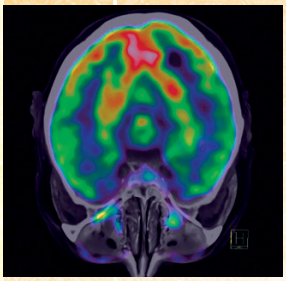
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٨



IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

صورة الغلاف مقدَّمة من: شركة فورشونغستسانتروم يوليخ المحدودة والوكالة الدولية للطاقة الذرية وهيئة روزإينيرغوأتوم.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٨

GC(62)/INF/2

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
آب/أغسطس ٢٠١٨

IAEA/NTR/2018

تصدير

استجابةً لطلبات الدول الأعضاء، تُصدر الأمانة *استعراضاً* شاملاً يتناول *التكنولوجيا النووية* في كلّ عام.

ويتناول *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٨* المجالات المختارَة التالية: تطبيقات القوى، والأنشطة الانشطارية والاندماجية المتقدّمة، وتطبيقات المُعجِّلات ومفاعلات البحوث، والتقنيات النووية في مجال الأغذية، وإدارة التربة والثروة الحيوانية، فيما يتعلق بالتصدِّي للطوارئ، والتطورات الجديدة في مجال العلاج الإشعاعي وطبّ النفس والأعصاب، وتلوث المحيطات باللدائن، والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية.

وقد قُدِّمت مسوَّدة هذا الاستعراض إلى مجلس المحافظين خلال دورته التي عُقدت في آذار/مارس ٢٠١٨ ضمن الوثيقة GOV/2018/2. وأُعدَّت الصيغة النهائية لهذا الاستعراض على ضوء المناقشات التي جرت خلال اجتماعات مجلس المحافظين وكذلك على ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

قائمة المحتويات

موجز جامع ١
التقرير الرئيسي ٧
ألف- تطبيقات القوى ٧
ألف-١- القوى النووية اليوم ٧
ألف-١-١- البلدان المستجدة ٩
ألف-١-٢- البلدان المتوسعة ١٠
ألف-١-٣- البلدان المشغِّلة ١١
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية ١٢
ألف-٣- دورة الوقود ١٤
ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية ١٤
ألف-٣-٢- ضمان الإمداد ١٧
ألف-٣-٣- المرحلة الختامية ١٨
ألف-٣-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة ١٩
باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان ٢٤
باء-١- الانشطار المتقدم ٢٤
باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء ٢٤
باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة ٢٥
باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز ٢٧
باء-١-٤- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية ٢٨
باء-١-٥- المبادرات الدولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية ٣٠
باء-١-٦- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية ٣١
باء-٢- الاندماج ٣٢
جيم- التطبيقات الخاصة بالمعجِّلات ومفاعلات البحوث ٣٤
جيم-١- المعجِّلات ٣٤
جيم-٢- مفاعلات البحوث ٣٦
دال- الأغذية والزراعة ٣٩
دال-١- التأهب للطوارئ النووية في مجال الأغذية والزراعة ٣٩
دال-١-١- التحديات المواجهة في التصدّي للطوارئ النووية ٣٩
دال-١-٢- التطورات الجديدة التي تشهدها نُظُم دعم اتخاذ القرارات فيما يتعلّق بالتصدّي للطوارئ ٣٩
دال-١-٣- نظام دعم اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA) ٣٩
دال-٢- استخدام التشعيع لاستحداث لقاحات جديدة وفعالة ضدّ الأمراض الحيوانية والأمراض الحيوانية المصدر ٤١
دال-٣- استخدام البصمات المتعددة النظائر لتحديد مصادر الملوثات الزراعية بدءا من التربة ووصولا إلى المسطحات المائية ٤٥
هاء- الصحة البشرية ٤٨

هاء-١- العلاج بالأشعة المجسمة: تقنية للعلاج الإشعاعي عالية الدقة ٤٨
هاء-١-١- المتطلبات التقنية ٤٨
هاء-١-٢- الفريق المطلوب ٤٩
هاء-١-٣- الاستطبابات ٥٠
هاء-١-٤- مساهمات الوكالة ٥٠
هاء-٢- طب النفس والأعصاب: ثورة التصوير الجزيئي في مرض الزهايمر ٥١
هاء-٢-١- الخلفية ٥١
هاء-٢-٢- التشخيص ٥٢
هاء-٢-٣- المبادرات العالمية والتوعية ٥٣
واو- البيئة ٥٥
واو-١- التقنيات النووية المستخدمة في البحوث بشأن المخلفات البلاستيكية الموجودة في البحار .. ٥٥
زاي- إنتاج النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية ٥٨
زاي-١- العلاج بأشعة ألفا: تطبيقات علاجية جديدة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا ٥٨
زاي-١-١- الراديوم -٢٢٣ ..... ٥٩
زاي-١-٢- مولّد الأكتينيوم-٢٢٥/البزموث-٢١٣ ..... ٥٩
زاي-١-٣- الأكتينيوم-٢٢٥ ..... ٦٠
زاي-١-٤- الأستاتين-٢١١ ..... ٦١

موجز جامع

١- في نهاية عام ٢٠١٧ كان هناك ٤٤٨ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل بقدرة عالمية على توليد الكهرباء قوامها ٣٩٢ غيغاواط (كهربائي)، وبزيادة قدرها نحو ١,٢ غيغاواط (كهربائي) منذ عام ٢٠١٦. وفي عام ٢٠١٧ أُغلقت خمسة مفاعلات بشكل دائمٍ، ووُصلت أربعة مفاعلات بشبكة الكهرباء، وبدأ إنشاء أربعة مفاعلات. ومازالت آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل تتمَرْكَزُ في آسيا، فهي تحتضن ٤٠ من أصل ٥٩ مفاعلاً قيد التشييد، مثلما تحتضن ٥١ من أصل ٥٩ مفاعلاً وُصلت بشبكة الكهرباء منذ عام ٢٠٠٥.

٢- وثمة ثلاثون بلداً في الوقت الراهن تستخدم القوى النووية و٢٨ بلداً تدرس أو تخطّط أو تعمل بهمَّة من أجل إدخال القوى النووية في مزيج الطاقة لديها. وتعكفُ ثلاثة بلدان مستجدَّة على بناء أولى محطات القوى النووية لديها، فيما بلغت عدة دول أخرى قرَّرت إدخال القوى النووية مراحلَ متقدّمة من إعداد البنية الأساسية اللازمة. وتُظهر توقعات الوكالة المرتفعة لعام ٢٠١٧ للقدرة العالمية للقوى النووية زيادةً بنسبة ٤٢٪ عن المستويات الحالية بحلول عام ٢٠٣٠، ومضاعفةَ تلك القدرة بحلول عام ٢٠٥٠، في حين تُظهر التوقعات المنخفضة تراجعاً تدريجياً في القدرة العالمية حتى عام ٢٠٤٠، قبل أن ترتفع مجدداً لتبلغ المستويات الحالية بحلول عام ٢٠٥٠.

٣- ومزايا القوى النووية من حيث تخفيف آثار تغيُّر المناخ، وأمن الطاقة، والسياسات البيئية والاجتماعية-الاقتصادية هي من الأسباب الرئيسية التي تجعل العديد من بلدان العالم تعتزم إدخال القوى النووية أو توسيع نطاق برامجها الحالية. وأكَّد مؤتمر الوكالة الوزاري الدولي بشأن القوى النووية في القرن الحادي والعشرين، الذي عُقد في أبو ظبي، أن هناك حاجة إلى نمو كبير في القوى النووية لكي يحقّق العالم أهدافه المتعلقة بالمناخ والتنمية المستدامة.

٤- وفي عام ٢٠١٧ كان إنتاج العالم من اليورانيوم مشابهاً لمستويات عام ٢٠١٦ إذ بلغ قرابة ٦٣٠٠٠ طن. وأدَّت الأسعار المنخفضة إلى الحدّ بشكل كبير من قدرة الشركات على جمع الأموال اللازمة لأنشطة الاستكشاف، وإجراء دراسات الجدوى، وإطلاق مشاريع جديدة للتوسُّع. فالقدرات العالمية على صعيد موارد اليورانيوم والتحويل والإثراء وتصنيع الوقود أكثر من كافية لتلبية الطلب.

٥- وفي آب/أغسطس ٢٠١٧ دُشّن مرفق الخزن الخاصّ بمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في كازاخستان. وصدر في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧ طلبُ تقديم العروض الخاصة باقتناء اليورانيوم الضعيف الإثراء.

٦- وتواصَل إحراز التقدُّم في تعزيز وتحسين أمان محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وأما التحديات الأكثر شيوعاً فتشمل تنفيذ التغييرات التنظيمية، وتأخُّر أنشطة الإدخال في الخدمة، وبناء القدرات البشرية، وتحقيق المستوى الأمثل في أنشطة الصيانة، وتقييم التعديلات الرئيسية المدخَلة في محطات القوى النووية لأغراض الأمان، وتعزيز إدارة الحوادث والتأهُّب والتصدّي للطوارئ في الموقع، وكذلك القيادة والإدارة فيما يتعلق بالأمان. وواصلت الوكالة، بالاستعانة بما أصدرته من معايير أمان وأدوات ومواد محسَّنة، مساعدة الدول الأعضاء وتوجيهها في تلك المجالات.

٧- وحتى هذا اليوم تمَّ إخراج نحو ٤٠٠ ٠٠٠ طن من المعادن الثقيلة من محطات القوى النووية كوقود نووي مستهلَك، تُعاد معالجة قرابة ٢٥٪ منها. وثمة ١٥١ مرفقاً من مرافق التخزين الجاف للوقود المستهلَك الواقعة بعيداً عن المفاعلات في ٢٧ بلداً.

٨- ومن المتوقع في السنوات القادمة أن تتمَّ أعمال واسعة لإخراج مفاعلات القوى النووية من الخدمة حول العالم، وكذلك مفاعلات البحوث، والمجمَّعات الحرجة، وغيرها من مرافق دورة الوقود.

٩- وأحرزت عدة بلدان تقدماً في مشاريعها المتعلقة بالتخلُّص الجيولوجي العميق من النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلَك المعلَن عنه كنفايات، وأيضاً مشاريعها المتعلقة بالتخلُّص داخل حفر السبر من المصادر المشعة المختومة المُهمَلة. وثمة مرافق تخلُّص لجميع الفئات الأخرى من النفايات المشعة وهي قيد التشغيل حول العالم.

١٠- وتواصَلَت في عدّة دول أعضاء جهود البحث والتطوير في مجال مفاعلات الانشطار المتقدّمة مثلما تواصَل نشر تلك المفاعلات. وتفكّر معظم البلدان المستجدَّة في اختيار المفاعلات المتقدّمة المبرَّدة بالماء ذات مخرجات القوى المتزايدة كأول مفاعلات تملكها. وهناك قيد النشر والتطوير العديد من تكنولوجيات المفاعلات السريعة التي تستند إلى خبرات تمتدُّ لعقود في مجال التصاميم والتشييد والتشغيل. وتعمل عدّة دول أعضاء، منها بلدان مستجدَّة، على تطوير مفاعلات مبرَّدة بالغاز تتسم بتعزيز سمات الأمان والكفاءة. ويجري حالياً تطوير ما يزيد على ٥٠ مفاعلاً من فئة المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية من جميع أنواع المفاعلات الرئيسية، منها ثلاثة في مراحل متقدّمة من التشييد. وتدعم هذه الأنشطةَ مبادراتٌ دولية عديدة في مجال نُظم الطاقة النووية الابتكارية.

١١- وثمة اهتمام متنامٍ باستخدام الطاقة النووية للتطبيقات غير الكهربائية في تحلية مياه البحر، وإنتاج الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية، واستخلاص النفط الثالثي، وغير ذلك من التطبيقات الصناعية. ويمكن للتوليد المشترَك أن يعوّض جزءاً كبيراً من تكاليف توليد القوى النووية.

١٢- ويشهد موقع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (ITER) تقدّماً واسعاً بادياً للعيان، وجارٍ تنفيذ برامج بحث وتطوير واسعة النطاق في مجال الاندماج النووي في عدة دول أعضاء. وكان ثمة معلَم بارز آخر في مجال طاقة الاندماج هو إنتاج أول بلازما داخل السِتلّلاريتُور المستمثَّل Wendelstein 7-X.

١٣- وواصلت المُعجّلات القيام بدورها في خدمة الدراسات البيئية، والتطبيقات الطبية الحيوية، وعلوم المواد، وتحديد خصائص التراث الثقافي ومصادره، والتأريخ بالكربون المشعّ. ودُشّن مركز استخدام الحُزم الضوئية السنكروترونية في مجال العلوم والتطبيقات التجريبية في الشرق الأوسط (سيسامي) في مطلع عام ٢٠١٧ بعد أن أطلق "ضوءَه الأول".

١٤- ويواصِل ٢٣٨ مفاعلاً بحثياً قيد التشغيل في ٥٦ بلداً الاضطلاع بدور استراتيجي في دعم القطاعات الطبية والصناعية والتعليمية وقطاع القوى النووية. وتقوم سبعة بلدان بتشييد مفاعلات بحوث جديدة، في حين تخطّط عدة بلدان أخرى أو تنظر في بناء مفاعلات جديدة كمرافق وطنية رئيسية لإرساء البنية الأساسية ووضع البرامج المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية، بما في ذلك القوى النووية. وفي عام ٢٠١٧ انضمَّت منظمتان بحثيتان جديدتان إلى المراكز الدولية المسمَّاة من الوكالة والقائمة على مفاعلات البحوث.

١٥- وحُوّل حتى الآن ٩٧ مفاعلاً بحثياً ومرفقان من مرافق إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، أو تمَّ تأكيد أنها في حالة إغلاق. ولابدَّ من بذل المزيد من أجل تحقيق التوافرية التجارية من أنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء عالية الكثافة لتحويل مفاعلات البحوث العالية الأداء والعالية الفيض. وتواصلَت في عام ٢٠١٧ أنشطة الحدّ من اليورانيوم الشديد الاثراء، بما في ذلك إعادة وقود اليورانيوم الشديد الاثراء المستخدَم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ. وفي عام ٢٠١٧ استُكمل المشروع الممتد لثلاثة أعوام لتحويل مفاعل البحوث الوحيد في غانا من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى الصين.

١٦- ورغم التحديات الناجمة عن توقُّف المفاعلات من حين إلى آخر، تم الحفاظ على الإمدادات العالمية من الموليبدينوم-٩٩، وهو النظير الطبي الأكثر استخداماً، بفضل التعاون المتميز والإجراءات الاستباقية المتخذة جماعياً من جانب أهمّ المنتجين الدوليين والهيئات المعنية بتنسيق سلاسل الإمدادات والجهات الحكومية صاحبة المصلحة ومفاعلات البحوث المشاركة.

١٧- وفي إطار التأهُّب للطوارئ النووية أو الإشعاعية، تُعدُّ القدرة على الاستبانة السريعة أساسيةً للحؤول دون وصول المنتجات الزراعية التي يُحتمل أن تكون ملوَّثة إلى المستهلكين. وقد تتضافر جهودُ وكالات عدّة في الاستجابة لحالة طارئة، وتكتسب الإدارة الكفؤة لمجموعات ضخمة من البيانات وتفسيرها بكفاءة أهمية حاسمة في اتخاذ القرارات الملائمة. وثمة تطورات جديدة في أدوات نُظم تكنولوجيا المعلومات الخاصة بدعم القرارات، وتتيح هذه التطورات تحسين الإدارة الآنية لكميات ضخمة من البيانات ودعم اتخاذ القرارات على نحو متكامل، مكانياً وزمانياً. لكن ليس ثمة أدوات كُثر تركّز على ضمان القرارات المتخذة بشأن الأغذية والزراعة. وتحقيقاً لهذه الغاية، وضعت الوكالة نظامَ اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA)، وهو يمثّل أداة سحابية شاملة تحقّق المستوى الأمثل على صعيد جمع البيانات وإدارتها ووضع تصوُّر لها. وبمجرد الحصول على بيانات تركيزات النُّويدات المشعة يمكن أن تقترح هذه الأداة فرض قيود على الأغذية والزراعة استناداً إلى مستوى الخطر ومستويات تحمُّل محدَّدة. وستتوافر الصيغة التجريبية من هذه الأداة في عام ٢٠١٨.

١٨- وتعود بداية البحوث المتعلقة بتشعيع مسبِّبات الأمراض بُغية استحداث لقاحات إلى خمسينيات القرن العشرين، غير أن التشعيع المفرط في العادة يُتلف البنية النووية والبروتينية للقاحات. وأجهزة التشعيع الحديثة قادرة على توليد جرعات أكبر وأكثر تحديداً بطريقة فعالة، وقد فتح ذلك، مقروناً بأوجه التقدُّم في البحوث الجينومية والمعرفة الأفضل بنُظم المناعة، الآفاقَ أمام تطوير مجموعة جديدة من اللقاحات. وتُظهر المستجدَّات الراهنة في تكنولوجيات اللقاحات المشعَّعة إمكانية إنتاج لقاحات جديدة للعديد من الفيروسات والطفيليات والجراثيم المسبِّبة للأمراض يمكن أن تترك أثراً إيجابياً ملموساً في صحة الحيوان والإنسان وكذلك اقتصادات البلدان النامية.

١٩- ويتسبَّب التلوث الزراعي للأنهار والجداول المائية بآثار سلبية تطالُ صحة الإنسان، والتنوع البيولوجي، ومصايد الأسماك. وقد تنشأ الملوّثات من مصادر متعدّدة، لذا ثمة حاجة إلى نُهُج متعدّدة لصَوْغ توصيفٍ واضح لمنشأ الذوائب وكيفية انتقالها عبر التربة. ويمكن استخدام النظائر المستقرة للنيتروجين والكربون والأكسجين والكبريت والهيدروجين كافة كمقتفياتٍ لتوفير هذه المعلومات في النُّظم الإيكولوجية الزراعية. والعنصر النظير لكلّ عنصر فريد من نوعه، وعليهِ يمكن استخدامه لوَسْم المصادر التي هي في العادة متداخلة. ومن شأن البحوث

التي تستخدم مُقتفيات نظائر مستقرة متعددة، عند تكاملها مع التقنيات التقليدية، أن تقدّم صورة واضحة عن المسارات الملوِّثة المتعدِّدة، وستساعد المعلومات المقدَّمة في تعزيز استدامة ممارسة إدارة الأراضي.

٢٠- ويمثّل العلاج بالأشعة المجسَّمة تقنيةً إشعاعية متقدّمة وغير جراحية لعلاج السرطان من خلال إيصال الإشعاع المستهدف بدقة إلى الأورام، وهو ما يجنّب المريض المخاطر الكبيرة المرتبطة بالجراحة الباضِعَة، خاصةً بالنسبة للمناطق التي يصعب الوصول إليها أو تلك القريبة من الأعضاء الحيوية. ويشمل النظامُ التصويرَ بالتقنية ثلاثية الأبعاد وتحديد مواضع الأورام بالتقنية رباعية الأبعاد، وأشعة غاما أو حُزَم الأشعة السينية عالية التركيز. وباستخدام المُعجِّلات الخطية يمكن علاج الأورام الكبيرة في جلسة واحدة. ويمكن استخدام هذه التقنية لعلاج العديد من اضطرابات الدماغ الوظيفية، وسرطان الرئة في مرحلة مبكرة، وسرطانات البروستاتا والبنكرياس والكبد والكُلْيَة، وكذلك سرطانات الرأس والرقبة والعمود الفِقْري في الحالات غير القابلة للجراحة طبياً. وتشير التجارب السريرية إلى أن العلاج بالأشعة المجسَّمة قد يظهر كعلاج فعّال من حيث التكلفة مقارنةً بالعلاج الإشعاعي التقليدي في العديد من السياقات الإكلينيكية.

٢١- ويتخذ الخَرَف أشكالاً كثيرة، ومرض ألزهايمر هو أكثرها شيوعاً. وقد يكون من الصعب تشخيص الأعراض الإكلينيكية المميّزة في المراحل المبكرة. ومع ذلك، أصبحت التقنيات النووية الآن أساسيةً في تحديد عملية المرض الكامنة، وأحياناً ما يكون ذلك قبل أن تصبح الأعراض ملحوظةً بأعوام عدّة، ما يسمح بإجراء التشخيصات الملائمة والتمييزية. والطب النووي، المعروف أيضاً باسم التصوير الجُزيئي، يمكنه تشخيص مختلف اضطرابات الدماغ والتمييز بين الأعراض الناجمة عن أمراض الخَرَف التنكُّسية العصبية والأمراض الأخرى ذات الأعراض المشابهة مثل السكتات الدماغية. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن توفّر المُقتفِياتُ الإشعاعية واسماتٍ حيوية موثوقة في حالة الخَرَف، وهو ما يساعد الأطباء في تشخيص اضطرابات الخَرَف المختلفة. وتوفّر أوجهُ التقدُّم المتحققة من خلال التصوير العصبي المعرفةَ بالغة الأهمية اللازمة لعملية المرض التي من شأنها أن تساعد في تحسين التطورات العلاجية.

٢٢- لقد أصبح المحيط مستودعاً نهائياً للكثير من التلوث القادم من اليابسة، بما في ذلك اللدائن (المواد البلاستيكية). ويمكننا الآن أن نفهم بشكل أفضل الآثار المحدَّدة للدائن الدقيقة على الكائنات البحرية بفضل البحوث التي تستخدم التقنيات النووية والنظيرية. وتؤثر اللدائن الدقيقة تأثيراً ضاراً من خلال الابتلاع البسيط، ويمكن أن تترسب في الأعضاء الداخلية، وهناك يمكن أن تكون نواقلَ فعالةً لنقل المزيد من المُلوِّثات، بما في ذلك للإنسان. وتتناول البحوث الحالية مصيرَ وسُمِّيَّة اللدائن الدقيقة والمُلِّوثات المرتبطة بها في الأنواع البحرية ذات الأهمية الاجتماعية والاقتصادية.

٢٣- ومنذ عقود تُستخدم المستحضَرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية لقتل الخلايا السرطانية. غير أن جُسيمات بيتا التي يتمّ استخدامها تنتقل لمسافة أبعدَ بكثير من جُسيمات ألفا التي لديها نفس الطاقة. وهذا هو الفرق الذي يتيح الدقة في استهداف الخلايا السرطانية بجُسيمات ألفا مع الحدّ بشكل كبير من خطر إتلاف الأنسجة الأخرى خارج أو حول المنطقة المستهدَفة. ويتمُّ حالياً تقييم مختلف النُّويدات المشعة الباعثة لجسيمات ألفا عند المستويات ما قبل الإكلينيكية والإكلينيكية لتحديد إمكاناتها بُغية استخدامها كمستحضَرات صيدلانية إشعاعية، وهو ما سيزيد من تقدُّم علاج السرطان.

٢٤- وخلال عام ٢٠١٧، قطع مشروع تجديد مختبرات التطبيقات النووية عدّة مراحل مِفصلية مهمة. فقد دُشّن مختبر مكافحة الآفات الحشرية الجديد، وبدأ العمل على مختبرٍ مَرِن قابل للتعديل في زايبرسدورف.

وجُمعت خلال العام أموالٌ إضافية خارجة عن الميزانية، ما رفع إجمالي المساهمات المالية المخصَّصة لمشروع التحديث المقدَّمة من ٣١ دولة عضــواً ومســاهمين آخرين إلى نحو ٣٢,٥ مليون يورو. وأثمرت الجهود الرامية إلى توسـيع قاعدة شـراكات الوكالة وحشـد الموارد إلى ما وراء شـركائها التقليديين عن إبرام شـراكة مع شـركة فاريان للأنظمة الطبية (Varian Medical Systems) بشـأن اقتراض مُعجِّل خطي لمدة عشـر سـنوات لتركيبه في مختبر قياس الجرعات التابع للوكالة، ورفدت دولةٌ عضو ذلك بتقديم مساهمة عينية في شكل خدمات دعم للجهاز المذكور. ووقَّعت الوكالة مذكرة تعاوُن مع شــركة شــيمادزو (Shimadzu Corporation) للتبرُّع للوكالة بجهاز للاستشراب السائل، في إطار مبادرة الاستخدامات السلمية، لتقديم دعم أفضل للدول الأعضاء في مجال البحوث المتعلقة بسلامة الأغذية والتدريب.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٨

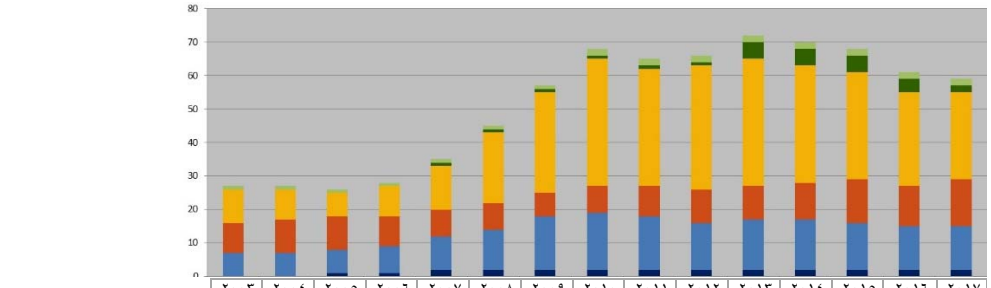
التقرير الرئيسي

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٧، بلغ عدد مفاعلات القوى النووية العاملة ٤٤٨ مفاعلاً على نطاق العالم، بقدرة إجمالية على توليد الكهرباء ٣٩٢ غيغاواط (كهربائي)[١] (أنظر الجدول ألف-١). ويمثّل ذلك زيادة تقدَّر بنحو ١,٢ غيغاواط (كهربائي) في إجمالي القدرة، مقارنةً بأرقام عام ٢٠١٦. والمفاعلات العاملة منها ٨١,٩٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الخفيف؛ و١٠,٩٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الثقيل؛ و٣,٣٪ مفاعلات مبرَّدة بالماء الخفيف ومهدَّأة بالغرافيت؛ و٣,١٪ مفاعلات مبرَّدة بالغاز. وثمة ثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلز سائل. وأنتج ٣٧٠ مفاعل ماء خفيف قرابة ٨٩٪ من الكهرباء المولَّدة نووياً.

٢- وفي عام ٢٠١٧ وُصلت أربعة مفاعلات ماء مضغوط بالشبكة الكهربائية، ثلاثة منها في الصين (Fuqing-4 وTianwan-3 وYangjiang-4) وواحد في باكستان (CHASNUPP-4). وتم إغلاق خمسة مفاعلات بشكل دائم: المفاعل Kori-1 (جمهورية كوريا)، والمفاعل Oskarhamn-1 (السويد)، والمفاعل Santa Maria de Garoña (إسبانيا) والمفاعل Monju (اليابان) والمفاعل Gundremmingen-B (ألمانيا). وقد كان المفاعل Monju والمفاعل Santa Maria de Garoña قيد الإغلاق الطويل الأجل قبل الإعلان عن إغلاقهما بصفة دائمة.



	٢٠٠٣	٢٠٠٤	٢٠٠٥	٢٠٠٦	٢٠٠٧	٢٠٠٨	٢٠٠٩	٢٠١٠	٢٠١١	٢٠١٢	٢٠١٣	٢٠١٤	٢٠١٥	٢٠١٦	٢٠١٧
أمريكا - اللاتينية	١	١	١	١	١	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢
أمريكا - الشمالية	٠	٠	٠	٠	١	١	١	١	١	١	٥	٥	٥	٤	٢
آسيا - الشرق الأقصى	١٠	٩	٧	٩	١٣	٢١	٣٠	٣٨	٣٥	٣٧	٣٨	٣٥	٣٢	٢٨	٢٦
آسيا - الشرق الأوسط وجنوب آسيا	٩	١٠	١٠	٩	٨	٨	٧	٨	٩	١٠	١٠	١١	١٣	١٢	١٤
أوروبا - الوسطى والشرقية	٧	٧	٧	٨	١٠	١٢	١٦	١٧	١٦	١٤	١٥	١٥	١٤	١٣	١٣
أوروبا - الغربية	٠	٠	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢

الشكل ألف-١- عدد المفاعلات قيد التشييد حسب المنطقة.

(المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة http://www.iaea.org/pris*)*

٣- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٧، كان ثمة ٥٩ مفاعلاً قيد الإنشاء. وبدأت أعمال تشييد المفاعل Shin-Kori-5 (جمهورية كوريا) والمفاعلان Kudankulam-3 وKudankulam-4 (الهند) والمفاعل Rooppur-1 (بنغلاديش). ومازالت مشاريع التوسُّع، وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل، تتمَرْكَز في آسيا (الشكل ألف-١) التي تشهد تشييد ٤٠ مفاعلاً جديداً. كذلك تحتضن آسيا ٥١ من ٥٩ مفاعلاً جديداً تمَّ وصلها بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

[١] واحد غيغاواط (كهربائي) يعادل ألف مليون واط من القوى الكهربائية.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل والتشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٧) [أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٧		مجموع الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٧	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	% من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٥	٢٦ ١٤٢	٧	٥ ٥٢٠	١٩٠,١	١٧,٨	١ ٢٦١	٩
الأرجنتين	٣	١ ٦٣٣	١	٢٥	٥,٧	٤,٥	٨٢	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٤	٣٢,٥	٤٣	٨
إسبانيا	٧	٧ ١٢١			٥٥,٦	٢١,٢	٣٢٩	١
ألمانيا	٧	٩ ٥١٥			٧٢,٢	١١,٦	٨٣٢	٧
الإمارات العربية المتحدة			٤	٥ ٣٨٠				
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	٢ ٠٧٠	٨٠,٤	٥٥,١	٤٨٨	٦
باكستان	٥	١ ٣١٨	٢	٢ ٠٢٨	٨,١	٦,٢	٧٢	٥
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٣٤٠	١٤,٩	٢,٧	٥٣	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩١٨			٤٠,٢	٤٩,٩	٢٨٩	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٢٦			١٤,٩	٣٤,٣	١٦٣	٣
بنغلاديش			١	١ ٠٨٠				
بيلاروس			٢	٢ ٢٢٠				
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٩٣٠			٢٦,٨	٣٣,١	١٥٨	١٠
جمهورية إيران الإسلامية	١	٩١٥			٦,٤	٢,٢	٦	٤
جمهورية كوريا	٢٤	٢٢ ٤٩٤	٤	٥ ٣٦٠	١٤١,٣	٢٧,١	٥٢٣	٥
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٦٠			١٥,١	٦,٧	٦٦	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٦	١٧,٧	٣١	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٤	٢	٨٨٠	١٤,٠	٥٤,٠	١٦٤	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٦,٠	٣٩,١	٣٦	٣
السويد	٨	٨ ٦٢٩			٦٣,١	٣٩,٦	٤٥١	٠
سويسرا	٥	٣ ٣٣٣			١٩,٦	٣٣,٤	٢١٤	١١
الصين	٣٩	٣٤ ٥١٤	١٨	١٩ ٠١٦	٢٣٢,٨	٣,٩	٢٨٠	٩
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٣٠	٣٨١,٨	٧١,٦	٢ ١٦٤	٤
فنلندا	٤	٢ ٧٦٩	١	١ ٦٠٠	٢١,٦	٣٣,٢	١٥٥	٤
كندا	١٩	١٣ ٥٥٤			٩٥,١	١٤,٦	٧٣١	٦
المكسيك	٢	١ ٥٥٢			١٠,٦	٦,٠	٥١	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨ ٩١٨			٦٣,٩	١٩,٣	١ ٥٨٩	٧
الهند	٢٢	٦ ٢٥٥	٧	٤ ٨٢٤	٣٤,٩ [ب]	٣,٢	٤٨٢	١١
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٥,٢	٥٠,٠	١٣٠	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٣	٢,٩	٧٣	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٩	٩٩ ٩٥٢	٢	٢ ٢٣٤	٨٠٥,٦	٢٠,٠	٤ ٣٠٩	٩
اليابان	٤٢	٣٩ ٧٥٢	٢	٢ ٦٥٣	٢٩,٣	٣,٦	١ ٨٢٣	٥
المجموع [ج، د]	٤٤٨	٣٩١ ٧٢١	٥٩	٦٠ ٤٦٠	٢ ٥٠٣,١		١٧ ٤٣٠	٦

أ- استُقِيت البيانات من نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة، المتاح على الموقع الشبكي (http://www.iaea.org/pris).

ب- تستند البيانات بشأن إمدادات الكهرباء النووية في الهند إلى القيمة السنوية على المستوى القطري حسبما أُفيد بها، إذ إنَّ البيانات المتعلقة ببعض المفاعلات لم تكن متوفرة في وقت إصدار هذا التقرير.

ج- ملحوظة: مجموع الأرقام هذا يتضمَّن البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين:
٦ وحدات، ٥٠٥٢ ميغاواط (كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) قيد الإنشاء؛
٣٥,١ تيراواط-ساعة من الكهرباء المولَّدة نووياً، أي ما يمثِّل ١٦,٣٪ من إجمالي كمية الكهرباء المولَّدة.

د- يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ أشهر)؛ وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)؛ وليتوانيـــــا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)؛ وتايوان، الصين (٢٠٦ عاماً وشهر واحد).

ألف-١-١- البلدان المستجدَّة

٤- من بين ٢٨ دول عضواً أعربت عن اهتمامها بالقوى النووية، شرعت ١٩ دولة في إجراء دراسات بشأن البنية الأساسية للقوى النووية، فيما اتَّخذت ٤ منها بالفعل قراراً في هذا الصَّدد وتقوم بتحضير البنية الأساسية اللازمة، ووقَّعت ٥ منها عقوداً وباتت تستعدُّ لبدء التشييد أو بدأت بالفعل فيه. ومن المتوقع أن تواصِل ٢١ دولة عضواً أخرى العمل على اتخاذ قرار بإنشاء برنامج للقوى النووية في غضون العقد المقبل.

٥- وتواصَلَت في الإمارات العربية المتحدة أعمالُ البناء في جميع المفاعلات الأربعة لأول محطة قوى نووية في البلاد والواقعة في البراكة. ومن المقرَّر أن يبدأ تشغيل الوحدة ١ في عام ٢٠١٨، تليها الوحدات الثلاث الأخرى في السنوات التالية. وفي عام ٢٠١٧ أوفدَت الوكالة بعثاتِ تقييم التعليم والتدريب وبعثات فريق مراجعة الأمان قبل التشغيل. وفي بيلاروس، مضى قُدُماً تشييد أول محطة قوى نووية في أوسترووفيتس Ostrovets ومن المقرَّر إدخال الوحدتين في الخدمة في عامَي ٢٠١٩ و ٢٠٢٠. وتمَّ تقديم تقرير تحليل الأمان النهائي لأغراض الاستعراض الرقابي في عام ٢٠١٧. واستُضيفت في عام ٢٠١٧ بعثة خدمة استعراض تصميم المواقع والأحداث الخارجية التابعة للوكالة.

٦- وفي بنغلاديش، بدأت أعمال الإنشاء المتصلة بالأمان في الوحدة ١ من محطة القوى النووية روبور Rooppur في ٣٠ تشرين الثاني/نوفمبر. ومن المتوقع إدخال وحدَتَي محطة روبور في الخدمة في عامَي ٢٠٢٣ و ٢٠٢٤. وفي تركيا، بدأت أعمال الإنشاء غير النووية في أكويو Akkuyu في تشرين الأول/أكتوبر، استناداً إلى رخصة بناء محدودة، ومن المقرَّر إدخال الوحدة ١ في الخدمة في عام ٢٠٢٣. وأكملت مصر المفاوضات مع الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" Rosatom التابعة للاتحاد الروسي بشأن أربعة اتفاقات رئيسية لإنشاء محطة قوى نووية تتألف من أربع وحدات في الضبعة، ومن المقرَّر إنجازها بين عامَي ٢٠٢٣ و ٢٠٢٦.

٧- وأحرزت المفاوضات بين الأردن و"روزاتوم" تقدُّماً. وبالانتهاء من دراسة الشبكة الرئيسية ودراسات مياه التبريد، من المتوقع صدور قرار الاستثمار النهائي في عام ٢٠١٨. ووقعَّت نيجيريا في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٧ اتفاقاتٍ مع الاتحاد الروسي بشأن إنشاء وتشغيل محطة قوى نووية ومركز للبحوث النووية، وخريطة طريق للتعاون في مجال التكنولوجيات النووية السلمية. وعملت بولندا والمملكة العربية السعودية على عطاءات دولية، وتعتزمان إصدارها في عام ٢٠١٨. ولا يزال قرار كينيا بشأن برنامج القوى النووية معلّقاً.

٨- وما تزال الدول الأعضاء تستفيد من مساعدة الوكالة في إرساء البنية الأساسية النووية الوطنية، بالاستناد إلى نَهْج المعالم المرحلية البارزة، بما يدعم إنشاء برامج قوى نووية مأمونة وآمنة ومستدامة. وينطوي ذلك على استعراض النظراء وبعثات الخبراء، والدورات والأدوات التدريبية التي تغطي بصورة منهجية مسائلَ البنية الأساسية النووية البالغ عددها ١٩ مسألة. وبإيفاد بعثة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية إلى غانا في عام ٢٠١٧، بلغ عدد بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية التي تمَّ إيفادها منذ إطلاق هذه البعثات في عام ٢٠٠٩ ما مجموعه ٢٢ بعثة إلى ١٦ دولة عضواً.

ألف-١-٢- البلدان المتوسِّعة

٩- مازالت الصين تمتلك أكبر برنامج توسُّع فهي تمتلك ٣٨ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل و١٩ مفاعلاً قيد الإنشاء، كما تعتزم الصين إنشاء ٣٠ مفاعلاً في الخارج بحلول عام ٢٠٣٠.

١٠- وانتقلَ مشروع المفاعل الأوروبي العامل بالماء المضغوط أولكيليوتو-٣ Olkiluoto-3 في فنلندا إلى مرحلة الإدخال في الخدمة، مع استكمال الاختبارات الوظيفية الباردة. وبعد الاختبارات الوظيفية الساخنة، من المقرَّر أن يبدأ التشغيل التجاري في أوائل عام ٢٠١٩. وما يزال مشروع محطة القوى النووية هانهيكيفي-١ Hanhikivi-1 قيد الاستعراض لأغراض الترخيص، ومن المزمع بدء أعمال إنشاء المحطة في عام ٢٠١٩.

١١- وفي آذار/مارس ٢٠١٧، وافقت المفوضية الأوروبية على إنشاء وحدات جديدة في محطة القوى النووية باكس الثانية Paks II، وفي نيسان/أبريل ٢٠١٧، أصدرت هيئة الطاقة الذرية الهنغارية رخصة بيئية نهائية ورخصة لموقع محطة القوى النووية.

١٢- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٧، تمَّ تركيب أول مولِّدات البخار الثلاثة في وحدة كراتشي ٢ بباكستان، وهي أول مفاعِلَيْن اثنين من طراز هوالونغ وَنْ Hualong One الصيني قيد الإنشاء في الموقع. (الشكل -٢)

الشكل ألف-٢ . أعمال الإنشاء في وحدة كراتشي ٢ ، باكستان، أيلول/سبتمبر ٢٠١٧ .
(الصورة من: شركة الصين للهندسة النووية CNEC)

١٣- وبدأت أعمال الإنشاء غير المتصلة بالأمان في بوشهر-٢ Bushehr-2، جمهورية إيران الإسلامية، في آذار/مارس. ومن المقرَّر أن يتم الانتهاء من وحدة VVER-100 في عام ٢٠٢٤، على أن يتبع ذلك بوشهر-٣ Bushehr-3 في عام ٢٠٢٦.

١٤- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تواصَلت أعمال البناء في كلّ من المفاعِلَيْن AP1000 Vogtle-3 وAP1000 Vogtle-4، وتولَّت شركة ساذرن نيوكلير Southern Nuclear إدارة المشروع بدلاً من شركة ويستينغهاوس Westinghouse؛ ومن المزمع بدء التشغيل في عامَي ٢٠٢١ و٢٠٢٢ على التوالي. وتمَّ تعليق بناء المفاعِلَيْن AP1000 Summer-2 و AP1000 Summer-3 في تموز/يوليه ٢٠١٧ لأسباب اقتصادية.

١٥- وفي أيار/مايو، وقّعت الشركة الحكومية لمحطات الكهرباء النووية في الأرجنتين "نوكلوليكتريكا" Nucleoeléctrica اتفاقاتٍ مع الشركة الوطنية النووية الصينية (CNNC) لمفاعِلَيْن جديدين: ومن المقرر أن يبدأ إنشاء المفاعل كاندو Candu الجديد بقدرة ٧٢٠ ميغاواط (كهربائي) في عام ٢٠١٨، تليه وحدة مفاعل هوالونغ وَنْ Hualong One بقدرة ١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) في عام ٢٠٢٠.

١٦- وفي آب/أغسطس، وقّعت الهند عقوداً مع "روزاتوم" بشأن الوحدتين ٥ و ٦ من محطة القوى النووية كودانكولام Kudankulam، وكلتاهما مفاعلان من طراز VVER-1000، وسيتمُّ تشييد الوحدتين بالتعاون مع شركة القوى النووية الهندية (NPCIL).

١٧- وفي تشرين الأول/أكتوبر، منحت وزارة الشؤون البيئية في جنوب أفريقيا إذناً بيئياً لإنشاء وتشغيل محطة قوى نووية بقدرة ٤٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) مع البنية الأساسية المرتبطة بها في دوينفونتين Duynefontein بالقرب من محطة القوى النووية العاملة كويبيرغ Koeberg.

ألف-١-٣- البلدان المشغِّلة

١٨- في نهاية عام ٢٠١٧، ومن بين مفاعلات القوى النووية العاملة في العالم البالغ عددها ٤٤٨ مفاعلاً، كان ٤٧٪ من هذه المفاعلات يعمل منذ فترة تتراوح بين ٣٠ و ٤٠ عاماً، في حين كانت نسبة ١٧٪ أخرى منها تعمل منذ فترة تزيد على ٤٠ عاماً. ويتم حالياً تنفيذ برامج التشغيل الطويل الأجل وإدارة التقادُم على عدد متزايد من محطات القوى النووية.

١٩- وأطلقت هيئة كهرباء فرنسا (Électricité de France) برنامجها المسمَّى Grand Carénage تحقيقاً لاستراتيجيتها الصناعية القائمة على التشغيل المأمون لأسطول محطات القوى النووية القائمة لمدة تتجاوز ٤٠ عاماً بكثير، وهو ينطوي على برنامج واسع لتجديد محطات القوى النووية بُغية تحسين الأداء والأمان. ومن المتوقع أن يستمر البرنامج لعشر سنوات. وفيما يتعلق باستبدال جزء من أسطول فرنسا القائم، فقد بلغ المفاعل Flamanville-3 EPR مرحلة الإدخال في الخدمة، بعد الانتهاء من الاختبارات الوظيفية الباردة. وعقب إجراء الاختبارات الوظيفية الساخنة، من المقرَّر أن يبدأ التشغيل التجاري في نهاية عام ٢٠١٨.

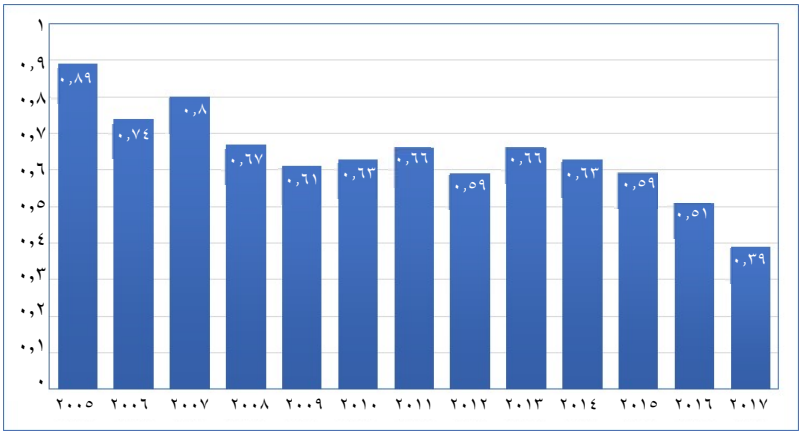
٢٠- ويُعَدُّ تجديد تراخيص تشغيل محطات القوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية عملية ناضجة ومستقرة، إذ يمتلك ٨٦ مفاعلاً من أصل ٩٩ مفاعلاً تراخيصَ تشغيل مجدَّدة لمدة تصل إلى ٦٠ عاماً. وبموجب العملية التنظيمية ذاتها المتبعة في تجديد الترخيص الاستهلالي، أصدرت الهيئة الرقابية النووية الأمريكية وثائق إرشادية في تموز/يوليه ٢٠١٧ بشأن تجديد الترخيص اللاحق لتشغيل المحطات لمدة تصل إلى ٨٠ عاماً.

٢١- وللمفاعِلَيْن Kozloduy 5 و Kozloduy 6 في بلغاريا رخصتان تشغيليتان حتى عام ٢٠١٧ وعام ٢٠١٩. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧، وبتمديد رخصة الوحدة ٥ حتى عام ٢٠٢٧، تكون الهيئة الرقابية النووية البلغارية قد سمحت للمرة الأولى باستمرار تشغيل مفاعل نووي بعد انتهاء الرخصة التشغيلية الأصلية.

٢٢- وفي اليابان، ومن أصل ٤٢ مفاعلاً قابلاً للتشغيل، اجتازت خمسة مفاعلات حتى الآن عمليات التفتيش التي أكدت أنها تفي بمعايير الأمان التنظيمية الجديدة وقد استأذنت التشغيل بالفعل. وهذه المفاعلات هي: المفاعِلان Sendai-1 وSendai-2 اللذان تشغلهما شركة كيوشو Kyushu؛ والمفاعل Ikata-3 الذي تشغّله شركة شيكوكو Shikoku؛ والمفاعلان Takahama-3 وTakahama-4 اللذان تشغلهما شركة كنساي Kansai. كذلك قدَّم ٢٠ مفاعلاً آخر طلبات للتشغيل من جديد.

٢٣- وما يزال أمان تشغيل محطات القوى النووية عند مستويات عالية، وهو ما يتّضح من مؤشرات الأمان التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغِّلين النوويين. ويُظهر الشكل ألف-٣ عدد حالات الإيقاف أو الإغلاق

اليدوي أو التلقائي غير المخطط لها لكل ٧ ٠٠٠ ساعة (قرابة سنة) من التشغيل للوحدة الواحدة. وما حالات الإيقاف غير المخطَّط له إلا واحدة من مؤشرات أداء الأمان الممكنة، غير أنها شائعة الاستخدام.

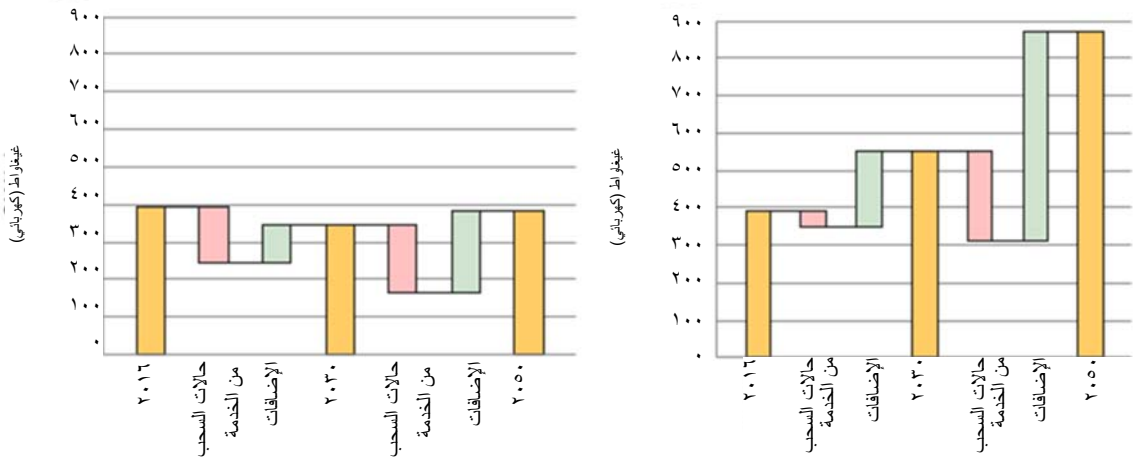


الشكل ألف-٣- متوسط معدل حالات الإيقاف: عدد حالات الإيقاف التلقائي واليدوي لكلِّ ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل للوحدة الواحدة. (المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة: www.iaea.org/pris)

ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

٢٤- وفقاً لتوقعات الوكالة لعام ٢٠١٧ (الشكل ألف-٤)، من المتوقع أن ترتفع القدرة العالمية على توليد الطاقة الكهربائية نووياً لتبلغ ٥٥٤ غيغاواط (كهربائي) بحلول العام ٢٠٣٠ و٨٧٤ غيغاواط (كهربائي) بحلول العام ٢٠٥٠ في سيناريو الحالة المرتفعة. ويمثل ذلك زيادة بنسبة ٤٢٪ عن المستويات الحالية بحلول عام ٢٠٣٠، ومضاعفة القدرة بحلول عام ٢٠٥٠. وفي سيناريو الحالة المنخفضة، من المتوقع أن تنخفض القدرة تدريجياً حتى عام ٢٠٤٠، على أن ترتفع مجدداً إلى المستويات الحالية بحلول عام ٢٠٥٠.

٢٥- والنطاق العريض لهذه التوقعات يُعزى جزئياً إلى حقيقة أنه من المقرَّر سحب عدد كبير من المفاعلات من الخدمة في حوالي عام ٢٠٣٠ وما بعده، خاصة في أمريكا الشمالية وأوروبا، مثلما يُعزى إلى حالة عدم اليقين فيما إذا كانت ستُبنى قدرات نووية جديدة لتحلَّ محلها.



الشكل- ألف-٤- التوقعات في حالتها المرتفعة (إلى اليسار) والمنخفضة للقدرات النووية العالمية. (المصدر: التقديرات بشأن الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة حتى عام ٢٠٥٠، سلسلة البيانات المرجعية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية – العدد ١، ٢٠١٧).

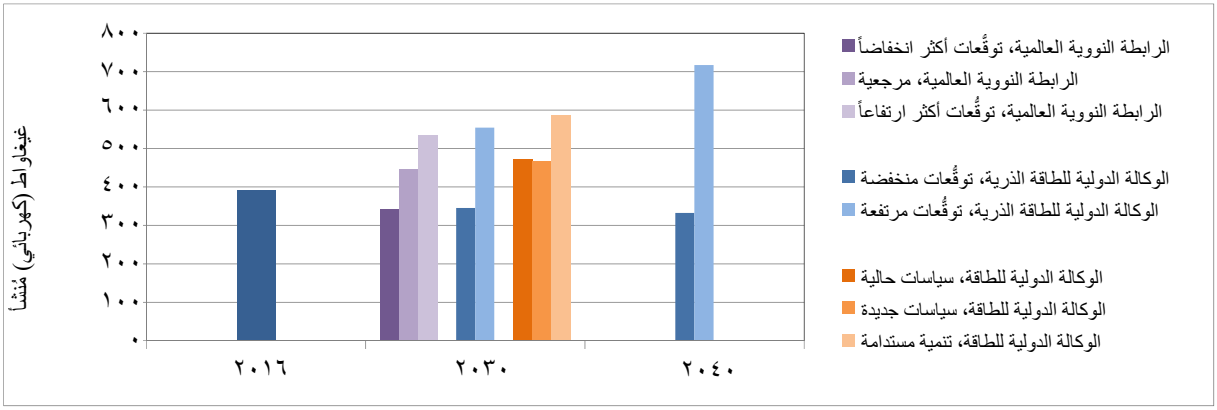
٢٦- وسيناريوهات الحالة المرتفعة الصادرة عن كلٍّ من الوكالة الدولية للطاقة الذرية، والوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، والرابطة النووية العالمية، تُظهِر باستمرار نمواً في حدود ٥٠٠-٦٠٠ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠، في حين تعكس سيناريوهات الحالة المنخفضة شكوكاً أكبر بشأن النمو (الشكل ألف-٥).

٢٧- وتسهم القوى النووية إسهاماً كبيراً في الحدّ من انبعاثات غازات الدفيئة في جميع أنحاء العالم، وتقوم في الوقت نفسه بتلبية الطلب المتزايد على الطاقة للأعداد المتزايدة من سكان العالم ودعم التنمية المستدامة. ولا تُنتج المفاعلات النووية تقريباً أيّ انبعاثات غازات دفيئة أو ملوِّثات هواء خلال تشغيلها، ولا تتسبَّب إلا بمقدار ضئيل للغاية من الانبعاثات على مدى دورة حياتها. ونتيجةً لذلك، فإن استخدامَ القوى النووية يجنِّبنا انبعاث ما يقرب من ٢ مليار طن من ثاني أكسيد الكربون كلّ عام.

٢٨- ويدعو اتفاق باريس، الذي صدَّق عليه ١٧١ بلداً، بلدانَ العالم إلى الحدِّ من ارتفاع متوسط درجات الحرارة العالمية إلى أقلّ بكثير من درجتين مئويتين فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية. وتُبرز النتائج التي توصلت إليها الوكالة الدولية للطاقة الذرية والوكالة الدولية للطاقة والرابطة النووية العالمية الحاجة إلى زيادة استخدام القوى النووية في المدى الطويل للوصول إلى الدرجتين المئويتين. وثمة أسباب مهمة تجعل عدّة بلدان، ولا سيما في العالم النامي، تعتزم إدخال القوى النووية في العقود المقبلة، أو توسيع نطاق برامجها الحالية، تتمثَّل في مزاياها في التخفيف من آثار تغيُّر المناخ، فضلاً عن أمن الطاقة والفوائد البيئية غير المناخية وأيضاً الفوائد الاجتماعية-الاقتصادية.

٢٩- وعقدت الوكالة المؤتمر الوزاري الدولي بشأن القوى النووية في القرن الحادي والعشرين، في أبو ظبي في الفترة من ٣١ تشرين الأول/أكتوبر إلى ٢ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧. وركَّزت الكلمات الوطنية والحلقات النقاشية على استخدام القوى النووية لحلِّ المعضلة الثلاثية (الطاقة - الاقتصاديات - البيئة)، والتحديات التي تواجه إرساء البنية الأساسية الخاصة بالقوى النووية، والجوانب المتعلقة بالأمان والموثوقية في الطاقة النووية،

والابتكارات والتطورات في التكنولوجيات النووية. وأبرز المؤتمر أيضـاً الحاجة إلى نمو كبير في القوى النووية لكي يحقّق العالم أهدافه المتعلقة بالتنمية المستدامة والمناخ.



الشكل- ألف-٥- مقارنة توقعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية لعام ٢٠١٧ لقدرات القوى النووية بسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة وتوقعات الرابطة النووية العالمية (أرقام الوكالة الدولية للطاقة مبنية على القدرة الإجمالية).

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية

موارد اليورانيوم وإنتاجه

٣٠- بقيت أسـعار التسـليم الفوري لليورانيوم منخفضـة في عام ٢٠١٧، وتراوحت على وجه العموم بين ٤٢ دولار أمريكي/كيلوغرام يورانيوم و٥٤ دولار أمريكي/كيلوغرام يورانيوم. وأدَّت الأسـعار المخفَّضـة إلى الحدِّ بشـكل كبير من قدرة الشـركات على جمع الأموال اللازمة لأنشـطة الاسـتكشـاف، وإجراء دراسـات الجدوى، وإطلاق مشـاريع جديدة للتوسُّـع. وعليهِ من المرجَّح أن يظل إنتاج العالم من اليورانيوم في عام ٢٠١٧ عند مستويات عام ٢٠١٦، والتي بلغت ٦٣٣٦٦ طناً من اليورانيوم، مقارنةً بـ ٦٠٤٩٦ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٥.

٣١- وحافظت كازاخسـتان على مكانتها باعتبارها منتج اليورانيوم الرائد في العالم، والمأخوذ بالكامل تقريباً من مناجمها للنضّ الموقعي. وبعد أن زادت كازاخسـتان إنتاجها بسـرعة في الفترة بين عامَي ٢٠٠٠ و٢٠١٢، وبعد أن أنتجت ٢٣٨٠٠ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٥ و٣٠٠٦٢ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٦، من المتوقع أن تنتج رقماً مشابهاً في عام ٢٠١٧.

٣٢- وفي كندا، وهي ثاني أكبر مُنتِج لليورانيوم في العالم، من المتوقع أن ترتفع القدرة الإنتاجية السـنوية لمنجم "سـيجار ليك" Cigar Lake (وهو المنجم الذي ينتج اليورانيوم الأعلى مرتبة في العالم وقد بدأ الإنتاج التجاري في أيار/ مايو ٢٠١٥) إلى ٦٩٠٠ طناً من اليورانيوم/سنوياً مع مطلع عام ٢٠١٨.

٣٣- وبدأ منجم هوسـاب Husab لليورانيوم في ناميبيا الإنتاج التجاري في عام ٢٠١٦، وأنتج ١٩٢ طناً من اليورانيوم خلال تلك السنة. ومن المتوقع أن يرتفع إنتاج المنجم، ومن المحتمل أن تبلغ القدرة الكاملة ٥٧٧٠ طناً من اليورانيوم/سـنوياً، ويتجاوز العمر المتوقع للمنجم ٢٠ عاماً. وواصـل منجما اليورانيوم روسـنغ Rössing

ولانغر هاينريتش Langer Heinrich في ناميبيا عمليات التشغيل في عام ٢٠١٧. وتواصلت دراسات الجدوى المتواضعة في بعض رواسب اليورانيوم الأخرى في ناميبيا.

٣٤- وفي أستراليا، أنتج منجم "فور مايل" Four Mile للنضّ الموقعي لليورانيوم قرابة ١٤٠٠ طن يورانيوم/سنوياً. وفي مشروع "رينجر" Ranger، بلغ الإنتاج في عام ٢٠١٦ ما مجموعه ١٩٩٤ طناً من اليورانيوم، ومن المتوقع إنتاج ما بين ١٧٠٠-٢٠٠٠ طن يورانيوم في عام ٢٠١٧، مقارنة بكمية تتراوح بين ٤٠٠٠ إلى ٦٠٠٠ طن يورانيوم/سنوياً في الفترة بين عامَي ١٩٩٧و٢٠٠٩. وبموجب الترتيبات الحالية يجب أن يتوقف تعدين اليورانيوم ومعالجته بحلول كانون الثاني/يناير ٢٠٢٠ على أن تُستكمل عملية إعادة التأهيل في غضون خمس سنوات. وواصل منجم "أولمبيك دام" Olympic Dam للنحاس واليورانيوم والذهب والفضة عملياته التقليدية، فيما تواصَل اختبارُ خيار النض التكويمي لجزء من ركازته. ومضت الدراسات والموافقات قُدُماً فيما يخصُّ عدّة رواسب يورانيوم في غرب أستراليا، ولكن دون وجود مواعيد مؤكدة لبدء الإنشاء أو الافتتاح.

٣٥- وتواصَلَت دراسات الجدوى والدراسات البيئية والموافقات لمشروع الأتربة النادرة والمعادن البخسة واليورانيوم في مستودع "كفانفيلد" Kvanefjeld في غرينلند، مملكة الدانمارك.

٣٦- وبقيت الصين ملتزمة التزاماً قوياً إزاء نمو الطاقة النووية من خلال النفقات المتصلة باستكشاف اليورانيوم والتطوير، وطنياً وخارجياً على السواء. وتواصَلَت نفقات التطوير في الخارج على نطاق واسع، ومردّ ذلك في المقام الأول إلى منجم هوساب Husab في ناميبيا.

٣٧- ويمرُّ مشروع يورانيوم سالامانكا Salamanca في إسبانيا حالياً بمرحلة الترخيص، بعد استكمال عدَّة إجراءات قانونية وفقاً للوائح الوطنية. وسوف يتطلَّب تشييد المنشأة وإدخالها في الخدمة الحصول على إذن بذلك من الحكومة، رهناً بتقرير تعدُّه الهيئة الرقابية المعنية بالأمان النووي في البلاد.

٣٨- وفي مطلع عام ٢٠١٧ بدأت شركة الصناعات النووية البرازيلية (INB) العمل على منجمها في إنغنهو Engenho الواقع في ولاية باهيا بالبرازيل، وقالت إنها تتوقع أن تنتج ٧٣ طناً من مُركَّزات اليورانيوم خلال السنة، مع إمكانية أن يتراوح الإنتاج بين ٢٨٠-٣٠٠ طن من مُركَّزات اليورانيوم سنوياً. وتجري حالياً دراسة جدوى وأعمال رقابية لتوسعةٍ تحت الأرض أو، كبديلٍ لها، حفرة مفتوحة ثانية في منجم كايتيتيه Caetité القائم.

٣٩- والعديد من مشاريع اليورانيوم بقيت معلَّقة أو تحت إنفاق منخفض. وبعض المشاريع التي استُهلَّت أو بلغت مراحل متقدّمة من الأعمال الإنشائية بقيت في حدود العناية والصيانة. وصدر إعلان مهم في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧ بتعليق الإنتاج من منجم ماك آرثر ريفر McArthur River ومنجم كي ليك Key Lake في كندا لفترة يُتوقع أن تستمر لعشرة أشهر.

التحويل والإثراء

٤٠- القدرة الحالية للتحويل والإثراء أكثر من كافية لتلبية الطلب، غير أنَّ الطبيعة المجزأة للأسواق، مع تركُّز الإنتاج على عدد قليل من المحطات، تضعنا أمام تحدٍّ.

٤١- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٧ وقَّعت شركة الطاقة "سنتراس إينيرجي" Centrus Energy والمختبر الوطني في أوك ريدج التابع لوزارة الطاقة الأمريكية عقداً لمواصلة جهودهما المشتركة الرامية لتقليص تكلفة وزيادة كفاءة تكنولوجيا الإثراء بالطرد المركزي الغازي AC100.

٤٢- وبعد أن اجتازت الاختبارات الضرورية ولما تحمله من آفاق واعدة من حيث تحقيق وَفْر كبير في الطاقة، سيتم إدخال الطاردات المركزية الغازية "الجيل ٩+" المتقدّمة في أعمال شركة Urals Electrochemical Combine التابعة للاتحاد الروسي في نوفورالسك Novouralsk، إقليم سفردلوفسك Sverdlovsk، ابتداء من ٢٠١٨ فصاعداً.

تصنيع الوقود

٤٣- في إطار عقد دخل حيّز النفاذ في كانون الثاني/يناير ٢٠١٧، ستقوم شركة الوقود TVEL، التابعة لشركة "روزاتوم"، بإنتاج وتوريد مجمَّعات الوقود في عامَي ٢٠١٧ و٢٠١٨ للمفاعل التجريبي الصيني السريع الذي شيَّده شركاؤها في روسيا. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٧، وقَّعت شركة الوقود TVEL عقداً مع HAEK CJSC لتوريد الوقود النووي إلى المفاعل Armenian-2 بقدرة ٤٤٠ ميغاواط لعملية إعادة التحميل التالية، وكذلك احتياطي الوقود لمدة سنتين.

٤٤- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٧، تلقَّت شركة باوتو للوقود النووي، التابعة للشركة الوطنية النووية الصينية (CNNC)، الموافقة على إنتاج قضبان الوقود النووي AP1000 لشركة ويستينغهاوس إيليكتريك. وهو ما يمكّن الشركة الوطنية النووية الصينية من استكمال خط إنتاج قضبان الوقود وتصنيع مجمَّعات الوقود AP1000.

٤٥- وفي نقلةٍ من مرحلة خط الإنتاج التجريبي إلى العمليات التشغيلية الصناعية، بدأ في تموز/يوليه ٢٠١٧ في شركة China North Nuclear Fuel في باوتو الإنتاجُ واسع النطاق لعناصر الوقود للمفاعلات المرتفعة الحرارة المبردَّة بالغاز. وتمَّ بالفعل إنتاج نحو ٢٠٠٠٠٠ من عناصر الوقود الكروية في المرفق المذكور الذي تبلغ قدرته الإنتاجية ٣٠٠٠٠٠ من عناصر الوقود الكروية سنوياً للمفاعل الإيضاحي المرتفع الحرارة المبرَّد بالغاز قيد التشييد في شيداوان Shidaowan في إقليم شاندونغ Shandong.

٤٦- وفي نيسان/أبريل ٢٠١٧، سمحت هيئة الرقابة النووية في اليابان بتعديل رخصة صنع الوقود في محطة صُنع الوقود النووي التابعة لشركة Global Nuclear Fuel – Japan (GNF-J) في يوكوسوكا Yokosuka بمحافظة كاناغاوا، بما يشكِّل إحدى الخطوات الرئيسية صوب الامتثال للمتطلبات الرقابية الجديدة التي استُحدثت في أعقاب الحادث الذي وقع محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وشركة GNF-J هي جزء من مشروع مشترك تقوده شركة جنرال إليكتريك مع شركتَي هيتاشي وتوشيبا لتصميم وتصنيع وقود مفاعلات الماء المغلي.

٤٧- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٧ وصلت من فرنسا شحنة تتألف من ١٦ مجمَّع وقود خليط الأكسيدين إلى محطة القوى النووية طاكاهاما Takahama في اليابان لتُستخدم في الوحدة ٤ في عام ٢٠١٨. ومُنحت شركة أريفا AREVA[٢] عقداً من شركة Nuclear Fuel Industries لتصنيع ٣٢ مجمَّع وقود خليط الأكسيدين لوحدات المفاعلين Takahama 3 وTakahama 4 التابعين لشركة Kansai Electric Company.

---

[٢] بعد إعادة هيكلة الصناعة النووية الفرنسية، جرى تقسيم شركة أريفا (AREVA) إلى شركة أورانو (Orano) (لعمليات الوقود النووي) وشركة فراماتوم (Framatome) (لعمليات المفاعلات النووية) في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨.

٤٨- ووقَّعت شركة كاميكو Cameco الكندية اتفاقَ تمديد لعشر سنوات في أيار/مايو ٢٠١٧ لمواصلة توريد الوقود النووي إلى محطة القوى النووية "بروس" Bruce.

٤٩- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٧ أطلقت شركة ويستينغهاوس إيليكتريك الوقود المتحمِّل للحوادث EnCoreTM على أمل تصنيع قضبان اختبار الرصاص في عام ٢٠١٨. وتقترح الشركة أن الوقود EnCore سيوفر أماناً قائماً على تغيير أساس التصميم وكفاءة يورانيوم أكبر وهو ما يساعد المرافق في توفير الأموال.

٥٠- وفي آب/أغسطس ٢٠١٧ مدَّدت شركة ويستينغهاوس إيليكتريك عقدها مع شركة الطاقة الأمريكية PSE&G في نيوجيرسي لتوفير الوقود لوحدَتي محطة القوى النووية "سالم" Salem.

٥١- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٧ اتفقت شركة AREVA مع شركة "لايتبريدج كوربوريشن"، وهي شركة أمريكية مختصة في تطوير الوقود النووي، على مشروع مشترك بنسبة ٥٠-٥٠ بالمئة سيُطلق في مطلع عام ٢٠١٨ لتصنيع وتسويق خط جديد من وقود معدني متقدّم لمحطات القوى النووية. وقامت شركة "لايتبريدج" بتطوير الوقود الذي يمكن استخدامه في المحطات القائمة والجديدة قيد التشييد لتحسين الكفاءة التشغيلية والأمان. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٧، وقَّعت شركة "لايتبريدج" طلبيات مع معهد تكنولوجيا الطاقة (IFE)، وهو المشغِّل لمفاعل البحوث "هالدن" Halden في النرويج، لتصميم وتصنيع جهاز تشعيع ثان لاختبار أشكال الوقود، وهو معلَم مهم في توفير تكنولوجيا الوقود في الأسواق.

٥٢- وفي شباط/فبراير ٢٠١٧ انتقلت شركة AREVA إلى المرحلة الثانية من الوقود المتحمِّل للحوادث المعزَّز لوزارة الطاقة الأمريكية، لتعزيز الكفاءة والموثوقية من خلال أقراص الوقود المغطاة بأكسيد الكروم وأيضاً الكسوة المغطاة بالكروم.

٥٣- وواصل الاتحاد الروسي اختبار نوعين جديدين من الوقود — وقود الخليط المعاد تنشيطه (ريميكس) لمفاعلات الماء الخفيف، ووقود خليط نيتريد اليورانيوم ونيتريد البلوتونيوم للمفاعلات السريعة.

ألف-٣-٢- ضمان الإمداد

٥٤- في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس محافظي الوكالة على إقامة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وأكملت الوكالة وكازاخستان الإطار القانوني الأساسي في عام ٢٠١٥ لإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في موقع محطة أولبا التعدينية في أوست-كامينوغورسك Ust-Kamenogorsk. ووُقِّعت اتفاقات العبور مع الاتحاد الروسي والصين، وتمضي قُدماً مفاوضات عقود النقل مع المنظمات المفوَّضة في البلدين المذكورين وكازاخستان.

٥٥- وأوشكت خطة الأنشطة المحدَّدة على الاكتمال بعد أن عالجت مسائل تشمل تلك المتعلقة بأمن وأمان المواقع. وتم استكمال إنشاء مرفق تخزين اليورانيوم الضعيف الإثراء الخاص بالوكالة في كازاخستان في صيف عام ٢٠١٧. وأكَّدت بعثة أوفدتها الوكالة في آب/أغسطس ٢٠١٧ أنَّ مرفق تخزين اليورانيوم الضعيف الإثراء الخاص بالوكالة قد تم تشييده وإدخاله في الخدمة وتحضيره للتشغيل بما يتفق مع معايير الأمان الصادرة عن الوكالة وأيضاً الوثائق الإرشادية في مجال الأمن الصادرة عنها، وأن تدابير كافية قد نُفِّذت لضمان حماية العاملين والجمهور والبيئة طوال تشغيله. ودُشِّن المرفق في ٢٩ آب/أغسطس ٢٠١٧.

٥٦- وأُحرز تقدُّمٌ في استكمال برنامج إدارة الأسطوانات الذي سيضمن أمان وأمن الأسطوانات في الموقع في الأجل الطويل ولاحقاً خلال نقلها. وأُجري في نيسان/أبريل ٢٠١٧ اختبار تجريبي قام بمحاكاة الاختبارات اللازمة لإعادة اعتماد الأسطوانات وفقاً لمعيار المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس القادم ذي الصلة، وسيُسترشد بتلك النتائج في برنامج إدارة الأسطوانات النهائي. وتمّ إصدار طلب تقديم العروض الخاصة باقتناء اليورانيوم الضعيف الإثراء في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧.

٥٧- ويبيّن *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* (الوثيقة GC(56)/INF/3) الآليات الأخرى المعمول بها لضمان الإمداد.

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية

التصرف في الوقود المستهلَك

٥٨- حتى هذا اليوم تمَّ إخراج نحو ٤٠٠ ٠٠٠ طن من المعادن الثقيلة من محطات القوى النووية كوقود نووي مستهلَك. وحالياً تُعاد معالجة قرابة ٢٥٪ منها، ومن المتوقع أن ترتفع هذه النسبة إلى ٣٠٪ بحلول العام ٢٠٢٠ ويوجد حالياً ١٥١ مرفقاً من مرافق تخزين الوقود المستهلَك الواقعة بعيداً عن المفاعلات في ٢٧ بلداً.

٥٩- وفي عام ٢٠١٧ وقَّع بلدان عقدَيْن لمرافق خزن جاف واقعة بعيداً عن المفاعل: سلوفينيا في محطة القوى النووية كرسكو Krško والبرازيل لتخزين الوقود المستهلَك من المفاعِلَيْن Angra-1 و Angra-2. ويتمُّ تصميم محطة كرسكو وفق متطلبات عالية لتحمُّل الأنشطة الزلزالية والفيضانات الشديدة وذلك بموجب متطلبات الأمان التي تم تحديدها عقب حادث فوكوشيما.

٦٠- وتلقَّى مرفق الخزن الجاف في محطة سيزيويل بي Sizewell B بالمملكة المتحدة، المصمَّم لاستيعاب ١٠٠ عام من التخزين، أول براميل وقود معبأة في عام ٢٠١٧.

٦١- وفي هنغاريا، تمَّ في عام ٢٠١٧ توسيع مرفق الخزن الجاف النمطي"باكس" Paks ذي الأقبية بإضافة أربعة أقبية أخرى بعد أن كانت قدرته ٩٣٠٨ من مجمّعات الوقود موزَّعة في ٢٠ قبواً.

٦٢- ويشهد حالياً مرفقُ الخزن المؤقت ISF-2 في محطة تشرنوبل للقوى النووية في أوكرانيا، الذي يتألف من مرفق لقطع الوقود/تعبئته ووحدات لخزن الوقود المستهلَك، اختباراتٍ الإدخال في الخدمة لعمليات قطع وقود المفاعل RMBK. ومُنح في عام ٢٠١٧ إذنُ الجهة الرقابية لتشييد مرفق خزن جاف مركزي جديد لوقود مفاعلات القوى ضمن "منطقة تشرنوبل المحظورة"، ومن المزمع بدء العمليات التشغيلية في عام ٢٠١٩.

٦٣- وخلال عام ٢٠١٧ تم الإبلاغ عن عدد من الابتكارات في مجال الصناعة، شملت الجلخ بالليزر لبراميل الخزن الجاف الملحومة للتخفيف من احتمال التصدُّع بفعل التآكل الناتج عن الإجهاد، وتطوير وحدات خزن جاف مدمجة تيسّر عملية التحقُّق من البراميل المخزنة.

٦٤- وفيما يتعلق بإعادة معالجة وإعادة تدوير الوقود المستهلَك، زادت فرنسا من نطاق أنواع الوقود المستخدمة في مفاعلات الماء الخفيف والتي تخضع للمعالجة في محطة لا هاغ La Hague. كما واصل الاتحاد الروسي زيادة نطاق أشكال الوقود التي يمكن إعادة معالجتها في محطة RT-1 في مجمّع مايك Mayak الكيميائي في أوزيرسك .Ozersk وفي هذا الصدد تم تحديث المحطة RT-1 في عام ٢٠١٧ لتمكينها من معالجة ٢٠ طناً من وقود المفاعل VVER-1000.

٦٥- وفي آذار/مارس ٢٠١٧ قالت الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة بالمملكة المتحدة أن محطة إعادة المعالجة الحرارية للأكاسيد (ثورب) ستتوقف عن العمل في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨. ومنذ عام ١٩٩٤ تمت إعادة معالجة قرابة ٩٥٠٠ طن من وقود الأكسيد في هذه المحطة.

٦٦- وفي آب/أغسطس ٢٠١٧، تعاقد مركز إنديرا غاندي للأبحاث الذرية في الهند مع شركة هندوستان للإنشاءات Hindustan Construction Co لبناء مرفق دورة وقود المفاعلات السريعة في كالباكام Kalpakkam على مدى السنوات الأربع القادمة. ويجري حالياً إنشاء مرفق بحوث كيميائية إشعاعية متعدد الوظائف في معهد بحوث المفاعلات الذرية (RIAR) في الاتحاد الروسي. وأعلنت "روزاتوم" في أيار/مايو أن هذا المرفق سيتم إدراجه تحت مظلة المركز الدولي للبحوث (IRC) لاختبار تكنولوجيات إغلاق دورة وقود المفاعلات السريعة.

٦٧- وفي آب/أغسطس ٢٠١٧، وصلت بالقطار الدفعة الأولى من الوقود المستهلَك من مرفق خزن "نورثرن فليت" Northern Fleet الواقع في خليج Andreeva Bay في الاتحاد الروسي لإعادة معالجته في محطة مایاك (قطعت مسافة ٣٠٠٠ كيلومتر). ومن المقرر أن ينقل نحو ٥٠ قطاراً ما مجموعه ٢٢٠٠٠ من عناصر وقود الغواصات النووية المستهلَك إلى مایاك، ويُقدَّر أن تستغرق معالجة هذه الكمية من ٥ إلى ١٠ سنوات.

ألف-٣-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعّة

إخراج مرافق نووية من الخدمة

٦٨- في أنحاء العالم ثمة ١٦٤ مفاعل قوى تمَّ إغلاقها أو تخضع حالياً لعملية الإخراج من الخدمة. من بينها ١٧ مفاعلاً تمَّ إخراجها من الخدمة بشكل كامل، فيما يقترب عدد آخر منها من المراحل النهائية من عملية الإخراج من الخدمة. كذلك تمَّ إغلاق أكثر من ١٥٠ مرفقاً من مرافق دورة الوقود النووي إغلاقاً دائماً، أو أنها في طور الإخراج من الخدمة، فيما تم إخراج نحو ١٢٥ مرفقاً من الخدمة. وتم إغلاق أكثر من ١٨٠ مفاعل بحوث أو أنها في طور الإخراج من الخدمة، كذلك تمَّ إخراج أكثر من ٣٠٠ مفاعل بحوث ومجمَّعات حرجة من الخدمة بشكل كامل.

٦٩- وجهود البحث والتطوير، لاسيما في البلدان التي تملك برامج قوى نووية مكثفة، مثل الاتحاد الروسي وإسبانيا وبلجيكا وجمهورية كوريا وفرنسا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان، ماضيةٌ في تحقيق تحسينات مستمرة. وفي نيسان/أبريل ٢٠١٧، افتتحت الوكالة اليابانية للطاقة الذرية مركز البحوث الجديد للمختبرات التعاونية للعلوم المتقدّمة في مجال إخراج المرافق من الخدمة (CLADS)، في توميوكا Tomioka، محافظة فوكوشيما. وسيكون مبنى توميوكا للبحوث التعاونية الدولية مرفقاً مركزياً للمختبرات المذكورة وذلك للمؤسسات الوطنية والدولية المنخرطة في جهود البحث والتطوير. وفي عام ٢٠١٧، انتهت شركة أريفا AREVA في فرنسا من تفكيك مبخر لنواتج الانشطار في إحدى محطات إعادة المعالجة باستخدام تكنولوجيا الليزر.

٧٠- وفي عام ٢٠١٧ تمَّ تنقيح خريطة طريق اليابان المتوسطة والطويلة الأجل وكذلك خطتها الاستراتيجية التقنية لإخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة. وثمة مشكلة رئيسية مازالت قائمة هي المياه الملوَّثة الناجمة عن تدفُّق المياه الجوفية إلى مباني المفاعلات والامتزاج بالماء الراكد المستعمل لتبريد حطام الوقود، وتتمُّ معالجة هذه المشكلة باستخدام نظام إزالة النُّويدات. ومنذ عام ٢٠١٦ تمَّ تركيب أنابيب التجميد للجدران المانعة للانزلاقات الأرضية لصدّ المياه الجوفية، وبدأ تجميد القسم الأخير من الجدار في آب/أغسطس ٢٠١٧.

٧١- ويتمُّ تحقيق تقدُّم ملموس في مشـــاريع إخراج محطات القوى النووية من الخدمة، بدعم من المصـــرف الأوروبي للإنشاء والتعمير، في كلٍّ من بلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا (الشكل ألف-٦) وأوكرانيا .

الشكل- ألف-٦ - هدم أبراج تبريد محطة بوهيونيس في V1 Bohunice للقوى النووية، سلوفاكيا، تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٧ الصورة من: شركة JAVYSللقوى النووية والإخراج من الخدمة

الاستصلاح

٧٢- وأبلغت اليابان على نحو منتظم بالتقدُّم المحرَز في إزالة التلوث خارج الموقع. وفي نهاية آذار/مارس ٢٠١٧، أُنجزت أعمال إزالة التلوث في جميع أنحاء منطقة إزالة التلوث الخاصة، ضمن دائرة نصف قطرها ٢٠ كيلومتراً من محطة فوكوشـــيما دايتشـــي للقوى النووية، وكذلك حيثما كان من المتوقع أن يتجاوز معدل الجرعة السنوية الفعالة ٢٠ ملي سيفرت في السنة الأولى بعد وقوع الحادث. وفيما يتعلق بمنطقة مسح التلوُّث المكثف، حيث تجاوز قياس معدَّل جرعة الهواء ٠,٢٣ ميكروسيفرت/ساعة (ما يعادل أكثر من ١ ملي سيفرت/سنوياً من الجرعة الإضـافية في ظروف معينة)، تمَّ إنجاز أعمال إزالة التلوث في ٨٩ بلدية وسـوف يتم الانتهاء منها في ٣ بلديات متبقية بحلول نهاية آذار/مارس ٢٠١٨.

التصرُّف في المصادر المشعّة المختومة المهمَلة

٧٣- تمَّ تقديم المزيد من الدعم في عدة دول أعضـــاء لخيارات إدارة نهاية عمر المصـــادر المشـــعة المختومة المهمَلة. وأحرزت غانا وماليزيا تقدُّماً في مشـاريع التخلُّص داخل حفر السـبر، فيما أعربت عدّة بلدان أخرى عن اهتمامها في احتمال تطبيق التخلُّص داخل حفر السبر. ومازالت من بين أولويات العديد من الدول الأعضاء إعداد وتعهُّد قائمة بالمواد المشعة.

٧٤- واسـتُهلَّت مشـاريع إزالة المصـادر العالية النشـاط في عام ٢٠١٧، بدعم من مانحين، لكلّ من إكوادور وألبانيا وأوروغواي وباراغواي وبوليفيا وبيرو وتونس وجمهورية مقدونيا اليوغوســـلافية ســـابقاً ولبنان، ومن المتوقع استكمالها في عام ٢٠١٨. وأزيل أحدُ المصـادر المشـعة المختومة المهملة عالية النشـاط من مستشـفى في ليبيريا ووُضع في موضع تخزين مأمون وآمن .

٧٥- واستُكملت في عدّة دول أعضاء عمليات تكييف المصادر المشعة المختومة المهمَلة من الفئات ٣-٥، بما في ذلك في غانا وماليزيا وهندوراس. ودُرِّب مشـــغِّلو النفايات والموظفون الرقابيون خلال تلك البعثات وعززوا قدرتهم على إدارة المصادر المشعة المختومة المهمَلة على نحو مأمون.

٧٦- وأُحرز تقدُّم كبير في إدماج خلية سـاخنة متنقلة في نظام التخلُّص داخل حفر السـبر، ما سـيقلّل إلى أدنى حدٍّ من مناولة المصادر عالية النشاط ويزيل الحاجة إلى نقلها على نحو لا ضرورة له. وقُدِّم إيضاح لهذا الإدماج

في جنوب أفريقيا في أيلول/سبتمبر ٢٠١٧. وإلى جانب ذلك، تواصَل إحراز التقدُّم في تجميع مجموعة من الأدوات المحمولة لدعم عمليات تكييف المصادر المشعة المختومة المهمَلة من الفئات ٣-٥. ومن المتوقع تنظيم تدريب للدول الأعضاء على استخدامها في مطلع عام ٢٠١٨.

٧٧- وشاركت عدّة دول أعضاء في عملية التصميم والتقييم الأولية للمراكز التقنية المؤهلة، وهذه مبادرة للوكالة للمساعدة في التصرُّف في المصادر المشعة المختومة المهمَلة أُطلقت في عام ٢٠١٧ .

التمهيد للتخلص من النفايات المشعّة

٧٨- أعلنت شركة سيلافيلد المحدودة Sellafield Ltd في شباط/فبراير ٢٠١٧ أن أول برميل سعة ٥٠٠ لتر من الحمأة المشعة (التي تتألف من طحالب ونواتج التآكل والمواد التي تهبُّ مع الرياح) من حوض خزن الوقود في مفاعل بايل Pile التابع لشركة سيلافيلد قد تمَّ تثبيته بالإسمنت في محطة التغليف في الموقع، وبأن النفايات المغطاة باتت جاهزة للتخلُّص طويل الأجل. وأشارت شركة سيلافيلد المحدودة إلى أن مشروع إزالة الحمأة المشعة يتمُّ تنفيذه قبل عشرة أعوام من الموعد المقرر وبنصف التكلفة المتوقعة البالغة ٢٠٠ مليون جنيه إسترليني (٢٤٩ مليون دولار أمريكي).

٧٩- وثمّة ضاغطة فائقة فريدة قادرة على ممارسة ضغط قدره ١٨٠٠ طن لضغط أسطوانات معبأة بالنفايات سعة ٢٠٠ لتر تعمل في موقع أيداهو التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة منذ أكثر من ١٠٠٠٠٠ ساعة. وضغطت هذه الضاغطة أكثر من ٢٣٨٠٠٠ أسطوانة من حطام النفايات خلال ١٤ عاماً الماضية، ما أزال الحاجة إلى قرابة ٦٠٠٠ شحنة شاحنة تقريباً كانت ستلزم لنقل قرابة ٤٣٠٠٠ متر مكعب من النفايات إلى المحطة التجريبية لعزل النفايات (WIPP).

٨٠- ونجحت شركة ماغنوكس المحدودة Magnox Ltd وشركات تابعة لها في إزالة حطام عناصر الوقود البالغ وزنه ٦٥ طناً في محطة برادويل Bradwell للقوى النووية في المملكة المتحدة، باستخدام تقنيات معالجة ابتكارية. وتم التخلُّص من النفايات الصلبة، بعد إعادة تصنيفها، في مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع.

٨١- وتم بنجاح تركيب المصهر الأول وزن ٣٠٠ طن، من بين مصهَرَيْن مقرَّرين، في مرفق معالجة النفايات الضعيفة الإشعاع في هانفورد Hanford في الولايات المتحدة الأمريكية. وطوَّر المختبر الوطني لمنطقة شمال غرب المحيط الهادئ خوارزميةً حسابية للنفايات العالية الإشعاع لهذا المصهر من أجل بلوغ المستوى الأمثل للنفايات والإضافات لكل دفعة نفايات قوية الإشعاع سيتم تزجيجها.

٨٢- وأعلن باحثون في مركز بهابها للبحوث الذرية عن تصنيع "أقلام" مزجَّجة سيزيوم-١٣٧ مستخلصة من نفايات مشعة. ويمكن أن يحلّ هذا المصدر المختوم الذي يبلغ عمره النصفي ٣٠ عاماً محلّ مصادر كوبالت-٦٠ (ذات العمر النصفي الأقصر البالغ ٥,٣ سنة) والمستخدمة حالياً في تشعيع الأغذية، والتشعيع الداخلي، وتعقيم المعدات الطبية.

٨٣- واجتاز مرفق معالجة قادر على التعامل مع ١٠٠٠٠ متر مكعب من النفايات المشعة الصلبة في خليج سايدا Sayda Bay في شمال روسيا تقييمَ الأثر البيئي الذي تجريه الحكومة، وسيتولى هذا المرفق تكييف والتصرف في هذا النوع من النفايات المشعة تحت رعاية SevRAO التي تتولى النفايات النووية في شمال غرب روسيا.

٨٤- ووافقت هيئة التفتيش الاتحادية المعنية بالأمان النووي في سويسرا على إنشاء مرفق خزن مؤقت للنفايات النووية الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في "معهد بول شيرر". ومن المزمع أن يخزن مبنى Stapelplatz Ost المزمع في فيرينلنغن Würenlingen النفايات الناجمة عن تطبيقات النظائر المشعة في الطب والصناعة إلى حين توافُر مستودع جيولوجي عميق.

٨٥- وطوَّر باحثون من شركة القوى النووية العامة الصينية وجامعة شينغوا معاً نظام تشعيع بالحُزم الإلكترونية لمعالجة مياه الصرف الصناعية. إذ يمكن بتشعيع الدوافق باستخدام الحُزم الإلكترونية تفتيت أكثر من ٧٠ مادة كيميائية مركَّبة وتحويلها إلى جزيئات أصغر حجماً تمكن معالجها وإزالتها باستخدام عمليات بيولوجية طبيعية.

التخلص من النفايات المشعّة

٨٦- توجد قيد التشغيل في أنحاء العالم مرافق للتخلُّص من جميع فئات النفايات المشعّة، باستثناء النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلَك المعلَن عنه كنفايات. وتشمل هذه المرافق التخلُّص في خنادق من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً (على سبيل المثال في إسبانيا والسويد وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ أو التخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مناطق قاحلة (على سبيل المثال في جنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصمَّمة هندسياً بالقرب من سطح الأرض للتخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في إسبانيا وبولندا والجمهورية التشيكية وسلوفاكيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند وهنغاريا واليابان)؛ والمرافق المصمَّمة هندسياً للتخلُّص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي اختيرَت مواقعها في تكويناتٍ جيولوجية على مدىً من الأعماق (على سبيل المثال في ألمانيا والجمهورية التشيكية والجمهورية الكورية وفنلندا والنرويج وهنغاريا والولايات المتحدة الأمريكية). وهناك في مراحل مختلفة من الترخيص أو التشييد مرافق للتخلُّص من النفايات الضعيفة أو المتوسطة الإشعاع، كما هو الحال في ألمانيا وبلجيكا وبلغاريا وجمهورية إيران الإسلامية ورومانيا وسلوفاكيا وكندا وليتوانيا. وتتفاوت خيارات التخلُّص من النفايات الناشئة عن المواد المشعّة الطبيعية المنشأ تبعاً للوائح التنظيمية الوطنية.

٨٧- وفي عام ٢٠١٧ حقَّق برنامج كندا للتخلُّص من الوقود المستهلَك تقدُّماً نحو تحديد موقع مرفق للتخلُّص الجيولوجي العميق، وتواصلت المشاركة في العملية القائمة لاختيار سبعة مواقع من أصل ٢٢ مجتمعاً مهتماً. وفيما يتعلق بطلب ترخيص مرفق للتخلُّص الجيولوجي من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في موقع كينكاردين Kincardine، طلب وزير البيئة وتغيُّر المناخ معلوماتٍ إضافيةً عن بيان الأثر البيئي المقدَّم من شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء (Ontario Power Generation) لتتمكن الوكالة الكندية للتقييم البيئي من إجراء مزيد من الاستعراض له.

٨٨- ويتواصل في الصين برنامج التخلُّص الجيولوجي الخاص بالرصيد المستقبلي من النفايات المزجَّجة قوية الإشعاع، بما في ذلك الاستقصاءات الموقعية للتكوينات البلُّورية والتكوينات الرسوبية على السواء. وتنظر الصين حالياً في خطط لتشييد مرفق بحثي مقام تحت الأرض في تكوينات الصخور البلورية في منطقة بيشان Beishan، وإجراء المزيد من الدراسات الاستقصائية الموقعية السطحية لتكوينات رسوبية داخلية في منغوليا.

٨٩- وبتشييد أول مرفق في العالم للتخلُّص الجيولوجي العميق من الوقود النووي المستهلَك في أولكيليوتو Olkiluoto، تفحَّصت شركة بوسيفا Posiva الفنلندية التطورات التكنولوجية والتشغيلية، مثل اختبارات النُّظم على

نطاق كامل في الموقع والمزيد من اختبارات التشييد والتشغيل، وذلك للتحضير لمرحلة الإدخال في الخدمة، بالتشغيل الساخن والتشغيل البارد، بُغية الحصول على الرخصة التشغيلية.

٩٠- وواصلت أندرا Andra، المنظمة الفرنسية المعنية بالتصرُّف في النفايات المشعة، تنفيذ تطويرات تكنولوجية مع أنشطة إيضاح في الموقع وتجارب علمية، بما يضمن أن يستند طلبها للحصول على رخصة لمرفق التخلُّص الجيولوجي العميق المزمَع إلى أُسس علمية وتقنية متينة.

٩١- وفي آذار/مارس ٢٠١٧، عدَّل البرلمان الألماني القانون المتعلق بالتخلص الجيولوجي من النفايات، بناءً على توصيات من قبل لجنته المعنية بتخزين النفايات القوية الإشعاع، والذي يشمل استناد قرارات تحديد المواقع إلى معايير الأمان ذات الصلة وإتاحة المشاركة الشاملة لأصحاب المصلحة. وفي عام ٢٠١٧ أيضاً، وبموجب القانون المتعلق بالالتزامات النووية للمرحلة الختامية، حوَّل مشغلو محطات القوى النووية مبلغ ٢٤,١ مليار يورو إلى الصندوق الوطني لتمويل التخلُّص من النفايات النووية، وبالتالي نقلوا المسؤولية الكاملة عن تخزين النفايات النووية والتخلص منها إلى الدولة. ويظلُّ المشغلون مسؤولين عن أنشطة الإخراج من الخدمة، ومعالجة النفايات والتهيئة.

٩٢- وفي تموز/يوليه ٢٠١٧، نشرت وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة اليابانية خريطة كاملة للبلاد تبيّن السمات العلمية ذات الصلة بالتخلُّص الجيولوجي كخطوة أولى نحو التخلُّص النهائي.

٩٣- وفي الاتحاد الروسي بدأ المشغّل الوطني للتصرُّف في النفايات المشعّة (NO RAO) تشغيلَ أول مرفق للتخلُّص من النفايات منخفضة الإشعاع بالقرب من سطح الأرض في نوفورالسك Novouralsk في إقليم سفيردلوفسكSverdlovsk. وهو الأول من عدة مرافق مماثلة يُعتزم إنشاؤها لمعالجة التركة الوطنية من النفايات المشعة.

٩٤- وتمَّ في تشرين الأول/أكتوبر في المحكمة السويدية للأراضي والبيئة إبرامُ الرخصة البيئية لطلب رخصة بناء تقدَّمت به الشركة السويدية للتصرُّف في الوقود النووي والنفايات النووية (SKB) لمرفق التخلُّص الجيولوجي من الوقود المستهلَك، وستقوم المحكمة بدورها بتقديم استنتاجاتها إلى الحكومة. وأكدت مجدداً بلدية أوسكارشامن Oskarshamn وهيئة الأمان الإشعاعي السويدية وغيرها من الهيئات أنها تؤيد أن يُجاز ذلك بموجب قانون البيئة، في حين ستقدّم بلدية أوستهامار Östhammar إجابة نهائية بعد إجراء استفتاء.

٩٥- وقدَّمت المنظمة السويسرية للتصرُّف في النفايات المشعة، ناغرا Nagra، طلبات لإجراء مزيد من الاستقصاء بشأن الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية للتراكيب الصخرية الواقعة تحت الأرض في منطقة تحديد المواقع نوردليش لاغرن Nördlich Lägern من برنامج المستودعات الجيولوجية.

٩٦- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تقدَّمت عملية التعافي بعد الحوادث في مرفق التخلُّص الجيولوجي للمحطة التجريبية لعزل النفايات فيما يخص النفايات النووية الضعيفة والمتوسطة الإشعاع لما بعد اليورانيوم على نحوٍ كافٍ يسمح ببدء العمليات التشغيلية مجدداً في نيسان/أبريل ٢٠١٧، وإن كان ذلك بمعدّل تمركز مخفَّض مقارنة بما كان عليه الحال قبل حادث عام ٢٠١٤.

باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان

باء-١- الانشطار المتقدم

٩٧- تمثّل القوى النووية تكنولوجيا ناضجة ومجرَّبة تساعد في تحسين أمن الطاقة، وتقلِّل من أثر أسعار الوقود الأحفوري المتقلبة، وتزيد من قدرة الاقتصادات على المنافسة، وتتسبب بكمية أقلّ بكثير من انبعاثات غازات الدفيئة وغيرها من الملوّثات مقارنة بالوقود الأحفوري. وكما هو الحال في أيِّ قطاع صناعي آخر، فإن البحث والتطوير والابتكار المستمر للتكنولوجيات[٣] ضروريان للحفاظ على قدرة القوى النووية على المنافسة، وجعلها خياراً جذاباً حتى في بيئة الأعمال المتغيرة، بما في ذلك البلدان المستجدَّة.

باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء

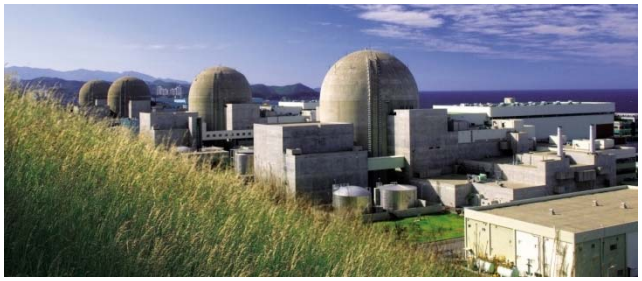
٩٨- تضطلع المفاعلات المبرَّدة بالماء بدور رئيسي في الصناعة النووية، مع إنجاز أكثر من ١٧٠٠٠ سنة تشغيلية تجارية للمفاعلات. فأكثر من ٩٥٪ من مفاعلات القوى المدنية العاملة في العالم و٥٦ من أصل ٥٨ مفاعلاً قيد التشييد حالياً يتمُّ تبريدها بالماء الخفيف أو الثقيل. وفي عام ٢٠١٧ تمَّ وصل ثلاثة مفاعلات جديدة مبرَّدة بالماء بشبكة الكهرباء في الصين وباكستان، وبدأت أعمال تشييد وحدتين جديدتين في جمهوريا كوريا والهند (الشكل باء-١). وتختار أغلب البلدان المستجدَّة المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء كأول مفاعلات لديها، كما هو الحال في الإمارات العربية المتحدة وبيلاروس وركَّز مؤتمر الوكالة الدولي السادس المعني بالمسائل المواضيعية في مجال أمان المنشآت النووية، الذي عُقد في حزيران/يونيه ٢٠١٧، على إيضاح أمان محطات القوى النووية المتقدِّمة المبرَّدة بالماء، بما في ذلك المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية.

٩٩- وتتسم معظم المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء بمخرجات قوى متزايدة. وتتراوح مخرجات المفاعلات التي شُيِّدت مؤخراً بين ١٠٠٠-١٧٠٠ ميغاواط للوحدة الواحدة، ومن المزمع زيادة هذه المخرجات أكثر في التصاميم التطوُّرية لهذه المفاعلات. وهناك اتجاه واضح نحو المواقع متعدِّدة الوحدات التي يوجد بها نوع واحد أو أنواع متعددة من المفاعلات، في إطار تفضيل وفورات الحجم. ويتمُّ التفكير في الطرازات المتقدِّمة من المفاعلات المبرَّدة بالماء القائمة ودراستها وتنفيذها في عدة بلدان من أجل النشر التدريجي لدورات الوقود الأكثر فعاليةً، المغلقة جزئياً أو كلياً. ويحرز الهند تقدُّماً في استراتيجيته ثلاثية المراحل نحو طاقة نووية قائمة على الثوريوم، بالاقتران بمفاعلات الماء الثقيل، والمفاعلات السريعة، ومفاعلات الماء الثقيل المتقدِّمة مع دورة وقود الثوريوم/اليورانيوم-٢٣٣. وزوَّدت الصين مفاعلاً عاملاً من نوع كاندو CANDU بالوقود بشكل كامل من خلال توليفة مكافئ اليورانيوم الطبيعي من الوقود المستهلَك لمفاعلات الماء الخفيف ومخلَّفات اليورانيوم المستنفَد.

١٠٠- وتجري عدة دول أعضاء أنشطة بحث وتطوير بشأن المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج. وقد استُكملت التصاميم المفاهيمية الخاصة بالمفاعل الكندي المبرَّد بالماء فوق الحرج، وهو مفهوم خاص بمفاعل مهدَّأ بالماء الثقيل ومزوَّد بأنابيب ضغط، مثلما استُكملت التصاميم المفاهيمية الخاصة بالمفاعل الصيني المبرَّد بالماء فوق الحرج (CSR1000). وأُعِدَّ في أوروبا تصميمُ مفاعل ماء خفيف أوروبي عالي الأداء، وتمَّ التخطيط لمرفق اختبار تأهيل الوقود التراكمي وتصميمه وتحليله بالتعاون مع الصين. وتجري في الاتحاد الروسي دراسات مفاهيمية بشأن مفاعل قوى مبتكر مبرَّد ومهدَّأ بالماء يتسم ببارامترات فوق حرجية لمبرِّد الماء، بما في ذلك إمكانية أن يكون قلب المفاعل طيفياً سريعاً .

---

[٣] لمعرفة المزيد انظر نظام الوكالة للمعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدمة: https://aris.iaea.org



الشكل- باء-١ . تتألف محطة القوى النووية (Hanul عُرفت سابقاً باسم Ulchin)، جمهورية كوريا، من ست وحدات قيد التشغيل، فيما يتم تشييد وحدتين جديدتين. (الصورة من: شركة كوريا للهيدرولوجيا والقوى النووية KHNP)

باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة

١٠١- منذ عام ١٩٦٠ كان هناك سعي إلى وضع برامج كبيرة للمفاعلات السريعة في كل أنحاء العالم. وخلصُ المؤتمر الدولي بشأن المفاعلات السريعة ودورات الوقود المتصلة بها: النُّظم النووية من الجيل التالي من أجل تنمية مستدامة، الذي عُقد في حزيران/يونيه ٢٠١٧ في يِيكاترينبرغ، الاتحاد الروسي، إلى أن دورة الوقود النووي المغلقة القائمة على أساس المفاعلات السريعة يمكن أن توفِّر طاقة كفؤة ومأمونة ومستدامة ونظيفة لأجيال عدّة، لاسيما من حيث صَوْن الموارد والتصرُّف في النفايات النووية القوية الإشعاع والمعمّرة. ويجري على المستويين الوطني والدولي تطويرُ العديد من المفاعلات السريعة الابتكارية المبرَّدة بالصوديوم، والمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص وخليط الرصاص والبزموث المنصهرين، والمفاعلات السريعة المبرَّدة بالغاز. وهناك أيضاً قيد التطوير المفاعلات السريعة المبرَّدة بالأملاح المصهورة كخيار طويل الأجل.

١٠٢- وتتسم تكنولوجيا المفاعلات السريعة الأكثر تطوراً، أي تكنولوجيا المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم، بخبرات تمتدُّ لأكثر من ٤٢٠ سنة في مجال المفاعلات اكتُسبت من خلال تصميم وتشييد وتشغيل وحدات تجريبية ونموذجية وتوضيحية وتجارية في العديد من البلدان، بما في ذلك الاتحاد الروسي وألمانيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان.

١٠٣- ودخل المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم BN-800 في روسيا مرحلة التشغيل التجاري في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦ (الشكل باء-٢). وجارٍ حالياً تشييدُ المفاعل البحثي السريع المبرَّد بالصوديوم المتعدد الأغراض، أي مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض والذي سيحلُّ محلَّ المفاعل التجريبي BOR-60 في عام ٢٠٢٠؛ وأُنتج وعاء المفاعل في عام ٢٠١٧. وفيما يتعلق بتكنولوجيا الفلز السائل الثقيل، فإنَّ المفاعل BREST-OD-300 المبرَّد بالرصاص قيد إجراءات الترخيص.

الشكل- باء-٢- بدأ المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم BN-800 مرحلة التشغيل التجاري في ٣١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦ . (الصور من: هيئة روزاينيرغوأتوم "ROSENERGOATOM")

١٠٤- وفي الهند استُكمل بناء المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط (كهربائي)، ومن المتوقع تحقيق أول مستوى حرجيّة في عام ٢٠١٨. ومن المزمع تشييد مفاعِلَيْن آخرين من فئة المفاعلات النموذجية السريعة التوليد في الموقع نفسه.

١٠٥- وفي عام ٢٠١٧ اختيرَ المفاعل الصيني الذي يعمل بالرصاص CLEAR-I، وهو في طور التصاميم الهندسية، ليكون المرجع في تطوير النظم العاملة بواسطة المعجِّلات والمفاعلات السريعة. وبلغ المفاعل الابتكاري CFR-600 مرحلة التصاميم الهندسية ومن المزمع بدء تشغيله في عام ٢٠٢٥.

١٠٦- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦، قرَّرت حكومة اليابان إخراج نموذج المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم المعروف باسم Monju من الخدمة، وقد كان في مرحلة الإغلاق الطويل الأجل. وسيتواصَل تطوير المفاعل الياباني السريع المبرَّد بالصوديوم JSFR، حيث يُنظر إلى تكنولوجيا المفاعلات السريعة كمسألة حيوية لمستقبل مزيج الطاقة في اليابان.

١٠٧- وفي أوروبا، فوَّضت الحكومة الفرنسية أن تمضي قُدُماً حتى نهاية عام ٢٠١٩ مرحلة التصاميم الأساسية للمفاعل ASTRID كنموذج صناعي للمفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم. وفي بلجيكا، يُنظر حالياً في تشييد المفاعل MYRRHA، وهو مفاعل مبرَّد بالرصاص-البزموث يمكنه أن يشتغل في وضعية تحت حرجة ووضعية حرجة كنظام قائم على المعجِّلات؛ وتهدف بلجيكا إلى توفير أول مرفق للبحث والتطوير بحلول نهاية ٢٠٢٤. ويخضع مفاعل الرصاص المتقدِّم السويدي (SEALER) لمرحلة ما قبل الترخيص من قبل هيئة الأمان النووي الكندية. والهدف المنشود هو بدء إنشاء مفاعل "البطارية" المذكور بقدرة ٣-١٠ ميغاواط (كهربائي)، والمصمَّم لإنتاج الكهرباء تجارياً في المجتمعات القطبية الشمالية وعمليات التعدين، بحلول نهاية عام ٢٠٢١، وإدخال وحدة الإيضاح مرحلة التشغيل في عام ٢٠٢٥. ومن المفاهيم الأخرى قيد التطوير ALFRED، وهو نموذج الإيضاح الأوروبي للمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص من الجيل الرابع، وأيضاً ALLERGO، وهو نسخة تجريبية من المفاعلات السريعة المبرَّدة بالغاز.

١٠٨- وفي الولايات المتحدة الأمريكية أكملت شركة تصميم المفاعلات النووية "تيرا باور" TerraPower تصاميم قلب المفاعل المفاهيمية لمفاعلات الموجات المتنقلة وفق مفهوم "توليد-حرق" وتعكف على تطوير مفاعل الأملاح المصهورة. وتعكف شركة ويستينغهاوس على تطوير مفاعل نمطي صغير ابتكاري مبرَّد بالرياص بقدرة ٤٥٠ ميغاواط (كهربائي).

باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز

١٠٩- تواصِل المملكة المتحدة تشغيل ١٤ مفاعلاً متقدِّماً مبرَّداً بالغاز تشغيلاً تجارياً، وتقوم بإجراء دراسات تمديد عُمر تلك المفاعلات. وتقوم عدّة دول أعضاء بتطوير المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز الصغيرة النمطية والتي تتسم في جوهرها بسمات الأمان بما يزيل الحاجة إلى معظم نُظم الأمان المطورة هندسياً النشطة. ومن شأن المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز أن تزيد الكفاءة وأن تخدم سوق الحرارة المعالجة فهي تتسم بوقود الجسيمات المغلَّفة وتستخدم الهيليوم كمبرِّد وتشتغل عند درجات حرارة عالية (≤ ٧٠٠ درجة مئوية).

١١٠- وفي الصين اكتمل إنشاء المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع (HTR–PM). ومن المتوقع أن تدخل محطة القوى النووية الإيضاحية الصناعية بقدرة ٢٠٠ ميغاواط (كهربائي)، مع مفاعلين بقدرة ٢٥٠ ميغاواط (حراري)، مرحلة التشغيل في عام ٢٠١٨. وتمَّ بالفعل تركيب أوعية ضغط المفاعل، كما تم تحميل المكوِّنات الداخلية لقلب المفاعل والأجسام الكروية من الغرافيت (وهي جزء من بدء التشغيل) إلى إحدى الوحدتين المذكورتين. ويتم حالياً تصميم محطة تجارية بقدرة ٦٠٠ ميغاواط (كهربائي)، مع إجراء دراسات جدوى لخمسة مواقع محتملة. وقد بدأت محطة تصنيع الوقود الحصوية في باوتو Baotou الإنتاج على النطاق التجاري في عام ٢٠١٦.

١١١- وحدَّدت المملكة العربية السعودية عمليات النشر المستقبلية للمفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز ضمن المشروع الوطني للطاقة الذرية. وتم توقيع مذكرة تفاهم مع الصين لإنشاء شراكة استراتيجية طويلة الأجل لتوطين التكنولوجيا وامتلاكها. وتمَّ في عام ٢٠١٧ استكمال دراسة جدوى مشتركة تشمل التطبيقات الصناعية لحرارة المعالجة في صناعة البتروكيماويات.

١١٢- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٧، قَبِل وزير الطاقة في بولندا تقريرَ لجنة استشارية دعا إلى نشر المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز، والتي ستعوِّض عن أكثر من ٦٥٠٠ ميغاواط من الحرارة الصناعية التي توفرها حالياً مصادر هيدروكربونية. وتشمل الخطة استضافة المفاعل التجريبي الأوروبي مرتفع الحرارة بقدرة ~١٠ ميغاواط (حراري) لتيسير التكنولوجيا الجديدة وتطوير الموارد البشرية.

١١٣- وبعد أن حصلت الوكالة الوطنية للطاقة النووية في إندونيسيا على رخصة موقع أولية لإنشاء مفاعل القوى التجريبي الحصوي القاع بقدرة ١٠ ميغاواط (حراري) فإنها تسعى الآن للحصول على تمويل لأعمال إنشاء المفاعل.

١١٤- وفي اليابان تُنتظر الآن نتائج الاستعراض الرقابي لاستئناف مفاعل الاختبارات الهندسي المرتفع الحرارة (HTTR) بقدرة ٣٠ ميغاواط (حراري) قبل أن يكون بالإمكان إجراء أي اختبارات إيضاحية للأمان والتكنولوجيا.

١١٥- وتركّز الأنشطة في الولايات المتحدة على تأهيل وقود الجسيمات المغلَّفة النظيري الثلاثي الهيكل لنشره في المستقبل. وقد أُحرز تقدُّم في إنشاء إطار ترخيص جديد للمفاعلات المتقدِّمة، وعلى وجه التحديد المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز.

١١٦- وتتواصل الأنشطة المتعلقة بالمفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز في المفوضية الأوروبية من خلال برنامج +GEMINI، وفي جنوب أفريقيا من خلال أنشطة البحث والتطوير على مفهوم القاع الحصوي

لمفاعل جديد متقدّم من فئة المفاعلات المرتفعة الحرارة، وفي الاتحاد الروسي وجمهورية كوريا لتطوير تكنولوجيات رئيسية والحفاظ عليها. وتتناول ثلاثة مشاريع بحثية منسَّقة للوكالة عدم يقين التحليلات، وتطوير معايير تصاميم الأمان، وتطبيق الحرارة الناجمة عن المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّة بالغاز من أجل الاستخلاص النظيف للمعادن وعلى نحو أكثر استدامة.

باء-١-٤- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية

١١٧- ثمة عدة دول أعضاء تُبدي اهتماماً بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو المفاعلات النمطية (المفاعلات الصغيرة والمتوسطة أو النمطية). ويمكن تصنيع أجزاء ونُظم هذا الجيل الأحدث من المفاعلات بقدرة تصل إلى ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي) في مصنع ومن ثم تركيبها في المواقع كوحداتٍ نمطية. ومن المتصوَّر أن تُوجَّه المفاعلات الصغيرة والمتوسطة أو النمطية إلى أسواق الكهرباء أو أسواق الطاقة المتخصصة حيث لا تكون المفاعلات الكبيرة خياراً مجدياً، ويمكن لهذه المفاعلات أن تلبّي الحاجة إلى المرونة في توليد الطاقة لنطاق عريض من المستخدمين والتطبيقات، بما في ذلك الاستعاضة عن محطات القوى المتقادمة التي تعمل بالوقود الأحفوري، وتوفير الطاقة للبلدان التي تملك شبكات كهرباء صغيرة، وتمكين النُّظم الهجينة للطاقة النووية والطاقة المتجدِّدة. ويمكن أن تكون المفاعلات الصغيرة والمتوسطة أو النمطية أنسبَ للاستخدام الجزئي أو المكرَّس في التطبيقات غير الكهربائية، مثل الحرارة للعمليات الصناعية، وإنتاج الهيدروجين، وتحلية مياه البحر. ورغم أن المفاعلات الصغيرة والمتوسطة أو النمطية مبشّرة من حيث مزايا الأمان المعزَّزة والتكلفة الأقلّ، غير أنه لا يزال يتعيَّن إثبات هذه السمات.

١١٨- وجارٍ حالياً تطوير أكثر من ٥٠ تصميماً لمفاعلات صغيرة ومتوسطة أو نمطية لجميع أنواع المفاعلات الرئيسية، وبلغ ثلاثة منها مرحلة متقدِّمة من أعمال التشييد: المفاعل CAREM-25 بقدرة ٢٧ ميغاواط (كهربائي) في الأرجنتين (نموذج من مفاعل الماء المضغوط المدمج CAREM بقدرة تتراوح بين ١٥٠-٣٠٠ ميغاواط (كهربائي)) (الشكل باء-٣)، ومن المزمع بدء الإدخال في الخدمة في عام ٢٠١٩؛ والمفاعل HTR-PM في الصين، والمزمع أن يدخل طور التشغيل في عام ٢٠١٨؛ ومحطة قوى نووية محمولة ومركَّبة على متن السفن في الاتحاد الروسي، مع وحدتَي مفاعل الماء المضغوط KLT-40S بقدرة ٣٥ ميغاواط (كهربائي)، ومن المزمع بدء الإدخال في الخدمة في عام ٢٠١٨.

الشكل- باء-٣ المفاعل CAREM-25 قيد الإنشاء (إلى اليسار)؛ التخطيط النهائي للمحطة (إلى اليمين). (الصور من: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية، الأرجنتين)

١١٩- وقد تلقَّت هيئة الأمان النووي الكندية بالفعل عشرة طلبات لإجراء استعراضات تصاميم البائعين السابقة للترخيص، وأعربت المختبرات النووية الكندية عن اهتمامها بأن تصبح مراكز إيضاح للمفاعلات الصغيرة

والمتوسطة أو النمطية. ويشمل تقرير الاستراتيجية طويلة الأجل المنشور في عام ٢٠١٧ هدفَ تحديد موقع لمفاعل من فئة المفاعلات الصغيرة والمتوسطة أو النمطية في "تشوك ريفر" بحلول عام ٢٠٢٦.

١٢٠- ومن المزمع بدء تشييد أول محطة إيضاحية صناعية مع وحدتَي المفاعل ACP100 من الشركة الوطنية النووية الصينية في عام ٢٠١٨ في موقع محطة القوى النووية تشانغ جيانغ Changjiang في هاينان Hainan. وقد بدأت المجموعة الصينية العامة للقوى النووية في تصنيع النُّظم والمكونات للمفاعل ACPR50S، وهو مفاعل بحري طافٍ؛ ومن المتوقع وصل المفاعل بشبكة الكهرباء في عام ٢٠٢٢. وأكمل معهد شنغهاي لبحوث وتصميمات الهندسة النووية مرحلة التصاميم المفاهيمية للمفاعِلَيْن CAP150 CAP200.

١٢١- وفي فرنسا، يعكف اتحادٌ تقوده هيئة كهرباء فرنسا ويضمُّ المفوضية الفرنسية للطاقات البديلة والطاقة الذرية (CEA) والمجموعة الصناعية Naval Group وشركة تكنيكاتوم TechnicAtome على تطوير مفاعل نمطي صغير بري من نوع مفاعلات الماء المضغوط المدمجة بقدرة ١٥٠-١٧٠ ميغاواط (كهربائي). كذلك واصلت مجموعة Naval Group عملها على تطوير المفاعل Flexblue، وهو مفاعل ماء مضغوط مغمور قابل للنقل بقدرة ١٦٠ ميغاواط (كهربائي).

١٢٢- وحصلت مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة على الملكية المشتركة لتصميم المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النُّظم (المفاعل SMART) بقدرة ١٠٠ ميغاواط (كهربائي) الذي طوره المعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية، بعد اتفاق أُبرم في عام ٢٠١٥ لنشر وحدَتَين في المملكة العربية السعودية. وتجري هيئة الطاقة الذرية الأردنية دراسة جدوى لتشييد وحدَتَين قائمتين على المفاعل SMART لإنتاج الكهرباء وتحلية المياه، وذلك في شراكة مع مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة والمعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية.

١٢٣- وطوَّر الاتحاد الروسي المفاعل RITM-200 بقدرة ٥٠ ميغاواط (كهربائي)، وهو مفاعل مدمج لكاسحات الجليد النووية، ومن المتوقع أن يدخل الخدمة في عام ٢٠٢٠. ومن أجل اتباع نهج سمات المفاعلات السريعة الابتكارية، تم تطوير مفاعل سريع مُبرَّد المبرَّدة بالرصاص وخليط الرصاص والبزموث المنصهرين ومتعدِّد الأغراض بقدرة ١٠٠ ميغاواط (كهربائي)، وهو المفاعل SVBR-100. وقد استُخدمت هذه التكنولوجيا من قبل في العديد من الغواصات النووية الروسية. وتعمل الجهة المصمِّمة على محطة تجريبية على أن يبدأ الإنتاج المتسلسل بحلول العام ٢٠٣٠.

١٢٤- وأطلقت حكومة المملكة المتحدة مسابقة في آذار/مارس ٢٠١٦ لإثراء استكشاف إمكانات المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية في دراسات مثل التقييمات التقنية الاقتصادية، ولإتاحة الفرصة للصناعة للتحاور مع الحكومة بشأن العوامل المحرِّكة والممكِّنة لنشر المفاعلات. وتعكف شركة رولز رويس على تطوير المفاعل UK SMR، وهو مفاعل ماء مضغوط من نوع المفاعلات الحلقية بقدرة ٤٥٠ ميغاواط (كهربائي) مع وحدات معيارية قابلة للنقل.

١٢٥- وفي آذار/مارس ٢٠١٧ قبلت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة لأغراض الإدراج والاستعراض طلب التصديق على تصميم المفاعل NuScale، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل يتألف من ١٢ وحدة، كلّ منها بقدرة ٥٠ ميغاواط (كهربائي). وتعتزم شركة نوسكيل باور (NuScale Power) التشغيل التجاري لأول محطة لها في أيداهو بحلول العام ٢٠٢٦، وأطلقت خطة للنشر في الأمد القريب في المملكة المتحدة. ويقدِّم برنامج "معبر نحو تسريع الابتكارات في الصناعة النووية" (GAIN) المنبثق عن مكتب الطاقة النووية في

وزارة الطاقة الأميركية الدَّعم لتطوير المفاعل SMR-160، وهو مفاعل ماء مضغوط مدمج آخر طوَّرته شركة هولتك انترناشونال Holtec International.

١٢٦- ومن المفاعلات الجديدة التي دخلت الأسواق المفاعلات المتقدِّمة العاملة بوقود الملح المصهور والمبرَّدة به. وتشمل الفوائد المحتملة العديدة لهذه المفاعلات درجات الحرارة التشغيلية العالية، وهو ما يزيد الكفاءة، إلى جانب ضغط المبرِّدات المنخفض، وانخفاض كمية النفايات القوية الإشعاع وعمرها، وسمات الأمان المذهلة، والتغلُّب على التحديات المتصلة بتأثيرات الحرق بمعدَّلات مرتفعة للوقود الصلب ودورات الوقود المرنة (يورانيوم وبلوتونيوم وثوريوم). ومن بين التصاميم المفاهيمية المتعددة المفاعل IMSR400، وهو من فئة المفاعلات السريعة المدمجة المبرَّدة بالأملاح المصهورة والذي تعكف على تطويره شركة Terrestrial Energy Canada وتبلغ قدرته نحو ١٩٠ ميغاواط (كهربائي).

١٢٧- ولابدّ من التغلُّب على تحديات معينة إذا ما أردنا نشر المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية بالسرعة اللازمة. إذ لابدّ من توافُر إطار رقابي مُحكم من أجل الاستعراضات الرقابية للمسائل المؤسسية. وتشمل التحديات التقنية تعيين الموظفين اللازمين لغرفة التحكم والهندسة المراعِية للعوامل البشرية لمحطات الوحدات النمطية المتعددة للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، وتحديد حجم منطقة تطبيق خطة الطوارئ، ووضع مدوّنات ومعايير جديدة وبناء شبكة إمداد تتسم بالمرونة الكافية. وعلاوة على ذلك، ورغم أن المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية تتطلب استثماراً رأسمالياً أولياً أقلّ للوحدة الواحدة فإنه من المرجَّح أن تكون تكلفة توليدها للكهرباء أكبر من المفاعلات الكبيرة.

باء-١-٥- المبادرات الدولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية

١٢٨- أُطلقت طيلة العقود القليلة الماضية عدّة مبادرات دولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية من أجل المساعدة على إيجاد حلول لقضايا مثل الطلب المتزايد على الطاقة، وتوافُر موارد وقود اليورانيوم، وإعادة تدوير الوقود النووي المستهلَك بُغية تقليص الأعباء المستقبلية على المستودعات الجيولوجية، وتحسين الكفاءة الحرارية، وتعزيز الأمان من خلال التصاميم ومقاومة الانتشار.

١٢٩- ويجمع المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي الابتكارية (مشروع إنبرو) الذي وُضع في الوكالة في عام ٢٠٠٠، مُطوّري التكنولوجيات ومورِّديها وزبائنها للنظر في الإجراءات الدولية والوطنية الهادفة إلى تحقيق الابتكارات المرجوَّة فيما يتعلَّق بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي لأغراض استدامة القوى النووية في الأجل الطويل. ويضمُّ مشروع إنبرو حالياً ٤٢ عضواً، هي ٤١ دولة عضواً في الوكالة إلى جانب المفوضية الأوروبية.

١٣٠- ونُشر في عام ٢٠١٦ دليلٌ محدَّث خاص بهذا المشروع بشأن تقييم استدامة عوامل الإجهاد البيئية. وتُجرى حالياً تقييماتٌ لنُظم الطاقة النووية، استناداً إلى منهجية مشروع إنبرو، في أوكرانيا ورومانيا، فيما تُجري الصين والهند والاتحاد الروسي حالياً تقييماتٍ محدودة النطاق لأحدث ما لديها من تصاميم المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم. وفي عام ٢٠١٧، وافقت اللجنة التوجيهية لمشروع إنبرو على تطوير خدمة جديدة لفائدة الدول الأعضاء استناداً إلى الأدوات الخاصة بنمذجة سيناريوهات نُظم الطاقة النووية وتحليلها ورسم خريطة طريق لها والتي طُوِّرت خلال السنوات القليلة الماضية في إطار مشروع إنبرو. وستكون هذه الخدمة متمِّمةً لخدمة تقييم نُظم الطاقة النووية القائمة.

١٣١- وفي عام ٢٠١٧، انضمَّت أستراليا إلى المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات وهو مسعى تعاوني دولي الهدف منه دراسة جدوى وأداء المفاعلات النووية من الجيل التالي. ويُشارك أعضاء هذا المحفل، وعددهم ١٤ عضواً، في جهود البحث والتطوير التعاونية بشأن واحد أو أكثر من أصل ستة من نُظم الطاقة النووية وهي: المفاعلات السريعة المبرَّدة بالغاز، والمفاعلات الفائقة الحرارة، والمفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج، والمفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم، والمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص، ومفاعلات الأملاح المصهورة. وتُعقدُ اجتماعاتٌ سنوية خاصة بأوجه الترابط بين المحفل المذكور والوكالة تتناول أساليب تقييم مجالات الاقتصاديات ومقاومة الانتشار التي تُمكِّنُ من تبادُل المعلومات بشأن المشاريع الجارية.

١٣٢- وفي عام ٢٠١٦، نشر المحفل المذكور تقريراً بعنوان *المبادئ التوجيهية لتصميم الأمان بشأن نَهْج الأمان وظروف التصميم فيما يتعلّق بالجيل الرابع من نُظُم المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم*، وذلك بُغية تقديم الإرشادات للجهات المطوِّرة والجهات البائعة بشأن تفاعلية قلوب المفاعلات السريعة وبشأن التخلُّص من عوامل فقدان الحرارة. وجاء ذلك في أعقاب نشاط أطلقه المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات في عام ٢٠١١، بالتعاون مع الوكالة، لوضع معايير التصميم المتصلة بالأمان فيما يتعلَّق بالمفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم، وهو ما نُشر في عام ٢٠١٣.

١٣٣- ويجمعُ منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة التابعُ للاتحاد الأوروبي أكثر من ١٠٠ جهة من الجهات المعنية الأوروبية من الأوساط الصناعية وأوساط البحوث والأوساط الأكاديمية والمنظمات الحكومية وغير الحكومية من أجل الترويج لأنشطة البحوث والتطوير والإيضاح المتعلقة بتكنولوجيات الانشطار المتقدِّمة بُغية تحقيق الخطة الأوروبية الاستراتيجية لتكنولوجيا الطاقة. وتتناول المبادرة الصناعية النووية المستدامة الأوروبية، التي أُطلقت في عام ٢٠١٠ في إطار منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة، الحاجة إلى إيضاح تكنولوجيا الجيل الرابع من المفاعلات النيوترونية السريع. وقام منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة، في إطار مخطَّطه الاستراتيجي للبحوث والابتكارات، بتحديد الأولويات فيما يتعلَّق بمختلف نُظم الجيل الثاني واقترحَ وَضْع المشاريع التالية: مشروع المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم ASTRID SFR بصفته حلاً مرجعياً، مع تشييد نموذج في فرنسا حوالي عام ٢٠٢٠؛ ومشروع المفاعل السريع المبرَّد بالرصاص ALFRED LFR، بصفته بديلاً أولاً، مع تشييد مفاعل تجريبي لإيضاح هذه التكنولوجيا في بلد أوروبي آخر يرغب في استضافة هذا البرنامج، بدعم من نظام MYRRHA في بلجيكا؛ ومشروع المحطة الإيضاحية للمفاعلات المبرَّدة بالغاز ALLEGRO GFR، بصفته بديلاً ثانياً، وهو يتطلّب أيضاً تشييد منصة لإيضاح هذه التكنولوجيا في دولة أوروبية.

١٣٤- ومن بين المبادرات الدولية الأخيرة الهادفة لتصميم خرائط طريق نحو مستقبل يقوم على طاقة خالية من الكربون مبادرةُ وكالة الطاقة النووية "الابتكار النووي ٢٠٥٠" (NI2050). ويتمثل الهدف من مبادرة "الابتكار النووي ٢٠٥٠"، التي يشارك فيها عددٌ من البلدان الأعضاء في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي وممثلون عن منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة، والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات، والرابطة النووية العالمية إلى جانب الوكالة، في المساعدة على تحديد الأولويات العالمية لجهود البحث والتطوير في مجال الانشطار النووي، وتعزيز تنفيذها، وتحديد فرص تعزيز التعاون.

باء-١-٦- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

١٣٥- يحظى استخدام الطاقة النووية لأغراض التطبيقات غير الكهربائية، الذي يعرف أيضاً باسم التوليد المشترَك للطاقة النووية، باهتمام متنامٍ. ويمكن استخدام التوليد المشترَك في تحلية مياه البحر، وإنتاج

الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية، واستخلاص النفط الثالثي وغير ذلك من التطبيقات الصناعية، كما يمكن استخدامه لضمان أمن الطاقة، والاستدامة، ومكافحة تغيُّر المناخ. ومن شأن التوليد المشترَك أن يزيد من إجمالي الكفاءة الحرارية لمحطة القوى النووية بأكثر من ٣٠٪ عبر إعادة استخدام الحرارة المبدَّدة، ومن شأنه أيضاً أن يقلِّص من الآثار البيئية للتدفئة والنقل بنسبة تصل إلى ٣٥٪ إذا ما اخترق تلك الأسواق.

١٣٦- وتشير الدراسات الحديثة إلى أن التوليد المشترَك باستخدام الحرارة المبدَّدة يمكن أن يعوّض جزءاً كبيراً من تكاليف توليد القوى النووية. فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام الحرارة المبدَّدة التي تطردها المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز في تحلية مياه البحر، وهو ما من شأنه أن يقود إلى استرداد كبير في التكلفة مقارنة بسعر المياه المنتجَة عبر تحلية المياه في محطات القوى العاملة بالغاز أو الزيت.

١٣٧- وبالنظر إلى أوجه التقدُّم الحالية المحرزة في مجال تكنولوجيات تحلية مياه البحر، من قبيل نُظُم التشغيل في درجات حرارة منخفضة، ونُظُم استرداد الحرارة المبدَّدة، ونُظم الطاقة والعمليات المتسمة بالكفاءة، وتحقيق المستوى الأمثل للعمليات الابتكارية، فإنّ التحلية النووية التي تتمُّ من خلال محطات القوى النووية ستكون خياراً مجدياً في المستقبل. ويُنظر إلى التصميم الحراري والغشائي المتكامل والهجين على أنّه التصميم الأمثل فيما يتعلّق باستخدام حرارة الإيقاف التي تنبعث من مكثّفات محطات الطاقة النووية أو في شكل بخار يستخرج عبر عملية منخفضة الجودة خلال المراحل الأخيرة من تشغيل التوربينات ذات الضغط المنخفض ويُلقّم في نظام للترشيح وتحلية المياه متعدّد التأثيرات. ومن شأن ذلك أن يقلّص من استهلاك الطاقة، وحجم مأخذ مياه البحر وتكاليف مخارج التصريف. وأعربت عدّة دول أعضاء، بما في ذلك الصين ومصر والأردن وباكستان والمملكة العربية السعودية، عن اهتمامها بالتحلية النووية أو جدّدت اهتمامها بهذا المجال. وستستخدم تصاميم عدة مفاعلات قيد التطوير مثل تصميم المفاعل المتقدم النموذجي المتكامل النظم (SMART) في جمهورية كوريا الحرارة المبدَّدة لأغراض تحلية مياه البحر.

١٣٨- ومع التقدّم المحرز فيما يتعلّق بتصاميم المفاعلات المرتفعة الحرارة وفي مجال إنتاج الهيدروجين النووي، لا سيما في مجال التحليل الكهربائي للبخار المرتفع الحرارة، يمكن لإنتاج الهيدروجين النووي أن يؤدي دوراً متزايداً في اقتصاد الهيدروجين في المستقبل وأن يساعد على مكافحة تغيُّر المناخ. ومن شأن المفاعلات النووية المنخفضة الحرارة الحالية أن تنتج أيضا الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي المتقدم للمياه في درجات حرارة منخفضة. ويمكن تحسين اقتصاديات هذه العملية عبر استخدام الكهرباء المولّدة خارج ساعات الذروة.

١٣٩- وسواء تعلّق الأمر بتدفئة الأحياء السكنية أو بأغراض أخرى، يمكن لمحطات القوى النووية أن توفر الحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية أو البخار على نحو ملائم وفعال من حيث التكلفة مع إتاحة الخيارات تقنية الحالية فيما يتعلّق بنقل كميات كبيرة من الحرارة (~ الغيغاواط) لمسافات طويلة (~ ١٠٠ كم). ويمكن أن تكون تكلفة الحرارة المقدَّمة إلى الزبائن تنافسية عندما تتجاوز الحرارة المستردّة من محطة القوى النووية القيمة العتبة.

باء-٢- الاندماج

١٤٠- أحرز تقدُّم كبير في مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي حيث أصبحت أعمال التشييد والتركيب في الموقع أكثر وضوحاً (الشكل باء-٤). ويتواصل استلام المكونات الرئيسية، أما المكونات الأخرى فهي قيد التصنيع. وتتعلّق أنشطة الفريق المركزي باستكمال التصميم، وتحقيق التكامل التقني والأمان النووي.

وبموازاة ذلك، ثمّة برامج للبحث والتطوير واسعة النطاق تجريها الأطراف المشاركة في المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي تعمل على دعم استكمال مكونات مواد احتواء البلازما، ونظم التدفئة ونظم الدفع الحالية، وإجراءات التشخيص، ونظم التحكم. وبعد إدخال عدة تنقيحات للجدول الزمني، خلصت الأطراف المشاركة في المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي وسبع من الوكالات المحلية إلى أنه سيتم إنتاج أول بلازما بحلول نهاية عام ٢٠٢٥.

١٤١- وكان ثمة معلم بارز آخر في مجال طاقة الاندماج هو أوّل إنتاج البلازما داخل السِتلّاريتُور المستمثَل Wendelstein 7-X في معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما بألمانيا (الشكل باء-٤). والهدف الرئيسي من هذه الآلة هو إيضاح كيفية التشغيل البلازمي في حالة مستقرة في ظل بارامترات ذات صلة بالاندماج، وبالتالي التحقق من أنّ السِتلّاريتُور المذكور يشكّل مفهوماً صالحاً لمحطات قوى الاندماج. وبعد اكتمال مرحلة التشييد الرئيسية للسِتلّاريتُور W7-X وإدخاله في الخدمة بنجاح، أجري التشغيل البلازمي على مدى ثلاثة أيام كل أسبوع خلال الفترة من كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥ إلى آذار/مارس ٢٠١٦، بما شمل ١٠ أسابيع من التشغيل البلازمي. وفي حين أنه تم الإبقاء على ملفات المجال المغنطيسي وعلى هيكلها الداعم داخل ترموستات الحرارة المنخفضة عند درجة حرارة قُرّيّة (١٠٠ K) طوال عملية التشغيل تبلغ الحرارة التشغيلية للسِتلّاريتُور (W7-X 4K)، تم تكثيف المجال المغناطيسي وتخفيضه كل يوم من أيام التشغيل البلازمي.

الشكل- باء-٤ إلى اليسار: موقع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٧. (الصورة من: المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي). إلى اليمين: المنظر الخارجي للسِتلّاريتُور Wendelstein 7-X (الصورة من إهداء: معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما)

١٤٢- وقد استمرت العديد برامج البحث والتطوير بشأن الهندسة، والاندماج، وتصميم محطات القوى، والمواد، والأمان. ويجري الاضطلاع بأعمال بحث وتطوير كبيرة بشأن مصدر نيوتروني اندماجي في الصين وأوروبا واليابان. ويتمثل الهدف من أنشطة التحقق الهندسي والتصميم الهندسي المضطلع بها في المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية بالاشتراك مع أوروبا واليابان في وضع تصميم هندسي مفصل وكامل ومتكامل تماما وللتحقق من استمرارية واستقرار تشغيل نماذج كل نظام فرعي من نظم المرفق المذكور. وقد تم التحقق من أداء مرفق الليثيوم المستهدف، ومن رنّانات أشعة بيتا النصف الموجية ومن غيرها من النظم الفرعية. ومن المقرر استكمال التحقق من نموذج المعجّل الخطي للمرفق المذكور في عام ٢٠١٩.

١٤٣- ومن المتوقع أن تُحقِّق المصادر النيوترونية الاندماجية في الصين، التي لا تزال قيد الإنشاء، تدفقاً سريعاً للنيوترونات يصل إلى 10^{14} $cm^{-2}s^{-1}$ بحلول نهاية عام ٢٠١٨.

١٤٤- وتعمل الوكالة على وضع معايير ومبادئ إرشادية لأغراض تقنيات اختبار العينات الصغيرة، التي سيتم استخدامها، بالاقتران مع مصادر نيوترونية اندماجية مكرّسة خلال عملية اختيار المواد وإجراءات التأهيل.

جيم- التطبيقات الخاصة بالمُعجِّلات ومفاعلات البحوث

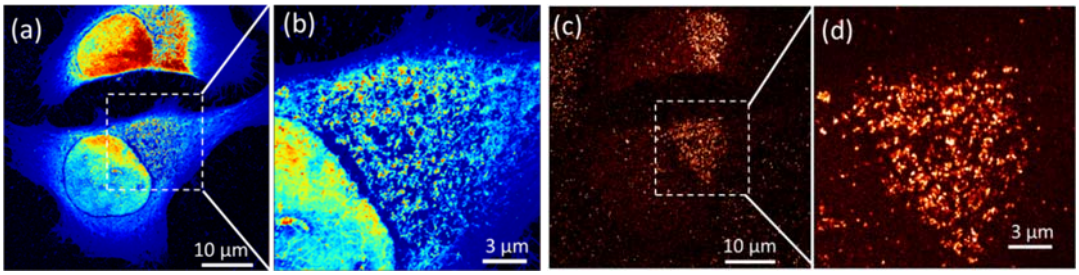
جيم-١- المُعجِّلات

١٤٥- تشمل التطبيقات الأكثر شيوعا لمعجِّلات الحُزم الأيونية الدراسات البيئية، والتطبيقات الطبية الحيوية، وتحديد خصائص التراث الثقافي ومصادرها، وعلوم المواد والتأريخ بالكربون المشعّ.[٤]

الاستجهاز النووي العالي الدقة لخلايا بأكملها

١٤٦- يمكن لمعجِّلات حُزم أيونية ذات طاقات أيونية تقدر ببضع ملايين من الكترون فلطات مقترنة بنظام تركيز متطور أن توفّر حزما يبلغ قطرها بضع عشرات من النانومترات. ويتيح هذا الأمر فرصة لتصوير الخلايا البيولوجية بأكملها بمستويات دقة أقل بكثير من مستوى حد الحيود البصري.

١٤٧- وقد أسفرت التطورات الأخيرة التي شهدتها نظم التركيز ومعدات كشف الضوء عن تقدّم في مجال التصوير البيولوجي باستخدام المسابر المكروية النووية. ويبين الشكل جيم-١ توليفة بين التصوير التألّقي والتصوير الهيكلي لخلية من خلايا هيلا (HeLa) بأكملها زُرعت في بيئة تحتوي على ألماس نانوية فلورية. وكان حجم البقعة المستخدمة للتصوير يبلغ ٣٠ نانومتر، وهو يعدّ من أصغر أحجام الحزم التي تم بلوغها بالنسبة إلى الأيونات التي تبلغ قدرتها ١,٦ مليون الكترون فلط. وتساهم هذه التطورات في فهم تأثيرات الإشعاعات في الكائنات الحية الأحادية الخلية وفي تطوير علاجات وأدوية جديدة.



الشكل- جيم-١ امتصاص خلايا هيلا (HeLa) للألماس النانوية. (أ) و (ب) صور متأتية من الاستجهار الأيوني النافذ الماسح تظهر الاختلافات في الكثافة. وتظهر فيها بوضوح نواة الخلية. (ج) و (د) تصوير تألقي مستحثّ بالحُزم الأيونية يُظهر مكان الألماس النانوية (الصور من: الأستاذ المساعد آندرو باتيول، مركز تطبيقات الحزم الأيونية، الجامعة الوطنية في سنغافورة)

تحديد العمر باستخدام الحُزم الأيونية

١٤٨- كان استخدام تقنيات الحُزم الأيونية مفيدا للغاية أيضا فيما يتعلّق بالتحقيقات الجنائية، والمسائل المتصلة بالسلامة الغذائية والصحة، والمصنوعات التراثية الثقافية، والعينات البيئية. ويُعدّ تحديد العمر المطلق باستخدام التأريخ بالكربون المشعّ مفيدا في الكشف عن عمليات التزوير وهو الآن أداة راسخة في مجال تشخيص الإرث الثقافي (الشكل جيم-٢). ويستند التأريخ بالكربون المشع إلى قياس التركيزات المتبقية من الكربون ١٤ في عينة ما وذلك عبر قياس الطيف الكتلي باستخدام المعجِّلات. وقد أطلقت الوكالة في عام ٢٠١٧ مشروعا بحثيا منسقا لزيادة الوعي وسد الفجوة بين ممارسي التقنيات التحليلية النووية ومجتمعات علم التحليل الجنائي.

---

[٤] لمزيد من المعلومات، يرجى الاطلاع على بوابة الوكالة للمعرفة المتعلقة بالمعجلات: https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators.

الشكل- جيم-٢ أخذ العينات من ذئبة كابيتولينا البرونزية الشهيرة في مركز التّأريخ والتشخيص، جامعة سالنتو، ليشي، إيطاليا (يساراً). وقد اعتبر هذا التمثال البرونزي تحفة أثرية إتروسكانية يعود تاريخها إلى نحو ٥٠٠ سنة قبل الميلاد. وأخذت عينات من المصبوبة المجوفة الأصلية، وتم اختيار مخلفات عضوية بواسطة الاستجهار البصري، وأدلى التأريخ بالكربون المشع الذي تم القيام به في معجّل المحطة النهاية بالجواب النهائي وهو: أن التمثال صنع في وقت ما في الفترة بين ١١٠٠-١٢٠٠ ميلادي وبالتالي فإنه كان أحدث عهدا بقرابة ١٦ قرنا مما كان يُعتقد.

(الصورة مُقدَّمة من: ج. كوارتا، لـ كاغانيلي، جامعة سالنتو).

سيسامي يُتيح للمستخدمين أول ضوء سنكروتروني

١٤٩- أصدر مركز استخدام الحزم الضوئية السنكروترونية في مجال العلوم والتطبيقات التجريبية في الشرق الأوسط (سيسامي) "ضوءه الأول" في كانون الثاني/يناير ٢٠١٧ وقد تم تدشين هذا المركز في أيار/مايو (الشكل جيم-٣). ولدى هذا المرفق البحثي الجديد في الأردن مصدر للضوء السنكروتروني من الجيل الثالث تبلغ قدرته ٢,٥ غيغا إلكترون فلط، وهو الأول من نوعه في الشرق الأوسط، وهو قادر على بعث إشعاعات عالية السطوع عبر طول موجي يتراوح من الأشعة دون الحمراء إلى الأشعة السينية الصلبة لمجموعة متنوعة من التطبيقات العلمية بما يشمل البيولوجيا، والمواد المتقدمة، والإرث الثقافي، وفيزياء المواد المكثّفة. وبفضل اليونسكو باعتبارها المنظمة الدولية الرائدة، استفاد سيسامي من الدعم المقدم من العديد من الدول الأعضاء في الوكالة، والاتحاد الأوروبي والمنظمة الأوروبية للبحوث النووية.

الشكل- جيم-٣ حلقة التخزين الداخلية الخاصة بسيسامي، مجهّزة بمغنطيسات الانحراف والتركيز التي تمرّ من خلالها الحزم الإلكترونية عندما يتم تسريعها (يسارا). الحزمة الأولى المنبعثة، على النحو الذي وضع تصوّر له به من خلال نظام الحصول على البيانات الموجود في غرفة التحكم الخاصة بسيسامي. (الصور من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٥٠- حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر، تم تشييد ٧٤٩ مفاعلا من مفاعلات البحوث المدنية في ٦٧ بلداً،[٥] منها ٢٥٤ مفاعلا عاملا في ٥٥ بلداً[٦]. ولدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث العاملة حيث يمتلك (٥٩) مفاعل بحوث، تليه الولايات المتحدة الأمريكية (٥٠)، والصين (١٧) واليابان (٩). وعلى نطاق العالم، يعمل ٥٧ مفاعل بحوث عند مستويات قدرة بـــ ٥ ميغاواط أو أعلى، وبالتالي فإن هذه المفاعلات توفّر تدفقات نيوترونية مرتفعة تدعم المنتجات والخدمات التي تتطلب سعة عالية.

١٥١- وتعتبر مفاعلات البحوث عنصرا لا غنى عنه لتوفير النظائر المشعّة لقطاعي الطب والصناعة، وتوفير الحزم النيوترونية للبحوث المتعلقة بالمواد والاختبارات غير المتلِفة، وتقديم الخدمات التحليلية وخدمات التشعيع للقطاعين الخاص والعام، وتقديم الخدمات الخاصة بالدراسات المتعلقة بالإرث الثقافي وبالدراسات البيئية (الجدول جيم-١). وهي تسهم إسهاما استراتيجيا فيما يتعلّق بالتعليم والتدريب. وبما أنه ثمة العديد من مفاعلات البحوث المتقادمة التي يتم سحبها، يجب للمرافق المتبقية والجديدة أن تُستخدم بكفاءة، وأن تُدار على نحو جيد، وأن تُشغَّل على نحو مستدام. وتشجع الوكالة مشغِّلي مفاعلات البحوث على وضع أو تحديث خطط استراتيجية فيما يتعلّق باستخدام مرافقهم. وفي السنوات الثلاث الماضية، قدم ٤١ مرفقا خططه إلى الوكالة للحصول على المزيد من المشورة.

١٥٢- ويبلغ عمر نصف مفاعلات البحوث العاملة أكثر من ٤٠ عاما. ويمكن أن تبلغ دورات حياتها ٦٠ سنة أو أن تتجاوز هذه المدّة، غير أنه من المهم للغاية أن يتم في الوقت المناسب وضع برامج مناسبة فيما يتعلّق بإدارة التقادم والتجديد والتحديث. ونظرا للاتجاه العام صوب التخفيض في تمويل مثل هذه المرافق والتخطيط المحدود فيما يتعلّق بالتعاقب، فإن نُظُم الإدارة السليمة، والبرامج الخاصة بالتشغيل السليم والإدارة السليمة، والبرامج الخاصة بالإدارة السليمة للأعمار التشغيلية، ستكون عاملا حيويا حتى تتمكن من أداء مهامها على نحو فعَّال من حيث التكلفة. ومن المتوقع أن تبدأ في المستقبل القريب عدّة من مفاعلات البحوث الـ١٢٢ من تلك التي هي في حالة إغلاق دائم في ٢٧ دولة عضو في أعمال التحضير للإخراج من الخدمة.

١٥٣- ويجري العمل على تشييد مفاعلات بحوث جديدة في الاتحاد الروسي، والأرجنتين، وأوكرانيا، وجمهورية كوريا، وفرنسا، والمملكة العربية السعودية، والهند (نظام يعمل بواسطة المعجلات). ولدى عدة دول أعضاء خطط رسمية لتشييد مفاعلات جديدة، بما في ذلك بلجيكا، وبوليفيا، وبيلاروس، وتايلند، وزامبيا، وطاجيكستان (استكمال مفاعل أرغوس-FTI)، وفييت نام، ونيجيريا، وهولندا، والولايات المتحدة الأمريكية. وتنظر دول أعضاء أخرى، مثل اثيوبيا، وأذربيجان، وبنغلاديش، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، وجنوب أفريقيا، والسنغال، والسودان، وغانا، والفلبين، وكينيا، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، والنيجر، في تشييد مرافق جديدة. وقد أُدخل مفاعل البحوث والتدريب الأردني الذي تبلغ قدرته ٥ ميغاواط في جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية في الخدمة وحصُل على رخصة التشغيل في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧. وبعد استيفاء متطلبات الأمان التي تم تحديدها عقب حادث فوكوشيما، أعيد في عام ٢٠١٧ تشغيل كل من مفاعل البحوث الصفري القدرة KUCA ومفاعل البحوث KUR الذي تبلغ قدرته ٥ ميغاواط، في جامعة كيوتو، فضلا عن مفاعل البحوث الصفري القدرة UTR، في جامعة كينداي. أما مفاعل البحوث المتعدد الأغراض هانارو الذي تبلغ قدرته ٣٠

---

[٥] المصدر: *قاعدة بيانات الوكالة بشأن مفاعلات البحوث* (http://nucleus.iaea.org/RRDB).

[٦] وتايوان، الصين.

ميغاواط، فقد استأنف عمله في جمهورية كوريا في كانون الأول/ديسمبر بعد أن أُغلق لأكثر من ثلاثة سنوات لأغراض إعادة تجهيز مبناه.

الجدول جيم-١ الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم.[أ]

نوع التطبيق	عدد مفاعلات البحوث المشمولة [ب]	عدد الدول الأعضاء التي تستضيف مثل هذه المرافق
التعليم والتدريب	١٥٧	٥٣
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١١٤	٥٢
إنتاج النظائر المشعّة	٨٣	٤٣
التصوير الشعاعي النيوتروني	٦٨	٣٨
تشعيع المواد والوقود	٦٢	٢٦
التشتت النيوتروني	٤٤	٢٩
التقويم الجيولوجي	٢٥	٢٢
التحويل (معالجة السليكون)	٢٣	١٦
التحويل (الأحجار الكريمة)	١٨	١١
العلاج النيوتروني، أساسا البحوث والتطوير	١٤	١١
البحوث الابتكارية في مجال الطاقة النووية	١٥	١٠
استخدامات أخرى [ج]	١١٨	٣٧

[أ] يرد وصف لهذه التطبيقات بمزيد من التفاصيل في المنشور الصادر عن الوكالة بعنوان *تطبيقات مفاعلات البحوث* (العدد NP-T-5.3 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، ٢٠١٤).

[ب] من بين ٢٣٨ مفاعل بحوث تم النظر فيها (ثمة ٢١٧ مفاعلا عاملا، و٢١ مفاعلا في حالة إغلاق مؤقت في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧).

[ج] مثل معايرة الأجهزة واختبارها، وتجارب التدريع، وقياسات البيانات النووية، والزيارات العامة، والحلقات الدراسية.

١٥٤- وظلت الدول الأعضاء التي تخطط لبناء قدراتها النووية الوطنية أو المحافظة عليها لأغراض برامجها الخاصة بالعلوم والتكنولوجيا، بما يشمل القوى النووية، تبدي اهتماما بالوصول إلى مفاعلات البحوث. لذا، قامت الوكالة في عام ٢٠١٧ بتعزيز وتوسيع صكوكها وأدواتها الأربع وهي: مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت، وهو عبارة عن أداة للتدريب عن بعد تستخدم أساسا لتقديم التعليم الأكاديمي (تواصلت دورات البث في عام ٢٠١٧ بالنسبة إلى مناطق أفريقيا وأوروبا وأمريكا اللاتينية والكاريبي)؛ والدورات الدراسية الإقليمية عن مفاعلات البحوث (RRRS)، لتقديم التدريب الأساسي، ومبادرة أوروبا الشرقية بشأن مفاعلات البحوث، لتقديم التدريب العملي، بالأساس لفائدة المهنيين الشباب (نُظّمت في عام ٢٠١٧ إحدى هذه الدورات بالاشتراك بين تايلند وفييت نام، وعقدت الدورة التدريبية الثالثة عشرة لهذه المبادرة في النمسا والجمهورية التشيكية وهنغاريا)؛ وخطة مركز الوكالة الدولي المسُمَّى القائم على مفاعلات البحوث لتقدير التدريب المحدد والمتقدّم لفائدة المهنيين الشباب والكبار (تمت في عام ٢٠١٧ تسمية كل من مركز البحوث النووية البلجيكي في بلجيكا ومختبر أيداهو الوطني التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة).

١٥٥- ويشكّل كل من استمرارية التصرف في الوقود النووي المستهلك الخاص بمفاعلات البحوث وخزنه على نحو مأمون وموثوق واقتصادي تحديا بالنسبة إلى عدّة دول أعضاء، وكذلك هو الحال بالنسبة إلى تحديد

الخيارات الختامية المجدية التي يجب أن تمتثل لمتطلبات عدم الانتشار، ومتطلبات السياسة الوطنية، وللمتطلبات والقيود الاقتصادية والبيئية، فضلا عن المتطلبات التي تطرحها القضايا التقنية. وتواجه العديد من البلدان التي لديها مفاعل بحوث واحد أو أكثر أو لديها برنامج قوى نووية محدود أو ليس لديها أي برنامج من هذا القبيل مشكلة التخلّص النهائي من الكميات الصغيرة نسبياً من الوقود النووي المستهلك؛ حيث قد تكون هذه البلدان مُلزَمة باتخاذ قرار بشأن مستقبل مفاعلات البحوث الخاصة بها نظرا إلى المدة المحدودة التي تستغرقها البرامج الدولية الخاصة باسترداد الوقود النووي المستهلك الخاص بمفاعلات البحوث. ويجري حاليا بذل جهود جماعية بتنسيق من الوكالة لوضع نماذج خاصة باتخاذ القرارات من أجل مساعدة الدول الأعضاء على اختيار الخيار الأكثر جدوى للسيناريو الذي تعتزم كل منها اعتماده في هذا الشأن.

١٥٦- وقد تم حتى الآن تحويل ٩٧ مفاعل بحوث ومرفقين اثنين من مرافق إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، أو تأكيد أنها في حالة إغلاق. وفي عام ٢٠١٧، تم تحويل المفاعل المصدري النيوتروني المصغّر في غانا من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الاثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُعيد الوقود النووي الشديد الإثراء المشعّ إلى الصين. ويجري حاليا تقديم الدعم فيما يتعلّق بتحويل المفاعل المصدري النيوتروني المصغّر في غانا. ويعد تطوير وتأهيل أنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء عالية الكثافة (مثل وقود اليورانيوم–الموليبدنوم) أمرا ضروريا لتحويل مفاعلات البحوث العالية الفيض العالية الأداء؛ ورغم التقدّم الكبير المحرز في هذا الشأن، ثمة حاجة إلى المزيد من العمل فيما يتعلّق باختبارات التشعيع، وفحوص ما بعد التشعيع وتقنيات الصنع لجعل هذه الأنواع من الوقود متاحة تجارياً.

١٥٧- وبحلول نهاية عام ٢٠١٧، استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الأمريكي المصدر إزالةُ حوالي ١٣٠٠ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك الخاص بمفاعلات البحوث، كما استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة الوقود الروسي المصدر إزالة حوالي ٢٢٥٠ كغ من الوقود.

١٥٨- وفي فرنسا، زادت شركة أريفا AREVA من نطاق أنواع الوقود المستخدمة في مفاعلات البحوث والتي تخضع للمعالجة، مثل وقود السيليسيد، الذي أُعيدت معالجته للمرة الأولى في عام ٢٠١٧.

١٥٩- ولم تسفر حالات الانقطاع لفترات قصيرة التي وقعت في عام ٢٠١٧ في بعض المرافق العالمية المعنية بالتشعيع المستهدف للموليبدينوم-٩٩ ومعالجته عن وقوع نقص كبير في الإمدادات بما يكفي للتأثير على المرضى، حيث عُوِّضت التقلُّبات نتيجة لجهود الهيئات المعنية بإدارة سلاسل الإمدادات والمنتجين الرئيسيين الدوليين، وكذلك الجهود الفعالة التي بذلها الممارسون في القطاع الصحي من أجل الحدِّ من تأثير نقص الإمدادات. ولم يكن لإيقاف الإنتاج الروتيني للموليبدينوم-٩٩ في مفاعل البحوث الوطنية الشامل الكندي في عام ٢٠١٦ أي تأثير سلبي فيما يتعلّق بالإمدادات على الصعيد العالمي. ويستمر تحويل عمليات إنتاج الموليبدينوم-٩٩ من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠١٧، أكملت المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين تشييد مرفق الإنتاجِ الجديدَ الخاص بها. وأعلنت شركة NTP للنظائر المشعة (جنوب أفريقيا) التحويل الكامل لعملياتها إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء. ويواصل منتِجان رئيسيان آخران وهما معهد العناصر الإشعاعية في بلجيكا، وشركة Curium (التي تجمع بين شركة IBA Molecular وشركة مالينكرودت للطب النووي ذات المسؤولية المحدودة) في هولندا إحراز تقدّم فيما يتعلّق بتحويل عمليات إنتاجهما من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء.

دال- الأغذية والزراعة

دال-١- التأهب للطوارئ النووية في مجال الأغذية والزراعة

دال-١-١- التحديات المواجهة في التصدّي للطوارئ النووية

١٦٠- إن تحديد مناطق إنتاج الأغذية المتضررة بسرعة والحيلولة دون وصول المنتجات التي من المحتمل أن تكون ملوّثة إلى المستهلكين هي بعض التحديات التي يتعيّن التصدي لها خلال حالات الطوارئ النووية. غير أن المعالجة التقليدية لبيانات التلوث الإشعاعي تؤثّر في زمن الاستجابة ودقة التصدي. وبسبب احتمال وقوع طارئ نووي واسع النطاق، قد تشارك مختبرات متعددة من مؤسسات مختلفة مما يوفّر معلومات متعددة الأوجه غالبا ما يُحصل عليها عبر تطبيق طائفة واسعة من المنهجيات. ومن شان الإدارة الفعالة والكفؤة لهذه الكمية الكبيرة من البيانات التي غالبا ما تكون متنوعة تحديدُ نوعية التصدي.

١٦١- ويمكن تحقيق ذلك عبر استخدام نظام قوي من نظم تكنولوجيا المعلومات خاص بدعم القرارات (IT-DSS) يتم من خلاله جمع كافة المعلومات ذات الصلة وخزنها مركزيا، واستهداف معالجة البيانات في الوقت الحقيقي.

دال-١-٢- التطورات الجديدة التي تشهدها نُظُم دعم اتخاذ القرارات فيما يتعلّق بالتصدّي للطوارئ

١٦٢- تتيح التطورات التي تشهدها أدوات وخوارزميات نظم تكنولوجيا المعلومات الخاصة بدعم القرارات (IT-DSS) تحسينَ الإدارة في الوقت الحقيقي لمجموعات كبيرة من البيانات ودعمَ اتخاذ القرارت على نحو متكامل. كما أن استخدام تكنولوجيات الأجهزة النقالة لجمع البيانات في الموقع وفي المختبرات تقلل من الأخطاء البشرية وتسرّع من عملية معالجة البيانات.

١٦٣- وتقدّم نظم تكنولوجيا المعلومات الحديثة الخاصة بدعم القرارات مساعدةً بصريةً واضحةً لتعزيز قدرات التصدي. ومن بين الأمثلة على ذلك إمكانية عرض مرحلة الجمع جغرافيّاً (خرائط تبيّن حالة جمع أو تحليل العينات)، ومرحلة التحليل/التحقق (خرائط تبيّن تركيز/ترسّب النشاط الإشعاعي)، ومرحلة اتخاذ القرارات (لوحة تحكم تساعد على اقتراح مواقع يتعيّن فيها فرض قيود على الأغذية). ويمكن إتاحة خرائط تلوّث الأغذية بشكل فوري حتى يتسنى لجميع الأطراف المعنية اتخاذ قرارات مستنيرة. ويمكن أيضا توفير مفاتيح تفسيرية للخرائط بتدرجات ألوان محددة مسبقا لتيسير عملية التواصل بشأن المخاطر بين الجهات المعنية والمواطنين.

١٦٤- وتساعد القدرة على تقييم البيانات بالعين المجردة في الوقت الحقيقي على تقدير تكاليف ومزايا سيناريوهات التصدي المحتملة. وتراعي القيم العتبية والمستويات الموجبة لاتخاذ إجراءات، التي تحدّدها كل جهة معنية في إطار عملية التنبّؤ بالسيناريو، مستويات متفاوتة من مخصصات المخاطر لاقتراح قيود تفرض على الزراعة وعلى حركة الأغذية. وتعزز هذه الوظائف الخاصة بدعم عملية اتخاذ القرارات من قدرة الجهات المعنية على التركيز على أهم المسائل المطروحة – وهي ضمان سلامة الأغذية وأمان المستهلكين.

دال-١-٣- نظام دعم اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA)

١٦٥- إن نظام اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة هو نظام من نظم تكنولوجيا المعلومات الخاصة بدعم القرارات (IT-DSS) قائم على بيئة الحوسبة السحابية طورته الشعبة

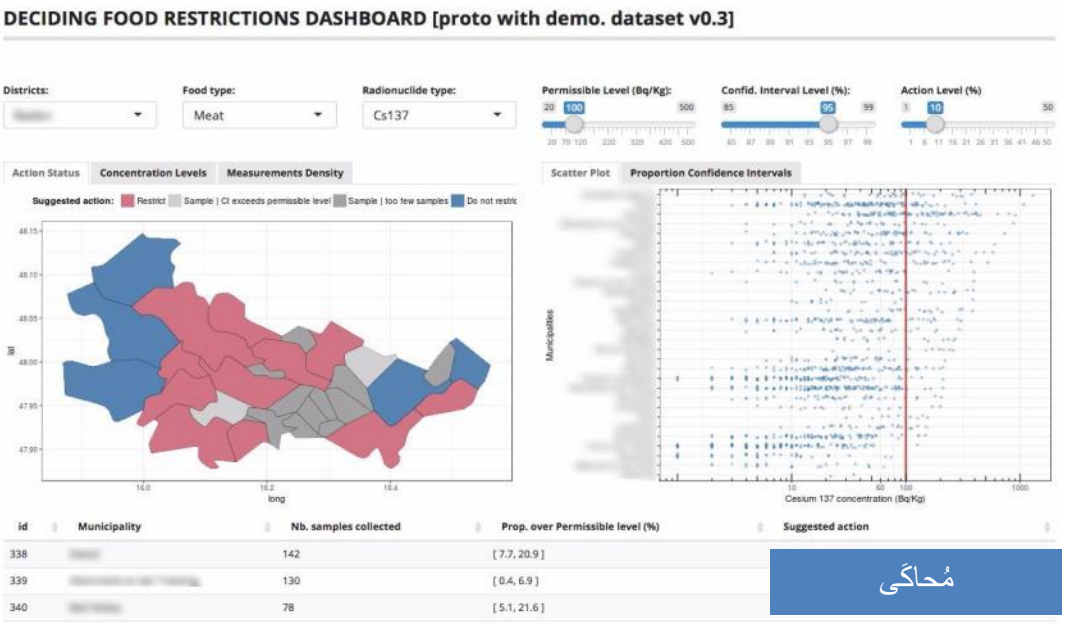
المشـتركة بين الفاو والوكالة لاسـتخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة لكي تسـترشـد به الوكالة والدول الأعضـاء في الوكالة في تصـديها خلال حالة طوارئ نووية تؤثِّر في الأغذية والزراعة (الشكل دال-١). ويحقق هذا النظام المسـتوى الأمثل لجمع البيانات وإدارتها ووضـع تصـوّر لها من خلال أحدث الخوارزميات. والسـمة المحددة التي تميّز هذا النظام عن باقي الأنظمة هي أنه يســتخدم التكنولوجيات الحديثة مثل الأدوات المحمولة وأساليب وضع التصوّر الجغرافي بهدف التغلب على التحديات اللوجيستية التي تُواجَه خلال حالة طوارئ نووية، كما أنه يتضـمن مكوّنا لتحليل البيانات سـهل الاسـتخدام يقترح إجراءات خاصـة بالتصـدي. وهذا النظام مُهيكل في شــكل وحدات نمطية، بما يشــمل عدة من مكوّنات تكنولوجيا المعلومات، وهي مكونات متكاملة بيد أنه يمكن استبدالها بشكل منفصل مما يجعل هذا النظام مرنا للغاية وقابلا للتكييف. وستُتاح الصيغة التجريبية من هذه الأداة في عام ٢٠١٨.

الشكل- دال-١: استخدام نظم تكنولوجيا المعلومات الحديثة لتحقيق المستوى الأمثل والتصدي للطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة. لمحة عامة عن كيفية عمل نظام اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة DSS4NAFA.
(المصدر: الفاو/الوكالة)

١٦٦- يُعدُّ نظام اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثِّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA) نظاما ابتكاريا لتقييم وتفسير البيانات بشأن التلوث الإشعاعي في الأغذية والزراعة ولتعزيز قدرات السلطات المسؤولة عن السـلامة الغذائية على التصـدي للطوارئ النووية. وهو يدعم متخذي القرارات في تحديد أماكن أخذ العينات وإسناد المهام المتعلقة بتحليل العينات وإجراء التحاليل في المختبرات. كما أنه يتيح أدوات قوية للتفسير البصري تُدمج بيانات متعددة الأبعا، يتراوح مأتاها من الصـــعيد المحلي إلى الصـــعيد الدولي، تُجمع وتُعالج خلال حالة طوارئ نووية.

١٦٧- وبمجرد الحصـول على بيانات تركيزات النويدات المشـعة، تجمع لوحة التحكم الخاصـة بفرض القيود على الأغذية هذه المعلومات، بما يشمل التوزيع المكاني وتوقيت وقوع الحادث، وتقترح فرض قيود على الأغذية

والزراعة استنادا إلى مستوى الخطر ومستويات التحمّل المحددة. ويقلّل استخدام هذا النظام من درجة التعقّد التي تواجَه عند إدارة لوجستيات جمع البيانات، والتنبؤ بالسيناريوهات في إطار تحليل البيانات، واقتراح إجراءات تقييدية لأغراض اتخاذ القرارات.



الشكل- دال-٢: تساعد لوحة التحكم الخاصة بفرض القيود، وهي عبارة عن وحدة نمطية من وحدات نظام اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA)، متخذي القرارات عبر اقتراح إجراءات فيما يتعلق باتخاذ القرارات استنادا إلى المعلومات عن تركيزات النويدات المشعة وفترات مستوى-الثقة القابلة للتعديل. ويمكن للجهات المعنية تحديد الوحدات الإدارية التي يتعيّن فرض قيود عليها، أو أخذ المزيد من العينات، أو عدم فرض قيود بالنسبة إلى القرارات المتعلّقة بالأغذية والزراعة. (المصدر الفاو/الوكالة)

١٦٨- وبوسع نظام اتخاذ القرارات بشأن الطوارئ النووية التي تؤثّر في الأغذية والزراعة (DSS4NAFA) إدارة مجموعات كبيرة من البيانات دون إثقال كاهل المستخدم. ومن بين الأمثلة العملية على استخدامه وضع تصوّر لبيانات التلوث في البعدين الزماني والمكاني، والصور الرسومية التفاعلية لأغراض تحقيق المستوى الأمثل لتخصيص استخدام أجهزة جمع العينات واستخدام المرافق المختبرية التحليلية، ولوحات التحكم الخاصة بتحديد المناطق التي يكون فيها فرض قيود على الأغذية مبرراً.

١٦٩- ويمكن الوصول إلى منصة هذا النظام في الموقع عبر تطبيق للهواتف الذكية، أو من المكتب عبر واجهة بينية حاسوبية، مما يتيح تبسيط الاستخدام والاتصالات. ويمكِّن الجمع بين هذه الوظائف من إشراك كافة الجهات المعنية في العملية ويزيد من متانة قدرات التصدّي للطوارئ.

دال-٢- استخدام التشعيع لاستحداث لقاحات جديدة وفعالة ضدّ الأمراض الحيوانية والأمراض الحيوانية المصدر

١٧٠- تساعد زيادة إنتاجية الثروة الحيوانية الملايين من الأسر في جميع أنحاء العالم على زيادة مداخيلها. ويؤدي عاملا توافر اللقاحات الفعالة والوصول إليها إلى التقليل من عبء المرض كما أن هذا الأمر يعدُّ حيويا

بالنسبة إلى تربية الماشية. وثمة العديد من الأمراض التي تنتقل من الحيوان إلى الإنسان والعكس صحيح (الأمراض الحيوانية المصدر) التي يمكن الوقاية منها عن طريق استخدام اللقاحات.

١٧١- كما أن استخدام اللقاحات يقلّل من استخدام المواد العلاجية في مجال تربية الماشية ويساهم في التخفيف من عبء مقاومة الطفيليات والميكروبات للمضادات. ورغم أن التطورات التي شهدها مجال التكنولوجيا البيولوجية في القرن الماضي ساعدت على استحداث العديد من اللقاحات الخاصة بالثروة الحيوانية، مازالت عدّة أمراض فادحة معدية عابرة للحدود تثقل كاهل منتجي الثروة الحيوانية بسبب الافتقار إلى لقاحات فعالة أو بسبب نقص كفاءة اللقاحات المتوافرة في الوقت الحاضر.

١٧٢- ويعدُّ استخدام مسببات الأمراض غير المعدية بالكامل كوسيلة لحفز المناعة من بين أفضل الطرق لاستحداث اللقاحات. وتطبّق التكنولوجيا الإشعاعية بطرق رشيدة متعدّدة لاستحداث اللقاحات (الشكل دال-٣). في إطار أحد النهج، تشعّع مسببات أمراض مثل الفيروسات بجرعات أكبر من أشعة غاما (25–30 kGy) لتعطيل مسببات الأمراض تماما. ومن المستصوب اتباع هذا النهج بالنسبة إلى الكائنات العضوية الشديدة الإمراض حيث لا يتعيّن حقن الثويّ بأي كائن عضوي حي. ومع ذلك، فإن التعطيل عن طريق التشعيع لا يدمّر المستضدات مقارنة بالأساليب الكيميائية التي غالبا ما تستخدم في استحداث اللقاحات.

١٧٣- وكحل بديل، تستخدم جرعة منخفضة من التشعيع لكبح قدرة الكائن العضوي على التنسّخ أو على التسبب في الأمراض طالما أن الكائن العضوي مازال نشطا أيضيا. ويرجع ذلك إلى التدمير الجزئي أو إلى حدوث بعض الطفرات صلب المواد الجينية. ولذلك، يصطلح على هذه اللقاحات بأنها "نشطة أيضيا ومعيبة تكراريا".[٧]

١٧٤- وفي إطار نهج ثالث، يستخدم مسبب أمراض مشعّع لزيادة أو تعزيز مُستمنعيّة مسبب أمراض آخر متصل أو غير متصل بالكائن العضوي الدقيق الذي يحتوي عليه اللقاح.

١٧٥- وتسمى المركبات التي تزيد من فعالية اللقاح المستضدّات وغالبا ما يتم استخدامها عند إعداد اللقاحات. ويمكن أيضا استخدام التكنولوجيا الإشعاعية على نحو غير مباشر لتعزيز فعالية اللقاحات وأمانها. ومن بين هذه التطبيقات تشعيع اللقاحات الموجودة حاليا لضمان خلو المستحضرات المستخدمة في التلقيح من أي كائنات عضوية معدية ملوّثة. وكحل بديل، يمكن تشعيع اللقاحات المستضدّية لتحوير هيكلها (عبر البلمرة مثلا) بغية تعزيز تأثيرها المناعي أو الوقائي.

١٧٦- وقد حاول العلماء منذ خمسينيات القرن العشرين استحداث لقاحات عن طريق تشعيع مسببات الأمراض. بيد أن الاستخدام التقليدي للتكنولوجيا الإشعاعية كان يتم عبر الإفراط في تشعيع مسببات الأمراض وهو ما ينجر عنه تدمير الهياكل النووية والبروتينية لهذه اللقاحات المرشحة. ويستند الفهم الذي توصلنا إليه مؤخراً فيما يتعلق باستخدام التكنولوجيا الإشعاعية إلى اكتشاف أنّ أجهزة التشعيع الحديثة قادرة على توليد جرعات تشعيع أكبر وأكثر تحديداً بطريقة فعالة. وبموازاة ذلك، توسّعت المعرفة بشأن الجهاز المناعي مما أدى غلى توافر أدوات وتكنولوجيات دقيقة لتقييم الاستجابات المناعية التي تعقب التلقيح.

---

[7] Magnani, D.M., Harms, J.S., Durward, M.A., Splitter G.A., Nondividing but metabolically active gamma-irradiated *Brucella melitensis* is protective against virulent *B. melitensis* challenge in mice, Infect. Immun. **77** 11 (2009) 5181-5189.

١٧٧- وإلى جانب التقدم المحرز في مجال الدراســـات الجينومية، أدت هذه التطورات إلى نهضـــة في مجال البحوث المتعلقة باللقاحات المشـعّة وإلى توسـيع نطاق تطوير لقاحات جديدة وفعالة. فعلى سـبيل المثال، يمكن للمشـعّعات بالحزم الإلكترونية أن تولّد جرعات تشـعيع تصـل إلى 30 kGy في غضـون دقائق، مما يحول دون تراكم المنتجات الثانوية غير المرغوب فيها من قبيل الجذور الحرة التي يسـتحيل تجنبها في حال اسـتخدام فترة تشعيع أطول.

١٧٨- كما أن المكونات الواقية من الإشـعاعات التي تم اكتشـافها مؤخرا تسـاعد على حماية الهياكل المسـؤولة عن قابلية اكتسـاب المناعة ضـد اللقاحات. ومن بين هذه المكونات ثمة معقّد (Mn2+-decapeptide (MDP، وهو عبارة عن مكون معزول من البكتيريا المقاومة للإشعاع يُحافظ على البروتينات المُستمنعية للفيروسات والبكتيريا التي تُعرَّضُ إلى جرعات أقوى من أشعة غاما وذلك عبر كسح الجذور الحرة التي تنتج أثناء عملية التشعيع.[٨]

١٧٩- ولقد تجاوزت أوجه التقدّم التكنولوجية والنُّهُجُ الابتكارية المتبعة فيما يتعلق باللقاحات المشـار إليها أعلاه الاختبارات الاسـاسـية الأولية. وفي مجال الطب البشـري، اسـتخدمت حيوانات بوغي ملاريا نشـطة أيضـيا غير تكرارية استخرجت من البعوض المشعّع لاستحثاث المناعة ضد عدوى الملاريا. ومن الضروري إجراء اختبار قوي للتحقق من المفهوم وتوافر معايير أمان عالية المستوى حتى يتم استخدام لقاح مرشح في التجارب الإكلينيكية على البشر.

١٨٠- ولم يصل لقاح الملاريا المشعّع مراحل التجارب الإكلينيكية فحسب، بل أظهر أيضا قابلية كبيرة للوقاية ضـد حالات العدوى اللاحقة.[٩] وقد اسـتخدم التشـعيع كذلك لأغراض التعطيل الكامل لفيروس HIV-1، الذي تبين لاحقا أنه مأمون في التجارب الإكلينيكية على البشر وأنه يحسّن من استجابة الأجسام المضادة لفيروس HIV.

١٨١- واسـتنادا إلى هذه التطورات الإيجابية وإلى فهمنا الجديد للاسـتخدام الانتقائي والمحكوم للتشـعيع، كثّفت العديد من المؤسسات العامة والخاصة من جهودها الرامية إلى تطوير "لقاحات مشعّعة". وأظهرت البحوث التي أجراها علماء من معهد فراونهوفر للعلاج الخلوي وعلم المناعة (IZI) في ألمانيا أنّ التشـــعيع الإلكتروني المنخفض الطاقة يحافظ على الخصائص المستضدية لفيروسات مثل فيروس هربس الخيول، وفيروس المتلازمة التناسلية والتنفسية عند الخنازير وحتى على الاستجابات المناعية الواقية ضد الإنفلونزا.[١٠]

١٨٢- وأظهرت البحوث التي أجريت في كل من جامعة ويسـكونسـن-ماديسـون وجامعة بوردو في الولايات المتحدة الأمريكية أن تلقيح الفئران ببكتيريا البروسيلا المشعّعة النشطة أيضيا تقيها من الإصابة بالأمراض عندما تُعرَّض لتحدي العدوى. والبروسـيلا هي مرض موهِن إقتصـاديا يصـيب الحيوانات له أثر إقتصـادي عالمي كما أنها مرض حيواني المصـــدر. وهذه ليســـت ســـوى أمثلة قليلة عن التجارب الناجحة التي أجريت عند تطوير اللقاحات المشـعّعة المضـادة للأمراض التي تصـيب الثروة الحيوانية. ومن بين التجارب الجارية الأخرى الهادفة لتطوير لقاحات مشعّعة مضادة للأمراض الحيوانية العابرة للحدود داءُ الحمى القلاعية والانتانَميَّة النزفية.

---

[8] Gayen, M., et al., Deinococcus Mn2+-peptide complex: A novel approach to alphavirus vaccine development, Vaccine. 35 29 (2017) 3672-3681.

[9] Sissoko, M.S., *et al.*, Safety and efficacy of PfSPZ Vaccine against *Plasmodium falciparum* via direct venous inoculation in healthy malaria-exposed adults in Mali: a randomised, double-blind phase 1 trial, Lancet Infect. Dis. **17** 5 (2017) 498-509.

[10] Fertey, J., *et al.*, Pathogens inactivated by low-energy-electron irradiation maintain antigenic properties and induce protective immune responses, Viruses **8** 11 (2016) E319.

١٨٣- وقد مهّدت الوكالة الطريق لجيل جديد من البحوث في هذا المجال من خلال مشروع بحثي منسّق يضم ستة نظراء (اثيوبيا، وبنغلاديش، وجمهورية إيران الإسلامية، وسري لانكا، والسودان، ومصر) لتقييم النهج الجديدة المتبعة لإنتاج لقاحات مشعّعة تجريبيا. (الشكل د-٤).

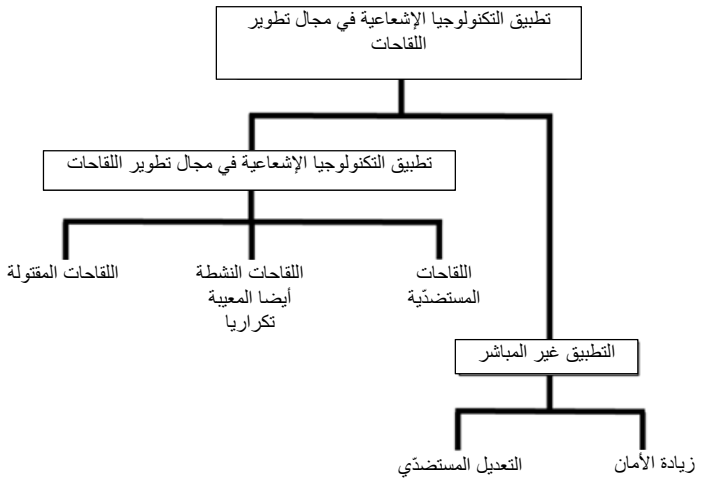
١٨٤- ويتطرّق العلماء من هذه البلدان إلى مختلف مسببات الأمراض الحيوانية أو الحيوانية المصدر كما أنهم أثبتوا مفاهيم خاصة بجرعات التشعيع التفريقية لتطوير اللقاحات المرشحة. ويجري حاليا الاضطلاع بتجارب لتحديد ما إذا كانت هذه اللقاحات قادرة على وقاية الحيوان عندما يعرَّض لتحدي العدوى جراء مسبّب مرض معد. وتم الإبلاغ بشأن أول إنجاز في هذا الشأن تمثل في لقاح نموذجي مشعّع مضاد ليرقة Haemonchus contortus، وهي عبارة عن طفيليات مَعدية معوية تصيب المجترات. وكانت الحيوانات التي تم إخضاعها لتحدي الإصابة بهذا الداء محمية بنسبة ١٠٠٪ وذلك عقب تناولها جرعتين عن طريق الفم من يرقات Haemonchus contortu المشعّعة.

١٨٥- وتجري الوكالة تجارب لتطوير لقاحات نموذجية مشعّعة مضادة لفيروسين اثنين من فيروسات حمى الخنازير لهما أثر شديد على تربية الخنازير وهما: إنفلونزا الخنازير والمتلازمة التناسلية والتنفسية التي تصيب الخنازير. كما أنها تقوم بتطوير وتوفير أدواة لقياس الاستجابات المناعية المستحثة عقب التلقيح بكائنات عضوية مشعّعة. ويجري استحداث تقنيات تُستخدم لقياس المناعة المتواسطة بالخلايا، وهو مجال من مجالات علم المناعة لم يحصل فيه كبير تطوير غير أنه مهم عند دراسة الأمراض المعدية.

١٨٦- وتعمل الوكالة أيضا على إنشاء مستودع بالأجسام المضادة وحيدة النسيلة التي تتعرف على الواسمات المناعية لدى البقر، سيتم توزيعها على مختبرات الدول الأعضاء. وفيما يتعلّق بمسببات الأمراض المحددة، اكتشف العلماء مؤخرا "بؤرا ساخنة" في جينوم طفيليات Trypanosoma تتأثر بجرعات منخفضة من التشعيع. وسيساعد هذا الاكتشاف على تصميم الأدوية واللقاحات المضادة لكائن طفيلي له آثار كبيرة على الإنتاج الحيواني في البلدان النامية.

١٨٧- وبما أنه تم إثبات وإرساء مفهوم تكنولوجيا التشعيع التفريقي، ينصب تركيز البحوثِ الآن على تطوير وتوسيع نطاق العمليات الخاصة بإنتاج اللقاحات. وتضطلع شركة سانااريا (Sanaria)، وهي شركة عاملة في مجال التكنولوجيا الحيوية تجري تجارب بشأن لقاح الملاريا المشعّع، بأعمال استكشاف باستخدام الروبوتات بهدف إنتاج اللقاحات، في حين يجري معهد فراونهوفر في ألمانيا تجارب تهدف إلى تطوير إجراء تقني جديد مؤتمت للارتقاء بحزم التشعيع الإلكترونية إلى مستوى صناعي لأغراض إنتاج اللقاحات. وقد اتخذ بعض النظراء المشاركين في المشروع البحثي المنسق مبادرات رامية إلى صنع مستحضرات جافة من هذا اللقاح المشعّع لبلوغ درجة الحرارة المستقرة التي من شأنها أن تيسّر نقله إلى المناطق النائية دون الحاجة إلى إبقاء اللقاحات داخل سلسلة البرودة.

١٨٨- ورغم أن العديد من التطورات المحرزة في مجال تكنولوجيا اللقاحات المشعّعة لا تزال في مرحلة البحوث فحسب، فإن الاكتشافات الحالية تُظهر بوضوح التطبيق المحتمل لهذه التكنولوجيا لتطوير لقاحات فعالة مضادة للعديد من الفيروسات والبكتيريا والطفيليات المسبّبة للأمراض. ومن شأن الاستثمار في هذه التكنولوجيا أن يساعد على مكافحة العديد من الأمراض ويمكن أن يكون له أثر كبير في مجالي الاقتصاد والصحة في البدان النامية.



الشكل- دال-٣ يمكن تطبيق التكنولوجيا الإشعاعية لتطوير لقاحات جديدة وتعزيز كفاءة وأمان اللقاحات الموجودة حاليا. (المصدر: الوكالة-الفاو)

الشكل- دال-٤ عالم من جمهورية إيران الإسلامية يقوم بصياغة لقاح مشعع (يسارا) في حين يقوم عالم من السودان بأخذ عينة من دم خروف (يمينا) لتقييم كفاءة اللقاح. الصورمقدَّمة من: فرناز-معتمدي-سيده، معهد بحوث العلوم والتكنولوجيا النووية، جمهورية إيران الإسلامية، وميهاد علواد، المختبر المركزي للبحوث البيطرية، السودان)

دال-٣- استخدام البصمات المتعددة النظائر لتحديد مصادر الملوثات الزراعية بدءا من التربة ووصولا إلى المسطحات المائية

١٨٩- تعمل الوكالة حاليا على وضع بروتوكولات ومبادئ توجيهية لتعقّب الملوثات الزراعية واستحداث ممارسات ابتكارية خاصة بإدارة التربة والمياه للتقليص من الملوثات الزراعية في البيئة.

١٩٠- وللتلوث الزراعي للأنهار والجداول المائية أثرٌ سلبي على صحة الإنسان، والتنوع البيولوجي، ومصايد الأسماك. وغالبا ما يؤدي توسيع وتكثيف النظم الزراعية استجابةً للطلب المتزايد على الأغذية إلى الإفراط في استخدام المواد الكيميائية الزراعية، مثل الأسمدة العضوية وغير العضوية ومبيدات الآفات، وإساءة استخدامها. وعلى الصعيد العالمي، تحقق إنتاج كبير في المحاصيل وذلك بالأساس من خلال الاستخدام المكثّف للمواد الكيميائية الزراعية وكذلك الري الذي يسهم في نقل الملوثات الزراعية من التربة إلى المسطحات المائية. وفي

معظم البلدان ذات الدخل المرتفع وفي العديد من الاقتصـــاديات الناشـــئة، يتجاوز التلوث الزراعي بالفعل التلوث الذي تتسبب فيه الأسر والقطاعات الصناعية، مما يجعله السبب الرئيسي لتدهور المياه الداخلية والساحلية. وفي الاتحاد الأوروبي، تتعرض ٣٨٪ من المسـطحات المائية لضـغوط كبيرة جراء التلوث الزراعي[١١] (الشـكل دال-٥). وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تُعدُّ الزراعة المصـــدر الرئيســـي للتلوث في الأنهار والجداول المائية، والمصدر الرئيسي الثاني للتلوث في الأراضي الرطبة، والمصدر الرئيسي الثالث للتلوث في البحيرات.[١٢]

١٩١- يعدُّ تحديد المصادر وتقسيمها إحدى الفجوات المعرفية الرئيسية فيما يتعلق بالتلوث في النظم الإيكولوجية الزراعية، وهو مجال يتطلب المزيد من البيانات والبحوث وتكامل في النُّهُج المتبعة. ومن الضـروري تحديد هذه المسـاهمات حتى تتمكن الوكالات الوطنية والحكومات من وضـع السياسـات والممارسـات الإدارية الملائمة ومن أجل اسـتهداف الاسـتجابات. وعندما يحصـل النظام الإيكولوجي الزراعي تلوّث متأت من مصـادر متعددة، فإن التقنيات التقليدية من قبيل تحديد كمية العنصـر الملوّث وتوازن الكتل ليسـت فعالة في تقييم المسـاهمة النسـبية لمختلف المصـــادر. وبالتالي، قمة حاجة إلى اتباع نُهُج تكميلية لســدّ هذه الثغرات. وتُعدّ النُّهّجُ التقليدية المكمّلة، والنظائر المستقرة لأهم العناصر الكيميائية من العوامل الرئيسية لتحديد خصائص المصادر وتقدير كميتها ولتنقل الذوائب عبر التربة والمسطحات المائية في النظم الإيكولوجية الزراعية.

١٩٢- وقد اســتخدمت النظائر المســتقرة للعناصــر الكيميائية النتروجين، الكربون، الأكســجين، الكبريت، والهيدروجين بنجاح لتعقّب ورصـــد المصـــادر وتنقّل الذوائب والمياه في النظم الإيكولوجية الزراعية.[١٣] وقد أظهرت الدراسات أنه وبحسب منشئ المصدر الملوّث، تكون البصمة النظيرية لكل عنصر من العناصر فريدة، وأنّه يمكن بالتالي استخدامها لوسم هذا المصدر. وبغية تعقّب ورصد مصادر الفسفور، وهو من الاسمدة الرئيسية التي تحسّن من إنتاجية المحاصيل، بدءا من التربة ووصولا إلى المسطحات المائية، يتم استخدام البصمة النظيرية للأكسـجين-١٨ الموجودة في الفوسـفات غير العضـوي (δ18O-PO4). ويتوقّف تطبيق تحليل النظائر المسـتقرة بمركبات معيّنة على الملوثات الدقيقة، على القدرة على رصد التغييرات التي تطرأ على تكوين النظائر المستقرة بين المصـــدر(المصـــادر) والمخرج (المخارج) وبالتالي على القدرة على تقدير كمية التحولات الكيميائية أو البيوكيميائية التي تحصل في النظم الإيكولوجية الزراعية.[١٤، ١٥، ١٦] ومن شأن مصادر التلوّث المتعددة الموجودة في النظم الإيكولوجية الزراعية أن تُظهِرَ بصـمات نظيرية متداخلة مما يجعل تحديدها وتوزيعها باسـتخدام مقتف نظيري واحد أمرا صعبا إن لم يكن مستحيلا.

---

11 WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

12 US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2016). Water Quality Assessment and TMDL Information. https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains_index.home.

13 Skrzypek G., Mydłowski A., Dogramaci S., Hedley P., Gibson J.J., Grierson P.F. (2015). Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using Hydrocalculator. Journal of Hydrology 523: 781-789. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.010.

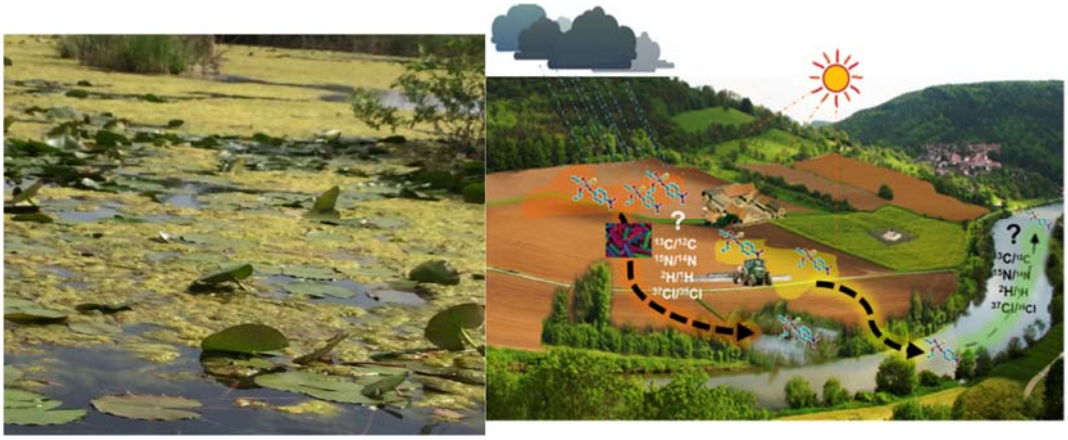
14 Tamburini F., Pfahler, V., von Sperber, C., Frossard E., Bernasconi, S.M. (2014). Oxygen isotopes for unravelling phosphorous transformations in the soil-plant systems: a A review. Soil Science Society of America Journal 78: 38-46:

15 Granger, S.J., Harris, P., Peukert, S., Gou, R., Tamburini, F., Blackwell, M.S.A., Howden, J.K., McGrath, S. (2017). Phosphate stable oxygen isotope variability within a temperate agricultural soil. Geoderma 285: 64-75:

16 Elsner M., Imfeld, G. (2016). Compound-specific isotope analysis (CSIA) of micro pollutants in the environment - current developments and future challenges. Curr. Opin. Biotechnol. 41:60–72.

١٩٣- ويتطلب التوصيف الكامل للمصادر العديدة المحتملة للمغذيات الكبيرة والملوثات الدقيقة الموجودة في النظم الإيكولوجية الزراعية المعقّدة اتباع نهج متكامل متعدّد المقتفيات. وتُحدِّد بصمات نظائر الكربون والأكسجين والنيتروجين والكبريت المستقرة الموجودة في الذوائب خصائص المساهمة النسبية المتأتية من مختلف المصادر في حين تُحدِّد نظائر الهيدروجين والأكسيجين المستقرة الموجودة في جزيئات الماء خصائص دورة المياه (مصادر المياه وفواقد المياه التي تحدث عن طريق التبخّر). ويمكن هذا النهج المتكامل المتبع لتحليل الذوائب والمياه من الفصل بين مسارات انتشار الملوثات ومسارات تدفق المياه. وتتمثل ميزة تطبيق تقنيات النظائر المستقرة في أنها توفّر بديلا تحليليا غير مكلف إزاء الرصد الشامل الذي عادة ما يكون شاقا ومستنزِفا للوقت، وهو ما يتطلّب بنية أساسية راسخة. وبناء على ذلك، استهلّت الشعبة المشتركة بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة مشروعا بحثيا منسّقا لوضع وإثبات مبادئ توجيهية خاصة باستخدام مقتفيات تنظيرية مستقرة متعددة لرصد ملوثات التربة والمياه والمغذيات المتأتية من الزراعة على المستوى الميداني وعلى مستوى الأراضي.

١٩٤- وينبغي لهذا النهج عندما يدمج مع التقنيات التقليدية أن يسهّل عملية اعتماد التدابير الاستصلاحية الملائمة في الدول الأعضاء، وأن يسفر عن ممارسات خاصة بإدارة الأراضي تكون أفضل وأكثر استدامة.



الشكل- دال-٥ إلى اليسار: رسم تخطيطي للملوثات المتأتية من الزراعة في إحدى بيئات النظم الإيكولوجية الزراعية (الصور مقدَّمة من: غوينايل إمفلد، المركز الوطني للبحوث العلمية، فرنسا). إلى اليمين: تأثر جودة المياه في دلتا الدانوب جراء الملوّثات (الصور مقدّمة من: الوكالة-الفاو)

هاء- الصحة البشرية

هاء-١- العلاج بالأشعة المجسمة: تقنية للعلاج الإشعاعي عالية الدقة

١٩٥- العلاج بالأشعة المجسمة هو تقنية إشعاعية متقدِّمة وغير جراحية لإيصال الإشعاع المستهدف بدقة إلى الأورام وإلى بعض الاختلالات الوظيفية التي تصيب الدماغ. والعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم الذي يُسمى أحيانا العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم هو امتداد لنفس التقنية الهادفة إلى إيصال الأشعة إلى مواقع من الجسم خارج الجمجمة.

١٩٦- وسواء تعلق الأمر بالعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم أو العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم، يتم إيصال الجرعة بأكملها في إطار جلسة علاجية واحدة إلى خمس جلسات، في حين يتم إيصال هذه الجرعة عندما يتعلق الأمر بالعلاج الإشعاعي التقليدي على عدد من الأجزاء اليومية الصغيرة تكون موزعة على امتداد عدة أسابيع. وتعدُّ كلا التقنيتين من البدائل المهمّة للجراحة الباضِعَة، خاصة بالنسبة إلى المرضى الذين لا يمكن لهم الخضوع لعمليات جراحية، وكذلك بالنسبة إلى الأورام والاختلالات التي يصعب الوصول إليها أو تكون قريبة من الأعضاء الحيوية. وهما لا تنطويان على عملية شقّ، ولا يترتب عنهما سوى إزعاج بسيط، وتكون فترات الشفاء عقب الخضوع لهما أقصر، وتقل بفضلهما المخاطر التي عادة ما ترتبط بالعمليات الجراحية مثل خطر العدوى.

١٩٧- كما أن تنفيذهما يتطلب خبرات فيما يتعلّق بموضع المرض والمعدات المستخدمة في العلاج. وبالتالي، ينبغي وضع مسار عمل لكلتا التقنيتين يكون مخصصا لموضع المرض والمعدات الجاري استخدامها.

هاء-١-١- المتطلبات التقنية

١٩٨- يتطلب برنامج خاص بالعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم أو العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم توفير عدد كافٍ من الموظفين لضمان أمانه وجودته. ويكون هامش الخطإ عند استخدام هاتين التقنيتين أصغر من ذلك الذي يطرحه العلاج الإشعاعي التقليدي لأنه يتم في إطار كل جزء من العلاج استخدام جرعات أقوى كما أن عدد الأجزاء التي ينطوي عليها العلاج تكون أقل عددا. وبالتالي، يجب للآلة التي تستخدم لإيصال هذا العلاج أن تفي بأكثر المتطلبات التقنية صرامة، بما في ذلك المتطلبات المتعلّقة بالتحمل الميكانيكي والإدخال في الخدمة. وقبل الشروع في تقديم العلاج فعليا، يتم اختبار عملية العلاج برمّتها من البداية إلى النهاية على نموذج للجسم البشري. وعادة ما تنطوي هاتان التقنيتان على التصوير، والتثبيت، والتخطيط، وإيصال العلاج، على النحو المبيَّن أدناه.

التصوير ثلاثي الأبعاد وتحديد موضع الورم رباعي الأبعاد

١٩٩- تحدد الصور العالية الاستبانة موضع الورم وحجمه وشكله، كما أنها تساعد على تحديد الإحداثيات الدقيقة للهدف (الورم)، ويُسترشدُ بها في تخطيط العلاج. ويستخدم التصوير مقطعي حاسوبي، والتصوير بالرنين المغنطيسي، والتصوير مقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي تحقيقا لهذا الغرض. وبوجه عام، يُستخدم المسح بالتصوير المقطعي الحاسوبي لأغراض التصوير الأساسي. وهو يوفّر معلومات دقيقة عن كثافة الإلكترونات، وعموما، لا يشوبه سوى قدر ضئيل من التشوه المكاني. وبالنسبة إلى العديد من أعضاء الجسم المستهدفة في إطار العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم، مثل الرئتين والبطن، وفي حالات الآفات التي تصيب الدماغ والكبد، يحبّذ استخدام التصوير مقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي

الحاسوبي والتصوير بالرنين المغنطيسي بما أنّ أداتي التصوير هاتين تفصل على نحو أفضل بين الأنسجة العادية وغير العادية مقارنة بالتصوير المقطعي الحاسوبي.

التثبيت وتحديد الموضع المريض والحفاظ عليه

٢٠٠- خلال مرحلتي التصوير العلاج، يمكن لموضع الورم أن يتغيّر بسبب الحركات التنفسية أو حركات الجسم، أو يمكن له أن يتغيّر من حيث الشكل والحجم. وبما أن هذا النوع من العلاج يتطلب دقة بالمليمترات، من الضروري توافر أجهزة تثبيت ذات مواصفات محددة خاصة بكل مريض من أجل إبقاء المرضى ثابتين وبالتالي التقليل إلى أدنى حدّ من تحركات العضو المستهدف خلال العلاج. وهنالك العديد من الأساليب الخاصة بتقييم وإدارة ورصد الحركة التنفسية خلال العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم، بما في يشمل التصوير المقطعي الحاسوبي، والتصوير المقطعي الحاسوبي رباعي الأبعاد، والضغط البطني، والتبوّب، وتقنيات حبس النفس. ويتيح التصوير المقطعي الحاسوبي رباعي الأبعاد استبناء حجم الدريئة الداخلية على نحو يأخذ في الحسبان موضع الورم خلال جميع مراحل الدورة التنفسية. وبالإمكان أيضا إجراء تتبع ديناميكي للهدف في الوقت الحقيقي.

أشعة غاما أو حُزم الأشعة السينية عالية التركيز

٢٠١- يمكن إيصال العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم والعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم باستخدام معجل خطي، أو مشارط أشعة غاما أو معجل جسيمات مشحونة. ويمكن للمعجلات الخطية أن تعالج الأورام الكبيرة في جلسة علاج واحدة (من خلال لعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم) أو جلسات علاجية متعددة (من خلال العلاج بالأشعة المجسَّمة).

٢٠٢- وقد اختُرع جهاز مشارط أشعة غاما في السويد في عام ١٩٥١ من قبل لاسكل، وهو جراح أعصاب، وكان هذا الجهاز هو أول جهاز يستخدم لإيصال العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم. ويتضمّن هذا الجهاز على عدّة من مصادر الكوبالت الإشعاعية تُولّد حزما من أشعة غاما عالية التركيز، تُصوّبُ جميعها نحو المنطقة المستهدفة. ويُعدّ هذا الأمر مثاليا فيما يتعلّق بعلاج الآفات، من الصغيرة إلى متوسطة الحجم، التي تقع داخل الجمجمة، والتي لا يتجاوز حجمها ٤ سنتمترات، مع الحرص على تجنّب إيصال جرعات عالية إلى هياكل مثل الجهاز البصري وجذع الدماغ.

٢٠٣- وتتمثَّل الميزة الرئيسية للعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم باستخدام الجسيمات البروتونية الثقيلة المشحونة في أن الحزم تتوقّف عند عمق ذي صلة بطاقتها. ويُتيح عاملا غيابِ جرعة الخروج وحِدّة حزم البروتونات تشعيعا مستهدفا بجرعة متكاملة أقل من الجرعات التي يتم إيصالها عبر التشعيع الفوتوني. ويعدّ هذا النوع من العلاج مُكلفا.

هاء-١-٢- الفريق المطلوب

٢٠٤- يتطلّب إيصال العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم والعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم فريقا من العاملين من ذوي المهارات العالية والتخصصات المتعدّدة، بما يشمل أخصائيي علاج الأورام الإشعاعي، والفيزيائيين الطبيين، والتقنيين المختصين بالعلاج الإشعاعي، واختصاصيي الأشعة، وجراحي الأعصاب، وفيزيائيي الأعصاب. ويقود أخصائيو علاج الأورام الإشعاعي الفريق المعني بإيصال العلاج، ويشاركهم في ذلك في بعض الأحيان جراحو الأعصاب.

٢٠٥- ويحدد أخصائي علاج الأورام الإشعاعي الهدف الذي يتعيّن علاجه والأنسجة السويّة، ويُحدّد الجرعة الإشعاعية المناسبة، ويوافق على خطة العلاج، ويفسر نتائج إجراءات الجراحة الإشعاعية. ويضمن الفيزيائي الطبي أن يتم إيصال الجرعة الإشعاعية المحددة، ويستخدم نظاما محوسبا خاصا بتخطيط العلاج بغية تبسيط خطط العلاج وحساب مدّة التعرّض وإعداد الحزم لمعالجة الهدف (الأهداف) بالجرعة المقررة. ويتولّى التقني المختص بالعلاج الإشعاعي تحديد موضع المريض على طاولة العلاج وتشغيل الجهاز.

هاء-١-٣- الاستطبابات

٢٠٦- تُعالج العديد من الاضطرابات الحميدة والخبيثة والوظيفية التي تُصيب الدماغ من خلال العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم. ويُستخدم العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم، بالنسبة إلى مجموعة متنوعة من الاستطبابات المتنوعة بما يشمل المراحل المبكرة من حالات الإصابة بسرطان الرئة لدى المرضى الذين يتعذر إخضاعهم للعمليات الجراحية، وأولئك الذين يرفضون الجراحة، وحالات انبثاث الرئة، والإصابات الأولى بسرطان الكبد، وحالات انبثاث الكبد، وحالات إصابة الأعضاء الماخضة مثلما هو الحال بالنسبة إلى سرطان البروستاتا، وسرطان البنكرياس، وحالات انبثاث الغدّة الكُظريّة، وحالات الإصابة للمرة الأولى بسرطان الكلى لدى المرضى الذين يتعذر إخضاعهم للعمليات الجراحية، ولحالات مختارة من حالات انبثاث العقد اللمفاوية داخل الصدر والبطن، والإصابات المتكررة والأولى بسرطان الرأس والعنق، والأورام التي تصيب النخاع الشوكي، وحالات انبثاث العظم الفقري.

٢٠٧- وبعد تلقي العلاج، قد تستغرق الأورام الحميدة فترة تمتدّ من ١٨ شهرا إلى عامين اثنين لكي تتقلّص، في حين أن الأورام الخبيثة الانبثاثية تتقلّص على نحو أسرع. وتبقى العديد من الأورام مستقرّة وغير نشطة، ولا يطرأ عليها عليها أي تغيير، وقد تستقر أو تنحسر مع مرور الوقت. وباعتبارهما خيار علاج غير باضع يُستكملُ عادة في إطار زيارة طبية خارجية لمدة يوم أو أسبوع، فإن العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم والعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم لا يمكنهما توفير الموارد في المستشفيات فحسب، بل يمكنهما أيضا إتاحة سبيل للمرضى لاستئناف أنشطتهم العادية اليومية بسرعة أكبر. وتتوقف الآثار الجانبية للعلاج على موضع الورم والجرعة المستخدمة. ولحسن الحظ، عادة ما يُتوقّعُ أن تكون الآثار الجانبية لكل من العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم والعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم ضمن الحدود المقبولة.

هاء-١-٤- مساهمات الوكالة

٢٠٨- في عام ٢٠١٤، استهلت الوكالة مشروعا بحثيا منسقا، هو عبارة عن دراسة عشوائية للعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم مقارنة بالانصمام الكيميائي عبر الأوردة في حالات سرطانة الخلايا الكبدية. ويشارك في هذه الدراسة أحد عشر مركزا من مراكز علاج السرطان من منطقة آسيا والمحيط الهادئ، وأفريقيا، وأوروبا. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الوكالة تدعم مشروعا إقليميا خاصا بالتطبيقات الإكلينيكية للعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم كما أنها تساعد الدول الأعضاء على استهلال خدماتها الخاصة بهذا العلاج أو الارتقاء بها. وقد تم تدريب العديد من أخصائيي علاج الأورام الإشعاعي، والفيزيائيين الطبيين، والمعالجين بالإشعاع من البلدان المشاركة على مختلف جوانب العلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم، بما يشمل توكيد الجودة ومراقبة الجودة.

٢٠٩- وقد أصبح كل من العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم والعلاج الإشعاعي التكتيكي للحيز الفردي للجسم مقبولين على نطاق واسع، كما أنهما يستخدمان على نحو متزايد. وقد رسخت نتائج منشورة متأتية من دراسات

إكلينيكية أجريت كما ينبغي الدور الذي يؤديه هذان العلاجان في مختلف السياقات الإكلينيكية. وبالإضافة إلى ذلك، يجري تقييم كل من هذين العلاجين في إطار عدد كبير من التجارب الإكلينيكية، إما على نحو منفرد، أو بالاقتران مع عوامل مستهدفة أو مع العلاج المناعي، وذلك بالنسبة إلى العديد من حالات الإصابة بالسرطان للمرة الأولى أو الثانية. وتظهر البيانات قبل الإكلينيكية أن من شأن العلاج المناعي أن يعزز من استجابة الأورام الموضعية للعلاج المتواسط بالأشعة، وبالمثل، فإن جرعات أعلى من الإشعاع يمكن أن تعزز من التأثيرات المجموعيّة للعلاج المناعي، مما يجعل العلاجين المذكورين طريقة مثالية فيما يتعلّق بالجمع مع العلاج المناعي. وقد يشكّل العلاجان المذكوران، في العديد من السياقات الإكلينيكية، طريقة علاجية أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنة بالعلاج الإشعاعي التقليدي.

هاء-٢- طب النفس والأعصاب: ثورة التصوير الجزيئي في مرض الزهايمر

هاء-٢-١- الخلفية

٢١٠- الخرف هو عبارة عن مرض تدريجي، لا عَكوس إلى حدّ كبير، تنكُّسي عصبي، يتّصف باختلال الوظيفة العقلية؛ وهو يؤثر في الذاكرة، والتفكير، والسلوك والقدرة على الاضطلاع بالأنشطة اليومية. ويعيش في البلدان النامية ثلثا المرضى الذين يعانون من الخرف والبالغ عددهم ٤٧ مليوناً في جميع أنحاء العالم.

٢١١- وقد يكون من الصعب تشخيص الأعراض الإكلينيكية المميّزة في المراحل المبكرة، بيد أن التقنيات النووية يمكن أن تكون أداة أساسية في تحديد عملية المرض الكامنة قبل أن تصبح الأعراض ملحوظةً بسنوات عدَّة.

٢١٢- وثمة العديد من الأنواع المختلفة من الخرف، ويعتبر مرض الزهايمر المرض الأكثر شيوعا، إذ يمثل قرابة ٦٠ إلى ٧٠٪ من حالات الإصابة بالخرف في العالم. وتشمل الأنواع الشائعة الأخرى من الخرف الخرفَ الوِعائي أو المتعدد السكتات الدماغية الذي يمثل قرابة ٢٥٪ من حالات الإصابة بالخرف، وخرف أجسام لوي الذي يمثل ١٥٪ من حالات الإصابة بالخرف، والخرف الجبهي الصدغي. ويمكن أن ينجم الخرف أيضا عن أمراض مثل مرض باركنسون، ومرض الزهري ومرض كروتزفيلد جاكوب. ويمكن لشخص واحد أن يصاب بأكثر من نوع واحد من أنواع الخرف.

٢١٣- وتشكل الاضطرابات مثل مرض الزهايمر، وهو أكثر الأمراض التي يُخشى من الإصابة بها بعد مرض السرطان، عبئا كبيرا على الصعيد العالمي، كما أن لها أثرا كبيرا من الناحيتين الطبية والاجتماعية-الاقتصادية. والخرف هو واحد من المسببات الرئيسية للإعاقة والاعتماد لدى كبار السن.

٢١٤- وعلى الرغم من عدم وجود علاج معروف للخرف، ثمة العديد من النُهُج الممكن اعتمادها للتصرف حيال الأعراض، وتخطيط الرعاية، وتوفير الإرشادات لمقدِّمي الرعاية وأفراد الأسرة، بحسب العامل المسبب للخرف. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون بعض الأدوية ميدة في المراحل الأولى من المرض مما يؤخّر من تقدّمه، وثمة تدابير أخرى يمكن اتخاذها من شأنها تحسين نوعية حياة الأشخاص المصابين بالخرف وحياة مقدّمي الرعاية لهم. ومقتضى ذلك أنَّ زيادة دقة التشخيص التفريقي أمرٌ ضروري من أجل تحسين رعاية المرضى.

٢١٥- وعادة ما يتم تشخيص الخرف من خلال تقييم سوابق المرض ونتائج الاختبارات الإدراكية المصممة لإظهار النشاط الفكري الواعي، من قبيل التفكير أو الاستدلال أو التذكر. ويُعدُّ الكشف عن قصور المحتمل للقدرات المعرفية الخطوة الأولى نحو تحديد ما إذا كان ينبغي للمريض الخضوع إلى مزيد من التقييم أم لا.

هاء-٢-٢- التشخيص

٢١٦- تطور الطب النووي، الذي يعرف أيضا باسم التصوير الجزيئي، بشكل كبير على مدى العقود القليلة الماضية. فمنذ تسعينات القرن العشرين، أصبح التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني باستخدام المستحضر الصيدلاني الإشعاعي المسمى الغلوكوز المنزوع الفلور ومسحُ التروية الدماغية باستخدام التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد يؤديان دوراً أساسياً في إطار التشخيص الإكلينيكي لمختلف الاضطرابات الدماغية، مثل مرض الزهايمر وغيره من أشكال الخرف.

٢١٧- أمَّا الدراسات المتعلّقة بالتصوير الجزيئي فهي مفيدة في حالات الخرف المعقدة، أو حين توجد أيضاً حالات مرضية أخرى ولا يتبيَّن على الفور أيُّ هذه الأمراض هو الذي ينبغي أن تُعزى الأعراض إليه. وتُعدّ السكتة الدماغية من الحالات المُرضية الشائعة. وقد تؤثر السكتة الدماغية بمفردها على وظائف الدماغ، ويمكن أن تتشابه بعض أعراضها مع الأعراض التي تسبِّبها أمراض الخرف التنكُّسية العصبية. ويمكّن التصوير الجزيئي الأطباءَ من التمييز ما بين الحالتين.

٢١٨- ويُعدُّ التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني من الوسائل الراسخة لتقييم حالة المرضى المصابين بالاضطرابات التنكُّسية العصبية، لا سيما فيما يتعلّق بتشخيص الخرف. وعند استخدام الغلوكوز المنزوع الفلور، يصبح من الممكن تقييم أيض الغلوكوز في الدماغ، مما يتيح التشخيص الملائم في وقت مبكّر، والتشخيص التفريقي، والتعرُّف المبكِّر على الخرف التدريجي، ورصد تطور المرض وتقييم مدى الاستجابة للعلاج.

٢١٩- كما أن استخدام المقتفيات يقدم وجهات نظر جديدة لدراسة الباثولوجيا العصبية لحالة الخرف الكامنة، مثل تراكم البروتينات النشوية، وبروتينات تاو، ووجود التهابات أو اضطرابات وعائية. ويتيح التصوير مقطعي بالانبعاث البوزيتروني الذي تستخدم فيه مقتفيات متنوعة واسماتٍ حيوية موثوقة في حالة الخَرَف، وهو ما يساعد الإكلينيكيين في تشخيص اضطرابات الخَرَف المختلفة، لا سيما في الحالات التي تكون فيها الأمراض متداخلة.

٢٢٠- وفي الآونة الأخيرة، أصبح تصوير الصفائح النشوية باستخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني متاحاً في السياقات الإكلينيكية في العديد من البلدان. ويتيح تصوير الصفائح النشوية باستخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني كشفاً دقيقا في الجسم الحي للصفائح النشوية، ويعدُّ هذا الأمر إحدى العمليات الرئيسية المسبِّبة لمرض الزهايمر. ويمكن لهذا التصوير الذي يعدُّ محدّدا للغاية فيما يتعلّق بتقييم الرواسب البروتينية غير العادية في الدماغ، أن يحسن من التوصيات المقدّمة لأغراض التشخيص والعلاج. ويجري حاليًّا تقييم جدواه الإكلينيكية من خلال تجارب تُجرى في مراكز متعدِّدة.

٢٢١- ومن بين تقنيات تصوير مقطعي بالانبعاث البوزيتروني الجديدة ثمة تقييم بروتينات تاو والتقييم الخاص بالالتهابات. وبروتينات تاو هي عبارة عن بروتينات مرتبطة بأنيبيبات تُعدُّ ضرورية فيما يتعلّق باستقرار الخلايا العصبية وعملها، كما أن شدة فسفرتها وتجمعها غير العادي يعدّان من العوامل المساهمة في الإصابة بمختلف لأمراض التنكُّسية العصبية التي تعرف باسم "أمراض تاو". ومرض الزهايمر هو المرض الأكثر شيوعا من بين هذه الأمراض.

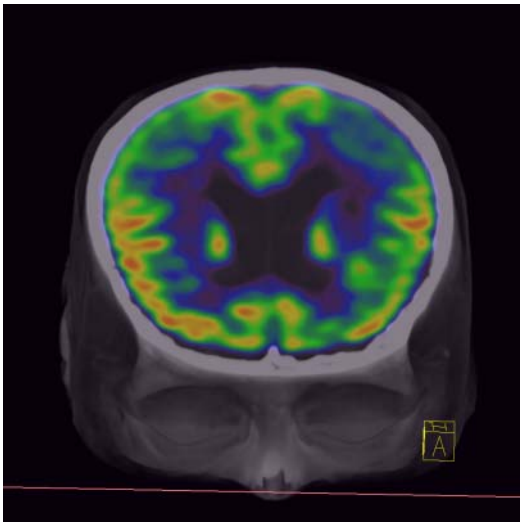
٢٢٢- وهذه التقنيات لا تساعد على تحسين رعاية اليومية للمرضى فحسب، ولكنها تتيح أيضا فهما نقديا بشأن مسار المرض في حدِّ ذاته، وهو ما من شأنه المساعدة على تحسين التطورات العلاجية.

هاء-٢-٣- المبادرات العالمية والتوعية

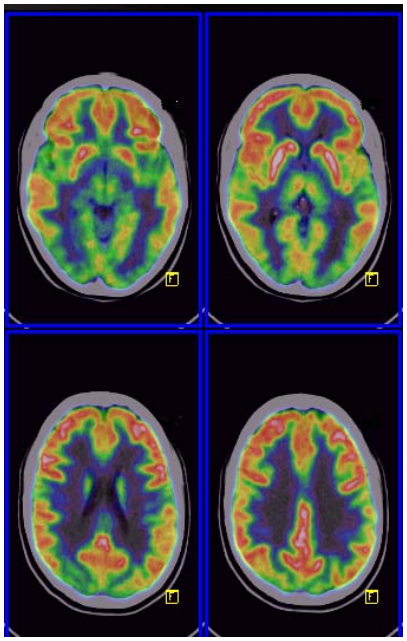
٢٢٣- أطلقت العديد من المبادرات العالمية للتصدّي للعبء الذي يمثله الخرف ومن بين أهم هذه المبادرات ثمة: تحديد الخرف كأولوية عالمية، والتطور السريع المحرز في مجال البحوث الطبية والبحوث المتعلّقة بالتصوير العصبي والهادفة لإيجاد بدائل علاجية جديدة. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل بعض المنظمات على إدراج الخرف في جدول أعمالها، مثلما هو الحال على سبيل المثال بالنسبة إلى مجموعة البلدان السبعة ومبادرتها الخاصة بالإجراءات العالمية لمكافحة الخرف، والمؤتمر الوزاري التابع المنظمة الصحة العالمية بشأن الإجراءات العالمية لمكافحة الخرف، ومؤخرا، مؤسسة بيل وميليندا غيتس.

٢٢٤- وتشارك الوكالة في عمليات التطوير والأنشطة الحالية الهادفة لإذكاء الوعي بشأن الأهمية التي يكتسها الخرف وغيره من الأمراض العصبية. وتشمل هذه الأنشطة مشاريع بحثية منسقة، ودورات تدريبية إقليمية وحلقات عمل إقليمية بشأن الأهمية التي تكتسيها تقنيات الطب النووي في مجال تصوير الأمراض الدماغية الوعائية والأمراض العصبية، بما في ذلك الخرف. وقد أنشأت الوكالة اتحاد المعني بالتصوير العصبي التابع لها بغية استقصاء جدوى التصوير العصبي باستخدام التقنيات الحديثة مثل التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني-التصوير المقطعي الحاسوبي بهدف تشخيص حالات قصور القدرات المعرفية الخفيفة على نحو ملائم، ولتحديد ما إذا كان وجود حالات مرضية من قبيل الإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية، وبالأمراض الدماغية الوعائية، وبالصدمات الدماغية يُسفر عن تشخيص أقل دقة مقارنة بما يكون عليه الحال بالنسبة إلى المرضى الذين لا يعانون من هذه الحالات المرضية. وثمة حاليا قدر محدود من الأدلة العلمية بالنسبة إلى هذه المجموعة الفرعية من المرضى، وبالتالي، فإن المعلومات الجديدة في هذا الشأن ستكون مفيدة بالنسبة إلى الدول الأعضاء. وقد ركزت حلقات العملة المنظمة في إطار مناهج الوكالة للمهنيين المتخصصين في مجال الطب النووي المنعقدة في المدرسة العليا للطب التابعة لجامعة أوساكا في اليابان على الأهمية التي تكتسيها تقنيات الطب النووي في مجال تصوير الأمراض الدماغية الوعائية والأمراض العصبية، بما في ذلك الأورام التي تصيب الدماغ، والصرع والخرف. ونُظّمت أيضا حلقات عمل بشأن التصوير العصبي لتحسين مهارات الفيزيائيين المختصين بالطب النووي على تفسير الدراسات في مجال طب الأعصاب النووي التي تشمل حالات الخرف، وذلك في الأرجنتين، والبرازيل، وتايلند، وسلوفينيا، والفلبين.

٢٢٥- ودعماً للتعليم الطبي المستمرّ، يتوافر على الموقع الشبكي لمجمّع الصحة البشرية التابع للوكالة قسم مكرّس للتصوير العصبي، يتيح لزائريه فرص الاطلاع على حالات دراسية، ومحاضرات، على قائمة ببليوغرافية ومبادئ توجيهية موصى بها، وعلى دليل خاص بالإبلاغ بشأن الصور الطبية والمواد التعليمية المستخدمة في الدورات التدريبية الخاصة بالوكالة.



الشكل هاء-١ استبناء حجمي لدراسة أجريت التصوير مقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي لمريضة بداء السكري تبلغ من العمر ٦٥ عاما مصابة بمرض الزهايمر. وقد أجريت هذه الدراسة في مجال الطب النووي باستخدام الغلوكوز المنزوع الفلور المرقوم بالفلورين-١٨ بهدف تحديد نوع الخرف ومدى استفحاله. (الصور من: الدكتور إيفان دياز، المعهد الوطني لطب الأعصاب وجراحة الأعصاب، المكسيك)



الشكل هاء-٢ مريض يبلغ من العمر ٧٥ عاما له سوابق ارتفاع في ضغط الدم وتظهر عليه الأعراض الإكلينيكية للخرف. وقد أجريت هذه الدراسة في مجال الطب النووي باستخدام الغلوكوز المنزوع الفلور المرقوم بالفلورين-١٨ بهدف تحديد نوع الخرف ومدى استفحاله. وتؤكّد الصورة التغيرات المرتبطة بمرض الزهايمر (الصور من: الدكتور إيفان دياز، المعهد الوطني لطب الأعصاب وجراحة الأعصاب، المكسيك)

واو- البيئة

واو-١- التقنيات النووية المستخدمة في البحوث بشأن المخلفات البلاستيكية الموجودة في البحار

٢٢٦- تُغطي المحيطات أكثر من ٧٠ بالمئة من مساحة سطح الأرض، وهي ترتبط بالأرض ارتباطا لا لبس فيه من حيث إسهامها في مناخ الأرض المؤاتي، ومن حيث التخفيف من بعض للتأثيرات السلبية المترتِّبة على تغيّر المناخ. وإذا ما تمت إدارتها بشكل جيد، يمكن للمحيطات أن تؤدي دورا مهما من حيث توفير مواطن الشغل واستدامة العديد من القطاعات بما فيه منفعة سكان العالم. ومن سوء الحظ أنّ المحيطات هي أيضا المستودع النهائي لكم كبير من التلوث الناجم عن مصادر برية، بما يشمل مختلف تصريفات الملوثات العضوية وغير العضوية الزراعية والبلدية والصناعية. وباعتبارها ناجمة عن هذه الأنشطة، فإن الشظايا البلاستيكية من جميع الأحجام توجد الآن في كل ركن من أركان المحيط، حيث يمكن للحيوانات البحرية من قبيل الكائنات القاعية، والعوالق الحيوانية، والرخويات، والأسماك، والطيور البحرية، والحيتان بلع هذه الجسيمات الأصغر حجما. وفي حين أن تأثير المرئي والبارز للمواد البلاستيكية الكبيرة في الكائنات البحرية قد تم توثيقه كما ينبغي، فإن الضرر الذي من المحتمل أن ينجم عن المواد البلاستيكية الدقيقة، وهي عادة ما تعرّف على أنها جسيمات لا يتجاوز قطرها ٥ مليمترات، [١٧، ١٨] هو أمر أقلّ وضوحا بكثير (الشكل واو-١).

الشكل- واو-١ إنّ مخلفات المواد البلاستيكية، بما في ذلك المواد البلاستيكية الدقيقة، موجودة اليوم في كل ركن من أركان المحيط. وبما أنه يمكن للكائنات البحرية بلعها أو مراكمتها حيويا، من شأن هذه الكائنات أن تشكل خطرا على صحة البشر. الصور مقدَّمة من: ج ل تايسي/الوكالة

٢٢٧- وبغية المساعدة على تقديم المعلومات واستحداث استراتيجيات وأدوات أفضل خاصة بالتخفيف، تستخدم ٧الوكالة التقنيات النووية والنظيرية لتقييم أثر عوامل الإجهاد البيئية الشائعة والناشئة، بما يشمل تأثيرات المواد البلاستيكية في الكائنات البحرية. ويجري حاليا تطوير مثل هذه التقنيات لتقدير حركة المواد البلاستيكية الدقيقة الموجودة في البحر والملوثات العضوية المرتبطة بها داخل النظم الإيكولوجية الساحلية والبحرية، وشبكاتها الغذائية المترابطة. وتتم على نحو فعال إزالة بعض الملوثات العضوية الموجودة على أسطح المواد البلاستيكية

[17] Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin 62, 1596–1605.
هذا المنشور مشار إليه عدة مرات في القسم واو.

[18] United Nations Environment Programme, Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. UNEP, Nairobi (2016).
هذا المنشور مشار إليه عدة مرات في القسم واو.

من مياه البحر؛ وتشكل هذه المواد البلاستيكية الدقيقة والملوثات المرتبطة بها مخاطر إضافية على الكائنات البحرية.[١٩] وتمكّن التقنيات النووية من دراسة "حركيات التمزُّز" أو الكيفية التي تتثبّت بها الملوثات العضوية على سطح المواد البلاستيكية الدقيقة الثوية، فضلا عن العمليات والمعدلات الخاصة بتدهور الملوثات. وعندما يتم استخدامها في أحواض تجريبية متحكّم فيها، فإن هذه الوسائل توفر كمية من شانها إتاحة نافذة فريدة من نوعها تطل على الآثار البيولوجية للمواد البلاستيكية الدقيقة.

٢٢٨- والمواد البلاستيكية الموجودة في البحار هي عبارة عن بوليميرات عضوية اصطناعية عادة ما يكون إنتاجها غير مكلف وتصميمها متينا للغاية. وإن جميع المواد البلاستيكية تصبح في نهاية المطاف هشة وتتفتت إلى شظايا أصغر حجما يمكن أن تتحلل أكثر عندما تتعرّض على نحو مستدام للأشعة فوق البنفسجية. والبوليميرات الأكثر شيوعا في قاع المحيط هي البوليثين العالي الكثافة والالبوليثين المتدني الكثافة، والكلوريد المتعدد الفاينيل، والبوليستيرين، ومتعدد البروبيلين، وتريفثالات الأثيلين المتعدد. وتمثل هذه البوليميرات مجتمعة أكثر من ٩٥٪ من المواد البلاستيكية المنتجة على الصعيد العالمي.[٢٠] وبما أنها مصممة خصيصا لمقاومة التآكل، تعتبر معظم هذه المواد البلاستيكية "صعبة التحلّل" كما أنها تدوم في البيئة البحرية لمدة تقدر بـ١٠٠ عام أو أكثر.

٢٢٩- وتوجد جزيئات المواد البلاستيكية الدقيقة في العديد من الكائنات البحرية، بما في ذلك الأنواع التي نعتمد عليها ونستهلكها كجزء من نظامنا الغذائي اليومي مثل الرخويات والأسماك الزعفية. ونظرا إلى صِغر حجمها، فإن هذه الجزيئات يمكن أن تترسّب داخل أعضاء داخلية معيّنة حيث يمكن لها أن تصبح نواقلَ فعالة لنقل الملوثات كيميائيا.[٢١] وبالإضافة إلى التأثيرات الضارة عن مجرد بلع المواد البلاستيكية الدقيقة، قد تحدث أيضا تأثيرات سمية ثانوية عندما تنفصل الملوثات المزالة من أسطح المواد البلاستيكية الدقيقة، داخل الأعضاء، كما أنها قد تخضع لتغيرات كيميائية البيولوجية لاحقا (الشكل واو-٢). ومن بين الأمثلة على الآثار البيولوجية الضارة الناجمة عن المواد البلاستيكية الدقيقة تعطل الغدد الصماء (أي تغير التعبير الجيني) الذي لوحظ لدى بعض الأسماك التي بلعت دون قصد مركبات بلاستيكية.[٢٢] ولا تزال هنالك ثغرات كبيرة في فهمنا لمصير وسمية المواد البلاستيكية الدقيقة والملوثات المرتبطة بها داخل الجسم البشري، والتي ستحاول البحوث الجديدة التي تجريها الوكالة التطرق إليها.

---

[19] Law, K.L., Thompson, R.C., Microplastics in the seas. Science 345, 144-145 .

هذا المنشور مشار إليه عدة مرات في القسم واو.

[20] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin 62, 2588–2597.

[21] Engler, R.E., The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean. Environmental Science and Technology 46, 12302−12315.

[22] Lusher, A.L., Hollman, P.C.H., Mendoza-Hill, J.J., Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 615. Rome.

الشكل- واو-٢ لم تحظ بعد ظاهرة بلع الكائنات الحية البحرية للمواد البلاستيكية الدقيقة، بما في ذلك بلح البحر والديدان والأسماك والعوالق الحيوانية، (حسبما هو مبيّن هنا)، ببحث كاف.

Cole, M. et al. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton, Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (12), pp 6646–6655.

٢٣٠- وستوفر التقنيات النووية القائمة على المختبرات معلومات حاسمة جديدة بشأن تفاعلات وتأثيرات مجموعة واسعة من جزيئات المواد البلاستيكية الدقيقة والملوثات السمية المرتبطة بها، بما يشمل الملوِّثات العضوية الثابتة، والعناصر النزرة من قبيل الزئبق والكادميوم والرصاص.

٢٣١- وإنّ النظائر المشعة ملائمة بشكل فريد لتقدير حركة المواد البلاستيكية الدقيقة والملوثات المرتبطة بها، وآثارها البيولوجية. وبالإمكان تصميم التجارب التي تُستخدم فيها النظائر المشعّة كمقتفيات للمواد البلاستيكية الدقيقة باستخدام التركيزات المحيطة والكائنات البحرية التي تكتسي أهمية من الناحية التجارية. وعلى هذا النحو، يمكن استخدام جزيء من جزيئات المواد البلاستيكية الدقيقة لتتبّع المعدلات الامتصاص الواقعية التي تقع داخل الكائن، بما يشمل المعلومات عن عمليات تدهور المواد البلاستيكية الدقيقة مع مرور الوقت. وبالمثل، فإن هذه التقنيات الخاصة بالوسم الإشعاعي يمكن استخدامها لتقدير كمية التغيرات الكيميائية البيولوجية التي تحصل داخل الكائنات والحركيات البيولوجية المحتملة فيما يتعلّق بالتنقية.

٢٣٢- ويمكن تطبيق أساليب تحليلية تكميلية من قبيل قياس الطيف الكتلي الخاص بمركّب معيّن، أو قياس الطيف الكتلي بالتقارن الحثي العالي الاستبانة التي تستخدم فيها البصمة النظيرية الخاصة بالملوثات لتتبع مصادرها ومساراتها، لاستكمال الصورة. وبالتالي، من شأن تطبيق التقنيات النووية والنظيرية أن يتيح فرصة فريدة لمعالجة المسائل الهامة المعلّقة بشأن الآثار البيولوجية للمواد البلاستيكية الدقيقة، بما يشمل على سبيل المثال، تأثيراتها المحتملة في أنواع الكائنات البحرية في مختلف مراحل حياتها، وتقييما لآثارها على السكان، والمجتمعات المحلية، والنظم الإيكولوجية، وفهما لحركيات الاستيعاب (مثل التنقل عبر الجدار المعوي)، وفهما أفضل لدورها باعتبارها نواقل مهمة فيما يتعلّق بتعرّض الملوّثات العضوية الثابتة والفلزات النزرة الممتزّة وتراكمها بيولوجيا.

٢٣٣- ومن شأن المعلومات التي تجمع من خلال هذه البحوث الجديدة أن تعزز من فهم الدور الذي تؤديه المواد البلاستيكية الدقيقة والملوثات العضوية المرتبطة بها فيما يتعلّق بالكائنات البحرية التي تكتسي أهمية من الناحية

الاجتماعية والتجارية، وأن تعزز برامج الدول الأعضاء الخاصة بأمان/سلامة الأغذية البحرية التي يجب لها أن تكون معتمدة على الرصد الدقيق وفي الوقت المناسب للصحة الغذائية.

زاي- إنتاج النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية

زاي-١- العلاج بأشعة ألفا: تطبيقات علاجية جديدة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا

٢٣٤- تحتوي المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية على نظائر مشعة تبتعث جسيمات من الطاقة النشيطة، تودع طاقتها بشكل سريع نسبيا على المواد التي تصادفها — وهي خاصية تعرف بالانتقال الخطي العالي الطاقة. ويعتمد مدى تنقل إشعاع الجسيمات والمعدّل الذي يودع به طاقته على المواد على طاقة الجسيم وكتلته. وتتنقل جسيمات بيتا، وهي بالإساس إلكترونات، لمسافة أبعد بكثير من جسيمات ألفا التي لديها نفس الطاقة. وبعبارة أخرى، فإن جزيئات ألفا التي يقدر وزنها بـ ٧٣٠٠ مرة ضعف وزن الإلكترونات، تودع طاقتها ضمن مدى أقصر بكثير من نطاق جزيئات بيتا التي لديها نفس الطاقة. وبالتالي، فإن الانتقال الخطي للطاقة الخاص بجسيمات ألفا أسرع بكثير من ذلك الخاص بجسيمات بيتا.

٢٣٥- وقد استخدم الجيل الأول من المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية، وهي مستحضرات موسومة بنظائر مشعة مبتعثة لجسيمات بيتا، مثل اليود-١٣١، في علاج المرضى المصابين بالسرطان وغيره من الأمراض، لعدة عقود. ورغم أن جسيمات بيتا كانت فعالة في القضاء على الخلايا السرطانية بسبب مداها الطويل، الذي يمتد عادة لبضع مليمترات داخل الأنسجة، فهي لا تزال قادرة، حتى في ظل أمثل الظروف، على إلحاق الضرر بالخلايا السليمة المجاورة للخلايا السرطانية. ومن ناحية أخرى تمتاز جسيمات ألفا بانتقال خطي أعلى للطاقة وبمدى تنقل أقصر داخل الأنسجة الحية، يقدّر عادة ببضع ميكرومترات. ولذلك، هي توفر خيارا أفضل لتشعيع الخلايا المستهدفة خصيصا، والتي يقدّر مداها عادة في حدود بضعة ميكرومترات. ومن شأن العلاج بالمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا أن تكون بمثابة نهج ناجح إذا وُضع المستحضر الصيدلاني الإشعاعي المبتعث لأشعة ألفا بالقرب من نواة الخلية المستهدفة، التي تعتبر الهدف تحت الخلوي. ويكمن التحدي هنا في وضع مبتعث أشعة ألفا على مقربة بشكل كاف من الخلايا المستهدفة لإلحاق الضرر المستهدف المطلوب بها.

٢٣٦- وترد في الجدول ١ مختلف النويدات المشعّة المبتعثة لجسيمات ألفا التي يكون من المحتمل استخدامها في المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. وقد أسفرت الجهود العديدة التي بذلت طيلة العقد الماضي في سبيل استحداث مستحضرات صيدلانية إشعاعية فعالة تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا على بعض النتائج الواعدة للغاية.

الجدول زاي-١- النويدات المشعّة المبتعثة لجسيمات ألفا وتطبيقاتها

النويدة المشعّة	العمر النصفي	وحدة الإنتاج	طريقة الاستخدام
الأكتينيوم-٢٢٥	١٠ أيام	سلسلة اضمحلال اليورانيوم-٢٣٣ الثوريوم-٢٢٩ (اضمحلال ألفي) الراديوم-٢٢٦ (p,2n)	العلاج باستخدام النويدات المشعّة الببتيدية
الراديوم-٢٢٤	٣,٦٦ يوما	الثوريوم-٢٢٨ (اضمحلال ألفي)	العلاج المخفف للآلام لدى المرضى الذين يعانون من أنواع سرطان الثدي وسرطان البروستاتا المنطوية على حالات انبثاث للهيكل العظمي
الراديوم-٢٢٣	١١,٤ يوما	سلسلة اضمحلال الأكتينيوم-٢٢٧ الثوريوم-٢٢٧ (اضمحلال ألفي)	
البزموث-٢١٣	٤٥,٦ دقيقة	سلسلة اضمحلال الأكتينيوم-٢٢٧ مولّد الأكتينيوم/البزموث	العلاج باستخدام النويدات المشعّة الببتيدية
البزموث-٢١٢	٦٠ دقيقة	سلسلة اضمحلال الأكتينيوم-٢٢٧ مولّد الراديوم-البزموث/الرصاص	العلاج بالنويدات المشعة الببتيدية (محتمل)
الأستاتين-٢١١	٧,٢ ساعة	البزموث-٢٠٩ (alpha, 2n)	العلاج المناعي الإشعاعي

زاي-١-١- الراديوم -٢٢٣

٢٣٧- يعد كلوريد الراديوم-٢٢٣ واحدا من المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الإشعاعية من الجيل الأول التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا. وهو يعد كذلك مستحضرا جذابا من بين المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا لأنه عبارة عن جزيئي كيميائي غير عضوي بسيط يسهل إعداده وفهمه. وفي عام ٢٠١٣، وافقت إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية على استخدامه في تخفيف آلام العظام وأصبح متاحا تجاريا منذ ذلك الحين تحت مسمى Xofigo. وإن الراديوم، الذي يشبه الكالسيوم من الناحية الكيميائية، يتراكم داخل أنسجة العظام على نحو كفؤ للغاية. ويتميز كلوريد الراديوم-٢٢٣ بأداء ممتاز بوصفه مستحضرا صيدلانيا إشعاعيا علاجيا يستخدم لتخفيف الألم الذي يعاني منه المرضى المصابون بحالات انبثاث للهيكل العظمي. وهو يستخدم حاليا لعلاج المرضى الذين يعانون من سرطان البروستاتا وسرطان المبيض المنطويين على حالات انبثاث. بيد أن العدد المحدود من منتجيه والتعقّد التقني الذي يتسم به إنتاج الراديوم-٢٢٣ أديا إلى محدودية توافره وارتفاع تكلفته وانخفاض إمكانية الوصول إليه في معظم البلدان، لا سيما في البلدان النامية.

زاي-١-٢- مولّد الأكتينيوم-٢٢٥/البزموث-٢١٣

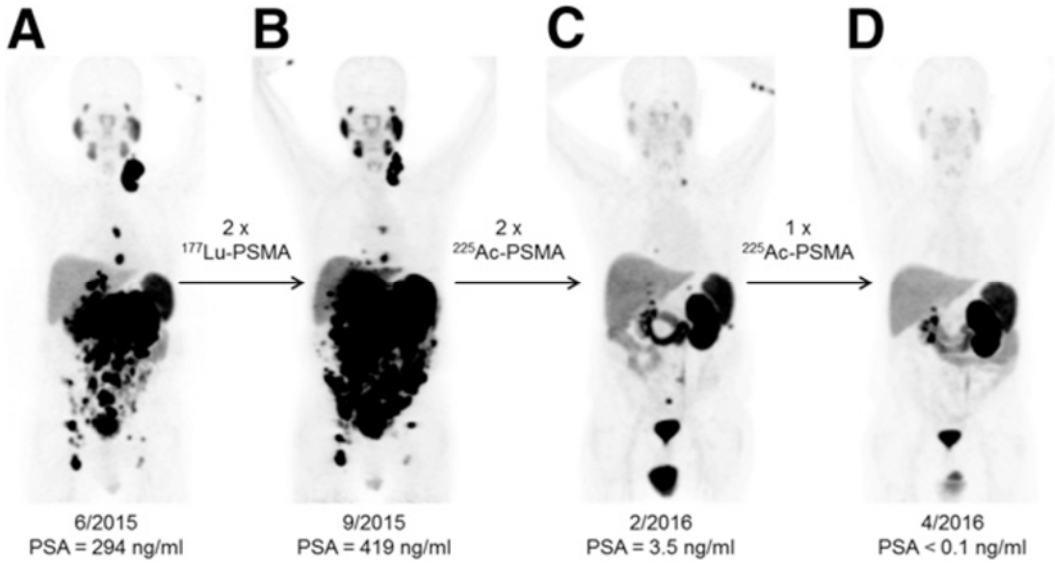
٢٣٨- أدت الخبرة المكتسبة من إنتاج كلوريد الراديوم-٢٢٣ إلى دفع البحوث نحو تطوير مستحضرات صيدلانية إشعاعية يمكن استخدامها لاستهداف الأورام أخرى غير حالات انبثاث العظام عبر استخدام جزيئات مستهدفة مثل الببتيدات والأجسام المضادة. وقد أدى البحث عن نويدة مشعة مبتعثة لأشعة ألفا متعددة التكافؤ يمكن استخدامها لوسم الببتيدات/الأجسام المضادة إلى استكشاف مبتعث أشعة ألفا المسمى البزموث-٢١٣، الذي يبلغ عمره النصفي ٤٥,٦ دقيقة، باعتباره نويدا مشعا "علاجيا تشخيصيا"، اي أنه يؤدي دورا تشخيصيا ودورا علاجيا. ونظرا إلى عمره النصفي القصير والقيود المفروضة على إنتاجه المباشر، فإنّ مولّدا للأكتينيوم-٢٢٥/البزموث-٢١٣ يعدُّ أفضل نهج يمكن اتباعه لإنتاج البزموث-٢١٣ لأغراض الاستخدام داخل صيدليات المشعَّات الموجودة بالمستشفيات. وإن مولّد الأكتينيوم-٢٢٥/البزموث-٢١٣ متاح بنشاط محدد عال، وبفضل خصائصه الكيميائية والمادية المواتية، يتم بالفعل استخدامه في إطار عدد كبير من الدراسات قبل الإكلينيكية وعدة تجارب إكلينيكية. ويثبت هذا النظام ما للعلاج المستهدف بأشعة ألفا باستخدام الببتيدات والجزيئات المناعية بمثابة عوامل استهداف من جدوى وأمان وكفاءة علاجية.[٢٣] وقد أثبتت أساليب إنتاج الأكتينيوم-٢٢٥ باستخدام

23 Morgenstern, A ,.Bruchertseifer, F ,.Apostolidis, C ,.Bismuth-213 and actinium-225 -- generator performance and evolving therapeutic applications of two generator-derived alpha-emitting radioisotopes, Curr Radiopharm. 5(3) (2012) 221-227.

مولّد من مولّدات النويدات المشعة الأكتينيوم-٢٢٥/البزموث-٢١٣ على نحو راسخ في بعض معاهد البحوث. بيد أن هذا النوع من المولّدات غير متوافر على نطاق واسع بسبب عدد منتجيه المحدود. والإنتاج الحالي في معاهد البحوث لا يلبي سوى الطلب المحدود الوارد في إطار الاختبارات الإكلينيكية الجارية في هذا الشأن.[٢٤] وثمة حاجة إلى إجراء تقييم للسوق واستعراض للطلب لتوضيح متطلبات السوق الفعلية.

زاي-١-٣- الأكتينيوم-٢٢٥

٢٣٩- تم مؤخرا تصنيف الأكتينيوم واستخدامه على نحو مباشر في التطبيقات الإكلينيكية، وهو قد أظهر إمكانات قوية بوصفه مستحضرا صيدلانيا إشعاعيا علاجيا تشخيصيا. وقد تم استخدام الأكتينيوم-٢٢٥ مثبتا بنصف مستهدف لخلايا سرطان البروستاتا، وهو المستضد البروستاتي الغشائي، لأغراض علاج المرضى الذين يعانون من سرطان البروستاتا في مراحله المتقدّمة. وقد اجتذبت النتائج (كما هو مبين في الشكل زاي-١) الاهتمام في جميع أنحاء العالم بهذا المستحضر الصيدلاني الإشعاعي. ومن بين القضايا المتعلّقة بإعداد وتوزيع المستضد البروستاتي الغشائي الأكتينيوم-٢٢٥ إنتاجُ وتوافرُ هذا المستضد لأن كافة سبل إنتاجه تنطوي على بعض العيوب. وبغية تلبية الطلب الكبير المحتمل على الأكتينيوم-٢٢٥ في المستقبل القريب، يجب معالجة جميع هذه العيوب. وتعمل المختبرات النووية الكندية على تشييد مولِّد قائم على كمية من الثوريوم-٢٢٩ ذات نشاط إشعاعي يقدَّر بميللي كوري واحد، وقادر على إنتاج كميات من الأكتينيوم-٢٢٥ ذات نشاط إشعاعي يُقدَّر بعشرات الميللي كوري سنويًّا.



الشكل- زاي-١ . صور 68Ga-PSMA-11 PET/CT للمريض مقارنةً بانتشار الورم الأولي (ألف)، وأشارت عملية إعادة تصنيف المراحل بعد دورتين من انبعاث بيتا 177Lu-PSMA-617 إلى تقدُّم المرض. وفي المقابل، أشارت عملية إعادة تصنيف المراحل بعد الدورتين الثانية (جيم) والثالثة (دال) من انبعاث ألفا 225Ac-PSMA-617 إلى استجابة مذهلة.[٢٥]

---

24 McDevitt, M.R. et al., An 225Ac/213Bi generator system for therapeutic clinical applications: construction and operation, Appl Radiat Isot. 50 (1999) 895-904.

25 Clemens Kratochwil, C. et al., 225Ac-PSMA-617 for PSMA-Targeted a-Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer, J Nucl Med 57 (2016) 1941–1944.

زاي-١-٤- الأستاتين-٢١١

٢٤٠- الأستاتين-٢١١ هو مبتعث لأشعة ألفا آخر معروف جيدا له خصائص مواتية للاستخدام في المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. وللاستاتين-٢١١، وهو عبارة عن نويد مشع هالوجيني، قيود من حيث الإنتاج بسبب استخدام السيكلوترونات المعجِّلة لجزيئات ألفا التي نادرا ما تكون متوافرة، وبسبب ضآلة محاصيله وتدني كفاءته من حيث الوسم. وقد قيد هذا الامر من مدى تطبيقه طيلة العقد الماضي.[٢٦] وحتى الآن، لم يتم الإبلاغ بشأن أي تجارب إكلينيكية لمستحضرات صيدلانية إشعاعية قائمة على هذا النويد المشع. وبالتالي، فإن التحدي المتمثل في حل القضايا المرتبطة بالإنتاج والتوافر، فضلا عن تيسير عملية روتينية لإنتاج هذا المستحضر الصيدلاني الإشعاعي، لا يزال قائما.[٢٧]

٢٤١- وقد أدت النجاحات التي تحققت مؤخرا في مجال استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تحتوي على مبتعثات أشعة ألفا إلى اهتمام شديد باستخدام هذه الجزيئات لعلاج حالات الإصابة بالسرطان. ويعدُّ استكشاف كيفية استخدامها على نحو مستدام في جميع أنحاء العالم أمرا ذا صلة ومناسبا من حيث التوقيت.

---

26 Elgqvist, J., Targeted alpha therapy: part I. Curr Radiopharm. 4(3) (2011) 176.

27 IAEA, Report of the Technical Meeting on Alpha emitting radionuclides and radiopharmaceuticals for therapy (2013)http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

www.iaea.org

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Vienna, Austria

الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (٤٣-١+)
الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (٤٣-١+)
البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org

GC(62)/INF/2

18-03536A