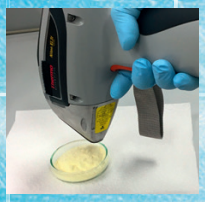
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٧



60 عامًا

تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

IAEA

الصور مقدَّمة من: مختبر باركلي، ومحطة تشرنوبل للقوى النووية، والوكالة، ومتحف ريكز، أمستردام

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٧

GC(61)/INF/4

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
آب/أغسطس ٢٠١٧

IAEA/NTR/2017

تصدير

استجابة لطلبات الدول الأعضاء، تُصدر الأمانة استعراضاً شاملاً يتناول التكنولوجيا النووية في كل عام.

ويُسلِّطُ استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٧ الضوء على أبرز المستجدَّات في العالم في عام ٢٠١٦ في المجالات المختارة التالية: تطبيقات القوى، والبيانات الذرية والنووية، وتطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث، والتقنيات النووية في إدارة الأغذية والتربة، والماشية وتشخيص السرطان وعلاجه، والتطورات الجديدة في دراسة النظائر في مياه الأمطار، وتأثيرات تحمض المحيطات وحفظ التراث الثقافي.

وقُدِّمت مسوَّدة هذا الاستعراض إلى مجلس المحافظين خلال دورته التي عُقدت في آذار/مارس ٢٠١٧ ضمن الوثيقة GOV/2017/2. وقد أُعدّت الصيغة النهائية لهذا الاستعراض في ضوء المناقشات التي جرت خلال اجتماعات مجلس المحافظين وكذلك في ضوء التعليقات التي تلقّتها الدول الأعضاء.

قائمة المحتويات

موجز جامع ١
التقرير الرئيسي ٥
ألف- تطبيقات القوى ٥
ألف-١- القوى النووية اليوم ٥
ألف-١-١- البلدان المستجدة ٧
ألف-١-٢- البلدان المتوسعة ٨
ألف-١-٣- البلدان المشغِّلة ٨
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية ٩
ألف-٣- دورة الوقود ١١
ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية ١١
ألف-٣-٢- ضمان الإمداد ١٦
ألف-٣-٣- المرحلة الختامية ١٧
ألف-٣-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة ١٩
ألف-٤- الأمان ٢٥
باء- البيانات الذرية والنووية ٢٧
جيم- تطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث ٢٩
جيم-١- المعجِّلات ٢٩
جيم-١-١- تقنيات المضخة – المسبار الجديدة المتطوَّرة لتقصّي الضرر الإشعاعي في الموقع . ٢٩
جيم-١-٢- أجهزة جديدة ملائمة بيولوجياً لقياس الجرعات الإشعاعية باستخدام حُزَم الأشعة الأيونية المركزية..... ٣٠
جيم-١-٣- التشتت النيوتروني القائم على المعجّلات ٣١
جيم-٢- مفاعلات البحوث ٣١
دال- الأغذية والزراعة ٣٥
دال-١- التقنيات النووية والتقنيات المتصلة بها للتحقق من صحة الأغذية ٣٥
دال-١-١- التقنيات التحليلية ٣٦
دال-٢- جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية: أسلوب جديد لرصد رطوبة التربة على نطاق منطقة بكاملها ٣٧
دال-٣- رسم الخرائط بالهجين الإشعاعي لتطوير أدوات تحديد التركيب الوراثي لدعم برامج تربية الماشية..... ٣٩
دال-٣-١- تقنيات النظائر المشعة في رسم خرائط جينوم الماشية ٤٠
دال-٣-٢- استخدامات خرائط الهجين الإشعاعي في تربية الماشية ٤٠
دال-٣-٣- الآثار على الأمن الغذائي وأهداف التنمية المستدامة ٤١
هاء- الصحة البشرية ٤١
هاء-١- التطورات في مكافحة سرطان البروستاتا: التشخيص والعلاج ٤١
هاء-١-١- الخلفية ٤١
هاء-١-٢- التشخيص..... ٤٢

هاء-١-٣- التطورات والاتجاهات الأخيرة ٤٢
واو- الموارد المائية ٤٤
واو-١- التطورات الجديدة في استخدام النظائر في دراسة الأمطار
لتشخيص الطقس والمناخ ٤٤
زاي- البيئة ٤٦
زاي-١- استخدام الأدوات النظيرية في دراسة تحمض المحيطات ٤٦
زاي-١-١- تحمض المحيطات – المشكلة الأخرى الناشئة عن ثاني أكسيد الكربون ٤٦
زاي-١-٢- الآثار البيولوجية الناجمة عن تحمض المحيطات ٤٧
زاي-١-٣- استخدام التقنيات النووية لفهم آثار تحمض المحيطات ٤٨
حاء- التكنولوجيات الإشعاعية ٤٩
حاء-١- التراث الثقافي: استكشافه وحفظه باستخدام التكنولوجيات الإشعاعية ٤٩
حاء-١-١- الاستكشاف والفحص ٤٩
حاء-١-٢- استخدام التقنيات القائمة على الإشعاعات لحفظ التُحف الفنية وتقويتها ٥٠

موجز جامع

١- بلغت القدرة العالمية على توليد الكهرباء من القوى النووية ٣٩١ ميغاواط (كهربائي) وفرها ٤٤٨ مفاعلاً قيد التشغيل في نهاية عام ٢٠١٦، وازدادت بذلك القدرة العالمية على توليد الكهرباء بنحو ٨,٣ ميغاواط (كهربائي) منذ عام ٢٠١٥. وأغلقت بشكل دائم ثلاثة مفاعلات في عام ٢٠١٦، وتم ربط عشرة مفاعلات جديدة بالشبكة الكهربائية، وبدأ تشييد ثلاثة مفاعلات. وظلت آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد متمركزة في آسيا، لا سيما في الصين. واستأثرت آسيا بما عدده ٤٠ مفاعلاً من أصل ٦١ من المفاعلات التي كانت قيد التشييد، وبما عدده ٤٧ مفاعلاً من أصل ٥٥ من المفاعلات التي وُصلت بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

٢- ويستخدم حالياً ثلاثون بلداً القوى النووية، والعدد نفسه تقريباً من البلدان يدرس أو يخطط أو يعمل بهمة من أجل إدخال القوى النووية في مزيج الطاقة لديها. ومن أصل ٣٠ بلداً يشغِّل محطات للقوى النووية، يشيِّد ١٣ بلداً محطات جديدة أو يعكف على إنجاز مشاريع التشييد التي توقف العمل فيها من قبل. ووصل عديد من البلدان التي قررت الأخذ بالقوى النووية إلى مراحل متقدمة من إعداد البنية الأساسية لهذا الغرض.

٣- وتظهر توقعات الوكالة في ٢٠١٦ بالنسبة لعام ٢٠٣٠ أن قدرة القوى النووية العالمية ستتسع بما يتراوح بين ١,٩٪ في الحالة المنخفضة و٥٦٪ في الحالة المرتفعة. ويمكن للقوى النووية بما لها من فوائد مؤكدة منخفضة الكربون، وقدرة كبيرة، وخرج قابل للنقل والتوزيع، أن تسهم بدور كبير في تحقيق هدف اتفاق باريس المتمثل في الحد من ارتفاع درجات الحرارة العالمية إلى أقل من درجتين مئويتين مقارنة بعصور ما قبل الصناعة، وتحقيق أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة. ويمكن لتكنولوجيات القوى النووية الابتكارية أن تزيد من خفض انبعاثات غازات الدفيئة وتوسيع دور القوى النووية كي يشمل تطبيقات جديدة.

٤- واستمر تحسين الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم وظل أمان التشغيل في محطات القوى النووية مرتفعاً حسب ما كشفت عنه مؤشرات الأمان التي يشيع استخدامها. ونقَّحت الوكالة منشوراتها الخاصة بمتطلبات الأمان كي تشمل الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي. وجرى أيضاً تنقيح متطلبين آخرين للأمان مرتبطين بالقيادة والإدارة من أجل الأمان، وبأمان مفاعلات البحوث.

٥- واستمر انخفاض أسعار اليورانيوم في تقييد الشركات في جهودها لجمع الأموال اللازمة للاستكشاف ودراسات الجدوى وإطلاق مشاريع تشييد جديدة وتوسيع المشاريع القائمة. ويتبيَّن من الطبعة السادسة والعشرين من "الكتاب الأحمر" الذي يصدر مرة كل سنتين، وهو تقرير مرجعي عالمي رسمي عن اليورانيوم، أن موارد اليورانيوم العالمية تزيد على ما يكفي لتلبية الطلب في سيناريو الحالة المرتفعة المشار إليه أعلاه .

٦- وعملت مرافق الإثراء وغيرها من مرافق دورة الوقود بمستويات ثابتة نسبياً. وبدأ تشييد مرفق خزن جديد لمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في كازاخستان، ويمضي العمل حسب الجدول الزمني المحدَّد.

٧- ووصل وقود المفاعلات النووية المستهلك المخزّن إلى نحو ٢٧٣ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة، ويتراكم بمعدل يبلغ نحو ٧ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً. وبدأ تشغيل خمسة مرافق خزن الوقود المستهلك من مفاعلات القوى خارج مواقع المفاعلات.

٨- ومن المتوقع في السنوات القادمة إجراء كثير من أعمال الإخراج من الخدمة في جميع أنحاء العالم. وقد أغلق بصفة دائمة ١٥٨ مفاعلاً من مفاعلات القوى النووية أو يجري إخراجها من الخدمة. ويجري تشغيل أكثر من ٦٠٪ من جميع المفاعلات العاملة منذ ٣٠ عاماً أو أكثر، ويزيد العمر التشغيلي في ١٥٪ منها على ٤٠ عاماً. وبالرغم من أن بعضها يمكن أن يظل قيد التشغيل لمدة أطول، سيسحب كثير من هذه المفاعلات من

الخدمة في غضون العقدين المقبلين. وبالإضافة إلى ذلك، تم بالفعل إخراج أكثر من ٤٨٠ من مفاعلات البحوث والمجمعات الحرجة وعدة مئات من مرافق دورة الوقود الأخرى من الخدمة أو يجري إخراجها من الخدمة.

٩- واستمرت عدة بلدان في متابعة مشاريع التخلص الجيولوجي العميق من النفايات المشعة. وتنتشر في كل أنحاء العالم مرافق قيد التشغيل للتخلص من جميع فئات النفايات المشعة الأخرى. وازدادت خيارات إعادة التدوير والإعادة إلى بلد المنشأ للتصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة. ووصلت مشاريع التخلص داخل حفر السبر إلى مراحل مختلفة من التطوير في عدة بلدان. ونتيجة لعمليات الإزالة الناجحة، خضع كثير من المصادر المشعة المختومة المهملة لظروف خزن مناسبة.

١٠- وحفَّز التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة التطورات في تقييمات المقاطع المستعرضة للنيوترونات في نويدات نظائر الأوكسجين، والحديد، واليورانيوم، البلوتونيوم التي تتسم بأهميتها الخاصة في التكنولوجيات النووية. ومما عزَّز قاعدة بيانات الشبكة الدولية لمقيمي بيانات الهيكل والاضمحلال النوويين موقع الوكالة الإلكتروني الخاص بالمخطط الحيّ للنويدات، وتطبيق مستعرض النظائر الذي يتيح الوصول إلى المعلومات النووية باستخدام الهواتف الذكية.

١١- وشمل التقدم والابتكار في تكنولوجيا المعجلات تقنيات قياس الطيف الجديدة باستخدام المضخة والمسبار لفحص الضرر الإشعاعي الموقعي، واستحداث أجهزة جديدة ملائمة بيولوجياً لقياس الجرعات الإشعاعية، والتشتت النيوتروني القائم على المعجلات.

١٢- ويزيد عمر ما يقرب من نصف مفاعلات البحوث والمرافق الحرجة في العالم البالغ عددها ٢٤٩ والتي ما زالت قيد التشغيل في ٥٦ بلداً على ٤٠ عاماً. وتكمن التحديات الرئيسية التي يواجهها مجتمع مفاعلات البحوث في إدارة التقادم، واستدامة إمدادات الوقود، والخيارات المتعلقة بإدارة الوقود المستهلك، وتعزيز استخدام مفاعلات البحوث. وتعكف سبعة بلدان على تشييد مفاعلات بحوث جديدة، في حين تخطط عدة بلدان أخرى لإنشاء مفاعلات جديدة أو تنظر في إنشائها، كمرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية الأساسية والبرامج اللازمة للعلوم والتكنولوجيا النووية، بما يشمل مجال القوى النووية. ومما يعزز التعاون الدولي في مجال استخدام مفاعلات البحوث لبناء القدرات النووية مبادرات من قبيل مشروع الوكالة لمختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت ومخطط مركز الوكالة الدولي المسمى القائم على مفاعلات البحوث، وكذلك الشبكات والائتلافات الإقليمية.

١٣- واستمرت أنشطة الحد من اليورانيوم الشديد الإثراء، بما في ذلك إعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ. وحققت برامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الروسي والأمريكي نتائج جديرة بالثناء على مر السنوات.

١٤- وبالرغم من حالات الانقطاع والتحدّيات التشغيلية في بعض المرافق، لم يشهد عام ٢٠١٦ أي نقصٍ كبير في الإمدادات العالمية من الموليبدينوم-٩٩، وهو النظير الطبي الأكثر استخداماً. ويواصل كبار المُنتِجين تقدّمهم في جهود التحويل من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى الإنتاج القائم على اليورانيوم الضعيف الإثراء.

١٥- وأدّت عولمة تجارة الأغذية إلى زيادة الحاجة إلى نُظم فعّالة لمراقبة الأغذية من أجل حماية المستهلكين من الأغذية المغشوشة. ويمكن للغش في الأغذية أن يشكِّل خطراً يهدّد سلامة المستهلك، ذلك أن المنتجات المزيَّفة لا تخضع لنفس الضوابط التي تخضع لها المنتجات الحقيقية وقد تكون مكوِّناتها غير معروفة. وازدادت بسرعة الحاجة إلى أساليب تحليلية لدعم آليات اعتماد الأغذية وتعقبها. ويمكن لمجموعة من التقنيات التحليلية النووية والتقنيات ذات الصلة الفعالة من حيث التكلفة، مثل قياس النظائر المستقرة الموجودة بصورة طبيعية في

العناصر البيولوجية في الأغذية، أن توفِّر معلومات عن منشأها الجغرافي وتقنية إنتاجها. وتيسِّر التطورات في أجهزة التحليل الميسورة التكلفة والمحمولة باليد التحقق من صحة الأغذية في نقاط متعددة على طول سلسلة الأغذية، وتزيد كثيراً من فعالية نُظم المراقبة.

١٦- ويمكن لقياس نسب النظائر المستقرة الموجودة بصورة طبيعية في العناصر البيولوجية في الأغذية أن توفِّر في كثير من الأحيان معلومات عن المنشأ الجغرافي لتلك الأغذية أو تقنية إنتاجها، بينما يوفِّر تحديد مواصفات عناصر الأغذية معلومات هامة عن سلامتها أو سميتها، ويمكن أن يساعد أيضاً في ربط الغذاء بمكان المنشأ. وتثبت هذه التقنيات، بالاقتران مع تقنيات أخرى، مثل قياس الطيف الاهتزازي، وتحليل الحمض الريبي النووي المنزوع الأوكسجين، وتحديد البصمة الميكروبية، قيمتها الكبيرة في التحقق من صحة المواد الغذائية.

١٧- وتستأثر الزراعة بنحو ثلثي استهلاك المياه العذبة في العالم. وسعياً إلى تحقيق الغلات المطلوبة للأعداد المتزايدة من السكان، يجب أن تسعى النُظم الزراعية إلى تحقيق الكفاءة. وجهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية جهاز جديد يمكن أن يأسر المحتوى المائي في التربة ويقيسه كمياً في مساحة شاسعة بدون الجوانب الاقتحامية والتي تتطلب وقتاً طويلاً في نُظم التقييم التقليدية. وتفضي المعلومات المتعلقة برطوبة التربة التي يوفرها هذا الجهاز إلى تحسين إدارة الموارد المائية التي تزداد شُحاً.

١٨- ويمكن للأدوات الجينومية، مثل رقائق ميكروأريي، أن تساعد على تقدير قيم تربية الحيوانات عند ولادتها. وتُحدِّد خرائط الجينوم أماكن السمات المحدَّدة في الكروموسومات، وتمثل أدوات أساسية لتحديد هوية الجينات والواسمات المسؤولة عن خصائص الإنتاج ومقاومة الأمراض. ويمكن لتقنيات النظائر المشعة أن تتغلب على عملية تحديد الجينومات التقليدية التي تستغرق وقتاً طويلاً في الحيوانات عن طريق محاكاة أحداث التأشيب الجيني وتسريع العملية في المختبر.

١٩- وسوف يساعد تطوير الخرائط الإشعاعية الهجينة والأدوات الجينومية وتنفيذها على وضع برامج تربية لتحسين إنتاجية الماشية وتعزيز الأمن الغذائي. ووضعت خرائط عالية الدقة لجينوم الأغنام والجواميس والماعز والخنازير، ويمكن وضع تلك الخرائط لمجموعة من الحيوانات الهامة الأخرى. ويسَّرت الخرائط تطوير رقائق ميكروأريي المستخدمة على نطاق واسع لاستيلاد الماشية من أجل زيادة إنتاج الألبان.

٢٠- يصنَّف سرطان البروستاتا ضمن أكثر أنواع السرطان شيوعاً في الرجال على نطاق العالم، وهو، بالإضافة إلى سرطان الرئة، والكبد، والمعدة، والأمعاء، من بين أكثر أسباب الوفاة الناجمة عن السرطان شيوعاً في الذكور. ويتعرض أكثر من نصف المرضى لانتكاسة بيولوجية كيميائية بعد استئصال البروستاتا أو بعد العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية. وجرى مؤخراً تطوير جزئ جديد يستهدف مستضد الغشاء البروستاتي وهو إنزيم مرتبط بخلايا سرطان البروستاتا. ويمكن لمستضد الغشاء البروستاتي أن يكون هدفاً جزيئياً ممتازاً لتطوير مقتفيات إشعاعية للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني – التصوير المقطعي الحاسوبي نظراً لقدرته على كشف المعاودة المبكِّرة للمرض. وما زالت التجارب الإكلينيكية جارية.

٢١- وتسجِّل الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار التابعة للوكالة النسب النظيرية للأوكسجين والهيدروجين في مياه الأمطار منذ ستينات القرن الماضي. وتظهر بيانات الشبكة المذكورة أن النسب النظيرية تتباين كثيراً تبعاً للموسم. وكشفت الأعمال التي أجرتها الوكالة مؤخراً عن وجود ارتباط كبير بين نسب النظائر والعمليات السحابية المسؤولة عن هطول الأمطار. وسوف توسِّع هذه المعرفة الجديدة كثيراً من فائدة بيانات تلك الشبكة لفهم العمليات المرتبطة بالمناخ على الأجل القصير والعمليات المرتبطة بالمناخ على الأجل الطويل، ويمكن أن تساهم في رصد تغيُّر المناخ والتكيُّف معه.

٢٢- ويؤثر تحمض المحيطات حالياً تأثيراً كبيراً على كثير من الكائنات البحرية، بما فيها الأسماك والمحاريات والعوالق والشعاب المرجانية، وهي جميعاً حاسمة بطرق مختلفة لصحة المحيطات وسلامتها وصحة ورفاه من يعتمدون عليها. وتتناول تجارب تستخدم فيها مجموعة من النظائر المشعة كيفية تأثير التراجع المتوقع في الأس الهيدروجيني لمياه المحيطات على تلك الكائنات البحرية، ويساعد ذلك على بلورة أفكار جديدة عن الآثار الواسعة النطاق التي ينطوي عليها تحمض المحيطات. وهذه المعلومات مطلوبة لوضع توقعات أفضل بشأن التأثيرات المحتملة على مواردنا الساحلية والبحرية في المحيطات المتغيِّرة.

٢٣- ويمكن تسخير التكنولوجيات الإشعاعية للحفاظ على مجموعة كبيرة من المصنفات الثقافية التي لا تقدَّر بثمن. وبينما تساعد تقنيات التصوير الإشعاعي والتصوير المقطعي الحاسوبي في الفحص المفصَّل للتحف الفنية، يساعد العلاج الإشعاعي على التخلص من الحشرات الضارة أو عدوى الطفيليات. ويمكن ترميم المواد والوثائق القيِّمة وتعزيزها بالاستعانة بتكنولوجيات المعالجة الإشعاعية التي أثبتت دورها الفريد المتميِّز في حفظ التراث الثقافي العالمي.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٧

التقرير الرئيسي

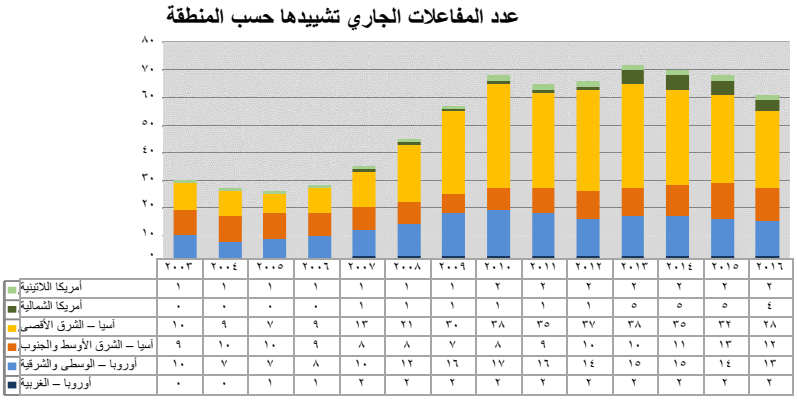
ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦، كان هناك ٤٤٨ مفاعلاً من مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل على نطاق العالم، بقدرة إجمالية بلغت ٣٩١ غيغاواط (كهربائي)[١] (انظر الجدول ألف-١). ويمثل ذلك زيادة بنحو ٨,٣ غيغاواط (كهربائي) من إجمالي القدرة، مقارنة بأرقام عام ٢٠١٥. ومن بين المفاعلات التي مازالت قيد التشغيل، يوجد ٨٢٪ من المفاعلات المهدأة والمبردة بالماء الخفيف، و١٠,٩٪ من المفاعلات المهدأة والمبرَّدة بالماء الثقيل، و٣,٣٪ من المفاعلات المبرَّدة بالماء الخفيف والمهدأة بالغرافيت، و٣,١٪ من المفاعلات المبرَّدة بالغاز. وهناك ثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بالفلز السائل.

٢- وشهد عام ٢٠١٦ ربط عشرة مفاعلات جديدة، وهي جميعاً من مفاعلات الماء المضغوط، بشبكة الكهربائية – أي نفس عدد المفاعلات التي جرى ربطها بالشبكة الكهربائية في عام ٢٠١٥. ويوجد خمسة من هذه المفاعلات في الصين (Changjiang-2 وFangchenggang-2 وFuqing-3 وHongyanhe-4 وNingde-4) وأما العدد المتبقي فيوجد في الهند (Kudankulam-2)، وجمهورية كوريا (Shin-Kori-3)، وباكستان (CHASNUPP-3)، والاتحاد الروسي (Novovoronezh 2-1) والولايات المتحدة الأمريكية (Watts Bar-2).

٣- وعقب إعادة تشغيل المفاعلين Sendai-1 وSendai-2 في عام ٢٠١٥، وهما أول مفاعلين للقوى النووية يستأنفان التشغيل الكامل في اليابان منذ حادث فوكوشيما داييتشي، أعيد تشغيل المفاعلين Takahama-3 وTakahama-4 في كانون الثاني/يناير وشباط/فبراير ٢٠١٦ على التوالي، ولكنهما أغلقا مرة أخرى بعد فترة وجيزة من تشغيلهما. وفي آب/أغسطس ٢٠١٦، أعيد تشغيل المفاعل Ikata-3. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦، أغلقت الوحدة رقم ١ في محطة فورت كالهون للقوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية بصفة دائمة بعد ٤٣ عاماً من التشغيل.



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

الشكل ألف-١- عدد المفاعلات الجاري تشييدها حسب المنطقة (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة: http://www.iaea.org/pris)

---

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

٤- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦، كان هناك ٦١ مفاعلاً قيد التشييد. وظلت حالات التوسع وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد مركزة في آسيا (الشكل ألف -١)، لا سيما في الصين. ويوجد في آسيا ٤٠ مفاعلاً من مجموع عدد المفاعلات التي ما زالت قيد التشغيل، كما يوجد فيها ٤٧ من أصل ٥٥ مفاعلاً جديداً تم ربطها بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

الجدول ألف-١ - مفاعلات القوى النووية العاملة والجاري تشييدها في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦)[أ]

البلد	مفاعلات قيد التشغيل		مفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٦		مجموع الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٦	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط - ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٥	٢٦١١١	٧	٥٥٢٠	١٨٤,١	١٧,١	١٢٢٦	٩
الأرجنتين	٣	١٦٣٢	١	٢٥	٧,٧	٥,٦	٧٩	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٢	٣١,٤	٤٢	٨
إسبانيا	٧	٧١٢١			٥٦,١	٢١,٤	٣٢٢	١
ألمانيا	٨	١٠٧٩٩			٨٠,١	١٣,١	٨٢٤	٧
الإمارات العربية المتحدة			٤	٥٣٨٠				
أوكرانيا	١٥	١٣١٠٧	٢	٢٠٧٠	٧٦,١	٥٢,٣	٤٧٣	٦
باكستان	٤	١٠٠٥	٣	٢٣٤٣	٥,٤	٤,٤	٦٧	١١
البرازيل	٢	١٨٨٤	١	١٢٤٥	١٥,٠	٢,٩	٥١	٣
بلجيكا	٧	٥٩١٣			٤١,٤	٥١,٧	٢٨٢	٧
بلغاريا	٢	١٩٢٦			١٥,١	٣٥,٠	١٦١	٣
بيلاروس			٢	٢٢١٨				
الجمهورية التشيكية	٦	٣٩٣٠			٢٢,٧	٢٩,٤	١٥٢	١٠
جمهورية إيران الإسلامية	١	٩١٥			٥,٩	٢,١	٥	٤
جمهورية كوريا	٢٥	٢٣٠٧٧	٣	٤٠٢٠	١٥٤,٣	٣٠,٣	٤٩٨	١١
جنوب أفريقيا	٢	١٨٦٠			١٥,٢	٦,٦	٦٤	٣
رومانيا	٢	١٣٠٠			١٠,٤	١٧,١	٢٩	١١
سلوفاكيا	٤	١٨١٤	٢	٨٨٠	١٣,٧	٥٤,١	١٦٠	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٤	٣٥,٢	٣٥	٣
السويد	١٠	٩٧٤٠			٦٠,٦	٤٠,٠	٤٤٢	٦
سويسرا	٥	٣٣٣٣			٢٠,٣	٣٤,٤	٢٠٩	١١
الصين	٣٦	٣١٣٨٤	٢١	٢١٦٢٢	١٩٧,٨	٣,٦	٢٤٣	٢
فرنسا	٥٨	٦٣١٣٠	١	١٦٣٠	٣٨٦,٥	٧٢,٣	٢١٠٦	٤
فنلندا	٤	٢٧٦٤	١	١٦٠٠	٢٢,٣	٣٣,٧	١٥١	٤
كندا	١٩	١٣,٥٥٤			٩٥,٧	١٥,٦	٧١٢	٦
المكسيك	٢	١٥٥٢			١٠,٣	٦,٢	٤٩	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨٩١٨			٦٥,١	٢٠,٤	١٥٧٤	٧
الهند	٢٢	٦,٢٤٠	٥	٢٩٩٠	٣٥,٠	٣,٤	٤٦٠	١١
هنغاريا	٤	١٨٨٩			١٥,٢	٥١,٣	١٢٦	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٧	٣,٤	٧٢	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٩	٩٩٨٦٩	٤	٤٤٦٨	٨٠٤,٩	١٩,٧	٤٢١٠	٩
اليابان	٤٢	٣٩٧٥٢	٢	٢٦٥٣	١٧,٥	٢,٢	١٧٨١	٥
المجموع [ب،ج]	٤٤٨	٣٩١١١٦	٦١	٦١٢٦٤	٢٤٧٦,٢		١٦٩٨٢	٥

أ- استُقيت البيانات من نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة (https://www.iaea.org/pris/)

ب- ملحوظة: مجموع الأرقام يشمل البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين:

٦ وحدات، ٥٠٥٢ ميغاواط (كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) قيد التشييد؛

٣٠,٥ تيراواط- ساعة من الكهرباء المولَّدة نووياً، أي ما يمثّل ١٣,٧٪ من إجمالي الكهرباء المولَّدة.

ج- يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ أشهر)؛ وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)؛ وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)؛ وتايوان، الصين (٢١٢ عاماً وشهرا واحدا).

ألف-١-١- البلدان المستجدة

٥- استمرت في الإمارات العربية المتحدة أعمال تشييد جميع المفاعلات الأربعة في أول محطة للقوى النووية في براكة. ومن المقرر أن يبدأ التشغيل التجاري للوحدة ١ في عام ٢٠١٧، وستحذو حذوها الوحدات الثلاث الأخرى في كل سنة من السنوات الثلاث التالية. وتم الانتهاء في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ من بعثة من بعثات الوكالة الخاصة بالخدمات الاستشارية الدولية المعنية بالحماية المادية. ووقعت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية وشركة كوريا للقوى الكهربائية اتفاق مشروع مشترك من أجل شراكة تعاون طويلة الأجل. والتمست الإمارات العربية المتحدة توجيه الوكالة بشأن الطريقة التي يمكن أن يساعد بها البحث والتطوير في ضمان استدامة برنامجها للقوى النووية ومؤسساتها ذات الصلة.

٦- واستمرت أعمال التشييد في الوحدتين اللتين تتألف منهما أول محطة للقوى النووية في بيلاروس والتي تقع في اوستروفيتس، ومن المقرر إدخال الوحدتين في الخدمة في السنتين ٢٠١٩ و٢٠٢٠. وتسلَّم الموقع وعاء ضغط المفاعل للوحدة ١ في نهاية عام ٢٠١٦. وأوفدت الوكالة في عام ٢٠١٦ بعثة من بعثات خدمة الاستعراضات الرقابية المتكاملة.

٧- ووقعت بنغلاديش عقداً لأعمال الهندسة والشراء والبناء مع شركة Atomstroyexport في الاتحاد الروسي في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥. وفي تموز/يوليه ٢٠١٦، صدرت رخصة للموقع وأبرم اتفاق ائتماني حكومي دولي مع الاتحاد الروسي. ومن المتوقع أن تدخل في الخدمة الوحدة رقم ١ من محطة روبور للقوى النووية في عام ٢٠٢٣، والوحدة رقم ٢ في عام ٢٠٢٤.

٨- ووقعت مصر اتفاق تطوير مشروع مع الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" في الاتحاد الروسي في شباط/فبراير ٢٠١٥ من أجل تشييد محطة جديدة للقوى النووية في الضبعة، ووقعت منذ ذلك الحين اتفاقاً مالياً آخر على الصعيد الحكومي الدولي مع الاتحاد الروسي. ومن المقرر الانتهاء من إنشاء الوحدة الأولى في موقع الضبعة في عام ٢٠٢٥، ومن المقرر الانتهاء من الوحدات الثلاث الأخرى بحلول عام ٢٠٢٧. وأنشأ الأردن فريقاً استشارياً دولياً لاستعراض التقدم المحرز في تنفيذ برنامجه النووي، وتعاقد مع خبراء استشاريين للامساك بزمام إعداد قرار الاستثمار المزمع لعام ٢٠١٨. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦، صادقت الجمعية الوطنية لفييت نام على قرار الحكومة بشأن إلغاء محطات القوى النووية في البلد. وكانت الجمعية الوطنية قد وافقت أول الأمر في عام ٢٠٠٩ على خطط لتشييد محطتين للقوى النووية تبلغ قدرتهما معاً ٠٠٠ ٤ ميغاواط.

٩- وتعمل البلدان "المستجدة" التي تدرس أو تخطط أو تعمل بنشاط من أجل إدخال القوى النووية في مزيج الطاقة لديها مع الوكالة في تطوير البنية الأساسية النووية الضرورية. وباتخاذ هذه البلدان قراراتها السيادية بشأن اختيار القوى النووية فإنها تعمل مع البلدان المورِّدة لبناء محطاتها المقبلة للقوى النوية. وتؤدي الوكالة، باستخدام منهجية محدَّدة يجسدها نهج المعالم البارزة، بدور هام في إرساء برامج مأمونة وآمنة ومستدامة. وتساعد الوكالة هذه الدول الأعضاء من خلال بعثات استعراضات النظراء وبعثات الخبراء، والدورات التدريبية، وأدوات النمذجة التي تغطي منهجياً قضايا البنية الأساسية النووية التسع عشرة التي يشملها نهج المعالم البارزة. وبعد إيفاد بعثتين من بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية وبعثتين من بعثات المتابعة في عام ٢٠١٦، وصل مجموع عدد بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية التي جرى إيفادها منذ انطلاقها في عام ٢٠٠٩ إلى ٢١ بعثة في ١٥ دولة عضواً.

ألف-١-٢- البلدان المتوسعة

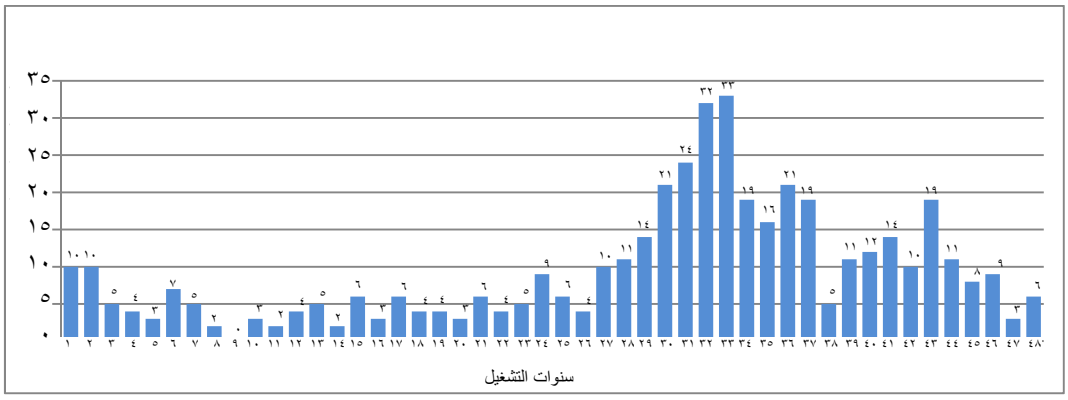
١٠- أصدرت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة رخصة تشغيل لمدة ٤٠ عاماً إلى شركة Tennessee Valley Authority لتشغيل الوحدة ٢ من مفاعل Watts Bar التي ربطت بالشبكة الكهربائية في حزيران/يونيه وبدأ تشغيلها التجاري في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦. وموقع المفاعل Watts Bar هو الأول الذي يمتثل لأوامر الهيئة الرقابية النووية المتصلة بحادث فوكوشيما بشأن استراتيجيات التخفيف من الحوادث. وكان قد تم الانتهاء من ٨٠٪ من أعمال تشييد الوحدة ٢ في مفاعل Watts Bar عندما توقفت في ثمانينات القرن الماضي، وحقق تطوير هذه المنشأة وفورات في الوقت والتكلفة بالمقارنة مع بدائل قدرة الحمل القاعدي الجديدة.

١١- ووافق مجلس إدارة شركة كهرباء فرنسا في تموز/يوليه ٢٠١٦ على مشروع 'هينكلي بوينت ج' لتشييد محطة قوى نووية بقدرة تبلغ ٣ ٢٠٠ ميغاواط (كهربائي) تضم مفاعلين أوروبيين يعملان بالماء المضغوط في سمرست بانكلترا، ووافقت عليه في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦ حكومة المملكة المتحدة بعد إدخال بعض الشروط الجديدة بشأن الاستثمار. ويبلغ العمر المتوقع للمحطة ٦٠ عاماً. وتتوقع شركة كهرباء فرنسا أن يدخل المفاعل الأول طور التشغيل في مطلع عام ٢٠٢٦، أي بعد حوالي عشر سنوات من اتخاذ قرار الاستثمار وإصدار الموافقة الحكومية.

١٢- وشهد عام ٢٠١٦ البدء في أربع عمليات تشييد على النحو التالي: محطة كراتشي الثالثة للقوى النووية (KANUPP-3) في باكستان، وTianwan-6 و Fangchenggang-4 في الصين.

ألف-١-٣- البلدان المشغِّلة

١٣- ما زال ٢٩٣ مفاعلاً، من أصل ٤٥٠ مفاعل قوى نووية، في الخدمة منذ ٣٠ عاماً أو أكثر. ويخضع المفاعل عندما يبلغ نهاية عمره التصميمي لاستعراض للأمان وتقييم لتقادم هياكله ونُظمه ومكوناته الأساسية بغرض التحقق من صحة الترخيص له بالعمل لفترات تتجاوز مدة الخدمة المزمعة أصلاً وتجديد ذلك الترخيص. واختار المالكون/المشغلون في السنوات الأخيرة عدداً من مفاعلات القوى النووية التي ما زالت تراخيص تشغيلها سارية أو التي كان يمكن أن تحصل على تمديد لتراخيص تشغيلها، لإغلاقها مبكراً عن الموعد المقرر وكانت العوامل الاقتصادية في حالات كثيرة سبباً رئيسياً وراء ذلك.



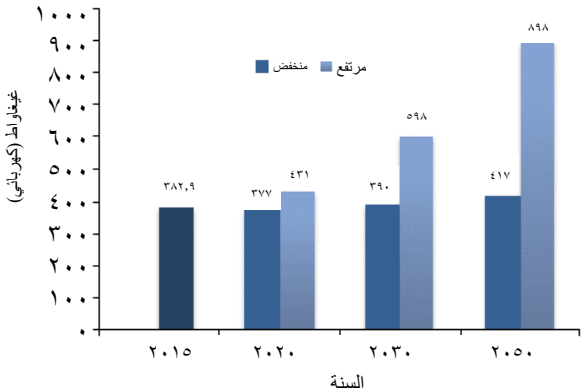
الشكل ألف-٢ توزيع مفاعلات القوى التي ما زالت قيد التشغيل حسب العمر، حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦ (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة: www.iaea.org/pris)

١٤- ومن المرجح أن يكون نصف جميع محطات القوى النووية العاملة في الولايات المتحدة قد عمل لمدة ٦٠ عاماً بحلول عام ٢٠٤٠ إذا مدَّدت الهيئة الرقابية النووية تراخيص تشغيلها بما يتجاوز عمرها التصميمي الأصلي البالغ ٤٠ سنة. وتنظر عدة مرافق في تمديد العمر التشغيلي لمحطاتها لمدة ٢٠ سنة أخرى، ويتطلب ذلك تجديد رخصة ثانية لسنوات التشغيل الإضافية. وتُعد محطة Peach Bottom للقوى النووية التابعة لشركة إكسلون في بنسلفانيا ومحطة Surry للقوى التابعة لشركة دومينيون في فيرجينيا أول محطتين للقوى النووية في الولايات المتحدة ستسعيان إلى تجديد رخصتي تشغيليهما لما مجموعه ٨٠ عاماً.

١٥- ورفضت في استفتاء أقيم في ٢٠ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ سياسة سويسرا بشأن الإغلاق التدريجي لمحطات القوى النووية التي اقترحت فرض حد دستوري قدره ٤٥ عاماً على العمر التشغيلي لمحطات القوى النووية. وبلغت نسبة الكهرباء المولدة من القوى النووية في سويسرا ٣٣٪ في عام ٢٠١٥.

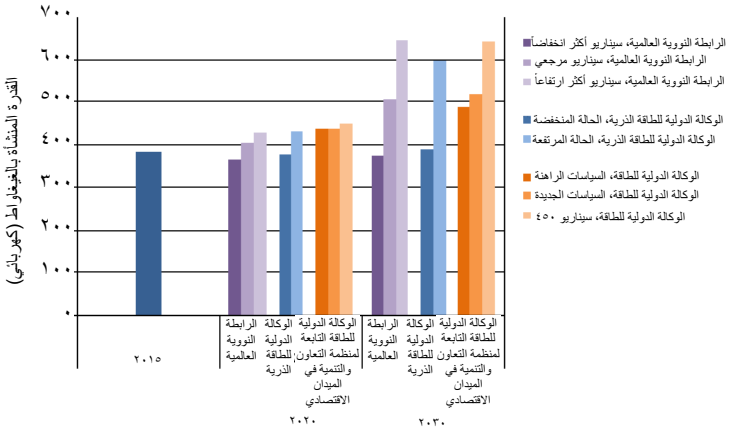
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

١٦- تشير التوقعات إلى أن القوى النووية ستستمر في الاتساع عالمياً خلال السنوات المقبلة حتى في ظل تباطؤ وتيرة النمو في المدى القصير نتيجة للمنافسة من أسعار الوقود الأحفوري المنخفضة ومصادر الطاقة المتجددة. ووفقاً لتوقعات الوكالة لعام ٢٠١٦ (الشكل ألف-٣)، واستنادا إلى القدرة المنشأة التي بلغت في نهاية عام ٢٠١٥ ٣٨٢,٩ غيغاواط (كهربائي)، ستصل القدرة العالمية للقوى النووية ٥٩٨ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠، مسجلة بذلك زيادة نسبتها ٥٦٪ في سيناريو الحالة المرتفعة. غير أن القدرة النووية العالمية في سيناريو الحالة المنخفضة ستتسع في عام ٢٠٣٠ بما نسبته ١,٩٪ لتصل إلى ٣٩٠ غيغاواط (كهربائي). وستكون القدرة الجديدة الفعلية المضافة خلال السنوات الأربع عشرة المقبلة أكبر كثيراً من الزيادة الصافية في القدرة النووية العالمية، على أن يؤخذ في الاعتبار استبدال كثير من مفاعلات القوى النووية الجاري إخراجها من الخدمة. وفي سيناريو الحالة المنخفضة، سيضاف نحو ١٥٠ غيغاواط (كهربائي) من القدرة الجديدة، بينما سيرتفع الرقم في سيناريو الحالة المرتفعة ليصل إلى ٣٠٠ غيغاواط (كهربائي). وبتوسيع تلك التوقعات لتشمل عام ٢٠٥٠، ستزداد القدرة النووية إلى ٨٩٨ غيغاواط (كهربائي) في سيناريو الحالة المرتفعة بينما ستكون مساوية تقريباً للمستوى الحالي في سيناريو الحالة المنخفضة.



الشكل ألف-٣- توقعات القدرات النووية العالمية (المصدر: تقديرات الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة الممتدة حتى عام ٢٠٥٠، سلسلة البيانات المرجعية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية – العدد ١، ٢٠١٦).

١٧- وهذه التوقعات يعدها فريق من الخبراء تنشئه الوكالة كل سنة، وتشتق التوقعات عن طريق تجميع التقييمات الخاصة بكل بلد على حدة. ويستعرض الخبراء جميع المفاعلات العاملة، والتمديدات الممكنة للتراخيص، وحالات الإغلاق المعتزمة، ومشاريع التشييد المعقولة المتوقعة للعقود القليلة المقبلة. ولا يقصد منها أن تكون تنبؤية ولا أن تعكس مجموعة السيناريوهات المستقبلية المحتملة بكاملها بدءاً من أدنى الحالات الممكنة وانتهاءً بأعلى هذه الحالات. وبالرغم من أوجه عدم التقين الكبيرة التي تعتري تلك التوقعات، فإن سيناريوهات الحالة المرتفعة التي تُعدها الوكالة الدولية للطاقة الذرية، والوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، والرابطة النووية العالمية، تكشف جميعاً عن زيادة محتملة تتراوح بين ٦٠٠ و٧٠٠ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠ في قدرة القوى النووية العالمية (الشكل ألف-٤).



الشكل ألف-٤- مقارنة بين آخر توقعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشأن قدرات القوى النووية، وسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي في عام ٢٠١٦ وتوقعات الرابطة النووية العالمية (تستند أرقام الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي إلى إجمالي القدرات).

١٨- ومع بدء نفاذ اتفاق باريس في ٤ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦، يلزم حالياً من الأطراف إعداد مساهمات متعاقبة محددة وطنياً تعتزم تحقيقها من أجل الإبقاء على الزيادة في درجات الحرارة العالمية أقل من درجتين مئويتين مقارنة بمستويات عصور ما قبل الصناعة وتعميم تلك المساهمات والحفاظ عليها[٢]. ويشكِّل اتفاق باريس الإطار لزيادة جهود التخفيف من آثار تغيُّر المناخ تدريجياً إلى أن يتم الوفاء بهدف الدرجتين المئويتين. وبات ذلك ضرورياً في الوقت الذي أخفقت فيه خطط التخفيف الوطنية الحالية كثيراً في بلوغ هدف الدرجتين المئويتين[٣].

١٩- ويمكن للقوى النووية أن تساهم بدور كبير في الوفاء بهدف الدرجتين المئويتين وتحقيق أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة[٤] نظراً لفوائدها المؤكدة المنخفضة الكربون وقدرتها الكبيرة وخرجها القابل للنقل والتوزيع[٥]. غير أن الاستفادة الكاملة من إمكانات القوى النووية تتطلب توسيعاً كبيراً يناسب توقعات الحالة

---

[٢] *اتفاق باريس* متاح في http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.

[٣] كُتيِّب *الوكالة المعنون تغيُّر المناخ والقوى النووية لعام ٢٠١٦* متاح في

http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11090/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2016.

[٤] مزيد من المعلومات عن *أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة* متاح في https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs.

[٥] منشور الوكالة المعنون *القوى النووية والتنمية المستدامة* (٢٠١٦) متاح في

http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11084/Nuclear-Power-and-Sustainable-Development

المرتفعة المذكورة أعلاه (الوصول إلى ٨٩٨ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠). وينطوي تحقيق هذه القدرات على تحديات لأن المحطات القائمة تحتاج إلى تطوير وتمديد لأعمارها بما يسمح بمواصلة تشغيلها، ويتعيَّن الاستعاضة عن القدرة النووية القديمة، ويلزم إطلاق موجة من التصاميم الجديدة لدعم الطلبات المتزايدة على الطاقة في الاقتصادات النامية. وهذا المعدل من الاستثمار ليس أمراً غير مسبوق، وإن كان من المرجح أن ذلك سيتطلب دعماً حكومياً وترتيبات تعاقدية جديدة لتقليص المخاطر على المستثمرين، وتحديد سعر لانبعاثات الكربون لتحسين اقتصادات البدائل المنخفضة الكربون، مثل القوى النووية.

٢٠- وحدَّد اتفاق باريس الابتكار باعتباره أداة رئيسية للوفاء بهدف الدرجتين المئويتين. ويمكن لتكنولوجيات القوى النووية الابتكارية، بما يشمل التصاميم التطورية، والمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو المفاعلات النمطية، ودورات الوقود المتطورة، أن تساهم بمزيد من الكفاءة في الحد من انبعاثات غازات الدفيئة وتوسيع دور القوى النووية ليشمل تطبيقات جديدة. من ذلك على سبيل المثال أن القوى النووية يمكن أن تزيد من تقليص انبعاثات الكربون عن طريق تزويد العمليات الصناعية بالحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية، كما يمكن استخدامها في إنتاج المياه المحلاة للمدن في المناخات الجافة. ومع ذلك، يلزم إجراء مزيد من الاستثمار في مجالات البحث والتطوير والإيضاح.

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية

موارد اليورانيوم وإنتاجه

٢١- صدرت في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ الطبعة السادسة والعشرون من المنشور الذي تصدره وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي بالاشتراك مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية كل سنتين بعنوان *اليورانيوم ٢٠١٦: موارده وإنتاجه والطلب عليه* الذي يُعرف أيضاً باسم "الكتاب الأحمر"[٦]. ومن الاستنتاجات الرئيسية التي توصل إليها هذا التقرير أن الموارد المحدَّدة حالياً القابلة للاسترجاع بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم تزيد على ما يكفي لتلبية الطلب في سيناريوهات الحالة المرتفعة التي سبقت الإشارة إليها. وتكمن التحديات الرئيسية في الاستثمار والخبرة المطلوبين لاستخدام تلك الموارد في الإنتاج. ومما يفاقم ذلك حالة الكساد التي تسود سوق اليورانيوم حالياً. وتكفي قدرات الإنتاج الحالي والملتزم به لتلبية الطلب في سيناريو الحالة المرتفعة. وتكفي قدرات الإنتاج القائم والملتزم به لتلبية الطلب في سيناريو الحالة المنخفضة.

٢٢- ولم تشهد أسعار التسليم الفوري لليورانيوم انخفاضاً بهذا المستوى منذ عام ٢٠٠٤. وتراوحت الأسعار بين ٧٥ دولاراً و٤٢ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم في عام ٢٠١٦. وأدّى انخفاض الأسعار إلى تقييد شديد في قدرة الشركات على جمع أموال للاستكشاف وإجراء دراسات الجدوى وإطلاق مشاريع توسعية جديدة.

٢٣- وظل كثير من مشاريع اليورانيوم متوقفاً أو انطوى على آثار مالية منخفضة في الوقت الذي أُجريت فيه أعمال الاختبار والدراسات الإضافية، وخضعت بعض المشاريع التي افتتحت أو التي وصلت إلى مراحل متقدمة

---

[٦] *Uranium 2016: Resources, Production and Demand* (*اليورانيوم في عام ٢٠١٦: موارده وإنتاجه والطلب عليه*) متاح في http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf.

من التشييد لعمليات رعاية وصيانة. وفي عام ٢٠١٥، تم إنتاج ٤٩٦ ٦٠ طناً من فلز اليورانيوم، وهو أعلى مستوى للإنتاج خلال العقد الأخير، مقابل ٠٤١ ٥٦ طناً من فلز اليورانيوم في عام ٢٠١٤، وأعلى من إنتاج عام ٢٠١٣ الذي بلغ ٣٣١ ٥٩ طناً من فلز اليورانيوم.

٢٤- وما زالت كازاخستان أكبر منتج لليورانيوم في العالم. وسجل الإنتاج الذي يأتي كله تقريباً من مناجم النض الموقعي، زيادة سريعة فيما بين عامي ٢٠٠٠ و٢٠١٢، وأما الزيادات الأخيرة فكانت متواضعة، ومن المتوقع إنتاج ٤٥٥ ٢٤ طناً من فلز اليورانيوم في عام ٢٠١٦، وتشير التنبؤات إلى أرقام مماثلة في عام ٢٠١٧.

٢٥- وتبلغ حالياً قدرة الإنتاج السنوي في سيجار ليك في كندا (منجم اليورانيوم الأعلى مرتبة في العالم الذي بدأ إنتاجه التجاري في أيار/مايو ٢٠١٥) ٠٠٠ ٥ طن من فلز اليورانيوم سنوياً، ومن المتوقع أن تزداد قدرة الإنتاج السنوية إلى ٩٠٠ ٦ طن من فلز اليورانيوم سنوياً بحلول عام ٢٠١٨. وفي ضوء استمرار نتائج استكشاف اليورانيوم المشجعة في حوض أثاباسكا، حافظت كندا على موقعها بصفتها ثاني أكبر منتج في العالم.

٢٦- واستمر في عام ٢٠١٦ إدخال منجم هوساب لليورانيوم الذي جرى تشييده مؤخراً في ناميبيا في الخدمة، ووصل إلى نقطة الإنتاج الأوَّلي، ومن المتوقع أن يزداد معدل الإنتاج خلال الأشهر الأربع والعشرين السابقة على عام ٢٠١٨. ويمكن أن تصل القدرة الكاملة إلى ٧٧٠ ٥ طناً من فلز اليورانيوم سنوياً، مع عمر محتمل لأكثر من ٢٠ عاماً. وواصل منجما Rössing وLanger Heinrich لليورانيوم عمليات التشغيل خلال عام ٢٠١٦. واستمرت بصورة مخففة أعمال دراسة الجدوى في بعض مكامن اليورانيوم الأخرى في ناميبيا.

٢٧- وفي أستراليا، استمر منجم يورانيوم فور مايل للنض الموقعي في العمل بقدرة سنوية اقتربت إنتاجيتها الكاملة من ٠٠٠ ١ طن من فلز اليورانيوم سنوياً. وفي مشروع Ranger، استمرت الجهة المشغِّلة، وهي شركة موارد الطاقة الأسترالية، في معالجة مخزوناتها من الركاز للوفاء بالتزامات البيع، وتمضي قدماً نحو إعادة تأهيل أجزاء الموقع التي لم تعد قيد التشغيل. وانخفض الإنتاج خلال عام ٢٠١٦ إلى أقل من ٥٠٠ ٢ طن من اليورانيوم مقابل ما تراوح بين ٠٠٠ ٤ و٠٠٠ ٦ طن من اليورانيوم سنوياً فيما بين عامي ١٩٩٧ و٢٠٠٩. وفي ظل الترتيبات الحالية، يجب أن تتوقف أعمال التنجيم والمعالجة بحلول كانون الثاني/يناير ٢٠٢٠، ويتعيَّن الانتهاء من أعمال إعادة التأهيل في غضون خمسة أعوام أخرى. وواصل مشغلو منجم أولمبيك دام للنحاس واليورانيوم والذهب والفضة العمليات التقليدية بينما أُجريت اختبارات أخرى لخيار النض التكويمي لجزء من خامه. وقطعت أشواط في الدراسات وعمليات الموافقة الخاصة بالعديد من مكامن اليورانيوم في غرب أستراليا، ولكن لم يتم الإعلان عن أي مواعيد محددة للتشييد والافتتاح.

٢٨- وتحقق مزيد من التقدم في دراسات الجدوى والموافقات الخاصة بمشروع عناصر الأتربة النادرة والفلزات الأساسية واليورانيوم في مستودع Kvanefjeld في غرينلاند بمملكة الدانمرك. وعقدت في كوبنهاغن في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ حلقة العمل الثامنة لتقييم الموارد المعدنية من أجل تقييم موارد اليورانيوم المحتملة في البلد.

٢٩- وواصلت الصين أنشطتها الخاصة باستكشاف اليورانيوم وزادت نفقات التطوير على المستوى الوطني وفي الخارج على حد سواء. وأفادت التقارير بزيادة كبيرة (أكثر من ١٠٠٪) في الموارد الاستدلالية نتيجة لتكثيف جهود الاستكشاف في العديد من الأحواض الرسوبية داخل البلد. واستمر تخصيص نفقات كبيرة لأعمال

التطوير (أكثر من ١,٥ مليار دولار في السنتين ٢٠١٤ و٢٠١٥) وذلك في المقام الأول بسبب تطوير منجم هوساب في ناميبيا.

٣٠- وظلت على مر التاريخ نسبة كبيرة من موارد اليورانيوم المحددة غير مستخدمة على الإطلاق في الإنتاج لدواعٍ تقنية أو اجتماعية أو سياسية. وفي إطار جهود تعزيز أمن الإمدادات الدولية والمحلية، يوجد لدى الأرجنتين والولايات المتحدة الأمريكية عدد من المشاريع النشطة التي تسعى إلى تقييم موارد اليورانيوم غير المكتشفة. وواصلت الوكالة تعاونها مع الأطراف الفاعلة الرئيسية لتوصيل هذه التقنيات التقييمية إلى سائر الدول الأعضاء من خلال حلقات العمل التدريبية والمنشورات، بما في ذلك حلقة عمل كوبنهاغن التي سبقت الإشارة إليها أعلاه.

التحويل والإثراء

٣١- يقوم كل من الاتحاد الروسي، والصين، وفرنسا، وكندا، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة الأمريكية بتشغيل مصانع تحويل تجارية الحجم. وتضطلع بخدمات الإثراء التجارية خمس شركات، وهي: الشركة الوطنية النووية الصينية (الصين)، وشركة آريفا (فرنسا)، والشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" (الاتحاد الروسي)، وشركة يوسيك "شركة الولايات المتحدة للإثراء" (الولايات المتحدة الأمريكية)، وشركة يورينكو (في كل من أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية). وثمّة مرافق تحويل وإثراء صغيرة مشغّلة في كل من الأرجنتين، وجمهورية إيران الإسلامية، وباكستان، والبرازيل، والهند، واليابان.

٣٢- واختارت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة شركة أتكينز للاستشارات الهندسية والتصميم وإدارة المشروعات التي يوجد مقرها في المملكة المتحدة، إلى جانب شريكين في مشاريع مشتركة، هما شركة وستينغهاوس وشركة فلور، لتشغيل مرافق تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المستنفد في محطة بادوكا للانتشار الغازي في كنتاكي التابعة لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة، ومحطة بورتسماوث للانتشار الغازي في بيكيتون بأوهايو. وسوف يشغِّل المشروع المشترك المسجل تحت اسم Mid-America Conversion Services المرفقين لتحويل رصيد وزارة الطاقة الذي يناهز ٠٠٠ ٧٦٥ طن من سادس فلوريد اليورانيوم المستنفد المخزَّن، وهو منتج ثانوي ناشئ عن عملية إثراء اليورانيوم، إلى أكسيد اليورانيوم المستنفد لإعادة استخدامه المحتمل في المستقبل أو خزنه أو التخلص منه.

٣٣- ووقعت شركة سنتراس للطاقة التي يوجد مقرها في الولايات المتحدة، مع شركة UT–Battelle المشتركة بين جامعة تينيسي ومعهد باتل التذكاري، وهي الجهة المشغِّلة لمختبر أوك ريدج الوطني التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة، من أجل إجراء مزيد من أعمال إثراء اليورانيوم على النطاق التجاري باستخدام تكنولوجيا "الطاردات المركزية الأمريكية" التي تحوزها الشركة. وفي مطلع عام ٢٠١٦، أتمت شركة سنتراس تجربة إيضاحية ناجحة استغرقت ثلاث سنوات لسلسلة تعاقبية كاملة من ١٢٠ طاردة مركزية متقدمة في مرفقها في بيكيتون بأوهايو، وأكدت التجربة أداء الأجهزة وعوليتها على الأجل الطويل في ظروف التشغيل الفعلية. وتواصل شركة سنتراس استكشاف تحسينات لهذه التكنولوجيا والبحث عن طرق أخرى لنشر قدرة الإثراء التجاري الأكثر فعالية من حيث التكلفة، مع مراعاة ميزة الفترة الزمنية الراهنة التي لا تحتاج فيها السوق إلى توسيع القدرة.

صنع الوقود

٣٤- حصلت شركة لايت بريدج، وهي شركة أمريكية لتطوير الوقود النووي، في كانون الثاني/يناير ٢٠١٦، على الموافقة الرقابية النهائية على اختبار وقودها المعدني الذي طورته مؤخراً في مفاعل هالدن للبحوث في النرويج (من المتوقع أن يبدأ التشعيع في عام ٢٠١٧). ويتألف الوقود المعدني المتقدم الذي طورته شركة لايت بريدج من سبيكة الزركونيوم واليورانيوم، ويستخدم تركيبة فريدة ووضعاً هندسياً لقضيب الوقود، وهو ما تزعم الشركة أن يشتغل بكثافة قوى أعلى من أنواع وقود أكسيد اليورانيوم المستخدمة حالياً. وحصلت شركة لايت بريدج لاحقاً، في تموز/يوليه ٢٠١٦، من المكتب الأوروبي لبراءات الاختراع على الموافقة على براءة اختراع رئيسية تغطي تصميمها الخاص بقضيب الوقود النووي الفلزي.

٣٥- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٦، أعلنت شركة ويستينغهاوس إليكتريك أن مرفق سبرينغفيدز لصنع الوقود النووي في المملكة المتحدة بات يفي بالمتطلبات اللازمة لصنع مجمعات الوقود المناسبة لتصميم مفاعلها النمطي الصغير. وفي شباط/فبراير ٢٠١٦، منحت شركة الكهرباء الوطنية التشيكية شركة ويستينغهاوس عقداً لتوريد ست من مجمعات اختبار الرصاص لمحطة تيميلين للقوى النووية التي تتألف من وحدتين من المفاعلات الروسية التصميم المبرَّدة والمهدَّأة بالماء من طراز WWER-1000.

٣٦- وفي آذار/مارس ٢٠١٦، أطلقت شركة شمال الصين للوقود النووي، وهي شركة تابعة للشركة الوطنية النووية الصينية، خطاً تجريبياً في محطتها الواقعة في باوتو لإنتاج عناصر الوقود لمفاعل الصين المرتفع الحرارة الحصوي القاع، وهو محطة قوى إيضاحية تضم مفاعلاً مرتفع الحرارة مبرَّداً بالغاز في شيداوان. وأنتجت محطة باوتو أيضاً مجمعة وقود نموذجية تناسب تصميم مفاعل الماء المضغوط CAP1400 الذي يجري حالياً التثبت من سلامة أدائه. وفي أيار/مايو ٢٠١٦، أتمت شركة شمال الصين للوقود النووي خط إنتاجها الأول لوقود المفاعلات من طراز AP1000 بعد شهرين من إصدار الإدارة الوطنية للأمان النووي موافقتها على تلقيم اليورانيوم في خط الإنتاج الذي تبلغ قدرته ٤٠٠ طن من فلز اليورانيوم سنوياً. وسوف تقوم شركة شمال الصين للوقود النووي بتصنيع مجموعتين من المجمعات الزائفة قبل الوصول إلى كامل القدرة الإنتاجية.

٣٧- وفي نيسان/أبريل ٢٠١٦، أعلنت شركة ويستينغهاوس إليكتريك توسيع مصنع الوقود النووي في فاستيراس بالسويد. وأوضحت الشركة التي يوجد مقرها في الولايات المتحدة وتمتلك توشيبا اليابانية أغلبية أسهمها، أن التوسع يُلبي الطلب المتزايد على تنويع إمدادات الوقود النووي للمفاعلات من طراز WWER-1000 في أوروبا.

٣٨- وفي أيار/مايو ٢٠١٦، اتفقت الشركة الأمريكية العالمية للوقود النووي (GNF-A) مع شركة الوقود النووي الروسية TVEL (وهي شركة تابعة للشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم") على إنتاج وقود TVS Kvadrat في الولايات المتحدة لمفاعلات الماء المضغوط من شركة ويستينغهاوس. وكجزء من اتحاد، ستدير شركة GNF-A المشروع في الولايات المتحدة، مع التركيز على الترخيص وضمان الجودة، وكذلك توفير الخدمات الهندسية، بينما ستوفِّر شركة TVEL الخبرة التصميمية والدعم التقني وستتولى صنع الدفعات الأولى من المجمعات لبرامج الإنتاج التجريبي. كما وقّعت شركة TVEL في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦ على عقد مع شركة السويدية للمرافق فاتنفال، لتُصبح بذلك الشركة الثالثة بعد شركتي آريفا وويستينغهاوس، التي تُمِدُّ محطة رينغهالز للقوى النووية بالوقود.

٣٩- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٦، وقعت هيئة الصناعات النووية البرازيلية عقداً مع شركة CONUAR الحكومية الأرجنتينية لتصدير اليورانيوم المُثرى. وينص الاتفاق على تصدير أربعة أطنان من مسحوق أوكسيد اليورانيوم لاستخدامه في أول حمولة وقود للمفاعل النمطي الأرجنتيني من طراز CAREM.

٤٠- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٦، أتمت محطة صنع الآلات، التابعة لشركة TVEL ومقرها إلكتروستال، في الاتحاد الروسي، اختبارات قبول أقراص الوقود لمحطة Sizewell B للقوى النووية في المملكة المتحدة، وهي محطة مفاعل ماء مضغوط مؤلفة من وحدة واحدة وتمثل ٣٪ من مجموع الطلب على الكهرباء في المملكة المتحدة. وأتمت أيضاً محطة صنع الآلات اختبارات قبول مكونات مجمعات الوقود التجريبية ETVS-14 وETVS-15 باستخدام وقود خليط اليورانيوم ونتريد البلوتونيوم الكثيف (الذي سيجري تجميعه في المجمع الكيميائي السيبيري) لتشغيله على سبيل التجربة في وحدة المفاعل السريع من طراز BN-600 في محطة بيلوبارسك للقوى النووية وفي المفاعل المستقبلي المبرَّد بالرصاص من طراز BREST-OD-300.

٤١- وجرى أيضاً في حزيران/يونيه ٢٠١٦ تحميل ثلاث مجمعات وقود تجريبية باستخدام وقود ريميكس ('الخليط المعاد توليده') في الوحدة ٣ من محطة بالاكوفو الروسية للقوى النووية أثناء انقطاع مقرر عن العمل لدواعي الصيانة. ويصنع وقود ريميكس من خليط غير مفصول من اليورانيوم والبلوتونيوم (ينتج عن طريق إعادة معالجة الوقود المستخدم) المقوى بمقدار صغير من اليورانيوم المثرى. وتتألف كل مجمعة وقود تجريبية من ستة قضبان وقود مزَّودة بوقود ريميكس إلى جانب قضبان وقود يورانيوم معيارية. وسوف يبقى وقود ريميكس في محطة بالاكوفو-٣ لما لا يقل عن دورتي وقود (أي نحو ثلاث سنوات) وسترسل المجمعات المشعَّعة بعد ذلك للفحص بعد التشعيع. وسوف تساعد تكنولوجيا وقود ريميكس الاتحاد الروسي على تحقيق دورة وقود نووي مغلقة والتقليل إلى أدنى حد من حجم النفايات المشعة التي ينتجها.

٤٢- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٦، أيّدت المحكمة العليا في فوكوكا باليابان حكماً أصدرته في آذار/مارس ٢٠١٥ محكمة مقاطعة ساغا قضت فيه بإمكانية استخدام وقود خليط الأكسيدين (موكس) في الوحدة ٣ (المتوقفة عن العمل منذ عام ٢٠١٠) في محطة جنكاي للقوى النووية التابعة لشركة كيوشو للقوى الكهربائية، والتي خضعت عملية إعادة تشغيلها لاستعراض من جانب هيئة الرقابة النووية. واستأنفت شركة شيكوكو للقوى الكهربائية التشغيل التجاري للوحدة ٣ في محطة إكاتا للقوى النووية في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦، مستخدمة جزئياً وقود موكس.

٤٣- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦، وقعت شركة لايت بريدج وآريفا الفرنسية للقوى النووية (AREVA NP) اتفاق مشروع مشترك بالمناصفة في الولايات المتحدة لتطوير مجمعات وقود وتصنيعها وتسويقها تجارياً لمعظم أنواع مفاعلات الماء الخفيف، بما فيها مفاعلات الماء المضغوط، ومفاعلات الماء المغلي، والمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، ومفاعلات البحوث.

٤٤- وبدأت أيضاً في تموز/يوليه ٢٠١٦ محطة نوفوسيبيرسك للمركزات الكيميائية، وهي جزء من شركة TVEL للوقود، إنتاج جيل جديد من وقود TVS-2M النووي للوحدة ٣ من محطة تيانوان للقوى النووية في الصين التي يجري تشييدها ومن المقرر إدخالها في الخدمة في عام ٢٠١٨. ويتيح هذا الوقود الذي يتميَّز بارتفاع معدل الحرق، التشغيل لفترات أطول بين كل انقطاعين لإعادة التزويد بالوقود.

٤٥- وفي آب/أغسطس ٢٠١٦، وقعت الشركة الوطنية لتوليد الطاقة النووية "أينرغواتوم" في أوكرانيا عقداً مع الشركة الأوروبية لإثراء اليورانيوم (URENCO). ويقضي العقد بأن تزوِّد الشركة الأوروبية لإثراء

اليورانيوم مرفق التصنيع التابع لشركة ويستينغهاوس في فاستيراس بالسويد، باليورانيوم المثرى لإنتاج وقود نووي لهيئة إينرغواتوم.

٤٦- وأعلنت شركة كنساي للقوى الكهربائية في اليابان في ٣٠ آب/أغسطس ٢٠١٦ أن شركة آريفا بدأت في مرفق ميلوكس التابع لها في فرنسا صنع ١٦ مُجمِّعة من مجمعات وقود موكس للوحدة ٤ في محطة تاكاهاما للقوى النووية.

٤٧- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٦ وقعت محطة أولبا التعدينية التابعة لشركة كازاتومبروم الوطنية لإنتاج اليورانيوم في كازاخستان، وشركة موارد اليورانيوم التابعة للهيئة الصينية العامة للقوى النووية، عقداً لإنشاء محطة إنتاج مجمعات وقود بقدرة تبلغ ٢٠٠ طن سنوياً في مرفق محطة أولبا التعدينية القائم، لتوريد أقراص الوقود إلى مفاعلات القوى النووية الصينية.

٤٨- ومن التطورات البارزة في ميدان تكنولوجيا وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط نجاح الهيئة الوطنية للطاقة الذرية في الأرجنتين في اجتياز اختبار تحمل استغرق ١ ٥٠٠ ساعة في أنشوطة ضغط عالٍ من أجل التحقق من تصميم جديد لوقود لمحطة Atucha-2 للقوى النووية باستخدام شبكات مباعدة مختلفة. والهدف الرئيسي لهذا التصميم الجديد هو تبسيط عملية صنع الوقود وتقليص تكلفتها.

ألف-٣-٢- ضمان الإمداد

٤٩- اعتمد مجلس محافظي الوكالة في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠ القرار GOV/2010/70 الذي وافق بموجبه على إنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء كما هو وارد في الوثيقة GOV/2010/67. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٥، اعتمد مجلس المحافظين اتفاق دولة مضيفة لمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء بين الوكالة وكازاخستان، وأتمت الوكالة وكازاخستان في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥ الإطار القانوني الأساسي لإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في موقع محطة أولبا التعدينية في أوست – كامينوغورسك. وقطعت الوكالة وكازاخستان منذ ذلك الحين أشواطاً على طريق تنفيذ/المشروع.

٥٠- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٦، سنت كازاخستان قانون استخدام الطاقة الذرية. وعقب اعتماد هذا القانون الجديد، بدأت أعمال تطوير الإطار الرقابي، وتم بالفعل سن عدد من اللوائح التنظيمية وما زال بعضها في مراحل المراجعة النهائية. وخلصت دراسة جدوى إلى أن تشييد مرفق خزن جديد لمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء بدلاً من تطوير المرفق القائم سيكون فعالاً أكثر من حيث التكلفة وسيتيح ترتيبات أمنية مبسَّطة وقوية، فضلاً عن تعزيز سمات الأمان المدرجة في تصميمه. وأجرى فريق بعثة من الوكالة زيارة إلى محطة أولبا التعدينية في آذار/مارس ٢٠١٦ لتقييم التقدم المحرز في الأعمال المرتبطة بتصميم مرفق الخزن الجديد، وخلص الفريق إلى أن التصميم يوفِّر تدابير كافية لضمان الأمان والأمن النوويين. وانطلقت أعمال تشييد مرفق الخزن الجديد في صيف عام ٢٠١٦ وتتوقع كازاخستان أن يدخل مرفق الخزن في الخدمة وأن يكون جاهزًا لتلقي اليورانيوم ضعيف الإثراء في النصف الثاني من عام ٢٠١٧. وبدأت الوكالة الآن الأنشطة للتحضير لاقتناء اليورانيوم الضعيف الإثراء الذي سيخزِّن في مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. ويجري وضع اللمسات الأخيرة على برنامج لإدارة الاسطوانات لضمان أمان الاسطوانات وأمنها على الأجل الطويل في الموقع، وكذلك أثناء نقلها لاحقاً، دون الحاجة إلى صب اليورانيوم الضعيف الإثراء دورياً من الاسطوانات.

٥١- ويتناول *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* (الوثيقة GC(56)/INF/3) بالوصف الآليات الأخرى المستخدمة لضمان الإمداد.

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية

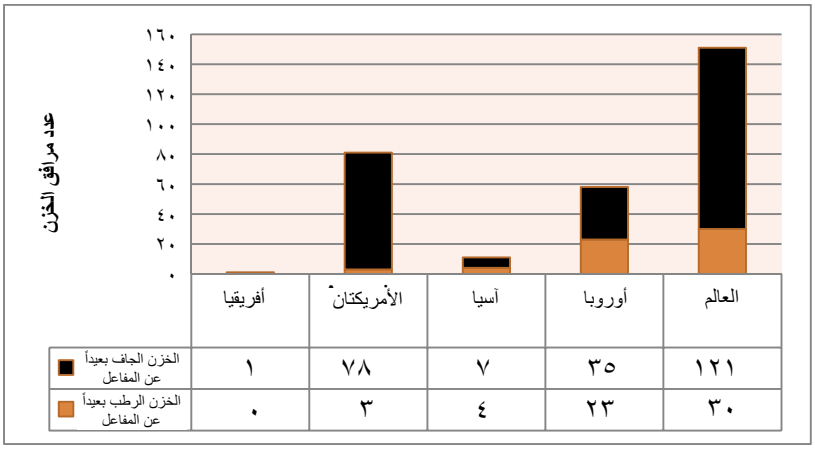
التصرف في الوقود المستهلك

٥٢- غالباً ما تمدَّد فترة الخزن بما يتجاوز العمر الأصلي المرخص لمرافق الخزن، أو حتى بما يتجاوز عمرها التصميمي. وباتت إدارة التقادم تمثل أولوية هامة في السنوات الأخيرة نتيجة للمدة الزمنية الطويلة اللازمة لوضع حلول متقدمة لإعادة التدوير أو لإنشاء مرافق للتخلص النهائي. وينطبق ذلك بصفة خاصة على الدول التي نُشرت فيها نُظم الخزن الجاف لاستخدامها لفترات قصيرة نسبياً.

٥٣- وضماناً لاستمرار الأمان، يجري وضع إرشادات بشأن إدارة التقادم ومشاريع البحث والتطوير الداعمة لها، لا سيما في ألمانيا والولايات المتحدة. من ذلك على سبيل المثال أن الهيئة الرقابية النووية أعدت تقريراً عن إدارة عمليات التقادم في الخزن (*Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report*) وصدر التقرير للتعليق عليه في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦ من أجل مساعدة مشغلي مرافق خزن الوقود المستقلين عن طريق تجديد رخصهم. وفي إطار تطوير الأساس التقني والمنهجية اللازمين لإصدار إرشادات للدول الأعضاء، أطلقت الوكالة أيضاً في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦ مشروعاً بحثياً منسقاً بشأن برامج إدارة التقادم في نُظم الخزن الجاف للوقود المستهلك.

٥٤- وتشير التقديرات إلى أن مقدار الوقود المستهلك قيد التخزين بلغ ٠٠٠ ٢٧٣ طن من الفلز الثقيل بحلول نهاية عام ٢٠١٦، ويتراكم بمعدل يبلغ حوالي ٠٠٠ ٧ طن من الفلز الثقيل سنوياً[٧]. وخلال عام ٢٠١٦، دخلت طور التشغيل خمسة مرافق أخرى لخزن الوقود المستهلك بعيداً عن المفاعل. وهذه المرافق الخمسة كلها جافة وتستخدم تكنولوجيا البراميل الخرسانية. وتقع المرافق في إغنالينا (ليتوانيا)، وبالو فيردي (المكسيك) وسايزويل (المملكة المتحدة)، وواتس بار (الولايات المتحدة الأمريكية) وسمر (الولايات المتحدة الأمريكية). ويبين الشكل ألف-٥ التوزيع العالمي لمرافق الخزن خارج مواقع المفاعلات والتي يبلغ عددها ١٥١ مرفقاً عاملاً في ٢٧ بلداً. وما زالت الولايات المتحدة الأمريكية التي تمتلك حالياً ٧٠ مرفقاً من مرافق الخزن الجاف التي تستوعب نحو ٣٦٪ من مجموع رصيدها من الوقود المستهلك، تضيف مرافق خزن جاف جديدة سنوياً. وتشير التوقعات الحالية إلى أن الولايات المتحدة الأمريكية سيكون لديها ٧٤ مرفقاً مستقلاً للخزن الجاف للوقود المستهلك بحلول عام ٢٠٢٠.

[٧] يبلغ الوقود المستهلك الذي يصرف من محطات القوى النووية سنوياً حوالي ٠٠٠ ١٠ طن من الفلز الثقيل على نطاق العالم.



الشكل ألف-٥- التوزيع العالمي لمرافق خزن الوقود المستهلك بعيداً عن المفاعل

٥٥- ووقعت حالات تأخير في تنفيذ مرافق الخزن بعيداً عن المفاعل في إسبانيا وأوكرانيا و اليابان بسبب مجموعة من الأسباب. ومن المتوقع أن يبدأ في عام ٢٠١٩ تشغيل أحد هذه المشاريع، وهو مرفق موتسو للخزن بعيداً عن المفاعل في اليابان.

٥٦- وفي عام ٢٠١٦، بدأت الاستعدادات لتفريغ الوقود من محطة ويلفا للقوى النووية في المملكة المتحدة بعد إغلاق آخر مفاعل كان قيد التشغيل في ٣٠ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥. ويوجد لدى محطة ويلفا للقوى النووية التي يرجح تاريخها إلى سبعينات القرن الماضي، أقدم مستودعات عاملة للخزن الجاف للوقود المستهلك من مفاعلات القوى. والهدف هو تفريغ الوقود من قلب المفاعلات ومستودعات الخزن الجاف المرتبطة بها قبل نهاية عام ٢٠١٨. وأطلقت إدارة استراتيجية الأعمال والطاقة والصناعة في المملكة المتحدة برنامجاً جديداً للبحوث والابتكارات النووية البريطانية. وتغطي المرحلة الأوَّلية من هذا البرنامج الممولة بمبلغ ٢٠ مليون جنيه إسترليني (٢٥ مليون دولار) من عام ٢٠١٦ حتى عام ٢٠١٨، خمسة مواضيع رئيسية: أنواع الوقود المتطورة، والمواد والتصنيع، وتصميم المفاعلات، وإعادة التدوير المتقدمة، ومجموعة أدوات استراتيجية. ويمثل ذلك التزامات أوسع من الحكومة بمضاعفة الإنفاق على ابتكارات الطاقة في المملكة المتحدة والذي من المتوقع أن تزيد على ٤٠ مليون جنيه إسترليني (٥٠ مليون دولار) سنوياً بحلول عام ٢٠٢١.

٥٧- وأنشأ الاتحاد الروسي برنامجاً جديداً لإدارة وقوده النووي المستهلك للفترة '٢٠١٦-٢٠١٨ حتى عام ٢٠٢٠' للاستعاضة به عن البرنامج السابق الذي انتهت مدته. ويغطي هذا البرنامج نقل مواد الوقود النووي المستهلك من محطات القوى النووية الروسية، سواءً إلى محطة مايك لإعادة معالجة الوقود في أوزيرسك، أو إلى مرافق الخزن المؤقتة المركزية التابعة للمجمع التعديني والكيميائي في جيليزنوغورسك، لإعادة معالجته لاحقاً. وتوجد في موقع المجمع التعديني والكيميائي أحواض مياه يمكن استخدامها لخزن الوقود النووي المستهلك في المستقبل من المفاعلات المبرَّدة والمهدأة بالماء من طراز WWER-1000 في محطات بالاكوفو، وكالينين، ونوفوفورونيز، وروستوف للقوى النووية، وكذلك من مفاعل Beloyarsk BN-600 السريع. ويحتوي أيضاً موقع المجمع التعديني والكيميائي منذ عام ٢٠١٢ على مرفق مركزي للخزن المؤقت الجاف لما يصل إلى ١٢٩ ٨ طن من الوقود النووي المستهلك الروسي من المفاعلات RBMK-1000 في محطات لينينغراد، وكورسك، وسمولنسك للقوى النووية. وزادت محطة مايك لإعادة معالجة الوقود إنتاجيتها بما نسبته ٣٥٪. وفي عام ٢٠١٦، تسلَّمت المحطة للمرة الأولى وقوداً نووياً مستهلكاً من مفاعل RBMK-1000 التابع لمحطة لينينغراد

للقوى النووية. وبدأت المحطة أيضاً في إعادة معالجة وقود اليورانيوم – الزركونيوم المستهلك من كاسرات الجليد السوفياتية والروسية المتراكم لعقود في مرافق الخزن.

٥٨- وأنشأت ليتوانيا بالقرب من محطة إغنالينا للقوى النووية التي جرى إغلاقها، مرفقاً مؤقتاً لخزن الوقود المستهلك من أجل تخزين الوقود النووي المستهلك من الوحدتين ١ و٢ في المحطة. وتتألف سعة الخزن من قرابة ١٩٠ من براميل الخرسانة المسلحة، وتسع هذه البراميل لحوالي ٠٠٠ ١٧ طن من مجمعات الوقود التي ستخزَّن لمدة ٥٠ عاماً. وبما أنّه تم استكمال الاختبارات الباردة في حزيران/يونيه ٢٠١٦، يُعدُّ هذا المرفق في مرحلة متقدّمة من مراحل الإدخال في الخدمة.

٥٩- وتمثل الصعوبات المالية وقضايا تخصيص الأراضي في المنطقة المحظورة من محطة تشرنوبل للقوى النووية أهم العوامل التي أفضت إلى تأخير مشروع تشييد المرفق المركزي لخزن الوقود المستهلك في أوكرانيا حتى نهاية عام ٢٠١٨.

٦٠- وعُلقت الأعمال الأوَّلية المتعلقة باختيار موقع محطة إعادة معالجة الوقود النووي الجديدة في ليان يونغانغ، في مقاطعة جيانغسو بالصين بسبب قضايا القبول العام. غير أن خطة التشييد ما زالت موضوعة حيث يجري النظر في خمس مقاطعات صينية أخرى لهذا المشروع.

ألف-٣-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة

إخراج المرافق النووية من الخدمة

٦١- أغلق ١٥٨ مفاعلاً من مفاعلات القوى على نطاق العالم أو يجري إخراجها من الخدمة، بما فيها ١٧ مفاعلاً أخرجت تماماً من الخدمة. وأغلق بصفة دائمة أكثر من ١٥٠ مرفقاً من مرافق دورة الوقود أو تجتاز عمليات إخراج من الخدمة، وأخرج تماماً من الخدمة ١٢٧ مرفقاً من تلك المرافق. وهناك أيضاً أكثر من ١٨٠ مفاعلاً من مفاعلات البحوث التي أغلقت أو التي يجري إخراجها من الخدمة. وأخرج تماماً من الخدمة أكثر من ٣٠٠ مفاعل بحوث ومجمعات حرجة.

٦٢- وخلال عام ٢٠١٦، نُشرت نُهج ابتكارية في محطة Dungeness A للقوى النووية في المملكة المتحدة، مثل استخدام الغواصين لتنظيف برك التبريد السابقة. ويقدَّم دعم مستمر من خلال أعمال البحث والتطوير الأخرى، لا سيما في البلدان التي لديها برامج قوى نووية عاملة منذ أمد بعيد، مثل الاتحاد الروسي، وإسبانيا، وبلجيكا، وفرنسا، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان. ومن الأمثلة الأخيرة على ذلك مبادرة 'التطبيقات التي تعمل من بُعد في البيئات الصعبة' في المملكة المتحدة التي انطلقت رسمياً في أيار/مايو ٢٠١٦.

٦٣- ويمثل إخراج محطات القوى النووية من الخدمة في أعقاب الحوادث قضية محددة وصعبة يتعيَّن على بعض البلدان مواجهتها حالياً. وتحقق تقدم ملموس في اليابان في التحضير لإخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة (انظر الإطار الوارد أدناه لمزيد من التفاصيل). ومن الأمثلة الأخرى لأنشطة ما بعد الحوادث إتمام الاحتواء المأمون الجديد فوق الوحدة ٤ لمحطة تشرنوبل للقوى النووية في أوكرانيا بعد عدة سنوات من أعمال التشييد وبدعم من المانحين الدوليين.

الشكل ألف-٦ - الاحتواء المأمون الجديد فوق الوحدة ٤ من محطة تشرنوبل للقوى النووية (إلى اليسار، مشهد من موقع التشييد؛ إلى اليمين، مشهد من الوحدة ٣) يبلغ ارتفاع هذا الهيكل ١٠٨ أمتار، وطوله ١٦٢ مترا، وعرضه ٢٥٧ مترا، ويزن حوالي ٣٦٠٠٠ طنا (الصور من: محطة تشرنوبل للقوى النووية).

٦٤- ويستمر أيضاً تنفيذ مشاريع الإخراج من الخدمة في بلغاريا ولتوانيا وسلوفيكيا التي أغلقت فيها محطات القوى النووية قبل نهاية أعمارها التصميمية، ويجري تقديم دعم مالي من خلال المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير.

الشكل ألف-٧- أنشطة التفكيك في قاعات التوربينات في الوحدة ١ (إلى اليسار) والوحدة ٢ (إلى اليمين) في محطة إغنالينا للقوى النووية (الصور من: محطة إغنالينا للقوى النووية).

التقدم المحرز في إخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة

تعرضت أربعة من المفاعلات الستة الموجودة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية لأضرار في قلب المفاعل و/أو انفجارات هيدروجينية. ويمثل إخراج هذه المفاعلات من الخدمة مشروعاً غير مسبوق يجري تنفيذه في إطار خريطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل[٨] والخطة الاستراتيجية التقنية[٩] التي اعتمدتها السلطات اليابانية. وخلال فعالية جانبية أقيمت على هامش الدورة العادية الستين للمؤتمر العام للوكالة في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦، سلط ممثلون من اليابان الضوء على التقدم الذي تحقق، وقدموا خططاً للتعاون مع المجتمع الدولي في

---

[٨] *خريطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل نحو إخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة* التي أصدرها المجلس المشترك بين الوزارات المعني بقضايا المياه الملوثة والإخراج من الخدمة في ١٢ حزيران/يونيه ٢٠١٥ متاحة في

http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20150725_01b.pdf.

[٩] ملخص *الخطة الاستراتيجية التقنية لعام ٢٠١٦ بشأن إخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للقوى الكهربائية* (*Technical Strategic Plan 2016 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc*) التي هيأت تيسير التعويض عن الأضرار النووية والإخراج من الخدمة في ١٣ تموز/يوليه ٢٠١٦، متاح في http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20160926_SP2016esum.pdf.

معالجة تحديات من قبيل استعادة حطام الوقود.

ومن القضايا الرئيسية المياه الملوثة المتولِّدة عن تدفق المياه الجوفية في مباني المفاعل واختلاطها بمواد التبريد المستخدمة في تبريد حطام الوقود. وتعالج المياه الملوثة باستخدام نظام إزالة النويدات. وفي إطار جهود إبعاد المياه عن المصادر الملوثة، ركبت أنابيب تجميد في الجدران البرية غير النفاذة لوقف المياه الجوفية، وبدأ التجميد الجزئي للجدران في آذار/مارس ٢٠١٦. وعملاً على منع تسرب المياه الملوثة، أغلقت الجدران الساحلية غير النفاذة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٥.

وأزيلت تماماً في عام ٢٠١٤ مجمعات الوقود البالغ عددها ٥٣٥ ١ التي كانت مخزَّنة في حوض الوحدة ٤. وفي إطار التحضير لإزالة مجمعات الوقود من الوحدة ١ (٣٩٢ مجمعة وقود) والوحدة ٢ (٦١٥ مجمعة وقود) والوحدة ٣ (٥٦٦ مجمعة وقود)، بدأ العمل في إزالة التلوث من أرضيات التشغيل وتدريعها لتحقيق مزيد من التخفيض في الجرعة الإشعاعية.

واستخدم التصوير المقطعي للميونات والروبوتات لاستقصاء الظروف الداخلية لأوعية الاحتواء الأوَّلي في وحدات المفاعلات. وأكد روبوت كان يجري تفتيشاً داخل وعاء الاحتواء الأوَّلي للوحدة ١ أنه لم تقع أي أضرار كبيرة لمعدات من قبيل مضخات إعادة تدوير الأنشوطات الأوَّلية، وأن مساحات كبيرة من قاع البير الجاف مغطاة بالرواسب. وأظهر التصوير المقطعي للميونات في الوحدة ٢ ظل مادة عالية الكثافة في قاع وعاء ضغط المفاعل، وهي فيما يبدو حطام الوقود.

الشكل ألف-٨- روبوت متغير الشكل لتفتيش الأجزاء الداخلية من وعاء الاحتواء الأوَّلي للوحدة ١ (الصور من: معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة، اليابان).

ويجري تنفيذ أعمال مكثَّفة لإزالة التلوث من أجل تحسين البيئة داخل الموقع. وبالنظر إلى أن الجرعة الفعالة الإضافية داخل حد الموقع تقل عن ١ ملي سيفرت سنوياً، لم يعد ضرورياً ارتداء أقنعة تغطي الوجه بكامله أو ارتداء ملابس واقية في نحو ٩٠٪ من أماكن الموقع.

وأنشأت هيئة التعويض عن الأضرار النووية وتيسير الإخراج من الخدمة مجلس شراكة البحث والتطوير للإخراج من الخدمة من أجل تعزيز البحث والتطوير من خلال تشجيع التعاون مع المؤسسات ذات الصلة. وأنشأت الوكالة اليابانية للطاقة الذرية منظمة عالمية جديدة للبحث والتطوير في اليابان أطلقت عليها اسم 'المختبرات التعاونية للعلوم المتقدمة للإخراج من الخدمة'. وبالإضافة إلى ذلك، بدأت الوكالة اليابانية للطاقة الذرية تشغيل مركز ناراها لتطوير تكنولوجيا التحكم من بعد الذي سيتم فيه إجراء اختبارات التطوير والتحقق من معدات التشغيل من بُعد، مثل أجهزة الروبوت والعمليات المتصلة بها. وشرعت أيضاً الوكالة اليابانية للطاقة الذرية في تشييد مركز أوكوما للتحليل والبحوث.

إدارة المصادر المشعة المختومة المهملة

٦٥- استكشفت بمزيد من الاستفاضة خيارات التصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة في نهاية عمرها، بما في ذلك التخلص منها بالاشتراك مع النفايات الأخرى في المرافق المناسبة. وازداد عدد خيارات إعادة التدوير والإعادة إلى المنشأ. وبلغت مشروعات التخلص في حفر السبر مراحل مختلفة من التطوير في عدة بلدان، بما فيها الصين وماليزيا والفلبين.

٦٦- وأجريت عدة عمليات ناجحة في عام ٢٠١٦ لإزالة مصادر مشعة مختومة مهملة من منشآت المستخدمين وإخضاعها للسيطرة في ظروف تخزين مناسبة وأُعيدت من لبنان وتونس مصادر مشعة مختومة مهملة فرنسية الصنع من الفئة ١ (مصدر في كل حالة) إلى بلد المنشأ، كما أُعيد إلى بلد المنشأ مصدران آخران من الكاميرون. وأزيل مصدر مشع مختوم مهمل من الفئة ١ من رأس جهاز المعالجة البعادية في أوغندا ونقل إلى التخزين المأمون والآمن. وأزيل مصدران مشعان مختومان مهملان من الفئة ١ من إحدى المستشفيات ووضع قيد التخزين المأمون والآمن في الأردن. وبدأت أعمال إزالة الفئة ١ ومصدرين في عدة دول أعضاء، بما فيها ألبانيا، وبوركينا فاسو، وجمهورية مقدونيا اليوغسلافية السابقة، ولبنان، ومن المتوقع انتهاء العمل في عام ٢٠١٧.

٦٧- وتحقق تقدم كبير في دمج خلية ساخنة متنقلة في مختلف تصاميم التخلص داخل حفر السبر، وهو ما سيؤدي إلى التقليل إلى أدنى حد من مناولة المصادر، والتخلص من النقل غير الضروري. وبالإضافة إلى ذلك، تم تصميم مجموعة من الأدوات المحمولة لتيسير عمليات تكييف المصادر المشعة المختومة المهملة من الفئات الثالثة إلى الخامسة، ودعم الإعداد للتخلص منها داخل حفر سبر.

٦٨- وتم الانتهاء من عمليات شملت تكييف مصادر مشعة مختومة مهملة في إندونيسيا، وبنما، والفلبين، وفييت نام، وماليزيا، ونيبال، وحصل العاملون المحليون في هذه البلدان على التدريب المناسب.

٦٩- ووسَّعت الوكالة نطاق الوصول إلى الفهرس الدولي للمصادر والأجهزة المشعة المختومة أمام مجموعة أوسع من المستخدمين في الدول الأعضاء، ويسهِّل ذلك بالتالي تحديد هوية المصادر المشعة المختومة المهملة التي يعثر عليها في الميدان. وفي عام ٢٠١٦، استهلت جهود في سبيل إضافة مزيد من التفاصيل عن المصادر والأجهزة، بهدف زيادة تحسين جدوى الفهرس.

٧٠- وبدأت عملية إزالة مصادر مشعة مختومة مهملة قوية الإشعاع من البرازيل في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦، ومن المقرر الانتهاء منها في شباط/فبراير ٢٠١٧. وستجري في إطار اتفاق تعاوني ثلاثي بين البرازيل وكندا والولايات المتحدة الأمريكية معالجة أكثر من ٨٠ من المصادر المشعة المختومة المهملة من الفئتين الأولى والثانية الكندية والأمريكية المنشأ وشحنها إلى الخارج. وسوف ترسل المجموعة الأولى إلى شركة Gamma-Service Recycling في لايبزيغ بألمانيا، لإعادة تدويرها، بينما ستُعاد المجموعة الثانية إلى الولايات المتحدة الأمريكية. وسوف تُنفذ هذه العملية فرق مدرَّبة من شركة جنوب أفريقيا للطاقة النووية.

التمهيد للتخلص من النفايات المشعة

٧١- بادرت الأرجنتين بتشغيل مرفق في مركز إيزيزا الذري لسمنتة ورضم النفايات الضعيفة الإشعاع الواردة من الهيئة الوطنية للطاقة الذرية (أساساً من تشغيل مفاعلات البحوث، وإنتاج النظائر المشعة، وأنشطة البحوث) والمولدات الخارجية الأخرى (المستخدمة في صنع الوقود وفي التطبيقات الطبية والصناعية والبحثية).

٧٢- ومنحت هيئة الأمان الإشعاعي والنووي الفنلندية رخصة تشغيل كامل لمرفق فورتوم للتصليد في محطة لوفيسا للقوى النووية. وسوف يعالج المرفق النفايات السائلة المنخفضة والمتوسطة الإشعاع في المستقبل (بما في ذلك راتينج التبادل الأيوني والرواسب الطينية) المتولدة عن عمليات المحطة. ويعطي هذا المرفق مثالاً جيداً للطريقة التي يفضي بها التخطيط المتكامل للتصرف في النفايات إلى مرفق واحد مصمَّم للتعامل بفعالية مع موروثات الماضي والنفايات الناشئة عن العمليات الراهنة وأرصدة النفايات في المستقبل.

٧٣- ومن الأهداف الرئيسية في فوكوشيما دايتشي التقليل إلى أدنى حد من النفايات، حيث تتولد كميات كبيرة من النفايات الصلبة مثل الملابس الواقية (القفازات والبزات الواقية) والنفايات التشغيلية (الورق، واللدائن، والخرق البالية، والخشب) يومياً. ولذلك قامت شركة طوكيو للقوى الكهربائية مؤخراً بإدخال مرفق لحرق النفايات الصلبة المتنوعة في الخدمة، ويتألف هذا المرفق من خطين، سعة المعالجة في كل منهما ٣٠٠ كيلوغرام من النفايات في الساعة. ويمثل الرماد الناشئ عن الحرق جزءاً صغيراً من الحجم الأصلي، وسوف يخزَّن في أسطوانات داخل الموقع لحين التخلص منه.

٧٤- وأتمت أستراليا تصميم محطة متكاملة وكاملة لمعالجة النفايات الناشئة عن مرفقها الخاص بإنتاج الموليبدينوم-٩٩، باستخدام تكنولوجيا 'الصخر الاصطناعي'. ومن المقرر أن يبدأ التشييد في عام ٢٠١٧. وتأخذ عملية الصخر الاصطناعي النفايات المشعة السائلة وتجميدها في شكل مصفوفة دائمة من 'الصخور الاصطناعية' للتخلص منها.

٧٥- وأُدخلت في الخدمة محطة للتزجيج في حاويات في محطة سيلافيلد في المملكة المتحدة. والتزجيج تكنولوجيا راسخة لتجميد السوائل والرواسب الطينية في شكل نفايات زجاجية معمِّرة يمكن التخلص منها. وصُمِّم نظام الصهر الجيولوجي للتزجيج داخل الحاويات لمعالجة أحجام أصغر من دوافق النفايات التي تنطوي على تحديات ولا يوجد لها حالياً أي مسار للتخلص منها.

٧٦- وأعلنت شركة سيلافيلد المحدودة (المملكة المتحدة) في آذار/مارس ٢٠١٦ أنها حوَّلت كل مخزوناتها من الوقود النووي التاريخي من حوض خزن الوقود في مفاعل بايل إلى مبنى خزن حديث. وخفض ذلك مستويات النشاط الإشعاعي في بركة الوقود المستهلك التي يبلغ عمرها ٦٨ عاماً بما نسبته ٧٠٪، وهو ما أدى إلى تقليص المخاطر التي تحدق بالناس والبيئة.

التخلص من النفايات المشعة

٧٧- يجري العمل على نطاق العالم في مرافق التخلص مع جميع فئات النفايات المشعة، باستثناء النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك (الذي يعلن عنه كنفايات). وتشمل هذه المرافق التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في خنادق (على سبيل المثال في إسبانيا، والسويد، وفرنسا، والولايات المتحدة الأمريكية)، والتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مناطق قاحلة (على سبيل المثال في جنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصممة هندسياً بالقرب من سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في إسبانيا، وبولندا، والجمهورية التشيكية، وسلوفاكيا، والصين، وفرنسا، والمملكة المتحدة، والهند، وهنغاريا، واليابان)؛ والمرافق المصممة هندسياً للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي اختيرت مواقعها في تكوينات جيولوجية على أعماق مختلفة (على سبيل المثال في ألمانيا، والجمهورية التشيكية، وجمهورية كوريا، وفنلندا، والنرويج، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية).

٧٨- ووصلت مرافق أخرى للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في بلدان مثل بلجيكا (ديسيل)، وبلغاريا (راديانا)، وكندا (كينكاردين)، وألمانيا (كونراد) وجمهورية إيران الإسلامية (تالميزي)، وليتوانيا (ستاباتيسكيس)، ورومانيا (سالينغي) وسلوفينيا (فربينا) إلى مراحل مختلفة من الترخيص أو التشييد.

٧٩- وتتفاوت خيارات التخلص من المواد المشعة الطبيعية المنشأ تبعاً للوائح التنظيمية الوطنية، حيث تتراوح بين مرافق التخلص في خنادق إلى المرافق المصممة هندسياً تحت سطح الأرض (على سبيل المثال في النرويج).

٨٠- وفي أستراليا، تلقت حكومة جنوب أستراليا تقريراً من هيئتها الملكية المعنية بدورة الوقود النووي وأعلنت أنها ستتابع تسعاً من التوصيات الاثنتي عشرة الواردة في التقرير. ويشمل ذلك مواصلة التقصي لتقييم فرصة إنشاء مرافق للخزن والتخلّص في جنوب أستراليا خاصّة بالوقود المستخدم على الصعيد العالمي والنفايات المتوسّطة الإشعاع.

٨١- وحصلت المؤسسة الحكومية للنفايات المشعة في بلغاريا على رخصة وشرعت في تشييد مرفق للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع بالقرب من سطح الأرض في موقع راديانا بالقرب من محطة كوزلودوي للقوى النووية.

٨٢- وفي كندا، من المتوقع صدور قرار حكومي اتحادي في أواخر عام ٢٠١٧ بشأن التقييم البيئي للمستودع الجيولوجي العميق للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في موقع بروس في كينكاردين، أونتاريو، الذي اقترحت إنشاءه شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء. كما استُهِلَّ تقييم بيئي بشأن اقتراح المختبرات النووية الكندية إنشاء مرفق تخلّص قرب سطح الأرض في موقع تشالك ريفر للتخلّص من النفايات الضعيفة الإشعاع وغيرها من النفايات المناسبة.

٨٣- وفي الصين، قطعت خطوات في تطوير برنامج التخلص الجيولوجي العميق بعد صدور قرار تشييد مرفق بحثي تحت الأرض في تكوين بللوري في منطقة بيشان. وأجريت هناك استقصاءات للموقع واختيار تكراري للموقع في تكوين رسوبي ذي طبقة عائلة.

٨٤- وقررت حكومة إستونيا في آذار/مارس ٢٠١٦ أن يكون موقع مرفق التخلص المستقبلي في البلد مشتركاً مع مرفق الخزن المركزي الحالي في مركز بالديسكي الواقع تحت سطح البحر.

٨٥- وبدأت في أولكيلووتو بفنلندا في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦ أعمال تشييد أول مرفق في العالم للتخلص الجيولوجي من الوقود النووي المستهلَك.

٨٦- وبناء على طلب من الهيئة الفرنسية للأمان النووي، أجرت الوكالة في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ استعراض نظراء لملف خيارات الأمان الخاص بمشروع التخلص الجيولوجي من النفايات القوية الإشعاع سيجيو.

٨٧- وتلقت الحكومة الألمانية تقريراً من لجنتها الوطنية المعنية بخزن النفايات المشعة القوية الإشعاع، وأوصى التقرير بإجراء عملية وطنية لتحديد موقع مستودع جيولوجي عميق. ويشمل التقرير توصيات مفصلة بشأن معايير الاستبعاد ذات الصلة بالأمان ومعايير التقييمات المقارنة التي ينبغي مراعاتها، وكذلك عمليات مشاركة أصحاب المصلحة التي ينبغي إرساؤها لتحقيق قبول عام واسع للقرارات بشأن تحديد الموقع. وتلقت

الحكومة أيضاً تقريراً بشأن تقديرات التكاليف وتمويل الالتزامات الوطنية المتعلقة بالمرحلة الختامية، بما في ذلك التخلص من النفايات المشعة.

٨٨- وفي جمهورية إيران الإسلامية، يستمر تشييد مرفق تالميزي للتخلص من النفايات قرب سطح الأرض، وقبلت أولى حاويات النفايات لخزنها داخل الموقع انتظاراً للبدء في عمليات التخلص منها.

٨٩- ووضعت جمهورية كوريا سياساتها الوطنية للتصرف في النفايات القوية الإشعاع بالاستناد إلى توصيات لجنة المشاركة العامة المعنية بالتصرف في الوقود النووي. وتحدِّد السياسة جدولاً زمنياً لوضع برنامج للتخلص الجيولوجي، بما يشمل تحديد الموقع وإنشاء مختبر بحثي واقع تحت الأرض وتشييد مرفق للتخلص الجيولوجي وتشغيله. ويجري حالياً النظر في منح الترخيص للمرحلة الثانية من مرفق وولسونغ للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع والتي من المتوقع أن يتم فيها تشييد أقبية للتخلص قرب سطح الأرض.

٩٠- ويمضي الاتحاد الروسي قُدماً في استراتيجيته بشأن تنفيذ شبكة من مرافق التخلص قرب سطح الأرض في كل أنحاء البلد. وحصل المشغل الوطني لإدارة التصرف في النفايات المشعة على رخصتين للتخلص قرب سطح الأرض في موقع نووي قائم في منطقة أورال، بينما يتابع طلبات ترخيص أخرى للتخلص في موقعين نوويين قائمين آخرين. ويجري أيضاً تقييم طلب الحصول على رخصة لمرفق بحثي مقام تحت الأرض في إطار الجزء الأول من مرفق التخلص الجيولوجي العميق المقرر إنشاؤه في المستقبل بالقرب من كراسنويارسك.

٩١- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٦، وافقت الهيئة السويدية للأمان الإشعاعي على طلب ترخيص لمستودع جيولوجي عميق للوقود المستهلك، ومن المتوقع إقامة جلسة استماع رئيسية أخرى في عام ٢٠١٧. وما زالت عملية الترخيص جارية بالنسبة لتمديد مستودع النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصيرة العمر المعروف باسم المستودع النهائي للنفايات المشعة القصيرة العمر.

٩٢- وواصلت سويسرا تقدمها في المرحلة الثانية لعملية تحديد موقع المستودع الجيولوجي العميق. وشمل ذلك مشاركتها بدور فاعل في 'المؤتمرات الإقليمية' لأصحاب المصلحة في مناطق تحديد الموقع، واختتمت بذلك حملتها الثلاثية الأبعاد لتحديد خصائص المواقع المعرضة للزلازل، وحصلت على تراخيص حفر لبرنامجها الخاص بتحديد خصائص موقع حفر السبر. وتستند التقييمات المقارنة إلى ١٣ معياراً و٤٩ مؤشراً من الهيئة الوطنية للأمان.

٩٣- وفي تموز/يوليه ٢٠١٦، وافقت سلطة التخطيط في كمبريا بالمملكة المتحدة على تشييد قبوين جديدين في مستودع النفايات المنخفضة الإشعاع في المملكة المتحدة، إلى جانب تمديد قبو ثالث. ويكفل ذلك مستقبل المرفق بالقرب من قرية دريج حتى عام ٢٠٥٠. ومن المتوقع أن تبدأ أعمال التشييد في عام ٢٠١٧.

ألف-٤- الأمان

٩٤- يستمر التقدم في تعزيز وتحسين الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وكان من بين هذه التحسينات تحديد الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي وتطبيقها؛ وتحسين فعالية الدفاع في العمق؛ وتعزيز قدرات التأهب والتصدي للطوارئ؛ وتعهد أوجه بناء القدرات وتحسينها؛ وحماية الناس والبيئة من الإشعاعات المؤينة.

٩٥- وحدَّدت الوكالة أولويات الأمان النووي لتعزيز الإطار العالمي للأمان النووي. وتغطي هذه الأولويات كل مجموعة أنشطة الوكالة في مجالات الأمان النووي والإشعاعي وأمان النقل وأمان النفايات. ونشرت الوكالة متطلبات أمان منقحة في سلسلة معايير الأمان التي تصدرها كي تأخذ في الحسبان الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي. وتشمل هذه المنشورات خمسة متطلبات أمان منطبقة على محطات القوى النووية صدرت كتنقيحات مركزة 'حسب التعديل'. وبالإضافة إلى ذلك، تم إصدار تنقيحات كاملة لاثنين من متطلبات الأمان الأخرى المتصلة بالقيادة والإدارة من أجل الأمان، وأمان مفاعلات البحوث. واستمرت أعمال مراجعة أدلة الأمان ذات الصلة ومراجعتها[١٠].

٩٦- ويشير تحليل البيانات المستقاة من النظام الدولي للتبليغ عن الخبرات التشغيلية الخاصة بمحطات القوى النووية إلى عدد من التحديات الجارية، بما يشمل مكامن ضعف في تصميم المحطات أو ممارسات تشغيلها أثناء بعض حالات الأخطار الخارجية، وعند إجراء تعديلات على المحطات. وتشير البيانات أيضاً إلى أن مراقبة المتعاقدين ما زالت تشكِّل تحدياً وأن عدد الحادثات المتصلة بتدهور المكونات بسبب التقادم آخذة في الازدياد.

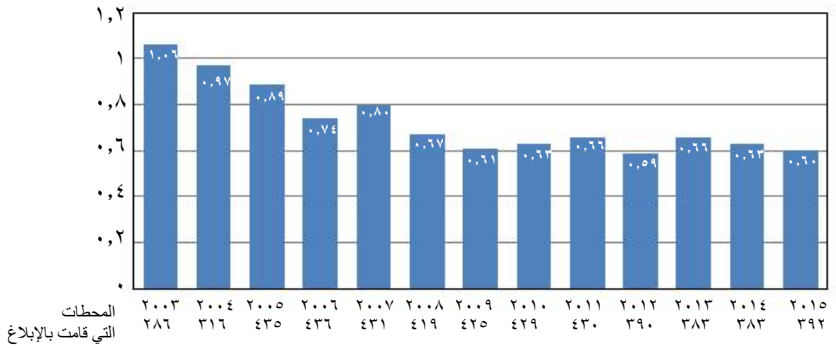
٩٧- وينفذ عدد متزايد من مفاعلات القوى النووية في جميع أنحاء العالم برامج للتشغيل وإدارة التقادم على الأجل الطويل. وفي نهاية عام ٢٠١٦، كان هناك ٤٦٪ من مفاعلات القوى النووية العاملة البالغ عددها ٤٥٠ مفاعلاً في العالم قيد التشغيل لمدة تراوحت بين ٣٠ و٤٠ عاماً، وكانت هناك نسبة أخرى بلغت ١٥٪ قيد التشغيل لمدة تزيد على ٤٠ عاماً.

٩٨- ولاحظ الفريق الدولي للأمان النووي أن تصاميم المفاعلات الحديثة يجري تطويرها للحد من المخاطر الناشئة عن الأحداث الداخلية إلى مستويات منخفضة جداً. ويرجح أن ينشأ المصدر الغالب للمخاطر عن أحداث خارجية، وهو ما يبرر مواصلة توخي العناية في السنوات المقبلة. وما زال الخبراء الذين يشاركون في الاجتماعات التقنية للوكالة مهتمين بمعالجة الدروس الناشئة عن حادث فوكوشيما داييتشي فيما يتصل بما يلي: (أ) أوجه عدم التيقن المرتبطة بالأخطار الشديدة؛ (ب) الحاجة إلى استخدام البيانات التاريخية وما قبل التاريخية في تقييم المخاطر الخارجية؛ (ج) النظر في مجموعات الأخطار الخارجية؛ (د) النظر في أثر الأخطار الخارجية على المواقع المتعدد الوحدات؛ (هـ) استخدام النُهج الاحتمالية في تحليل الأحداث الخارجية.

٩٩- وما زال مستوى أمان تشغيل محطات القوى النووية عالياً كما تشير إليه مؤشرات الأمان التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغلين النوويين. ويبين الشكل ألف-٩ عدد حالات الإيقاف الطارئ أو الإغلاق اليدوي أو التلقائي غير المخطط لكل ٠٠٠ ٧ ساعة (سنة واحدة تقريباً) من التشغيل للوحدة الواحدة. ولا تمثل حالات الإيقاف الطارئ سوى مؤشر واحد من عدة مؤشرات محتملة لأداء الأمان، ولكن هذا النهج شائع كمؤشر يبين النجاح في تحسين أمان المحطات عن طريق الحد من عدد الحالات التفاعلية العابرة الحرارية الهيدروليكية غير المرغوب فيها وغير المخطط لها التي تقتضي إيقافاً طارئاً للمفاعل.

---

[١٠] انظر التفاصيل في استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٧ (الوثيقة GOV/2017/3).



الشكل ألف-٩ -متوسط معدل حالات الإيقاف الطارئ: عدد حالات الإيقاف الطارئ التلقائي واليدوي التي تحدث كل ٧ ٠٠٠ ساعة من تشغيل الوحدة الواحدة (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة: www.iaea.org/pris).

١٠٠- وتواجه عدة دول أعضاء جرعات جماعية من الاستخدامات الطبية للإشعاع بما يتجاوز الجرعات الناشئة عن إشعاعات الخلفية الطبيعية وغيرها من المصادر البشرية. وفي ظل ازدياد الاستخدامات السلمية للتكنولوجيا الإشعاعية، من المتوقّع أن يزداد عدد الدول الأعضاء في ذلك الوضع. ويمكن تجنُّب نسبة كبيرة (٢٠-٥٠٪ في بعض المناطق) من التعرُّضات الطبية الفردية عن طريق الاختيار الأنسب للإجراءات الطبية والتدابير الفعّالة للوقاية من الإشعاعات. ولم تنفَّذ إلاّ جزئياً على نطاق العالم سوى النُهُج الراسخة لتحقيق المستوى الأمثل لوقاية المرضى من الإشعاعات أثناء التصوير التشخيصي، ويلزم بذل جهود متواصلة لاستخدامها على نطاق أوسع وعلى نحو سليم من أجل تحسين الأمان والجودة.

١٠١- ويزداد إدخال تكنولوجيات وإجراءات إشعاعية علاجية معقَّدة إلى مناطق لم تكن تُستخدَم فيها من قبل، الأمر الذي أوجد الحاجة إلى وضع تدابير كافية لتحقيق الأمان. وبينما يسود اتفاق عام بين الخبراء على أن العلاج الإشعاعي شكل فعّال من أشكال المعالجة، من المُعتَرف به أيضاً أن هناك حاجة إلى زيادة تعزيز تدابير الأمان.

باء- البيانات الذرية والنووية

١٠٢- حَفَّز التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة الذي تنسّقه وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي التطوُّرات في تقييمات المقاطع المستعرَضة لأسر النيوترون في النويدات ذات الصلة الخاصة بالتكنولوجيات النووية: نظائر الأوكسجين، والحديد، واليورانيوم، والبلوتونيوم. وأفضت فوائد الجهود المنسَّقة في إطار التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة بين الخبراء في العلوم النووية من جميع أنحاء العالم إلى تحسين دقّة الحرجية النووية الواسعة النطاق وعمليات محاكاة نقل النيوترونات. ويُنظر إلى تقييمات التنظيم المذكور باعتبارها مرشَّحة للإدراج في مكتبات البيانات النووية العالمية، مثل مكتبة ملفات البيانات النووية المقيَّمة ENDF/B-VIII (الولايات المتحدة الأمريكية)، والمكتبة اليابانية المقيَّمة لبيانات النيوترونات، ومكتبة الانشطارات والاندماجات المقيَّمة المشتَركَة (وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي) والمكتبة الصينية للبيانات النووية المقيَّمة، ومكتبة البيانات النووية المقيَّمة القائمة على برنامج 'تاليس' لمحاكاة التفاعلات النووية (المفوضية الأوروبية/الوكالة).

١٠٣- والشبكة الدولية لمقيِّمي بيانات الهيكل والاضمحلال النوويين هي مبادرة تعاونية عالمية لتجميع وتقييم الخصائص الأساسية لهيكل النويدات واضمحلالها. ومما حسن كثيراً في الآونة الأخيرة استخدام العلماء النوويين قاعدة بيانات هذه الشبكة اقترانها بتكنولوجيا الاتصالات الحديثة، مثل الموقع الإلكتروني للمخطط الحيّ للنويدات التابع للوكالة، وتطبيق مُستَعرِض النظائر الذي أطلقته الوكالة في عام ٢٠١٣. ويمكِّن هذا التطبيق المتاح مجاناً لنُظم تشغيل أندرويد وآي أو أس استرجاع المعلومات المتعلقة بالنويدات على الأجهزة النقّالة وتم تنزيله بالفعل نحو ٤٠ ٠٠٠ مرة.

١٠٤- وتحتوي حالياً قاعدة البيانات التجريبية المتعلقة بالتفاعلات النووية (إكسفور) أكثر من ٢٢ ٠٠٠ مجموعة من بيانات التفاعلات النووية التجريبية منذ عام ١٩٣٥ حتى اليوم. وتشكّل هذه القاعدة الفريدة من البيانات صُلب مكتبات البيانات النووية المستخدمة في جميع التكنولوجيات النووية، والمستخدمة في المقام الأول في تحليل محطات القوى النووية، وقضايا دورات الوقود، وتصاميم المفاعلات الابتكارية، والاندماج وإنتاج النظائر الطبية. وأنشئت شراكات تعاونية جديدة، خاصة في الصين والهند، لتحديث قاعدة البيانات.

١٠٥- ويجري حالياً سدّ الثغرة في الفيزياء على نطاقات حجمية مختلفة تماماً باستخدام نَهج ابتكاري للبيانات النووية في تحليل الضرر الإشعاعي. ويمكن حالياً بمساعدة القوة الحاسوبية الراهنة تقدير وظائف التصدّي للأضرار- مثل معيار نورغيت وتورينز وروبنسون (NRT)[١١] للإزاحة لكل ذرة (dpa) والاستبدال لكل ذرة، ومعيار إعادة الارتباط اللاحراري المصحح-الإزاحة لكل ذرة (arc-dpa) والاستبدال لكل ذرة، وطاقة الحركة المنبعثة في المادة، وإنتاج الغاز – على أساس علمي أفضل، بما في ذلك التعبير الكمّي عن أوجه عدم التيقُّن. وسوف يكون لهذه التطوّرات آثار على تدريع المفاعلات الانشطارية والاندماجية وكذلك المعجِّلات.

١٠٦- وطرأت زيادة ملحوظة على الأنشطة والمنشورات في ميدان إنتاج النظائر الطبية باستخدام المعجِّلات وما يرتبط بذلك من استخدام لمكتبات البيانات النووية المستحثّة بالجسيمات المشحونة لتحديد أمثل مسارات إنتاج تلك النظائر الطبية.

١٠٧- ويجري حالياً توسيع انتشار عدم التيقُّن المتعلّق بالبيانات النووية والذرية الأساسية في الخدمات النووية الواسعة النطاق من الميدان التقليدي المتعلّق بالحرجية ليشمل سائر جوانب التشغيل النووي المأمون والموثوق. وتشمل مجالات البحوث البارزة التي تراعى فيها حالياً تقديرات عدم التيقُّن تقييم الضرر الإشعاعي للمفاعلات الانشطارية والاندماجية واستخدام البيانات الذرية والجزيئية لنمذجة الوضع المحسوم للهيدروجين والهليوم في بلازما الانشطار، والحصول على بيانات عن التآكل واحتباس التريتيوم في المواد المعرَّضة لبلازما البريليوم.

١٠٨- وعُقد المؤتمر الدولي بشأن البيانات النووية لأغراض العلوم والتكنولوجيا بتنظيم مشتَرك من مركز البحوث المشتَرك التابع للمفوضية الأوروبية، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، والوكالة، في بروج، بلجيكا، في أيلول/سبتمبر ٢٠١٦، وحضره زهاء ٤٥٠ مشاركاً. وعُرِضَت خلال المؤتمر آخر التطوّرات في مجال تكنولوجيا البيانات النووية، مثل الإمكانات التجريبية في معهد المواد المرجعية والقياسات التابع لمركز البحوث المشتَرك في غيل ببلجيكا، والنُهُج الأكثر منهجية في إنتاج البيانات النووية باستخدام مجموعة رموز برمجية تاليس.

---

[١١] هذا المعيار مقياس للضرر في المادة، وكان قد اقترحه Norgett، وRobinson، وTorrens، في عام ١٩٧٥.

١٠٩- واستُحدِثَت بيانات نووية محسَّنة للتفاعلات المستحثة بأشعة ألفا في الفلور، وتتسم هذه البيانات بأهميتها في تحليلات الضمانات.

١١٠- وتستثمر الصين جهوداً أكبر في تقييم البيانات النووية لمفاعل الأملاح المصهورة. وتوجَّه حالياً مختلف أنشطة التجريب والنمذجة، بتنسيق من مركز البيانات النووية الصيني في بيجينغ نحو البيانات ذات الصلة بمفاعل الأملاح المصهورة التي لها تأثير على الأمان والاقتصاد.

١١١- وتستثمر المفوضية الأوروبية في تطوير البيانات النووية على نطاق واسع من خلال مشروع CHANDA ('التغلُّب على التحدّيات في البيانات النووية')، باستخدام المختبرات والجامعات ومختبرات البحوث تقريباً في كل بلدان الاتحاد الأوروبي المتعاونة في تطوير البيانات النووية. وينصبّ التركيز على التقليل إلى أدنى حدّ من النفايات المشعّة وعلى نُظُم النيترونات السريعة. وسوف يُسفر تطوير مكاتب بيانات نووية جديدة عن تحليلات حسابية أفضل لنُظم المفاعلات المتقدّمة.

جيم- تطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث

جيم-١- المعجِّلات

١١٢- طُوِّرَت معجّلات الجسيمات لإلقاء الضوء على المسائل الجوهرية التي طرحها العلماء الذين يدرسون الهيكل الداخلي لنواة الذرة وخصائصها والقوانين الفيزيائية التي تحكم تفاعلات الإشعاعات مع المادة. ويستفيد ملايين الأشخاص حالياً في حياتهم اليومية من التطبيق العالمي لعشرات الآلاف من المعجّلات في الصناعة والطب والبيئة والبحوث الأساسية، بما فيها الفيزياء دون الذرية والفيزياء الفلكية. وللاستجابة للطلب المتزايد باستمرار على المعجّلات في البحوث العلمية المتطوّرة، وللحفاظ على المجموعة الواسعة من التطبيقات التي تنطوي على فوائد اجتماعية – اقتصادية قوية وتوسيع تلك التطبيقات، من الحيوي مواصلة تحسين تكنولوجيات المعجّلات وتطويرها. وتدفع الابتكارات التكنولوجية المعجّلات إلى منتهاها من حيث الطاقة والنوع والحجم في حُزَم أشعة الجسيمات المعجَّلة. ومن التحدّيات الأخرى تقليص حجم المعجِّلات وتكلفتها في التطبيقات الصناعية والطبية.

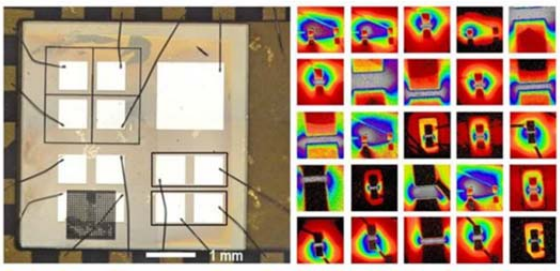
جيم-١-١- تقنيات المضخة – المسبار الجديدة المتطوَّرة لتقصّي الضرر الإشعاعي في الموقع

١١٣- يزداد فهمنا لتأثيرات الإشعاعات عن طريق التجريب والمحاكاة. ومن التطوّرات المثيرة للاهتمام سرعة ظهور تقنيات المضخة – المسبار حيث يمكن لنبضات أيونية شديدة قصيرة (من معجّلات حثية، مثل المعجل NDCX-II في مختَبَر لورنس بيركلي الوطني، أو من معجّلات البلازما الليزرية) أن تستحث تغييرات في الديناميات الهيكلية في المواد التي يمكن بعد ذلك تعقُّبها في الموقع باستخدام مسابير هيكلية سريعة، مثل الحيود الفائق السرعة للإلكترونات أو النبضات الشديدة للشعاع السيني. وتمكِّن هذه التقنيات الجديدة من تقصّي تأثيرات الإشعاع الأيوني في الموقع. ويحسِّن ذلك فهمنا الأساسي ويمكن أن يعجّل بتطوير مواد جديدة ذات أداء معزَّز وقدرة على الصمود أمام الإشعاعات في البيئات العالية الإشعاع.

الشكل جيم-١ - المعجّل NDCX-II[١٢] في مختَبَر لورانس بيركلي الوطني في بيركلي بالولايات المتحدة الأمريكية، يمكِّن من دراسة الديناميات الهيكلية في المواد. وتبيِّن الصورة المعجِّل الذي يبلغ طوله عشرة أمتار وتظهر في مقدمة الصورة المحطة النهائية المستهدَفة (الصورة من: مختبر بيركلي).

جيم-١-٢- أجهزة جديدة ملائمة بيولوجياً لقياس الجرعات الإشعاعية باستخدام حُزَم الأشعة الأيونية المركزية

١١٤- تتيح خصائص أجهزة قياس الجرعات الإشعاعية المصنّعة من الماس الاصطناعي بعض المزايا على الأجهزة التقليدية، بما في ذلك صمودها أمام الإشعاعات وتوافقها البيولوجي، خاصة عند استخدامها في العلاج الإشعاعي بالبروتونات. وتُستخدَم حُزَم أيونات مركَّزة في نطاق واسع من طاقات البروتونات بما يتراوح بين ٥ و٢٥٠ مليون إلكترون فولط لتقييم مدى ملاءمة أجهزة الماس البللوري الوحيدة كمقاييس دقيقة للجرعات. وتقابِل حُزَم الطاقة العالية الممارسة الإكلينيكية، وتتيح حزم الطاقة المنخفضة التي يوفّرها نظام مَسح مجهري نووي قياس الاستجابة التفصيلية من الجهاز كي يتسنّى تقييم تصاميم أجهزة الكشف الجديدة. ويمكن للصور التي تتكوّن باستخدام تقنية الشحنات المستحثة بالحُزَم الأيونية عن طريق حُزمة دقيقة تبلغ ٥,٥ مليون إلكترون فولط بقياس الاستجابة التفصيلية للجهاز إلى جانب كفاءة جمع الشحنات التي تناهِز ١٠٠٪.



الشكل جيم-٢ - تبيِّن الصور مجموعة من أجهزة قياس الجرعات النمطية المصنّعة من الماس الاصطناعي وصورة مركَّبة من خرائط تبيّن قياس الاستجابة الإشعاعية في مختلف التصاميم باستخدام تقنية الشحنات المستحثة بالحُزَم الأيونية باستخدام تشعيع أيوني يبلغ ٥,٥ مليون إلكترون فولط. (الصور من: البروفيسور د. جميسون، جامعة ملبورن؛ والدكتور ج. ديفيس، جامعة وولونغونغ؛ والدكتور د. بروكوبوفيتش، المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين)

[١٢] لمزيد من التفاصيل، يرجى الرجوع إلى P.A. Seidl, et al.,Nucl.Inst. Method A800 (٢٠١٥) ٩٨-١٠٣.

جيم-١-٣- التشتت النيوتروني القائم على المعجّلات

١١٥- تجاوز متوسط المدة الزمنية لتدفق نيوترونات مصادر التشظي من قبيل مصدر نيوترونات التشظّي في الولايات المتحدة، ومصدر التشظّي الأوروبي المقبل في السويد، والذي سبقته تطورات في معجلات البروتونات، متوسط مدة التدفق في أعلى مفاعلات حزم التدفق. ويبشِّر التألّق غير المسبوق لهذه المصادر واقترانه بقدرة الإلكترون على الاختراق وتشتُّته القوي بالهيدروجين والعزم المغنطيسي، بتقدُّم في مواد الطاقة والمواد المغنطيسية، وعلوم الحياة، وعلم الآثار، والجيولوجيا، والمواد الهندسية.

١١٦- ويجب تهدئة النيوترونات في تلك التطبيقات، وجرت العادة على إجراء ذلك في مهدئات ضخمة تعمل عند درجات حرارة منخفضة لا ينبعث منها سوى جزء صغير من النيوترونات نحو المرافق التجريبية. ولذلك ينصب التركيز على جيل جديد من مواد المهدئات وتصاميمها. ويمكن عن طريق اختيار أحد مصاوغات الهيدروجين الدوارة بناء مهدئات باردة سائلة من الباراهيدروجين في شكل قضيبي أو مسطح. وتقلل هذه التصاميم امتصاص النيوترونات، ويمكن وضع أجهزة قياس الطيف بكفاءة أكبر حول المصدر. وبالمثل فإن الميثان الصلب يتسم بكفاءته الكبيرة كمهدئ بارد، ولكنه عرضة لأضرار إشعاعية. ولذلك، يجري بحث مواد المهدئات الصلبة وتصاميمها الجديدة. ويلزم جمع معرفة دقيقة عن المقاطع المستعرضة لنيوترونات المواد المرشّحة، ويجري إجراء القياسات الضرورية في كثير من معجلات البحوث، بما فيها معجلات البحوث في الأرجنتين، واليابان، وجنوب أفريقيا، والولايات المتحدة الأمريكية. ويجري تطوير تصاميم نموذجية يمكن فيها إدخال أقراص هذه المواد الجديدة في الوعاء وإزالتها لاحقاً ثم إعادة توليدها، على سبيل المثال في الاتحاد الروسي، كطريقة أخرى للتعامل مع الضرر الإشعاعي.

الشكل جيم-٣- موقع مصدر التشظية الأوروبي في لوند بالسويد، في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦ . وسوف يبدأ في عام ٢٠١٩ تشغيل أقوى مصدر نيوتروني في العالم ملقم بمعجِّل خطي بروتوني نبضي بطاقة قدرها ٢ غيغا إلكترون فولط يولد ما متوسطه ٥ ميغاواط من قوى حزم الأشعة (المصدر: https://dam.esss.lu.se/asset-bank/images/assets/33/40_2S5D41851.jpg)

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١١٧- يبين الجدول جيم-١ أكثر تطبيقات مفاعلات البحوث شيوعاً. يمكن أن تتراوح قوتها من صفر (أي مجمعات حرجة أو دون الحرجة) إلى حوالي ٢٠٠ ميغاواط (حراري) وتصميم مفاعلات البحوث أكثر تنوعاً بكثير من تنوع مفاعلات القوى، ولها أيضاً أوضاع تشغيل مختلفة يمكن أن تكون مستمرة أو نبضية.

١١٨- ووفقاً لقاعدة بيانات الوكالة بشأن مفاعلات البحوث، تم حتى الآن بناء ٧٧٤ مفاعلاً من مفاعلات البحوث في ٧٠ بلداً، منها ٢٤٩ مفاعلاً قيد التشغيل في ٥٦ بلداً حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦. ويوجد لدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث (٥٥) العاملة أو المغلقة مؤقتاً، وتليها الولايات المتحدة الأمريكية (٤٢)، ثم الصين (١٧) واليابان (١٤). وكثير من البلدان النامية لديها أيضاً مفاعلات بحوث قيد التشغيل، بما في ذلك ١٠ مرافق في أفريقيا. ويعمل ٦٤ مفاعل بحوث على نطاق العالم بمستويات قوى أعلى من ٥ ميغاواط، وبالتالي فهي توفِّر تدفقات نيوترونية عالية لمختلف المنتجات والخدمات.

الجدول جيم-١ - الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم[١٣]

نوع التطبيق[أ]	عدد مفاعلات البحوث المشمولة[ب]	عدد الدول الأعضاء التي توجد بها تلك المرافق
التدريس/التدريب	١٦٥	٥١
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١١٨	٥١
إنتاج النظائر المشعة	٨٧	٤٣
التصوير الشعاعي	٦٩	٣٧
تشعيع المواد/الوقود	٦٨	٢٧
التشتت النيوتروني	٤٥	٣٠
التقويم الجيولوجي	٢٧	٢٣
التحويل (معالجة السليكون)	٢٤	١٦
التحويل (الأحجار الكريمة)	١٧	١٠
العلاج النيوتروني، أساساً للبحث والتطوير	١٦	١١
استخدامات أخرى[ج]	١٢٠	٣٦

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

[ب] من بين ٢٤٩ مفاعلاً من مفاعلات البحوث التي خضعت للدراسة (٢٣٠ مفاعلاً قيد التشغيل، و١٩ مفاعلاً مغلقاً بصفة مؤقتة) حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٦.

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

١١٩- وما زال معامل استخدام العديد من مفاعلات البحوث العاملة متدنياً نسبياً، ويتجاوز عمر نصف تلك المفاعلات ٤٠ عاماً. وأغلبية هذه المفاعلات في حاجة إلى عناية مستمرة في المجالات الاستراتيجية للتخطيط وإدارة التقادم والتحديث والتجديد. وما زالت جهود تعزيز استخدامها وتحقيق إيرادات صافية آخذة في الازدياد.

[١٣] بالاستناد إلى البيانات المستمدة من قاعدة بيانات مفاعلات البحوث التابعة للوكالة: http://nucleus.iaea.org/RRDB/.

وخلال السنوات الثلاث الأخيرة، أعدت المنظمات القائمة بتشغيل ٤١ مرفقاً من مرافق مفاعلات البحوث خططاً استراتيجية وقدمتها إلى الوكالة لاستعراضها[١٤].

١٢٠- وما زال التعاون الدولي يشجع استخدام مفاعلات البحوث وتعزيزه من أجل بناء القدرات النووية في مجموعة مجالات تشمل التعليم والتدريب. ومن أمثلة ذلك مشروع مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت الذي انطلق في عام ٢٠١٥ وتوجد مفاعلاته المضيفة في كل أمريكا اللاتينية والكاريبي وأوروبا. ويسعى المشروع إلى ربط الجامعات ومعاهد البحوث عن طريق الإنترنت بمفاعلات البحوث العاملة المكرَّسة للتعليم والتدريب وسوف يستمر تنفيذ مشروع مختبر المفاعلات على الإنترنت في عام ٢٠١٦، حيث ستقدَّم ست حلقات من حلقات البث الحي في أمريكا اللاتينية والكاريبي (وسيكون مفاعل الأرجنتين من طراز CNEA RA-6 المرفق المضيف والمنظمات المتلقية في إكوادور وكوبا وكولومبيا)، وخمس في أوروبا وأفريقيا (سيكون مفاعل ISIS التابع للمفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة للطاقات البديلة والطاقة الذرية المرفق المضيف والمنظمات المتلقية في بيلاروس وتونس وجمهورية تنزانيا المتحدة وليتوانيا). ومن الأمثلة الأخرى مخطط مركز الوكالة الدولي المسمى القائم على مفاعلات البحوث بتيسير من الوكالة وبهدف تعزيز التعاون بين الدول الأعضاء من أجل بناء القدرات النووية وأنشطة البحث والتطوير التعاونية. ومتابعة لتعيين أول مركز من مراكز الوكالة الدولية المسماة القائمة على مفاعلات البحوث في عام ٢٠١٥، وهو المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة، ممثلة في المركزين البحثيين التابعين لها في ساكليه وكاداراش، اختير معهد بحوث المفاعلات النووية الكائن في ديميتروفغراد بالاتحاد الروسي، ليكون مركزاً من مراكز الوكالة الدولية المسماة القائمة على مفاعلات البحوث في عام ٢٠١٦، وأصبح المركز البلجيكي للبحوث النووية (في مول ببلجيكا) مرشحاً لذلك التعيين.

الشكل جيم-٤- إلى اليسار: تجربة إيضاحية حيّة مقدَّمة إلى هيئة الطاقة الذرية في تنزانيا من المفاعل المضيف، وهو مفاعل البحوث ISIS التابع للمفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة في ساكليه (فرنسا) أثناء اجتماع تنسيق لمشروع الوكالة للتعاون التقني الإقليمي RAF/1/005 (الصورة من: الوكالة). إلى اليمين: بث حي لمختبر من المفاعل المضيف CNEA RA-6 في باريلوتشي بالأرجنتين (الصورة من: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية).

١٢١- وتعكف عدة بلدان على بناء مفاعلات بحوث جديدة كمرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية الأساسية والبرامج اللازمة للتكنولوجيا والعلوم النووية، بما في ذلك القوى النووية. وما زال تشييد مفاعلات بحوث جديدة

---

[١٤] نقحت الوكالة وثيقتها الإرشادية الصادرة منذ عام ٢٠٠١ بعنوان *التخطيط الاستراتيجي لمفاعلات البحوث: إرشادات لمديري المفاعلات* (الوثيقة IAEA-TECDOC-1212) بتضمينها جوانب مفاعلات البحوث الجديدة أو مشاريع التجديد الرئيسية، والاطلاع على الخبرات من المرافق الجيدة التشغيل من خلال أمثلة متعددة. ومن المقرر أن تُنشر في عام ٢٠١٧ النسخة المنقحة من الوثيقة باعتبارها العدد NG-T-3.16 من سلسلة الطاقة النووية التي تصدرها الوكالة.

جارياً في الاتحاد الروسي، والأرجنتين، والبرازيل، وجمهورية كوريا، وفرنسا، والمملكة العربية السعودية، والهند. ووضعت عدة دول أعضاء، بما فيها بلجيكا، وبيلاروس، ودولة بوليفيا المتعددة القوميات، وفييت نام، وهولندا، والولايات المتحدة الأمريكية، خططاً رسمية لبناء مفاعلات بحوث جديدة. وتدرس دول أعضاء أخرى، مثل إثيوبيا، وأذربيجان، وبنغلاديش، وتايلند، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، وجنوب أفريقيا، والسنغال، والسودان، وطاجيكستان، وغانا، والفلبين، والكويت، وكينيا، ولبنان، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، ونيجيريا، بناء تلك المرافق[١٥]. وفي عام ٢٠١٦، أُدخل بنجاح في الخدمة مفاعل البحوث والتدريب الأردني، وهو مفاعل بحوث متعدد الأغراض تبلغ قدرته ٥ ميغاواط (حراري)، ويقع في حرم جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية.

١٢٢- وتساعد الشبكات والائتلافات الإقليمية المعنية بمفاعلات البحوث، التي تيسِّرها الوكالة[١٦] على تعزيز التعاون الدولي، وتمكِّن مفاعلات البحوث من توسيع نطاق جماعات أصحاب المصلحة والمستخدمين. وفي عام ٢٠١٦، عُيِّنَت منظمتان من منظمات مفاعلات البحوث، هما المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين، ومعهد مفاعلات ديلفت في هولندا، مركزين متعاونين مع الوكالة في مجالات التقنيات التحليلية المتعددة لبحوث المواد والدراسات البيئية والتطبيقات الصناعية، والمنهجيات القائمة على التنشيط النيوتروني والحُزَم النيوترونية في مفاعلات البحوث على التوالي.

١٢٣- وبحلول نهاية عام ٢٠١٦، تم تحويل ٩٧ مفاعلاً من مفاعلات البحوث إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تم تأكيد إغلاقها بصفة دائمة، بما في ذلك مرفق واحد لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ كان يستخدِم اليورانيوم الشديد الإثراء. وتمثّلت التطوُّرات الهامة في عام ٢٠١٦ في التحوُّل إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء في المفاعل المصدري النيوتروني الصيني المصغَّر الذي وصل إلى الحرجية في آذار/مارس، وفي المفاعل WWR-K في كازاخستان الذي بلغ مرحلة الحرجية في أبريل/نيسان، وإزالة جميع اليورانيوم الشديد الإثراء من المُجَمِّعَة الحرجة السريعة في اليابان. وواصلت الوكالة، بالتعاون مع الصين والولايات المتحدة الأمريكية والبلدان الأخرى صاحبة المصلحة، دعم غانا في جهودها لتحويل وإزالة قلب مفاعلها المصدري النيوتروني المصغّر الذي يعمل بيورانيوم شديد الإثراء، ومن المتوقّع القيام بذلك في عام ٢٠١٧. وانطلقت أنشطة دعم تحويل المفاعل المصدري النيوتروني المصغّر النيجيري.

١٢٤- وتشمل الأنشطة المرتبطة بالحدّ من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ الذي تم إثراؤه فيه. وبحلول نهاية عام ٢٠١٦، تم الانتهاء من إزالة ما يقرب من ١ ٣٠٠ كيلوغرام من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلَك المستخدَم في مفاعلات البحوث في إطار برنامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الأمريكي المنشأ. وفي إطار برنامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الروسي المنشأ، نُقِل ٢ ٢٢٨ كيلوغرام من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلَك المستخدَم في مفاعلات البحوث في نفس الفترة. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٦، أعادت

---

[١٥] يهدف منشور الوكالة المعنون *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (اعتبارات ومعالم بارزة محدَّدة لمشاريع مفاعلات البحوث) (العدد NP-T-5.1 من سلسلة الطاقة النووية التي تصدرها الوكالة) ومجموعة الوثائق الداعمة إلى مساعدة الدول الأعضاء في هذا المجال.

[١٦] تدعم الوكالة العديد من ائتلافات مفاعلات البحوث في منطقة البلطيق، ومنطقة الكاريبي، ووسط أفريقيا، وآسيا الوسطى، وأوروبا الشرقية، ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، وكذلك في رابطة الدول المستقلة والشبكة العالمية لمفاعلات بحوث تريغا. وأصدرت الوكالة مؤخراً في الحالة الأخيرة *History, Development and Future of TRIGA Research Reactors* (تطوُّر ومستقبل مفاعلات بحوث تريغا) (العدد ٤٨٢ من سلسلة التقارير التقنية، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا، ٢٠١٦).

بولندا والولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الروسي والوكالة إلى الاتحاد الروسي آخر ٦١ كيلوغرام متبقية من مواد اليورانيوم الشديد الإثراء الروسية المنشأ من مفاعل ماريا البحثي في أوتوك-سويرك ببولندا.

١٢٥- ويتطلَّب تحويل مفاعلات البحوث العالية الأداء والعالية الفيض أنواعاً متقدمة من وقود اليورانيوم-الموليبدينوم. وبالرغم من إحراز تقدم كبير في هذا المضمار، من الضروري إجراء مزيد من اختبارات التشعيع، وفحوص ما بعد التشعيع، وتقنيات التصنيع، لتحقيق التوافر التجاري لأنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء المؤهَّلة ذات الكثافة العالية.

١٢٦- وبينما لم تقع حالات نقص كبيرة في الموليبدينوم-٩٩ في عام ٢٠١٦، ما زالت هناك تحدّيات تشغيلية في مرافق المعالَجة. ولم تسفر حالات الانقطاع في بعض المرافق العالمية في عام ٢٠١٦ عن أي حالات نقص. وأعيد في ١٩ تموز/يوليه ٢٠١٦ تشغيل مفاعل البحوث البلجيكي BR2، وهو مشعِّع رئيسي في إنتاج الموليبدينوم-٩٩، بعد إغلاق دام تسعة أشهر بسبب أنشطة موسّعة للصيانة والتحديث. وتوقَّف مفاعل البحوث الوطنية الشامل في كندا عن إنتاج الموليبدينوم-٩٩ في ٣١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦، ولكنه ما زال في حالة 'إغلاق مؤقت ساخن' لتوفير قدرة إنتاج احتياطية في حالة حدوث نقص على الصعيد العالمي، وهو أمر مستبعد حدوثه، فيما بين ١ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٦ و ٣١ آذار/مارس ٢٠١٨. وقام المنتجون الرئيسيون الآخرون بزيادة إنتاجهم لتعويض هذه الخسارة.

١٢٧- ويتواصل تحويل عمليات إنتاج الموليبدينوم-٩٩ من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، حيث تتولّى المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين (أستراليا) وشركة NTP للنظائر المشعّة (جنوب أفريقيا) الإمساك بزمام توريد الموليبدينوم-٩٩ القائم على اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠١٦، حقّقت المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين تقدُّماً كبيراً في مرفق إنتاجها الجديد، الذي من المتوقّع الانتهاء من تشييده في مطلع عام ٢٠١٧. وما زالت شركة NTP للنظائر المشعّة تحوُّل عملياتها إلى الاستخدام الحصري لليورانيوم الضعيف الإثراء. ويواصل اثنان من كبار المنتجين، هما معهد العناصر الإشعاعية في بلجيكا، وشركة مالينكرودت في هولندا، إحراز تقدم في دعم تحويل عملياتهما الخاصة بالإنتاج على النطاق التجاري من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء.

دال- الأغذية والزراعة

دال-١- التقنيات النووية والتقنيات المتصلة بها للتحقق من صحة الأغذية

١٢٨- تمثل جودة الأغذية وسلامتها شواغل رئيسية لصناعة الأغذية وللمستهلكين. ويمكن لتكرار أزمات صحة الأغذية وسلامتها أن تعرِّض صحة الجمهور للخطر وتؤدي إلى فقدان ثقة الجمهور في سلامة إمدادات الأغذية. وأدّت العولمة في تجارة الأغذية إلى زيادة الحاجة إلى نُظم فعالة لمراقبة الأغذية من أجل حماية المستهلكين من الأغذية الملوثة والمغشوشة. وباتت جرائم الأغذية – تعمد وضع علامات مضللة على السلع الغذائية أو غشها بصورة منظمة وعلى نطاق واسع لتحقيق مكاسب مالية – تشكِّل نشاطاً إجرامياً رئيسياً يمكن أن يسفر عن خسائر اقتصادية كبيرة ويشوه سمعة قطاعات اقتصادية كاملة، الأمر الذي يؤدي إلى إيجاد حواجز أمام التجارة الدولية. وبالرغم من أن الدافع وراء الغش في الأغذية هو تحقيق كسب مالي فإن هناك في كثير من الأحيان مخاطر على سلامة الأغذية لأن المنتجات المغشوشة أو المزيَّفة لا تخضع لنفس الضوابط التي تخضع

لها المنتجات الأصلية وقد تكون مكوناتها مجهولة. وتشمل الأمثلة إضافة الميلامين إلى مسحوق الحليب لزيادة محتواه الظاهري من البروتين، وهو ما تسبب في الإصابة بآلاف كثيرة من الأمراض ووقوع العديد من حالات الوفاة بين الرُضع بسبب سُمية الميلامين؛ وغش زيت الزيتون البكر الممتاز العالي القيمة بزيت أرخص، مثل زيت الفول السوداني، دون الإعلان عن ذلك على بطاقة التوسيم، ويمكن أن يتسبب ذلك في تفاعلات تسبب حساسية خطيرة؛ بل وحتى الأرز المزيَّف المصنوع من نشا البطاطا والراتنجات الاصطناعية المستخدمة في الصناعة.

دال-١-١- التقنيات التحليلية

١٢٩- ازدادت بسرعة الحاجة إلى أساليب تحليلية لدعم آليات التحقق من صحة الأغذية واقتفائها، ومن المرجح أن تزداد هذه الحاجة في المستقبل في ظل ازدياد تعقد سلاسل إمداد الأغذية والتقدم في معالجة الأغذية وتكنولوجياتها. وتوفِّر التقنيات النووية الخصائص الرئيسية المطلوبة لفحص صحة الأغذية.

١٣٠- ويمكن لقياس نسب النظائر المستقرة الطبيعية للعناصر البيولوجية (الهيدروجين، والكربون، والنيتروجين، والأوكسجين، والكبريت) في الأغذية أن يوفِّر في أحيان كثيرة معلومات عن منشأها الجغرافي أو تقنية إنتاجها من خلال الصلات بنسب النظائر الموجودة في البيئة أو عملية الإنتاج. ويمكن أيضاً للنظائر المستقرة للعناصر الثقيلة (مثل الاسترنشيوم) أن توفِّر معلومات متصلة بالتكوين الجيولوجي لمنطقة المنشأ، وتنقل هذه 'البصمة' من خلال التربة إلى النباتات والحيوانات. ونظراً لأن النظائر المستقرة تمثل خصائص متأصلة في ذرات الأغذية، يتعذَّر التلاعب في توزيعها ونسبها لأغراض الاحتيال.

١٣١- وتوفِّر الصورة العامة لعناصر الأغذية معلومات هامة عن سلامتها فيما يتعلق بتركيز العناصر التي يحتمل أن تكون سامة، ويمكن أن توفِّر معلومات تربط بين الأغذية ومكان إنتاجها. ويُعبِّر التكوين المتعدد العناصر في الأنسجة الحيوانية إلى حد ما عن تكوين النباتات التي تتغذى عليها. من ذلك مثلاً أن الفلزات القلوية، خاصة الروبيديوم والسيزيوم، التي يمكن أن تتجمَّع بسهولة في التربة ويمكن أن تتنقل بسهولة إلى النباتات، مؤشر جيد للهوية الجغرافية.

١٣٢- ويُستخدم أيضاً تحديد البصمة الأيضية، أي تحليل المستقلبات التي تنشأ عن العمليات الخلوية أو الجزيئية في الكائن، للتحقق من صحة الأغذية. ويمكن أن تكون دراسة الأيض موجهة، حيث تركز على مجموعات من المستقلبات ذات الصلة لتوفير معلومات وظيفية مباشرة للنمذجة، أو يمكن أن تكون غير موجَّهة، حيث تكشف عن أنماط المستقلبات التي يمكن أن تميِّز بين مجموعات العينات ويمكن استخدامها لبناء نماذج لتصنيف العينات المجهولة. ومن أمثلة ذلك تحديد البصمة المتولدة بالدوران عن طريق استخدام التنظير الطيفي للرنين المغنطيسي النووي للبروتونات لفحص عصائر الفاكهة والخمور.

١٣٣- وأثبتت هذه التقنيات، بالاقتران مع تقنيات أخرى، مثل تنظير الطيف الاهتزازي، وتحليل الحمض الريبي النووي المنزوع الأوكسجين وتحديد البصمات الميكروبية، أهميتها الكبيرة في التحقق من صحة المواد الغذائية.

١٣٤- ويتطلب استخدام هذه التقنيات بنجاح بحث تطبيقها على مختلف السلع الغذائية، وتطوير قواعد بيانات موسَّعة لنتائج قياس المواد الغذائية الصحيحة، وإجراء تحليل إحصائي دقيق ونمذجة.

التقنيات المتاحة لاختبار صحة الأغذية

١٣٥- تزيد التطورات الأخيرة في الأجهزة التحليلية من إمكانية الوصول إلى التقنيات التحليلية المطلوبة. وباتت بعض الأجهزة التي كان استخدامها مقصوراً من قبل على المختبرات متاحة في أشكال منضدية أو نقالة أو محمولة باليد ميسورة التكلفة ويمكن استخدامها في إجراء الفحوص. من ذلك على سبيل المثال أنه أتيحت مؤخراً أجهزة رنين مغنطيسي نووي منضدية ميسورة نسبياً يمكن أن تجري تحليلات الفحص التي كانت تجريها من قبل أجهزة الرنين المغنطيسي النووي ذات المجال المغنطيسي القوي الباهظة التكلفة والتي كانت تتطلب بنية أساسية متخصصة وعاملين متخصصين. وبالمثل فإن أجهزة قياس الطيف بتألق الأشعة السينية المحمولة باليد وأجهزة قياس الطيف بالأشعة تحت الحمراء القريبة متاحة تجارياً الآن ولها تطبيقات في مجال اختبار الأغذية. وتشمل التقنيات المنضدية أو النقالة الأخرى التي يمكن أن تكون لها تطبيقات في اختبار صحة الأغذية قياس طيف حركة الأيونات الذي يستخدم فيه مصدر تأيين بالنيكل-٦٣، وأصبح يستخدم مؤخراً على نطاق واسع لكشف المتفجرات والمخدرات في المطارات، وقياس نسبة النظائر عن طريق القياس الطيفي النظيري الجزيئي لامتصاص الليزر.

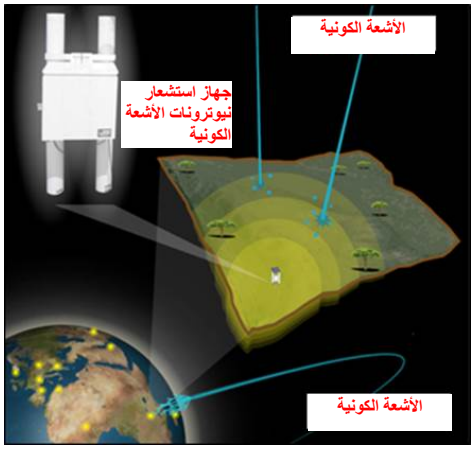
١٣٦- وتعني فعالية تكلفة التقنيات الحديثة وسهولة الحصول عليها أنه يمكن لأصحاب المصلحة في صناعة الأغذية والجهات الرقابية والمستهلكين استخدامها لفحص الأغذية في نقاط متعددة على طول سلسلة الأغذية، ومن شأن ذلك أن يزيد كثيراً من فعالية نُظم المراقبة. ويمكن بعد ذلك فحص المنتجات المشتبه بها، عند الاقتضاء، باستخدام تقنيات التأكيد النهائي في مختبر مرجعي لتوفير معلومات أكثر تفصيلاً لتحقيقات المتابعة.

دال-٢- جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية: أسلوب جديد لرصد رطوبة التربة على نطاق منطقة بكاملها

١٣٧- تستأثر الزراعة بنحو ثلثي استهلاك المياه العذبة في العالم. وللمساعدة على مواجهة تحديات تغيُّر المناخ العالمي والزيادة السريعة في أعداد السكان، يجب أن تزيد المجتمعات الزراعية في جميع أنحاء العالم غلاتها إلى أقصى حد وأن تحسِّن في الوقت نفسه كفاءة استخدام المياه من خلال الري. ويتطلب تحقيق ذلك أساليب لرصد موارد مياه التربة لزيادة كفاءة استخدام مياه الري. وتشمل الأساليب التقليدية لقياس محتوى التربة من المياه أجهزة موقعية في نقاط محدَّدة لنقل معلومات متعلقة عن الماء في التربة، وتمثل هذه المعلومات النقطة التي توضع فيها الأجهزة. ولا يمكن لهذا النوع من الاستشعار الموقعي أن يجمع معلومات عن محتوى الماء في التربة على نطاق منطقة بكاملها، بما في ذلك تجانسها الطبيعي بدون شبكة من الأجهزة القائمة على النقاط. وجهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية جهاز جديد قادر على رصد وقياس معلومات محتوى الماء في التربة على نطاق منطقة بكاملها عن بُعد في مساحة مكانية واسعة (دائرة يبلغ نصف قطرها ٢٥٠ متراً تقريباً أو مساحة تبلغ ٢٠ هكتاراً) بدون الجوانب المستهلكة للوقت والاقتحامية التي تنطوي عليها الشبكات التقليدية الخاصة بقياس محتوى الماء في التربة في نقاط محددة. ويمكن للمجتمعات المحلية أن تستفيد من المعلومات المتعلقة برطوبة التربة على النطاق الذي يوفِّره جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية، وهو ما يفضي إلى تحسين إدارة الموارد المائية التي تزداد شحاً.

١٣٨- ويعتمد أسلوب جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية على كشف الجسيمات النووية العالية الطاقة القادمة من الكون إلى الغلاف الجوي. ويصطدم كثير من هذه الجسيمات مع غازات الغلاف الجوي ويفقد بالتالي طاقة ويتعرض لسلسلة متعاقبة من التحولات إلى جسيمات أقل طاقة تصبح في نهاية المطاف نيوترونات قرب سطح التربة (الشكل دال-١). وتمتص هذه النيوترونات بسهولة في ذرات الهيدروجين. ويعني ذلك أن وجود

الهيدروجين في البيئة هو الوسيلة الرئيسية التي يمكن بها للنيوترونات القادمة أن تختفي من التربة والغلاف الجوي. ويصدق ذلك على الهيدروجين بجميع أشكاله في بيئة معيَّنة، سواءً أتغيرت هذه المصادر الهيدروجينية بسرعة (رطوبة التربة) أو ببطء (الغطاء النباتي، أو المياه السطحية، أو المادة العضوية في التربة)، أو لا تتغيَّر بمرور الوقت (المياه في المعادن الطينية أو الهياكل البشرية). ويكشف جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية سلبياً هذه النيوترونات أثناء تحركها خلال التربة والهواء، ويحدِّد عدد النيوترونات لكل وحدة زمنية. وبالنظر إلى أن أغلبية الهيدروجين الموجود في الأرض وعلى سطحها يتخذ شكل ماء، يمكن تحديد العلاقة بين عدد النيوترونات وكمية المياه الموجودة في التربة في أي منطقة معيَّنة. وتشمل منهجية جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية عملية معايرة، الغرض منها إزالة إشارة الهيدروجين البيئي بخلاف محتوى الماء في التربة. وتُنفذ هذه العملية من خلال حملات لأخذ عينات من أجل التحقق الموقعي.



الشكل دال-١ - رسم توضيحي للأشعة الكونية القادمة المتفاعلة مع الغلاف الجوي والمؤدية إلى وجود نيوترونات على سطح التربة يمكن قياسها بجهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية على مستوى صفحة الأرض (الصورة: الوكالة الدولية للطاقة الذرية).

١٣٩- واستخدام تقنية جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية كأداة ثابتة مثبتة لرصد مياه التربة في البيئات الزراعية مترسخ في الدول الأعضاء حول العالم[١٧]. وبينما يتميَّز هذا الأسلوب بقدرته الكبيرة على توليد معلومات عن رطوبة التربة على نطاق منطقة بكاملها[١٨] فإن استجابة جهاز الاستشعار للتجانس البيئي الطبيعي لمحتوى الماء في التربة موضوع قيد الاستقصاء الموسَّع[١٩،٢٠]. وأفضت جهود تحسين استخدام جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية لاستكشاف التجانس المكاني لمحتوى الماء في التربة إلى بحث وتطوير أجهزة نقالة

---

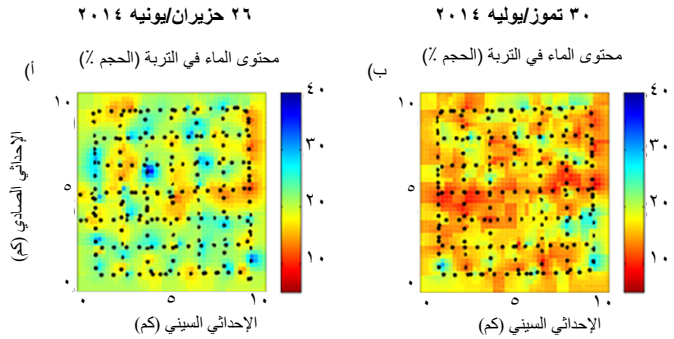
[١٧] *Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., Rosolem, R.: COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 4079– 4099, 2012.*

[١٨] *Franz, T. E., Wahbi, A., Vreughenhil, M., Weltin, G., Heng, L., Oismueller, M., Strauss, P., Dercon, G., Desilets, D., Using cosmic-ray neutron sensors to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural systems, Appl. & Environ. Soil Sci., Article ID 4323742, 11 pages, 2016.*

[١٩] *Desilets, D., Zreda, M., Ferre, T. P. A.: Nature's Neutron Probe: Land Surface Hydrology at an Elusive Scale with Cosmic-Rays, Water Resour. Res., 46, W11505, 7 pages, 2010.*

[٢٠] *Avery, W. A., Finkenbiner, C., Franz, T. E., Wang, T., Nguy-Robertson, A. L., Suyker, A., Arkebauer, T., Muñoz-Arriola, F.: Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic-ray neutron probe method for estimating field-scale soil water content, Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 3859 – 3872, 2016.*

جديدة أكثر تنوعاً لاستشعار نيوترونات الأشعة الكونية. والجهاز النقال لاستشعار نيوترونات الأشعة الكونية، سواءً أكان محمولاً على الظهر أو ملحقاً بمركبة، يعمل بالضبط كما يعمل جهاز الاستشعار الثابت مع نفس البصمة على نطاق منطقة بكاملها. وتتيح خاصية التنقل لتنقية استشعار نيوترونات الأشعة الكونية قدرة على استكشاف التجانس المكاني لرطوبة التربة في البيئة (الشكل دال-٢)، وتبين للعلماء والمزارعين الأماكن التي تكون فيها الأرض جافة والأماكن التي تكون فيها غير جافة، وهي معلومات مطلوبة للري الدقيق. ومع ذلك، يحتاج هذا الأسلوب النقال إلى مزيد من الاستكشاف للوصول باستخدامه إلى المستوى الأمثل وإتاحته للدول الأعضاء. وتشارك الشُعبة المشتركة بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة بدور نشط في هذه التطورات.



الشكل دال-٢ - قدرة جهاز استشعار نيوترونات الأشعة الكونية النقال على رصد وقياس التغيرية المكانية لمحتوى الماء في التربة عبر صفحة الأرض الزراعية. وتمثل الخطوط السواء المتقطعة أماكن القياس أثناء فترتي استقصاء يفصل بينهما شهر واحد. (المصدر: Franz et al., Combined Analysis of Soil Moisture Measurements from Roving and Fixed Cosmic-Ray Neutron Probes for Multiscale Real-Time Monitoring, Geophys. Res. Lett., 42, 3389–3396, 2015)

دال-٣- رسم الخرائط بالهجين الإشعاعي لتطوير أدوات تحديد التركيب الوراثي لدعم برامج تربية الماشية

١٤٠- يقوم التحسين الوراثي لحيوانات المزرعة من أجل زيادة إنتاجيتها من الألبان واللحوم والألياف تقليدياً على اختيار الحيوانات العالية الأداء وتربيتها. وفي ضوء التطورات الأخيرة في الجينوميات، بات من الممكن حالياً تقدير القيمة الاستيلادية للحيوانات بمجرد ولادتها باستخدام أدوات جينومية، مثل رقائق ميكروأريي. ويتطلب تطوير هذه الرقائق لتقييم الحيوانات تحديد متواليات الجينومات الحيوانية ورسم خرائطها. وتساعد خرائط الجينوم على تحديد مكان السمات المحددة على الصبغيات في كائن ما. وتمثل هذه الخرائط أدوات أساسية في تحديد الجينات المسؤولة عن الخصائص المتعلقة بالأمراض أو الإنتاج أو التكاثر.

١٤١- ويمكن وضع خريطة الجينوم باستخدام الأساليب التقليدية أو تقنيات النظائر المشعة. وتستند الأساليب التقليدية لرسم الخرائط – على سبيل المثال رسم خرائط الصلات الوراثية – إلى أحداث التأشب الجيني الطبيعي، وتتطلب حيوانات مؤصلة السلالات في أجيال متعاقبة. وفي حالة الماشية، لا تنطوي تلك الأساليب على تكاليف ضخمة ووقت طويل فحسب (بسبب الفترات الزمنية الطويلة الفاصلة بين الأجيال)، بل وتسفر كذلك عن خرائط منخفضة الاستبانة. ويساعد استخدام تقنيات النظائر المشعة على التغلب على تلك القيود عن طريق محاكاة

أحداث التأثير الوراثي عن طريق تسريع عملية رسم الخرائط الجينومية لتسريع تطوير أدوات لزيادة إنتاجية الماشية.

دال-٣-١- تقنيات النظائر المشعة في رسم خرائط جينوم الماشية

١٤٢- يمكن استخدام الكوبالت -٦٠ أو الأشعة السينية لتشعيع جينوم الماشية بنجاح وتكسيره عشوائياً إلى عدة شظايا. وتستخدم في العادة جرعة إشعاعية تتراوح بين ٣٠ غراي و١٥٠ غراي، وتنقل الشظايا الصبغية المكسورة من جينوم الماشية إلى خلايا القوارض. وتلتئم النهايات الصبغية سريعاً بعد التشعيع ويتم إيلاجها أو إزفاؤها في صبغيات القوارض عند ادماج خلايا أنواع الماشية مع خلايا القوارض. ويحلل ما يتراوح بين ٩٠ و١٠٠ تقريباً من تلك خلايا القوارض والماشية الهجينة بعد ذلك للتحقق من وجود أو عدم وجود واسمات جينية. وعند استخدام جرعة معيَّنة من الإشعاع، تتكسر الواسمات الموجودة على مسافات أبعد في الصبغي على الأرجح وتدخل في شظايا صبغية منفصلة يمكن دمجها مع خلايا هجينة مختلفة. ولا يساعد تواتر ذلك التكسير في تقدير المسافة بين الواسمات فحسب، بل ويساعد أيضاً على تحديد ترتيبها على الصبغيات، وبالتالي وضع خرائط كثيفة لجينومات الماشية. وتتوقف استبانة تلك خرائط الهجين الإشعاعي في العادة على الجرعة الإشعاعية المستخدمة، إذ تزداد استبانة الخريطة كلما كانت الجرعة أعلى. وهكذا فإن خرائط الهجين الإشعاعي مفيدة بدرجة كبيرة، لا سيما في إنتاج خرائط عالية الاستبانة لجينومات الماشية بتكلفة منخفضة نسبياً وفي غضون نطاقات زمنية أقصر مما في التقنيات التقليدية.

دال-٣-٢- استخدامات خرائط الهجين الإشعاعي في تربية الماشية

١٤٣- يسَّرت خرائط الهجين الإشعاعي العالية الاستبانة تطوير رقائق ميكروأريي المستخدمة على نطاق واسع في تربية الماشية الحلوب لزيادة إنتاج الألبان. وأحدثت تكنولوجيا الانتخاب الجينومي التي أسفر عنها ذلك ثورة في التلقيح الاصطناعي من خلال الزيادة الكبيرة في المكاسب الوراثية السنوية في إنتاج الألبان. ووصلت حالياً حصة السوق من ثيران التلقيح الاصطناعي الصغيرة المختارة بالاستناد إلى هذه التكنولوجيا أكثر من ٥٠٪ في كثير من البلدان الصناعية، وتتطلع بلدان نامية زراعية أخرى إلى تنفيذ التكنولوجيا الجديدة في نُظم إنتاج ماشية الألبان. وبالمثل، استحدثت خرائط جينوم عالية الاستبانة لأنواع أخرى من الماشية، بما فيها الأغنام والجاموس والخنازير. واستخدم الباحثون في جميع أنحاء العالم منذ عهد أقرب الألواح الهجينة الإشعاعية التي طورتها الوكالة لتجميع أول مشروع على الإطلاق لمتواليات الجينوم[٢١] ولوضع خريطة جينومية كاملة عالية الاستبانة[٢٢] للماعز التي تمثل أحد أنواع الماشية الهامة الأخرى في البلدان النامية. وساعد ذلك أيضاً على تطوير رقاقة ميكروأريي يمكن استخدامها لتربية الماعز من أجل زيادة إنتاجيتها من اللحوم.

---

[٢١] Dong, Y., et al. (2013). Sequencing and automated whole-genome optical mapping of the genome of a domestic goat (Capra hircus). Nature Biotechnology 31, 135–141.

[٢٢] Du, X., et al. (2014). يتيح تحديث مجمَّع جينوم الماعز باستخدام خرائط الهجين الإشعاعي الكثيفة تحليلاً مفصلاً لعمليات إعادة الترتيب التطوري في البقريات. BMC Genomics، العدد ١٥، الصفحة ٦٢٥.

دال-٣-٣- الآثار على الأمن الغذائي وأهداف التنمية المستدامة

١٤٤- ولا تتاح حالياً خرائط الهجين الإشعاعي والأدوات الجينومية لكثير من أنواع الماشية الهامة زراعياً، مثل الجمال، وماشية الزبو، والألبكة، واللامة، وأبقار القطاس، والحمير، والميثون، والأرانب. وتزدهر هذه الأنواع من الحيوانات في النوعين الرئيسين من البيئة القاسي، وهما المناخ الصحراوي الحار ومناطق المرتفعات الباردة، وتساهم في سُبل عيش أعداد كبيرة من المزارعين الحديين. فالجمال على سبيل المثال تقوم بدور هام في سُبل عيش عدة ملايين من الرعاة الرُحل في أفريقيا وآسيا، وتشهد عدة بلدان زيادة سريعة في الطلب على حليب الجمال بصفة خاصة.

١٤٥- وسوف يساعد تطوير خرائط الهجين الإشعاعي والأدوات الجينومية وتنفيذها على وضع برامج تربية لتحسين إنتاجية تلك الماشية وتعزيز الأمن الغذائي. وسجلت في السنوات الأخيرة زيادة كبيرة في الطلب من الدول الأعضاء على اللوحات الهجينة الإشعاعية لرسم خرائط جينوم الأنواع السالفة الذكر. وتقوم الوكالة، من خلال مختبراتها المشتركة بينها وبين منظمة الفاو بدور حلقة الوصل لتطوير تلك الألواح والموارد الضرورية الأخرى (مثل المواد المرجعية البيولوجية ذات الصلة، وموارد رسم الخرائط، وأدوات البرمجيات الحاسوبية) وتوزيعها على الدول الأعضاء.

الشكل دال-٣- (إلى اليسار) تشعيع خلايا جملية لتشييد ألواح هجين إشعاعي (إلى اليمين) ألف- خلايا هجينة حيّة تنقل من طبق استزراع. باء- مستعمرة من خلايا هجين إشعاعي لرسم خرائط الجينوم. (الصور من: الوكالة)

هاء- الصحة البشرية

هاء-١- التطورات في مكافحة سرطان البروستاتا: التشخيص والعلاج

هاء-١-١- الخلفية

١٤٦- يصنَّف سرطان البروستاتا ضمن أكثر أنواع السرطان شيوعاً في الرجال على نطاق العالم، وهو، بالإضافة إلى سرطان الرئة، والكبد، والمعدة، والأمعاء، من بين أكثر أسباب الوفاة الناجمة عن السرطان شيوعاً في الذكور. وبعد استئصال البروستاتا أو العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية، يمكن أن تحدث انتكاسة بيولوجية كيميائية لدى ٥٤٪ من المرضى، ويُعرَّف ذلك بأنه ارتفاع مستويات مصل المستضد المحدد للبروستاتا (PSA). ويمكن التنبؤ بحدوث انتكاسة موضعية في قاعدة البروستاتا عقب استئصال البروستاتا جذرياً بدرجة من الدقة تبلغ نحو ٨٠٪. ويستند نوع العلاج المستخدم إلى مستويات مصل المستضد المحدد للبروستاتا وحدها، بل وكذلك

إلى فحوص التصوير التشخيصي الأخرى، مثل مسح العظام، لاستبعاد حدوث انبثاثات، أو التصوير المقطعي الحاسوبي، أو التصوير بالرنين المغنطيسي، لإظهار حدوث انتكاسة موضعية.

١٤٧- وبالرغم من وجود مستوى معقول من الحساسية في التمييز بين الانتكاسة الموضعية والانتكاسة البعيدة، لا توفِّر الأدوات التنبؤية المتاحة، مثل المخططات البيانية، معلومات عن الموقع الحقيقي للانتكاسة (مثل العقد اللمفية مقابل العظام، أو منطقة الحوض مقابل المنطقة الواقعة خارج الحوض) أو العدد الفعلي للانبثاثات. وعلاوة على ذلك، يحدث لدى كثير من مرضى سرطان البروستاتا ارتفاع في مستويات مصل المستضد المحدد للبروستاتا الذي يمكن أن يكون متوافقاً مع الانتكاسات الموضعية أو الانتكاسات الجهازية. ولهذا السبب، يتعذَّر تخطيط العلاج الذي يستهدف إنقاذ المريض نظراً لاحتمالات المخاطر التي ينطوي عليها الاعتماد فقط على المخططات البيانية. ولذلك يوجه المرضى عموماً نحو العلاج الإشعاعي الإنقاذي لقاعدة البروستاتا (في حال وجود اشتباه بحدوث انتكاسة موضعية) أو العلاج الجهازي باستخدام الهورمونات، مثل العلاج بالحرمان من الأندروجين في حال الاشتباه بحدوث انتكاسة جهازية.

هاء-١-٢- التشخيص

١٤٨- يتسم التصوير التقليدي، بما في ذلك التصوير المقطعي الحاسوبي، والتصوير الوميضي للعظام، والرنين المغنطيسي، بانخفاض دقته عند استخدامه مع المرضى الذين يعانون انتكاسة كيميائية بيولوجية. وأظهر التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني باستخدام الكولين عن حساسية دون المستوى الأمثل عند استخدامه مع المرضى الذين يعانون انتكاسة بيولوجية كيميائية مبكرة، أي المرضى الذين لديهم مستويات منخفضة من مصل المستضد المحدد للبروستاتا بعد العلاج الجذري. وتبيَّن خلال العقد الأخير أن تقنيات الطب النووي، مثل التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني باستخدام الكربون-١١ والكولين، والفلور-١٨والكولين، أدق من التصوير التشخيصي التقليدي لدى المرضى الذين يصابون بانتكاسة في مستويات مصل المستضد المحدد للبروستاتا، وهو ما يسمح بالتمييز بين الانتكاسة الموضعية المحصورة في منطقة الحوض والانتكاسة الجهازية.

١٤٩- والتوقيت الأمثل لإجراء العلاج الإنقاذي من أجل الحصول على أفضل النتائج من زاوية التوقعات هو الوقت الذي يكون فيه مستوى انتشار المرض ضئيلاً وليس عندما يصل مصل المستضد المحدد للبروستات إلى مستويات يمكن كشفها قبل العلاج الجذري. وقد يكون من الحاسم في هذا السياق توافر اختبار تشخيصي قادر على التمييز بين الانتكاسة الأوَّلية، أي معاودة الظهور موضعياً، وهو ما يمكن علاجه، والانتكاسة الجهازية التي لا يمكن علاجها إلاّ من خلال نُهج تسكينية.

هاء-١-٣- التطورات والاتجاهات الأخيرة

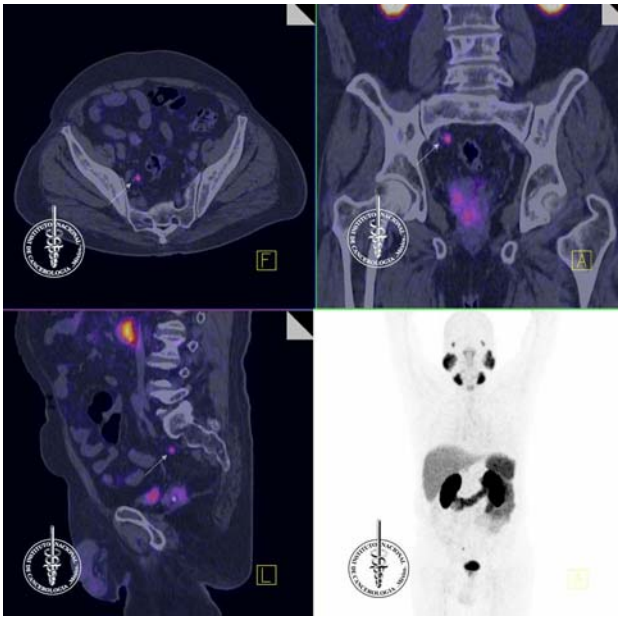
١٥٠- شهدت الآونة الأخيرة تطوير جزيء جديد يستهدف مستضد الغشاء البروستاتي. وهذا المستضد هو عبارة عن إنزيم غشائي يظهر أساساً في خلايا سرطان البروستاتا مقارنة بأنسجة البروستاتا السليمة. وأثناء الدراسات الأوَّلية لتشخيص المعاودة المبكرة للمرض، أظهر الجاليوم-٦٨ ومستضد الغشاء البروستاتي، باعتباره كابحاً لمستضدات الغشاء البروستاتي خارج الخلايا، والمستخدم كمستحضر صيدلاني إشعاعي للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع التصوير المقطعي الحاسوبي دقة أكبر كثيراً من تقنية التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع التصوير المقطعي الحاسوبي باستخدام الفلور-١٨ والكولين. ووثقت هذه الدراسات أيضاً نسبة أفضل بين الورم والخلفية في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع التصوير المقطعي الحاسوبي باستخدام الجاليوم-٦٨ ومستضد الغشاء البروستاتي مقارنة بالتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع التصوير المقطعي الحاسوبي باستخدام الفلور-١٨والكولين في تحديد الإصابات التي يشتبه في انتكاسها.

١٥١- وكشفت الدراسات الأخرى التي أُجريت في شريحة أوسع من المرضى الذين تعرضوا لانتكاسة بيولوجية كيميائية بعد العلاج الجذري عن قدرة تشخيصية متميزة للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع

التصوير المقطعي الحاسوبي باستخدام الجاليوم٦٨- ومستضد الغشاء البروستاتي في المرضى الذين يعانون انتكاسة بيولوجية كيميائية للمرضى حتى عندما تكون مستويات مصل المستضد المحدد للبروستاتا منخفضة جداً. وكان استخدام هذا المقتفي موضع اهتمام خاص ومتزايد لدى الأوساط العلمية في الأشهر الأخيرة. وأظهر أيضاً هذا المستحضر الصيدلاني الإشعاعي عن خصوصية عالية (أكثر من ٩٠ في المائة) في الدراسات التي تستخدم تحليل الأنسجة كمعيار مرجعي للتحقق من نتائج التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني (الشكل هاء-١). وأخيراً، لم تشر أي دراسة من الدراسات التي أُجريت عن أحداث معاكسة أو تأثيرات دوائية يمكن كشفها إكلينيكياً في هذه التقنية.

١٥٢- وللأسباب الموضحة أعلاه، يمكن أن يكون مستضد الغشاء البروستاتي هدفاً جزيئياً ممتازاً لتطوير مقتفيات إشعاعية للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني والتصوير المقطعي الحاسوبي نظراً لقدرته على كشف المعاودة المبكرة للمرض.

١٥٣- وأفضى نجاح الأداء الإكلينيكي في استخدام الجاليوم-٦٨ ومستضد الغشاء البروستاتي في التشخيص إلى تطوير العلاج بنفس الجزيء ولكن بعد توسيمه بنظير عالي الطاقة، مثل اللوتيتيوم-١٧٧ أو الإيتريوم-٩٠. وكشفت التجارب الإكلينيكية عن نتائج جيدة جداً حتى الآن، ولكن يلزم إجراء مزيد من الاختبارات للتحقق من هذا العلاج الجديد. ويُطلق على استخدام نفس الجزيء في التشخيص والعلاج على حد سواء 'التشخيص العلاجي' وهو ما ينطبق على مستضد الغشاء البروستاتي في مكافحة سرطان البروستاتا.



الشكل هاء-١ - مريض لديه تاريخ سابق في الإصابة بسرطان البروستاتا، وعولج بالجراحة والعلاج الكيميائي. وأجريت دراسة طبية نووية باستخدام الجاليوم-٦٨ ومستضد الغشاء البروستاتي في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مع التصوير المقطعي الحاسوبي لتقييم المتابعة بعد العلاج. ويظهر السهم الامتصاص الشاذ للمقتفي في غدة لمفاوية، ويشير ذلك إلى معاودة المرض. (الصور من: المعهد الوطني للسرطان في المكسيك).

واو- الموارد المائية

واو-١- التطورات الجديدة في استخدام النظائر في دراسة الأمطار لتشخيص الطقس والمناخ

١٥٤- الأمطار هي المصدر النهائي لجميع المياه في الأنهار والبحيرات ومستودعات المياه الجوفية. وتنقسم العمليات التي تتكون بها الأمطار إلى نوعين رئيسيين: حَملية، وطباقية. وتتميز الأمطار الحملية، مثل العواصف الرعدية، بكثافتها العالية (كمية كبيرة من الأمطار خلال فترة زمنية قصيرة) ولكنها تحدث في منطقة محدودة (تتراوح مساحتها بين ١٠ و٢٥ كم^{٢})، في حين أن الأمطار الطباقية منخفضة الكثافة ولكنها تحدث لمدة زمنية أطول كثيراً وتغطي مساحة أوسع (أكثر من ٥٠٠ كم^{٢}). وتشير التوقعات إلى أن الأمطار الحملية التي تسبب فيضانات أكثر وكوارث أخرى، ستزداد في ظل ارتفاع درجة حرارة المناخ.

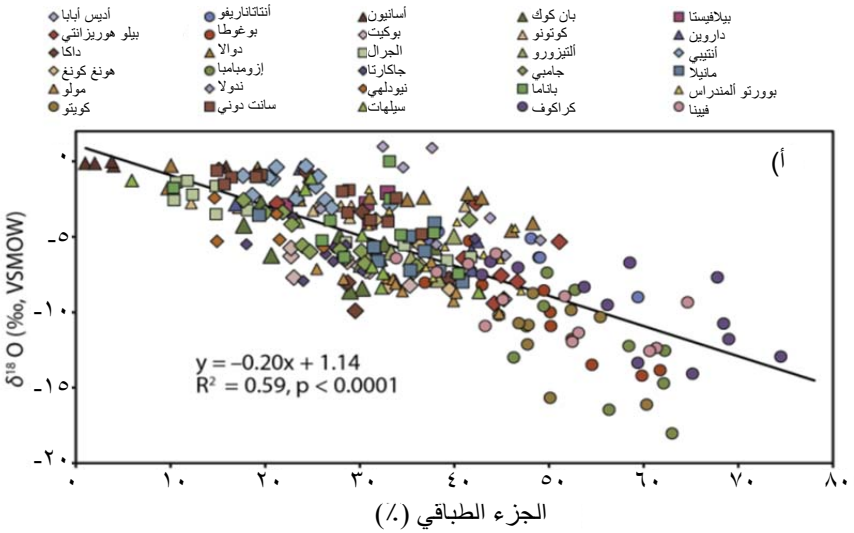
١٥٥- ونظراً للفروق في الكتل الذرية، يختلف سلوك النسب النظيرية للأوكسجين والهيدروجين في سُحب الحمل الحراري أو السحب الطباقية، وتحتوي بالتالي على نسب مختلفة من النظائر. ومن الممكن، باستخدام التقلبات النظيرية لتصنيف كمية الأمطار الحملية أو الطباقية، فهم عمليات السُحب وكيفية تغيرها في المواسم المختلفة، وهو ما يفضي إلى قدرة أفضل على نمذجتها من أجل عمليات محاكاة الطقس الأكثر أجلاً وآثار تغيُّر المناخ على الأجل الأطول.

١٥٦- وساد في مطلع خمسينات القرن الماضي اعتراف بالفائدة المحتملة لهذه التقلبات النظيرية في فهم كيفية تأثير المناخ على دورة الماء على كوكب الأرض، وكان ذلك يشكِّل أحد الاعتبارات الرئيسية عندما أنشأت الوكالة الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار بالتعاون مع المنظمة العالمية للأرصاد الجوية في عام ١٩٦٠. وأدّت البيانات النظيرية المستمدة من الشبكة المذكورة إلى إدراك أن الجليد القطبي والقاري (في المنطقة القطبية الجنوبية والمنطقة القطبية الشمالية، وغرينلاند، ومرتفعات الإنديز، وجبال الهيملايا) يحتوي على سجلات تاريخيه للتغيرات التي طرأت على دورة الماء استجابة لبرودة المناخ أو احتراره.

١٥٧- ومن المعروف أن البيانات النظيرية المستمدة من الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار وغيرها من الملاحظات مختلفة في دراسة الأمطار عنها في مختلف أنواع السُحب، مثل رخات المطر السريعة مقابل الأمطار البطيئة التي تهطل لمدة طويلة. ومع ذلك، لم يكن من المعتقد أن تلك الفروق النظيرية كافية للمساعدة على بلورة فهم أفضل لعمليات السحب. وأظهرت الأعمال التي أجرتها الوكالة مؤخراً[٢٣] أن هناك في الواقع ارتباط كبير بين النسب النظيرية وعمليات السُحب المسؤولة عن هطول الأمطار، ومن المرجح أن توسِّع هذه المعرفة الجديدة بدرجة كبيرة فائدة الشبكة المذكورة في فهم العمليات المرتبطة بالطقس على الأجل القصير والعمليات المرتبطة بالمناخ على الأجل الطويل.

---

[٢٣] Aggarwal, Pradeep K, Ulrike Romatschke, Luis Araguas-Araguas, Dagnachew Belachew, Frederick J. Longstaffe, Peter Berg, Courtney Schumacher & Aaron Funk, "Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios", Nature Geoscience, Vol. 9, pp 624-629.



الشكل واو-١ - العلاقة بين متوسط محتوى الأوكسجين-١٨ الطويل الأجل المقاس في عينات شهرية مركبة من الأمطار، وجزء الأمطار الطباقية في مجموعة مختارة من محطات الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار في خطوط العرض المدارية والمتوسطة. وأما سائر جزء الأمطار فهو حملي. (المصدر: أغاروال، ب. وآخرون. نسب الأمطار الحملية والطباقية التي تكشف عنها نسب نظائر الماء. (Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios) المجلد التاسع من دورية علم الأرض Nature Geoscience)

١٥٨- واستخدمت البيانات المستمدة من جهاز رادار على متن ساتل رحلة قياس كميات الأمطار المدارية الذي أُطلق بالاشتراك مع وكالتي الفضاء اليابانية والأمريكية في عام ١٩٩٨، لتقدير نسب أنواع الأمطار للفترة من عام ١٩٩٨ حتى عام ٢٠١٤. وعندما يتم الجمع بين نسب هذين النوعين من الأمطار والبيانات النظيرة المستمدة من الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار لنفس الفترة الزمنية، يتبيَّن وجود ارتباط قوي بين البارامترين (الشكل واو-١). وترتفع نسب النظائر في الأمطار الحملية بينما تنخفض نسب النظائر في الأمطار الطباقية. ومعظم الأمطار التي تُجمع على نطاقات زمنية يومية أو شهرية هي خليط من هذين النوعين من الأمطار.

١٥٩- ويعتقد حتى الآن أن محتوى التريتيوم في الأمطار يشير إلى اختلاط الرطوبة القارية بالرطوبة المحيطية. ومع ذلك تظهر الدراسة الأخيرة المشار إليها أعلاه إلى أن المحتوى من التريتيوم يتفاوت أيضاً بتفاوت نسب نوع المطر. وتبيَّن أن الأمطار الحملية تحتوي على نسبة أعلى من التريتيوم عندما تكون السُحب عميقة جداً (أي عندما تصل إلى أكثر من ٦ كيلومترات فوق سطح الأرض) وتنمو بعض جسيمات الثلج في ظل وجود رطوبة من ارتفاعات أعلى من ٥ كيلومترات حيث محتوى التريتيوم مرتفع بطبيعته. ويرجع ذلك إلى أن التريتيوم يتكون في الاستراتوسفير ويصل إلى التروبوسفير (حيث تتكون السحب والأمطار) عن طريق تبادل الرطوبة.

١٦٠- وسوف تساعد القياسات الروتينية للنظائر المستقرة والتريتيوم في الأمطار اليومية أو شبه اليومية على بلورة فهم أفضل للتقلبات القصيرة الأجل في ديناميات السُحب المسؤولة عن التغييرات في أجزاء الأمطار. ويمكن استخدام البيانات النظيرية كأداة تشخيصية مستقلة لرصد التقلبات في نوع الأمطار وآثار تغيُّر المناخ عليه.

١٦١- وسوف تساعد التطورات التكنولوجية التي تستخدم تقسيم الأمطار بالاستناد إلى التفاوتات النظيرية على تحسين النماذج المناخية (أو نماذج الدوران العالمي) ومحاكاة الأمطار الحملية. ويمكن للمعلومات الدقيقة والمحسَّنة في هذا المجال أن تساهم في قدرة الدول الأعضاء على التنبؤ بآثار تغيُّر المناخ والتخفيف منها.

زاي- البيئة

زاي-١- استخدام الأدوات النظيرية في دراسة تحمض المحيطات

١٦٢- تغطي محيطات العالم أكثر من ٧٠ في المائة من سطح الأرض، وتساهم بدور حاسم في تحديد مناخها. وللمحيطات، إذا أديرت بصورة مستدامة، دور هام في توفير فرص عمل وإطعام سكان العالم. وتنتج المحيطات أكثر من نصف الأوكسجين الذي نتنفسه، وتمتص في الوقت نفسه جزءاً كبيراً من فائض الحرارة وغازات الدفيئة الهامة، مثل ثاني اكسيد الكربون الذي ننتجه. ونحن نعلم الآن أن التغييرات الجوهرية في كيمياء مياه البحر تحدث في جميع محيطات العالم.

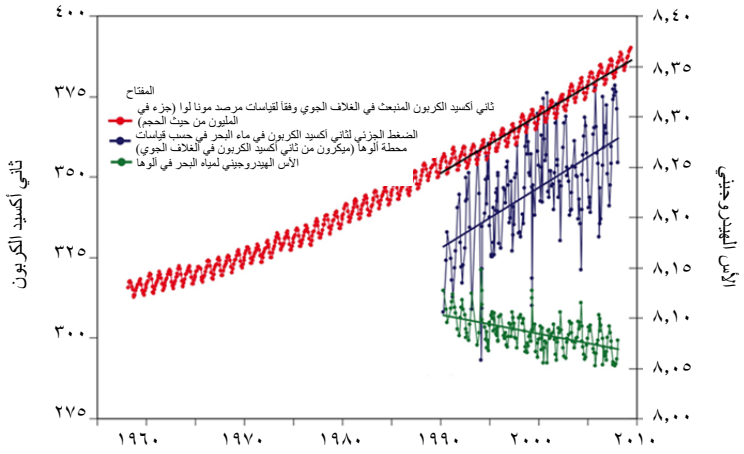
زاي-١-١- تحمض المحيطات – المشكلة الأخرى الناشئة عن ثاني أكسيد الكربون

١٦٣- يزداد انطلاق ثاني أكاسيد الكربون باطراد منذ بداية الثورة الصناعية. ويتجاوز حالياً تركز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ٤٠٠ جزء في المليون (٠,٠٤٪). ويستطيع المحيط حالياً امتصاص ما يقرب من ربع ثاني أكسيد الكربون المنطلق في الغلاف الجوي سنوياً. وبارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوف باطراد ترتفع أيضاً مستويات ثاني أكسيد الكربون في المحيط (الشكل زاي-١) وفي حين أن العلماء الأوائل كانوا يركزون على فوائد إزالة ثاني أكسيد الكربون من المحيطات، يتبيَّن الآن بوضوح بعد سنوات من ملاحظة المحيطات وجود انخفاض خطير أيضاً، ذلك أن ثاني أكسيد الكربون الذي يمتصه المحيط يغيِّر كيمياء مياه البحر من خلال عمليات يُطلق عليها اسم تحمض المحيطات.

١٦٤- وكجزء من هذه العملية، تنطلق أيونات الهيدروجين الحرة (H^+)، الأمر الذي يؤدى إلى تراجع في الأس الهيدروجيني لمياه البحر فضلاً عن انخفاض تركزات الأيونات الكربونية ($CO32^-$) عندما تتحد بعض أيونات الهيدروجين الحرة مع الكربونات لتكوِّن البيكربونات ($HCO3^-$). وتشير عمليات تمثيل التكوينات القديمة إلى أن الأس الهيدروجيني لمياه البحر ظل ثابتاً نسبياً لملايين السنين؛ ومع ذلك، لوحظ في العقد ونصف العقد الفائت، أي منذ بداية الثورة الصناعية، تراجع منتظم في الأس الهيدروجيني على نطاق العالم. وفي حين أن انخفاض الأس الهيدروجيني اليوم يمكن أن يبدو صغيراً نسبياً (٠,١ من الوحدات، أي بزيادة نسبتها ٢٦٪ تقريباً في الحموضة)، توحي أفضل التوقعات العلمية المتاحة حالياً[٢٤] أن استمرار الانبعاثات سيقلِّص على الأرجح من الأس الهيدروجيني لمياه البحر السطحية بما قدره ٠,٤ وحدات أخرى في هذا القرن (أي بما يعادل زيادة نسبتها ١٥٠٪ تقريباً في الحموضة).

---

[٢٤] Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification,Science 14 Dec 2007:Vol. 318, Issue 5857, pp. 1737-1742 DOI:10.1126/science.1152509.



الشكل زاي-١ - زيادة الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي وانخفاض الأس الهيدروجيني لمياه المحيطات السطحية باستخدام قياسات مرصد مونا لوا، ومحطة "ألوها" في هاواي للسلاسل الزمنية المحيطية.

(المصدر: Feely R.A., Doney S.C. and Cooley S.R., 2009. Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO_2 world. Oceanography 22(4), 36–47)

زاي-١-٢- الآثار البيولوجية الناجمة عن تحمض المحيطات

١٦٥- بالنظر إلى أن تحمض المحيطات يؤثر على الكيمياء البحرية العالمية، تتأثر أيضاً العمليات البيولوجية الأساسية بطرق حاسمة في بعض الأحيان. وتستخدم مجموعة كبيرة من الكائنات البحرية (مثل كثير من الرخويات، والقشريات، والمرجانيات، والطحالب المرجانية، والمنخربات)، أيونات الكربونات لبناء هياكلها المكوَّنة من كربونات الكالسيوم. ومن المهم أن أيونات الكربونات تشكل أيضاً الأساس للصفائح المتكلسة لدى الطحالب النباتية الصدفية، والعوالق المجهرية التي تشكِّل جزءاً من قاعدة سلسلة الأغذية البحرية. وعلاوة على ذلك يمكن لمستويات ثاني أكسيد الكربون المذاب أن تؤثر على الوظائف العضوية للكائنات البحرية التي تعتمد في كثير من الأحيان على مجموعة ضيقة من البارامترات البيئية، بما فيها ثاني أكسيد الكربون المذاب والأس الهيدروجيني.

١٦٦- وهناك طرق كثيرة يمكن أن تتأثر بها الكائنات البحرية بتحمض المحيطات المستمر. وفي حالة الأسماك، يمكن لزيادة ثاني أكسيد الكربون في مياه المحيطات أن تنطوي على مجموعة كبيرة من الآثار التي تشمل تغيير تكوين عظمة أذن السمكة، ونمو صغار الأسماك، وسلوك المفترسات والفرائس. ويمكن لتحمض المحيطات في حالة أسماك المحار التي تحتوي على أصداف من كربونات الكالسيوم، مثل المحار، والحلزون، والإسكالوب، أن يضر بها من خلال تأثيره على نموها، ووظائفها العضوية وبقائها. وبالنسبة للعوالق التي تتغذى عليها كائنات بحرية أخرى، ويتكلس بعضها، يمكن لتحمض المحيطات أن يؤثر على نموها ووظائفها العضوية وبقائها وما يمكن أن يترتب على ذلك من عواقب في كل شبكة الأغذية، ومن ذلك على سبيل المثال أن فراش البحر القشري لديه بالفعل قشور رقيقة بدرجة كبيرة، ويمكن أن تذوب هذه القشور بسرعة في مياه البحر التي يبلغ فيها الأس الهيدروجيني ٧,٨، وهو الأس الهيدروجيني المتوقع لمياه البحر في عام ٢٠١٠ وفقاً للتنبؤات الحالية. وفي المرجانيات التي لديها هياكل من كربونات الكالسيوم، سيغدو بناء هذه الهياكل والحفاظ عليها في ظل ازدياد تحمض المحيطات أمراً أكثر صعوبة، ويمكن أن يؤثر ذلك على الروابط التعايشية بين المرجانيات

ودواميات السياط، وهو ما سيؤدي إلى ابيضاض المرجان. وتوحي الملاحظات الواسعة الانتشار إلى أن ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون يؤثر تأثيراً قوياً على ابيضاض المرجان (الشكل زاي-٢).

الشكل زاي-٢ - ابيضاض المرجان على نطاق واسع في جُزر مارشال. (الصورة من: الوكالة)

زاي-١-٣- استخدام التقنيات النووية لفهم آثار تحمض المحيطات

١٦٧- تتميَّز عدة نظائر مشعة بوضعها الفريد الذي يجعها مناسبة لقياسات التأثيرات البيولوجية الناجمة عن تحمض المحيطات، بما في ذلك الكالسيوم-٤٥ لدراسة معدلات التكلس، والكربون-١٤ لتقييم الإنتاج الأوَّلي من العوالق النباتية البحرية، والاسترنشيوم-٨٥ لتقييم معدلات التمعدن البيولوجي، والزنك-٦٥ لدراسة معدلات الأيض لدى الكائنات البحرية، ومجموعة من العناصر النزرة المرقومة إشعاعياً (مثل الفضة-١١٠ شبه المستقرة، والكادميوم-١٠٩، والكوبالت-٥٧، والكوبالت-٦٠، والمنغنيز-٥٤، والسيلينيوم-٧٥) لدراسة معدلات التراكم البيولوجي والتنقية المعتمدة على الأس الهيدروجيني. ويمكن استخدام التكوين النظيري للبورون-١٠ والبورون-١١ في المرجانيات المعمِّرة لإعادة بناء الأس الهيدروجيني لمياه البحر من أجل فهم الظروف البيئية في الماضي وتحديد سياق التغييرات المتنبأ بها في الأس الهيدروجيني للمحيطات في المستقبل.

١٦٨- وتحقَّق تقدم كبير في علم تحمض المحيطات[٢٥] في السنوات الأخيرة. ومما يُعزز التجارب اليوم استخدام النظائر المشعة مع نهج متعدد المقتفيات لتقصي تأثير الانخفاض المتوقع في الأس الهيدروجيني للمحيطات على الكائنات البحرية. وتُظهر التجارب الخاضعة للمراقبة التي تجريها الوكالة في مختبراتها البيئية لتأثيرات تحمض المحيطات على مجموعة مختارة من المرجانيات والمحاريات والأسماك والتغييرات أيضية والفيزيولوجية بعد التعرض لأس هيدروجيني بيئي منخفض لمدة طويلة. ويمكن بفضل التطورات في استخدام النظائر المشعة، بما فيها دراسات النظائر المزدوجة (مثل السيزيوم- ١٣٤، ١٣٧)، الخروج بأفكار جديدة تساعد على فهم الآثار الواسعة النطاق لتحمض المحيطات من خلال عوامل الإجهاد التراكمية المضافة مثل درجات الحرارة و/أو الأوكسجين المذاب، في بيئات المحيطات في المستقبل.

[٢٥] يقوم مركز التنسيق الدولي المعني بتحمض المحيطات بدور حلقة الوصل للمعلومات في هذا المجال https://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2181.

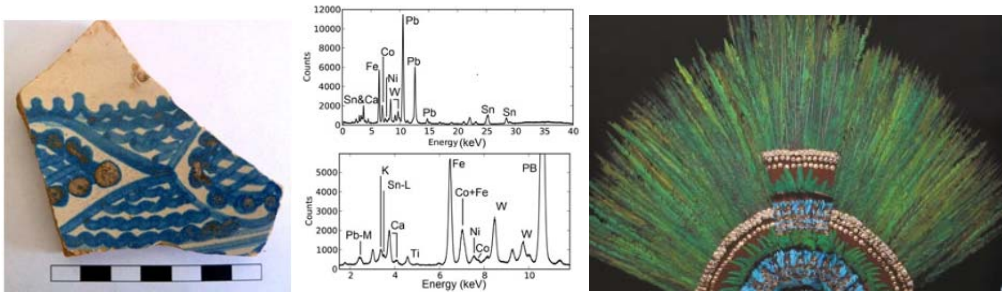
حاء- التكنولوجيات الإشعاعية

حاء-١- التراث الثقافي: استكشافه وحفظه باستخدام التكنولوجيات الإشعاعية

١٦٩- تُمثل مواد التراث الثقافي في كثير من الأحيان تحفاً فنية جديرة بالاعتزاز ولا تقدَّر قيمتها بثمن وتتطلب توخي الحرص في التعامل معها والأخذ بتقنيات متقدمة لحفظها. وتسخَّر التقنيات الإشعاعية لتوفير فحوصات مفصَّلة لهذه المواد وتعزيزها والمساعدة على التحكم في تدهورها أو تحللها. ويمكن أيضاً تطهير التحف الفنية، عند اللزوم، وبالتالي حفظها بصورة أفضل. ويزداد تطور التقنيات الإشعاعية وقبولها لدى المؤسسات المعنية المسؤولة عن إدارة التحف الثقافية.

حاء-١-١- الاستكشاف والفحص

١٧٠- يمكن للتقنيات الإشعاعية أن تساعد في التحقق من أصالة اللوحات الزيتية أو تحديد ما إذا كانت هناك طبقة أخرى تحت السطح، وتأكيد ما إذا كانت تحفة ما مصنوعة من الذهب أو مجرد مطلية بالذهب، وتقييم مدى هشاشة تمثال قديم قبل نقله، وذلك كله دون إلحاق أي ضرر بالتحفة. ويمثل تألق الأشعة السينية أداة يمكن أن تساعد في تحليل عناصر المواد، وغالباً ما تُستخدم في المتاحف لدراسة مجموعة متنوعة من التحف الفنية (الشكل حاء-١).

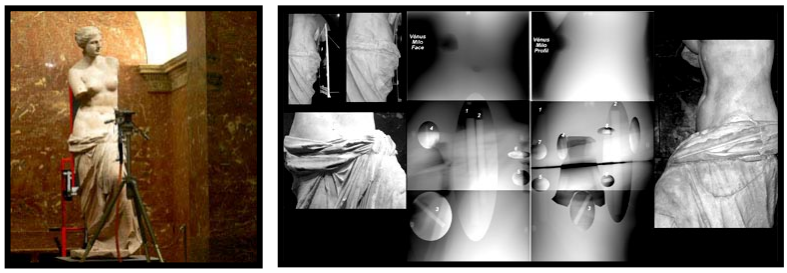


الشكل حاء-١- تحليل عناصر قطعة من الخزف من القرن السابع (إلى اليسار) وقطعة أثرية مكسيكية على شكل رأس من القرن السابع عشر حُلِّلت باستخدام جهاز تألق أشعة سينية محمول باليد للكشف عن زخارف الذهب الأصلية والسمات المضافة لاحقاً (إلى اليمين). (الصورة من: الوكالة)

١٧١- وعلى غرار التصوير الإشعاعي الطبي للأجزاء الداخلية من جسم الإنسان، يمكن لتقنيات التصوير الإشعاعي أن تكشف عن الهيكل الداخلي للتماثيل وتُظهر مكامن الضعف الممكنة. وتساعد مجموعة متنوعة من تقنيات التصوير الإشعاعي (مثل التصوير الإشعاعي التقليدي باستخدام الأشعة السينية، أو التصوير بأشعة غاما، أو التصوير الإشعاعي باستخدام المعجِّلات، أو الفحص الإشعاعي، أو التصوير بأشعة بيتا، أو التصوير الإشعاعي بالإلكترونات الثانوية، أو التصوير الإشعاعي بالانبعاث الإلكتروني، أو التصوير الإشعاعي النيوتروني، أو التصوير الإشعاعي الذاتي والتصوير الإشعاعي بمساعدة الحاسوب) في فحص الأعمال الفنية واستكشافها (الأشكال حاء-٢، وحاء-٣، وحاء-٤).

الشكل حاء-٢- الاختلافات في تقنيات الأشعة السينية، مثل انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجسيمات، والتقنيات القائمة على المعجلات، تُستخدم روتينياً في المتاحف لدراسة الأعمال الفنية، من قبيل هذا المثال من متحفسيفيكو دارتي أنتيكا في طورينو بإيطاليا (الصورة من: مختبر التقنيات النووية من أجل التراث الثقافي/المعهد الوطني للفيزياء النووية، إيطاليا)

الشكل حاء-٣- الصورة الإشعاعية تشير إلى أن الرأس والجذع في هذا التمثال للإله جوبيتر الموجود في فيل-إفرو بفرنسا، قد تم وصلهما باللحام. (الصورة من: ج.ل.بوتين)



الشكل حاء-٤- صورة بأشعة غاما تبين الهيكل الداخلي لتمثال فينوس دي ميلو في متحف اللوفر بفرنسا استخدمت لاتخاذ قرار بشأن نقل التمثال. (الصور من: الوكالة)

حاء-١-٢- استخدام التقنيات القائمة على الإشعاعات لحفظ التُحف الفنية وتقويتها

١٧٢- يمكن لإصابة تُحف التراث الثقافي بالحشرات أن يسارع تدهورها ويمكن أن يشكل خطراً يهدِّد صحة من يتعاملون معها. وتستخدم تقنيات التطهير التقليدية المستخدمة في الطب والزراعة لمعالجة كميات كبيرة من القطع، مثل التبخير، مواد كيميائية سامة، مثل الفورمالدهايد، أو الإيثانول، أو أكسيد الإيثيلين، أو تتطلب ظروفاً شديدة، مثل الحرارة والضغط المرتفعين اللذين لا يمكن لكثير من التحف الثقافية تحملهما. وأشارت التجارب التي أُجريت في خمسينات القرن الماضي (استخدام أشعة غاما في تشعيع حشرات زايلوفيغوس آكلات الخشب) في البداية إلى تأثير الإشعاعات المؤيِنة كمبيد أحيائي للآفات. ومع تطور تكنولوجيا المعالجة الإشعاعية في الصناعة، ازداد استخدامها في تطهير تحف التراث الثقافي. وتتيح المعالجة الإشعاعية التي ترسخت تماماً في تعقيم المنتجات الطبية والأغذية وطعوم الأنسجة، خياراً خالياً من المواد المضافة ويناسب درجة حرارة الغرفة من أجل معالجة مواد التراث الثقافي. وبالنظر إلى أن الإشعاعات لا تغني فقط عن استخدام المواد الكيميائية السامة، بل وتكفل كذلك اختراقاً متسقاً وشاملاً بغض النظر عن حجم الجسم أو شكله، ولا تخلِّف وراءها أي مواد

ضارة متبقية، فقد باتت تشكل خياراً جذاباً لحفظ التراث الثقافي، وهي مأمونة للعاملين وكذلك للبيئة. ويتم إجراء التطهير الإشعاعي بصورة مأمونة على يد أشخاص مرخصين في مرافق معتمدة.

تطهير مومياء رمسيس الثاني

١٧٣- نقلت مومياء رمسيس الثاني المعروضة في المتحف المصري في القاهرة، إلى فرنسا لعرضها في عام ١٩٧٦، وتبيَّن أنها مصابة ببرقات وحشرات ومجموعة كبيرة من الفطريات، بالرغم من عدم إصابتها بأي بكتيريا ممرضة. وقام المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي في فرنسا، بالاتفاق مع السلطات المصرية بتطهير المومياء في عام ١٩٧٧ باستخدام التشعيع بأشعة غاما في الورشة الإقليمية المعنية بالمحافظة النووية على القطع الفنية. وأدار اتحاد من المختبرات والمتاحف في باريس وغرينوبل المعالجة الإشعاعية بعد تخطيط وفحص دقيقين. ولكي يتسنى تحديد جرعة التشعيع التي تقضي بفعالية على جميع الفطريات (أكثر من ستين نوعاً) دون أن يؤثر ذلك على سائر المكونات، مثل الشعر، والمنسوجات، والجلد، والأسنان في المومياء، أُخذت أربعمائة عينية من مومياوات أخرى لفحصها. واقتضى شكل المومياء الكبير (١,٧٢ من الأمتار طولاً) فضلاً عن وجود مواد متعددة داخلها، حسابات معقدة لقياس الجرعة باستخدام نماذج حسابية دقيقة لتوجيه جرعة متسقة قدرها ١٨ كيلوغراي. وشُعِّعت مومياء رمسيس الثاني بنجاح بعد إجراء تحقق باستخدام نموذجين من المومياوات، وأعيدت المومياء إلى مصر حيث بقيت في حالة جيدة لمدة أربعين عاماً بعد ذلك.

مشروع الفن الإشعاعي، البرتغال

١٧٤- عولج قرميد برتغالي يرجع إلى القرن الثامن عشر في متحف القرميد الوطني في لشبونة، باستخدام جرعة إشعاعية قدرها ~٤ كيلو غراي، لوقف نشاط البكتيريا الموجودة على السطح والفطريات الموجودة داخلها، والتي كانت مسؤولة عن ظهور بقع خضراء. وأظهرت عملية التشعيع كفاءة ميكروبية تزيد على ٧٠٪.

مركز كساكسيا للبحوث، إيطاليا

١٧٥- تبين من الدراسات التي أُجريت في مركز كساكسيا للبحوث التابع للوكالة الوطنية الإيطالية للتكنولوجيات الجديدة والطاقة والتنمية الاقتصادية المستدامة، لتأثيرات أشعة غاما على المواد أن الإشعاعات المؤينة تتميَّز بكفاءتها الكبيرة في التطهير من الحشرات الضارة (بجرعات تتراوح بين ٠,٢ و٠,٥ كيلو غراي) والطفيليات الدقيقة (بجرعات تتراوح بين ٣ و٨ كيلو غراي). وكشفت الدراسات عن أنه حتى مع استخدام جرعة إشعاعية قدرها ١٠ كيلو غراي، فإن ألوان الصور المطبوعة على السليلوز النقي أو الورق ظلت ثابتة بغض النظر عما إذا كانت العملية انطوت على استخدام الألبومين، أو جيلاتين الفضة، أو الكلولوديون، أو الأنيلين، وهو ما يدل على فائدة التكنولوجيا الإشعاعية في معالجة الصور القديمة والمصابة بميكروبات.

كبسولة الزمن، البرازيل

١٧٦- عُثِر على صندوق مصنوع من الخشب والرصاص بداخله بعض أقدم الوثائق من عصر الامبراطورية البرازيلية (القرن التاسع عشر) داخل حجر أحد الأساسات في مدينة ريو دي جانيرو. وعولج الصندوق بجرعة إشعاعية تراوحت بين ٨ و١٠ كيلو غراي في المرفق المتعدد الأغراض للتشعيع بأشعة غاما في معهد البحوث النووية وبحوث الطاقة التابع لهيئة الطاقة النووية الوطنية في البرازيل، قبل ترميمه (الشكل حاء-٥).

الشكل حاء-٥- كبسولة الزمن تعالج من الفطريات. (الصورة من: ب. فاسكيز، معهد البحوث النووية وبحوث الطاقة التابع لهيئة الطاقة النووية الوطنية، ساو باولو، البرازيل)

كروما- حفظ ماموث صغير مجمَّد

١٧٧- عُثر في عام ٢٠٠٨ في سيبيريا بالاتحاد الروسي على عينة مجمَّدة لفيل ماموث صغير. وهذا الماموث الصغير الذي أُطلق عليه اسم 'كروما'، نسبة إلى النهر الذي وُجد على ضفافه، والذي تشير التقديرات إلى أنه يرجع إلى أكثر من ٥٠ ٠٠٠ سنة، ربما يكون أقدم عينة معروفة. وبالرغم من أنه محفوظ بصورة جيدة، كان لا بد من وقف نشاط أي آثار للبكتريا أو غيرها من الكائنات الممرضة المحتملة الأخرى التي كان يمكن أن يكون حاملاً لها. وبرز التشعيع بأشعة غاما باعتباره التقنية الأنسب لمعالجة العينة بكاملها معالجة أحيائية غير متلفة. وفي تموز/يوليه ٢٠١٠، جرى تعريض الماموث الصغير المجمَّد لجرعة بلغت ٢٠ كيلو غراي في غرينوبل بفرنسا، وما زال محفوظاً حفظاً جيداً ومعروضاً للجمهور. (الشكل حاء-٦).

الشكل حاء-٦ - فيل ماموث صغير يسمى 'كروما' محفوظ بعد تشعيعه في تموز/يوليه ٢٠١٠ . (الصورة من: الدكتور كيوك كوي تران من الورشة الإقليمية المعنية بالمحافظة النووية على القطع الفنية، المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة – غرينوبل)

60 عامًا

تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

IAEA

www.iaea.org

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Vienna, Austria
الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org