعة للوكالة.

**الاتجاهات**

22- وبحلول 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 31 بلداً. وتتطلب هذه الزيادة الكبيرة مواصلة تعزيز جاهزية البنية الأساسية لدى تلك البلدان بدعم من الوكالة لضمان النشر المسؤول. وتتقدم أيضاً جهود اتخاذ القرارات أو تنفيذ المشاريع المتعلقة بتشييد محطات جديدة للقوى النووية في العديد من البلدان المتوسعة مثل الأرجنتين وأرمينيا وباكستان وبلغاريا والجمهورية التشيكية وجمهورية إيران الإسلامية ورومانيا وسلوفاكيا وهنغاريا. كما أنّ قطاع الصناعة النووية في عدة دول أعضاء يدعمُ تجدد الاهتمام بالطاقة النووية في جميع أنحاء العالم ويعملُ على تنمية المزيد من القدرات لإنتاج مكونات جديدة.

23- 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 عدد من البلدان التي أخذت المفاعلات النمطية الصغيرة في الحسبان عند النظر في

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 حالياً 31 بلداً.

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.

24- وفي الوقت نفسه، تواصل الدول الأعضاء التي شرعت في إنشاء برامجها للقوى النووية بالاستناد إلى محطات قوى نووية تطوُّرية إبداء اهتمامها بتكنولوجيات محطات القوى النووية الكبيرة الحجم.

25- وبصرف النظر عما إذا كان برنامج القوى النووية قائماً على محطات القوى النووية الكبيرة الحجم أو المفاعلات النمطية الصغيرة، فإنَّ البنية الأساسية للقوى النووية على الصعيد الوطني، بما يشمل متطلبات الأمان النووي والأمن النووي والضمانات، تظلُّ لازمة وينبغي إرساؤها على النحو المناسب. ولا تزال الدول الأعضاء تفيد باعتزامها استخدام التصاميم المرجعية في التشغيل والاستفادة من الخبرات التي اكتسبتها الهيئات الرقابية والجهات المشغلة في بلد المنشأ.

## ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية

### الحالة

26- يرجع التركيز العالمي على تطوير تكنولوجيات القوى النووية إلى الحاجة إلى التعجيل بنشر المفاعلات المتقدمة، بما في ذلك المفاعلات النمطية الصغيرة. ويتجاوز هذا التركيز توليد الكهرباء ليشمل التطبيقات غير الكهربائية، مثل تدفئة الأحياء السكنية وإنتاج الهيدروجين وتحلية المياه. وهناك اهتمام متزايد من جانب الجهات المعنية غير التقليدية بالاستفادة من القوى النووية في إزالة الكربون من الأنشطة الصناعية التي تتسم بكثافة استهلاك الطاقة. ويتجسد التطور الدينامي للتكنولوجيا النووية في جهود استكشاف التطبيقات الابتكارية، مثل استخدام محطات القوى النووية العائمة لأغراض التوليد المشترك، وتشييد المفاعلات المتناهية الصغر في المناطق النائية، واستغلال الحلول النووية في تطبيقات في الفضاء الخارجي. وتكتسب المفاعلات المتقدمة زخماً بفضل قدرتها على توفير المرونة للشبكات الكهربائية مع تصاعد الأخذ بمصادر الطاقة المتجددة المتقطعة. وبالإضافة إلى ذلك، بدأت الصناعة النووية تأخذ بالذكاء الاصطناعي، لا سيما تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق، لإحداث ثورة في نظم التشغيل والصيانة بالاستعانة بقدرات الحوسبة المتطورة وأدوات تحليل البيانات.

27- وتتطور تكنولوجيا القوى النووية مع التركيز بوجه خاص على تطوير المفاعلات المتقدمة وتوسيع نطاق تطبيقاتها. ومن خلال جهود البحث والابتكار المتواصلة، تبرز القوى النووية بوصفها عنصرا رئيسيا في تلبية احتياجات الطاقة العالمية مع التخفيف في الوقت نفسه من انبعاثات الكربون. وتُعدُّ المساعي الرامية إلى إدماج القوى النووية في القطاعات غير الكهربائية مثالا للنهج الاستراتيجي الذي يهدف إلى تحقيق أقصى استفادة ممكنة من الفوائد المتنوعة التي يمكن أن تأتي بها التكنولوجيا النووية في مختلف جوانب مشهد الطاقة العالمي. ويؤدي هذا التطور الاستراتيجي إلى جعل القوى النووية عاملا حاسم الأهمية في المساهمة في تحقيق مستقبل قائم على الطاقة المستدامة المنخفضة الكربون.

**الاتجاهات**

28- ظلَّت المفاعلات المبردة بالماء هي التكنولوجيا السائدة في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وتشمل الاتجاهات الحالية تعزيز سمات الأمان في المفاعلات المبردة بالماء، مثل استخدام نظم التبريد الخاملة لتعزيز الموثوقية العامة للنظم، وتحسين تصاميم الوقود لزيادة كفاءة الوقود وتقليل النفايات.

29- ولا تزال المفاعلات النمطية الصغيرة محل دراسة جادة على الصعيد العالمي، نظرا لصغر حجمها وإمكانية نشرها في المناطق النائية أو المناطق التي تعوزها البنية الأساسية للشبكات الكهربائية. ويركز الاتجاه الحالي في تطوير المفاعلات النمطية الصغيرة على تحسين الجوانب الاقتصادية وسمات الأمان والقابلية للتوسع.

30- وفيما يتعلق بالاتجاهات السائدة في تطوير تكنولوجيا المفاعلات السريعة، ينصب التركيز على تحسين تدابير الأمان عن طريق إدماج نظم خاملة للإغلاق واستكشاف أنواع مختلفة من المبردات، لا سيما في سياق تصاميم المفاعلات الابتكارية. وهناك أيضا تركيز قوي على تحسين اقتصاديات المفاعلات السريعة من أجل خفض تكاليف التشييد وزيادة كفاءة استهلاك الوقود.

31- وهناك اهتمام متزايد باستخدام تطبيقات الحرارة النووية لأغراض مثل تشغيل محطات تحلية المياه لمعالجة مشاكل ندرة المياه في العديد من المناطق؛ وإنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي المرتفع الحرارة؛ أو في الصناعات التي تتطلب درجات حرارة مرتفعة، مثل قطاع الصناعات الكيميائية وقطاع التصنيع.

**ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبردة بالماء**

**الحالة**

32- تستأثر المفاعلات المبردة بالماء بنسبة تزيد على 95٪ من محطات القوى النووية التجارية العاملة في العالم. وتتمتع هذه المفاعلات بسجل تشغيل حافل وناجح، ومن ثم تقدِّم مساهمة كبيرة في تلبية احتياجات الطاقة العالمية. وتُستخدم المفاعلات المبردة بالماء على نطاق واسع لتوليد الطاقة نظرا لموثوقيتها وكفاءتها. وتتطور الصناعة النووية بصورة مستمرة، مع تواصل جهود البحث والتطوير بشأن التصاميم المتقدمة وتحسينات الأمان والتكنولوجيات البديلة مثل نظم الطاقة المختلطة (التي تجمع بين مصادر الطاقة المتجددة والقوى النووية) لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة والتصدي للتحديات المناخية. ويؤدي التقدم في علوم المواد والنمذجة الحاسوبية وهندسة الأمان إلى إدخال تحسينات على تكنولوجيات المفاعلات المتقدمة المبردة بالماء. ويشمل ذلك الأخذ بسمات ونظم الأمان الخاملة، وتحسين تكنولوجيات الوقود، وزيادة كفاءة أساليب التبريد، والتقليل من النفايات المشعة، وتعزيز مقاومة الانتشار. وعلى سبيل المثال، فهناك تصاميم متقدمة لمفاعلات تعمل بالماء المضغوط قيد التشغيل و/أو قيد الإنشاء بالفعل في عدة بلدان، مثل المفاعلات من طرازات AP1000 وAPR1400 وEPR وHPR1000 وVVER1200. وبدأ في شباط/فبراير 2023 التشغيل التجاري لثالث وحدة مفاعل من طراز APR1400 في موقع براكة في الإمارات العربية المتحدة. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأ التشغيل التجاري لمفاعل من طراز AP1000 في تموز/يوليه 2023 في الوحدة 3 من محطة فوغتل. وفي تشرين الثاني/نوفمبر 2023، بدأ التشغيل التجاري بالنسبة إلى وحدة القوى 2 من محطة بيلاروس للقوى النووية. وفي الاتحاد الروسي، يجري العمل على تطوير مفاعل مبرد ومهدأ بالماء من طراز VVER-S قادر على التعديل الطيفي. وتتركز الجهود الجارية في بلدان متعددة على مواصلة تطوير مفاهيم المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج، بما يشمل استكشاف إمكانية وضع تصاميم أصغر حجما لاستخدامها في تطبيقات متنوعة وتحسين المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج وصولاً للمستوى الأمثل حتى تعمل بفعالية في النظم القائمة على أطياف النيوترونات

المختلطة. ويتواصل إجراء دراسات الحالة الوطنية بشأن التحليل التقني والاقتصادي للنظم المختلطة التي تجمع بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة – لا سيما الجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وهما مصدران متقطعان للطاقة مع محطات القوى النووية المتقدمة – من أجل توفير الأحمال الكهربائية الأساسية، وتعزيز استقرار الشبكات، واستخدام الحرارة النووية في التطبيقات غير الكهربائية.

*الشكل- ألف- 3- الوحدة 3 في محطة فوغتل لتوليد الكهرباء في ولاية جورجيا بالولايات المتحدة الأمريكية، بعد اكتمال تشييدها. (المصدر: شركة Southern Nuclear)*

**الاتجاهات**

33- يوجد قيد التشييد 55 وحدة من مفاعلات الماء المضغوط في 17 دولة عضوا، منها 50 وحدة من مفاعلات الماء المضغوط التطورية المتقدمة (أنواع تصاميم مختلفة لوحدات من طراز ACP (1)، وطراز AP1000 (1)، وطراز APR-1400 (3)، وطراز CAP1000 (6)، وطراز CAREM (1)، وطراز EPR (3)، وطراز HPR1000 (11)، وطراز PRE KONVOI (1)، وطراز VVER (23))، ووحدتان اثنتان من مفاعلات الماء المغلي المتقدّمة، و3 وحدات من مفاعلات الماء الثقيل المضغوط. وتحتوي تصاميم هذه المفاعلات على سمات أمان محسنة لمواجهة الحوادث العنيفة وتكفل أداء أفضل على صعيد الاقتصاد في استهلاك الوقود. وتتفاوت قدرة هذه الوحدات بين 25 ميغاواط (كهربائي) و1630 ميغاواط (كهربائي) لكل وحدة. وتقع معظم هذه المفاعلات في مواقع تجمع بين أكثر من مفاعل في موقع واحد.

34- وفي سبيل التصدي لتحديات تغير المناخ وتلبية الطلب على الطاقة، يعمل العديد من البلدان المشغلة للقوى النووية على تمديد العمر التشغيلي للمحطات لفترات تتجاوز إلى أقصى حد ممكن العمر المتوقع وقت إنشاء هذه المحطات والبالغ 40 عاماً، مع التركيز على تحديث المحطات وتحسين المكونات والمعدات الرئيسية.

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

**الحالة**

35- في نهاية عام 2023، كان يوجد قيد التشغيل اثنتان من محطات القوى النووية الإيضاحية القائمة على

المفاعلات النمطية الصغيرة. وجرت عملية إعادة التزويد بالوقود للمرة الأولى في محطة أكاديميك لومونوسوف العائمة للقوى النووية في الاتحاد الروسي، والتي تحتوي على مفاعلين من طراز KLT-40S قدرة كل منهما 35 ميغاواطا (كهربائيا). ويجري تشغيل محطة القوى النووية العائمة تجاريا منذ أيار/مايو 2020، لتوفير الحرارة والكهرباء لبلدة بيفيك في منطقة تشوكوتكا. وفي الصين، وفيما يتعلق بالمحطة الإيضاحية القائمة على المفاعلات النمطية المرتفعة الحرارة الحصوية القاع في موقع شيداوان، فقد بدأ في 6 كانون الأول/ديسمبر 2023 تشغيل المحطة تجاريا بقدرتها الكاملة البالغة 200 ميغاواط (كهربائي) والمستمدة من مفاعلين. وفي عام 2023، كانت هناك ثلاث محطات قوى قائمة على مفاعلات نمطية صغيرة في مراحل مختلفة من عملية التشييد. ففي الأرجنتين، حُدِّد عام 2028 موعدا مستهدفا جديد لتوصيل المفاعل CAREM-25 بالشبكة الكهربائية بعد الانتهاء من تشييده. ولا تزال المحطة الإيضاحية ACP100 في تشانغجيانغ بمقاطعة هاينان في الصين قيد التشييد منذ تموز/يوليه 2021. وتم تركيب قلب المفاعل في آب/أغسطس 2023. وتقوم المحطة على وحدة متعددة الأغراض تعمل بالماء المضغوط، يُشار إليها باسم Linglong One، وستولد 125 ميغاواطا (كهربائيا) بحلول عام 2027. وحصل التصميم RITM-200N على رخصة لاستخدام موقع في منطقة أوست يانسكي في ياكوتيا بالاتحاد الروسي، ومن المتوقع أن تولِّد الوحدة المستندة إلى هذا التصميم 55 ميغاواطاً (كهربائياً) من الكهرباء بحلول عام 2028. وبدأ تصنيع قوالب شكلية من مختلف أنساق المفاعلات من طراز RITM-200C - و بحلول عام 2027، ستُشيَّدُ في منطقة تشوكوتكا بالاتحاد الروسي محطة قوى نووية عائمة قائمة على مفاعل من هذا الطراز.

**تطوير التصاميم والترخيص للنشر في الأمد القريب**

36- في كندا، من المقرر أن يبدأ في عام 2025 في موقع دارلينغتون تشييد المفاعل BWRX-300 القائم على الدوران الطبيعي، والذي يُتوقع توصيله بالشبكة بحلول نهاية عام 2028. ويُعتزم استخدام تصميم المفاعل النمطي المتناهي الصغر (MMR) في تطبيقات خارج الشبكة في تشوك ريفر بأونتاريو. ويخضع المفاعل ARC-100 لعملية استعراض التصميم المقدم من الجهة البائعة، كما أنّ إجراءات الترخيص المتعلقة بإعداد موقعٍ في هذا الصدد قيد الاستعراض. وسيُشيد أول مفاعل من طراز ARC-100 في موقع بوينت ليبرو في نيو برونزويك.

37- وفي الصين، بدأ في 6 كانون الأول/ديسمبر التشغيل التجاري للمحطة الإيضاحية HTR-PM (المحطة الإيضاحية القائمة على المفاعلات النمطية المرتفعة الحرارة الحصوية القاع المبردة بالغاز) في خليج شيداو بمقاطعة شاندونغ، وهي محطة القوى النووية الأولى من نوعها في العالم. ومشروع المحطة الإيضاحية HTR-PM هو جهد تعاوني تقوده من الناحية التقنية جامعة شينغوا بصفتها الجهة المسؤولة عن البحث والتطوير وتصميم المكونات والنظم الرئيسية، وتشارك فيه شركة China Huaneng Group بصفتها الجهة المالكة والمشغلة للمحطة، والمؤسسة الوطنية النووية الصينية (CNNC)، بصفتها الجهة المتعاقدة لتنفيذ أعمال الهندسة والشراء والبناء وأيضا الجهة المصنعة للوقود.

*الشكل ألف-4- المدير العام رافائيل ماريانو غروسي أثناء زيارة للمحطة الإيضاحية HTR-PM (المحطة الإيضاحية القائمة على المفاعلات النمطية المرتفعة الحرارة الحصوية القاع المبردة بالغاز) في خليج شيداو بمقاطعة شاندونغ في الصين. (المصدر: الهيئة الصينية للطاقة الذرية)*

38- وفي فرنسا، أنشأت هيئة كهرباء فرنسا (EDF) شركة فرعية تابعة بالكامل لمشروع NUWARD المصمم لتطوير وحدتين من وحدات مفاعلات الماء المضغوط تولدان ما مجموعه 340 ميغاواطاً (كهربائياً). وفي غضون ذلك، أدى إطلاق الدعوة لتقديم المشاريع في إطار برنامج "فرنسا 2030" إلى تعزيز الأنشطة المتعلقة بالمفاعلات النمطية المتقدمة. وفي عام 2023، تم اختيار ثمانية من مشاريع المفاعلات النمطية الصغيرة. وهي تستند إلى عدد من تكنولوجيات مفاعلات الجيل الرابع، بما في ذلك تكنولوجيات المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم، والمفاعلات السريعة المبردة بالرصاص، ومفاعلات الأملاح المصهورة، والمفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز. وفي أوروبا، نشرت ثلاث هيئات رقابية نووية تابعة للجمهورية التشيكية وفرنسا وفنلندا تقريرها بشأن المرحلة الأولى من الاستعراض المبكر المشترك بشأن تصميم NUWARD الفرنسي القائم على المفاعلات النمطية الصغيرة، ومن المقرر أن تنضم إلى المرحلة الثانية من هذا الاستعراض ثلاث هيئات رقابية نووية تابعة لبولندا والسويد ومملكة هولندا.

39- وفي إيطاليا، أطلقت وزارة البيئة وأمن الطاقة، في أيلول/سبتمبر 2023، المنصة الوطنية للطاقة النووية المستدامة، التي تجمع بين الجهات الإيطالية المعنية بالمجال النووي بهدف إعداد دراسة جدوى تمهيدية فيما يتعلق بإمكانية نشر الطاقة النووية في البلد، باستخدام تكنولوجيات المفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات النمطية المتقدمة والمفاعلات المتناهية الصغر كتكنولوجيات مرجعية.

40- وفي اليابان، يُعكَف على مناقشة ما يزيد على عشرة تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة من إعداد جهات

معنية من القطاع الخاص. أما مفاعل الاختبارات الهندسية العالي الحرارة (HTTR) التابع للوكالة اليابانية للطاقة الذرية، الذي تبلغ طاقته الحرارية 30 ميغاواطاً، فهو عامل ويستخدم لأغراض مشروع إيضاحي لإنتاج الهيدروجين.

41- ويوجد لدى جمهورية كوريا تصميمان بارزان للمفاعلات النمطية الصغيرة. ويُطلق على التصميم الأول اسم SMART، وهو مفاعل ماء مضغوط قادر على توليد 100 ميغاواط (كهربائي). وأُعلن عن شراكة جديدة مع كندا، مع اعتزام تقديم طلب رخصة لنشر مفاعل محتمل من طراز SMART في مختبرات تشوك ريفر في كندا. ويُطلق على التصميم الثاني اسم المفاعل النمطي الصغير الابتكاري (Innovative-SMR)، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل مصمم لتوليد 170 ميغاواطا (كهربائيا) يعكف على تطويره تحالف من عدة جهات وطنية.

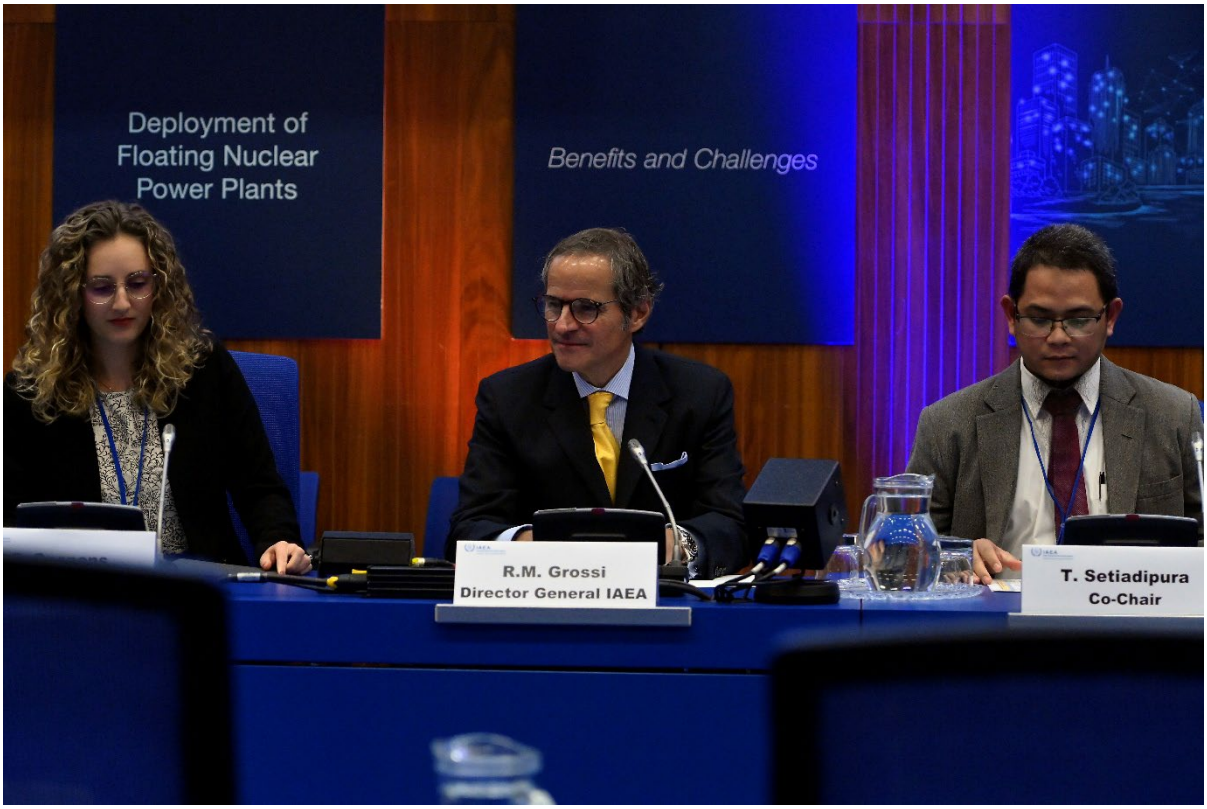
42- وفي الاتحاد الروسي، وُضع ما لا يقل عن 20 تصميما للمفاعلات النمطية الصغيرة من خطوط تكنولوجية مختلفة لمحطات القوى النووية البرية والبحرية على السواء ولأغراض توليد الكهرباء والتوليد المشترك. ووُقّع اتفاق لتشييد وحدة مفاعل من طراز SHELF-M بقدرة 10 ميغاواطات (كهربائية) لتوفير الكهرباء لعمليات التعدين في سوفينوي. وستبدأ أعمال تشييد المفاعل من طراز RITM-200N، وهو مفاعل نمطي صغير مبرد بالماء، في ياكوتيا في عام 2024. ويجري حاليًّا تطوير اثنين من مشاريع المفاعلات المبرَّدة بالماء لمحطات القوى المتوسطة الحجم التي تضم مفاعلات مبردة ومهدأة بالماء من طراز VVER-600 وVVER-C-600 وذلك لاستبدال المفاعلات المبردة والمهدأة بالماء من طراز VVER-440 المتقادمة الموجودة في موقع مفاعلات محطة كولا للقوى النووية. ويشتمل مشروع المفاعل المبرد ومهدأ بالماء من طراز VVER-C-600 على خاصية تعديل الطيف النيوتروني وذلك لأغراض معاوضة حرق الوقود بهدف إتاحة التشغيل ضمن دورة وقود نووي مغلقة.

43- وفي المملكة المتحدة، اختيرت خمسة تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة ومفاعلات نمطية متقدمة لمواصلة النظر فيها، على أن تُرسى العقود ذات الصلة في صيف عام 2024. ومن بين هذه التصاميم NUWARD، وBWRX-300، وARC-100، وVOYGR، وAP300. وقد بدأ الاستعراض الرقابي فيما يتعلق بالمفاعل النمطي الصغير من طراز Rolls-Royce SMR (الذي يبلغ صافي قدرته الكهربائية 470 ميغاواطاً كهربائياً)، وهو مفاعل ماء مضغوط من النوع الحلقي القياسي.

44- وهناك العديد من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة قيد التطوير في الولايات المتحدة الأمريكية. وقد انتقلت خدمات ترخيص وإيضاح تصميم المفاعل من طراز VOYGR الخاص بشركة NuScale، والذي يمكن أن يضم 6 وحدات تولد كل منها 77 ميغاواطاً (كهربائياً)، من أيداهو فولز إلى مستخدمين محتملين آخرين في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا، بما في ذلك رومانيا. وهناك تصميمان قائمان على تكنولوجيات مفاعلات الجيل الرابع، وهما التصميم Natrium الخاص بشركة TerraPower والقائم على المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم، والتصميم Xe-100 القائم على تكنولوجيا المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز. وتشمل التصاميم المتقدمة الأخرى تصميم المفاعل العالي الحرارة المبرد بأملاح الفلوريد الخاص بشركة Kairos Power، والمفاعل المتناهي الصغر eVinci، والمفاعل SMR-160 الخاص بشركة Holtec. ويُضطلع أيضاً بمشروع بعنوان تطبيقات المفاعلات المتناهية الصغر وبحوثها والتحقق منها وتقييمها (مشروع MARVEL).

**الاتجاهات**

45- على مدى عام 2023، أبدت الدول الأعضاء اهتماما متزايدا بمحطات القوى النووية والمفاعلات المتناهية الصغر، وبتطبيقات هذه المحطات والمفاعلات. وهناك جهود كبيرة جارية على المستويين الصناعي والرقابي من أجل تيسير تطوير التصاميم والتبكير بنشرها. وهناك آفاق تبشر بإمكانية النشر المبكر للتكنولوجيات الأكثر نضجا أو جاهزية، في حدود عام 2030. وشهد عام 2023 استمرار 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 يمكن أن تصل إلى 20 ميغاواطاً (كهربائي)، ومن المتوخى 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. وتشمل التكنولوجيات المعتمدة في المفاعلات المتناهية الصغير تكنولوجيات المفاعلات المرتفعة الحرارة والمفاعلات السريعة وأنابيب الحرارة.




*الشكل- ألف- 5- المدير العام رافائيل ماريانو غروسي في افتتاح الندوة الدولية بشأن نشر محطات القوى النووية العائمة — الفوائد والتحديات، والتي عُقدت في مقر الوكالة الرئيسي في فيينا في تشرين الثاني/نوفمبر 2023. (المصدر: الوكالة)*

46- وهناك بلدان أخرى تعمل حاليا على وضع تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة بحرية لاستخدامها في محطات القوى النووية العائمة لأغراض التطبيقات البرية والبحرية. وتعمل شركة ناشئة في مجال تصميم المفاعلات في الدانمرك على تطوير مفاعلات الأملاح المصهورة الصغير الحجم لإنتاج 100 ميغاواط (كهربائي). وتواصل جمهورية كوريا تطوير الوحدة BANDI-60، وهي وحدة عائمة لتوليد القوى قائمة على مفاعل ماء مضغوط

للتوليد بقدرة 60 ميغاواطاً (كهربائياً). واعتمد الاتحاد الروسي التصميم RITM-200M لمحطات القوى النووية العائمة في المستقبل. وتستهدف محطات القوى النووية العائمة القائمة على مفاعلات نمطية صغيرة أسواقاً ذات طابع خاص، بما يشمل توليد الكهرباء لامركزياً وتوفير إمدادات الحرارة للمجتمعات المحلية النائية، وتحلية مياه البحر، ونظم الطاقة المختلطة بالتعاون مع قطاعي الصناعة البحرية وبناء السفن. ويجري العمل على تحليل وتقييم الجوانب القانونية و التنظيمية والمؤسسية لمفاهيم هذه المفاعلات النمطية الصغيرة المحمولة بهدف تيسير نشرها.

47- وفي هذا السياق السريع التطور، تعمل منصة الوكالة المعنية بالمفاعلات النمطية الصغيرة وتطبيقاتها، والتي أنشأها المدير العام في عام 2021، على تنسيق أنشطة الوكالة في مجال المفاعلات النمطية الصغيرة، وتقوم بدور جهة الاتصال التي تخاطبها الدول الأعضاء والجهات المعنية الأخرى لطلب المساعدة بشأن المسائل العامة المتعلقة بالمفاعلات النمطية الصغيرة وتطبيقاتها من خلال القنوات الرسمية، وبدور الآلية التي تستجيب من خلالها الوكالة لهذه الطلبات. ومن بين الجهود التعاونية الرئيسية المضطلع بها في عام 2023 من خلال آلية المنصة، تجدر الإشارة إلى بعثة الخبراء التي أجرت استعراضا لدراسة جدوى استخدام المفاعلات النمطية الصغيرة في تحلية مياه البحر في الأردن، والندوة الدولية بشأن محطات القوى النووية العائمة.

### ألف-4-3- المفاعلات السريعة

#### الحالة

48- حتى كانون الأول/ديسمبر 2023، كانت هناك خمسة مفاعلات سريعة مبردة بالصوديوم قيد التشغيل في ثلاث دول أعضاء، منها ثلاثة مفاعلات في الاتحاد الروسي ومفاعل واحد في الصين ومفاعل واحد في الهند. وفي عام 2023، تم تحميل المفاعل الروسي BN-800 بالكامل بوقود موكس، مما يمثل المرحلة الأولى من عملية إغلاق دورة الوقود النووي. ويجري في الهند حاليا إدخال النموذج الأولي للمفاعل السريع التوليد في الخدمة، وهو مفاعل تجريبي سريع مبرد بالصوديوم من الحجم الصناعي تبلغ قدرته 500 ميغاواط (كهربائي). ومن المتوقع توصيله بالشبكة في عام 2024. وتعمل الصين حاليا على تشييد وحدتين متطابقتين من المفاعل الإيضاحي CFR-600، وقد بدأ إدخال أولاهما في الخدمة بالفعل. وسيُعاد تشغيل المفاعل السريع التجريبي Joyo في عام 2026 بعد إدخال أعمال تحسين عليه. وتجتذب تكنولوجيا التبريد بالفلزات السائلة الثقيلة اهتماما متزايدا، لا سيما في مجال المفاعلات النمطية الصغيرة النيوترونية السريعة. ويعمل الاتحاد الروسي على تشييد مفاعل إيضاحي سريع مبرد بالرصاص بقدرة 300 ميغاواط (كهربائي)، باسم BREST-OD-300، في حين يجري العمل على تطوير عدة تصاميم للمفاعلات السريعة المبردة بالرصاص في الصين والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية وفي الاتحاد الأوروبي. ومن بين مفاهيم المفاعلات الابتكارية الستة التي وضعها المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات، هناك ثلاثة نظم نيوترونية سريعة، هي المفاعلات المبردة بالصوديوم وبفلز سائل ثقيل وبالهليوم. أما النوعان المتبقيان — أي المفاعلات المبردة بالأملاح المصهورة وبالماء فوق الحرج — فلديهما القدرة على العمل في أطياف النيوترونات السريعة أو المتوسطة على السواء.

*الشكل- ألف-6- شركة الوقود TVEL ترسل الوقود إلى الصين لتحميل الوقود في قلب أول مفاعل نيوتروني سريع من طراز CFR-600. (المصدر: شركة TVEL)*

**الاتجاهات**

49- يعتمد نشر النظم النيوترونية السريعة في الأجل المتوسط على المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم بوصفها الخيار الرئيسي. وبالإضافة إلى المفاعلات الثلاثة السريعة المبردة بالصوديوم العاملة في الاتحاد الروسي، يجري العمل على تطوير المفاعل الكبير الحجم BN-1200 الذي تبلغ قدرته 1200 ميغاواط (كهربائي) وعلى تشييد مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض. وتعمل الصين على تطوير مفاعل من الجيل الرابع باسم CFR-1000 تبلغ قدرته 1 غيغاواط (كهربائي). وتعمل شركة TerraPower التي يقع مقرها في الولايات المتحدة الأمريكية على تطوير مفاعل سريع مبرد بالصوديوم يحمل اسم Natrium ويترافق تشغيله مع الخزن في الأملاح المصهورة. وتكفل هذه التكنولوجيا المتقدمة قدرة قصوى تبلغ 500 ميغاواط (كهربائي)، مما يجعلها بديلا محتملا لمحطات توليد القوى التقليدية التي تعمل بالفحم، ويمكن الجمع بينها وبين مصادر أخرى متجددة. وتُنتظر موافقة الكونغرس في الولايات المتحدة على مشروع آخر لمفاعل سريع مبرد بالصوديوم، وهو المفاعل التجريبي المتعدد الاستخدامات. وفي فرنسا، ومن بين المشاريع الـ15 المقدمة في سياق الدعوة لتقديم المشاريع في إطار برنامج "فرنسا 2030"، تم في عام 2023 اختيار سبع شركات لتطوير مفاعلات نمطية صغيرة قائمة على النيوترونات السريعة. واستُهلّت استُهلَّ في عام 2023 أربعة مشاريع فرعية للمفاعلات النمطية الصغيرة القائمة على النيوترونات السريعة. وفي حين أن المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم لا تزال هي التكنولوجيا الأكثر نضجا، هناك العديد من البلدان التي تعمل على تشييد وتطوير المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص، مثل المفاعل BREST-300 الذي يجري تشييده حاليا في الاتحاد الروسي ويُتوقع إدخاله في الخدمة في عام 2028. ويجري العمل أيضا على تطوير المفاعل السريع المبرد بالرصاص التابع لشركة Westinghouse والمشترك بين المملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية بقدرة 450 ميغاواطا (كهربائيا)، والمفاعل الإيضاحي الأوروبي السريع المتقدم المبرد بالرصاص المشترك بين إيطاليا ورومانيا بقدرة 120 ميغاواطا (كهربائيا)، وعدة تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة سريعة مبردة بالرصاص في الصين وفي فرنسا. وهناك شركات ناشئة تعمل على تطوير

المفاعل SEALER الذي تبلغ قدرته 55 ميغاواطا (كهربائيا) في السويد، بالإضافة إلى مفاعل سريع مبرد بالرصاص من طراز LFR-AS-30 (بقدرة 30 ميغاواطاً (كهربائياً)) في فرنسا و مفاعل سريع مبرد بالرصاص من طراز LFR-AS-200 (بقدرة 200 ميغاواط (كهربائي)) في المملكة المتحدة، تجري أعمال البحث والتطوير بشأنه هو أيضاً في إيطاليا. وهناك تكنولوجيات أخرى للمفاعلات القائمة على طيف النيوترونات السريعة قيد التطوير في الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الأمريكية، مثل المفاعلات السريعة المبردة بالغاز والمفاعلات السريعة المبردة بالأملاح المصهورة.

### ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

#### الحالة

50- يُعدُّ استخدام الطاقة النووية في التطبيقات غير الكهربائية، بما في ذلك تدفئة الأحياء السكنية وتحلية المياه والإمداد المباشر بالحرارة لمختلف العمليات الصناعية، من التكنولوجيات التي أثبتت جدواها، حيث يُستخدم في هذه التطبيقات حاليا قرابة 70 مفاعلا عاملا في عدة دول أعضاء، في حين أن هناك العديد من الدول الأعضاء الأخرى التي تبدي اهتماما متزايدا بهذا الخيار.

51- وفي عام 2023، وفر 45 مفاعل قوى نووية في 10 دول أعضاء كمية من الحرارة تعادل 2046,0 غيغاواط-ساعة لاستخدامها في التطبيقات غير الكهربائية. واستُخدم معظم كمية الحرارة هذه (88%) لأغراض تدفئة الأحياء السكنية، بما مجموعه 1799,1 غيغاواط-ساعة، وذلك في بلغاريا، والجمهورية التشيكية، وروسيا، ورومانيا، وسلوفاكيا، وسويسرا، والصين، وهنغاريا. وفي سويسرا والهند، دُعِمت التدفئة الصناعية من خلال توفير كمية من الحرارة تُعادل 211,8 غيغاواط-ساعة (10%) في حين استُخدِمت كمية من الحرارة تُعادل 35,1 غيغاواط-ساعة (2%) للأغراض تحلية المياه.

52- واستهلت الصين مؤخرا برنامجا كبيرا لنشر التدفئة النووية للأحياء السكنية على نطاق واسع، لتنضم إلى مجموعة البلدان التي لديها بالفعل برامج قائمة، بما في ذلك الاتحاد الروسي وأوكرانيا وبلغاريا والجمهورية التشيكية ورومانيا وسلوفاكيا وسويسرا وهنغاريا. واستهلت الصين مشروع هونغيانهي في عام 2022، بعد أن أطلقت في عام 2021 مشروعا إيضاحيا لتدفئة الأحياء السكنية في محطة كينشان للقوى النووية في مقاطعة تشجيانغ. وبالإضافة إلى ذلك، فهناك بلدان أخرى لديها بالفعل شبكات واسعة لتدفئة الأحياء السكنية، مثل فنلندا وبولندا، تنظر في استخدام الحرارة النووية لتشغيل تلك الشبكات بالطاقة النووية العديمة الانبعاثات.

53- وتجتذب تحلية المياه بالاستعانة بالطاقة النووية اهتماما متزايدا في الدول الأعضاء، حيث يشهد استخدام تحلية المياه زيادة متسارعة في جميع أنحاء العالم، من أجل تمكين نسبة متزايدة من سكان العالم من تلبية احتياجاتهم الأساسية من المياه النظيفة. وتخطط الهند لتوسع كبير في قدراتها في مجال التحلية النووية، من خلال تركيب وحدتين من وحدات التقطير المتعدد التأثير تعملان بالحرارة النووية في كالباكام، بما يكفل معالجة 1000 متر مكعب في اليوم. وهناك بلدان آخران (اليابان والولايات الولايات المتحدة الأمريكية) يستخدمان الكهرباء المولدة نووياً لتشغيل وحدات التناضح الأسموزي العكسي لتحلية المياه، في حين تتمتع كازاخستان وباكستان بالخبرة في مجال التحلية النووية الحرارية، وتخطط الصين لتركيب وحدات للتناضح الأسموزي العكسي تعمل بالطاقة النووية.

54- وقد أعربت عدة دول أعضاء عن اهتمامها بإنتاج 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. وفي الولايات المتحدة الأمريكية تحديداً، بدأت محطة ناين مايل بوينت النووية في عام 2023 إنتاج الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي المنخفض الحرارة، لتنضم إلى محطة أوسكارشامن للقوى النووية في السويد، التي بدأت الإنتاج التجاري للهيدروجين في عام 2022. وبالإضافة إلى ذلك، فقد بلغ كل من المملكة المتحدة (محطة هيشام للقوى النووية) والولايات المتحدة الأمريكية (محطة بريري آيلاند للقوى النووية) مرحلة وضع المشاريع لربط محطات القوى النووية القائمة بمرافق للتحليل الكهربائي العالي الحرارة، ومن ثم استخدام البخار المستخرج من الدورة الثانوية في محطات القوى النووية لزيادة كفاءة إنتاج الهيدروجين. وفي الاتحاد الروسي، تجري هيئة روزإينيرغوأتوم "ROSENERGOATOM" تقييماً للأثر البيئي لمشروع تشييد مجمع تجريبي لإنتاج الهيدروجين في محطة كولا للقوى النووية. وهناك عدة مشاريع أخرى في مرحلة التطوير لربط مفاعلات نووية بمرافق للتحليل الكهربائي المنخفض الحرارة، بما في ذلك في الاتحاد الروسي وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية.

*الشكل- ألف-7- بدأ في عام 2023 التشغيل التجاري لإنتاج الهيدروجين نوويا في مركز ناين مايل بوينت للطاقة النظيفة.*
*(المصدر: شركة Constellation)*

**الاتجاهات**

55- من بين مصادر الطاقة المنخفضة الكربون، تنفرد الطاقة النووية بقدرتها على توفير كميات كبيرة من الحرارة والكهرباء على مدار الساعة وبلا قيود جغرافية، وبطريقة موثوقة تتيح توليد الطاقة عند الطلب. ويؤدي هذا المزيج الفريد من المزايا إلى زيادة الاهتمام بإمكانات الاستفادة من الطاقة النووية في المساعدة على إزالة الكربون، لا من قطاع الكهرباء فحسب، وإنما أيضا من تطبيقات الطاقة الأخرى التي تنتج عنها غالبية انبعاثات الكربون في العالم، لأنها تعتمد حاليا على توليد الطاقة من الوقود الأحفوري. وتشمل هذه القطاعات التدفئة والنقل وتطبيقات أخرى في قطاعات صناعية متعددة، بما في ذلك صناعة الأسمنت، وإنتاج النفط والغاز، وصناعة الحديد، وإنتاج الأسمدة وطائفة واسعة من المواد الكيميائية الأخرى. وتكفل الطاقة النووية توفير الكهرباء الخالية

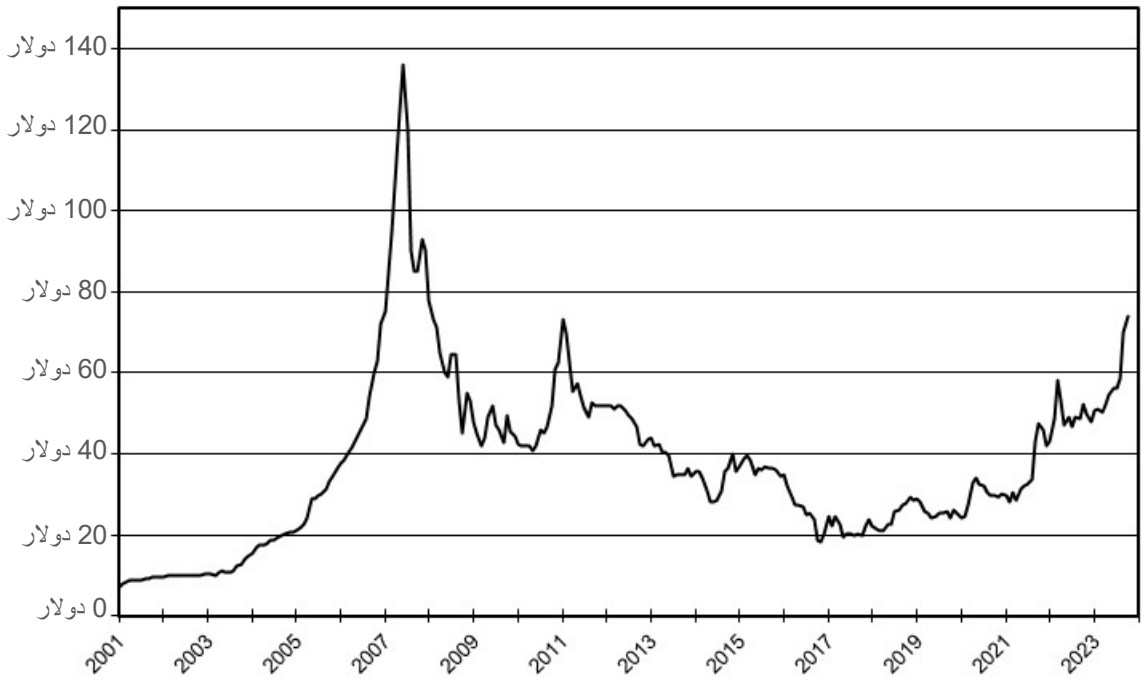
من الكربون حيثما كان اســـتخدام الكهرباء عملياً، والإمداد بالحرارة العديمة الكربون مباشـــرة لتحل محل حرق الوقود الأحفوري، وتوفير الطاقة الخالية من الكربون لإنتاج الهيدروجين، ومن ثم يتزايد النظر إليها بين صـفوف الدول الأعضـــاء باعتبارها عامل رئيســـي في التمكين من إقامة اقتصـــاد منخفض الكربون. وتتزايد جاذبية هذه التطبيقات في ظل معاناة مناطق عديدة في العالم من ارتفاع تاريخي في تكاليف الوقود الأحفوري، مع تصـــاعد المخاوف بشأن أمن إمدادات الطاقة على الصعيد العالمي، وتكثيف الدول الأعضاء جهودها لمكافحة تغير المناخ.

# باء- دورة الوقود النووي

## باء-1- المرحلة الاستهلالية

### الحالة

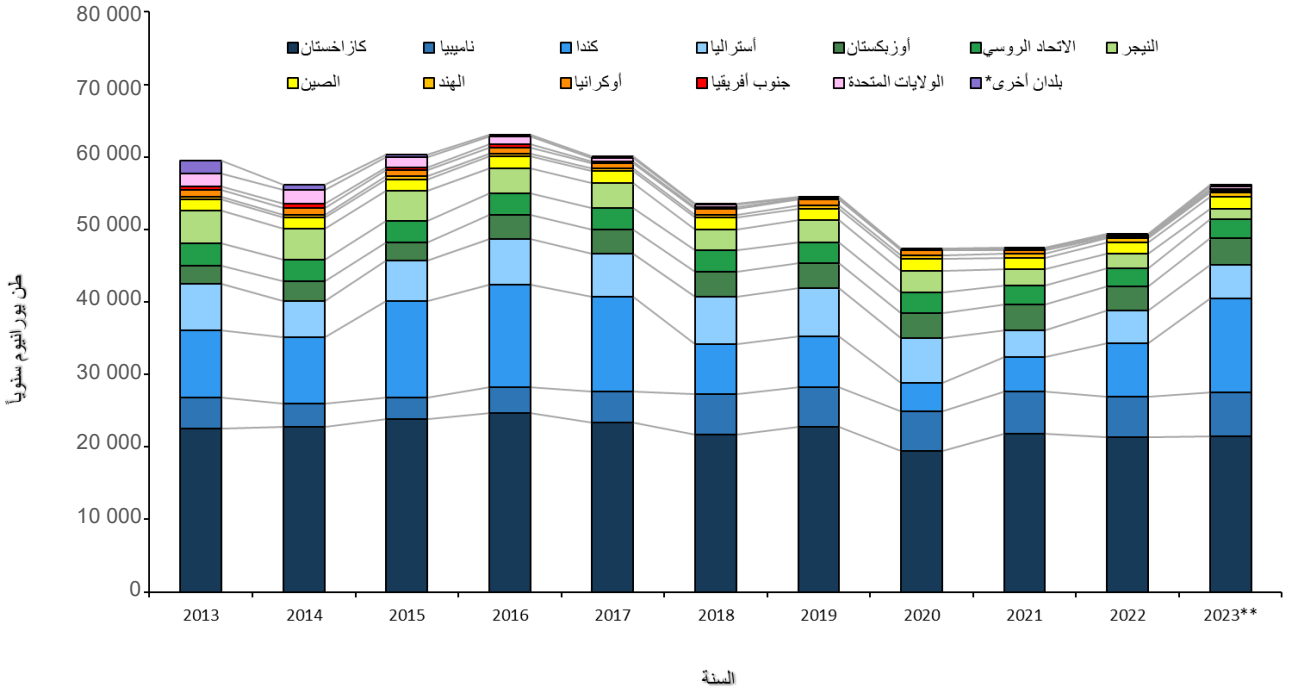
56- في 30 تشـرين الأول/أكتوبر 2023، كان سـعر التسـليم الفوري لليورانيوم 74,00 دولارا أمريكيا للرطل من ثامن أكســـيد ثلاثي اليورانيوم (أي 192,38 دولارا أمريكيا للكيلوغرام من اليورانيوم)، ليصـــل إلى أعلى مستوياته منذ 16 عاما. ويُعدُّ هذا تغيرا جوهريا مقارنة بالانخفاض النسبي الذي شـهدته أسـعار السـوق في الفترة بين عامي 2016 و2021، حيث كان السـعر يتراوح بين 20 و30 دولارا أمريكيا للرطل من ثامن أكسـيد ثلاثي اليورانيوم (أي بين 52 و 78 دولارا أمريكيا للكيلوغرام من اليورانيوم)، بزيادة قدرها نحو 200٪.




*الشكل- باء- 1- تطور سعر التسليم الفوري لليورانيوم في الفترة 2001-2023*
*(حتى تشرين الأول/أكتوبر 2023؛ مصدر البيانات: شركة UxC)*

57- وحسبما جاء في المنشور المشترك بين وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والوكالة الدولية للطاقة الذرية، والصادر بعنوان Uranium 2022: Resources, Production and Demand (اليورانيوم في عام 2022: موارده وإنتاجه والطلب عليه) (الكتاب الأحمر لعام 2022)، والذي يتناول عامي 2019 و2020، فقد تراجع الإنتاج العالمي من مناجم اليورانيوم بنسبة 13٪، حيث انخفض من 478 54 طنا من اليورانيوم إلى 342 47 طنا من اليورانيوم. وكانت البلدان المنتجة الرئيسية، بما فيها كازاخستان وكندا، قد عمدت إلى الحد من إنتاجها الإجمالي في السنوات الأخيرة بسبب استمرار الكساد الذي شهده سوق اليورانيوم قبيل عام 2021 حتى منتصف ذلك العام. وبالإضافة إلى ذلك، أدت جائحة كوفيد-19 العالمية في الفترة 2020-2021 إلى مزيد من الانخفاض غير المتوقع في إنتاج اليورانيوم.

58- ويفيد الكتاب الأحمر لعام 2022 بأنه في 1 كانون الثاني/يناير 2021، كانت القدرة الإنتاجية الإجمالية للمناجم المتوقفة عن العمل تبلغ 410 29 طنا إضافيا من اليورانيوم سنويا، وكان هناك ما لا يقل عن 000 335 طن إضافي من موارد اليورانيوم الجوفية القابلة للاستخلاص. وهذه العمليات مستوفية لجميع التراخيص والتصاريح والاتفاقات اللازمة للتشغيل وسبق استخدامها للإنتاج التجاري بالفعل، ومن ثم يمكن أن تعود إلى الإنتاج بسرعة نسبيا (في غضون سنة أو سنتين). بيد أن البيانات الأولية الخاصة بالكتاب الأحمر لعام 2024 تشير إلى حدوث انتعاش في إنتاج اليورانيوم، حيث ارتفع قليلا إلى 504 47 أطنان من اليورانيوم في عام 2021، وإلى 336 49 طنا من اليورانيوم في عام 2022، وإلى 143 56 طنا من اليورانيوم في عام 2023، وهو المستوى المتوسط الذي كان سائدا على مدى العقد السابق لجائحة كوفيد-19. وفي عام 2023، تشير التقديرات إلى أن أكبر أربعة بلدان منتجة لليورانيوم سنويا — أستراليا وكندا وكازاخستان وناميبيا — قد زادت إنتاجها بنحو 2٪ و 76٪ و 1٪ و 7٪ على التوالي مقارنة بمعدلات الإنتاج لعام 2022.




* تشمل "البلدان الأخرى" بقية البلدان ذات الإنتاج الصغير.
** تقديرات وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والوكالة الدولية للطاقة الذرية.

*الشكل- باء-2- تطور الإنتاج العالمي من اليورانيوم، 2013-2023.*

59- وتُعدُّ الكميات المحددة عالميا من موارد اليورانيوم التقليدية القابلة للاستخلاص (أي الموارد التي تأكد بقدر

معقول استنتاج وجودها في أنواع الرواسب الجيولوجية التي عادة ما تخضع للتعدين) كافية لدعم نمو القدرة على توليد الطاقة النووية في الأجلين القريب والمتوسط. ويفيد الكتاب الأحمر لعام 2022 بأن الكمية المحددة من موارد اليورانيوم القابلة للاستخلاص بأسعار السوق الحالية تزيد على 6 ملايين طن، وهي كمية تكفي لأكثر من 100 عام على أساس الاحتياجات العالمية من اليورانيوم اللازم لتشغيل المفاعلات في عام 2020، والتي بلغت 114 60 طنا من اليورانيوم.

60- وقد جرت العادة فيما مضى على استخدام إمدادات اليورانيوم الثانوية في سد العجز في الإمدادات الأولية. بيد أن هذا الاستخدام قد تراجع بالفعل ومن المتوقع أن يستمر في التراجع حتى عام 2040. ومع ثبات وزيادة سعر التسليم الفوري في سوق اليورانيوم في الآونة الأخيرة، استعادت صناعة إنتاج اليورانيوم نشاطها، واستأنف عدد قليل من المنتجين الأوليين عملياتهم المتوقفة والموضوعة قيد الرعاية والصيانة بسبب الفترة الطويلة التي ظل فيها سعر التسليم الفوري لليورانيوم منخفضا. ويشمل ذلك منجم هاني مون في أستراليا، ومنجم مكارثر ريفر ووحدة التجهيز-كي ليك في كندا، وعمليات التعدين في سميث رانش هايلند في الولايات المتحدة الأمريكية، والتي سيكون الإنتاج قد استؤنف فيها جميعا في الفترة 2022-2024، وكذلك منجم لانغر هاينريش في ناميبيا، الذي يُتوقع إعادة تشغيله في عام 2025.

61- وفقا للكتاب الأحمر لعام 2022، فقد شهد الإنفاق على الاستكشاف والتطوير حول العالم ارتفاعاً طفيفاً في عام 2021 إلى نحو 280 مليون دولار أمريكي، مما يمثل ارتفاعاً بنسبة 10% مقارنة بعام 2020 وذلك بعد انخفاض قدره 1,88 مليار دولار أمريكي في الفترة بين 2014 و2020. وتشير البيانات الأولية للكتاب الأحمر لعام 2024 إلى أنه من المتوقع أن الزيادة الكبيرة في الإنفاق قد استمرت في عامي 2022 و2023. وعلى سبيل المثال أعلنت شركة NexGen Energy في عام 2023 عن التوسع في برنامج الاستكشاف الذي تنفذه بالقرب من مكمن آرو للرواسب في حوض أثاباسكا في كندا.

62- والمعتاد تاريخيا هو أن سوق إنتاج الوقود يتميز بمنافسة قوية بين الجهات المصنعة والموردة للوقود. وفي الوقت الراهن، تتجاوز القدرة على إنتاج الوقود الاحتياجات منه، على الصعيدين العالمي والإقليمي.

63- ويُعدُّ إنتاج الوقود النووي من التكنولوجيات الناضجة التي شهدت تقدماً مستمراً على مر السنين من خلال أتمتة ورقمنة عملية تصنيع الوقود، وتقليل النفايات التشغيلية، وتعزيز وقاية العاملين من الإشعاعات. وفي الوقت نفسه، أُحرز تقدم في العديد من البلدان لتحسين اقتصاديات المفاعلات النووية، من خلال زيادة معدلات حرق الوقود وإطالة مدة دورة الوقود وتعزيز الموثوقية التشغيلية للوقود النووي، من خلال الحد من حالات انقطاع الوقود.

64- وتعتزم بعض الدول الاعضاء زيادة استخدام اليورانيوم المعاد معالجته وأنواع الوقود القائمة على مزيج اليورانيوم والبلوتونيوم في مفاعلات الماء الخفيف، وذلك بهدف استخدام الموارد الانشطارية الطبيعية على النحو الأمثل. وتهدف عدة دول أعضاء، منها الاتحاد الروسي وفرنسا والهند واليابان، إلى استخدام أنواع الوقود القائمة على مزيج اليورانيوم والبلوتونيوم في المفاعلات السريعة. وبدأت بعض الدول الأعضاء التي لديها مفاعلات تعمل بالماء الثقيل المضغوط في الاستعاضة عن قلوب المفاعلات القائمة على اليورانيوم الطبيعي بقلوب قائمة على يورانيوم مثرى قليلا لتحسين القدرة التنافسية لمفاعلاتها.

65- والعديد من الدول الأعضاء، بما في ذلك إسبانيا وبلجيكا وجمهورية كوريا والصين وفرنسا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان والاتحاد الروسي، لديها برامج جارية للبحث والتطوير والإيضاح بهدف نشر أنواع الوقود المتحملة للحوادث في أساطيل المفاعلات الحالية، من خلال صنع قضبان الاختبار الأولية ومجمعات الاختبار الأولية، وإجراء فحوصات التشعيع وما بعد التشعيع، وتقييم أداء الوقود، وتطوير المكونات الهيدروليكية الحرارية للنظم، ووضع شفرات نمذجة الحوادث العنيفة والتحقق من صحتها. وينطوي تطوير أنواع الوقود المتحملة للحوادث على استخدام مواد جديدة، ومن شأن بعض تصاميمها أن يتيح إطالة أمد العمليات التشغيلية

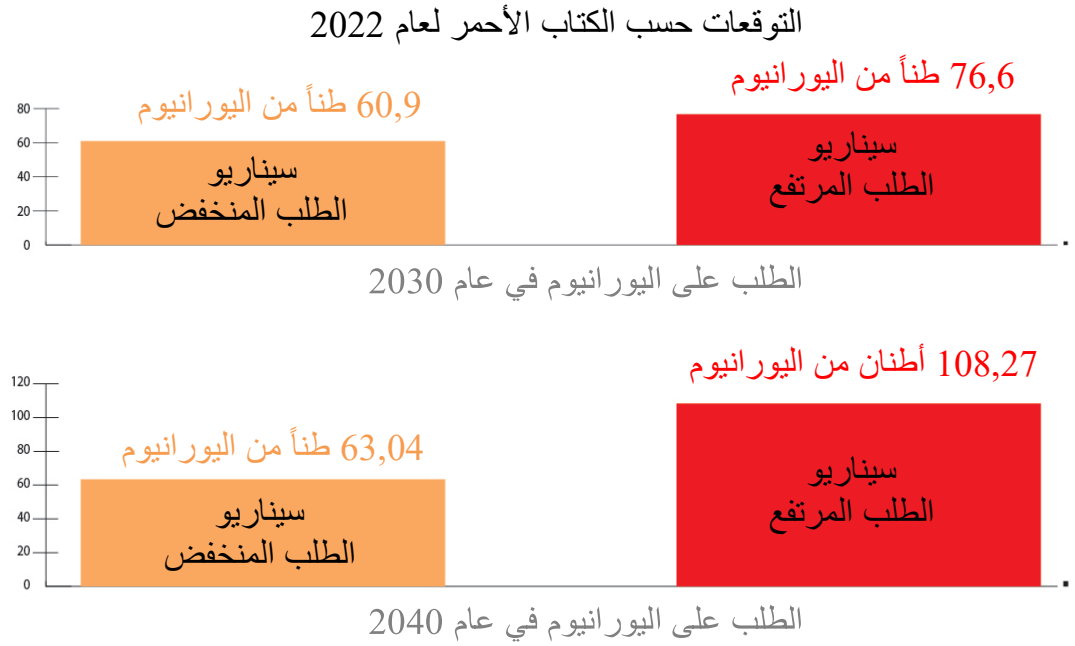
وزيادة فعاليتها في المفاعلات عن طريق تمديد الفترة الفاصلة بين فترات انقطاع التشغيل لإعادة التزويد بالوقود لتصل إلى سنتين، مما يؤدي إلى تحسين اقتصاديات محطات القوى النووية. وتعمل بعض الدول الأعضاء على تطوير تكنولوجيات تصنيع متقدمة، مثل التصنيع بإضافة الطبقات (باستخدام الطابعات الثلاثية الأبعاد على سبيل المثال)، أو استخدام الذكاء الاصطناعي وعمليات تصنيع الوقود المؤتمتة بالكامل لإتاحة أنواع الوقود المبتكرة والمعززة بمواد مضافة في السوق.

66- وهناك بعض من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة التي ستستخدم تصاميم الوقود التقليدية (على غرار تصاميم الوقود المنخفض الإثراء التي يشيع استخدامها في المفاعلات الكبيرة الحجم). بيد أن بعض الجهات القائمة على تطوير المفاعلات النمطية الصغيرة اختارت تصاميم أكثر ابتكارية، قائمة على اليورانيوم HALEU، لتحقيق فوائد تتجاوز ما يمكن تحقيقه باستخدام تصاميم الوقود التقليدية. كما أنَّ أعمال البحث والتطوير جارية بشأن أنواع الوقود القائمة على ثاني أكسيد اليورانيوم وعلى خليط أكسيد اليورانيوم وأكسيد البلوتونيوم 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. غير أن هذه التصاميم ستتطلب إنشاء محطات لصنع الوقود وسلاسل توريد منفصلة أو جديدة كليا. وسوف يلزم أيضاً اعتماد صلاحية هذه التصاميم الابتكارية وترخيصها قبل إتاحتها على المستوى الصناعي، لا سيما في حالة الأنواع ذات المستويات الأعلى من الإثراء اليورانيوم LEU واليورانيوم HALEU.

**الاتجاهات**

67- خلال مؤتمر الأمم المتحدة المعني بتغير المناخ COP28، أصدر 22 بلدا إعلانا بشأن التقدم صوب تحقيق الهدف الطموح المتمثل في مضاعفة القدرة النووية ثلاث مرات بحلول عام 2050. ووفقاً للكتاب الأحمر لعام 2022، تقدِّر التوقعات أن الطلب على اليورانيوم سيصل بحلول عام 2030 إلى ما بين 960 60 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المنخفض) و 592 76 طنا من اليورانيوم (سيناريو ارتفاع الطلب)، وبحلول عام 2040 إلى ما بين 040 63 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المنخفض) و 272 108 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المرتفع). ومع ذلك، ففي حال زيادة الطلب على اليورانيوم بسبب بدء تشغيل المفاعلات النمطية الصغيرة على النحو الوارد في التقرير الصادر عن الرابطة النووية العالمية بعنوان:
World Nuclear Association's Nuclear Fuel Report: Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023–2040 (الوقود النووي: السيناريوهات العالمية للطلب وتوافر العرض في الفترة 2023-2040)، يمكن أن تتراوح الاحتياجات العالمية السنوية من اليورانيوم بين 914 86 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المنخفض) و316 184 طنا من اليورانيوم (سيناريو الطلب المرتفع) بحلول عام 2040.

68- وهناك عدد من المناجم المخطط لها والمحتملة في 19 بلدا، والتي يمكن، في حال بدء تشغيلها في الفترة بين عامي 2023 و2040، أن تسهم في الوصول بالقدرة الإنتاجية الاسمية العالمية إلى 138 77 طنا من اليورانيوم سنويا. وسيتطلب ضمان إمدادات اليورانيوم استئناف العمل في المناجم المتوقفة وتنفيذ مشاريع المناجم المخطط لها والمحتملة، أما اكتشاف مكامن جديدة للرواسب فسيتطلب وجود ظروف سوقية مؤاتية على نحو مستدام. ويُعدُّ هذا مهمًّا بوجه خاص فيما يتعلق بإنشاء مناجم اليورانيوم الجديدة، حيث يستغرق إنشاؤها في المتوسط من 10 سنوات إلى 15 سنة، ما بين اكتشاف المكامن وبدء عمليات التعدين. وسيلزم أيضا استثمار مبالغ كبيرة في الوقت المناسب في جهود الاستكشاف وتكنولوجيا التعدين/المعالجة، بما في ذلك استخدام تقنيات فعالة من حيث التكلفة لاستخراج اليورانيوم من أجل استغلال أنواع المكامن غير التقليدية (مثل استخلاص اليورانيوم من رواسب الفوسفات ورواسب الطَّفل الأسود).




69- وهناك ابتكارات وتطورات حديثة نسبيا يمكن أن تؤدي إلى تحويل مكامن اليورانيوم دون الاقتصادية والهامشية إلى مناجم منتجة، وتشمل هذه الابتكارات والتطورات استخلاص اليورانيوم في الموقع من رواسب ناشئة عن تقصف في طبقات الأرض، على النحو الذي جرى إيضاحه في مكمن فينيكس في حوض أثاباسكا في كندا؛ واستخلاص اليورانيوم في الموقع عن طريق النض البيولوجي من رواسب الحجر الرملي، مثل مكمن اليورانيوم رقم 512 في الصين، حيث تُجرى تجارب ميدانية في هذا الصدد؛ والارتقاء بجودة خام اليورانيوم المنخفض الجودة، على النحو الذي يجري العمل على تطويره في مكمن مارينيكا المحتوي على رواسب كلسيريتية في ناميبيا؛ واستخراج الموارد من آبار التنقيب السطحية، وهو أسلوب ابتكاري مستحدث في التعدين يتسم بقابليته للتوسع ويمكن أن يتيح استغلال كتل صغيرة نسبيا من الخام العالي الجودة ليس من المجدي اقتصاديا استخراجها باستخدام أساليب التعدين القائمة على مناجم الحفر المفتوحة أو التنقيب تحت الأرض، إما بسبب صغر حجمها أو وجودها على أعماق يتعذر الوصول إليها. وبالإضافة إلى ذلك، فإن تقنيات النض التكويمي التي عادة ما تستخدم لاستخراج الفلزات من أنواع أخرى من الرواسب المعدنية تبشر بالخير في حالة بعض عمليات اليورانيوم.

70- ومجمعات الوقود النووي ليست بضائع يسهل الاستعاضة عنها بغيرها بل هي منتجات معقدة تجتمع فيها أنشطة التصميم والترخيص والبحث والتطوير، ويلزم أن تستوفي مواصفات معينة. وتُحدَّد هذه المواصفات بناء على الخصائص المادية للمفاعل، واستراتيجية المرفق لتشغيل المفاعل وإدارة دورة الوقود، ومتطلبات الترخيص الوطنية أو الإقليمية. ويمكن تقسيم التطورات الجديدة في تكنولوجيات تصميم وتصنيع الوقود إلى مجالين رئيسيين: أنواع الوقود التطورية أو الثورية المصممة للاستخدام في أساطيل المفاعلات القائمة، والتي يمكن أن تكفل إدخال تحسينات على الأمان والأداء، وكذلك على اقتصاديات التشغيل والتصرف في النفايات؛ وأنواع الوقود التطورية أو الثورية المصممة للاستخدام في المفاعلات المتقدمة، بما فيها المفاعلات النمطية الصغيرة.

71- وقد خططت بعض الدول الأعضاء بالفعل لإرساء البنية الأساسية للترخيص دعماً لرفع معدلات حرق الوقود والإثراء إلى ما يتجاوز الحد القديم البالغ 5٪ بحلول أواسط عشرينات هذا القرن، والتمكين من تشغيل مفاعلات الماء الخفيف القائمة بطريقة مأمونة واقتصادية على مدى دورات مدتها 24 شهراً بغير إدخال تغييرات مادية على محطات التصنيع وحاويات النقل (أي بالاقتصار على إدخال تغييرات على إجراءات الترخيص).

72- بيد أن صناعة إنتاج الوقود النووي ستواجه في العقد المقبل طلبا متزايدا في جميع قطاعات الوقود النووي

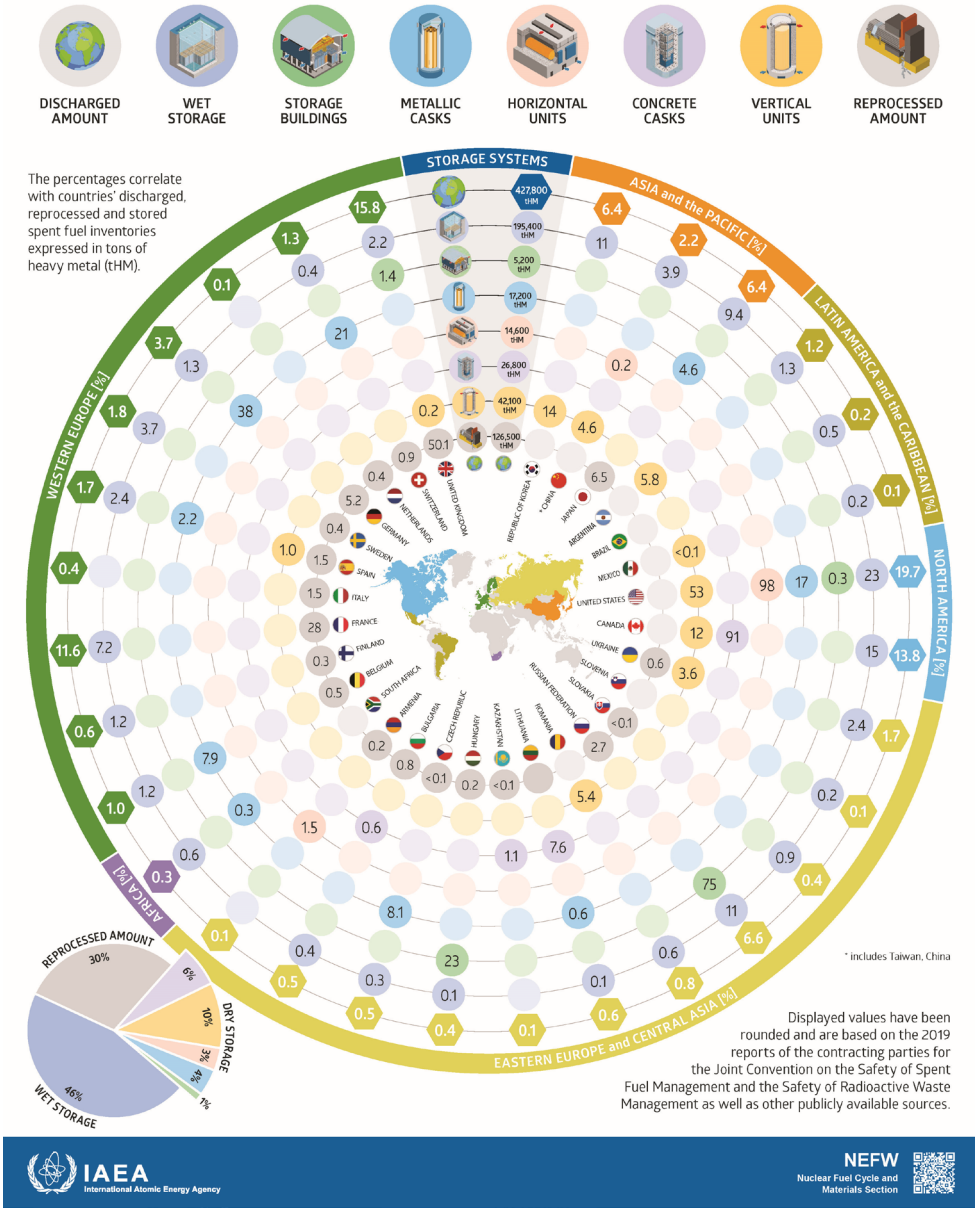
بمختلف أنواعه، بسبب النمو الذي تشهده برامج التشييد في البلدان المخضرمة والمستهلة على السواء، وفي ضوء الأهداف الطموحة الرامية إلى تطوير أنواع جديدة من الوقود، بما في ذلك الأنواع اللازمة للمفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات المتقدمة. ويجري استكشاف العديد من التصاميم المختلفة لأنواع وقود متحملة للحوادث، مما أدى إلى وضع مجموعة كبيرة ومتنوعة من الحلول بمستويات مختلفة من التعقيد؛ وبعضها من السهل نسبيا صنعه باستخدام خطوط ومرافق التصنيع القائمة، في حين سيتطلب البعض الآخر إنشاء خطوط ومرافق تصنيع جديدة. وسوف تتطلب أنواع الوقود المعززة المتحملة للحوادث وتصاميم الوقود النووي الابتكارية مستويات إثراء بنسبة تفوق 5٪ (حيث سيلزم استخدام اليورانيوم LEU+ واليورانيوم HALEU في صنع العديد من أنواع الوقود ذات المفاهيم الابتكارية). والنجاح في نشر جميع أنواع وقود المفاعلات النمطية الصغيرة سيتطلَّب نضج تكنولوجيات إنتاج الوقود بدءاً من مرحلة البحث والتطوير وصولاً إلى مرحلة التصنيع.

73- وإن استحداث عبوات نقل معتمدة لنقل أنواع اليورانيوم LEU+/HALEU عامل بالغ الأهمية لاستخدام وقود LEU+/HALEU. ويجري حاليا النظر في تنفيذ برامج قائمة على هذا النوع من اليورانيوم في أمريكا الشمالية والاتحاد الروسي. وتمتلك الشركة الحكومية للطاقة الذرية (روزاتوم) القدرة التكنولوجية على إنتاج كل من اليورانيوم LEU+ واليورانيوم HALEU المثرى بنسبة تصل إلى 19,75٪ من اليورانيوم-235، بأشكال مختلفة. وفي معظم البلدان، تقيِّد اللوائح الرقابية نسبة الإثراء المسموح بها في البنية الأساسية الحالية لدورة الوقود النووي بحيث لا تتعدى 5٪ من اليورانيوم-235. بيد أن الطلب على اليورانيوم HALEU قد يشهد تغيرا كبيرا في العقد القادم بسبب نشر المفاعلات النمطية الصغيرة على نطاق واسع، حيث يتطلب العديد من تصاميم هذه المفاعلات الجديدة استخدام اليورانيوم LEU+ أو اليورانيوم HALEU. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأت شركة Centrus Energy في إيضاح عملية إنتاج اليورانيوم HALEU في تشرين الأول/أكتوبر 2023 وستتوسع في الإنتاج تدريجيا، مع تزايد الطلب على اليورانيوم HALEU. وأعلنت شركة Urenco عن استعدادها لتوريد وقود اليورانيوم LEU+ للأسواق الدولية، وأنها تستكشف إمكانية تشييد وحدة مخصصة لوقود اليورانيوم HALEU، ووقعت على اتفاق تحالف مع شركة أورانو لتطوير أسطوانات مخصصة لنقل وقود LEU+/HALEU.

## باء-2- المرحلة الختامية

### الحالة

74- يتراكم الوقود النووي المستهلك قيد التخزين بمعدل يقارب 7000 طن من الفلزات الثقيلة سنوياً على مستوى العالم، وتجاوز حجم المخزون 000 300 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 لخزن الوقود النووي المستهلك وزيادة مدَّة الخزن قبل التخلص. وفي بعض البلدان، يُنقَل الوقود النووي المستهلك من مرافق للخزن الرطب إلى مرافق للخزن الجاف بعد انقضاء فترة تبريد أولية. وهناك مرافق جديدة للخزن الجاف بدأ تشغيلها بالفعل (على سبيل المثال في الأرجنتين وسلوفاكيا وسلوفينيا) أو يُخطط لذلك (على سبيل المثال في اليابان). وقد استهلت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة مبادرة لاتباع نهج لتحديد المواقع فيما يخص مرفقا واحداً أو أكثر من هذه المرافق الاتحادية الخاصة بالخزن المؤقت المدمج وذلك برضا الجهات المعنية.




*طالعوا المزيد*

*الشكل- باء- 3- نظم خزن الوقود المستهلك المستخدمة حول العالم.*

75- تواصل الدول الأعضاء أعمال إزالة الوقود النووي المستهلك ونقله إلى أماكن أخرى في إطار مشاريع إخراج محطات القوى النووية التابعة لها من الخدمة. ونُشرت تكنولوجيات جديدة لتحسين تكنولوجيات التفتيش، لا سيما المنصات الروبوتية المستخدمة بمثابة أدوات تفتيش، في نظم خزن الوقود النووي المستهلك. ويُعدُّ نقل الوقود النووي المستهلك عملية روتينية في بعض البلدان. وفي السنوات الأخيرة، استُحدثت عبوات جديدة للخزن والنقل وخضعت للترخيص وبدأ استخدامها لاستيعاب المخزونات الجديدة أو المتزايدة.

76- ويسهم تمديد أعمار بعض محطات القوى النووية في زيادة كمية الوقود النووي المستهلك المطلوب خزنها. وشهدت القدرة العالمية على إعادة المعالجة انخفاضاً كبيرا بعد إغلاق محطات إعادة المعالجة في المملكة المتحدة. ويتواصل في الاتحاد الروسي وفرنسا والهند واليابان العمل على تطوير تكنولوجيات إعادة التدوير على النطاق التجاري سواء لوقود الأسطول الحالي أو لوقود المفاعلات المتقدمة. وتتوقع اليابان أن يبدأ التشغيل التجاري لمحطة روكاشو لإعادة المعالجة في عام 2024. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، قدمت شركة Oklo إلى الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة خطة تحدد الخطوات السابقة على تقديم طلب إنشاء محطة لإعادة المعالجة على نطاق تجاري. ويعمل الاتحاد الروسي على تحديث محطتي إعادة المعالجة التابعتين له RT-1 وODC الواقعتين في مجمّع مایاك الإنتاجي وذلك بهدف زيادة قدرته على إعادة معالجة الوقود النووي المستهلك وتحسين الكفاءة التشغيلية.

**الاتجاهات**

77- يظل فهم سلوك الوقود النووي المستهلك في مختلف نظم الخزن، وكذلك آليات التقادم والتدهور في الهياكل والنظم والمكونات الخاصة بالخزن، 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 وتقترب من مراحل التشييد النهائية في بعض الدول الأعضاء، سُجِّلت زيادة في عدد الأنشطة التحضيرية، مثل وضع برامج تحديد الخصائص. ولمواصلة 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.

78- ومع توخي اعتماد تصاميم وقود جديدة لكل من أسطول المفاعلات القائم (مثل الوقود المعزز بمواد مضافة) 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. وتنسق الوكالة أنشطة بحثية دولية بشأن هذه المسألة لتعزيز تقاسم المعلومات وتحسين تكوين المعارف وبناء القدرات في الدول الأعضاء من خلال جمع الخبرات التشغيلية ونتائج البحوث والنُّهُج المتبعة في وضع السياسات والاستراتيجيات.

79- ورغم الانخفاض العام في 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 والمفاعلات النمطية الصغيرة. 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. وفي حين أنها منفذة بالفعل في بعض البلدان، تم في بلدان أخرى البدء في العمل على مناقشة وتطوير مبادرات لمعالجة التصرف في الوقود المستهلك والنفايات المشعة بطريقة متكاملة. وسيشكل نشر المفاعلات الجديدة ودورات الوقود المرتبطة بها تحديا كبيرا، ومن ثم سيكون لتضافر الجهود وإقامة الشراكات على الصعيد الدولي أهمية قصوى لتحقيق النجاح.

# جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة

## جيم-1- الإخراج من الخدمة

### الحالة

80- على الصعيد العالمي، خضع 210 من المفاعلات النووية للسحب الدائم من الخدمة، بما في ذلك 23 مفاعلاً اكتمل إخراجها من الخدمة تماماً.[4] وتقع هذه المفاعلات المغلقة في 21 بلدا في أنحاء مختلفة من أوروبا وآسيا وأمريكا الشمالية. وأكثر من ثلثي المفاعلات المغلقة، سواء المفاعلات التي أخرجت من الخدمة بالفعل أو المفاعلات التي لا تزال قيد الإخراج من الخدمة، يتركز في 5 بلدان، ألا هي فرنسا (14) وألمانيا (33) واليابان (27) والمملكة المتحدة (36) والولايات المتحدة الأمريكية (41). ولذلك، تشهد هذه البلدان تنفيذ أكبر البرامج الجارية لإخراج مفاعلات القوى من الخدمة، غير أن هناك عدة بلدان أخرى لديها أيضا مشاريع جارية لإخراج مفاعلات القوى من الخدمة، بما في ذلك الاتحاد الروسي وإسبانيا وإيطاليا وبلغاريا وجمهورية كوريا وسلوفاكيا والسويد وكندا وليتوانيا، بالإضافة إلى تايوان، الصين.

81- وشملت التطورات الرئيسية التي شهدها مجال الإخراج من الخدمة في عام 2023 الإغلاق النهائي لخمسة من مفاعلات القوى حول العالم، بما في ذلك آخر مفاعلات القوى المتبقية في ألمانيا (المفاعلات Emsland و Isar-2 و Neckarwestheim-2)، ومفاعل قوى في بلجيكا (المفاعل Tihange-2)، ومفاعل ماء مغلي في تايوان، الصين (المفاعل Kuosheng-2). ويتوافق ذلك مع متوسط معدل الإغلاق السنوي خلال العقد الماضي. ولا يزال الاهتمام قويا بين صفوف الجهات المشغلة بتمديد أعمار المفاعلات التي تم تشييدها في ثمانينات القرن العشرين لتصل إلى 60 سنة أو أكثر.

82- ولا يزال قدر كبير من الخبرات يُكتسب من إخراج مفاعلات البحوث من الخدمة، حيث تم إخراج نحو 450 منها بالكامل من الخدمة في جميع أنحاء العالم. وهناك حاليا 67 مفاعل بحوث قيد الإخراج من الخدمة.

83- ويتقدم العمل في كبرى مشاريع الإخراج من الخدمة الجارية في مواقع مرافق دورة الوقود النووي في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك في عدة مواقع في الاتحاد الروسي وفرنسا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية.

84- وأُحرز تقدم تقني كبير في إطار العديد من المشاريع الجارية في مجال الإخراج من الخدمة، بما في ذلك انتهاء شركة Enresa من أعمال إعادة تأهيل موقع محطة خوسيه كابريرا للقوى النووية بعد سحبها من الخدمة، وهي أول محطة للقوى النووية يتم تفكيكها بالكامل في إسبانيا (الشكل جيم-1).

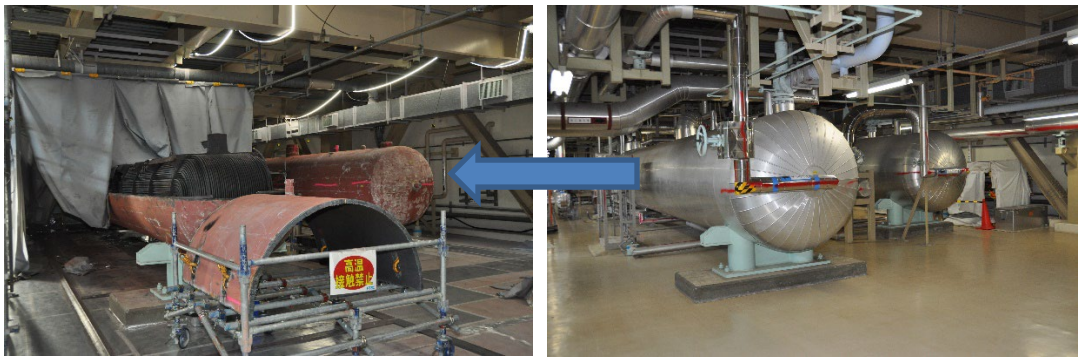
[4] وفقاً لقاعدة بيانات نظام المعلومات عن مفاعلات القوى (PRIS)، (PRIS – Home (iaea.org))، حتى 31 كانون الأول/ديسمبر 2023، تم استخراجها في 6 حزيران/يونيه 2024.

*الشكل- جيم-1- مبنى الاحتواء السابق في موقع محطة خوويه كابريرا للقوى النووية.*
*(المصدر: المؤسسة الوطنية للنفايات المشعة في إسبانيا (Enresa))*

85- وبالإضافة إلى ذلك، حصلت الجهة المشغلة لمحطة برينيليس للقوى النووية على مرسوم من الحكومة الفرنسية في أيلول/سبتمبر 2023 يأذن باستكمال تفكيك المرفق. ويمهد هذا المرسوم الطريق أمام استكمال أعمال التفكيك في مبنى المفاعل، وتجديد هياكل الهندسة المدنية، وهدم المكونات الفائضة المتبقية، والاستصلاح النهائي للموقع.

86- وتحققت إنجازات هامة في إطار برنامج الوكالة اليابانية للطاقة الذرية المعني بالمرحلة الختامية. فعلى سبيل المثال، دخل المفاعل Monju، وهو مفاعل سريع التوليد، المرحلة الثانية من عملية الإخراج من الخدمة، والتي تشمل التحضير لتفكيك المكونات المرتبطة بالصوديوم (مثل التدريع النيوتروني) والمكونات المرتبطة بتوليد الكهرباء (مثل التوربينات)، إضافة إلى موافقة الهيئة الرقابية، والتي تم الحصول عليها في شباط/فبراير 2023.

87- وفي تشرين الأول/أكتوبر 2023، حصلت هيئة روزإينيرغوأتوم "ROSENERGOATOM" على رخصة من الدائرة الاتحادية للرقابة البيئية والصناعية والنووية تمنحها حق إخراج وحدتي القوى 1 و2 التابعتين لمحطة Novovoronezh للقوى النووية من الخدمة. ومن المقرر الانتهاء من المشروع في عام 2035.



*الشكل- جيم-2- تفكيك سخان مياه تغذية عالي الضغط في إطار إخراج المفاعل MONJU من الخدمة.*
*(المصدر: الوكالة اليابانية للطاقة الذرية)*

**الاتجاهات**

88- رغم حالة عدم التيقُّن التي تحيط بمعدل إغلاق المرافق في المستقبل، فإنَّ عدد المرافق الجاري تفكيكها فعليًّا آخذ في الازدياد، مع الاتجاه 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.

89- وهناك تركيز متزايد على تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في مشاريع الإخراج من الخدمة. ويتجلى الحرص على الاستدامة في مجال الإخراج من الخدمة على مستويات مختلفة، بما في ذلك تحسين فعالية استخدام مواد الإخراج من الخدمة سعياً لتقليل النفايات التي تتطلب التخلص النهائي إلى أدنى حد، وتعزيز مراعاة إعادة استخدام المواقع أو المرافق أو تغيير أغراضها دعماً لمشاريع صناعية مقبلة. ومع ذلك، يتطلب تطبيق الاقتصاد الدائري التعاون بين مختلف الجهات المعنية، من واضعي السياسات والهيئات الرقابية إلى المجتمعات المحلية، التي قد تتعدد وجهات نظرها وتوقعاتها فيما يتعلق بقبول وجود النشاط الإشعاعي في حياتهم اليومية.

90- واستشرافا للمستقبل، فسوف يكون للتكنولوجيات الرقمية دور متزايد الأهمية في تطوير عمليات إخراج المرافق النووية من الخدمة. ومن الفوائد الهامة التي تكفلها هذه التكنولوجيات الكفاءة والاستخدام الأمثل للموارد البشرية والمالية والتكنولوجية المتاحة؛ وتعزيز الأمان الإشعاعي للتقليل إلى أدنى حد من تعرض القوى العاملة للإشعاع؛ وتنفيذ العمليات الرقابية وإشراك الجهات المعنية لتيسير فهم أنشطة الإخراج من الخدمة؛ وإدارة المعارف من أجل نقل المعارف والخبرات بفعالية بين القوى العاملة الحالية والمقبلة.

91- ومن التطورات الأخرى المرتبطة على نحو وثيق بتزايد الأخذ بالتكنولوجيات الرقمية استخدام الروبوطات المتنقلة لفحص الحالة المادية والإشعاعية للهياكل، واستخدام الأدوات المشغلة عن بعد لمعالجة النفايات وتنفيذ عمليات التعبئة والعمليات في المناطق التي يصعب الوصول إليها، بسبب ارتفاع معدلات الجرعات على سبيل المثال.

92- وستجلب التكنولوجيات الرقمية العديد من الفوائد المحتملة الأخرى للصناعة النووية ككل، عن طريق التيسير كثيرا من إتاحة الخبرات المكتسبة في المشاريع الجارية في مجال الإخراج من الخدمة للجهات المعنية بتصميم المرافق النووية وتشغيلها والهيئات الرقابية، بالإضافة إلى طائفة متعددة من الجهات الأخرى المعنية بالمشاريع المقبلة في هذا المجال.

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

### الاستصلاح البيئي

93- تتركز أنشطة الاستصلاح البيئي في معظمها على أربعة أنواع من المواقع الملوثة، ألا وهي المواقع النووية (التي تندرج في نهاية المطاف ضمن مشروع للإخراج من الخدمة)؛ والمواقع القديمة لتعدين اليورانيوم ومعالجته؛ والمواقع المتضررة من الحوادث الإشعاعية؛ ومواقع العمليات الصناعية غير النووية التي نجمت عنها مخلفات/نفايات تستلزم التصرف فيها بطريقة مناسبة (على سبيل المثال، الشكل جيم-3).

*الشكل- جيم-3- الخزن المؤقت لمخلفات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية. (المصدر: الوكالة)*

94- وفي عام 2023، استمر إحراز تقدم مطرد في مجال الاستصلاح في جميع أنحاء العالم. وفي المملكة المتحدة، وسعت الهيئة المعنية بإخراج المرافق النووية من الخدمة برنامج عملها ليتجاوز المسؤولية الأصلية المسندة إليها، وهي تنظيف أقدم 17 موقعا نوويا مدنيا في البلد، بحيث يشمل أيضاً أسطول المفاعلات المتقدمة المبردة بالغاز. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تمكن 91 موقعا من أصل 107 مواقع في البلد من معالجة المياه

والتربة الملوثة بنجاح. وتم التخلص نهائيا مما يزيد على 000 179 حاوية من نفايات ما وراء اليورانيوم. وبحلول نهاية عام 2023، كانت مساحة قدرها 000 17 هكتارا من الأرض قد أُعفيت من الرقابة. وفي ولاية واشنطن، وبعد أن أصبح المفاعل باء في موقع هانفورد جزءا من متنزه مشروع مانهاتن الوطني إلى جانب مختبر أوك ريدج الوطني ومختبر لوس ألاموس الوطني، انتهى المفاعل من تنفيذ أنشطة بالغة الأهمية لمعالجة مياه الخزانات والتقليل من المخاطر من خلال الارتقاء بالمرافق وتحسينها. وجهود التنظيف جارية حاليا في 16 موقعا، وإن كان التنظيف في هذه المواقع المتبقية صعبا نسبيا بسبب الخصائص الفريدة للنفايات المشعة الموجودة فيها.

**التصرف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية**

95- وبالإضافة إلى النفايات المشعة، تواجه بلدان كثيرة أيضا تحديا في التعامل مع كميات كبيرة من المخلفات المحتوية على مستويات متفاوتة من النويدات المشعة الطبيعية الناتجة من عمليات غير نووية.

96- وتترتب على عملية إنتاج الأسمدة كميات كبيرة من منتج ثانوي يُعرف بالجص الفوسفوري، وهو نوع من كبريتات الكالسيوم. ونظراً لأن نقل الجص الفوسفوري وخزنه في الأجل الطويل ينطويان على تكاليف استثمارية وتشغيلية، فغالبا ما تُترك هذه المادة في مكبات نفايات مكشوفة، يقع الكثير منها في مساحات مفتوحة. وكثيرا ما ينجم عن مكبات الجص الفوسفوري تأثير بيئي ضار من خلال تلوث المياه الجوفية والمياه السطحية والتربة.

97- ويحتوي الجص الفوسفوري على عدد من العناصر الأرضية النادرة كالحديد والتيتانيوم والمغنيسيوم والألومنيوم والمنغنيز، لكنه يحتوي أيضا على فلزات ثقيلة سامة. وتنص اللوائح في الاتحاد الأوروبي على اعتبار العديد من العناصر الأرضية النادرة مواد خام "بالغة الأهمية". وتمتد استخدامات الجص الفوسفوري المحتملة إلى مجالات مختلفة أخرى، بما في ذلك استخدامه في إنشاء الطرق كمادة قاعدية، وهو أقل تكلفة من المواد المستخدمة حاليا ويساويها في الفعالية إن لم يتجاوزها؛ وفي تحسين التربة الزراعية لتوفير الكبريت البالغ الأهمية للتربة؛ وفي مستودعات طمر النفايات كغطاء لتسريع اضمحلال النفايات وإطالة عمر المستودع؛ وفي صنع البلاط الخزفي المستخدم في الأسقف؛ وفي صنع مواد الركائز البحرية، مثل أرضيات تربية المحار. ويمكن اتباع نهج مماثلة لتحسين قيمة المخلفات الناتجة عن عمليات أخرى، ويمكن إعادة استثمار الأرباح المحققة من بيع هذه المواد في استصلاح المواقع الملوثة. ويوفر هذا النهج حلا ممكنا، لا سيما في حالة الدول الأعضاء المنخفضة الدخل التي ليس أمامها سبيل آخر لتوفير الموارد اللازمة لاستصلاح مثل هذه المواقع.

**الاتجاهات**

**الاستصلاح البيئي**

98- مع استمرار الجهود المبذولة لاستصلاح المواقع الملوثة في جميع أنحاء العالم، فإن الاتجاه نحو تجاوز الحد من المخاطر إلى منظور موسع قائم على تراكم القيمة، دون المساس بالأمان، آخذ في اكتساب الزخم بين صفوف الأوساط المعنية بالاستصلاح. وتقتضي مبادئ الاقتصاد الدائري التركيز على إعادة إكساب الموقع قيمة اقتصادية بعد انتهاء العمليات النووية وغير النووية على السواء. ومن شأن نجاح أعمال الاستصلاح أن يؤدي دورا حاسما في ضمان مساهمة القوى النووية في التخفيف من آثار تغير المناخ. وفي هذا الصدد، تبرز الحاجة إلى حلول استصلاح مستدامة ومرنة تأخذ في الاعتبار عمليات صنع القرار القائمة على المشاركة النشطة من مختلف الجهات المعنية.

**التصرف في المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية**

99- أثبتت بلدان عديدة إمكانية التقليل إلى أدنى حد من مخلفات المواد المشـــعة الموجودة في البيئة الطبيعية من خلال اعتماد نُهُج الاقتصـاد الدائري (على سبيل المثال، استخدمت إسبانيا الجص الفوسفوري في تحسين التربة واسـتخدمت هولندا مخلفات المواد المشـعة الموجودة في البيئة الطبيعية كمثبتات في مسـتودعات طمر النفايات). وهناك حالات يمكن فيها اسـتخراج المواد الأكثر أهمية من مخلفات المواد المشـعة الموجودة في المواد الطبيعية، لكن ذلك يتطلب تقنيات ابتكارية. وسـتكون هناك حاجة ماسـة إلى سـياسـات حكومية تحفز اعتماد المناهج القائمة على الدائرية، على أن تدعمها لوائح معدلة لتلائم سيناريو الاقتصاد الدائري.

## جيم-3- التصرف في النفايات المشعة

**الحالة**

100- على مدى عام 2023، أحرزت عدة بلدان تقدما كبيرا في التصـــرف في النفايات المشـــعة، وبذلك أكدت من جديد التزامها بالتعامل مع النفايات والتخلص منها بطريقة مسـؤولة، وباتباع ممارسـات أكثر أمانا واسـتدامة للتصرف في النفايات.

101- وأحرزت الدول الأعضـــاء التي تتمتع بعقود من الخبرة في تنفيذ حلول التصـــرف في النفايات مزيدا من التقدم في بعض برامجها الوطنية الرئيسـية. فعلى سـبيل المثال، قدمت الوكالة الوطنية الفرنسـية للتصـــرف في النفايات المشعة طلب الحصول على رخصة تشييد مرفق التخلص الجيولوجي التابع لها في إطار مشروع Cigéo في كانون الثاني/يناير 2023. وبالإضـــافة إلى ذلك، وتحسـبا للنفايات التي سـتنشـأ في المسـتقبل نتيجة لإخراج محطات القوى النووية من الخدمة، تقدمت الوكالة الوطنية الفرنسـية بطلب للحصـــول على تصـــريح بيئي لزيادة قدرتها على التخلص من النفايات ذات مسـتوى الإشـــعاع البالغ الضـــعف في مرفقها الصـــناعي لتجميع النفايات وفرزها والتخلص منها (مرفق CIRES). وأعلنت المؤسـسـة الوطنية الإسـبانية للنفايات المشـعة عن زيادة كبيرة تصـــل إلى أربعة أضـــعاف في قدرة التخلص من النفايات الضـــعيفة الإشـــعاع في مرفق El Cabril للتخلص من النفايات. وتنتظر الجمعية التعاونية الوطنية للتخلص من النفايات المشـعة في سـويسـرا الإذن بإجراء الدراسـات الجوفية في الموقع الموصـــى به. وتعكف دول أعضـــاء أخرى بنشـــاط على عمليات لتحديد المواقع، ومنها ألمانيا وأوكرانيا والمملكة المتحدة واليابان.

*الشكل جيم-4- خلال زيارته الرسمية إلى فرنسا في عام 2023، أدى المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي منشأة وكالة أندرا في موز/هوت مارن، بما شمل عرضاً قدمه المدير العام لوكالة أندرا السيد بيار أبادي من مشروع Cigéo للتخلص الجيولوجي العميق من النفايات المشعة. (المصدر: وكالة أندرا)*

102- وبفضل الابتكارات التي شهدها مجال التصرف في النفايات المشعة، وقعت شركتا Studsvik (السويد) وGesellschaft für Nuklear-Service (ألمانيا) اتفاقا حصريا لتنفيذ تكنولوجيا inDRUM التي وضعتها الشركة الأولى، وهي تقنية حاصلة على براءة اختراع لمعالجة النفايات المشعة المستعصية. وفي الاتحاد الروسي، تتعاون جامعة تومسك التقنية مع TVEL بشأن مشروع يستخدم التفريغات الكهربائية للتعجيل بإزالة التلوث من الخرسانة المشعة. وتبشر هذه الطريقة المبتكرة بإزالة التلوث بوتيرة أسرع وكفاءة أكبر مع التقليل إلى أدنى حد من تشتت الغبار، الذي غالبا ما ينجم عن طرق تكسير الخرسانة التقليدية. وطور معهد الفيزياء وهندسة القوى في الاتحاد الروسي تكنولوجيا للأكسدة في الحالة الصلبة لمبرد الصوديوم المستخدم في المفاعلات السريعة وأنشأ مرفقاً صناعياً تجريبيًّا Mineral 100/150. ويعد تحالف الإخراج من الخدمة (المملكة المتحدة)، وهو شراكة تجمع بين شركات Jacobs وAtkins وWestinghouse Electric، رائدا في اتباع نهج ابتكاري لاستخلاص الحطام بأمان من أحواض الوقود في موقع تابع لهيئة الإخراج من الخدمة النووية. وخضعت أداة استخلاص الرواسب الطينية السائبة للاختبار، وتبين أنها توفر حلا يكفل الكفاءة والفعالية من حيث التكلفة ويشبه المكنسة الكهربائية الصناعية.

*الشكل- جيم-4- المدير العام رافائيل ماريانو غروسي في جولة بصحبة مرشدين في مختبر العبوات التابع للشركة السويدية للتصرف في الوقود النووي والنفايات، والتي شملت تفقد عبوات الخزن العميق للوقود المستهلك تحت الأرض، خلال زيارته الرسمية إلى السويد في آب/أغسطس 2023. (المصدر: الوكالة)*

103- وخلال الفترة المشمولة بالتقرير، أُنشئت قدرات ومرافق وطنية في عدد من الدول الأعضاء التي تتحمل مسؤوليات أحدث عهدا و/أو أصغر نطاقا. فعلى سبيل المثال، تحرز بيلاروس تقدما كبيرا في إنشاء منظمة للتصرف في النفايات المشعة. وتهدف الدولة إلى تشغيل مرفق للخزن الطويل الأجل والتخلص بحلول عام 2030، على ألا يقتصر عمله على النفايات الناتجة من محطة القوى النووية البيلاروسية وإنما يشمل أيضاً النفايات الناتجة من قطاعات متعددة تستخدم مصادر الإشعاع المؤين. وبدأت هولندا تشييد مبنى الخزن المتعدد الوظائف، وهو مرفق جديد لخزن النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع، ويبلغ عمره الافتراضي حسب تصميمه 100 سنة على الأقل. وانتهت زمبابوي من تشييد مرفق وطني مركزي للتصرف في النفايات المشعة من أجل التصرف الطويل الأجل في النفايات المشعة والمصادر المشعة المختومة المهملة. وأُدخلت تحسينات على ظروف الأمان والأمن في مرافق الخزن الوطنية في الفلبين وجمهورية فنزويلا البوليفارية، مما أدى إلى زيادة سعة الخزن المتاحة في المستقبل القريب.

*الشكل- جيم-5- المرفق المركزي لإدارة النفايات الذي شُيّد حديثا في زمبابوي. (المصدر: الوكالة)*

*الشكل- جيم-6- تحسين ظروف مرافق الخزن في الفلبين (يساراً) وجمهورية فنزويلا البوليفارية (يميناً).*
*(المصدران: المعهد الفلبيني للبحوث النووية (إلى اليسار) والمعهد الفنزويلي للبحوث العلمية (إلى اليمين))*

104- وفي تموز/يوليه 2023، بدأت الوكالة المعنية بالتصرف في النفايات الإشعاعية في سلوفينيا تجهيز الموقع المختار لتشييد مرفق التخلص من النفايات المنخفضة الإشعاع والمتوسطة الإشعاع، بما في ذلك إنشاء الطرق الأساسية وتوصيلات المرافق الضرورية وتركيب أجهزة الرصد البيئي الأساسي. ولكن في أستراليا، وبعد نجاح هيئة معنية بتمثيل الجهات المالكة التقليدية في الاعتراض على اختيار الموقع المفضل لإنشاء مرفق مركزي للتصرف في النفايات المشعة في جنوب أستراليا وذلك على أساس وجود تحيز واضح، لا تعتزم الحكومة الأسترالية المضي قدما فيما يتعلق بعملية اختيار الموقع المفضل.

*الشكل- جيم-7- تجهيز الموقع لتشييد مرفق للتخلص من النفايات التشغيلية الناتجة عن محطات القوى النووية في سلوفينيا. (المصدر: الوكالة المعنية بالتصرف في النفايات المشعة في سلوفينيا)*

**الاتجاهات**

105- تشهد الصناعة النووية تحولا جوهريا بسبب الاتجاه العالمي نحو اعتماد مبادئ وممارسات الإدارة المتكاملة للنفايات المشعة. ويضمن هذا النهج استدامة استخدام التكنولوجيا النووية عن طريق التعامل مع النفايات على الوجه الأمثل، بدءا من مرحلة إنتاج النفايات وحتى مرحلة التخلص منها. ويتطلب الأمر التنسيق بين واضعي السياسات وواضعي الاستراتيجيات من أجل التصدي لمختلف التحديات المتعلقة بمدى كفاية الأهداف المرجو تحقيقها ومن ثم تحديد الخيارات التقنية الملائمة فيما يتعلق بتحقيق التكامل في مجال التصرف في النفايات المشعة. وتؤدي الإدارة المتكاملة للنفايات إلى تبسيط العمليات والتخفيف من المخاطر البيئية وتعزيز التصرف المسؤول في النفايات المشعة. واعتمدت هيئة التصرف في النفايات النووية في كندا استراتيجية متكاملة للتصرف في النفايات المشعة، فيما عدا الوقود النووي المستعمل. ويتضمن هذا النهج الشامل التخلص من النفايات المتوسطة الإشعاع والنفايات القوية الإشعاع التي ليست وقوداً في مستودع جيولوجي عميق، والتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مرافق للتخلص قرب سطح الأرض.

106- ومن شأن اهتمام الدول الأعضاء بنشر المفاعلات النمطية الصغيرة أن يحدث تحولا في مجال الطاقة النووية. غير أن المفاعلات النمطية الصغيرة تطرح تحديا كبيرا فيما يتعلق بالتصرف في النفايات المشعة. ومع اعتماد البلدان هذه التكنولوجيا المبتكرة، يجب تعديل السياسات والاستراتيجيات المتعلقة بالنفايات المشعة بطريقة مناسبة لاستيعاب المفاعلات النمطية الصغيرة. ويتطلب ذلك استثمارات كبيرة في مرافق معالجة النفايات وخزنها والتخلص منها، كما يتطلب تدريب الموظفين المؤهلين. وتكتسي ترتيبات التمويل، لا سيما فيما يتعلق بمرافق التخلص، أهمية حاسمة في الاضطلاع بهذه المسؤوليات الناشئة عن التصرف في النفايات المشعة، من أجل ضمان مستقبل مستدام للطاقة النووية.

107- ومن الاتجاهات المتصاعدة الأخرى اعتماد التسلسل الهرمي للنفايات المشعة، مع التركيز على منع إنتاج النفايات وتقليلها إلى أدنى حد وإعادة تدويرها وإعادة استخدامها. ويهدف هذا النهج إلى التقليل من حجم النفايات المشعة التي تصل إلى مرافق التخلص، ومن ثم الحفاظ على هذه المرافق بوصفها أصول قيمة طويلة الأجل. ويتمثل أحد مظاهر هذا الاتجاه في المرفق الغربي للفرز وإعادة التدوير لأغراض الطاقة النظيفة التابع لشركة أونتاريو لتوليد الكهرباء، والذي يقلل إلى أدنى حد من النفايات الناتجة عن محطات القوى النووية، ومن ثم يقلل من احتياجات الخزن وتكاليف الإخراج من الخدمة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن مرفق RECUMO البلجيكي لإعادة تدوير المخلفات المشعة الناتجة عن إنتاج النظائر المشعة الطبية واستخلاص اليورانيوم الضعيف الإثراء، يُعدُّ بدوره دليلاً على الالتزام بالتقليل من النفايات. وبالمثل، يُعدُّ مرفق إزالة التريتيوم التابع لشركة كوريا للهيدرولوجيا والقوى النووية في رومانيا مثالا على التوجه للحد من إنتاج النفايات مع تعزيز الخبرات في مجال التصرف في التريتيوم. وفي المملكة المتحدة، نشرت هيئة خدمات النفايات النووية استراتيجيتها للتصرف في النفايات المشعة، وأكدت اتفاقها مع مبادئ التسلسل الهرمي للنفايات. وتشدد هذه الاستراتيجية على التقليل من النفايات، واستهداف إعادة تدوير النفايات بنسبة 50٪ عند الإخراج من الخدمة، وتهدف إلى تقليل النفايات الثانوية بنسبة 70٪ تقريبا بحلول عام 2030.

108- ويفكر العلماء في المجال النووي في كيفية استخراج القيمة من النفايات عن طريق استخلاص النظائر المشعة منها لاستخدامها في التطبيقات الطبية واستكشاف الفضاء. وتعمل وكالة الفضاء البريطانية والمختبر النووي الوطني في المملكة المتحدة على استكشاف إمكانية استخدام الأميريشيوم في البطاريات الفضائية. وفي عام 2023، أزيل ما مجموعه 32 مصدرا من المصادر العالية النشاط من شيلي وسلوفينيا. وبالإضافة إلى ذلك، وفي إطار المبادرة العالمية للتصرف في الراديوم-226، أزيلت مصادر مهملة قائمة على الراديوم من تايلند. وهناك أعمال جارية في 17 دولة عضوا، منها إثيوبيا وإسبانيا وإندونيسيا والسلفادور وسلوفينيا وكرواتيا وماليزيا، من أجل حصر مصادر الراديوم المهملة المتاحة لإنتاج النظائر المشعة التي تستخدم في علاج السرطان.

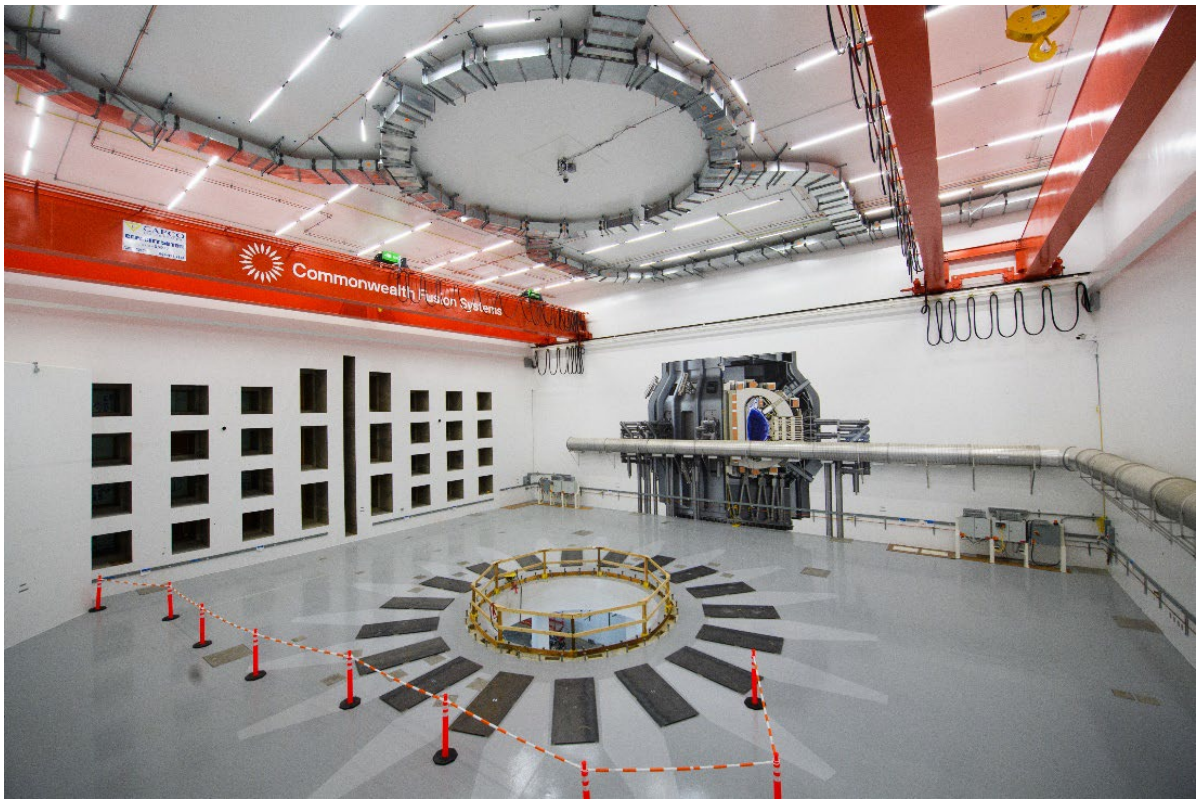
## دال- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل

### الحالة

109- في عام 2023، تمكَّن الباحثون في مختبر لورانس ليفرمور الوطني الأمريكي من تكرار إشعال طاقة الاندماج لثلاث مرات على الأقل وهو الإنجاز الذي تحقق من قبل في مرفق الإشعال الوطني في كانون الأول/ديسمبر 2022.

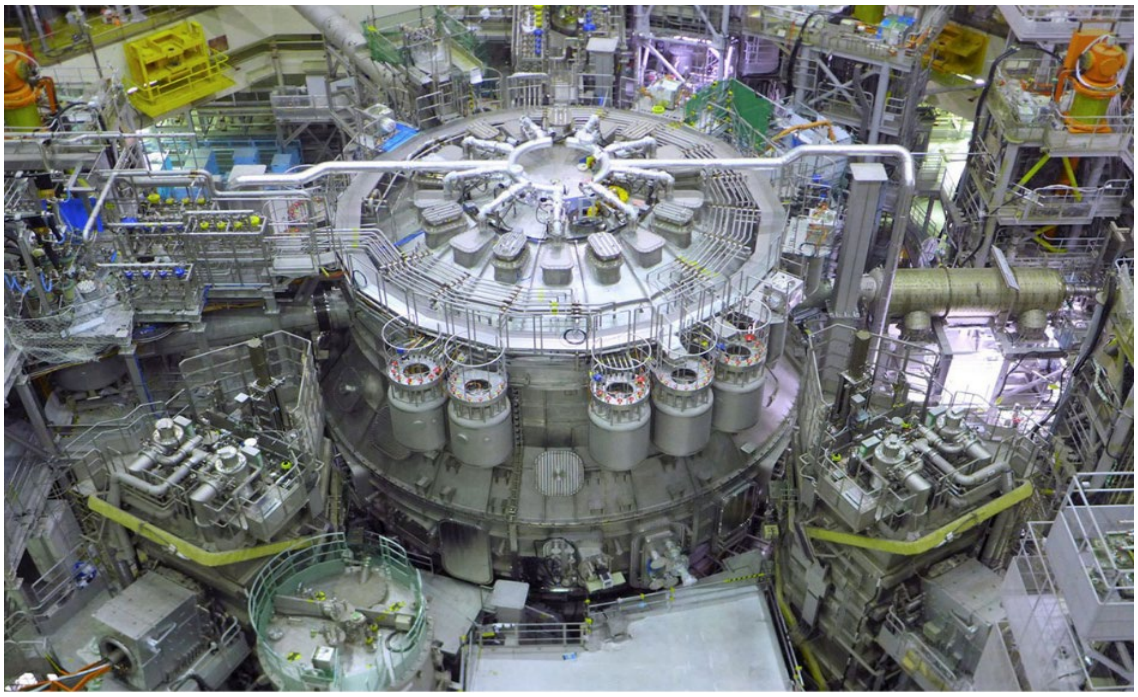
*الشكل- دال- 1- المدير العام رافائيل ماريانو غروسي يزور قاعة جهاز التوكاماك SPARC (المصدر: الوكالة)*

110- وفي شـــباط/فبراير 2023، احتفلت شـــركة Commonwealth Fusion Systems (CFS) ومركز علوم البلازما والاندماج التابع لمعهد ماســاتشــوســتس للتكنولوجيا، وهو أول مركز متعاون مع الوكالة في مجال طاقة الاندماج، بالافتتاح الرســمي لموقع تشــييد المفاعل SPARC – وهو جهاز توكاماك يهدف إلى تحقيق فائض في مكسب الطاقة للأغراض العلمية. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المفاعل SPARC في عام 2025 وأن يثبت إمكانية تحقيق فائض في مكســب الطاقة للأغراض العلمية. ومن المتوقع أن يكتمل المفاعل الذي ســيخلفه، والذي يحمل اسم ARC، بحلول عام 2035، والذي يهدف إلى إيضاح إمكانية إنتاج الكهرباء.

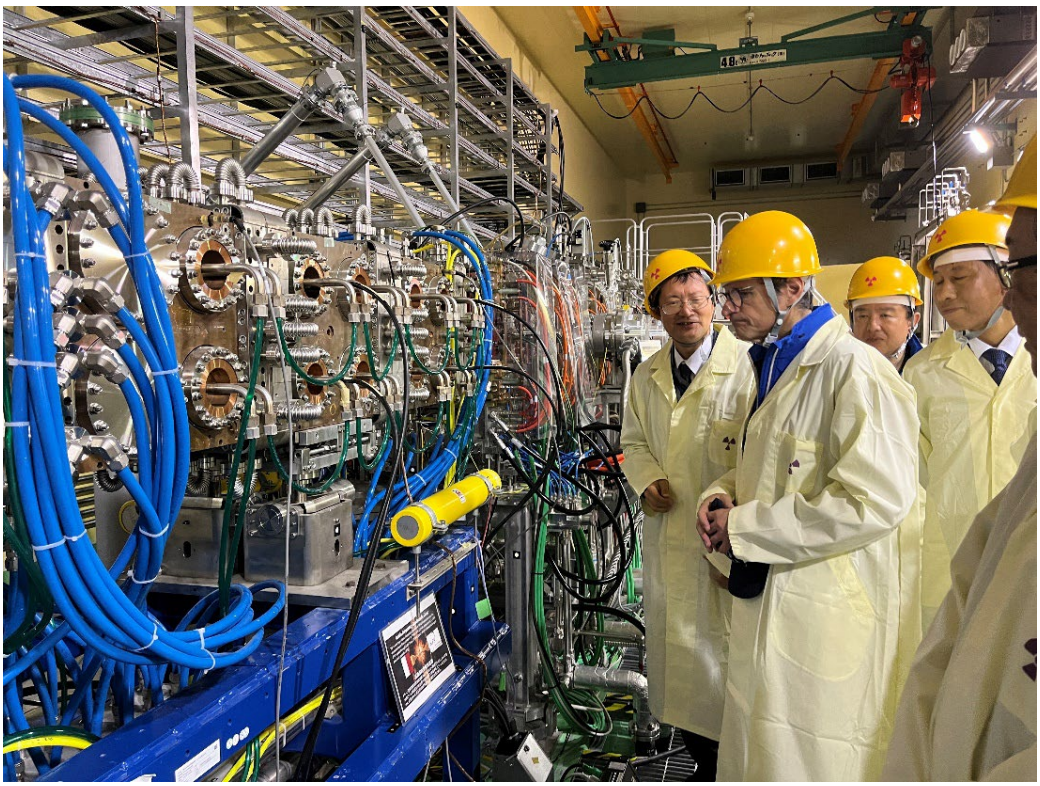



*الشكل- دال-2- قاعة جهاز التوكاماك SPARC بعد الانتهاء من تجهيزها لتجميع الآلة. (المصدر: شركة CFS)*

111- وفي تشرين الأول/أكتوبر 2023، أنتج جهاز التوكاماك الياباني JT-60SA البلازما لأول مرة. والجهاز الذي يبلغ ارتفاعه أربعة طوابق مصمَّم لاحتجاز البلازما بعد تسخينها إلى 200 مليون درجة مئوية لمدة 100 ثانية تقريباً، وهي فترة أطول كثيرا مما كانت تكفله أجهزة التوكاماك الكبيرة في السابق. وستكون البلازما في جهاز JT-60SA متشابهة إلى حد كبير مع البلازما المخطط لاستخدامها في مفاعل إيتير، ومن المتوقع أنها ستسمح للفيزيائيين بدراسة استقرار البلازما وكيفية تأثيرها على إنتاج طاقة الاندماج على نطاقات زمنية طويلة، ومن ثم استخلاص دروس يمكن تطبيقها في جهاز التوكاماك الأكبر حجماً. وفي اليابان أيضاً، رُكِّب في عام 2023 النموذج الأولي للمعجِّل الخطي في المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية في روكاشو باليابان.



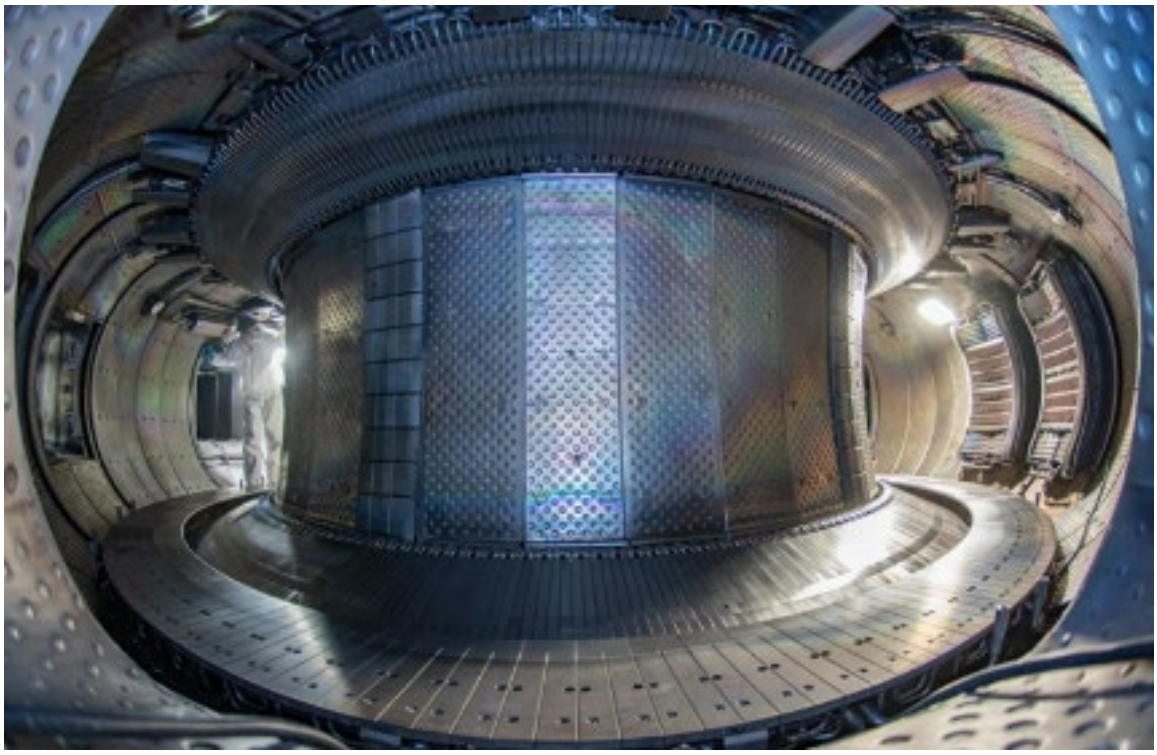
*الشكل- دال-3- الجهاز JT-60SA هو أكبر جهاز توكاماك قيد التشغيل، وقد تم تصميمه وتشييده بالاشتراك بين اليابان والاتحاد الأوروبي. (المصدر: المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم في اليابان)*



*الشكل دال-4- المدير العام للوكالة رافائيل ماريانو غروسي أثناء زيارة النموذج الأولي للمعجل الخطي في المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية بمعهد روكاشو للاندماج خلال زيارته الرسمية إلى اليابان.*
*(المصدر: المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم في اليابان)*

112- وأجرى مرفق التوكاماك البحثي المتقدِّم الفائق التوصيل في الصين (مرفق EAST) عملية احتواء محكم للبلازما في حالة مستقرة لمدة طويلة تبلغ 403 ثوانٍ. ويمثل هذا الإنجاز تحسناً ملحوظاً عن الرقم القياسي الأول البالغ 101 ثانية، والذي سجله مرفق EAST في عام 2017. وزادت درجة حرارة وكثافة الجسيمات بشكل كبير أثناء عملية الاحتواء المحكم للبلازما، مما سيحسِّن كفاءة توليد القوى الكهربائية في محطات توليد القوى الاندماجية المستقبلية. كما أن جهاز التوكاماك HL-3 في الصين عمِل لأول مرة في وضع الاحتواء المحكم في ظل وجود تيار بلازما بلغت شدته مليون أمبير، ويُعزى ذلك إلى التطوير الذي شهدته نظم التدفئة والتشغيل والتحكم والتشخيص والإمداد بالقوى الكهربائية.

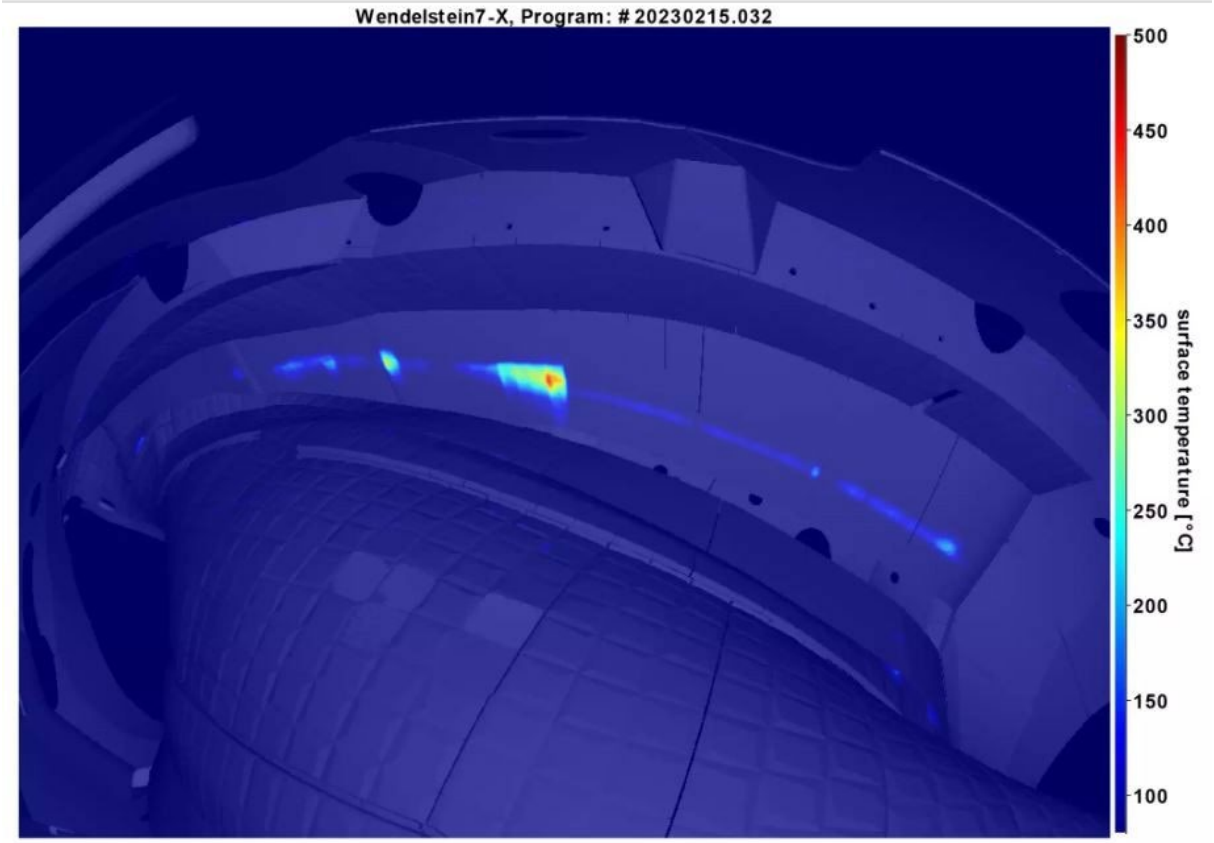
113- وفي عام 2023، بدأ التوكاماك الفرنسي WEST تشغيلَ محرِّف التنغستن الخاص به. وأطلقت حملة تجريبية أولى نتج عنها تدفق نيوتروني عالٍ من خلال سلسلة متعاقبة من نبضات البلازما استمرت حوالي دقيقة واحدة وذلك بهدف إظهار مدى مقاومة وأداء هذ المكوّن الجديد.



*الشكل- دال-5- توكاماك WEST المجهز بمحرّف التنغستن المبرَّد اضطراريا (المصدر: المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة)*

114- وبعد 40 عاماً من التشغيل وإجراء آخر تجارب الديوتيريوم والتريتيوم طوال عام 2023، بدأ إخراج مرفق الطارة الأوروبية المشتركة من الخدمة وسيستمر العمل على ذلك حتى عام 2040 تقريباً. وسيتيح إخراج مرفق الطارة الأوروبية المشتركة من الخدمة معلومات قيّمة للأوساط المعنية بالاندماج من خلال تمكين تحليل كيفية تغيُّر المواد داخل الوعاء بمرور وقت التشغيل.

115- وتمكَّن الباحثون في مرفق فندلشتاين X-7 في ألمانيا، وهو أكبر مرفق ستلاريتور في العالم، من تحقيق عائد مرتفع من الطاقة يبلغ 1,3 غيغاجول. وفي المستقبل، يهدف مرفق فندلشتاين X-7 إلى الوصول إلى تحقيق عائد طاقة يبلغ 18 غيغاجول، مع الحفاظ على استقرار البلازما لمدة نصف ساعة.



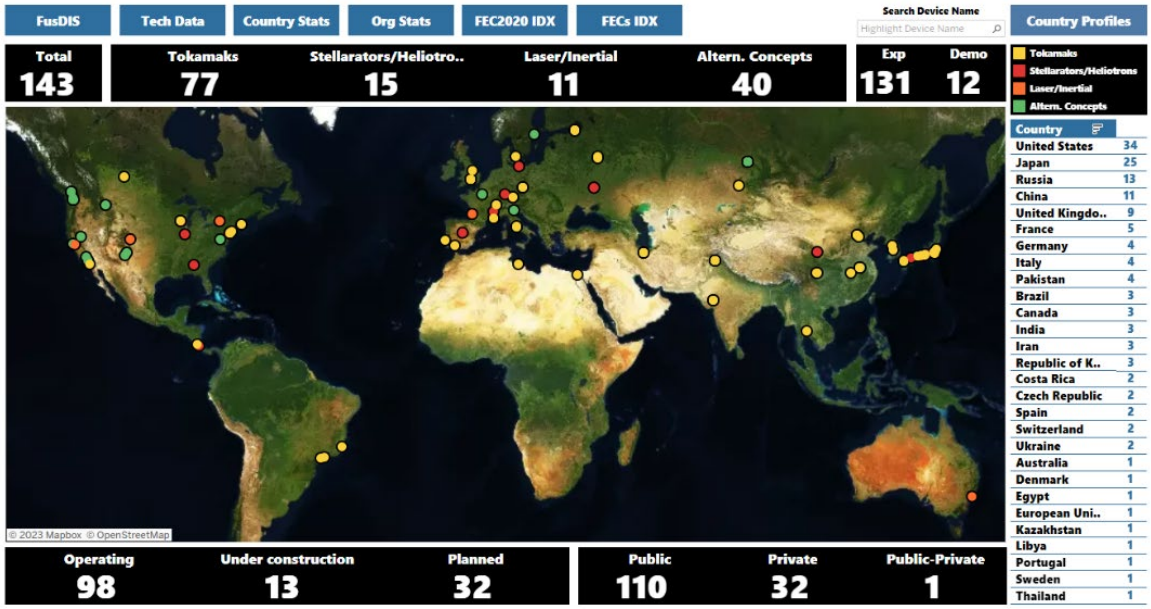

*صورة بالأشعة تحت الحمراء من الوعاء الفراغي في مرفق فندلشتاين 7-X، تظهر توزيع درجة الحرارة على عوارض المجّرف المبرَّد بالماء. ويمكن بوضوح رؤية خط محدَّد في المركز يُطلق عليه خط الاصطدام. وهذا هو المكان الذي تلامس فيه البلازما المحرّف وتكون الحرارة في أعلى درجاتها. وفي المناطق الفردية، تصل درجات الحرارة إلى 600 درجة مئوية (المناطق الحمراء). ويمكن أن يتحمل بلاط المحرّف درجات حرارة تصل إلى 1200 درجة مئوية. (المصدر: معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما)*

116- وفي عام 2023، واصلت المنظمةُ المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (المنظمة المعنية بمفاعل إيتير) ووكالاتُها المحلية المضي قدماً صوب وضع خط أساس محسَّن للمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير) ينطوي على تغيير مواد الجدار الأول من البريليوم إلى التنغستن وهو ما من المتوقع أن يعزّز مرونة المكونات داخل الوعاء مع تقليل كمية التريتيوم الموجودة داخل الجهاز. وقد أُحرِزَ تقدُّم بشأن أعمال إصلاح المكونات الرئيسية وكذلك بشأن الأعمال الجارية فيما يتعلق بالتصنيع والتجميع والتركيب، في حين واصلت المنظمة المعنية بمفاعل إيتير أيضاً العمل مع هيئة الأمان النووي في فرنسا بشأن إدماج نهج تدريجي إزاء الترخيص يشمل ثلاث مراحل تشغيلية تجريبية، تُلبي كل منها معالم مرحلية محدَّدة ومتطلبات الأمان اللازمة لتوجيه مشروع إيتير نحو الاكتمال بنجاح. كما شدد أعضاء المجلس على القيمة العالية لمشروع إيتير ومهمته.

117- 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 المتقدِّمة لأغراض مشروع محطات قوى الاندماج الإيضاحية. ويتألف الاتحاد المضطلع بتنفيذ هذا المشروع من العديد من المؤسسات البحثية الإيطالية والشركاء الدوليين، بما في ذلك واحدة من أكبر شركات الطاقة في العالم، وقد تمكَّن من جمع ما يقرب من 500 مليون يورو لتشييد هذا المرفق. وتتمثل المهمة الأساسية لمرفق اختبار التوكاماك القائم على المحوّل

الحراري في استكشاف واختبار الفيزياء والتكنولوجيا المتعلقة بمفاهيم القوى المنبعثة من البلازما التي يمكن استخدامها في محطة قوى الاندماج الإيضاحية الأوروبية.

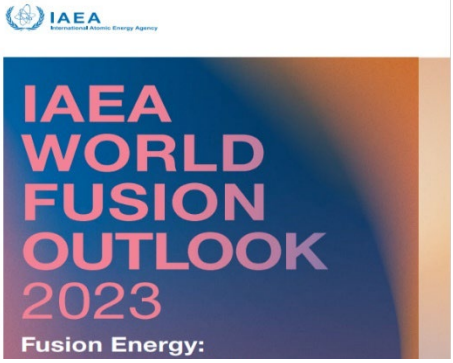
118- والهدف من محطات قوى الاندماج الإيضاحية هو إثبات إمكانية توليد مكسب صاف من الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الاندماج. وهناك على الأقل 12 مفهوماً من هذا القبيل في مراحل مختلفة من التطوير في الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان، ويتراوح الموعد المستهدف للانتهاء منها بين عامي 2030 و2050. وتطور هذه المفاهيم فرادى الحكومات والشركات الخاصة وبعض المشاريع المشتركة بين القطاعين العام والخاص (الشكل دال-4).




*الشكل-دال-6- يوجد حاليًا قيد التشغيل أو التشييد أو التخطيط ما يزيد على 140 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 التابع للوكالة).*

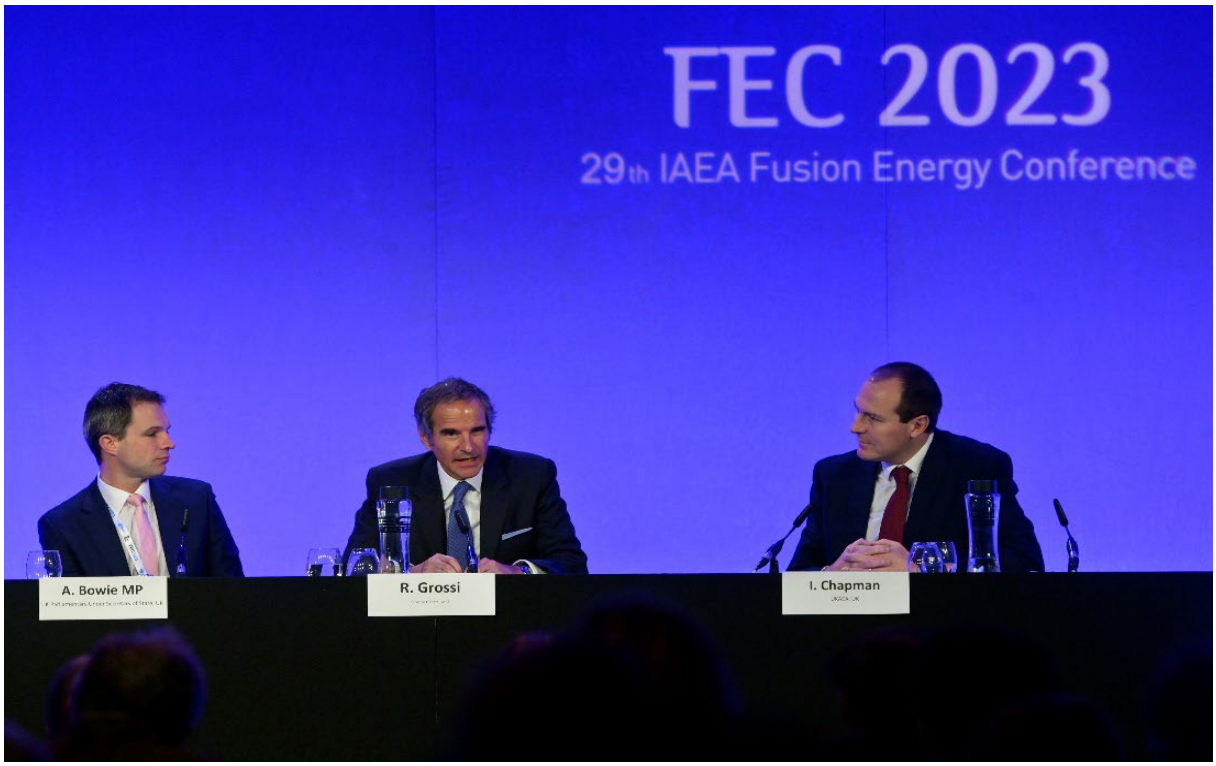
**الاتجاهات**

119- في مؤتمر الوكالة التاسع والعشرين للطاقة الاندماجية، الذي نظمته الوكالة وحكومة المملكة المتحدة في لندن في تشرين الأول/أكتوبر 2023، قدَّم المدير العام أول عدد تصدره الوكالة من المنشور المعنون "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج"، وهو مرجع عالمي للمعلومات الموثوقة عن آخر التطورات في مجال الطاقة الاندماجية، وأعلن أيضاً عن الاجتماع الافتتاحي للفريق العالمي المعني بالطاقة الاندماجية، الذي سيعقد في عام 2024. وخلال المؤتمر، أعلنت المملكة المتحدة عن برنامج آفاق الاندماج، والذي سيشهد استثمار 650 مليون جنيه إسترليني (793 مليون دولار أمريكي) إضافية على مدى السنوات الخمس المقبلة في حزمة من برامج البحث والتطوير، بما في ذلك إنشاء 2200 مكان تدريب، ومرفق جديد لاختبار دورة الوقود، وتمويل لتطوير البنية الأساسية للشركات الخاصة للطاقة الاندماجية، ولا سيما في حرم كولهام التابع لهيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة. وجاء هذا




طالعوا المزيد عبر الرمز

الإعلان في أعقاب قرار المملكة المتحدة بمغادرة برنامج البحوث والتدريب التابع للجماعة الأوروبية للطاقة الذرية. وبعد بضعة أسابيع، أعلنت وزارة أمن الطاقة والوصول بصافي الانبعاثات إلى مستوى الصفر في المملكة المتحدة ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة عن شراكة استراتيجية جديدة لتسريع وتيرة إثبات جدوى استخدام طاقة الاندماج والترويج التجاري لها، تركِّز على تطوير الاستراتيجيات الوطنية للطاقة الاندماجية لدى كلٍ من البلدين.




*الشكل- دال-7- حفل افتتاح مؤتمر الوكالة التاسع والعشرين للطاقة الاندماجية في لندن. من اليسار: السيد أندرو باوي، وكيل الوزارة البرلماني (وزير شؤون الطاقة النووية والشبكات) في وزارة أمن الطاقة والوصول بصافي الانبعاثات إلى مستوى الصفر؛ والسيد رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة؛ والسيد إيان تشابمان، الرئيس التنفيذي لهيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة. (المصدر: الوكالة)*

120- وفي الوقت نفسه، في ألمانيا، أعلنت الوزارة الاتحادية للتعليم والبحوث أنها ستوفِّر أكثر من مليار يورو لبحوث الاندماج بحلول عام 2028، بالإضافة إلى 370 مليون يورو (396 مليون دولار أمريكي) المخصصة بالفعل للمؤسسات البحثية على مدى السنوات الخمس المقبلة.

121- واعتمدت اليابان استراتيجيتها الوطنية الأولى بشأن الطاقة الاندماجية، مشددة على الحاجة إلى إنشاء صناعة محلية في مجال الطاقة الاندماجية تنطوي على مشاركة أوسع للقطاع الخاص في البحث والتطوير في مجال الطاقة الاندماجية. وأعلنت الحكومة اليابانية أيضاً أنها ستنشئ مجلساً لصناعة الطاقة الاندماجية لتطوير الصناعات ذات الصلة، فضلاً عن وضع مبادئ توجيهية لتنظيم تكنولوجيا الطاقة الاندماجية. وبالإضافة إلى ذلك، ستعطي الحكومة الأولوية لتعليم الطاقة الاندماجية في الأوساط الأكاديمية.

122- وقَدَّمَ المكتب المعني بعلوم طاقة الاندماج والتابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة رؤيته عبر إصداره منشوره المعنون "Building Bridges" الذي يُوضِّح ثلاثة عناصر رئيسية هي: 1) تنمية القوى العاملة واستمراريتها — ضمان إنشاء مسارات مستدامة ومرنة لأصحاب المواهب المتنوعة والاستثنائية؛ و2) سد الثغرات — استحداث محركات للابتكار بالاشتراك مع المختبرات الوطنية، والجامعات، وقطاع الصناعة من

أجل سد الثغرات في مجال البحث والتطوير ودعم سلاسل الإمداد المحلية بالنسبة إلى طاقة الاندماج؛ و3) العلوم التحويلية — تعزيز الاكتشافات في مجال علوم وتكنولوجيا البلازما مما يسهم في ترجمتها إلى أثر في مجال الابتكار. وتُعَدُّ هذه الرؤية جزءا من استراتيجية اندماج شاملة تهدف إلى جعل أنشطة القطاعين الخاص والعام تتلاقى ضمن مسار البحث والتطوير في مجال الاندماج.

123- وتحظى شركات القطاع الخاص باهتمام واستثمارات متزايدة في مجال طاقة الاندماج، حيث يهدف العديد منها إلى تطوير أجهزتها الخاصة للبحث والإيضاح بصورة مستقلة. وأعلنت شركة Helion، وهي شركة خاصة في الولايات المتحدة، عن إبرام اتفاق مع شركة مايكروسوفت لتزويد الأخيرة بالكهرباء من أول محطة قوى اندماجية تنشئها، ويُتوقع بدء تشغيل هذه المحطة بحلول عام 2028 وتستهدف توليد 50 ميغاواطا من الكهرباء. وأعلنت شركة Helion أيضاً عن جهد تعاوني مع شركة Nucor لتطوير محطة اندماجية بقدرة 500 ميغاواط لتوفير الكهرباء لمصنع صلب تابع للأخيرة، ويُستهدف بدء تشغيل المحطة في عام 2030.

124- وفي ظل التطور السريع الذي تشهده الطاقة الاندماجية، بدأت الشراكات تتبلور بين القطاعين العام والخاص. وفي أيار/مايو 2023، أعلنت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة عن تمويل بقيمة 46 مليون دولار أمريكي لثماني شركات خلال الأشهر الثمانية عشر الأولى من تطوير التصميمات وأنشطة البحث والتطوير لمحطات القوى الاندماجية، في إطار برنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية. وكانت الشركات المختارة من بين شركات متعددة قدمت مقترحات توضح بالتفصيل خطط طرح طاقة الاندماج بشكل تجاري في السوق، ولن تحصل هذه الشركات على الأموال المنفقة إلا بعد تحقيق معالم مرحلية تُحدَّد مسبقاً للترويج التجاري وتثبُّت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة من ذلك. وفي سياق الدعوة لتقديم المشاريع في إطار برنامج "فرنسا 2030"، أسنِد إلى إحدى الشركات مشروع تطوير مفاعل اندماج من نوع سِتلّلاريتُور.

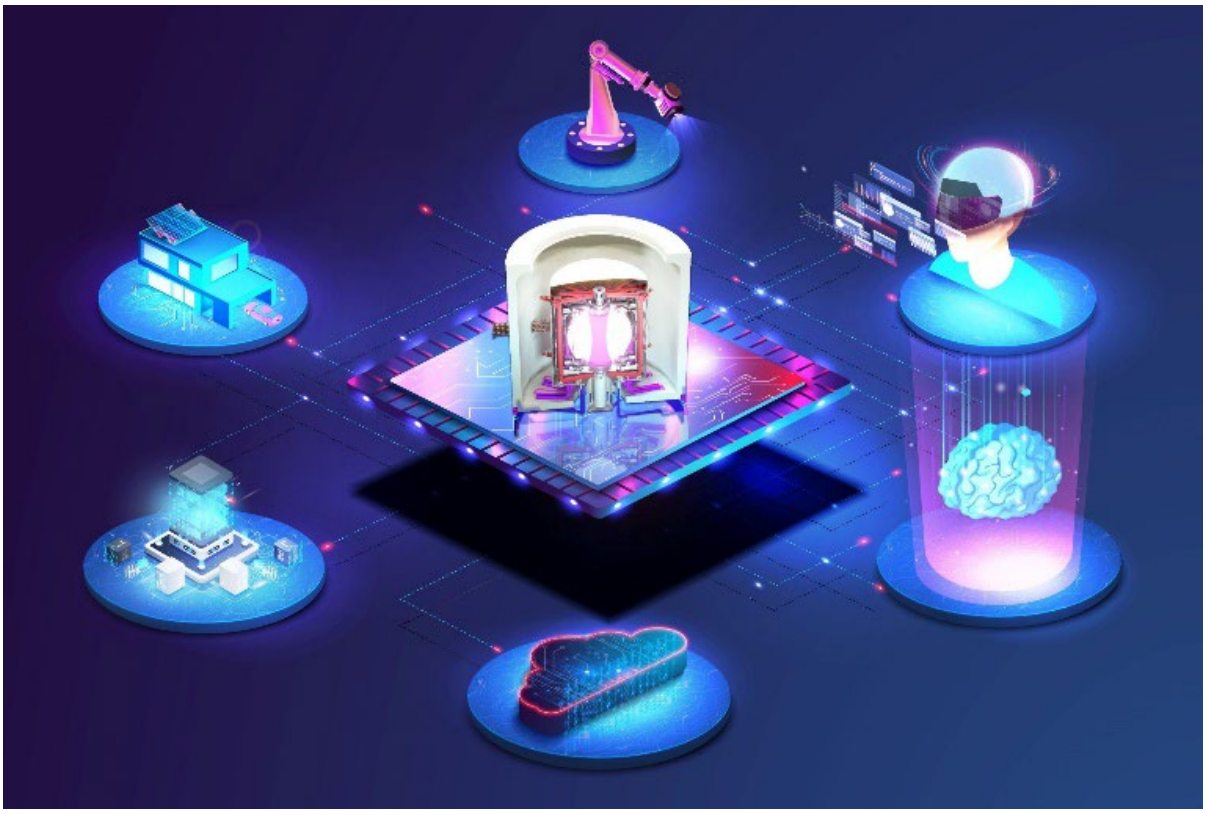
125- وتشهد صناعة الطاقة الاندماجية بشكل عام زيادات سنوية في التمويل. ويبيّن التقرير السنوي بشأن صناعة الاندماج الصادر عن رابطة صناعة الاندماج المعنون *The global fusion industry in 2023* (صناعة الاندماج على الصعيد العالمي في عام 2023)، وهو التقرير الثالث من نوعه، أن صناعة الطاقة الاندماجية قد اجتذبت الآن ما مجموعه 6,21 مليارات دولار أمريكي من الاستثمارات (بعد أن كانت 4,8 مليارات دولار أمريكي في عام 2022). وشمل التقرير 43 شركة خاصة عاملة في مجال الطاقة الاندماجية، منها شركات قائمة وأخرى مستجدة. وعلى الرغم من أن الولايات المتحدة الأمريكية لا تزال تتصدر هذا المجال، مع وجود 25 شركة عاملة في مجال الطاقة الاندماجية (منها العديد من الشركات الكبرى)، فإن الصناعة أصبحت أكثر تنوعاً من الناحية الجغرافية، مع وجود شركة واحدة على الأقل تعمل في مجال الطاقة الاندماجية في 12 بلداً.

126- كما بدأت الهيئات الرقابية والمشرّعون في معالجة التحديات والفرص المرتبطة بالطاقة الاندماجية. وفي عام 2023، كانت كاليفورنيا أول ولاية في الولايات المتحدة الأمريكية تعترف بطاقة الاندماج كتكنولوجيا منفصلة ومتميزة عن طاقة الانشطار النووي. وسلط التشريع الضوء على مزايا الأمان والمزايا البيئية التي تتحلى بها الطاقة الاندماجية، وأرسى الأساس للوائح التي ستضعها الدولة في المستقبل. وجاء ذلك بعد تصويت الهيئة الرقابية النووية بالإجماع على فصل تنظيم طاقة الاندماج عن طاقة الانشطار النووي وتنظيم نظم طاقة الاندماج على المدى القريب في إطار المواد الثانوية (مثل معجِّلات الجسيمات).

127- وأكدت حكومة المملكة المتحدة أن وكالة البيئة والسلطة التنفيذية المعنية بالصحة والأمان هما من سيواصلان تنظيم جميع مرافق الطاقة النموذجية للاندماج المخطط لها في المملكة المتحدة، على عكس محطات القوى النووية التي يتولى تنظيمها مكتب الرقابة النووية.

128- وبالإضافة إلى ذلك، أصدر الفريق العامل المعني بالطاقة الاندماجية التابع لشبكة المرونة الأممية (Agile Nations)، والذي يضمُّ كندا والمملكة المتحدة واليابان، كأعضاء، والبحرين وسنغافورة كمراقبين، توصيات مشتركة تقرُّ بالمساهمة المهمة التي يمكن أن تضيفها طاقة الاندماج في مواجهة التحديات العالمية لتغيُّر المناخ وأمن الطاقة، فضلاً عن فوائد اتباع نهج منسق في لوائح تنظيم طاقة الاندماج الجاري اعتمادها من العديد من البلدان؛ وتدعو إلى الوضوح عند وضع إطار رقابي ينطبق على مرافق الطاقة الاندماجية بصرف النظر عن التكنولوجيا المستخدمة في الاندماج بما يكفل توفير حماية مناسبة للناس والبيئة، على نحو يتناسب مع مخاطر طاقة الاندماج، ومع الحفاظ على الشفافية ودعم الابتكار.

129- كما زادت درجة الاهتمام بالحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي و "الميتافيرس الصناعي". وفي عام 2023، أُعلِن عن جهد تعاوني بين هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة وشركة Dell Technologies وشركة إنتل وجامعة كامبريدج. ويهدف هذا التعاون إلى استكشاف كيف يمكن لأجهزة الحواسيب الفائقة وتقنيات الذكاء الاصطناعي ذات القدرات التنبؤية المتقدمة أن تقدم توأماً رقميًّا لجهاز التوكاماك الكُروي لإنتاج الطاقة - النموذج الأولي لتصميم محطة القوى الاندماجية في المملكة المتحدة. وبالإضافة إلى ذلك، أعلنت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة عن تمويل بقيمة 29 مليون دولار أمريكي يُمنح لسبعة فرق بحثية تعمل في مجال التعلُّم الآلي والذكاء الاصطناعي وموارد البيانات لأغراض علوم الطاقة الاندماجية. وكان مركز علوم البلازما والاندماج التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أحد المستفيدين السبعة، حيث تلقى 5 ملايين دولار أمريكي كتمويل لمشروع أقرته الوكالة بعنوان *Open and FAIR Fusion for Machine Learning Applications* (الاندماج المفتوح والعادل لتطبيقات التعلُّم الآلي). ويتماشى هذا المشروع مع الاتفاق المبرم بين الوكالة والمركز المتعاون التابع لمركز علوم البلازما والاندماج ومع المشروع البحثي المنسق للوكالة المعنون "تسخير الذكاء الاصطناعي لتسريع وتيرة البحث والتطوير في مجال الاندماج"، الذي يضطلع المركز المذكور بدور المنسق التقني له.



*الشكل-دال-8- ستعزِّز الحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي و"الميتافيرس الصناعي" تطوير جهاز التوكاماك الكُروي لإنتاج الطاقة - النموذج الأولي لمحطة القوى الاندماجية في المملكة المتحدة. (المصدر: هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة)*

# هاء- مفاعلات البحوث، ومعجِّلات الجسيمات، والأجهزة النووية

## هاء-1- مفاعلات البحوث

### الحالة

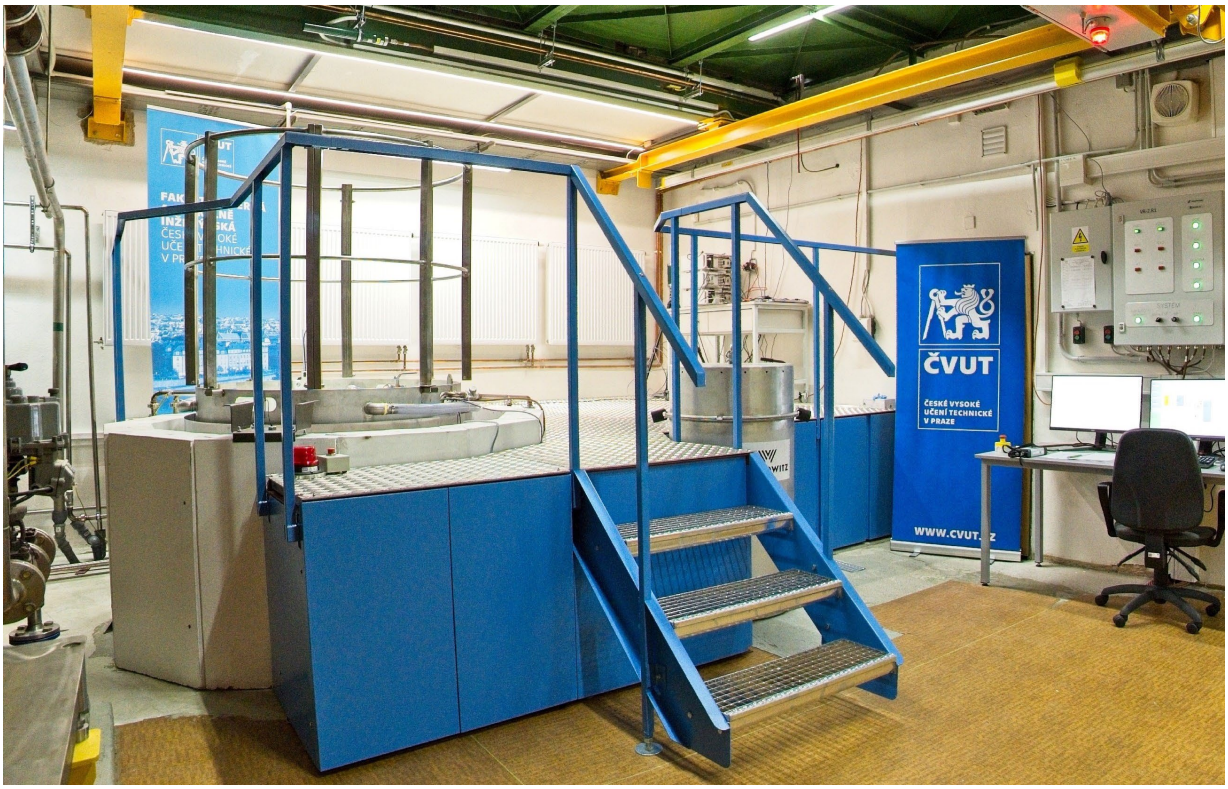
130- في نهاية عام 2023، كان عدد المفاعلات البحثية العاملة، بما فيها المفاعلات قيد الإغلاق المؤقت، يبلغ 234 مفاعلا في 54 بلداً. واستمرت مفاعلات البحوث هذه في توليد حزم نيوترونية؛ وتوفير خدمات التشعيع التي لا غنى عنها للعلوم والطب والصناعة؛ وتعزيز برامج التعليم والتدريب. ويُبيّن الجدول هاء-1 في المرفق التطبيقات الأكثر شيوعاً لمفاعلات البحوث.

131- وإنَّ أقل من 10% من أسطول مفاعلات البحوث في العالم مسؤول مسؤولة عن تزويد معظم السوق العالمية بالنظائر المشعة الطبية المهمة، مثل التكنيتيوم-99 شبه المستقر، أو اليود-131، أو اللوتشيوم-177، أو الهولميوم-166، وعن اختبار الوقود النووي والمواد الهيكلية لمفاعلات القوى المتقدمة في المستقبل، إلى إقامة عدة مشاريع لإنشاء مفاعلات بحوث جديدة عالية القدرة ومتعددة الأغراض. ومن الأمثلة على ذلك مفاعل البحوث RA-10 الذي شارف على الاكتمال في الأرجنتين، ومواصلة تشييد مفاعل كي - جانغ للبحوث في جمهورية كوريا، ومفاعل جول هورويتز في فرنسا، الذي تمت الموافقة على مواصلة الاستثمار فيه بهدف استكمال أعمال تشييده، ومفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض في الاتحاد الروسي؛ والإعلان عن التمويل الكامل وبدء أعمال التشييد التحضيرية لمفاعل بالاس في هولندا؛ وتجديد الالتزام الحكومي تجاه المفاعل البرازيلي المتعدد الأغراض في البرازيل؛ والتأييد الحكومي مؤخراً لاستبدال المفاعل سافاري-1 البالغ من العمر

58 عاماً في جنوب أفريقيا.

132- وإجمالاً، هناك 11 مفاعلاً جديداً للبحوث، بما في ذلك نظام واحد يعمل بواسطة المعجّلات، قيد الإنشاء في 10 بلدان: الاتحاد الروسي، والأرجنتين، وأوكرانيا، والبرازيل، وجمهورية إيران الإسلامية، وجمهورية كوريا، ودولة بوليفيا المتعددة القوميات، والصين، وفرنسا، والمملكة العربية السعودية. وفي عام 2023، بدأ تشغيل المرفق النووي الجديد دون الحرج، VR-2، في جمهورية التشيك.

*الشكل-هاء-1-أ- يوشك تشييد مفاعل البحوث RA-10 على الاكتمال في الأرجنتين. (المصدر: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية في الأرجنتين)*




*الشكل-هاء-1-ب- بدأ تشغيل المرفق النووي دون الحرجة VR-2 في عام 2023 في جمهورية التشيك. (المصدر: الجامعة التقنية التشيكية)*

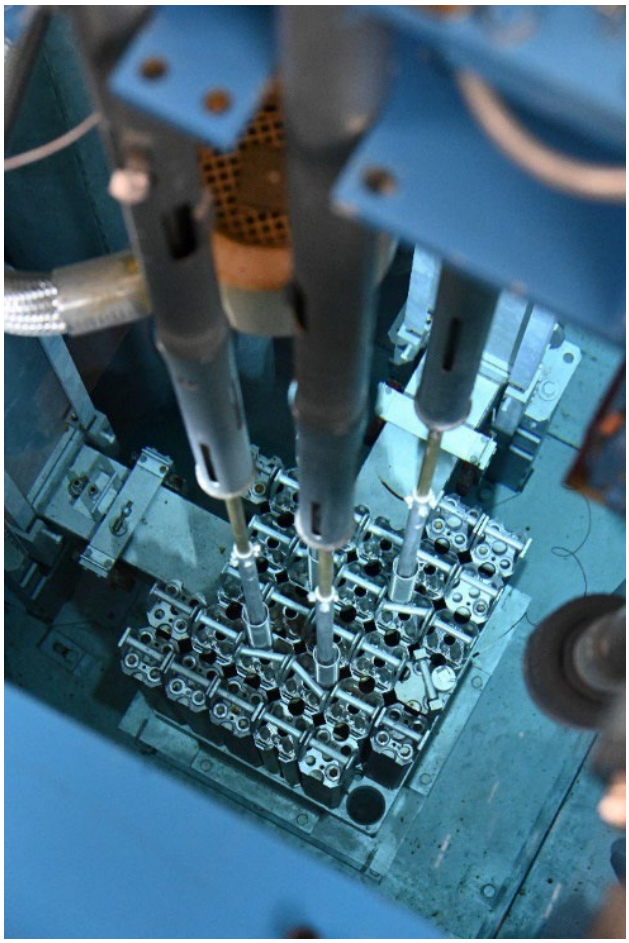
133- وفي نهاية عام 2023، كان لدى 14 دولة عضواً خطط رسمية لتشييد مفاعلات بحوث جديدة، وهي بلجيكا وبنغلاديش وبيلاروس وتايلند وجنوب أفريقيا وزامبيا والصين وطاجيكستان والفلبين وفييت نام ونيجيريا والهند وهولندا والولايات المتحدة الأمريكية. وهناك عدد كبير من البلدان التي تنظر في تشييد مفاعلات بحوث، وهي تحديداً إثيوبيا، وأذربيجان، وأوغندا، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، ورواندا، والسنغال، والسودان، والعراق، والفلبين، وكينيا، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، والنيجر، والهند.

134- واستمرت الجهود الدولية الرامية إلى التقليل إلى أدنى حد من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع المدني. ومع التحويل الكامل من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء في إنتاج الموليبدينوم-99 في بلجيكا، استخدم جميع المنتجين العالميين الرئيسيين لهذا النظير المشع الطبي المطلوب بشدة أساليب إنتاج خالية من اليورانيوم الشديد الإثراء منذ نيسان/أبريل 2023. وإجمالاً، تم حتى الآن تحويل 109 مفاعلات بحوث ومرافق رئيسية لإنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكَّد إغلاقها، وأُعيدت 6925 كيلوغراماً من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلدان منشئها أو جرى التخلص منها بطريقة أخرى من 48 بلداً (وتايوان، الصين).

**الاتجاهات**

135- تعمل الدول الأعضاء على زيادة استخدام مفاعلات البحوث العاملة لديها لدعم انتقال الطاقة وإزالة الكربون في إطار الهدف 7 من أهداف التنمية المستدامة (طاقة نظيفة وبأسعار معقولة). وتُستخدم تقنيات النيوترونات، مثل التصوير النيوتروني وتقنية تحديد الخصائص العميقة باستخدام النيوترونات، لتحديد خصائص

خلايا وقود الهيدروجين وبطاريات الليثيوم أيون. ويُستخدم عدد من مفاعلات البحوث لتشعيع واختبار المواد الهيكلية والوقود، وهي أنشطة أساسية لتطوير مفاهيم جديدة للطاقة الانشطارية والاندماجية النووية ولدعم الاهتمام المتجدد بالبحث والتطوير والإيضاح في المجال النووي الذي ظهر في عدة بلدان، بما فيها الولايات المتحدة الأمريكية. ويتمتع مفاعل التصوير الإشعاعي النيوتروني التابع لمختبر أيداهو الوطني بقدرات تجريبية فريدة لتحليل العينات القوية الإشعاع بشكل روتيني، مما يُمكِّن الموظفين من إجراء البحوث على الوقود النووي المشعَّع والمواد الهيكلية، مما يساعد على تطوير حلول ابتكارية قائمة على الطاقة النووية. ونقَّح مختبر أيداهو الوطني استراتيجيته في عام 2023، من أجل السعي بنشاط إلى توسيع نطاق استخدام مفاعل التصوير الإشعاعي النيوتروني للمساعدة في تطوير حلول ابتكارية قائمة على الطاقة النووية.



*الشكل-هاء-2- صورة لقلب مفاعل التصوير الإشعاعي النيوتروني مع معداته الداخلية للأبحاث المتعلقة بالمواد في مختبر أيداهو الوطني. (المصدر: مختبر أيداهو الوطني)*

136- كما يعمل مفاعل البحوث التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا على زيادة قدراته لتوسيع أنشطته في مجال تشعيع المواد ذات الصلة بالانشطار النووي والاندماج، لاستكمال عمل مختبر أيداهو الوطني وغيره من مرافق البحوث النووية الأمريكية. ودعمت الوكالة كلتا المؤسستين في مشاريعهما التوسعية من خلال بعثات الاستعراض المتكامل لاستخدام مفاعلات البحوث التي أُوفدت في منتصف عام 2023.

137- ولا يزل اختبار تكنولوجيات المفاعلات المتقدمة أحد التطبيقات المهمة في مجال مفاعلات البحوث. ويستعد الاتحاد الروسي لتشييد أول مفاعل بحثي في البلد يعمل بالأملاح المصهورة بقدرة 10 ميغاواطات وذلك

لإثبات الجدوى العملية لتكنولوجيا وقود الأملاح المصـــهورة وحرق الأكتينات الثانوية. ومن المتوقع الحصـــول على رخصة التشييد في عام 2027.

138- وقد دفع التقادم التدريجي لأســـطول مفاعلات البحوث في جميع أنحاء العالم المشـــغِّلين والرقابيين نحو اعتماد تقنيات ومنهجيات جديدة لتقييم ظروف تشـــغيل مفاعلات البحوث من أجل مواصـــلة التشـــغيل المأمون. وإحدى هذه المنهجيات هي تحليل التقادم المحدود الوقت، الذي يهدف إلى تقييم ظروف التشـــغيل والعمر المتبقي للنظم والهياكل والمكونات، ولا ســـيما تلك التي تنطوي على تكاليف عالية للفحص والاســـتبدال ولها تأثير كبير على الجاهزية التشـــغيلية للمفاعل. وقد طُبِّق بنجاح تحليل التقادم المحدود الوقت دعماً للتشـــغيل الطويل الأجل لمحطات القوى النووية. وقد بدأ العديد من مشـــغِّلي مفاعلات البحوث بالفعل في اســـتخدام تحليل التقادم المحدود الوقت لدعم تمديد تراخيص تشـــغيل تلك المفاعلات. ونظراً للاختلافات القائمة بين مفاعلات البحوث ومفاعلات القوى، فإن تطبيق تحليل التقادم المحدود الوقت على مفاعلات البحوث يتطلب نهجاً متدرجاً مناسباً. ويجري حاليًّا النظر في بذل جهد مشترك لوضع منهجية مشتركة تنطبق على جميع الدول الأعضاء.

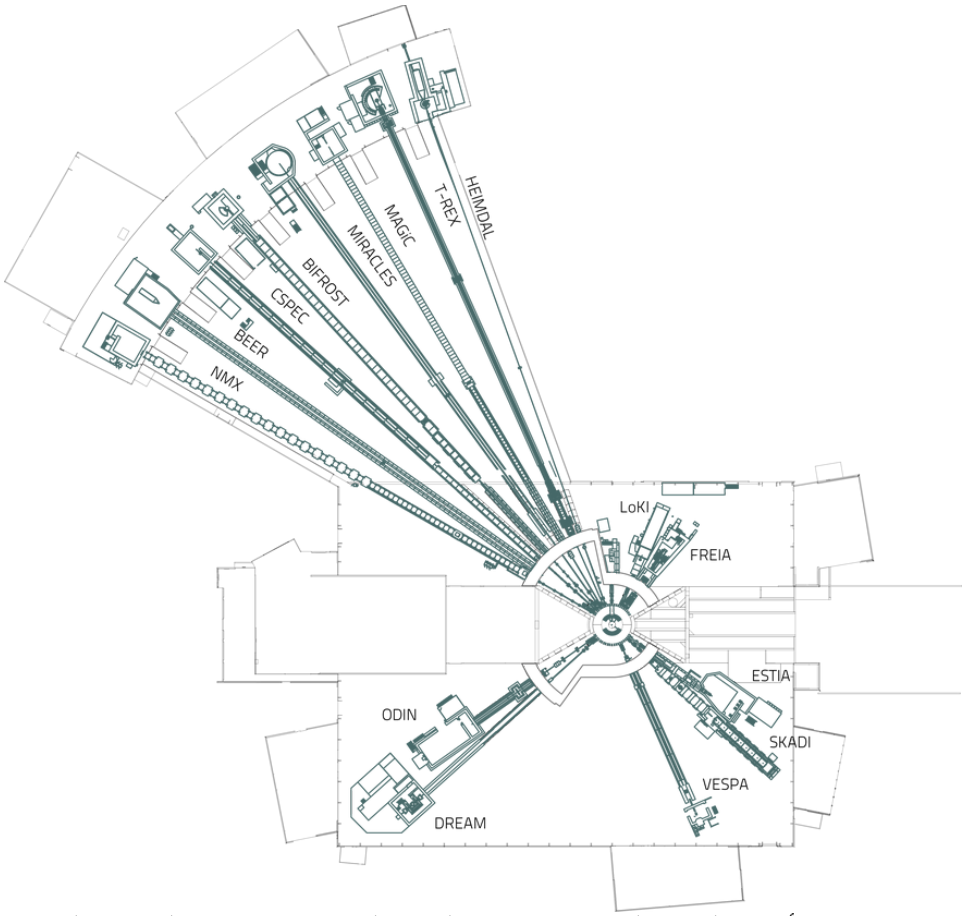
139- وتســـتفيد بلدان كثيرة من فرص الوصـــول إلى مفاعلات البحوث من خلال مبادرات التعاون الدولية والإقليمية، مثل مخطَّط المراكز المســـمَّاة من الوكالة باعتبارها مراكزَ دوليةً قائمةً على مفاعلات بحوث. ويوجد حاليًّا سبعة مراكز من هذا القبيل في أربع قارات، جرى تسمية آخر مركز منها في المغرب، في عام 2023.

## هاء-2- معجِّلات الجسيمات

### الحالة

140- تعتمد الدراســـات العلمية التفصـــيلية، في كل شـــيء من المحركات والأدوية إلى المواد البلاســـتيكية والبروتينات، على عدد النيوترونات التي يمكن إنتاجها وإتاحتها للباحثين من خلال مصـــدر نيوتروني. ولذلك، بالإضـافة إلى مفاعلات البحوث، واصـل العلماء والمهندسـون تطوير جيل جديد من مصـادر النيوترونات القائمة على معجِّلات الجسيمات وتكنولوجيا أهداف التشظي. وفي عام 2023، تقدمت بشكل مطرد مرحلة تشييد مرفق مصدر التشظية الأوروبي، أحد أكبر مشاريع البُنى الأساسية للعلوم والتكنولوجيا في العالم. وبالإضافة إلى ذلك، قُطِع شـوط كبير في إدخال أقوى معجِّل بروتونات خطي شُـيِّد على الإطلاق في الخدمة، وهو عجلة مسـتهدّفة من التنغســـتن المبرَّدة بالهيليوم، فضـــلاً عن أحدث الأجهزة النيوترونية المرتبطة بها، وذلك من خلال التعاون بين الدول الأعضـــاء والعديد من المســـاهمات العينية. ومن بعض المعالم المرحلية الرئيســـية التي تحقَّقت مؤخراً في مرفق مصـــدر التشـــظية الأوروبي الانتهاء من إدخال معجِّل بروتونات في الخدمة وتركيب التدريع الدائم للوعاء الأحادي الكتلة المستهدف بالإضافة إلى أداة التهدئة والعجلة المستهدّفة الدوارة لإنتاج النيوترونات. وبالتوازي مع ذلك، أُحرِز تقدم كبير في تركيب التجهيزات التجريبية المتطورة في 15 من خطوط الحزم النيوترونية المتطورة المختارة وأجهزة التشتت (وتسمى أيضاً المحطات النهائية للحزم النيوترونية).[5]

[5] الصفحة الشبكية الخاصة بأجهزة مرفق مصدر التشظية الأوروبي: https://europeanspallationsource.se/instruments

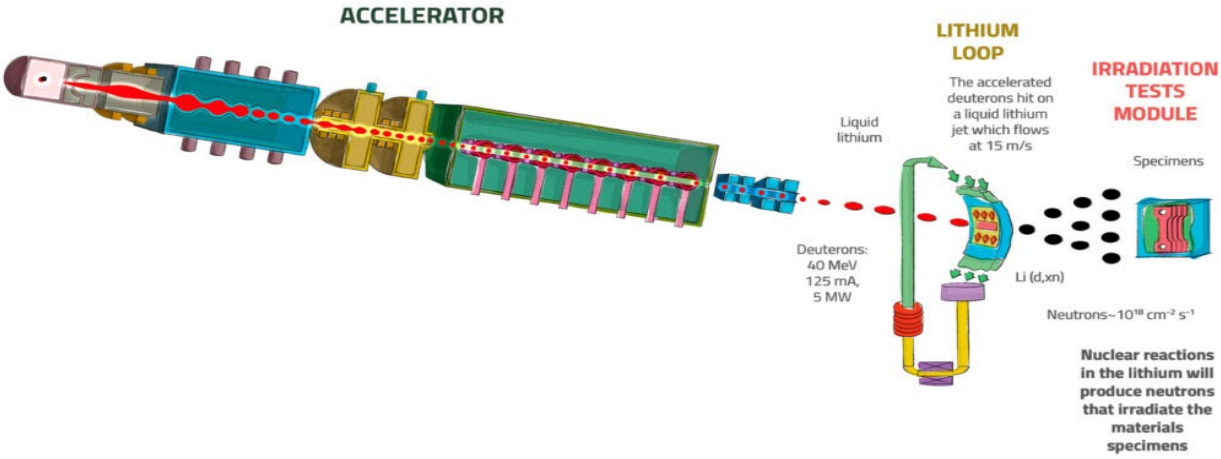



*الشكل-هاء-3- مجموعة من أجهزة التشتت النيوتروني وقياس الطيف التي يمكنها استخدام المصادر النيوترونية القائمة على المعجّلات من الجيل التالي في مرفق مصدر التشظية الأوروبي. (المصدر: مرفق مصدر التشظية الأوروبي)*

141- وفي أوائل عام 2023، خلال الاجتماع الأول للجنة التوجيهية[6] لبرنامج المصدر النيوتروني الإيضاحي التابع للمرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية (مرفق IFMIF-DONES)، وهي أعلى هيئة إدارية معنية بالبرنامج، أُعلِن رسميا عن دخول البرنامج مرحلة التشييد في إسكوزار بغرناطة في إسبانيا. وهذا معلم مرحلي مهم في تطوير برنامج الاندماج الدولي، الذي يقوم على ثلاث ركائز رئيسية هي: مفاعل إيتير، ومشروع محطات قوى الاندماج الإيضاحية، ومرفق IFMIF-DONES[7]. وسيوفر هذا المرفق، الذي يتألف من معجِّل حديث وهدف من الليثيوم السائل ووحدة اختبارات التشعيع، لمشروع محطات قوى الاندماج الإيضاحية البيانات التجريبية اللازمة لتشعيع المواد وقدرات الاختبار في ظل ظروف تشعيع مماثلة. وبالتوازي مع التقدم المحرز في تشييد البنية الأساسية، نُفِّذت أنشطة لتشجيع وتعزيز التعاون في مشاريع البحث والتطوير والابتكار في مجال الاندماج ومجالات العلم والتكنولوجيا الأخرى ذات الصلة، مثل إنتاج النظائر المشعة وقياسات البيانات النووية.

[6] https://euro-fusion.org/glossary/neutron/

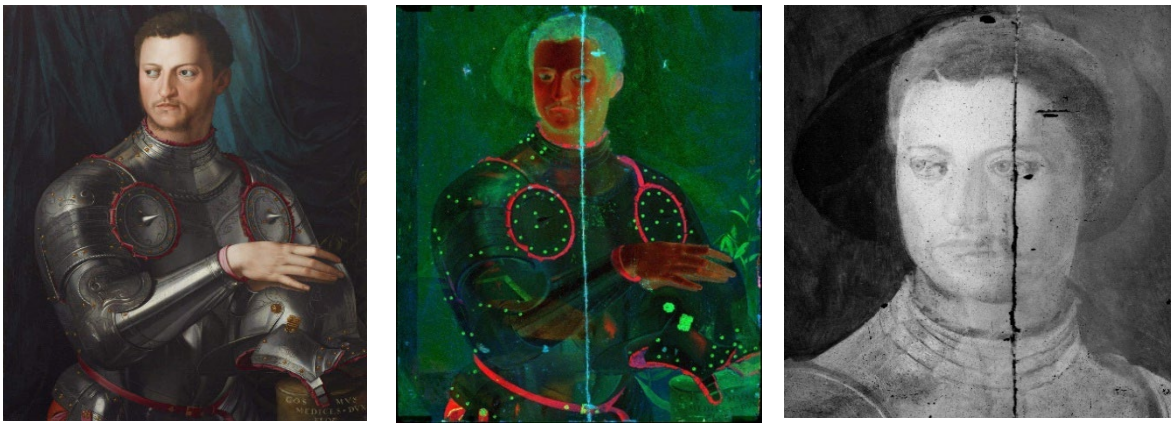
[7] الصفحة الرئيسية لمرفق IFMIF-DONES: https://ifmif-dones.es/




*الشكل-هاء-4- مخططات مرفق IFMIF-DONES الذي يضم معجِّل ديوترونات عالي القدرة، وحلقة مستهدفة من الليثيوم السائل لإنتاج النيوترونات العالية الطاقة، ووحدة لإجراء اختبارات تشعيع المواد. (المصدر: مرفق IFMIF-DONES)*

**الاتجاهات**

142- تؤدي معجِّلات الجسيمات دوراً رئيسيًّا في التصوير دون الخلوي والتشعيع لعلاج السرطان. ولأغراض التشخيص الطبي، تُستخدم بانتظام مجموعة واسعة من تقنيات التصوير مثل الموجات فوق الصوتية والتصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغناطيسي. ونظراً لأن تقنيات التحكم في حزم الأشعة الأيونية والأشعة السينية أصبحت متطورة بشكل متزايد، فمن الممكن تركيز حزم الأشعة الأيونية أو الأشعة السينية على مستوى نانومتر. ومن خلال إجراء مسح بهذه الحزمة الصغيرة لقطعة أثرية واستخدام نظم أجهزة كشف مختلفة، تزيد أهمية الصورة المتولِّدة للقطعة الأثرية في حد ذاتها بالإضافة إلى المعلومات التحليلية المكتسبة. وأصبح تحديد الأصباغ واكتشاف الرسومات المخفية تحت اللوحات وحتى الكشف عن البنية الداخلية للمخطوطات العتيقة ممكناً بسبب ظهور أساليب تصوير جديدة متعددة الأطياف. وعلاوة على ذلك، كما هو الحال في التصوير الطبي لأغراض التشخيص، يجري تطوير أساليب معالجة الصور المتطورة القائمة على التعلُّم الآلي لتحسين تصور القطعة الأثرية، أو حتى تفاصيلها المفقودة.



*الشكل-هاء-5- استُخدم السنكروتون الأسترالي لإنتاج صور مجهرية عالية الدقة قائمة على تألق الأشعة السينية للوحة للرسام الإيطالي برونزينو في القرن السادس عشر للدوق كوزيمو دي ميديشي (يساراً)، وكشفت الصور المنتجة عن وجود رسم غير مرئي تحت اللوحة، كما أتاحت اكتشاف استخدام مواد معدنية في أصباغ الطلاء وتعيين مواضعها دون المساس باللوحة نفسها (يميناً). وتظهر خريطة توزيع عنصر الرصاص اللوحة الأصلية بوضوح، كما يتبين على سبيل المثال حول الرأس والكتف (وتظهر أيضا عين شخص تحت الرسم). (المصدر: معرض الفنون في نيو ساوث ويلز (يساراً)، والمنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النووية (في الوسط ويميناً))*

143- والاتجاه المتبع مؤخراً في تصوير المواد التراثية هو تطبيق التصوير المتعدد الوسائط إلى جانب معالجة الصور. ويتشابه هذا النوع من التصوير في بعض السمات الأخرى مع التصوير الطبي، على سبيل المثال، يتسم كل من المرضى والقطع الأثرية بالهشاشة ومقدار الجرعة الإشعاعية التي يتعرضون لها، سواءً من أجل التشعيع أو التحليل، له أهمية بالغة من أجل تقليل الضرر الإشعاعي المحتمل لتحقيق أقصى تأثير للعلاج الإشعاعي أو لجمع المعلومات التحليلية الضرورية. ولذلك، فإن التطبيقات الطبية حافز قوي لبحوث علوم وتكنولوجيا المعجِّلات فيما يتعلق بإعطاء جرعة[8] الجسيمات/الأشعة السينية بشكل دقيق وقابل للتحكم. وهذه المتطلبات في المجال الطبي، إلى جانب التصوير المتعدد الأطياف، تحسِّن قدرات التصوير التراثي أيضاً.[9]

## هاء-3- الأجهزة النووية

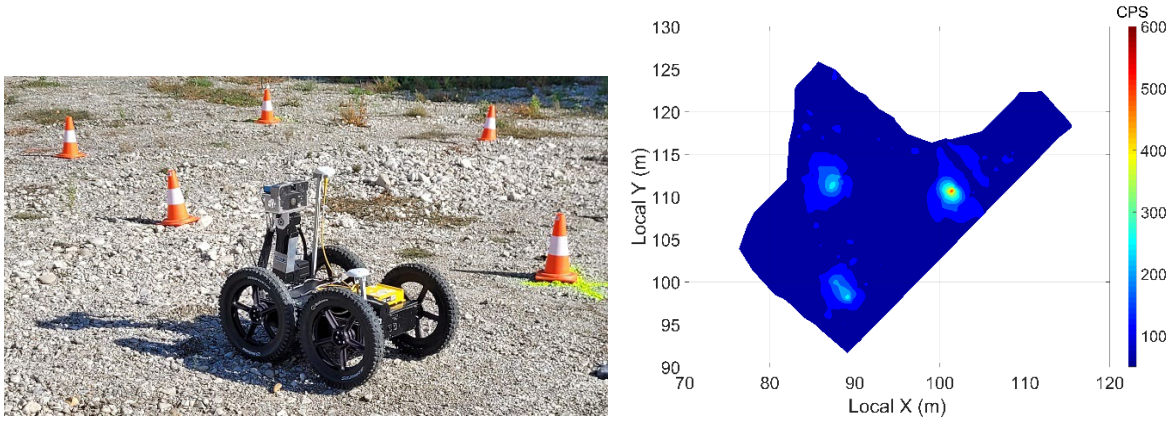
### الحالة

144- يوفر نشر المركبات الأرضية غير المأهولة، بالإضافة إلى حقائب الظهر التقليدية المزوَّدة بأجهزة والطائرات بلا طيار، العديد من المزايا في مجال رسم الخرائط الإشعاعية. وتأتي هذه المنصات الأرضية في مجموعة متنوعة من الأشكال، مع روبوطات ذات عجلات وأرجل ومجنزرة تمثل الأنواع الأكثر انتشاراً. ويمكن تصميم المركبات الأرضية غير المأهولة خصيصاً لتحمل معدلات الجرعات العالية، مما يسمح لها بأداء مهام مثل تفكيك المرافق النووية وإخراجها من الخدمة. ويمكن أن تعمل الروبوطات في أحد الوضعين التاليين: التحكم عن بُعد (التشغيل عن بُعد) أو بشكل مستقل، وتستفيد من أجهزة الاستشعار المناسبة تماماً والخوارزميات المتطورة. وفي بعض البيئات الخارجية، يكون للملاحة الساتلية دور في ذلك، رغم أن الاتجاه السائد هو اعتماد أجهزة كشف المدى وقياسه بالضوء (أجهزة ليدار (LIDAR)) التي تُحِّدد المواقع وترسم الخرائط في آن واحد، وهو ما ينطبق كذلك داخل الأماكن المغلقة. وفي الوقت الحاضر، من الممكن استخدام حزم البرامج الحاسوبية المتاحة في السوق لتحديد المواقع لضمان التنقل المستقل. وتشمل مجموعة أجهزة الاستشعار الشائعة في هذا المجال أجهزة ليدار والرادارات ونظم RGB وكاميرات القياس عن بُعد وأجهزة التصوير الحراري، بالإضافة إلى مجموعة متنوعة من عدادات معدل الجرعة ومقاييس الطيف والنظم الأخرى للكشف عن الإشعاعات.
والاتجاه المعاصر هو دمج البيانات المستمدة من المكان، وهي تقنية تجمع بين مصادر بيانات متعددة لإثراء قياسات الإشعاعات بالمعلومات الظرفية. ويمكن تنفيذ معالجة البيانات في الوقت الفعلي، إما من خلال أجهزة الكمبيوتر الموجودة في الروبوطات أو المحطات البعيدة، مما يستلزم تدفق البيانات ذات الصلة إلى محطات التحكم الأرضية المحلية أو الخادم السحابي. وبدلاً من ذلك، يمكن لأجهزة تسجيل البيانات جمع المعلومات لمعالجتها في وقت لاحق.

---

[8] Bertrand, L. et al. Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects. TrAC Trends in Analytical Chemistry, Volume 164 (2023). https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078
(التطورات العملية صوب تعزيز الأمان في تحليل العينات والقطع التراثية).

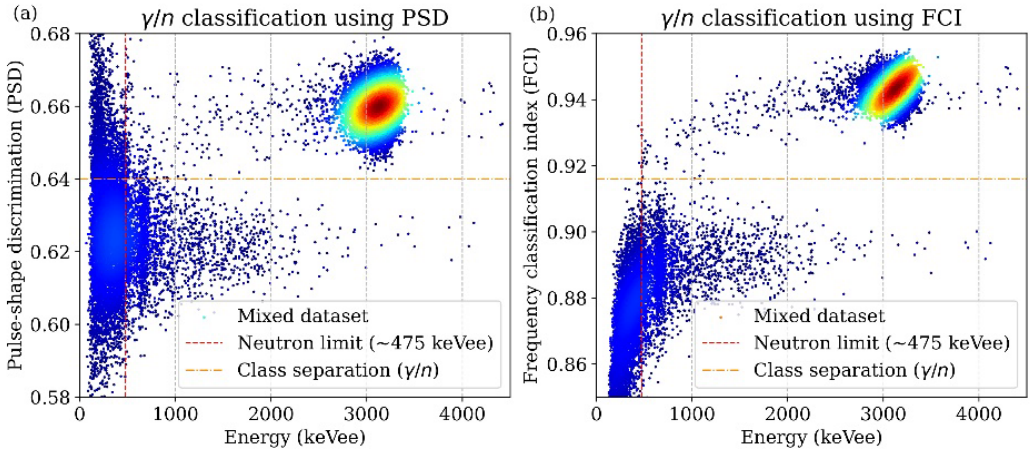
[9] Gibson, AP. Medical imaging applied to heritage. The British Journal of Radiology 96, No 1152 (2023). https://doi.org/10.1259/bjr.20230611
(تطبيق التصوير الطبي على القطع التراثية).




*الشكل-هاء-6- استخدام مركبة أرضية غير مأهولة مجهَّزة في حلقة عمل تدريبية في مختبر العلوم والأجهزة النووية في زايبرسدورف بالنمسا (يساراً) إلى جانب خريطة الإشعاع التي تبيّن "المناطق الساخنة" (يميناً). CPS ترمز إلى العدد في الثانية. (المصدر: الوكالة)*

**الاتجاهات**

145- تُستخدم مصفوفات المداخل القابلة للبرمجة الميدانية بشكل متزايد كجزءٍ لا يتجزأ من نظم الحصول على بيانات أجهزة الكشف الإشعاعي. وتؤدي هذه المصفوفات مجموعة واسعة من الأغراض، بداية من تحديد بارمترات الحصول على بيانات أجهزة الكشف الإشعاعي وتدفق/توجيه البيانات، وصولاً إلى تمييز متقدِّم للإشارات أو حتى إعادة بناء الحدث بالكامل. والخوارزميات المنشورة لمعالجة البيانات هي صلب تأدية الوظائف الأكثر صعوبة، سواءً التقليدية أو القائمة على الذكاء الاصطناعي. ومن الأمثلة على ذلك تنفيذ خوارزميات التمييز بين أشعة غاما والنيوترونات في تطبيقات النظم المدمجة التي تستخدم مصفوفات المداخل القابلة للبرمجة الميدانية. ومجالات الإشعاعات المختلطة شائعة في العديد من التطبيقات العملية للإشعاعات المؤيِّنة، حيث تكون أجهزة الكشف ذات القدرة التمييزية أداة ضرورية. وعلى سبيل المثال، بدلاً من تطبيق النهج التقليدي لتمييز شكل النبضات في المجال الزمني، من الممكن تطبيق الخوارزميات التي يمكن أن تعمل في مجال التردد. ومن خلال التحديد الدقيق لرقم الاستحقاق المناسب، يمكن تسريع وتيرة التحليل اللازم للتمييز بين شكل النبضات (والمجال الإشعاعي) (انظر الشكل هاء-7). وقد أدى ذلك إلى تطبيقات بهذه الخوارزميات تعمل في الوقت الحقيقي وكان تنفيذها هو الاتجاه السائد في نظم الحصول على بيانات أجهزة الكشف الإشعاعي الحديثة في السنوات الأخيرة، مع وجود مجال واسع من التطبيقات التي تتراوح من العلوم النووية والأمن النووي إلى الوقاية من الإشعاعات والفيزياء الطبية. وعلاوة على ذلك، فإن انتشار التوليف العالي المستوى، أي إمكانية تشفير لوحة مصفوفات المداخل القابلة للبرمجة الميدانية بلغة عالية المستوى، جعل هذه المصفوفات في متناول المزيد من المطوّرين.




*الشكل-هاء-7- مقارنة فصل أشعة غاما والنيوترونات بأسلوب التمييز التقليدي لشكل النبضات (يساراً) ومؤشر تصنيف الترددات (يميناً)، حيث يتسم الأخير بإجراء تمييز أكثر تفوقاً من الناحية النوعية على نطاق الطاقة بأكمله. واستُمِدت البيانات التجريبية في مرفق علوم النيوترونات التابع للوكالة في زايبرسدورف بالنمسا. (المصدر: Morales, I. R. et al., Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications[10])*

# واو- البيانات الذرية والنووية

## الحالة

146- يتطلب تطوير مفاعل إيتير زيادة الاعتماد على قواعد البيانات الرقمية النووية والذرية، حيث أصبحت برامج المحاكاة النووية الحاسوبية أكثر تقدماً. وفيما يتعلق بالنيوترونيات وتنشيط المواد، يتعلق هذا الاعتماد باستخدام مكتبة البيانات النووية المقيَّمة المتعلقة بالاندماج، بينما يستخدم مفاعل إيتير قاعدة بيانات CollisionDB فيما يخصُّ التفاعلات الذرية في بلازما الاندماج.

## الاتجاهات

147- تستثمر دول أعضاء مختلفة المزيد من الوقت والموارد في مفاعل إيتير للحصول على بيانات عالية الجودة بشأن تفاعلات أشعة غاما. والتطبيقات الرئيسية لهذه البيانات هي الاستكشاف النشط بالنيوترونات، والتقديرات الأكثر دقة للحرارة المتولِّدة عن أشعة غاما في تدريع مفاعلات الانشطار وأجهزة الاندماج، والابتكارات في التطبيقات الفضائية. ومن أجل الحصول على بيانات عالية الجودة عن تفاعلات أشعة غاما، يلزم تحديث قواعد البيانات النووية القديمة التي تتضمن بيانات بشأن تفاعل أشعة غاما بمعلومات تجريبية ونظرية أحدث. وتُبذل حاليًّا جهود جديدة لتقييم البيانات النووية لتحقيق هذا الغرض.

148- كما أن الطلب العالمي المتزايد بسرعة على النظائر المشعة الطبية، لأغراض التشخيص والعلاج على حد سواء، له تأثير كبير على البيانات النووية. وهناك حاجة إلى حسابات أكثر دقة لاحتمالات التفاعلات الواقعة، لا سيما لطرق إنتاج النظائر المحسنة مع الحد الأدنى من الشوائب. وهذه الحاجة إلى الحسابات الأكثر دقة

[10] Morales, I. R. et al. Gamma/neutron classification with SiPM CLYC detectors using frequency-domain analysis for embedded real-time applications. Nuclear Engineering and Technology (2023). https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.013
(تصنيف أشعة غاما/النيوترونات بأجهزة الكشف SiPM CLYC باستخدام تحليل مجالات التردد لأغراض التطبيقات الآنية المدمجة)

لاحتمالات التفاعلات الواقعة تتطلب مزيداً من الجهد من علماء الفيزياء النووية التجريبية ومُعدي نماذج التفاعلات النووية النظرية.

## زاي- تطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال القوى النووية ودورة الوقود النووي

### الحالة

149- الذكاء الاصطناعي مصطلح عام يشمل مختلف التكنولوجيات التي طُوِّرت على مدى عقود من الزمن. وينطوي الذكاء الاصطناعي على إمكانات واعدة للنهوض بقطاع إنتاج الطاقة النووية. وتُحاكي نظم الذكاء الاصطناعي المتطورة المنطق البشري فيما يتعلق بحل المشاكل واتخاذ القرارات. وبفضل قدرته على تحسين الكفاءة والأتمتة والأمان والصيانة التنبؤية، فضلاً عن ضمان الاستخدام الأمثل للعمليات، فإنّ الذكاء الاصطناعي يخطو بالفعل خطوات واسعة في بعض المجالات مثل المجال النووي.

150- تُستخدم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تشغيل محطات القوى النووية ومرافق دورة الوقود. وهذه التطبيقات مستقلة حاليًّا عن النظم أو العمليات أو الوظائف المتعلقة بالأمان. وفي حالة تطبيقات الفحص غير المتلِف، على سبيل المثال، يضمن ذلك زيادة سرعة ودقة عمليات التفتيش، وإطلاع متخذي القرارات على التصاميم الأمثل لحمل قلب المفاعل، وتبسيط جداول انقطاع الصيانة المعقدة. وتشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي الأخرى تحسين تقييم التصاميم النووية المتقدمة وتحسينها إلى المستوى الأمثل عن طريق البرامج الحاسوبية المدعومة بالذكاء الاصطناعي والنماذج الرياضية.

151- ويركِّز العمل الحالي المتعلق بأمان الذكاء الاصطناعي وأمنه وموثوقيته على تحديد مخاطر وعواقب الأعطال، و"قابلية التفسير"، والجدارة بالثقة، والاعتبارات الأخلاقية المرتبطة باستمرار نشر الذكاء الاصطناعي. وقد تؤثر سيناريوهات نشر الذكاء الاصطناعي في المستقبل التي تنطوي على نظم أو عمليات رقمية خاصة بالمرافق في الأمان النووي أو الأمن النووي لمحطة للقوى النووية. وعلاوة على ذلك، وكما هو معتاد في أي نظام رقمي، تُوضع التدابير المناسبة لضمان التحقق والأمن السيبراني بالتوازي مع سيناريوهات التطبيق المختلفة. وتسعى المنظمات المعنية بنشاط إلى تنظيم تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي في المرافق النووية والإشعاعية.

### الاتجاهات

152- يتزايد تطبيق الذكاء الاصطناعي في تصميم وتشغيل مرافق القوى النووية ودورات الوقود النووي ذات الأغراض التجارية. ومن شأن الذكاء الاصطناعي أن يحسِّن الأمان والكفاءة التشغيلية والفعالية من حيث التكلفة مع تيسير تطوير التكنولوجيات النووية المتقدمة. وتساعد النظمُ القائمة على الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات الضخمة التي تُجمع أثناء فترة التشغيل وذلك بهدف زيادة الموثوقية التشغيلية ولمنع تعرض الموظفين للحوادث. وتساهم هذه التطورات في استدامة الطاقة النووية وقدرتها التنافسية في مشهد الطاقة الحديث.

153- ويُوظَّف الذكاء الاصطناعي بطرق مختلفة لتحسين الأمان والكفاءة والفعالية من حيث التكلفة في مجال الصناعة النووية. وفيما يتعلق بالأمان والصيانة، يُطبَّق الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بأعطال المعدات، وتحليل بيانات أجهزة الاستشعار، وتحسين جداول الصيانة، ولتقليل وقت التوقف عن العمل وتحسين الأمان. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تساعد بعض خوارزميات التعلُّم الآلي حاليًّا في اكتشاف الحالات الشاذة وتحسين نظم الإنذار المبكر. كما أنَّ الذكاء الاصطناعي يُستخدم بشكل متزايد لتحديد علاقات الترابط المنخفضة المستوى فيما يتعلق بالأحداث (بما في ذلك الأحداث المتكررة) الواردة في مصادر البيانات والوثائق التاريخية غير المُهيْكَلة، وذلك على نحو فعال. ويُمكّن هذا النهج من تحديد الأحداث المتكررة بشكل منهجي التي لم تتخذ بشأنها تدابير

تصـــحيحية، وكذلك من تقليص الفترة الزمنية التي يســتغرقها البحث عن الأحداث المهمة حســب درجة أهميتها (التحقيق في الانتهاكات، الانحرافات، العيوب كبيرة وما إلى ذلك).

154- وقد أثبت تطبيق الذكاء الاصـطناعي في مجال البحث والتطوير إمكاناته فيما يتعلق بتحسـين التصـميم الأســاســـي لقلب المفاعل بكفاءة في تطبيقات مفاعلات القوى النووية والمفاعلات النووية المتقدمة. وقد تعمل الحلول التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي على تحسين أنماط تحميل الوقود وإطالة مدة تحميل الوقود. ومن شأن ذلك أن يزيد من إنتاج القوى، ويقلل من إنتاج النفايات ويقلل من تكاليف التشـــغيل. وبالإضـــافة إلى ذلك، يمكن للذكاء الاصـطناعي أن يدعم تصـميم المفاعلات النووية المتقدمة ومرافق دورة الوقود من خلال محاكاة العمليات الفيزيائية المعقدة، مما قد يؤدي إلى تحسين التصاميم وتقليل وقت التطوير. ومن المتوقع أن تتسارع وتيرة تطوير ونشـــر حلول الذكاء الاصـــطناعي في مجال صـــناعة القوى النووية التجارية ومرافق دورة الوقود مع تراكم الخبرات ومعالجة أوجه عدم التيقن.

155- ويتزايد اسـتخدام الذكاء الاصـطناعي في تحليل بيانات الفيديو لمسـاعدة موظفي التشـغيل على ضـمان الأمان داخل مرافق الإنتاج والتشـــغيل. وينطبق هذا الأمر على كل من آليات الرقابة الخاصـــة بمعدات الحماية الشخصية وأمان العاملين في الموقع.

## حاء- الصحة البشرية

### حاء-1- التقييم غير الجراحي لوظيفة الجهاز الهضـــمي في الأمعاء: اختبار النَّفَس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13

#### الحالة

156- أحد أكثر الأسـئلة إلحاحاً في مجال التغذية في مجال الصـحة العامة هو لماذا لا يزال الأطفال في البلدان المنخفضـــة والمتوســطة الدخل يعانون من التقزُّم (قاماتهم قصـــيرة بالنســـبة لأعمارهم) على الرغم من تدخلات الصـحة العامة المتعددة، بما في ذلك المكملات الغذائية وتحسين خدمات المياه والصـرف الصـحي. ويشـير أحدث تقرير مشـــترك لوكالات الأمم المتحدة بشـــأن الأمن الغذائي والتغذية إلى أن حوالي 150 مليون طفل دون ســـن الخامسـة يعانون من التقزُّم، مع ما يترتب على ذلك من آثار وخيمة على نموهم النفسـي الحركي وخطر الإصـابة بأمراض مزمنـة في وقت لاحق من الحياة.[11] وفي حين أن العوامل المتعلقة بـالتقزُّم معقدة وغير مفهومة تمامـاً، فإن الخلل الوظيفي المعوي البيئي - الذي يتميز باضطراب جهازي ومزمن في السلامة الهيكلية للأمعاء ووظيفتها - يشـــارك بشـــكل متزايد في التقزُّم بين الأطفال الذين يعيشـــون في بيئات غير صـــحية في البلدان المنخفضـــة والمتوسـطة الدخل.[12] وقد يسـهم الخلل الوظيفي المعوي البيئي في التقزُّم عبر مسـارات مختلفة، بما في ذلك زيادة نفاذية الأمعاء والالتهاب وانخفاض امتصـــاص العناصـــر الغذائية.[2] والمعايير التشـــخيصـــية للخلل المعوي البيئي ليســـت متطورة، ويعتمد النهج الأكثر قوة على أخذ الخزعات عن طريق الجراحة لتشـــخيص تلف الأمعاء. وفي معظم البيئات المنخفضـــة والمتوســـطة الدخل حيث يســـود الخلل الوظيفي المعوي البيئي، فإن هذا النهج ليس قابلاً للتطبيق ولا يمكن تبريره من الناحية الأخلاقية.

---

[11] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والصندوق الدولي للتنمية الزراعية، ومنظمة الأمم المتحدة للطفولة، وبرنامج الأغذية العالمي، ومنظمة الصحة العالمية. حالة الأمن الغذائي والتغذية في العالم 2023: التوسع الحضري وتحويل النُظم الزراعية والغذائية والأنماط الغذائية الصحية عبر التسلسل الريفي الحضري المتصل، منظمة الأغذية والزراعة، روما (2023).

[12] Owino, V., et al., Environmental Enteric Dysfunction and Growth Failure/Stunting in Global Child Health, Pediatrics. 138 6 (2016).

(تصنيف أشعة غاما/النيوترونات بأجهزة الكشف SiPM CLYC باستخدام تحليل مجالات التردد لأغراض التطبيقات الآنية المدمجة).

157- واختبارات النَّفس، التي استُخدمت في تطبيقات الصحة البشرية مثل أمراض الجهاز الهضمي، هي اختبارات غير جراحية ويمكن استخدامها في جميع الفئات العمرية، بما في ذلك الأطفال.[13] وتشمل اختبارات النَّفس الشائعة الهيدروجين والميثان وثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13. وتُجرى اختبارات النَّفس باستخدام الهيدروجين والميثان بشكل أساسي لتقييم سوء امتصاص الكربوهيدرات العام.[3، 14] ومن ناحية أخرى، تُستخدم اختبارات النَّفس باستخدام الكربون-13 لتقييم عدد كبير من الأعراض في أمراض الجهاز الهضمي لأنها تستخدم جزيئات مختارة موسومة بالكربون-13 لاستهداف وظائف محددة وقياس ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13 في النَّفس كمنتج نهائي لعملية التمثيل الغذائي. والتطبيق الإكلينيكي المعمول به هو اختبار النَّفس باستخدام الكربون-13 لتشخيص هيليكوباكتر بيلوري باستخدام يوريا الكربون-13.[15] ومع ذلك، اقتصرت تطبيقات اختبار النَّفس إلى حد كبير على الإعدادات الإكلينيكية ولم تشهد سوى استخدام محدود في التغذية في إطار الصحة العمومية.

158- وقد سبق تطبيق اختبار النَّفس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 (اختبار $^{13}$C-SBT) لدراسة هضم السكروز في سياق نقص إنزيم سكراز-إيزومالتاز الخِلَقي[16]. وتكشف زيادة ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13 في النَّفس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 عن طريق الفم عن ضعف في قدرة الأمعاء على هضم السكروز، مما يعكس انخفاض نشاط سكروز الاثني عشر - الإيزومالتاز (الإنزيم الموجود في الأمعاء الذي يجب أن يُكسِّر السكروز إلى جلوكوز وفركتوز قبل امتصاصه واستقلابه) (الشكلان حاء-1 وحاء-2). كما استُخدِم اختبار $^{13}$C-SBT كأحد الدلائل على تناول السكر الغذائي المضاف في الفئران.[17] وكان ريتشي وزملاؤه أول من طبق اختبار $^{13}$C-SBT لتقييم الخلل الوظيفي المعوي البيئي لدى الأطفال الأستراليين المصابين بالإسهال.[18] وفي تلك الدراسة، تلقى أطفال السكان الأصليين المصابون بالإسهال الحاد وغير المصابين به ومجموعة ضابطة من الأطفال الأصحاء من غير السكان الأصليين جرعة فموية من السكروز المُثرى طبيعيًّا (من مصدر الذرة، الذي يحتوي على نسبة أكبر قليلاً من الكربون-13 مقارنة بسكر

---

[13] Broekaert, I.J., et al., An ESPGHAN Position Paper on the Use of Breath Testing in Paediatric Gastroenterology, Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition. 74 1 (2022) 123–37.
(ورقة موقف للجمعية الأوروبية لأمراض الجهاز الهضمي والكبد والتغذية عند الأطفال حول استخدام اختبار النَّفس في أمراض الجهاز الهضمي للأطفال).

[14] Hammer, H.F., et al., European guideline on indications, performance, and clinical impact of hydrogen and methane breath tests in adult and pediatric patients: European Association for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Neurogastroenterology and Motility, and European Society for Paediatric Gastroenterology Hepatology and Nutrition consensus, United European Gastroenterology Journal. 10 1 (2022) 15–40.
(المبادئ التوجيهية الأوروبية بشأن المؤشرات والأداء والتأثير الإكلينيكي لاختبارات النَّفس باستخدام الهيدروجين والميثان في المرضى البالغين والأطفال).

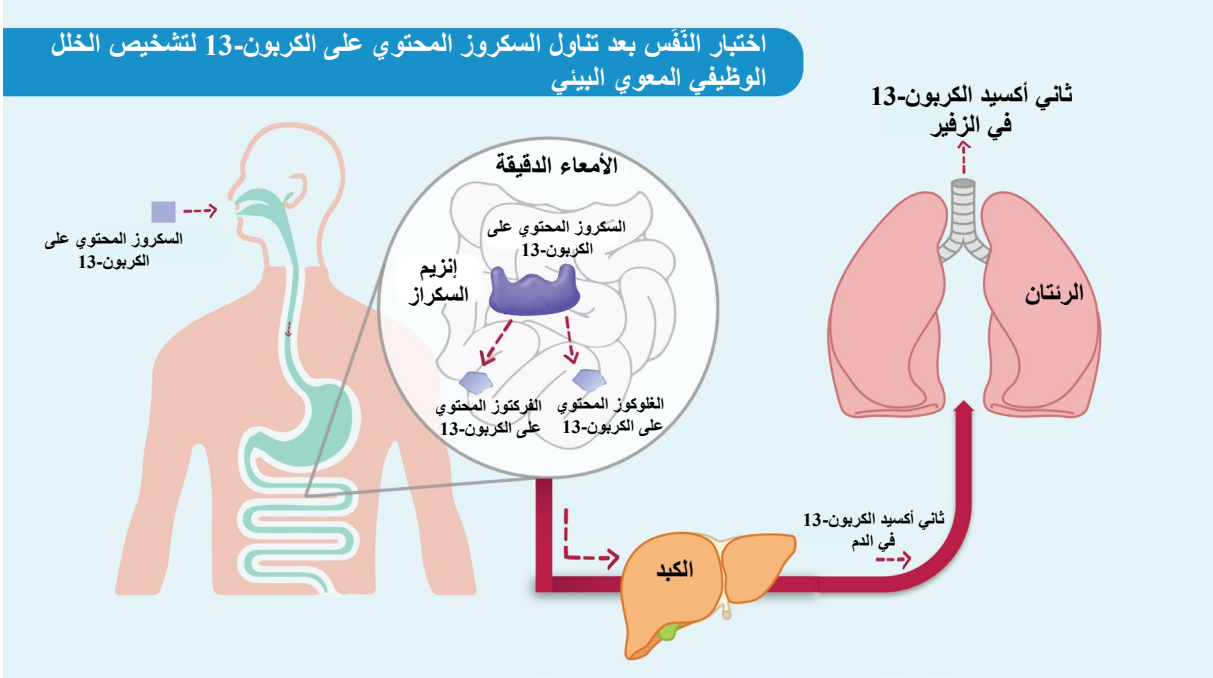
[15] Keller, J., et al., European guideline on indications, performance and clinical impact of 13C-breath tests in adult and pediatric patients: An EAGEN, ESNM, and ESPGHAN consensus, supported by EPC, United European Gastroenterology Journal. 9 5 (2021) 598–625.
(المبادئ التوجيهية الأوروبية بشأن المؤشرات والأداء والتأثير الإكلينيكي لاختبارات النَّفس باستخدام الكربون-13 في المرضى البالغين والأطفال).

[16] Robayo-Torres, C.C., et al., $^{13}$C-breath tests for sucrose digestion in congenital sucrase isomaltase-deficient and sacrosidase-supplemented patients, Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition. 48 4 (2009) 412–8.
(اختبارات النَّفس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 بخصوص هضم السكروز لدى المرضى الذين يعانون من النقص الخِلَقي لإنزيم سكراز-إيزومالتاز والمرضى الذين يتناولون مكملات الساكروسيداز).

[17] Yazbeck, R., et al., Breath $^{13}CO_2$-evidence for a noninvasive biomarker to measure added refined sugar uptake, Journal of Applied Physiology. 130 4 (2021) 1025–32.
(وجود ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون في النَّفس كدليل غير جراحي لقياس امتصاص السكر المكرَّر المضاف).

[18] Ritchie, B.K., et al., $^{13}$C-Sucrose Breath Test: Novel Use of a Noninvasive Biomarker of Environmental Gut Health, Pediatrics. 124 2 (2009) 620–6.
(اختبار النَّفس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13: استخدام جديد لدليل حيوي غير جراحي لصحة الأمعاء البيئية، طب الأطفال).

البنجر). وكان امتصاص ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13 بعد 90 دقيقة أقل في أطفال السكان الأصليين المصابين بالإسهال مقارنة بأولئك الذين لا يعانون منه؛ وأظهر الأطفال الأصحاء من غير السكان الأصليين قدرة أكبر على امتصاص ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13. ومع ذلك، فإن هذا الاختبار غير حساس بشكل رئيسي لأن إشارة الكربون-13 من سكروز الذرة ليست كبيرة بما يكفي عن المستويات الطبيعية والمتغيرة للكربون-13 (حوالي 1,1٪)، حتى إعطاء جرعات كبيرة جداً من السكروز.[19،20]




*الشكل-حاء-1- يستهلك الفرد جرعة موزونة بدقة من السكروز الموسوم بالكربون-13 المُذاب في كمية صغيرة من الماء. وينتقل السكروز المحتوي على الكربون-13 عبر الظهارة المعوية إلى الحافة الفرشاتية؛ حيث يتحلل مائيًّا عن طريق إنزيم سكراز-إيزومالتاز إلى فركتوز الكربون-13 وجلوكوز الكربون-13، اللذين يُمتصان في مجرى الدم ويُنقلان إلى الكبد، حيث يتكسران بمعدلات متفاوتة لإنتاج الطاقة المصحوبة بخروج ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13، الذي يخرج مع الزفير عند التنفس. والنسبة المئوية لامتصاص الكربون-13 الموجود في ثاني أكسيد الكربون الموسوم بالكربون-13 بالنسبة إلى الكربون-13 الأصلي في السكروز الموسوم هي مؤشر على قدرة الامتصاص في الأمعاء وترتبط بنشاط إنزيم سكراز-إيزومالتاز. (الرسم التوضيحي من: الوكالة)*

---

[19] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، New approaches for stable isotope ratio measurements (نُهج جديدة لقياس نسب النظائر المستقرة) وقائع اجتماع الفريق الاستشاري المعقود في فيينا في الفترة من 20 إلى 23 أيلول/سبتمبر 1999، الوثيقة التقنية الصادرة عن الوكالة TECDOC-1247، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2001).

[20] Butler, R.N., et al., Stable Isotope Techniques for the Assessment of Host and Microbiota Response During Gastrointestinal Dysfunction, Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition. 64 1 (2017) 8–14.
(استخدام تقنيات النظائر المستقرة لتقييم استجابة العائل والميكروبات في حالات اختلال وظائف الجهاز الهضمي).

*الشكل-حاء-2- بالنسبة للأطفال الأكبر سناً والبالغين، يجري تجميع عينات النَّفَس عن طريق التنفس في كيس جمع عينات النَّفَس كما هو موضح. وبالنسبة للرضع والأطفال الصغار، يُركَّب قناع على حقنية جمع عينات النَّفَس. (الرسم التوضيحي من: الوكالة)*

159- ويمكن استخدام السكروز الشديد الإثراء (99٪) لتحسين حساسية اختبار $^{13}$C-SBT [21]. وقدَّم مشروع بحثي منسق تابع للوكالة بعنوان "تطبيق تقنيات النظائر المستقرة في تقييم الاختلال الوظيفي المعوي البيئي وفهم أثره على نمو الأطفال" الدعم لتسعة بلدان في تحسين وتطبيق اختبار $^{13}$C-SBT في تقييم الخلل الوظيفي المعوي البيئي وفهم تأثير الخلل الوظيفي المعوي البيئي على نمو الأطفال. وخلال المرحلة الأولى من المشروع،[22] خضع الاختبار للتحسين والتحقق من صحته من خلال مقارنة النتائج من مقتفيات السكروز الشديدة الإثراء إلى السكروز المُثرى طبيعيًّا في المملكة المتحدة. واستُخدمت النسخة المحسَّنة من الاختبار مع الأطفال المصابين بمرض الاضطرابات الهضمية في أستراليا وقورن بنتائج أخذ الخزعات لدى البالغين زامبيا واختبار نفاذية الأمعاء لدى الأطفال في بيرو. وخلال المرحلة الثانية من المشروع، استُخدم الاختبار في دراسات مقطعية مستعرضة في بنغلاديش وبيرو وجامايكا وزامبيا وكينيا والهند لتقييم الخلل الوظيفي المعوي البيئي لدى الأطفال الذين تتراوح أعمارهم بين 12 و15 شهراً.

**الاتجاهات**

160- واختبار $^{13}$C-SBT هو اختبار غير جراحي للنَّفَس يهدف إلى قياس الأضرار المعوية الدقيقة في الخلل

[21] Schillinger, R.J., et al., $^{13}$C-sucrose breath test for the non-invasive assessment of environmental enteropathy in Zambian adults, Frontiers in Medicine. 9 (2022).
(اختبار النَّفَس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 لتقييم الاعتلال المعوي البيئي دون تدخل جراحي لدى البالغين في زامبيا).

[22] Lee, G.O., et al., Optimisation, validation and field applicability of a $^{13}$C-sucrose breath test to assess intestinal function in environmental enteropathy among children in resource poor settings: study protocol for a prospective study in Bangladesh, India, Kenya, Jamaica, Peru and Zambia, BMJ Open. 10 11 (2020).
(تحسين اختبار النَّفَس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 والتحقق من صحته وتطبيقه الميداني لتقييم وظيفة الأمعاء في اعتلال الأمعاء البيئي بين الأطفال في البيئات الفقيرة الموارد: بروتوكول دراسة لدراسة مستقبلية في بنغلاديش وبيرو وجامايكا وزامبيا وكينيا والهند).

الوظيفي المعوي البيئي باستخدام جرعة فموية من السكروز المحتوي على الكربون-13. وأظهرت دراسات التحقق من صحة هذا الاختبار في زامبيا والمملكة المتحدة أنه يمكن استخدام جرعة صغيرة من السكروز المحتوي على الكربون-13 الشديد الإثراء لتقييم نشاط إنزيم الحافة الفرشاتية بدقة، وتحديداً نشاط إنزيم سكراز-إيزومالتاز الموجود في الأمعاء.[11] ومع ذلك، فإن أحد قيود الاختبار هو أن النتائج لم تكن مرتبطة مباشرة بالعمليات البيولوجية الأساسية في الأمعاء. وهكذا، يعمل الباحثون على تطوير نماذج ميكانيكية جديدة لفهم ديناميات التمثيل الغذائي التي تحدث في الأمعاء بشكل أفضل.[23] وقد أبرزت هذه النماذج أهمية التمييز بين استقلاب الفركتوز والجلوكوز الموجود في السكروز المحتوي على الكربون-13. ولمطابقة الآليات البيولوجية المنطوى عليها في اختبار $^{13}$C-SBT بشكل أفضل، يُوصى باستخدام الجلوكوز الموسوم بالكربون-13 في السكروز. وللحصول على نتائج أكثر شمولية، يمكن تطبيق اختبار $^{13}$C-SBT جنباً إلى جنب مع الاختبارات الأخرى لتغطية مجالات الخلل الوظيفي المعوي البيئي الإضافية التي تتجاوز هضم السكروز.

## حاء-2- ضمان الجودة: التطورات الجديدة في التشعيع الداخلي

### الحالة

161- لا يزال سرطان عنق الرحم يشكل تحديًّا كبيراً حيث إنه رابع أكثر أنواع السرطان شيوعاً بين النساء في جميع أنحاء العالم. وفي عام 2020، وقع ما يقرب من 90٪ من الحالات الجديدة والوفيات في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط[24]. وتهدف مبادرة "أشعة الأمل" التي أطلقتها الوكالة إلى زيادة فرص حصول مرضى السرطان على الرعاية، مع التركيز بشكل خاص على أفريقيا، حيث يفتقر 70٪ من السكان إلى العلاج الإشعاعي. وتركِّز مبادرة "أشعة الأمل" في مرحلتها الأولى على سبعة بلدان - بنن وتشاد وجمهورية الكونغو الديمقراطية والسنغال وكينيا وملاوي والنيجر - حيث يصنف سرطان عنق الرحم على أنه إما أكثر أنواع السرطان انتشاراً أو ثاني أكثر أنواع السرطان انتشاراً بين النساء. وستعالج مبادرة "أشعة الأمل" التحديات المرتبطة بسرطان عنق الرحم من خلال زيادة الوعي وتوفير التدريب وبناء القدرات وزيادة فرص الحصول على العلاج والرعاية.

---

[23] Brouwer, A.F., et al., Mechanistic inference of the metabolic rates underlying $^{13}$C breath test curves, Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics. 50 3 (2023) 203–14.
(الاستدلال الميكانيكي على معدلات الأيض الكامنة وراء منحنيات اختبار النَّفس باستخدام الكربون-13).

[24] Sung, H., et al., Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, CA Cancer Journal for Clinicians. 71 (2021) 209–49.
(تقديرات المرصد العالمي للسرطان (غلوبوكان) التابع للوكالة الدولية لبحوث السرطان لحالات الإصابة والوفيات بخصوص 36 نوعاً من السرطان في جميع أنحاء العالم في 185 بلداً).

*الشكل-حاء-3- شهدت الدورة السابعة والستين للمؤتمر العام للوكالة الإعلان رسميا عن إنشاء خمسة مراكز إسناد افتتاحية خلال فعالية جانبية بشأن مبادرة أشعة الأمل التي أطلقتها الوكالة. (الصورة من: الوكالة)*

162- ويتطلب علاج سرطان عنق الرحم مزيجاً من التدخل الجراحي والعلاج الكيميائي والعلاج الإشعاعي. ويؤدي التشعيع الداخلي - وهو عنصر حيوي في العلاج الإشعاعي - دوراً محورياً في علاج هذا المرض. ويُظهر التشعيع الداخلي الحديث المدعوم بأدلة قوية العلاقة بين مقدار الجرعة المعطاة وتأثيرها الإكلينيكي. ومع ذلك، نظراً لأن التشعيع الداخلي يقدم جرعات أعلى بكثير من العلاج الإشعاعي الخارجي، فإنه يمثل تحدياً علاجياً فريداً: يتطلب التشعيع الداخلي التخطيط الدقيق لتجنب الآثار الإكلينيكية الضارة من الجرعة المنخفضة أو الزائدة.

163- وضمان توصيل الجرعة بشكل ثابت أمر بالغ الأهمية لجودة وأمان خيار العلاج هذا. ويمكن أن يؤدي ذلك أيضاً إلى بناء ثقة الجمهور في التشعيع الداخلي، التي قوضتها حوادث سابقة مبلغ عنها منها حالة وفاة واحدة نُسبَت إلى خطأ بشري. وبوسع عمليات مراجعة قياس الجرعات أن تمنع وقوع الحوادث الكارثية وتقلل الاختلافات المنهجية في الجرعات.

164- ومنذ إنشاء برنامج الوكالة لمراجعة قياس الجرعات بالمراسلة في عام 1969، قدَّم هذا البرنامج خدمات المراجعة من خلال مختبر الوكالة لقياس الجرعات في مختلف تكنولوجيات العلاج الإشعاعي إلى الدول الأعضاء التي تفتقر إلى القدرة على القيام بذلك على الصعيد الوطني. وقد ساهمت هذه الخدمة الحيوية بشكل كبير في أمان ممارسات العلاج الإشعاعي في جميع أنحاء العالم، مما أفاد الملايين من مرضى السرطان.

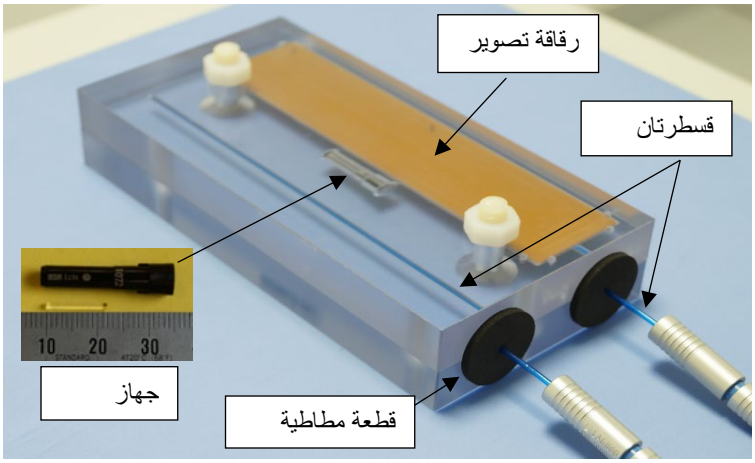
165- وبالنسبة للتشعيع الداخلي، هناك أيضاً فجوة متزايدة في التعليم والتدريب - وهي فجوة تتفاقم بسبب التعقيد المتزايد للتكنولوجيا ونقص معدات التدريب. والبلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل لديها إمكانية ضئيلة أو معدومة لتطوير الموارد البشرية اللازمة القادرة على استخدام هذه التقنية بطريقة مأمونة وفعالة.

166- وتستخدم الوكالة الواقع الافتراضي كأداة ابتكارية لسد هذه الفجوة في المهارات بطريقة فعالة من حيث التكلفة. وقد وضعت الوكالة مواد للتعلُّم الإلكتروني بشأن إجراءات التشعيع الداخلي في أنواع السرطان التي تصيب الجهاز التناسلي للمرأة في بيئة تعليمية ثلاثية الأبعاد قائمة على الواقع الافتراضي (الشكل حاء-4). وبدلاً من الاستعانة بمرضى حقيقيين، تُمكِّن هذه التقنية المتدربين من ممارسة التشعيع الداخلي، مما يساعد على تعزيز علاج وإدارة سرطان عنق الرحم، خاصة في السياقات التي تواجه تحديات في الموارد.

*الشكل-حاء-4- وحدة التعلُّم الإلكتروني الجديدة لدى الوكالة حول إجراءات التشعيع الداخلي في أنواع السرطان التي تصيب الجهاز التناسلي للمرأة لاستخدامها مع نظارة الواقع الافتراضي. (الصورة من: الوكالة)*

**الاتجاهات**

167- في عام 2021، أطلقت الوكالة مشروعاً بحثيًّا منسقاً بعنوان "تطوير منهجية لعمليات مراجعة قياس الجرعات في التشعيع الداخلي"، والذي يهدف إلى تطوير منهجية لمراجعة قياس الجرعات التي ستشمل ثلاثة مستويات متدرجة من الصعوبة لمراجعة الممارسات الإكلينيكية. وستفيد هذه المنهجية البلدان من خلال ضمان العلاج المأمون والفعال لأنواع السرطان التي تصيب الجهاز التناسلي للمرأة. وحتى الآن، وُضِع مستوى أساسي للمراجعة يقيِّم دقة بارامتر حاسم لقياس الجرعات وهو المعدل المرجعي لكيرما الهواء. كما أُنشئ نموذج يحاكي الأنسجة البشرية بسيط وخفيف الوزن وفعال من حيث التكلفة مناسب لإجراء عمليات مراجعة قياس الجرعات بالمراسلة عن بُعد (الشكل حاء-5).




*الشكل-حاء-5- طُوِّر نموذج يحاكي الأنسجة البشرية بسيط وخفيف الوزن وفعال من حيث التكلفة في مختبر قياس الجرعات التابع للوكالة يُستخدم في عمليات مراجعة التشعيع الداخلي (جهاز قياس الجرعات بالوميض الضوئي الإشعاعي (جهاز RPLD)). (الصورة من: الوكالة)*

168- وقد خضعت هذه المنهجية للاختبار في عشرة بلدان مشاركة (الاتحاد الروسي، وجمهورية إيران الإسلامية، والبرازيل، وجنوب أفريقيا، والصين، وكرواتيا، والمكسيك، والمملكة المتحدة، والهند، واليونان) تمثل بيئات إكلينيكية متنوعة، مما يضمن قوة المنهجية. وبهذه النتائج التجريبية الواعدة، ستُتاح قريباً خدمة مراجعة التشعيع الداخلي في إطار برنامج الوكالة لمراجعة قياس الجرعات بالمراسلة.

169- وتهدف البحوث الجارية في إطار المشروع البحثي المنسق أيضاً إلى وضع منهجية لإجراء مراجعة أكثر تطوراً. ومن خلال التدقيق الشامل، ستتمكن المستشفيات من استخدام أدوات التطبيق الخاصة بها لإكمال سير العمل الكامل لعلاج المرضى. وهذا التطور بدوره سيُعزِّز الثقة في الممارسة الإكلينيكية للتشعيع الداخلي، مما يضمن سلامة المرضى وجودة العلاج.

170- وعُرِضت فوائد أداة الواقع الافتراضي الجديدة لدى الوكالة لتعليم التشعيع الداخلي والتدريب عليه في حلقة عمل عقدتها الوكالة في موزمبيق في تموز/يوليه 2023. وتمكَّن المهنيون في موزمبيق من ممارسة مختلف العمليات المتعلقة بالتشعيع الداخلي في أنواع السرطان التي تصيب الجهاز التناسلي للمرأة قبل التنفيذ الإكلينيكي لهذه التقنية (الشكل حاء-6). كما تمكَّن أكثر من 150 من أخصائيي علاج الأورام بالإشعاع والفيزيائيين الطبيين وأخصائيي قياس الجرعات والمعالجين بالإشعاع من جميع أنحاء أفريقيا من التدرُّب باستخدام هذه الأداة في حلقة عمل الوكالة بشأن رسم الخرائط الكنتورية إلكترونيًّا خلال المؤتمر الدولي الرابع عشر للمنظمة الأفريقية للتدريب والبحوث في مجال السرطان حول السرطان في أفريقيا الذي عُقِد في السنغال في تشرين الثاني/نوفمبر 2023.

*الشكل-حاء-6- أخصائيان في مجال الرعاية الصحية (فيزيائي طبي وأخصائي علاج الأورام بالإشعاع) في موزمبيق يتدربان على التشعيع الداخلي باستخدام أداة الواقع الافتراضي الجديدة لدى الوكالة. (الصورتان من: الوكالة)*

171- وأداة الواقع الافتراضي لدى الوكالة هي تقنية قيّمة لتعزيز إمكانية حصول مهنيي الرعاية الصحية على تدريب عالي الجودة واكتساب مهارات تفاعلية. ويمكن أن تساعد هذه الأداة في التغلب على القيود المادية والجغرافية واللوجستية وتحفيز تطوير قوة عاملة مهنية عالية المهارة ومحترفة في مجال رعاية مرضى السرطان، مما يسهم في نهاية المطاف في الصحة والرفاه العالميين.

## حاء-3- رؤية داخل القلب: الدور الحاسم للتصوير النووي في الكشف عن الداء النشواني القلبي

### الحالة

172- يحدث فشل القلب عندما يواجه القلب صعوبة في ضخ الدم بشكل فعَّال، مما يؤدي إلى نقص الأكسجين والمواد المغذية في أنسجة الجسم وأعضائه. ويمكن أن يظهر ذلك في أعراض مثل الإرهاق وضيق النفس واحتباس السوائل. وفي الحالات الشديدة، يمكن أن يؤدي فشل القلب إلى مضاعفات تهدد الحياة. ويؤدي الاكتشاف المبكر والعلاج السليم دوراً محوريًّا في تحسين النتائج والتخفيف من مخاطر حدوث مضاعفات.

173- وعادة ما يُصنَّف فشل القلب إلى نوعين رئيسيين بحسب قيمة الكسر القذفي (EF)، أي النسبة المئوية للدم الخارج من القلب مع كل نبضة. فعلى سبيل المثال، يعني الكسر القذفي بنسبة 60٪ ضخ 60٪ من دم القلب في كل انقباض. وفي حين أن الكسر القذفي الطبيعي يتراوح عادة من 50٪ إلى 70٪، فقد يختلف هذا قليلاً وفقا للإرشادات الطبية وطريقة التصوير المستخدمة للقياس. ويشير انخفاض الكسر القذفي دون المعدل الطبيعي إلى تراجع قدرة القلب على ضخ الدم بفعالية، وهي سمة شائعة في فشل القلب.

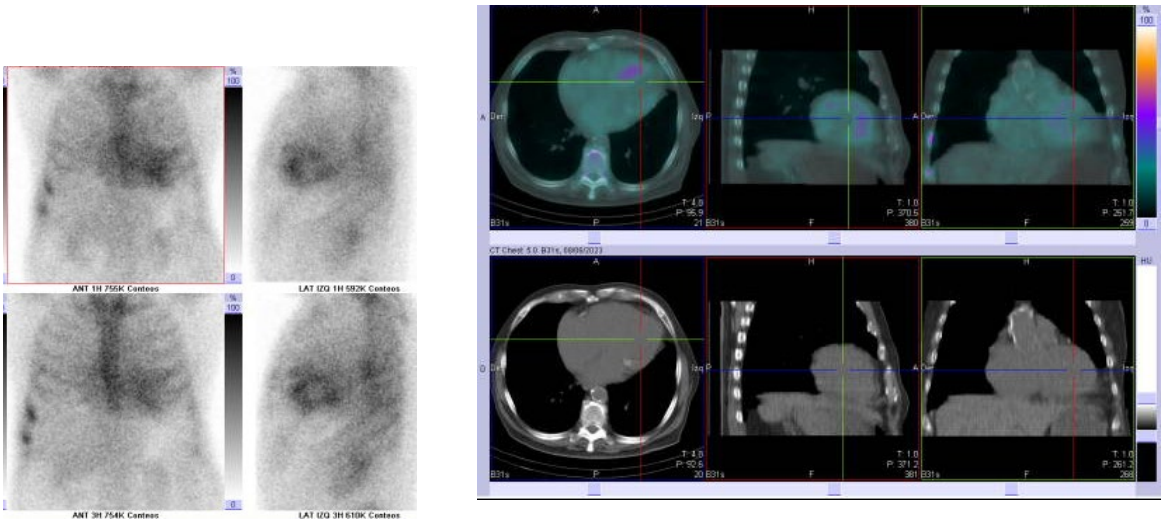
174- وفي حالة فشل القلب المقترن بانخفاض الكسر القذفي (فشل القلب من النوع HFrEF)، تضعف عضلة القلب، ويكون القلب أقل كفاءة في ضخ الدم. وعادة ما يكون لدى الأشخاص المصابين بهذه الحالة كسر قذفي أقل من 40٪. أما في حالة فشل القلب المقترن بثبات الكسر القذفي (فشل القلب من النوع HFpEF)، يضخ القلب الدم على طبيعي، لكن عضلة تظل متيبسة ولا تسترخي كما ينبغي بين النبضات. ويكون الكسر القذفي طبيعي أو شبه طبيعي عادة عندما يعادل أو يزيد عن 50٪. ونظراً لاختلاف أسباب فشل القلب واستراتيجيات علاجه، يساعد هذا التصنيف على توجيه النهج المتبع في العلاج. وتجدر الإشارة إلى أن فشل القلب هو حالة معقدة قد تنطوي كل حالة فردية منها على أسباب كامنة مختلفة أو عوامل مساهمة.

175- وغالبا ما ينتج فشل القلب من النوع HFpEF عن مجموعة من العوامل. ومن العوامل الشائعة المساهمة في ذلك ارتفاع ضغط الدم، الذي يمكن أن يؤدي إلى سماكة وتصلُّب عضلة القلب؛ والتقدم في السن، الذي يمكن أن يؤثر على بنية القلب ووظيفته؛ ومرض السكري، الذي يمكن أن يسهم في تصلُّب عضلة القلب؛ والسمنة، وخاصة زيادة وزن الجسم حول محيط البطن؛ ومرض الشريان التاجي، الذي يقلل من تدفق الدم إلى عضلة القلب بسبب ضيق أو انسداد الشرايين التاجية. ومن بين العوامل المساهمة المهمة التي حظيت باهتمام متزايد في السنوات الخمس الماضية داء اعتلال عضلة القلب النشواني المرتبط بالترانس ثايريتين (الداء النشواني من نوع ATTR)، وهو اضطراب مرضي يتسم بترسب بروتينات غير سوية (تُعرف بالنشوانيات (amyloids)) في أنسجة القلب. وتشير التقديرات إلى أن هذه الحالة المرضية تصيب 13-18٪ من كبار السن الذين تزيد أعمارهم على 65 عاماً الذين يعانون فشل القلب وتبلغ القيمة الوسيطة لفترة البقاء على قيد الحياة بعد الإصابة ما بين 25 و41 شهراً.

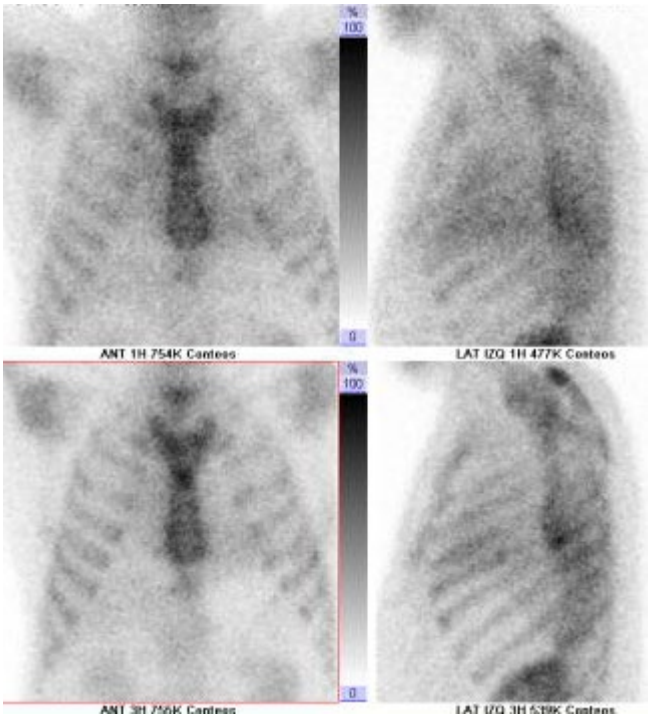
176- وهناك تطورات حديثة في البحوث الطبية والاستراتيجيات العلاجية تبشر بعصر جديد من الأمل للمرضى المصابين بالداء النشواني القلبي. والأدوية الابتكارية التي تستهدف الآليات الأساسية لترسب النشوانيات التي أُتيحت في أوائل عام 2019 إلى جانب أدوات التصوير التشخيصي المُحسَّنة مثل علاج أمراض القلب بالأساليب النووية قد مكَّنت مقدمي الرعاية الصحية من التدخل في وقت مبكر وبشكل أكثر فعالية. وتمثل هذه النقلة النوعية، بفضل الفهم المتطور للداء النشواني القلبي وتوافر العلاجات، طفرة كبيرة حيث إنها توفر للمرضى مستقبلاً أكثر تفاؤلاً. وعلى الرغم من هذه التطورات الإيجابية، فإن القصور في تشخيص الإصابة بالداء النشواني من نوع ATTR يعيق الاستخدام الكامل لهذه التطورات العلاجية.

**الاتجاهات**

177- يؤدي علاج أمراض القلب بالأساليب النووية دوراً محورِّيا في تقييم الداء النشواني القلبي. ومن خلال تقنيات التصوير المتقدمة مثل المسح باستخدام بيروفوسفات التكنيتيوم-99 شبه المستقر (المستحضر $^{99m}$Tc-PYP)، يتسنى الكشف بدقة عن الداء النشواني القلبي وتمييزه عن اضطرابات القلب الأخرى. وتوفر أساليب التصوير هذه معلومات قيِّمة حول مدى إصابة عضلة القلب، مما يساعد في التشخيص المبكر وتصنيف المخاطر (الشكلان حاء-7 وحاء-8). ومن خلال تقييم مدى وشدة ترسب النشوانيات، يساعد علاج أمراض القلب بالأساليب النووية الأطباء في تصميم التدخلات العلاجية المناسبة ورصد تطور المرض. وعلاوة على ذلك، فإن اتسام هذه التقنيات بأنها غير جراحية تجعلها ذات قيمة خاصة لتقييم الداء النشواني القلبي بشكل شامل، مما يساهم بدوره في علاج الحالة في الوقت المناسب وبدقة.



*الشكل-حاء-7- صور ثابتة أمامية وجانبية (يساراً) وصور باستخدام تقنية التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد-التصوير المقطعي الحاسوبي (تقنية SPECT–CT) (يميناً) لمريض يعاني من امتصاص بؤري مكثف غير طبيعي للمستحضر $^{99m}$Tc-PYP في عضلة القلب، وهو ما يتوافق مع إصابته بالداء النشواني من نوع ATTR. (الصور من: أميليا خيمينيز-هيفرمان، مستشفى خوان رامون خيمينيز)*




*الشكل-حاء-8- صور ثابتة أمامية وجانبية لمريض مصاب بفشل القلب تشير إلى عدم وجود امتصاص غير طبيعي للمستحضر $^{99m}$Tc-PYP في عضلة القلب، ومن ثم استبعاد أن يكون سبب فشل القلب هو الداء النشواني من نوع ATTR. (الصور من: أميليا خيمينيز-هيفرمان، مستشفى خوان رامون خيمينيز)*

178- وعلى الرغم من وجود التكنولوجيا والخبرة في مجال التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد باستخدام المستحضر $^{99m}$Tc-PYP، فإن الاستخدام العملي لهذه التقنية في تشخيص الإصابة بالداء النشواني من نوع ATTR محدود في العديد من البلدان. ونظراً لأن معايير التشخيص الحالية لهذه لحالة قد وضعها خبراء في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية، فإنه من غير المعروف ما إن كان يصلح تطبيقها على السكان المتنوعين

عرقيًّا واجتماعيًّا واقتصاديًّا في بقية أنحاء العالم.

179- وتجري الوكالة مشروعاً بحثيًّا منسقاً بعنوان "دراسة الوكالة بشأن اعتلال عضلة القلب النشواني المرتبط بالترانس ثايريتين"، يهدف إلى تحقيق كفاءة مستدامة على مستوى العالم في إجراء تصوير دقيق باستخدام البيروفوسفات (PYP) لتشخيص اعتلال عضلة القلب النشواني ترانسثيريتين بشكل فعال. وسيسهم ذلك في تحسين تحديد وعلاج الكسر القذفي المحفوظ في جميع أنحاء العالم. وفي إطار السعي إلى الكشف المبكر بالإصابة بالداء النشواني القلبي والوصول إلى العلاجات المنقذة للأرواح، يبرز علاج أمراض القلب بالأساليب النووية كمنارة عالمية تضيء طريقاً يبعث الأمل في الأشخاص المصابين. بهذا الداء.

# طاء- الأغذية والزراعة

## طاء-1- تكنولوجيات التشعيع لتطوير اللقاحات: تطبيقات التكنولوجيات النووية للوقاية من الأمراض المعدية التي تصيب الثروة الحيوانية

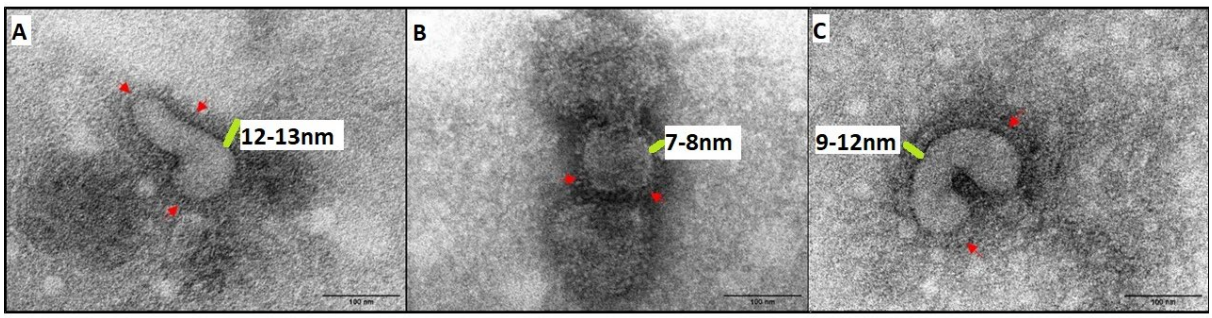
### الحالة

180- يمكن أن تسبب الأمراض المعدية في صناعة الثروة الحيوانية خسائر اقتصادية هائلة في جميع أنحاء العالم. فعلى سبيل المثال، أدت أوبئة الطاعون البقري إلى نفوق العديد من الثروة الحيوانية على مستوى العالم لعدة قرون، مما أدى إلى فترات مستمرة من ندرة الأغذية وانتشار المجاعة على نطاق واسع في المناطق الريفية، وخاصة في أفريقيا وآسيا. وفي عام 2011، أُعلِن عن خلو العالم من هذا المرض المدمر بفضل تطوير لقاح فعَّال وتنفيذ برامج تحصين واسعة النطاق.

181- وغالباً ما تمثِّل اللقاحات نهجاً فعالاً من حيث التكلفة للوقاية من الأمراض. وهناك حاجة كبيرة إلى الإسراع في تصميم وإنتاج اللقاحات ضد مسببات الأمراض الناشئة والناشئة من جديد التي تصعب مكافحتها ولديها القدرة على التسبب في أوبئة مدمرة. ويؤكد هذا الطلب المتزايد على اللقاحات المأمونة لمكافحة الأمراض ذات الأولوية على أهمية تقييم منصات إنتاج اللقاحات الجديدة التي تتطلب بنية أساسية منخفضة التكلفة وكفؤة في نفس الوقت. ولا يزال النهج التقليدي لتصنيع اللقاحات، الذي ينطوي على تعطيل مسببات الأمراض، يمثل طريقة كفؤة وسريعة لتطوير لقاحات جديدة.

182- وحاليًّا، يتمثل الأسلوب السائد المستخدم في إنتاج اللقاح في التعطيل الكيميائي. ومع ذلك، فإن التعطيل المستحث بالتشعيع يوفر العديد من الفوائد المهمة المحتملة مقارنة بأسلوب التعطيل الكيميائي. والمواد الكيميائية المستخدمة في التعطيل لديها القدرة على تعديل البروتينات المسببة للأمراض الأساسية المسؤولة عن تحفيز الاستجابات المناعية. وعلى النقيض من ذلك، يحافظ التعطيل المستحث بالتشعيع على تلك البروتينات بالإضافة إلى السلامة الهيكلية لمسببات الأمراض، مما يساعد على إثارة استجابة مناعية لدى الفرد الملقَّح عند التعرض لمسبب المرض. ومع ذلك، فإن التعطيل المستحث بالتشعيع يتسبب في تلف المادة الوراثية لمسبِّب المرض بحيثي يفتقر إلى القدرة على التكاثر والتسبب في العدوى. وعلى الرغم من أن هذه التكنولوجيا مستخدمة منذ أكثر من 50 عاماً، فإنه لم يتجدد الاهتمام باستخدام التشعيع لإنتاج اللقاحات إلا مؤخراً بفضل أجهزة التشعيع الجديدة التي يمكن أن توفر جرعات إشعاعية دقيقة في فترات أقصر، إلى جانب وجود فهم أفضل للجهاز المناعي مما يتيح تقييماً أكثر فعالية لاستجابات التطعيم.

183- وعلى مدى العقد الماضي، أحرزت الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، تقدماً كبيراً في هذا المجال، حيث أجرت أنشطة البحث والتطوير بشأن استخدام التعطيل الإشعاعي للقاحات ضد أكثر من 20 من مسببات الأمراض الحيوانية والأمراض الحيوانية المصدر. ويتضمن هذا البحث تحديد الجرعة المناسبة من الإشعاع لقتل مسببات الأمراض، ووضع معايير للتطعيمات واكتشاف ما يحدث بعد التطعيم.[25] فعلى سبيل المثال، أظهر نموذج أولي للقاح مشع ضد الأنفلونزا في الدجاج نتائج واعدة عند إجراء الاختبار.[26]




*الشكل- طاء-1- خصائص اللقاحات المشعة مقابل اللقاحات التقليدية المعطَّلة كيميائيًّا: أ: فيروس الأنفلونزا النشط؛ ب: فيروس الأنفلونزا بعد إعطابه هيكليًّا من خلال التعطيل الكيميائي؛ ج: فيروس الأنفلونزا المعطل بالإشعاع وهو يشبه هيكل الفيروس النشط بحيث، عند التطعيم ضده، تنشأ ذاكرة مثالية لهذا المرض لدى الفرد المتلقي للتطعيم لمكافحة مسبب المرض عند التعرض إليه. وتُبيّن الأسهم الحمراء الجزيئات المسؤولة عن تحفيز المناعة داخل اللقاح المرشَّح، بينما تُبيّن الخطوط الخضراء طول تلك الجزيئات. (المصدر: ف. بونفانتي/معهد فينيسيا للتجارب المتعلقة بالوقاية من الأمراض الحيوانية، إيطاليا ومجلة Frontiers in Veterinary Science تموز/يوليه 2022).*

**الاتجاهات**

184- بالإضافة إلى استخدام التشعيع في إنتاج اللقاحات المعطِّلة، يمكن استخدامه لإنتاج كائنات نشطة أيضيًّا ولكنها غير قابلة للتكاثر يمكن أن تكون بمثابة لقاحات مرشحة محتملة، لا سيما للأمراض البكتيرية والطفيلية. ويمكن تعديل جرعة الإشعاع إلى مستوى يجعل الميكروبات التي تتعرض لها غير قادرة على التكاثر (أي لا يمكن أن تسبب العدوى)، مع الحفاظ على وظيفتها الأيضية. وميزة هذه الطريقة هي أن الذاكرة المناعية لا تنشأ فقط ضد بنية هذه الميكروبات ولكن أيضاً ضد وظائف مسبب المرض. واستُخدمت هذه الطريقة لإنتاج لقاح ضد الديدان الخيطية التي تصيب رئتي الماشية وطُرحت لاحقاً في السوق التجارية. ويجري حاليًّا استكشاف هذه الطريقة في سري لانكا من خلال مشروع بحثي منسق لإنتاج لقاح مشع ضد الديدان الخيطية التي تصيب الأغنام والماعز في جميع أنحاء العالم.

185- وقد مكَّن التقدم التقني الأخير من استخدام الحزم الإلكترونية وغيرها من طرق التشعيع لوقف نشاط مسببات الأمراض، مما سمح بالتحول عن استخدام المواد المشعة لإنتاج لقاحات مشعة باستخدام أشعة غاما.

186- وعلاوة على ذلك، أدى استخدام مواد جديدة واقية من الإشعاع مثل أيونات المنغنيز ($Mn^{2+}$)

[25] Cattoli, G., Ulbert, S. and Wijewardana, V., Editorial: Irradiation Technologies for Vaccine Development, Frontiers in Immunology, 9 January 2023.
(المقال الافتتاحي: استخدام تكنولوجيات التشعيع لتطوير اللقاحات).

[26] Alessio Bortolami, et al., Protective Efficacy of H9N2 Avian Influenza Vaccines Inactivated by Ionizing Radiation Methods Administered by the Parenteral or Mucosal Routes, Frontiers in Veterinary Science, Vol. 9, 11 July 2022.
(الفعالية الوقائية للقاحات إنفلونزا الطيور H9N2 المعطَّلة بأساليب الإشعاع المؤيّن المعطاة عن طريق الحقن أو الغشاء المخاطي).

والتريهالوز إلى تحسين الحفاظ على جزيئات مسببات الأمراض المسؤولة عن المناعة أثناء التعطيل المستحث بالتشعيع.

187- كما أدى الابتكار التكنولوجي إلى تحسين عمليات إنتاج اللقاحات المشعة. ومن الأمثلة على ذلك استخدام طبقة سائلة رقيقة مستمرة في إنتاج اللقاح المعطَّل بحزمة الإلكترونات الذي طوره معهد فراونهوفر في ألمانيا ويخضع للاستكشاف الآن في تونس من خلال مشروع بحثي منسق لإنتاج لقاح مشعَّع ضد الفيروس العقدي الذي يؤثر على سمك القاروص.

*الشكل- طاء-2- علماء من سري لانكا يقيّمون الاستجابة المناعية في الماعز المطعَّم بلقاح مشعَّع ضد يرقات Haemonchus contortus، وهي ديدان خيطية يمكن أن تدمِّر قطعان الأغنام والماعز، مما يتسبب في خسائر اقتصادية هائلة. (الصورة من: ت. أنوباما/جامعة بيرادينيا، سري لانكا)*

## طاء-2- الجمع بين التكنولوجيا النووية لجهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية وصور الاستشعار عن بُعد لإدارة المياه الزراعية

### الحالة

188- يعاني ثلاثة مليارات شخص يعيشون في المناطق الزراعية من مستويات مرتفعة أو مرتفعة للغاية من ندرة المياه. ووفقاً لتوقعات منظمة الفاو، بحلول عام 2050، قد يواجه حوالي 57٪ من سكان العالم نقصاً في المياه لمدة شهر واحد على الأقل كل عام. وسيزيد تغيُّر المناخ من هذا التحدي لأن الظواهر الجوية القاسية تؤثر على توافر المياه للإنتاج الزراعي من خلال الجفاف أو الفيضانات. ولذلك، من الضروري الحصول على معلومات صحيحة ودقيقة حول كيفية تأثير هذه التأثيرات القاسية على رطوبة التربة وإنتاجية مياه المحاصيل.

189- ورصد رطوبة التربة أمر بالغ الأهمية ليس فقط لإدارة الري، ولكن أيضاً للنمذجة الهيدرولوجية، وتجدُّد المياه الجوفية، والتنبؤ بالفيضانات والجفاف. وتوفِّر الأساليب التقليدية والنووية تقييمات دقيقة لرطوبة التربة على مستوى موقع محدَّد (مثل موقع محدَّد في الحقل)، في حين توفر تكنولوجيا الاستشعار عن بُعد بيانات شاملة على نطاق أوسع.

190- وعلى مدى السنوات العشر الماضية، كانت هناك تطورات كبيرة في تطوير جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية. وقد قادت الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، هذا الابتكار من خلال مشروع بحثي منسق بعنوان "تحسين صمود الزراعة وأمن المياه باستخدام جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية". ويسعى هذا المشروع البحثي المنسق إلى مواجهة التحدي المتمثل في قياس رطوبة التربة بدقة عن طريق سد الفجوة بين التصوير الساتلي الواسع النطاق وأجهزة الاستشعار الأرضية المحلية من أجل الإدارة الفعالة لاستخدام المياه الزراعية. ويعمل جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية عن طريق اكتشاف النيوترونات المنخفضة الطاقة بالقرب من سطح التربة، مما يتيح رصد رطوبة التربة عبر مساحات واسعة تصل إلى 40 هكتاراً. وقد صُقِلت هذه التكنولوجيا، مما جعلها أكثر يسراً وفعالية من حيث التكلفة لكل من متخذي القرارات والمجتمعات الزراعية. ونتيجة لذلك، فإن اعتماد هذه التكنولوجيا آخذ في الاتساع بسرعة بين مختلف الجهات المعنية.

191- ولتحقيق أقصى استفادة ممكنة من المساعدة التي تقدمها الوكالة إلى الدول الأعضاء من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، أطلق المدير العام غروسي، بالاشتراك مع السيد شو دونيو، المدير العام للفاو، مبادرة Atoms4Food (تسخير الذرة من أجل الغذاء) خلال منتدى الأغذية العالمي الذي عقد في روما في تشرين الأول/أكتوبر 2023 (الشكل أولا-3). وتهدف هذه المبادرة، مقترنة بجهود البحث والتطوير الجديدة، إلى التصدي للتحديات التي تفرضها زيادة احتياجات الأمن الغذائي وتعزيز القدرة على الصمود أمام تغيُّر المناخ في جميع أنحاء العالم.

*الشكل-طاء-3- أطلق السيد رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة، والسيد شو دونيو، المدير العام للفاو، مبادرة Atoms4Food (تسخير الذرة من أجل الغذاء) خلال منتدى الأغذية العالمي الذي عقد في روما في 18 تشرين الأول/أكتوبر 2023. (الصورة من: الوكالة)*

**الاتجاهات**

192- حتى وقت قريب، كانت معظم أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية تعتمد على استخدام أنابيب العد النسبي، والتي تستخدم عادة غازات مثل الهيليوم-3 أو ثلاثي فلوريد البورون-10. وفي حين أن أنابيب العد هذه لديها حساسية عالية للنيوترونات (المؤشر البديل لرطوبة التربة)، إلا أنها باهظة الثمن نسبيًّا، مما يعيق النقل العالمي لهذه التكنولوجيا. ومع ذلك، فإن المؤسسات البحثية والشركات التجارية تستخدم أو تختبر في الوقت الحالي أجهزةَ الكشف القائمة على الليثيوم والمواد البلاستيكية والمعدنية المحددة، مما تسبب في انخفاض كبير في الأسعار منذ تطوير أجهزة الكشف هذه في أوائل القرن الحادي والعشرين.

193- وتُستخدم الآن تكنولوجيا استشعار نيوترونات الأشعة الكونية إلى جانب صور الاستشعار عن بُعد العالية الدقة. ويسمح الجمع بين التقنيات النووية والرقمية برصد رطوبة التربة عبر مناطق واسعة من الأراضي أو على مستوى مستجمعات المياه على أساس أسبوعي. وهذه التكنولوجيا المتطورة لديها القدرة على إحداث ثورة في الاستشعار عن بُعد للري الذكي مناخيًّا، مما سيحسِّن بشكل كبير حصول متخذي القرارات والمجتمعات الزراعية على المعلومات الأساسية. ومن شأن ذلك أن يعزز الاستخدام المستدام للموارد المائية في الزراعة، ويتناول الغاية 6-4 من أهداف التنمية المستدامة، التي تهدف إلى تحقيق زيادة في كفاءة استخدام المياه العذبة وإمداداتها.

194- ويجري الآن تنفيذ هذا المزيج من التقنيات النووية والرقمية، لأول مرة، في بلدان في جميع أنحاء العالم للمساعدة في الحفاظ على الموارد المائية من أجل الإنتاج الغذائي المستدام. وفي أفريقيا، أُدخِلت هذه التكنولوجيا في 23 بلداً تغطي الأنواع الرئيسية لاستخدام الأراضي والمناطق المناخية في القارة، ولا سيما تلك التي تواجه الجفاف. كما يمهد هذا العمل الطريق أمام مجموعة من التطبيقات المحتملة للبحوث البيئية، مثل التحقُّق من صحة بيانات الاستشعار عن بُعد، وتحليل اتجاهات رطوبة التربة، ونمذجة إنتاجية مياه المحاصيل، والتغيرات في توافر المياه من المستنقعات الاصطناعية.

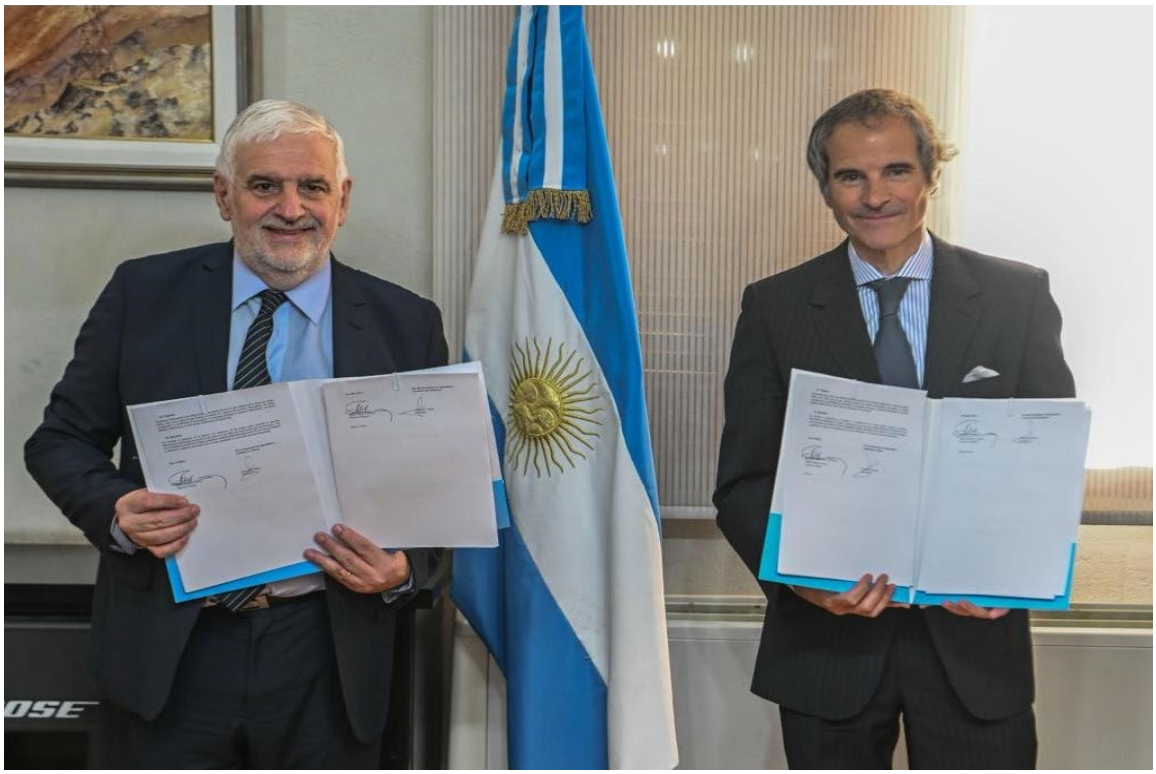
*الشكل طاء-4: جهاز استشعار نيوتروني للأشعة الكونية مثبَّت في الأراضي الرطبة في بوليفيا في جبال الأنديز على ارتفاعات عالية لدراسة دورها في تخزين المياه في ظل تغيُّر المناخ. (الصورة من: ترنتون فرانز، جامعة نبراسكا - لينكولن)*

195- وفي دولة بوليفيا المتعددة القوميات، ثُبِّت جهاز استشعار نيوتروني للأشعة الكونية في الأراضي الرطبة المرتفعة بحوالي 4500 متر فوق مستوى سطح البحر (الشكل طاء-4). وتقع هذه الأراضي الرطبة بالقرب من الثلوج الأبدية لجبل هواينا بوتوسي الذي يبلغ ارتفاعه 6088 متراً في كورديليرا ريال، والذي فقد أكثر من ثلث سطحه الجليدي بسبب تغيُّر المناخ، مما أثر على إمدادات المياه لملايين البوليفيين. وسيساعد هذا الجهاز العلماء على تقييم قدرة تخزين المياه في الأراضي الرطبة، والتنبؤ بمدى واحتمال حدوث الجفاف، وبالتالي دعم متخذي القرارات في وضع سياسات التكيُّف مع تغيُّر المناخ.

*الشكل-طاء-5: دورة تدريبية بشأن استخدام أجهزة استشعار نيوترونات الأشعة الكونية، عُقِدت في زايبرسدورف بالنمسا، في إطار مشروع التعاون التقني الإقليمي RAF5086 "تعزيز الزراعة المستدامة في ظل الظروف المناخية المتغيرة باستخدام التكنولوجيات النووية". (الصورة من: الوكالة)*

196- وعن طريق برامج التدريب ونقل التكنولوجيا التي تُنفَّذ من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة، تسعى الوكالة إلى تعزيز قدرات البلدان والارتقاء بها إلى المستوى الأمثل للاستفادة من هذه التقنية النووية في استخدام مواردها المائية بطريقة مستدامة لتحقيق الأمن الغذائي (الشكل طاء-5).

197- وفي 29 كانون الأول/ديسمبر 2023، وقعت الوكالة والأرجنتين مذكرة تفاهم تهدف إلى تعزيز التعاون في مجال الأغذية والزراعة من خلال مبادرة Atoms4Food (تسخير الذرة من أجل الغذاء) التي أطلقتها الوكالة مؤخرا (الشكل طاء-6). ونصت مذكرة التفاهم على تحديد أربعة مجالات ذات أولوية، ألا وهي تكنولوجيا تشعيع الأغذية، وصحة الحيوان، وتقنية الحشرة العقيمة، والكشف عن الكربون المتجدد في المنتجات الحيوية.



*الشكل-طاء-6: وقع المدير العام للوكالة غروسي (يميناً) والبروفيسور فرناندو فيليا، مدير كلية الهندسة الزراعية بجامعة بوينس آيرس، مذكرة تفاهم بين الوكالة وأمانة الأغذية والاقتصاد الحيوي في وزارة الزراعة والثروة الحيوانية ومصايد الأسماك في الأرجنتين بشأن التعاون في إطار مبادرة Atoms4Food في 29 كانون الأول/ديسمبر 2023.*
*(الصورة من: الوكالة)*

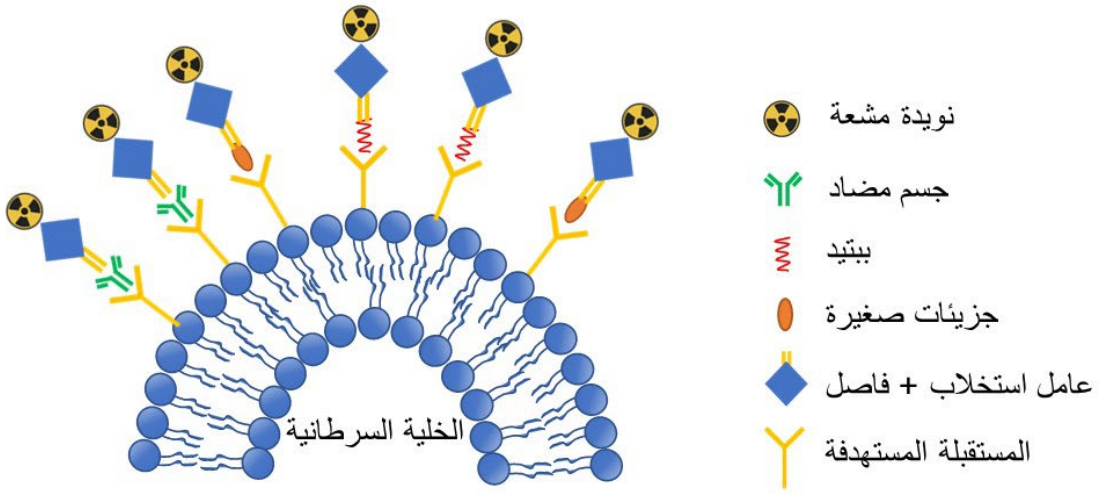
# ياء- النظائر المشعة والتكنولوجيا الاشعاعية

## ياء-1- نظم إيصال جديدة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تستهدف الخلايا

### الحالة

198- استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية طريقة مأمونة وفعالة لإيصال النويدات المشعة إلى الأعضاء أو الأنسجة أو الأهداف الخلوية ذات الأهمية للأغراض تشخيصية أو العلاجية. ويجب إيصال النويدات المشعة إلى الهدف المحدَّد وإبقاؤها في هذا الهدف طوال الفترة اللازمة لذلك فقط وفقاً للمتطلبات الإكلينيكية، وتجنب تراكم النويدات في الأنسجة السليمة وتعرضها غير الضروري للإشعاعات. وكان اليود المشع، الذي استُخدم لتشخيص وعلاج أمراض الغدة الدرقية منذ أوائل أربعينيات القرن العشرين، أول النويدات المشعة التي تستخدم بهذه الطريقة. وبالإضافة إلى ذلك، فإنَّ فلوريد الصوديوم الفلور-18 وكلوريد الراديوم-223/الستِرُنشيوم-89 المستخدمين في تصوير العظام وعلاج انبثاث العظام بالنويدات المشعة يُعدَّان مثالين آخرين مماثلين على تصميم بسيط للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. ومع ذلك، يصبح استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية أكثر تعقيداً عندما تنطوي التصاميم على نويدات مشعة مختلفة تحتاج إلى وسمها بأنواع مختلفة من النواقل، مثل الجزيئات الصغيرة والببتيدات والأجسام المضادة وبقاياها، والتي يمكنها التعرف بدقة على الأهداف الخلوية المعبَّر عنها على الخلايا السرطانية[27] (الشكل ياء-1).

[27] Bodei L., Herrmann K., Schöder H., Scott A. M. and Lewis J. S. Radiotheranostics in oncology: current challenges and emerging opportunities. Nature Reviews Clinical Oncology 19, 534–550 (2022).




*الشكل- ياء-1- تمثيل تخطيطي لتصاميم المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. (الرسم التوضيحي من: الوكالة)*

199- وفي الوقت الراهن، أثبتت المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية فائدتها الإكلينيكية ليس فقط للتصوير الوظيفي للأعضاء، ولكن أيضاً لتكوين صورة للخلايا السرطانية دون اللجوء للجراحة باستخدام تصاميم مستحضرات صيدلانية إشعاعية محددة الهدف. ويسمح هذا التقدم بتوفير علاج مخصَّص باستخدام أدوية جديدة منها العلاجات المناعية والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية، مثل تلك المعتمدة مؤخراً لعلاج سرطان البروستاتا والغدد الصماء العصبية.[28] ويمكن رصد المزيد من سبل العلاج باستخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التشخيصية.

200- وتتزايد توافر النويدات المشعة ذات الخصائص الفيزيائية المناسبة للتصوير التشخيصي أو العلاج، وذلك بفضل التطورات التقنية والشبكات التعاونية في بلدان متعددة.[29] وتساهم البحوث الطبية الحيوية أيضاً في تطوير جزيئات يمكن استخدامها للوسم الإشعاعي لأهداف الخلايا الجديدة الخاصة بالأمراض وفي أعمال التطوير السابقة للاستخدام الإكلينيكي. ومع ذلك، يوجد عائق أمام الاستخدام الإكلينيكي بسبب التحديات المختلفة المرتبطة بالحواجز البيولوجية والتفاعلات على المستوى الخلوي التي تؤدي إلى التدهور والتمثيل الغذائي والتفاعلات غير المرغوب فيها التي تسبب السمية. ويزداد تحسين تركيبات المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية تعقيداً عند استخدام نويدات مشعة ينبعث منها عند اضمحلالها جسيمات قصيرة المدى لإلكترونات بيتا وألفا وأوجيه، ولا تنبعث منها أشعة غاما ذات الصلة الملائمة لإجراء التصوير.

**الاتجاهات**

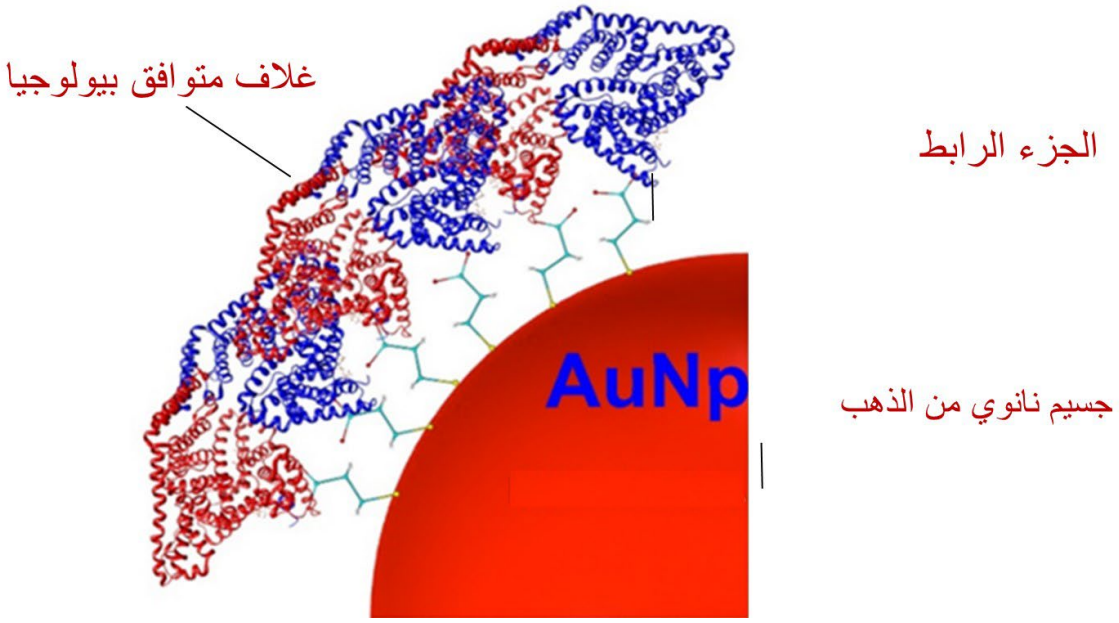
201- تتمثل إحدى طرق التغلب على هذه التحديات في مجال المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في استخدام نظم إيصال مماثلة لتلك المستخدمة في المستحضرات الصيدلانية واللقاحات غير المشعة. وتجري دراسة مستفيضة لنظم الإيصال النانوية، بما في ذلك النظم النانوية التشخيصية العلاجية، ذات التباديل المختلفة وتوليفات طرائق التصوير والعقاقير والنويدات المشعة، بهدف تعزيز أمان العقاقير وفعاليتها. وفي النظم البيولوجية، تحدث العديد من الآليات الداخلية للخلية بشكل طبيعي على مقياس نانومتر (10-9 ملي). ولذلك، من المتوقع أن توفِّر نظم إيصال الجسيمات النانوية فوائد عديدة، مثل تركيز أفضل للنويدات المشعة العلاجية عند الهدف مع تقليل

(مستحضرات التشخيص العلاجي الإشعاعي في طب الأورام: التحديات الحالية والفرص الناشئة).

[28] الصفحة الشبكية لإدارة الأغذية والعقاقير: https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/daf/index.cfm

[29] الملخص الأول القابل للنشر لمشروع PRISMAP (مشروع PRISMAP, 2022):
https://www.prismap.eu/members/repository/Public/Publishable_summaries/PRISMAP_PubSum_1.pdf

الآثار الجانبية[30]، من خلال تعديل الحرائك الدوائية للأدوية. وتشمل نظم إيصال الجسيمات النانوية تصميمات مختلفة، مثل جزيئات الديندريمر والجسيمات الدهنية والمذيلات والكبسولات النانوية والكرات النانوية، فضلاً عن أنواع مختلفة من الجسيمات النانوية، مثل الجسيمات غير العضوية والبوليمرية والصلبة وغيرها[31] (الشكل ياء-2).




*الشكل ياء-2- مخططات جسيمات الذهب النانوية المترافقة (Au) المستخدمة في تطوير المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. (الرسم التوضيحي من: الوكالة)*

202- وتعتمد العديد من المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تخضع حاليًّا للتقييم قبل الاستخدام الإكلينيكي على الأجسام المضادة أو البروتينات أو الأدوية النانوية التي لديها القدرة على استهداف البيئة الدقيقة للورم، إما بشكل نشط أو سلبي. ويجري تطوير نظم إيصال أفضل كطريقة لاستكشاف الإمكانات الخفية للعلاج المستهدف بالنويدات المشعة. كما طُبِّقت الكيمياء النقرية والكيمياء المتعامدة الحيوية، اللتان حظيتا باهتمام متزايد منذ منح جائزة نوبل في الكيمياء لعام 2022 للباحثين العاملين في هذين المجالين، على الكيمياء الإشعاعية ونظم الإيصال، وذلك أساساً من أجل الإيصال الفعال للجزيئات المترافقة المناعية الإشعاعية (النويدات المشعة التشخيصية أو العلاجية جنباً إلى جنب مع مواد مناعية محدَّدة).[32]

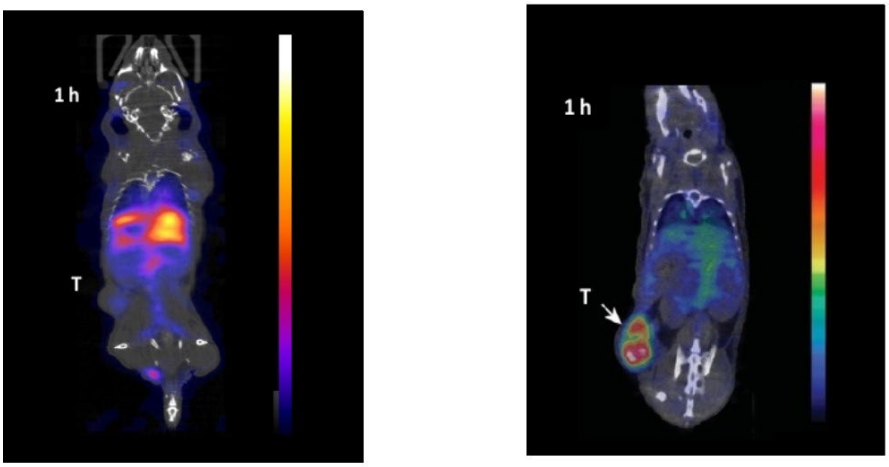
203- ويمكن دمج جميع نظم الإيصال المستهدفة هذه مع نهج الاستهداف المسبق أو العلاجات المركبة للعلاج الكيميائي أو المحسسات الإشعاعية. وتنطوي نهج الاستهداف المسبق على إمكانية إحداث ثورة في الاستراتيجيات العلاجية الحديثة، حيث يمكنها زيادة نسب الخلايا المستهدفة إلى الخلايا المحيطة السليمة حتى 150 ضعفاً،

[30] Jani, P. Subramanian, S., Korde, A., Rathod, L. and Sawant, K. Theranostic Nanocarriers in Cancer: Dual Capabilities on a Single Platform. Functional Bionanomaterials Nanotechnology in the Life Sciences, 293 Thangadurai, D. et al. Functional Bionanomaterials. Nanotechnology in the Life Sciences, 293–310 (2020).
(استخدام الناقلات النانوية في التشخيص العلاجي للسرطان: قدرات مزدوجة بأداة واحدة).

[31] Jalilian, A. R., Ocampo-García, B. et al. IAEA Contribution to Nanosized Targeted Radiopharmaceuticals for Drug Delivery, Pharmaceutics 14, 1060 (2022).
(مساهمة الوكالة الدولية للطاقة الذرية في استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الموجهة من الحجم النانوي لإيصال العقاقير).

[32] Kondengadan, S. M., Bansla, S., Yang, C. et al. Click chemistry and drug delivery: A bird's-eye view. Acta Pharmaceutica Sinica B 13, 1990 (2023).
(الكيمياء النقرية وإيصال العقاقير: نظرة عامة إجمالية).

ضمن الأطر الزمنية المبكرة، كما هو مبين في الشكل ياء-3. وتشير النتائج الأولية إلى أن هذه النهج تتفوق حتى على نهج الاستهداف التقليدية للعلاج بالنويدات المشعة. وكلما تسارعت عملية استهداف الخلايا المصابة عن الخلايا المحيطة بنسب أكبر وتراكمت الأجسام المضادة قبل العلاج، أصبح من الممكن استخدام النويدات المشعة ذات الأعمار النصفية القصيرة، مما يقلل من احتمال تعرُّض الأنسجة السليمة للإشعاع.




(أ) (ب)

*الشكل-ياء-3- صورتان للتصوير المناعي الإشعاعي للبروتين السكري 72 المرتبط بالورم الذي يستهدف الجسم المضاد أحادي النسيلة CC49 باستخدام النهج التقليدي (أ) ونهج الاستهداف المسبق (ب) للتوصيل الفعال للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. (المصدر: المستحضرات الصيدلانية، 15، 685 (2022)[33])*

204- وستهدف أنشطة الوكالة المستقبلية إلى الجمع بين خبراء متعددي التخصصات في هذا المجال لتحديد أكثر النظم الواعدة، وتحديد التحديات المرتبطة بها، ووضع حلول للاستخدام الإكلينيكي لهذه التطورات. وقد جرى التخطيط لمشروع بحثي منسق لعام 2025 لمساعدة الدول الأعضاء في استعدادها لاعتماد هذه التطورات بسلاسة من أجل الإيصال الفعَّال للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. وإنَّ نقل المعارف والتكنولوجيا في سياق الإطار الخاص بالوكالة أمر يكتسي أهمية كبيرة في هذا الصدد.

## ياء-2- استخدام تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية والمستنقعات الاصطناعية لمعالجة مياه الصرف الناتجة عن التعدين

### الحالة

205- على الرغم من أن صناعات التعدين ومعالجة المعادن تسهم بشكل كبير في الاقتصاد العالمي، فإنه من المعروف أيضاً أنها تؤثر بشكل سلبي على البيئة. ولا يقتصر ضرر التصريف المباشر لمياه الصرف الناتجة عن التعدين والمحتوية على ملوثات عضوية وغير عضوية في البيئة على التلوث البيئي، بل يشمل إهدار موارد المياه المتناقصة. وبالتالي، فإنَّ إعادة التدوير وإعادة الاستخدام ضروريان لتطوير اقتصاد دائري في صناعة معالجة المعادن.

[33] García-Vázquez, R., Battisti, U. M. and Herth, M. M. Recent Advances in the Development of Tetrazine Ligation Tools for Pretargeted Nuclear Imaging. Pharmaceuticals 15, 685 (2022).
(التطورات الحديثة في استحداث أدوات الربط بالتترازين للتصوير النووي عن طريق الاستهداف المسبق).

206- وتشوب النظم التقليدية لمعالجة مياه الصرف أوجه قصور كبيرة في قدرتها على إزالة الملوثات المستعصية الموجودة في أنواع مختلفة من مياه الصرف، وكذلك فيما يتعلق بتراكم الرواسب الطينية ومعالجتها وتصريفها. وبالإضافة إلى أن النظم التقليدية لمعالجة مياه الصرف تتوقف عن العمل بشكل متكرر نتيجة للأعطال الميكانيكية أو سوء إدارتها، فإنها باهظة الثمن وتتطلب وجود موظفين ذوي كفاءة تقنية عالية في جميع مراحل التشييد والتشغيل والصيانة. وعلى مدى العقود الماضية، يسرت الوكالة التطبيقات الصناعية لتكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية بغرض فحص مختلف منشآت معالجة مياه الصرف، مثل الخلاطات، وخزانات التهوية، وأجهزة التصفية، وأجهزة الهضم، ووحدات الترسيب والترشيح.

*الشكل ياء-4- مياه الصرف الناتجة عن التعدين، وادي بوبناس، بلمونتي دي ميراندا، أستورياس، إسبانيا.*
*(المصدر: Adobe Stock)*

207- وتؤدي تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية دوراً مهماً في صناعة معالجة المعادن، حيث تُستخدم لدراسة العمليات في المحطات الصناعية واستكشاف مشاكلها وإصلاحها، مما يؤدي إلى تحسين أكبر لهذه الصناعة. وعلى الرغم من أن هذه التكنولوجيا قابلة للتطبيق عبر طيف صناعي واسع، فإنَّ مجموعات المستخدمين المستهدفة الرئيسية تشمل صناعات البترول والبتروكيماويات وصناعة معالجة المعادن وصناعة معالجة مياه الصرف. وتتضمن تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية استخدام مصادر مشعة مختومة أو مصادر مشعة مفتوحة أو نظم مراقبة نووية، إما بمفردها أو مجتمعة، اعتماداً على المشكلة المعنية. وفي تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية المفتوحة، التي تُستخدم عادة لدراسة الهيدروديناميات، يُحقَن المقتفي الإشعاعي في نظام صناعي. وتقيس أجهزة الكشف عن الإشعاعات ونظام متكامل للحصول على البيانات نشاط المقتفي عند مخرج النظام، مما يؤدي إلى إنشاء منحنى عمر الخروج الذي يمكن أن يوفِّر معلومات مهمة حول تدفق السوائل.

208- وعلى الرغم من أن تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية ساعدت على تحسين كفاءة المحطات التقليدية لمعالجة مياه الصرف، فإنه لا يزال هناك طلب على طرق بديلة أسهل في التشييد والتشغيل والصيانة. وقد أدى هذا الطلب إلى مزيد من التطورات في معالجة مياه الصرف التي تهدف إلى التغلب على هذه الصعوبات المستمرة.

209- وتقدم المستنقعات الاصطناعية بديلاً جذاباً للمحطات التقليدية لمعالجة مياه الصرف. والمستنقعات الاصطناعية هي نظم مصممة لاستخدام الوظائف الطبيعية لنباتات المستنقعات الاصطناعية وتربتها وتجمعاتها الميكروبية لمعالجة الملوّثات في المياه السطحية أو المياه الجوفية أو مجاري النفايات. وهي نظم فعالة من حيث التكلفة وصديقة للبيئة، نظراً لاستهلاكها المنخفض للطاقة وبنيتها الأساسية الميكانيكية البسيطة. ونتيجة لذلك، برزت المستنقعات الاصطناعية على مدى العقود الخمسة الماضية بوصفها تكنولوجيا معالجة موثوقة ومناسبة لجميع أنواع مياه الصرف، بما في ذلك مياه المجاري والنفايات السائلة الصناعية والزراعية ورشح مستودعات طمر النفايات وانجراف مياه العواصف. وعلى الرغم من المزايا التي تتمتع بها المستنقعات الاصطناعية عن المحطات التقليدية لمعالجة مياه الصرف، فإنه لا يوجد ما يكفي من المعارف والفهم المتعلق بالهيدروديناميات المعقدة، مما يعرقل التشغيل الفعال وتحسين عملية المعالجة. وللتغلب على هذه الفجوة، أطلقت الوكالة مشروعاً بحثيًّا منسقاً يهدف إلى استحداث أسلوب قائم على المقتفيات الإشعاعية لدراسة المستنقعات الاصطناعية، ووضع البروتوكولات والمبادئ التوجيهية ذات الصلة والتحقق من صحة نماذج التدفق للمستنقعات الاصطناعية.

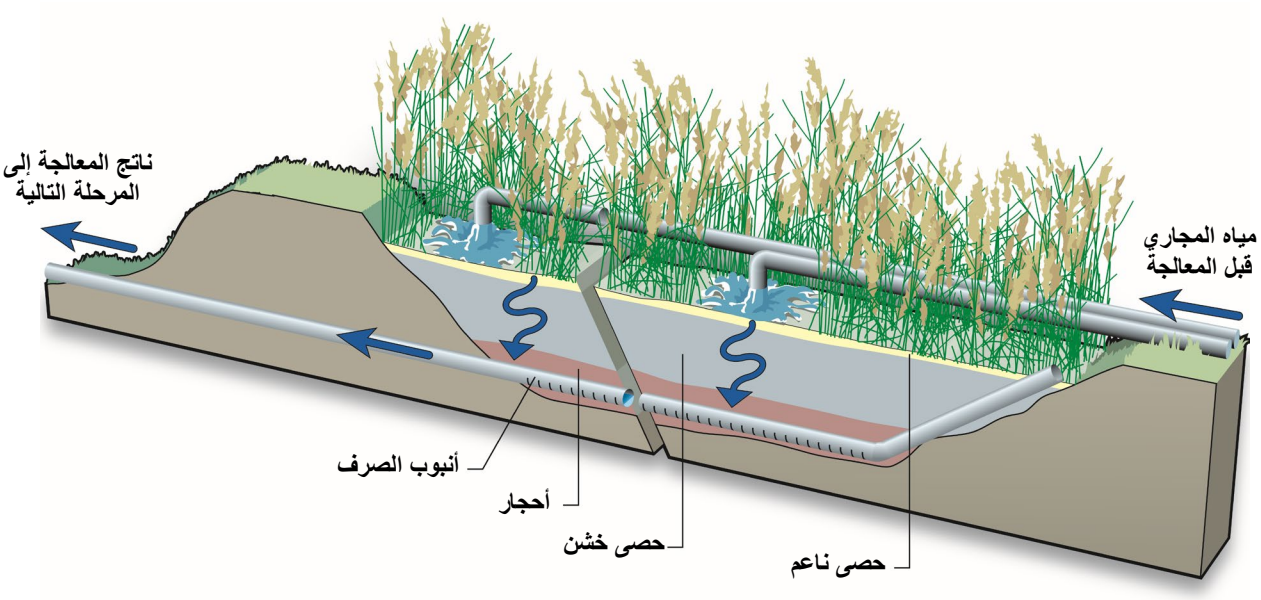
*الشكل-ياء-5- نظام تقليدي لمعالجة مياه الصرف، بيلاروس.*
*(المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، رسم بياني معدَّل من Graphithèque/Adobe Stock)*

**الاتجاهات**

210- من المتوقع أن تنمو صناعة التعدين في المستقبل المنظور، مع استمرار الطلب على التقنيات الجديدة التي تعتمد على المواد الحيوية. وتعتبر خطط استصلاح المناجم وإغلاقها، التي تعتمد على تضاؤل الموارد المائية، مهمة لتحقيق النجاح النهائي لأي منجم. وتأخذ هذه الخطط في الاعتبار جميع المشاكل المحتملة المرتبطة

بكل من المنجم ومحطة معالجة مياه الصرف الخاصة به وقد تشمل بعض التدابير لمعالجة المياه بعد الإغلاق بالإضافة إلى أخذ العينات على المدى الطويل. كما استرعى النموذج القائم على الاقتصاد الدائري الاهتمام مؤخراً كوسيلة لمعالجة هذا السيناريو المعقد، وتشجيع اعتماد تقنيات واستراتيجيات معالجة جديدة.

211- ولا يخفى على أحدٍ فعالية استخدام المستنقعات الاصطناعية لإزالة مجموعة متنوعة من الملوثات. ومع ذلك، ركَّزت الأبحاث المتعلقة بالمستنقعات الاصطناعية بشكل أساسي على عمليات المعالجة البيولوجية والكيميائية، باستخدام اختبار الصندوق الأسود الذي يقارن تركيزات الملوّثات والنفايات الداخلة والخارجة، ولكنه يتجاهل أهمية خصائص التدفق التي تعتبر وسيلة رئيسية لنقل الملوّثات وإزالتها ومهمة للأداء العام للنظام.




*الشكل-ياء-6- رسم تخطيطي لمستنقع اصطناعي مشيَّد. (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، رسم بياني معدَّل من Graphithèque/Adobe Stock)*

212- والوكالة بصدد إعداد مشروع بحثي جديد بشأن الأداء الهيدروليكي للمستنقعات الاصطناعية من أجل معالجة مياه الصرف الناتجة عن التعدين من أجل استقصاء بارامترات التصميم المتصلة بالعمليات الهيدروليكية والترابط بين العمليات الهيدروليكية وعمليات نوعية المياه باستخدام تكنولوجيا المقتفيات الإشعاعية المفتوحة المصدر. ويهدف هذا المشروع البحثي المنسق إلى إعداد نماذج وأدوات تعمل على تحسين كفاءة إزالة الملوثات في المستنقعات الاصطناعية من خلال توفير معلومات مكانية وزمنية مفصَّلة، بالإضافة إلى التنبؤ بالاستجابة الديناميي لهذه المستنقعات في ظل مجموعة متنوعة من الظروف. وستكون البروتوكولات والمبادئ التوجيهية لاستخدام المقتفيات الإشعاعية في المستنقعات الاصطناعية الموضوعة في إطار مشروع بحثي منسق قائم مورداً كبيراً لمشروع البحث المنسق الجديد.

# كاف- الهيدرولوجيا النظيرية

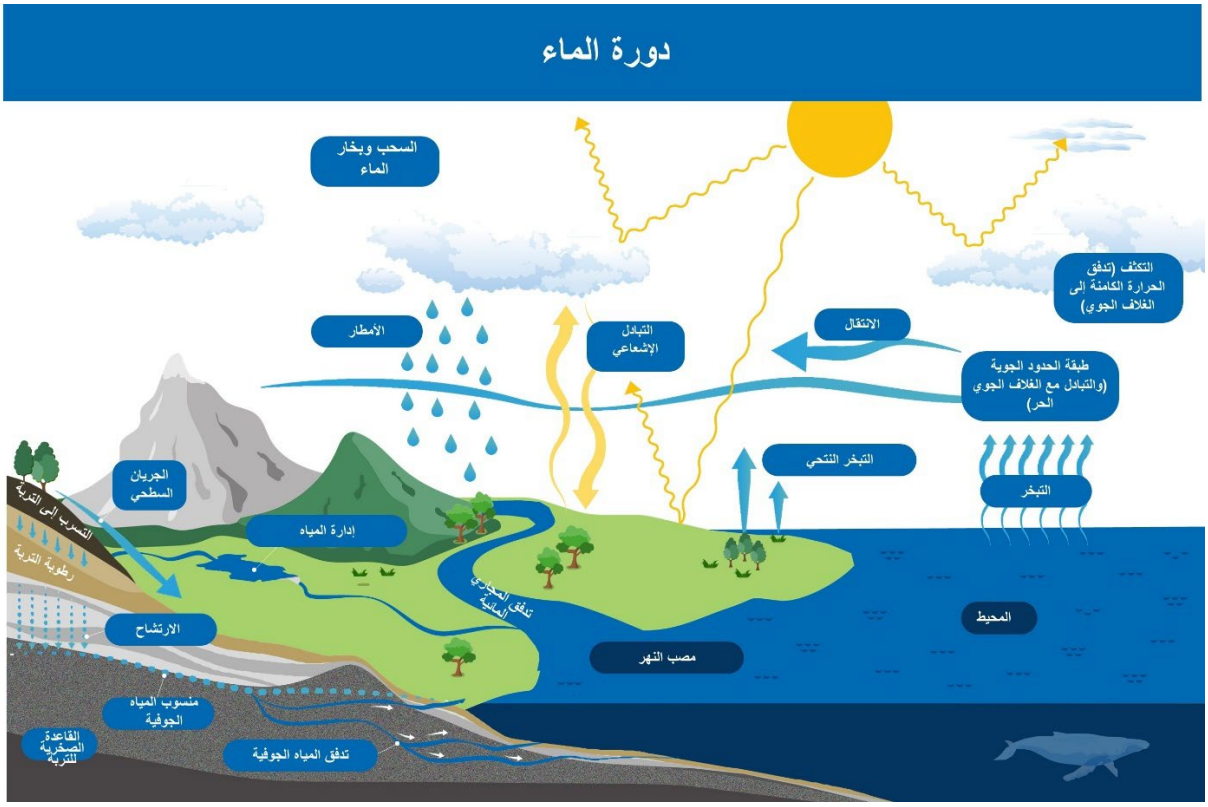
## كاف-1- تعقب عمليات دورة المياه: التطورات الجديدة في تحليل التريتيوم

### الحالة

213- التريتيوم هو النظير المشـــع الوحيد المدمج في جزيء الماء، مما يجعله أداة تعقب قيّمة لعمليات دورة المياه. ونظرا لقصر العمر النصفي للتريتيوم (12,3 سنة)، فإنه يُستخدم أساساً في الهيدرولوجيا لتقدير تجدُّد المياه الجوفية وتقييم مدى تأثرها بالتلوث. ويُنتج التريتيوم بشـــكل طبيعي عن طريق تفاعل الأشـــعة الكونية مع النتروجين-14 في الغلاف الجوي العلوي، وتبلغ معدلات إنتاجه حوالي 258 جراماً ســـنويًّا. كما يُنتج التريتيوم كمنتج ثانوي للصناعة النووية بكميات مماثلة لإنتاجه من المصادر الطبيعية.

214- وخلال الفترة 1945-1963، أُطلِق أكثر من 500 كيلوغرام من التريتيوم في الغلاف الجوي بســـبب اختبار الأجهزة النووية الحرارية، مما أدى إلى زيادة التريتيوم في هطول الأمطار على المستوى العالمي بمقدار أكبر من المســـتوى الطبيعي بعدة مرات. ومنذ الحظر المفروض على إجراء الاختبارات في الجوي في عام 1963، تدهورت مستويات التريتيوم في مياه الغلاف الجوي ببطء حتى وصلت إلى مستويات الوضع المستقر. ونظراً لانخفاض تركيز التريتيوم في المياه الطبيعية في الوقت الحالي، أصـــبح قياس محتوى التريتيوم تحديًّا من الناحية التقنية. ومن أجل الحصول على أعداد كافية من مرات الاضمحلال للحصول على نتائج صحيحة ودقيقة مناسبة للتطبيقات الهيدرولوجية الموثوقة التي تستخدم عدادات قياس الوميض بالسوائل المتاحة في السوق، يلزم إثراء التريتيوم بدرجة كبيرة (التركيز التمهيدي من 15 إلى 100 ضعف).

215- وعادة ما يُثرَّى التريتيوم باستخدام خلايا قلوية إلكتروليتية، صُمِّمت في أوائل ستينيات القرن العشرين، يكون قطباها من النيكل أو أحد قطباها من الفولاذ والآخر من الفولاذ الطري. وانتهى الاختبار الذي أُجري مؤخراً في عام 2018 لمقارنة الكفاءة بين المختبرات بشـــأن قياس التريتيوم وشـــمل حوالي 90 مختبراً إلى أن أكثر من 75٪ من مختبرات التريتيوم في جميع أنحاء العالم تســـتخدم نظم الخلايا القلوية الإلكتروليتية من الفولاذ الطري لقياس التريتيوم في عينات من المياه البيئية يبلغ حجمها 250 مللي أو 500 مللي. ومع ذلك، فإن ما يقرب من نصـــف هذه المختبرات أعطت نتائج غير دقيقة لمســـتويات منخفضـــة ومنخفضـــة للغاية من التريتيوم في عينات المياه، مما يجعل هذه النتائج غير مناسبة للتطبيقات الهيدرولوجية. وكان هذا الأداء الضـعيف راجعا إما إلى عدم كفاية الإثراء بالتريتيوم أو إلى مشاكل عامة في المعالجة اللاحقة للبيانات.




*الشكل-كاف-1- دورة الماء. (الرسم التوضيحي من: الوكالة)*

**الاتجاهات**

216- لتلبية الحاجة إلى زيادة مستوى الإثراء بالتريتيوم، طوَّر مختبر الهيدرولوجيا النظيرية التابع للوكالة نظاماً ابتكارياً يقوم على غشاء إلكتروليتي بوليمري للإثراء بالتريتيوم وأخضعه لاختبارات مستفيضة. ويبشر هذا النظام بإحداث ثورة في قدرة الدول الأعضاء على تحديد تركيز التريتيوم في عينات المياه البيئية بمستويات شديدة الانخفاض لأغراض الرصد والإنذار الهيدرولوجي والإشعاعي على حدٍ سواء.

217- وبوسع النظام الجديد لإثراء التريتيوم أن يُنتِج عوامل لزيادة تركيزه الأولي بدرجة عالية (أكثر من 60 ضعفاً) ويتجنب بعض عيوب الأساليب التقليدية لإثراء التريتيوم، بما في ذلك استخدام التحليل الكهربائي الخطير والمواد الكيميائية المعادِلة وجهاز التحليل الكهربائي المعقد الذي يتطلب تبريداً مكثفاً وأدوات تحكم في درجة الحرارة. وبالإضافة إلى ذلك، يهدف النظام الجديد للغشاء الإلكتروليتي البوليمري إلى تبسيط وتقصير فترة الإجراءات التحليلية، مما يجعل تحليل التريتيوم مهمة أسهل بكثير بالنسبة للدول الأعضاء المهتمة باستخدام التريتيوم كأداة اقتفاء لتقييم الموارد المائية وإدارتها.

*الشكل-كاف-2- صورة أمامية لنظام التريتيوم الخاص بالغشاء الإلكتروليتي البوليمري التابع للوكالة، والذي يتألف من عشر خلايا إلكتروليتية تختبر صحة ودقة مجموعة من العينات المرجعية. (الصورة من: الوكالة)*

218- وستساعد التطورات في تكنولوجيا إثراء التريتيوم على صقل التمييز بين الإشارات الطبيعية والإشارات البشرية المنشأ وسيزيد من توافر بيانات خط الأساس للتريتيوم الطبيعي.

*الشكل-كاف-3- المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، يلقي البيان الافتتاحي لفعالية إطلاق الشبكة العالمية لتحليل المياه (شبكة GloWAL) في مؤتمر الأمم المتحدة للمياه لعام 2023 في نيويورك. (الصورة من: الوكالة)*

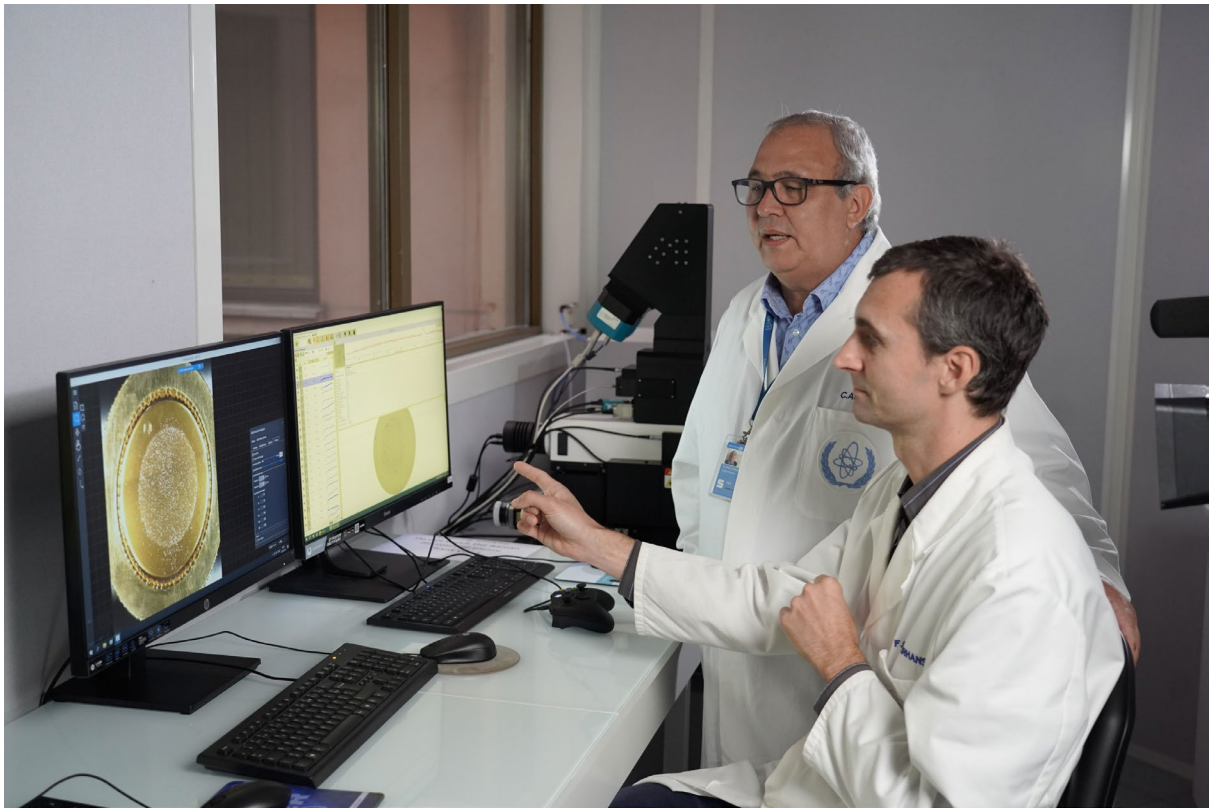
# لام- البيئة البحرية

## لام-1- استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين رصد التلوُّث بالمواد البلاستيكية الدقيقة في المحيطات والبحوث المتعلقة به

### الحالة

219- أدى تدفق المواد البلاستيكية البرية إلى المحيط إلى تحويل البيئات البحرية إلى مستودعات للنفايات البلاستيكية. وتواجه النظم الإيكولوجية البحرية أزمة متنامية، حيث أدى التدفق السنوي لأكثر من 12 مليون طن من المواد البلاستيكية الأرضية إلى تصاعد التلوث بالمواد البلاستيكية الدقيقة والنانوية في المحيط. ولمعالجة الزيادة الهائلة في التلوث بالمواد البلاستيكية، تعمل مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية التابعة للوكالة على رصد المواد البلاستيكية الدقيقة وتقييم آثارها على البيئات البحرية. وعلى الرغم من التقدم المحرز في فهم التلوث البحري بالمواد البلاستيكية، لا يزال تحديد كمية وخصائص المواد البلاستيكية الدقيقة أمراً صعباً، بسبب عمليات تحللها المعقدة والافتقار إلى قواعد بيانات البوليمرات الشاملة. وفي سياق الأبحاث الجارية في إطار مبادرة نيوتيك للمواد البلاستيكية، تعمل المبادرة على إعداد قاعدة بيانات للمواد البلاستيكية الدقيقة في حالات مختلفة من التدهور البيئي تكون متاحة على المستوى العالمي.

220- وتعمل الوكالة عن كثب مع الدول الأعضـــاء على تطوير محطات تجريبية لإعادة تدوير النفايات البلاستيكية وتحويلها إلى منتجات ذات قيمة. وأحرزت الأرجنتين وإندونيسيا والفلبين وماليزيا تقدما كبيرا صوب تشـييد نماذج أولية على نطاق تقني في عام 2024، بالتعاون مع شـركاء من قطاع الصـناعة. وتتركز التطبيقات الواعدة الرئيســية في توفير مواد بناء ميســورة التكلفة ومتينة وعالية الجودة، وكذلك إجراء التحلل الحراري بمساعدة الإشعاع لإنتاج الوقود والمواد المضافة، وتحسين عوارض السكك الحديدية.



*الشكل-لام-1- عالمان في مختبرات البيئة البحرية التابعة للوكالة يحلِّلان الخصائص الكيميائية للمواد البلاستيكية الدقيقة في عينات البيئة البحرية باستخدام التحليل الطيفي الاهتزازي، والتحليل الطيفي لرامان، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه. (الصورة من: الوكالة)*

221- واسـتُخدم العديد من التقنيات التي تنطوي على تفاعل الفوتونات مع المادة، مثل التحليل الطيفي بالأشـعة تحت الحمراء باســتخدام تحويل فورييه، والتحليل الطيفي لرامان، والتحليل الطيفي بالأشــعة تحت الحمراء المباشـرة بالليزر، للكشـف عن البوليمرات والمواد البلاسـتيكية الدقيقة وتحديد خصـائها. وتعتمد هذه الطرق على قواعد البيانات التي تحتوي على أطياف مرجعية تُسـتخدم كمعيار لمقارنة أطياف الجسـيمات المكتسـبة. وفي حين أن الأطياف المرجعية مشـتقة عادة من البوليمرات البكر، نادراً ما تظل الجسـيمات في العينات البيئية نقية وغالباً ما تتعرض للتحلل نتيجة لعوامل مثل التعرُّض للأشـعة فوق البنفسـجية والأكسـدة. ويغيّر هذا التدهور الخواص الفيزيائية والكيميائية للعينات البيئية، مما يؤثر على تفاعلها مع ضــوء الأشــعة تحت الحمراء ويؤدي إلى تعديل الملامح الطيفية، مما يزيد من خطر التحديد الخاطئ. وبما أن تجميع قاعدة بيانات لأطياف البوليمرات في مراحل مختلفة من التحلل ســيكون مهمة كثيفة العمالة وغير عملية، فإن هناك حاجة إلى نُهج بديلة تجمع بين التقنيات التحليلية الأسرع وأساليب تحليل البيانات المتقدمة للاستفادة من المعلومات الموجودة عن العينات البكر والمتحللة على السواء.

222- وقد ظهر مؤخراً التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء المباشرة بالليزر كتقنية بديلة في مختبرات البيئة البحرية التابعة للوكالة لتحليل المواد البلاستيكية الدقيقة والبوليمرات في عينات من مياه البحر والرواسب البحرية والكائنات الحية البحرية. وعلى عكس تقنيات مثل التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه، يوفِّر التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء المباشرة بالليزر ميزة مسح العينات قبل التصوير الفعلي وتحليل المناطق التي اكتُشِفت فيها الجسيمات فقط. وينتج عن هذا أوقات تحليل أسرع، خاصة بالنسبة للعينات ذات الحد الأدنى من وجود الجسيمات. ومع ذلك، فإن أحد العيوب هو التحديد الخاطئ المحتمل لجسيمين متجاورين كجسيم واحد، حيث يُسجَّل طيف واحد فقط لكل جسيم. وبالإضافة إلى ذلك، بالمقارنة مع التقنيات الأخرى مثل التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه، فإن التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء المباشر بالليزر أكثر عرضة للأخطاء في تحديد الهوية عند تحليل الجسيمات المجوفة، بسبب نطاق الأشعة تحت الحمراء الأضيق المسجَّل باستخدام أدوات الأشعة تحت الحمراء المباشرة بالليزر. ولذلك، من الضروري تطوير أساليب تصنيف أكثر فعالية من أجل التقليل إلى أدنى حد من خطر الخطأ في التحديد.

**الاتجاهات**

223- يمكن أن يكون التعلُّم الآلي أداة قيمة لتحسين التصنيف، على الرغم من أن تطبيقه في مجال تحديد المواد البلاستيكية الدقيقة لا يزال محدوداً. وأصبح التعلُّم الآلي، بما في ذلك التعلُّم العميق والتعلُّم المعزَّز، جزءاً لا يتجزأ من مختلف المجالات العلمية والقطاعات الصناعية، بما في ذلك الهندسة الطبية الحيوية وأبحاث المياه. ويتضمن التعلُّم الآلي تدريب النماذج الرياضية على إجراء تنبؤات أو قرارات بناءً على البيانات المرصودة، باستخدام طرق مشتقة من الإحصاء وعلوم الكمبيوتر. وبالتالي فإن تطبيق التعلُّم الآلي على تحديد البوليمرات والمواد البلاستيكية الدقيقة يمكن أن يؤدي إلى تعزيز الدقة في البيئات البيئية.

*الشكل-لام-2- تشارك الوكالة حاليًّا في مشروع يهدف إلى تحليل المواد البلاستيكية الدقيقة الموجودة في عينات مياه البحر والرواسب التي تُجمع في القارة القطبية الجنوبية بالشراكة مع المعهد الأرجنتيني للمنطقة القطبية الجنوبية. (الصورة من: الوكالة)*

224- ويبرز الذكاء الاصطناعي كأداة أساسية في مجال تحديد المواد البلاستيكية الدقيقة. ويمثل استخدام الذكاء الاصـــطناعي لخوارزميات التعلُّم الآلي لكشـــف تعقيدات البوليمرات المتدهورة في البيئة البحرية نقلة نوعية. وتسـمح القدرة على توليد أطياف من البوليمرات المتدهورة في ظل ظروف بيئية محددة للباحثين بتمييز تصـنيف المواد البلاستيكية الدقيقة بدقة غير مسبوقة. ولا تُيسِّر هذه الرؤية الطيفية التمييز بين تركيبات المواد البلاستيكية المتنوعة فحسب، بل توفِّر أيضاً للباحثين فهماً عميقاً لكل من منشأ البوليمر وسلوكه في البيئات البحرية المختلفة.

225- ويأتي الدمج بين الذكاء الاصـطناعي والحفاظ على البيئة في لحظة حاسـمة في المعركة المسـتمرة ضـد التلوث البحري بالمواد البلاستيكية. ويوفِّر الذكاء الاصـطناعي، من خلال سـرعته في التحليل الطيفي، إلى جانب قدرتـه على محـاكـاة العمليـات الفيزيـائيـة والكيميـائيـة والبيولوجيـة لتوليـد أطيـاف من البوليمرات المتـدهورة، أداة متطورة يمكن من خلالها رؤية التحديات المعقدة التي يفرضـها التلوث بالمواد البلاسـتيكية الدقيقة والتغلب عليها. وبينما نواصـل تحري نقاط التقاطع بين الابتكار التكنولوجي والإدارة البيئية، يبشـر الذكاء الاصـطناعي بأن يكون أداة هائلة في الكفاح من أجل محيطٍ خالٍ من المواد البلاسيتيكية.

# المرفق

## الجدول ألف-1- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد حول العالم[أ]

| البلد | المفاعلات قيد التشغيل | | المفاعلات قيد التشييد | | إمدادات الكهرباء النووية في عام 2023 | | | إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام 2023 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | عدد الوحدات | المجموع بالميغاواط (الكهربائي) | عدد الوحدات | المجموع بالميغاواط (الكهربائي) | تيراواط-ساعة | ٪ من المجموع | | الأعوام | الأشهر |
| الأرجنتين | 3 | 1 641 | 1 | 25 | غ.م. | غ.م. | | 100 | 2 |
| أرمينيا | 1 | 416 | | | غ.م. | غ.م. | | 56 | 3 |
| إسبانيا | 7 | 7 123 | | | غ.م. | غ.م. | | 375 | 2 |
| الإمارات العربية المتحدة | 3 | 4 011 | 1 | 1 310 | غ.م. | غ.م. | | 7 | 0 |
| أوكرانيا | 15 | 13 107 | 2 | 2 070 | غ.م. | غ.م. | | 578 | 6 |
| باكستان | 6 | 3 262 | | | غ.م. | غ.م. | | 104 | 9 |
| البرازيل | 2 | 1 884 | 1 | 1 340 | غ.م. | غ.م. | | 65 | 3 |
| بلجيكا | 5 | 3 916 | | | غ.م. | غ.م. | | 329 | 5 |
| بلغاريا | 2 | 2 006 | | | غ.م. | غ.م. | | 175 | 3 |
| بنغلاديش | | | 2 | 2 160 | غ.م. | غ.م. | | | |
| بيلاروس | 2 | 2 220 | | | غ.م. | غ.م. | | 3 | 10 |
| تركيا | | | 4 | 4 456 | غ.م. | غ.م. | | | |
| الجمهورية التشيكية | 6 | 3 934 | | | غ.م. | غ.م. | | 194 | 10 |
| جمهورية إيران الإسلامية | 1 | 915 | 1 | 974 | غ.م. | غ.م. | | 12 | 4 |
| جمهورية كوريا | 25 | 24 489 | 3 | 4 020 | غ.م. | غ.م. | | 669 | 9 |
| جنوب أفريقيا | 2 | 1 854 | | | غ.م. | غ.م. | | 78 | 3 |
| روسيا | 37 | 27 727 | 3 | 2 700 | غ.م. | غ.م. | | 1 484 | 7 |
| رومانيا | 2 | 1 300 | | | غ.م. | غ.م. | | 43 | 11 |
| سلوفاكيا | 5 | 2 308 | 1 | 440 | غ.م. | غ.م. | | 189 | 7 |
| سلوفينيا | 1 | 688 | | | غ.م. | غ.م. | | 42 | 3 |
| السويد | 6 | 6 944 | | | غ.م. | غ.م. | | 492 | 0 |
| سويسرا | 4 | 2 973 | | | غ.م. | غ.م. | | 240 | 11 |
| الصين | 55 | 53 181 | 22 | 22 724 | غ.م. | غ.م. | | 568 | 2 |
| فرنسا | 56 | 61 370 | 1 | 1 630 | غ.م. | غ.م. | | 2 505 | 0 |
| فنلندا | 5 | 4 394 | | | غ.م. | غ.م. | | 181 | 2 |
| كندا | 19 | 13 624 | | | غ.م. | غ.م. | | 922 | 0 |
| مصر | | | 3 | 3 300 | غ.م. | غ.م. | | | |
| المكسيك | 2 | 1 552 | | | غ.م. | غ.م. | | 63 | 11 |
| المملكة المتحدة | 9 | 5 883 | 2 | 3 260 | غ.م. | غ.م. | | 1 667 | 9 |
| الهند | 19 | 6 290 | 8 | 6 028 | غ.م. | غ.م. | | 617 | 11 |
| هنغاريا | 4 | 1 916 | | | غ.م. | غ.م. | | 154 | 2 |
| هولندا | 1 | 482 | | | غ.م. | غ.م. | | 79 | 0 |
| الولايات المتحدة الأمريكية | 93 | 95 835 | 1 | 1 117 | غ.م. | غ.م. | | 4 918 | 7 |
| اليابان | 12 | 11 046 | 2 | 2 653 | غ.م. | غ.م. | | 2 053 | 6 |
| **جميع أنحاء العالم[ب، ج]** | **412** | **370 165** | **58** | **60 207** | **غ.م.** | **غ.م.** | | **20 202** | **9** |

**ملاحظة:** غ.م. – غير متاح

(أ) المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة (نظام www.iaea.org/pris) (PRIS) وفقاً للبيانات التي قدمتها الدول الأعضاء حتى نهاية تشرين الثاني/نوفمبر 2023.

(ب) الأرقام الإجمالية تشمل البيانات التالية من تايوان، الصين: 2 من الوحدات العاملة بقدرة إجمالية تبلغ 874 1 ميغاواط (كهربائي).

(ج) إجمالي الخبرة التشغيلية المذكور يشمل أيضاً المحطات المغلقة في ألمانيا (835 عاماً، 8 أشهر)، وإيطاليا (80 عاماً، 8 أشهر)، وكازاخستان (25 عاماً، 10 أشهر)، وليتوانيا (43 عاماً، 6 أشهر)، والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (241 عاماً، 11 شهراً).

(د) الأرقام الإجمالية تشمل البيانات الخاصة بوحدات ظلَّ تشغيلها قيد الوقف المؤقت، وبيانها كما يلي: الهند (4 وحدات؛ 639 ميغاواطاً (كهربائياً)) واليابان (21 وحدة؛ 633 20 ميغاواطاً (كهربائياً)).

## الجدول هاء-1- التطبيقات الشائعة لمفاعلات البحوث على الصعيد العالمي

| نوع التطبيق [أ] | عدد مفاعلات البحوث المشاركة [ب] | عدد الدول الأعضاء التي لديها مرافق تُستخدم لهذا الغرض |
|---|---|---|
| التدريس/التدريب | 162 | 51 |
| التحليل بالتنشيط النيوتروني | 119 | 50 |
| إنتاج النظائر المشعة | 83 | 40 |
| التصوير الإشعاعي النيوتروني | 69 | 34 |
| تشعيع المواد/الوقود | 67 | 26 |
| التشتُّت النيوتروني | 45 | 28 |
| التقويم الجيولوجي | 25 | 22 |
| التحويل (معالجة السليكون) | 24 | 15 |
| التحويل (الأحجار الكريمة) | 21 | 12 |
| العلاج النيوتروني، أساساً أنشطة البحث والتطوير | 16 | 11 |
| قياس البيانات النووية | 17 | 11 |
| تطبيقات أخرى [ج] | 116 | 35 |

(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 234 مفاعلاً (بما يشمل 225 مفاعلاً عاملاً و9 مفاعلات مغلقة بصفة مؤقتة، في كانون الأول/ديسمبر 2023).

(ج) تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها وتجارب التدريع وإنشاء المصادر البوزيترونية ودراسات حرق النفايات النووية.

## قائمة المختصرات العربية والإنكليزية

| | |
|---|---|
| اختبار $^{13}$C-SBT | اختبار النَّفس بعد تناول السكروز المحتوي على الكربون-13 |
| التصوير بتقنية PET | التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني |
| التصوير بتقنية SPECT–CT | التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد–التصوير المقطعي الحاسوبي |
| جهاز ليدار (LIDAR) | جهاز كشف المدى وقياسه بالضوء |
| خدمة INIR | خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية |
| الداء النشواني من نوع ATTR | داء اعتلال عضلة القلب النشواني المرتبط بالترانس ثايريتين |
| شركة CFS | شركة Commonwealth Fusion Systems |
| الفاو | منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة |
| فشل القلب من النوع HFpEF | فشل القلب المقترن بثبات الكسر القذفي |
| فشل القلب من النوع HFrEF | فشل القلب المقترن بانخفاض الكسر القذفي |
| كوفيد-19 | مرض فيروس كورونا 2019 |
| مبادرة التنسيق والتوحيد | مبادرة التنسيق والتوحيد في المجال النووي |
| مرفق CIRES | المرفق الصناعي لتجميع النفايات وفرزها والتخلص منها |
| مرفق IFMIF-DONES | المصدر النيوتروني الإيضاحي التابع للمرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية |
| مرفق STEP | مرفق التوكاماك الكُروي لإنتاج الطاقة |
| المستحضر $^{99m}$Tc-PYP | بيروفوسوفات التكنيتيوم-99 شبه المستقر |
| مشروع MARVEL | مشروع تطبيقات المفاعلات المتناهية الصغر وبحوثها والتحقق منها وتقييمها |
| المفاعل HPR1000 | المفاعل Hualong One |
| المفاعل SMART | المفاعل المتقدم النموذجي المتكامل النظم |
| المفاعلات النمطية الصغيرة | المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية |
| مؤتمر المناخ (COP28 2023) | الدورة الثامنة والعشرون لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ |
| نظام PRIS | نظام المعلومات عن مفاعلات القوى |
| اليورانيوم HALEU | اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز |
| اليورانيوم +LEU | اليورانيوم الضعيف الإثراء الأعلى درجة |

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*

24-01872A