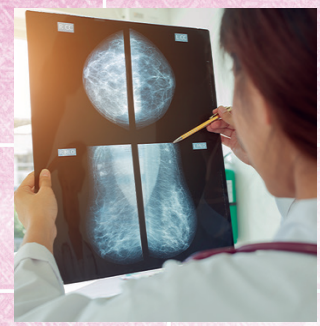
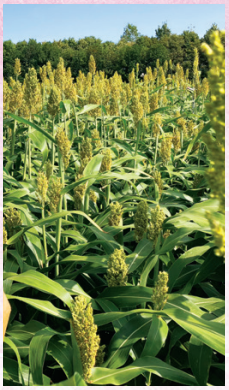
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٩





IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

صورة الغلاف مقدمة من:
GAEC; Gesellschaft für Nuklear-Service mbH; IAEA;
Lynkeos Technology Ltd.; SouthernNuclear

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٩

GC(63)/INF/2

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
آب/أغسطس ٢٠١٩

IAEA/NTR/2019

تصدير

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

ويسلِّط استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٩ الضوء على التطورات البارزة التي شهدها العالم في عام ٢٠١٨، في المجالات المختارة التالية: تطبيقات القوى، والبيانات الذرية والنووية، وتطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث، واستخدام التقنيات النووية في إدارة الأغذية والتربة والثروة الحيوانية، وتشخيص السرطان وعلاجه، والتطورات المستجدَّة في دراسة النظائر في الأمطار، وآثار تحمُّض المحيطات، وحفظ التراث الثقافي.

وقد قُدِّمت مسودة استعراض الأمان النووي إلى مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس ٢٠١٩ ضمن الوثيقة GOV/2019/4. وأُعدَّت هذه الصيغة النهائية في ضوء المناقشات التي جرت في مجلس المحافظين، وكذلك في ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

قائمة المحتويات

موجز جامع ١
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٩ ..... ١
التقرير الرئيسي ١
ألف- تطبيقات القوى ١
ألف-١- القوى النووية اليوم ١
ألف-١-١- البلدان المشغِّلة ٣
ألف-١-٢- البلدان المتوسِّعة ٥
ألف-١-٣- البلدان المستجدَّة ٧
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية ٩
ألف-٣- دورة الوقود ١٠
ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية ١٠
ألف-٣-٢- ضمان الإمدادات ١٤
ألف-٣-٣- المرحلة الختامية ١٤
ألف-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة ١٦
ألف-٤-١- إخراج المرافق النووية من الخدمة ١٦
ألف-٤-٢- الاستصلاح ١٧
ألف-٤-٣- التصرف في النفايات المشعة ١٩
باء- البيانات الذرية والنووية ٢٣
جيم- التطبيقات الخاصة بالمُعجِّلات ومفاعلات البحوث ٢٥
جيم-١- المعجِّلات والأجهزة المرتبطة بها ٢٥
جيم-١-١- تكنولوجيات ابتكارية من خلال هندسة الحُزم الأيونية ٢٥
جيم-١-٢- محاكاة تلف مواد المفاعلات بالاستعانة بالمعجِّلات ٢٥
جيم-١-٣- رصد تلوث الهواء واسع النطاق باستخدام تقنيات تحليلية نووية ٢٦
جيم-١-٤- القياسات الميدانية لتوصيف التلوث السطحي ٢٧
جيم-٢- مفاعلات البحوث ٢٨
جيم-٢-١- تكنولوجيات جديدة في المهدئات لإنتاج نيوترونات باردة ٣١
دال- التكنولوجيات الإشعاعية ٣٢
دال-١- التصوير المقطعي بالأشعة الكونية: مسبر من النجوم ٣٢
دال-١-١- التطبيقات ٣٣
هاء- الصحة البشرية ٣٦

هاء-١- خدمات معايرة التصوير الإشعاعي للثدي بالأشعة السينية ٣٦
هاء-١-١- الخلفية ٣٦
هاء-١-٢- السّمات الإشعاعية ٣٦
هاء-١-٣- مقاييس الجرعات الإشعاعية ٣٧
هاء-١-٤- عمليات المعايرة..... ٣٧
هاء-١-٥- تطورات أخرى ٣٧
هاء-٢- الجراحة الموجَّهة بالأشعة في السرطانات النسائية ٣٨
هاء-٢-١- الخلفية ٣٨
هاء-٢-٢- سرطان عُنق الرحم..... ٣٩
هاء-٢-٣- سرطان بطانة الرحم..... ٣٩
هاء-٢-٤- سرطان المبيض..... ٤٠
هاء-٢-٥- الاتجاهات المستقبلية..... ٤٠
واو- الأغذية والزراعة ٤١
واو-١- تطورات جديدة تشير إلى تحوُّل في نموذج تشعيع الأغذية والتشعيع الخاص بالصحة النباتية..... ٤١
واو-٢- استخدام التكنولوجيات النووية للتكيُّف السريع للمحاصيل والنظم المحصولية مع تغير المناخ..... ٤٤
واو-٢-١- الاستيلاد الطفري للنباتات بمساعدة الواسمات من أجل تعجيل تطوير أصناف ذكية مناخياً .. ٤٤
واو-٢-٢- التصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية لأغراض تحديد الأنماط الظاهرية غير الاقتحامي عالي الإنتاجية للنباتات..... ٤٦
واو-٣- التطبيق المبتكر للتكنولوجيات النظيرية والنووية في تغذية الحيوان..... ٤٦
واو-٣-١- استخدام التقنيات النووية لدراسة وتحسين تغذية الحيوانات التي ترعى الأعشاب ٤٧
واو-٣-٢- الـ ن-ألكانات تساعد على تقدير استهلاك الأغذية وقابليتها للهضم واختيار النظام الغذائي.... ٤٨
واو-٣-٣- تحليل المغذيات المتبقية في الروث باستخدام التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة يساعد على تقدير المحتويات الغذائية واستهلاك الأغذية الطوعي واختيار النظام الغذائي ٤٨
واو-٣-٤- تألق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة يحدد المحتوى المعدني في الكلأ بدقة..... ٤٩

موجز جامع

١- في نهاية عام ٢٠١٨، حققت مفاعلات القوى النووية العاملة البالغ عددها ٤٥٠ مفاعلاً رقماً قياسيًّا من حيث القدرة العالمية على توليد الكهرباء، إذ وصلت تلك القدرة إلى ٣٩٦,٤ غيغاواط (كهربائي)، بزيادة قدرها ٥ غيغاواط (كهربائي) مقارنة بعام ٢٠١٧. وخلال عام ٢٠١٨، وُصِّلت بالشبكة الكهربائية تسعة مفاعلات، وأُغلقت سبعة مفاعلات على نحو دائم، وبدأت أعمال تشييد خمسة مفاعلات. ومازالت آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد تتركَّز في آسيا، حيث يوجد ٣٥ من أصل ٥٥ مفاعلاً قيد التشييد، وكذلك ٥٨ من أصل ٦٨ مفاعلاً وُصِّلت بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

٢- ومن بين الدول الأعضاء التي لديها محطات قوى نووية عاملة في الوقت الراهن، والبالغ عددها ٣٠ دولة عضواً، هناك ١٤ دولة عضواً إمَّا تشيِّد مفاعلات جديدة أو تستكمل مشاريع تشييد عُلِّقت في وقت سابق. وثمَّ ٢٨ بلداً آخر تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية ضمن مزيج الطاقة الخاص بها أو تخطِّط لذلك أو تتَّخذ خطوات فعلية في هذا الصدد. وهناك أربعة بلدان مستجدَّة تعمل على تشييد أول محطة للقوى النووية لديها، وعدَّة بلدان أخرى بلغت مراحل متقدِّمة من عملية إعداد البنية الأساسية اللازمة.

٣- وتشير التوقُّعات التي وضعتها الوكالة في عام ٢٠١٨ بشأن القدرة العالمية على توليد القوى النووية في الحالة المرتفعة إلى زيادة تلك القدرة بنسبة ٣٠٪ مقارنة بالمستويات الحالية بحلول عام ٢٠٣٠ وزيادتها إلى الضعف تقريباً بحلول عام ٢٠٥٠، في حين تشير التوقعات في الحالة المنخفضة إلى تراجع مستمر في القدرة لفترة تمتدُّ زهاء عقد واحد قبل أن تعود إلى مستويات عام ٢٠٣٠ بحلول عام ٢٠٥٠. وهناك حاجة إلى التوسُّع كثيراً في مساهمة القوى النووية في التخفيف من حدَّة تغير المناخ، وهو ما يتبيَّن من مسارات الانبعاثات المعروضة في تقرير خاص صادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC).

٤- وكما تبيّن الطبعة السادسة والعشرون من "الكتاب الأحمر"، وهو تقرير مرجعي عالمي ذو حجية يصدر كلَّ سنتين، فإنَّ الإمدادات العالمية من اليورانيوم أكثر من كافية لتلبية الاحتياجات المتوقَّعة في المستقبل المنظور، بصرف النظر عن الدور الذي سوف تؤديه الطاقة النووية في نهاية المطاف صوب تلبية الطلب على الكهرباء والأهداف المناخية العالمية في المستقبل. بيد أنَّ انخفاض أسعار اليورانيوم لا يزال يحدُّ من قدرة الشركات على الاستثمار في الاستكشاف وإجراء دراسات الجدوى وتشييد المشاريع الجديدة. والقدرات العالمية في مجالات التحويل والإثراء وصُنع الوقود أكثر من كافية لتلبية الطلب كما يتجسَّد في كلتا الحالتين المرتفعة والمنخفضة للتوقُّعات بشأن القدرة المنشأة على توليد القوى النووية.

٥- وفيما يتعلق بمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، دخل اتفاق العبور المبرم مع الصين حيّز النفاذ في شباط/فبراير ٢٠١٨، ووُقِّعت عقود النقل مع المنظمتين المفوَّضتين من الاتحاد الروسي وكازاخستان في أيلول/سبتمبر وتشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨، على التوالي. ووقَّعت الوكالة عقوداً مع شركة Kazatomprom الذرية الوطنية وشركة Orano Cycle لشراء اليورانيوم الضعيف الإثراء.

٦- وحتى اليوم، تمَّ تفريغ كمية تبلغ قرابة ٤٠٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة من محطات القوى النووية كوقود نووي مستهلَك، يخضع منها قرابة ٢٥٪ لإعادة المعالجة. وتُخزن الكمية المتبقية إمَّا في أحواض المفاعلات أو في مرافق خزن الوقود النووي المستهلَك بعيداً عن المفاعلات والبالغ عددها ١٥١ مرفقاً في ٢٧ بلداً.

٧- ويُتوقع الاضطلاع في السنوات المقبلة بالكثير من العمل في ميدان الإخراج من الخدمة، وما يتصل بذلك من أنشطة الاستصلاح، فيما يخص مفاعلات القوى، ومفاعلات البحوث، والمرافق الأخرى المعنية بدورة الوقود، والمجمعات الحرجة، والمعجِّلات، ومرافق التشعيع. وهناك تحسينات مستمرة تتحقَّق في هذه المجالات بالاستعانة بتكنولوجيات مثبتة وجديدة على حد سواء.

٨- وأحرزت عدَّة بلدان تقدماً في المشاريع التي تضطلع بها بشأن التخلُّص الجيولوجي العميق من النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلَك المعلن عنه باعتباره من النفايات. وفي غانا وماليزيا، بلغ التقدُّم مراحل مهمة في إطار مشروعين رائدين في مجال التخلُّص داخل حفر السبر من المصادر المشعة المختومة المهملة. وتوجد حول العالم مرافق عاملة معنية بالتخلُّص من سائر فئات النفايات المشعة الأخرى.

٩- واستمر إحراز التقدُّم في مجال تعزيز الأمان وتحسينه في محطات القوى النووية ومفاعلات البحوث في مختلف أنحاء العالم، ونفَّذت الوكالة العديد من بعثات استعراض النظراء والخدمات الاستشارية في جميع مجالات الأمان. وواصلت الدول الأعضاء التماس المساعدة من الوكالة في مجالات مثل إدارة التقادم، وإدارة الأخطار الداخلية والخارجية، ومراقبة التلوث، والاستفادة من الخبرات التشغيلية، ووضع الإطار الرقابي اللازم لبرامج القوى النووية، والمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، فضلاً عن الإخراج من الخدمة والتصرف في النفايات المشعة.

١٠- وصدرت في عام ٢٠١٨ عدَّة مكتبات للبيانات النووية، وتُعدُّ هذه المكتبات ضرورية لجميع أنشطة البحث والتطوير المضطلع بها بشأن التطبيقات النووية، سواء في مجال القوى أو في المجالات غير المتصلة بالقوى. وأُطلقت الشبكة الدولية المعنية بتقييم البيانات النووية (INDEN) لتحفيز التقدُّم في تقييمات النويدات باستخدام المقاطع المستعرضة النيوترونية، ولهذه التقييمات أهمية خاصة فيما يتعلق بالتكنولوجيات النووية.

١١- وأُفيد بأنَّ التكنولوجيات والأجهزة المبتكرة المنطوية على استخدام المعجِّلات والحُزم الأيونية أحرزت نتائج مشجِّعة في مجالات مثل الاتصالات الآمنة، ومحاكاة الأضرار المادية، ورصد تلوُّث الهواء، والتخفيف من حدَّة تأثير أكسيدات النيتروجين وأكسيدات الكبريت في تغيُّر المناخ، وقياس التلوُّث السطحي.

١٢- ولا تزال مفاعلات البحوث العاملة، البالغ عددها ٢٥٢ مفاعلاً في ٥٥ بلداً، تؤدِّي دوراً مهمًّا في دعم قطاعات الطب والصناعة والتعليم والقوى النووية. وهناك مفاعلات بحوث جديدة قيد التشييد في سبعة بلدان، في حين تخطط عدَّة بلدان أخرى لتشييد مفاعلات بحوث جديدة أو تفكِّر في ذلك. وحتى اليوم، هناك ٩٩ مفاعل بحوث و٤ مرافق لإنتاج النظائر الطبية إمَّا تم تحويلها من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكيد أنَّها في حالة إغلاق. وفي عام ٢٠١٨، تم تحويل المفاعل المصدري النيوتروني المصغَّر في نيجيريا من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُعيد الوقود النووي الشديد الإثراء المشعَّع إلى الصين. وانتهت شركة Curium، وهي شركة تقدِّم الحلول في مجال الطب النووي، من تحويل عملية صُنع المواد المستهدفة لتقتصر على استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، ما جعل قرابة ٧٥٪ من الموليبدينوم-٩٩ المباع في العالم اليوم يُنتج دون استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء. ورغم أنَّ عام ٢٠١٨ شهد على الصعيد العالمي فترات انقطاع وجيزة في بعض مرافق تشعيع ومعالجة المواد المستهدفة المصنوعة من الموليبدينوم-٩٩، ما أسفر عن وقوع بعض حالات النقص في الإمدادات على الصعيد الإقليمي، فقد عُوِّض جانب من التقلبات في الإنتاج عن طريق جهود بذلها المنتجون والممارسون في القطاع الصحي.

١٣- والتصوير الإشعاعي بالميونات هو تقنية ناشئة تستخدم الإشعاعات الأساسية الموجودة في الطبيعة في شكل ميونات الأشعة الكونية. وتنطوي ميونات الأشعة الكونية على مستوى من الطاقة يفوق الأشعة السينية النمطية بنحو ١٠ ٠٠٠ ضعف، ومن ثمَّ يكون بوسعها أن تخترق الهياكل، حتى الكبيرة الحجم منها، دون أن تخلِّف جرعة إشعاعية تتجاوز مستويات الإشعاعات الأساسية الطبيعية. ويمكن استخدام تقنيات التصوير الإشعاعي بالميونات كأداة غير متلِفة لدراسة سلامة هياكل مدنية بأكملها، مثل المباني والجسور والأنفاق. ويمكن أيضاً تطبيق هذه التقنيات في مجالي علوم الأرض وعلم الآثار، وكذلك في ميداني الأمان والأمن النوويين والتصرف في النفايات المشعة.

١٤- وتخضع ملايين النساء كلَّ عام للفحص الطبي للكشف عن سرطان الثدي عن طريق التصوير الإشعاعي للثدي باستخدام جرعة منخفضة من الأشعة السينية. ومن الضروري إعطاء أقلّ جرعة ممكنة مع ضمان أفضل مستوى ممكن من جودة الصورة لجميع أنواع الأثداء وعلى اختلاف تركيبتها. ومن أجل تحقيق ذلك، تستخدم الوحدات الحديثة التي توفِّر التصوير الإشعاعي للثدي طائفة واسعة من طاقات الحُزم. وتساعد مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات المستشفيات على ضمان أن تكون الجرعات التي تعطيها مستندة إلى المعايير الدولية المتفق عليها. وتحتاج معدات قياس الجرعات إلى المعايرة بانتظام. وبغية قياس الجرعات بدقة، يوصى باستخدام غرف تأيُّن عالية الجودة تحافظ على ثبات استجابتها على نطاق طاقات الحُزم المختلفة الموجودة في العيادات.

١٥- وتنطوي الجراحة الموجَّهة بالأشعة فيما يخصّ السرطانات النسائية على إمكانية تقليل مستويات الاعتلال في الأجلين القصير والطويل بالمقارنة باستئصال العقد اللمفاوية بالكامل. وتؤدي العقد اللمفاوية الخافرة دوراً أساسيًّا في عملية انتقال السرطان من عضو إلى آخر (النقائل السرطانية)، ومن ثمَّ فإنَّ تحديد أماكنها وأخذ الخزعات منها من الجوانب المحورية في العديد من علاجات السرطان. ويُعدُّ أخذ الخزعات من العقد اللمفاوية الخافرة الأسلوب الوحيد الموثوق لفحص العقد اللمفاوية في مرحلة النقائل السرطانية المجهرية. والتطور الأهم في مجال الجراحة الموجَّهة بالأشعة فيما يتعلق بعلاج السرطانات النسائية هو بدء العمل في غرف العمليات بأجهزة مثل كاميرات أشعة غاما المحمولة.

١٦- وتشكِّل عملية تشعيع الأغذية جزءاً مهمًّا من مرحلة ما بعد الإنتاج، إذ تضمن خلوّ الأغذية من الميكروبات التي تسبِّب التسمُّم الغذائي، أو الآفات، أو الكائنات الدقيقة المتلِفة للأغذية، ومن ثمَّ تُطيل عمر صلاحية تخزينها. وقد جرت العادة على أنَّ تشعيع الأغذية كثيراً ما يُعهد به إلى مرافق منفصلة كبيرة الحجم، غير أنَّ استحداث أجهزة تشعيع جديدة وتكنولوجيات ذات صلة يمهّد الطريق أمام اتِّباع نهج جديد. وتقلّص التكنولوجيا حجم الأجهزة التي تولِّد حُزم الإلكترونات والأشعة السينية، وتشير التطورات الأخيرة في مجال التشعيع بالمصادر الآلية إلى أنَّه قد يمكن في المستقبل تركيب وحدات التشعيع في خطوط تعبئة الأغذية بسهولة أكبر.

١٧- وتتطلَّب الخسائر الكبيرة في المحاصيل من جرَّاء تغيُّر المناخ استحداث خطوط استيلاد ابتكارية من أجل ضمان الأمن الغذائي العالمي. ويشكِّل مزيج التقنيات الذي يجمع بين كل من الاستيلاد الطفري للنباتات والانتقاء بمساعدة الواسمات والأساليب الغزيرة الإنتاجية في تحديد الأنماط الظاهرية وصفةً ناجعة لتحقيق التكيُّف السريع للنباتات مع تغيُّر المناخ. ويتمُّ الأخذ بعمليات لإدارة تسلسل سير العمل بما يكفل الفعالية من حيث التكلفة في تحديد الطفرات المستحثة التي تُنتج أنماطاً ظاهرية بعينها، وهذه التكنولوجيات والمنهجيات تتدفق بصورة متزايدة إلى الدول الأعضاء.

١٨- ومن المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على الأغذية ذات المنشأ الحيواني بنسبة ٦٠-٧٠٪ بحلول عام ٢٠٥٠. وحتى تتمكَّن صناعة الثروة الحيوانية من تلبية هذا الطلب، سوف تحتاج إلى تكثيف ما لديها من نظم الإنتاج بالاستعانة بالتكنولوجيا. وسيتعيَّن مضاعفة إمكانية الوصول إلى إمدادات العلف والكلأ والمراعي الجيدة. ويمكن عن طريق تطبيق التكنولوجيا النظيرية والنووية تطبيقاً ابتكاريًّا المساهمة في تكوين مجموعة بيانات عن مقدار الغذاء الذي تحصل عليه الحيوانات من العلف والنظم الغذائية التي تختارها ومقدار المغذيات في الحشائش التي تتغذى عليها، بحيث يُسترشد بهذه البيانات في وضع استراتيجيات ملائمة لإدارة التغذِّي على العلف والرعي. ويمكن للدراسات بشأن المغذيات الدقيقة أن توفِّر الأساس لتحديد المكمِّلات الغذائية من المعادن اللازمة لتحقيق أفضل مستوى ممكن من صحة الحيوانات وإنتاجياتها.

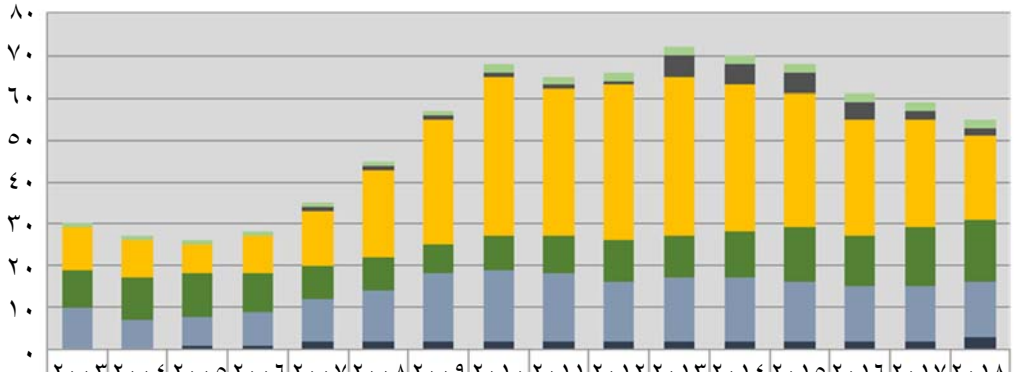
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٩
التقرير الرئيسي

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، كان عدد مفاعلات القوى النووية العاملة حول العالم ٤٥٠ مفاعلاً، بقدرة إجمالية على توليد الكهرباء بلغت ٣٩٦,٤ غيغاواط (كهربائي)[١] (انظر الجدول ألف-١)، وهو أعلى رقم يتحقَّق حتى الآن. ويمثِّل ذلك زيادة قدرها نحو ٥ غيغاواط (كهربائي) في القدرة الإجمالية، مقارنةً بأرقام عام ٢٠١٧. والمفاعلات قيد التشغيل منها ٨٢,٢٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الخفيف؛ و١٠,٩٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الثقيل؛ و٣,١٪ مفاعلات مبرَّدة بالماء الخفيف ومهدَّأة بالغرافيت؛ و٣,١٪ مفاعلات مبرَّدة بالغاز. وهناك ثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلز سائل. وأنتج ٣٧٦ مفاعل ماء خفيف قرابة ٨٩٪ من الكهرباء المولَّدة نووياً.

٢- وفي عام ٢٠١٨، وُصِّلت بالشبكة الكهربائية تسعة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط: منها سبعة في الصين (هايانغ-١، وهايانغ-٢، وسانمن-١، وسانمن-٢، وتايشان-١، وتيانوان-٤، ويانغ جيانغ-٥)، واثنان في الاتحاد الروسي (لينينغراد ٢-١ وروستوف-٤). وخضعت سبعة مفاعلات للإغلاق الدائم، وهي: تشينشان-١ في تايوان، الصين؛ وإيكاتا-٢ وأوهي-١ وأوهي-٢ وأوناغاوا-١ في اليابان؛ ولينينغراد-١ في الاتحاد الروسي؛ وأويستر كريك في الولايات المتحدة الأمريكية).



	٢٠٠٣	٢٠٠٤	٢٠٠٥	٢٠٠٦	٢٠٠٧	٢٠٠٨	٢٠٠٩	٢٠١٠	٢٠١١	٢٠١٢	٢٠١٣	٢٠١٤	٢٠١٥	٢٠١٦	٢٠١٧	٢٠١٨
أمريكا – اللاتينية	١	١	١	١	١	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢
أمريكا – الشمالية	٠	٠	٠	٠	١	١	١	١	١	١	٥	٥	٥	٤	٢	٢
آسيا - الشرق الأقصى	١٠	٩	٧	٩	١٣	٢١	٣٠	٣٨	٣٥	٣٧	٣٨	٣٥	٣٢	٢٨	٢٦	٢٠
آسيا - الشرق الأوسط وجنوب آسيا	٩	١٠	١٠	٩	٨	٨	٧	٨	٩	١٠	١٠	١١	١٣	١٢	١٤	١٥
أوروبا - الوسطى والشرقية	١٠	٧	٧	٨	١٠	١٢	١٦	١٧	١٦	١٤	١٥	١٥	١٤	١٣	١٣	١٣
أوروبا - الغربية	٠	٠	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٣

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

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

[١] الغيغاواط (الكهربائي) الواحد هو مقدار من القوى الكهربائية يعادل ألف مليون واط.

٣- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، كان هناك ٥٥ مفاعلاً قيد التشييد. وبدأت أعمال التشييد في المفاعلات أكويو-١ (تركيا)، وكورسك ٢-١ (الاتحاد الروسي)، وروبور-٢ (بنغلاديش)، وشين-كوري-٦ (جمهورية كوريا)، وهينكلي بوينت ج-١ (المملكة المتحدة). ولا تزال حالات التوسُّع، وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد، تتركَّز في آسيا (الشكل ألف-١)، حيث يوجد ٣٥ مفاعلاً قيد التشييد. ويوجد في آسيا أيضاً ٥٨ من أصل ٦٨ مفاعلاً جديداً وُصِّلت بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨) [أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٨		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٨	
	عدد الوحدات	مجموع ميغاواط (كهربائي)	عدد الوحدات	مجموع ميغاواط (كهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٦	٢٧ ٢٥٢	٦	٤٥٧٣	١٩١,٣	١٧,٩	١ ٢٩٨	٦
الأرجنتين	٣	١ ٦٣٣	١	٢٥	٦,٥	٤,٧	٨٥	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			١,٩	٢٥,٦	٤٤	٨
إسبانيا	٧	٧ ١٢١			٥٣,٤	٢٠,٤	٣٣٦	١
ألمانيا	٧	٩ ٥١٥			٧١,٩	١١,٧	٨٣٩	٧
الإمارات العربية المتحدة			٤	٥ ٣٨٠				
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	٢ ٠٧٠	٧٩,٥	٥٣,٠	٥٠٣	٦
إيران (جمهورية-الإسلامية)	١	٩١٥			٦,٣	٢,١	٧	٤
باكستان	٥	١ ٣١٨	٢	٢ ٠٢٨	٩,٣	٦,٨	٧٧	٥
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٣٤٠	١٤,٨	٢,٧	٥٥	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩١٨			٢٧,٣	٣٩,٠	٢٩٦	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٦٦			١٥,٤	٣٤,٧	١٦٥	٣
بنغلاديش			٢	٢١٦٠				
بيلاروس			٢	٢ ٢٢٠				
تركيا			١	١ ١١٤				
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٩٣٢			٢٨,٣	٣٤,٥	١٦٤	١٠
جمهورية كوريا	٢٤	٢٢ ٤٤٤	٥	٦٧٠٠	١٢٧,١	٢٣,٧	٥٤٧	٥
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٦٠			١٠,٦	٤,٧	٦٨	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٥	١٧,٢	٣٣	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٤	٢	٨٨٠	١٣,٨	٥٥,٠	١٦٨	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٥	٣٥,٩	٣٧	٣
السويد	٨	٨ ٦١٣			٦٥,٩	٤٠,٣	٤٥٩	٠
سويسرا	٥	٣ ٣٣٣			٢٤,٥	٣٧,٧	٢١٩	١١
الصين	٤٦	٤٢٨٥٨	١١	١٠٩٨٢	٢٧٧,١	٤,٢	٣٢٢	١١
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٣٠	٣٩٥,٩	٧١,٧	٢ ٢٢٢	٤

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٨		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٨	
	عدد الوحدات	مجموع ميغاواط (كهربائي)	عدد الوحدات	مجموع ميغاواط (كهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الأشهر
فنلندا	٤	٢ ٧٨٤	١	١ ٦٠٠	٢١,٩	٣٢,٤	١٥٩	٤
كندا	١٩	١٣ ٥٥٤			٩٤,٤	١٤,٩	٧٥٠	٦
المكسيك	٢	١ ٥٥٢			١٣,٢	٥,٣	٥٣	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨ ٩٢٣	١	١ ٦٣٠	٥٩,١	١٧,٧	١ ٦٠٤	٧
الهند	٢٢	٦ ٢٥٥	٧	٤ ٨٢٤	٣٥,٤	٣,١	٥٠٤	١١
هنغاريا	٤	١ ٩٠٢			١٤,٩	٥٠,٦	١٣٤	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٣	٣,١	٧٤	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٨	٩٩ ٠٦١	٢	٢ ٢٣٤	٨٠٨,٠	١٩,٣	٤ ٤٠٨	٦
اليابان	٣٨	٣٦ ٤٧٦	٢	٢ ٦٥٣	٤٩,٣	٦,٢	١ ٨٦٣	٢
المجموع (ب)، (ج)	٤٥٠	٤١٣ ٣٩٦	٥٥	٥٦ ٦٤٣	٢٥٦٣,٠		٨٨٠ ١٧	١١

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

ب- ملاحظة: تشمل الأرقام الإجمالية البيانات التالية المتعلقة بتايوان، الصين: ٥ وحدات، ٤٤٤٨ ميغاواط (كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) قيد التشييد؛ و٢٦,٧ تيراواط-ساعة من الكهرباء المولدة نوويًّا، بما يمثل ١١,٤٪ من إجمالي الكهرباء المولدة.

ج- يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً محطات مغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ أشهر)؛ وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)؛ وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)؛ والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (٢٢٤ أعوام وشهر واحد).

ألف-١-١- البلدان المشغِّلة

٤- في نهاية عام ٢٠١٨، ومن بين مفاعلات القوى النووية العاملة في العالم البالغ عددها ٤٥٠ مفاعلاً، كانت نسبة ٦٦٪ قيد التشغيل منذ مدة تزيد على ٣٠ عاماً. ويجري تنفيذ برامج معنية بالتشغيل الطويل الأجل وبإدارة التقادم فيما يخص عدداً متزايداً من محطات القوى النووية.

٥- وشارفت هنغاريا على الانتهاء من تمديد العمر التشغيلي لمفاعلاتها. ووافقت هيئة الطاقة الذرية الهنغارية على تشغيل أربع وحدات في محطة باكس للقوى النووية لمدة ٢٠ سنة إضافية بعد فترة ترخيصها الأصلية البالغة ٣٠ سنة. ومن المقرر أن يشهد عام ٢٠٢٠ البدء في تشييد وحدتين إضافيتين في محطة باكس للقوى النووية (وهو مشروع يشار إليه باسم باكس-٢)، ويُتوقَّع أن يبدأ التشغيل التجاري في عامي ٢٠٢٦ و٢٠٢٧.

٦- وفي أيار/مايو ٢٠١٨، استهلَّت جمهورية إيران الإسلامية أعمال تثبيت التربة في موقع تشييد الوحدة بوشهر-٢ المقرر أن تعمل بقدرة ١٠٥٠ ميغاواط (كهربائي)، وهي واحدة من بين وحدتين مخطط لهما. ويُتوقع توصيل الوحدتين بوشهر-٢ وبوشهر-٣ بالشبكة الكهربائية في عامي ٢٠٢٦ و٢٠٢٧، على التوالي.

٧- وفي كندا، بدأت أعمال التجديد في الوحدة ٢ في محطة دارلينغتون للقوى النووية. وتهدف أعمال التجديد المضطلع بها في جميع وحدات المحطة، وهي أربع وحدات من طراز كاندو، إلى تمكين المحطة من الاستمرار قيد التشغيل حتى عام ٢٠٥٥، ومن المقرر الانتهاء من هذه الأعمال بحلول عام ٢٠٢٦. وفي آب/أغسطس ٢٠١٨، مُنحت محطة بيكيرنغ لتوليد القوى النووية رخصة تشغيل لمدَّة عشر سنوات، بما يشمل ثلاث مراحل: استمرار التشغيل التجاري حتى عام ٢٠٢٤؛ وتنفيذ أنشطة تحقيق الاستقرار، مثل عمليات تفريغ الوقود وتفريغ المياه بعد الإغلاق؛ والخزن المأمون تحت المراقبة.

٨- وفي إطار التزام الحكومة البريطانية بإرساء قدرات نووية جديدة بمقتضى استراتيجية النمو النظيف التي أصدرتها في عام ٢٠١٧، فقد اتَّخذت إجراءات لتشجيع تشييد منشآت نووية جديدة، واقترح قطاع الصناعة النووية تشييد منشآت جديدة تصل قدرتها إلى ١٧,٨ غيغاواط (كهربائي). ويجري العمل على تجهيز الموقع المخصص للمفاعل الأول في محطة هينكلي بوينت "ج" للقوى النووية، الذي يُعتزم توصيله بالشبكة في عام ٢٠٢٥.

٩- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، استكملت محطة كوزلودوي في بلغاريا عملية ترقية يمكن أن تؤدي إلى تمديد عمرها التشغيلي حتى عام ٢٠٥١. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، ألغى مجلس الوزراء قراراً صدر في عام ٢٠١٢ بوقف تشييد محطة بيليني للقوى النووية، ليكفل إنعاش المشروع واستئناف العمل في الموقع.

١٠- وفي عام ٢٠١٨، كانت هناك دراسات جارية في المكسيك بشأن التوسُّع في القدرة المنشأة في محطة لاغونا فيردي للقوى النووية.

١١- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، أكَّدت أرمينيا أنَّها تعمل على تمديد العمر التشغيلي للوحدة ٢ في محطة ميتسامور للقوى النووية.

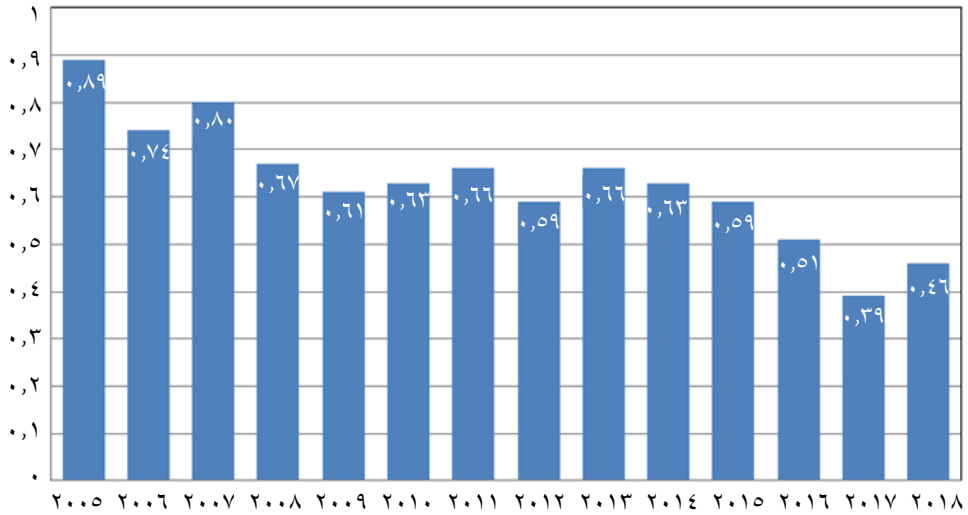
١٢- وتخطِّط رومانيا لمواصلة زيادة قدرة التوليد النووي عن طريق تشييد الوحدتين ٣ و٤ في محطة تشرنافودا للقوى النووية وإدخالهما في الخدمة. وفي أيار/مايو ٢٠١٨، تقرَّر إغلاق الوحدة تشرنافودا-١ لأغراض التجديد في عام ٢٠٢٦.

١٣- وفي آب/أغسطس ٢٠١٨، أصدرت جنوب أفريقيا آخر صيغة من خطة الموارد المتكاملة/خطة التنمية الوطنية، ولم تتوقع فيها حدوث نمو في قدرتها في مجال الطاقة النووية قبل عام ٢٠٣٠.

١٤- وفي أيار/مايو ٢٠١٨، أجرت شركة الكهرباء الوطنية التشيكية ČEZ دراسة بيَّنت عدم وجود عقبات جوهرية تتعلق بالأمان أو بالمسائل التقنية أمام بلوغ الوحدات في محطة تيميلين للقوى النووية عمراً تشغيليًّا مقداره ٦٠ سنة. وفي أيار/مايو ٢٠١٨ أيضاً، أجَّلت الحكومة اتِّخاذ قرار بشأن بناء وحدات نووية جديدة.

١٥- وفي بلجيكا، يُعتزم الانتهاء من الإغلاق التدريجي لمحطات القوى النووية بحلول عام ٢٠٢٥. وكما أكَّدت استراتيجية الطاقة الجديدة التي أقرتها الحكومة في آذار/مارس ٢٠١٨، فسوف يتوقف تشغيل المفاعل دويل-٣ بحلول عام ٢٠٢٢ والمفاعل تيهانج-٢ بحلول عام ٢٠٢٣، وسوف تُغلق سائر الوحدات المتبقية في عام ٢٠٢٥. ويجري حاليًّا إعداد الخطة الوطنية المتكاملة بشأن الطاقة والمناخ للفترة ٢٠٢١-٢٠٣٠ في إسبانيا، ومن المتوقع أن تبيّن هذه الخطة تطوُّر دور الطاقة النووية في مزيج الطاقة في البلاد، بما في ذلك وضع جدول زمني لإغلاق محطات القوى النووية. وتواصل ألمانيا اتِّباع سياسة التخلي تدريجيًّا عن الطاقة النووية. وتبقي السويد وسويسرا على ما لديهما من محطات القوى النووية حسب الجداول الزمنية المقررة.

١٦- وما يزال أمان تشغيل محطات القوى النووية عالي المستوى، وهو ما يتضح من مؤشرات الأمان التي تجمعها الوكالة. ويبيّن الشكل ألف-٢ عدد حالات الإيقاف أو الإغلاق اليدوي أو التلقائي غير المخطط له لكل ٧٠٠٠ ساعة (زهاء عام) من التشغيل للوحدة الواحدة. وليست حالات الإيقاف غير المخطَّط له إلا مؤشراً واحداً من مؤشرات أداء الأمان الشائعة الاستخدام.



الشكل ألف-٢ - متوسط معدل حالات الإيقاف غير المخطط له: عدد حالات الإيقاف التلقائي واليدوي غير المخطط له التي تقع في كل ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل للوحدة الواحدة. (المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة: www.iaea.org/pris)

ألف-١-٢- البلدان المتوسِّعة

١٧- من بين الدول الأعضاء المشغِّلة البالغ عددها ٣٠ دولة عضواً، هناك ١١ دولة عضواً تتَّخذ خطوات فعلية من أجل تشييد وحدات إضافية لتوليد القوى النووية أو توسيع نطاق برامجها للقوى النووية. ومن بين مشاريع تشييد المفاعلات الجارية البالغ عددها ٥٥ مشروعاً، هناك ٤٦ مشروعاً يُضطلع بها في بلدان لديها برامج قائمة للقوى النووية، وعلى رأسها الصين (١١) والهند (٧) والاتحاد الروسي (٦).

١٨- وفي الوقت الراهن، يوجد لدى الصين ٤٦ وحدة مفاعلات نووية قيد التشغيل و١١ وحدة قيد التشييد. وفي عام ٢٠١٨، انضمَّت إلى الشبكة الكهربائية سبع وحدات (سانمين-١، وسانمين-٢، وتايشان-١، وهايانغ-١، وهايانغ-٢، ويانغ جيانغ-٥، وتيانوان-٤). ومن المتوقع أن تحدِّد إدارة الطاقة الوطنية، وهي الهيئة الرقابية المعنية بالطاقة في الصين، القيمة المستهدفة للقدرة النووية في عام ٢٠٣٠ بين ١٢٠ و١٥٠ غيغاواط (كهربائي). وتخطِّط الصين أيضاً لتشييد ٣٠ مفاعلاً خارج البلاد بحلول عام ٢٠٣٠.

١٩- ويوجد لدى الاتحاد الروسي ٣٧ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل و٦ مفاعلات قيد التشييد. ويتوخَّى أحدث البرامج الروسية الاتحادية المحدَّدة الهدف أن يتراوح نصيب الطاقة النووية من إمدادات الكهرباء بين ٢٥-٣٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠، ليرتفع إلى ما بين ٤٥-٥٠٪ في عام ٢٠٥٠ ثم ما بين ٧٠-٨٠٪ بحلول نهاية القرن. وفي نيسان/أبريل ٢٠١٨، انتهت روسيا من تشييد محطة عائمة للقوى النووية، وهي محطة أكاديميك لومونوسوف التي يُتوقع أن تدخل في الخدمة في عام ٢٠١٩.

٢٠- وانتقل مشروع المفاعل الأوروبي العامل بالماء المضغوط أولكيليوتو-٣ في فنلندا إلى مرحلة الإدخال في الخدمة، إثر الانتهاء من الاختبارات الوظيفية الباردة والساخنة. ويُعتزم أن يبدأ التشغيل التجاري في أواخر عام ٢٠١٩. وتوجد لدى فنلندا أربع وحدات قيد التشغيل لتوليد القوى النووية، وهي تخطِّط للتوسُّع في برنامجها. وتم تمديد رخصتي الوحدتين أولكيليوتو-١ وأولكيليوتو-٢، بما يكفل تشغيلهما حتى عام ٢٠٣٨. ولا يزال مشروع هانهيكيفي-١ قيد استعراض الترخيص، ويُعتزم بدء أعمال التشييد في عام ٢٠١٩.

٢١- وحدَّدت خطة أمن الطاقة في باكستان مستوى مستهدفاً بحلول عام ٢٠٣٠ للقدرة على توليد القوى النووية يبلغ ٨٨٠٠ ميغاواط (كهربائي)، بما في ذلك ١١٠٠ ميغاواط (كهربائي) من مفاعل الماء المضغوط الذي يُتوقع أن يبدأ تشييده في عام ٢٠٢٠ وتشغيله التجاري في عام ٢٠٢٥.

٢٢- ويوجد لدى الولايات المتحدة الأمريكية ٩٨ مفاعلاً نووياً تجارياً قيد التشغيل. ويجري العمل على تشييد الوحدتين ٣ و٤ من المفاعلات من طراز AP1000 في محطة فوغتل في ولاية جورجيا، ويُعتزم بدء التشغيل في عامي ٢٠٢١ و٢٠٢٢. وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، أُعلن أنَّ مركز دواين أرنولد للطاقة القائم على وحدة واحدة والكائن في ولاية أيوا سوف يُغلق نهائيًّا في أواخر عام ٢٠٢٠، أي قبل انتهاء صلاحية رخصة تشغيله بخمس سنوات. وتقدَّمت الجهات المشغِّلة بطلبات لتمديد العمر التشغيلي للوحدتين ٣ و٤ في محطة توركي بوينت في ولاية فلوريدا، والوحدتين ٢ و٣ في محطة بيتش بوتوم في ولاية بنسلفانيا، والوحدتين ١ و٢ في محطة ساري في ولاية فرجينيا، من ٦٠ إلى ٨٠ عاماً. والولايات المتحدة الأمريكية هي أول بلد ينظر في تمديد العمر التشغيلي لمحطة نووية حتى ٨٠ عاماً. وتوقَّف تشغيل محطة أويستر كريك للقوى النووية القائمة على وحدة واحدة للتقاعد في أيلول/سبتمبر ٢٠١٨ بعد قرابة ٤٩ عاماً من التشغيل التجاري.

٢٣- وفي الأرجنتين، تخضع وحدة إمبالسي لعملية تمديد عمرها التشغيلي وتجديدها. ويُعتزم إدخال المفاعل النمطي الصغير كاريم-٢٥، الذي تبلغ قدرته ٣٠ ميغاواط (كهربائي)، في الخدمة لأغراض بدء التشغيل في عام ٢٠٢٢. وفي نيسان/أبريل ٢٠١٨، مدَّدت الهيئة النووية الرقابية رخصة تشغيل المفاعل أتوشا-١، لتسمح بتشغيله حتى عام ٢٠٢٤.

٢٤- في آذار/مارس ٢٠١٨، وقَّعت شركة القوى النووية الهندية المحدودة، من الهند، وهيئة كهرباء فرنسا، من فرنسا، اتفاقاً بشأن تشييد محطة جايتابور للقوى النووية، التي تضم ستة مفاعلات من طراز المفاعلات الأوروبية التي تعمل بالماء المضغوط. وفي تشرين الأول/أكتوبر، وقَّعت الهند والاتحاد الروسي اتفاقاً بشأن تشييد محطة تضم ست وحدات مفاعلات من طراز VVER في موقع لم يتحدَّد بعد.

٢٥- وتسعى حكومة البرازيل إلى زيادة إنتاجها من القوى النووية، حيث تخطِّط لإنشاء أربعة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط ليبدأ تشغيلها في الفترة بين عامي ٢٠٢٥-٢٠٣٠. وكانت أعمال تشييد المفاعل أنغرا-٣، الذي تبلغ قدرته ١٤٠٥ ميغاواط (كهربائي)، قد استؤنفت في عام ٢٠١٠، وتحدَّد الموعد المبدئي لبدء التشغيل في عام ٢٠١٨. ومع ذلك، فقد تعطل التقدُّم في العمل عند قرابة ٦٠٪ من استكمال الوحدة، وتسعى شركة الكهرباء النووية (Eletronuclear) إلى اتِّباع نموذج قائم على الشراكة لاستئناف المشروع. وفي أيار/مايو، وجدت بعثة استعراض نظراء أوفدتها الوكالة أنَّ شركة الكهرباء النووية، التي تديرها الحكومة وهي الجهة المشغِّلة للمفاعل أنغرا-١، قد أحرزت تقدُّماً في إدارة تقادم المفاعل والتأهب لتشغيله الطويل الأجل.

٢٦- وتوجد لدى فرنسا ٥٨ وحدة قيد التشغيل لتوليد القوى النووية، وهناك وحدة جديدة في محطة فلامانفيل للقوى النووية يُعتزم تحميلها بالوقود بحلول نهاية عام ٢٠١٩. ووفقاً للحكومة الفرنسية، فإنَّ استراتيجية التطوير المتَّبعة إزاء القوى النووية ترتبط بالأهداف التي نصَّ عليها قانون التحوُّل في مجال الطاقة لأغراض النمو النظيف وبالخطة المتعدِّدة السنوات في مجال الطاقة المقرَّر اعتمادها في منتصف عام ٢٠١٩. وينصُّ مشروع الخطة على تحديد عام ٢٠٣٥ ليكون الموعد النهائي لتقليص حصة الطاقة النووية من مزيج الكهرباء في البلاد إلى ٥٠٪. وبغية تحقيق هذه الغاية، سوف يتم إغلاق ١٤ مفاعلاً قائماً بحلول عام ٢٠٣٥. وسوف تعمل الحكومة مع قطاع الصناعة النووية لوضع خطة عمل، بحلول عام ٢٠٢١، تكون أساساً يُستند إليه عند اتِّخاذ قرار بشأن تشييد مفاعلات جديدة للقوى النووية.

٢٧- ووفقاً للخطة الأساسية الثامنة بشأن إمدادات الكهرباء والطلب عليها في الأجل الطويل والصادرة في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٧، ستواصل جمهورية كوريا العمل على تشييد ٥ وحدات من طراز APR-1400 قبل عام ٢٠٢٣. غير أنَّ البلاد لن تسعى إلى تشييد وحدات جديدة أخرى أو إلى تمديد الأعمار التشغيلية للمحطات القائمة. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، قرَّرت الجهة المشغِّلة، وهي شركة كوريا للهيدرولوجيا والقوى النووية، إغلاق ثاني أقدم مفاعل نووي في البلاد، أي المفاعل وُلسونغ-١، بناء على تحليل اقتصادي أُجري وفقاً لخطة الحكومة للتحوُّل في مجال الطاقة. وكان العمل في المفاعل قد توقف منذ أيار/مايو ٢٠١٧ لغرض إجراء أعمال صيانة مخطط لها.

٢٨- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، أُعلن أنَّه من المتوقع أن يبدأ العمل في الوحدة ٣ في محطة موهوفتسي (Mochovce) للقوى النووية في سلوفاكيا في الربع الثاني من عام ٢٠١٩.

٢٩- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، تم تمديد رخصة تشغيل الوحدة روفنو-٣ في أوكرانيا لمدَّة ٢٠ عاماً إضافياً، بحيث يمكن أن يستمر تشغيل المحطة حتى عام ٢٠٣٧. واستُكملت خلال عام ٢٠١٨ دراسة جدوي بشأن استئناف تشييد الوحدتين خميلنيتسكي-٣ وخميلنيتسكي-٤. وتتوخَّى "استراتيجية الطاقة في أوكرانيا حتى عام ٢٠٣٥" أن تكون حصة القوى النووية من إنتاج الكهرباء في البلاد ٥٠٪ بحلول عام ٢٠٣٥.

٣٠- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، وافقت الحكومة اليابانية على خطة الطاقة الأساسية، التي أكَّدت تحديد حصة الطاقة النووية بنحو ٢٠-٢٢٪ بحلول عام ٢٠٣٠. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، أعلنت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية عن خطط لإخراج جميع الوحدات من الخدمة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية. وفي الشهر نفسه، استؤنف العمل في الوحدة غينكاي-٤ في ظل معايير رقابية جديدة. وفي عام ٢٠١٨، تقرَّر أنَّه سوف يُسمح باستمرار عمل الوحدات أوهي-٣ وأوهي-٤ وتوكاي-٢.

ألف-١-٣- البلدان المستجدَّة

٣١- من بين الدول الأعضاء التي تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية ضمن مزيج الطاقة لديها أو تخطط لذلك أو تتَّخذ خطوات فعلية صوب تحقيقه، والبالغ عددها ٢٨ دولة، استهلَّت ١٩ دولة دراسات بشأن البنية الأساسية للقوى النووية، واتَّخذت ٥ دول قرارها بالفعل وهي الآن تعمل على إعداد البنية الأساسية اللازمة، ووقعت ٥ دول عقوداً وهي الآن تعمل على الإعداد لبدء أعمال التشييد أو شرعت في تلك الأعمال بالفعل.

٣٢- ففي الإمارات العربية المتحدة، أُحرز تقدُّم في أعمال التشييد في جميع المفاعلات الأربعة في محطة براكة للطاقة النووية. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل الوحدة ١ في أواخر عام ٢٠١٩ أو أوائل عام ٢٠٢٠، ومن المقرر أن يبدأ تشغيل الوحدة الثانية بعد عام من ذلك. وأُوفدت في عام ٢٠١٨ إلى الإمارات العربية المتحدة بناءً

على طلبها بعثة في إطار المرحلة ٣ من الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية. وفي بيلاروس، تواصلت أعمال تشييد أول محطة للقوى النووية في أوستروفيتس، ومن المقرر إدخال الوحدتين الأولى والثانية في الخدمة في عامي ٢٠١٩ و٢٠٢٠ على الترتيب. وفي بنغلاديش، بدأ صبُّ الخرسانة للوحدة الثانية في محطة روبور للقوى النووية. ومن المقرر إدخال الوحدتين ١ و٢ في الخدمة في عامي ٢٠٢٤ و٢٠٢٥ على التوالي. وهناك مشروع لإنشاء محطة قوى نووية ثانية مخطط له أيضاً. وسنَّت تركيا تشريعاً نوويًّا جديداً بموجب مرسوم قانوني. وبدأت أعمال تشييد محطة أكويو للقوى النووية، ومن المتوقع إدخال أول وحدة في الخدمة في عام ٢٠٢٣. وفي مصر، كانت رخصة الموقع قيد النظر فيما يخصُّ محطة للقوى النووية تضم أربع وحدات في الضبعة. ومن المتوقع أن تبدأ أعمال التشييد في عام ٢٠٢٠، ويُتوخَّى إدخال أولى الوحدات في الخدمة في عام ٢٠٢٦. وطلبت مصر إيفاد بعثة إليها في إطار المرحلة ٢ من الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩.

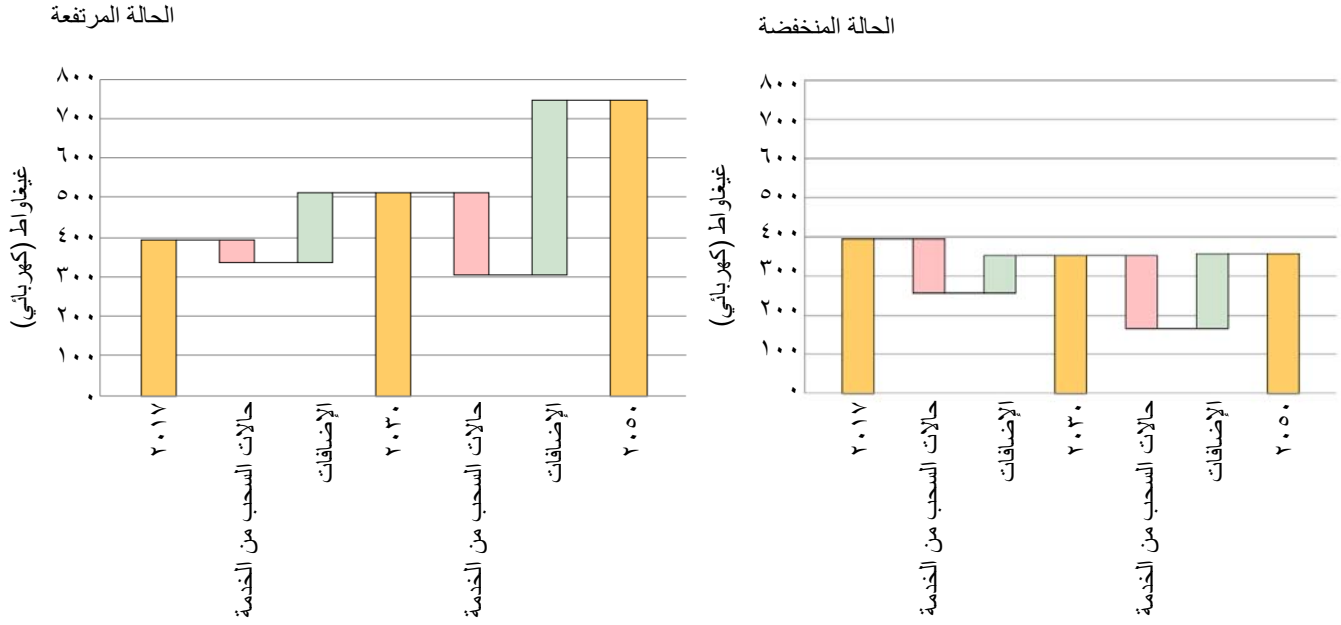
٣٣- وتتوخَّى المملكة العربية السعودية تشييد مفاعل نمطي صغير ومحطتين تقليديتين للقوى النووية على نحو متوازٍ. ويجري الآن الاضطلاع بعملية الشراء الخاصة بمحطتي القوى النووية التقليديتين. ويُتوقع بدء أعمال تشييد المفاعل النمطي في عام ٢٠٢٠، وأعمال تشييد المحطة الأولى من محطتي القوى النووية الكبيرتين في عام ٢٠٢١، ويُتوخَّى إدخال هذه المحطة في الخدمة في عام ٢٠٢٨. وأُوفدت في هذا الصدد بعثة في إطار المرحلة ٢ من الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في تموز/يوليه ٢٠١٨. وفي الأردن، يجري العمل أيضاً على إعداد برنامج مزدوج المسار للقوى النووية، بما يشمل اختيار إحدى تكنولوجيات المفاعلات النمطية الصغيرة بحلول عام ٢٠١٩، بقدرة إجمالية تتراوح بين ٢٠٠ و٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) رهناً بالطلب على الكهرباء، ليجري نشرها في الفترة ٢٠٢٧-٢٠٢٨، وتشييد مفاعل كبير يعمل بالماء الخفيف المضغوط بقدرة تبلغ نحو ١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي)، على الأرجح بعد عام ٢٠٣٠. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٨، وقَّعت أوزبكستان اتفاقاً مع الاتحاد الروسي لتشييد أول محطة للقوى النووية في البلاد، وتضمُّ هذه المحطة وحدتين وتبلغ قدرتها الإجمالية ما يصل إلى ٢٤٠٠ ميغاواط (كهربائي). وتخطِّط نيجيريا لإنشاء أربعة مفاعلات، بنهج قائم على نظام التشييد والامتلاك والتشغيل فنقل الملكية، على أن يبدأ تشغيل أول وحدة في عام ٢٠٢٧. وفي كينيا، ورهناً باتِّخاذ قرار بالمضي قدماً في إنشاء برنامج للقوى النووية، يُعتزم إدخال أول محطة للقوى النووية في الخدمة في عام ٢٠٢٧. وأُوفدت إلى البلاد في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨ بعثة في إطار خدمة تصميم المواقع والأحداث الخارجية. وطلبت كينيا إيفاد بعثة إليها في إطار المرحلة ٢ من الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في آب/أغسطس ٢٠١٩. وأعربت كينيا مؤخراً عن اهتمامها بالعمل على تشييد مفاعل بحوث قبل تشييد محطة قوى نووية. وفي بولندا، يُتوخَّى إدخال أول وحدة في الخدمة في عام ٢٠٣٠، إذا ما قررت الحكومة المضي قدماً في برنامج القوى النووية.

٣٤- ولا تزال الدول الأعضاء تستفيد من المساعدة التي تقدِّمها الوكالة في إرساء البنية الأساسية النووية الوطنية اللازمة، استناداً إلى نهج المعالم المرحلية البارزة، بما يدعم إنشاء برامج مأمونة وآمنة ومستدامة في مجال القوى النووية. وتنطوي هذه المساعدة على الاضطلاع باستعراضات النظراء وإيفاد بعثات الخبراء وعقد الدورات التدريبية وتوفير الأدوات اللازمة، بما يكفل تغطية منهجية لجميع المسائل المتعلقة بالبنية الأساسية النووية التي يتناولها نهج المعالم المرحلية البارزة والبالغ عددها ١٩ مسألة. وعقب إيفاد خمس بعثات في إطار الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في عام ٢٠١٨، إلى النيجر والفلبين والمملكة العربية السعودية والسودان والإمارات العربية المتحدة، وصل عدد البعثات المضطلع بها في إطار الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية منذ إطلاق هذه الخدمة في عام ٢٠٠٩ إلى ٢٧ بعثة أُوفدت إلى ٢٠ دولة عضواً.

ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

٣٥- تشير توقُّعات الوكالة لعام ٢٠١٨ (الشكل ألف-٣)، والتي أُعدَّت بالتشاور مع الخبراء الإقليميين بما يجسِّد أحدث المعلومات بشأن السياسات وأحوال الأسواق، إلى أنَّ القوى النووية قد تجد صعوبة في المحافظة على مكانتها الحالية في مزيج الطاقة العالمي. وفي إطار التوقُّعات المنخفضة حتى عام ٢٠٣٠، يسجِّل صافي القدرة المنشأة على توليد الكهرباء النووية تراجعاً بنسبة تزيد على ١٠٪ مقارنةً بقيمته في نهاية عام ٢٠١٧ البالغة ٣٩٢ غيغاواط (كهربائي). وفي الحالة المرتفعة، تزيد القدرة بنسبة ٣٠٪ لتصل إلى ٥١١ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠. وفي الأمد الأبعد، تواصل القدرة تراجعها في الحالة المنخفضة لفترة تقترب من عقد من الزمن قبل أن تعود في عام ٢٠٥٠ إلى مستوياتها في عام ٢٠٣٠، مع تراجع نصيب الطاقة النووية من القدرة العالمية على توليد الكهرباء ليصل إلى ٢,٨٪ مقارنة بنصيبها الحالي البالغ ٥,٧٪. وفي الحالة المرتفعة، يُتوقع أن تصل القدرة المنشأة إلى ٧٤٨ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠، بما يمثِّل ٥,٨٪ من قدرة التوليد العالمية.

٣٦- ويرجع التفاوت الكبير بين التوقعات في الحالتين المنخفضة والمرتفعة إلى عدم اليقين بشأن استبدال العدد الكبير من المفاعلات التي من المقرَّر إحالتها إلى التقاعد في عام ٢٠٣٠ تقريباً وما بعده، ولا سيما في أمريكا الشمالية وأوروبا.



الشكل-ألف-٣- التوقعات بشأن القدرات النووية العالمية في الحالة المرتفعة (إلى اليسار) والمنخفضة (إلى اليمين).

(المصدر: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 (التقديرات بشأن الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة حتى عام ٢٠٥٠)، العدد ١ من سلسلة البيانات المرجعية الصادرة عن الوكالة، ٢٠١٨).

٣٧- وهناك حاجة إلى التوسُّع كثيراً في مساهمة القوى النووية في التخفيف من حدَّة تغير المناخ، وهو ما يتبيَّن من مسارات الانبعاثات المعروضة في تقرير خاص صادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ بعنوان *Global Warming of 1.5° C* ("الحد من الاحترار العالمي عند مستوى ١,٥ درجة مئوية")[٢]. وتشهد معظم المسارات المتسقة مع الحد من تغير المناخ عند مستوى ١,٥ درجة مئوية زيادة نصيب القوى النووية بحلول عام ٢٠٥٠؛ وعلى سبيل المثال فإنَّ المسارات الأربعة النموذجية التي يسلِّط عليها الضوء في مشروع الموجز الخاص بواضعي السياسات تتوقع زيادة في توليد القوى النووية بنسبة لا تقلُّ عن ٥٩٪ بحلول عام ٢٠٣٠ وما يصل إلى ٥٠١٪ بحلول عام ٢٠٥٠، مقارنة بعام ٢٠١٠.

٣٨- ولا يزال الاهتمام بالقوى النووية مرتفعاً أيضاً في العالم النامي، ولا سيما في آسيا، حيث تسعى بلدان مثل الصين والهند إلى تلبية الطلب على الكهرباء الآخذ في التزايد بسرعة، مع التقليل في الوقت نفسه من انبعاثات غازات الدفيئة. ومن ثمَّ فإنَّ المفاوضات الدولية الجارية حول تغير المناخ في إطار اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، بما في ذلك الدورة الرابعة والعشرون لمؤتمر الدول الأطراف في تلك الاتفاقية المعقودة في كانون الأول/ديسمبر في كاتوفيتسه، بولندا، تمثِّل فرصة مهمة لتسليط الضوء على الدور الذي يمكن أن تؤديه الطاقة النووية المنخفضة الكربون في التصدي للتحديات العالمية المتصلة بالمناخ والطاقة.

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية

موارد اليورانيوم وإنتاجه

٣٩- وكما يبيِّن المنشور الذي يصدر كلَّ سنتين بالاشتراك بين وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والوكالة الدولية للطاقة الذرية، والمعروف أيضاً باسم "الكتاب الأحمر"، في طبعته السادسة والعشرين الصادرة بعنوان "*اليورانيوم في عام ٢٠١٨: موارده وإنتاجه والطلب عليه*"[٣]، فإنَّ الإمدادات العالمية من اليورانيوم أكثر من كافية لتلبية الاحتياجات المتوقَّعة في المستقبل المنظور، بصرف النظر عن الدور الذي سوف تؤديه الطاقة النووية في نهاية المطاف صوب تلبية الطلب على الكهرباء وتحقيق المقاصد المتصلة بتغيُّر المناخ في المستقبل. بيد أنَّ ذلك التقرير يسلِّط الضوء على الاستثمارات الكبيرة والخبرات الفنية العريضة التي سيتطلبها ضمان دخول موارد اليورانيوم المشار إليها حيز الإنتاج في الوقت المناسب، بما في ذلك الموارد الموجودة في مناجم هي حاليًّا قيد الرعاية والصيانة.

٤٠- واستمر في عام ٢٠١٨ الانخفاض النسبي في أسعار التسليم الفوري لليورانيوم، حيث ظلَّت عموماً في النطاق بين ٤٧ دولاراً للكيلوغرام و٥٩ دولاراً للكيلوغرام، بزيادة طفيفة عن نطاقها خلال عام ٢٠١٧، مع اتِّجاه صاعد عموماً على مدى العام. وأدَّى انخفاض الأسعار إلى التقييد كثيراً من قدرة الشركات على حشد الأموال اللازمة للاستكشاف وإجراء دراسات الجدوى وتنفيذ مشاريع تشييد جديدة. وظلَّت مشاريع عديدة متعلقة باليورانيوم معلَّقة أو مقيَّدة بمستوى منخفض من الإنفاق. وهناك بعض المشاريع التي كانت قد فُتحت أو بلغت مراحل متقدِّمة من التشييد والتي ظلَّت قيد الرعاية والصيانة أو خُفِّض إنتاجها. ومن ثمَّ فمن المرجح أن يكون الإنتاج العالمي في عام ٢٠١٨ مشابهاً لنظيره في عام ٢٠١٧، والذي بلغ ٥٩ ٣٤٢ طناً من اليورانيوم، بما يمثِّل كمية أقلّ من الكمية التي أُفيد بها فيما يخص عام ٢٠١٦.

---

[2] IPCC, Global Warming of 1.5°C, 1 October 2018, http://www.ipcc.ch/report/sr15/

[٣] نُشر في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨ في الموقع الإلكتروني التالي:
https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf

٤١- وحافظت كازاخستان على تصدرُّها قائمة أكبر منتجي اليورانيوم في العالم، ويأتي إنتاجها من اليورانيوم كلُّه تقريباً من مناجم النضِّ الموقعي الموجودة لديها. وبعد زيادة سريعة في الإنتاج بين عامي ٢٠٠٠ و٢٠١٦، تراجع الإنتاج في عام ٢٠١٧ إلى ٤٠٠ ٢٣ طن من اليورانيوم؛ ويُتوقَّع تسجيل رقم مماثل فيما يخص عام ٢٠١٨.

٤٢- وفي كندا، ثاني أكبر المنتجين، حقَّق منجم سيغار ليك قدرته الإنتاجية الكاملة البالغة ٦٩٢٥ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٧، ويتوقَّع إنتاج كمية مماثلة في عام ٢٠١٨. غير أنَّ تعليق عمليات الإنتاج في منجم "مكارثر ريفر" وعمليات التجهيز في مرفق "كي ليك"، الذي كان قد أُعلن في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٧ لفترة ١٠ أشهر، مُدِّد إلى أجل غير مسمى في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨ بسبب استمرار انخفاض مستوى الطلب على اليورانيوم وانخفاض أسعاره.

٤٣- وتواصل خلال عام ٢٠١٨ العمل في منجمي "روسينغ" و"هوساب" في ناميبيا، في حين وُضع منجم "لانغر هاينريتش" لليورانيوم قيد الرعاية والصيانة في أيار/مايو ٢٠١٨ كردِّ فعل على استمرار انخفاض أسعار اليورانيوم على مدى فترة طويلة. واستمر الاضطلاع بعمل محدود النطاق بشأن دراسات الجدوى في بعض مستودعات اليورانيوم الأخرى في ناميبيا.

٤٤- وفي أستراليا، أنتج منجم "فور مايل" للنض الموقعي قرابة ١٥٠٠ طن من اليورانيوم في عام ٢٠١٨. وفي مشروع منجم "رينجر"، يقتصر الإنتاج على مخزونات الخام ومن المخطط أن تتوقف عمليات التعدين والمعالجة بحلول كانون الثاني/يناير ٢٠٢٠. وعموماً فالعمل معلَّق فيما يخص عدَّة مستودعات لليورانيوم في ولاية أستراليا الغربية، أو يجري الاضطلاع ببعض الدراسات الإضافية، ولكن دون تحديد مواعيد مؤكَّدة للتشييد وبدء العمل.

٤٥- واستمر إجراء دراسات الجدوى والدراسات البيئية واستصدار الموافقات فيما يخص مشروع الأتربة النادرة والفلزات البخسة واليورانيوم في مستودع كفانفيلد في غرينلند، مملكة الدانمرك.

٤٦- وواصلت الصين زيادة إنفاقها في مجال استكشاف اليورانيوم وتطوير مناجمه، داخل البلاد وخارجها على السواء. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، وافقت شركة الصين الوطنية لليورانيوم على شراء حصة قدرها ٦٩٪ من منجم "روسينغ" المملوك لشركة ريو تينتو، وهو أقدم منجم عامل قائم على حفرة مفتوحة في العالم، وقد أنتج من اليورانيوم كمية أكبر مما أنتجه أي منجم آخر.

٤٧- وواصل مجلس الأمان النووي في إسبانيا عمله على تحليل وثائق مشروع "سالامانكا" لليورانيوم من أجل إصدار تقريره الإلزامي بشأن الإذن بتشييد محطة صُنع ركازة اليورانيوم. وهذه الخطوة هي إحدى الموافقات التي يلزم الحصول عليها قبل البدء في تشغيل المحطة.

٤٨- وهناك أعمال جارية بشأن دراسات الجدوى والمسائل الرقابية في منجم "إنجينيو" في ولاية باهيا بالبرازيل، فيما يتعلق بتشغيل حفرة مفتوحة أخرى بالقرب من منجم كاشوئيرا المستنفد.

التحويل والإثراء

٤٩- والقدرة الحالية على تحويل اليورانيوم وإثرائه أكثر من كافية لتلبية الطلب العالمي، مع تجزُّؤ السوق إلى شرائح مختلفة وتركُّز الإنتاج في يد عدد قليل من الموردين.

٥٠- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٨، دشَّنت شركة أورانو في تريكاستان، فرنسا، محطة التحويل الجديدة التابعة لها في إطار مشروع محطة كومورهيكس الثانية. وقد صُمِّمت هذه المحطة، التي تحمل اسم "فيليب كوست"، بالاستعانة بأحدث التكنولوجيات المتقدمة، وهي تستهلك مستويات منخفضة للغاية من المواد الكيميائية والطاقة. وتحتوي المحطة على ثلاثة أفران لهب سوف تمكِّنها من إنتاج كمية تصل إلى ١٥ ٠٠٠ طن من سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6) سنويًّا.

٥١- والعملية الأساسية لإثراء اليورانيوم باستخدام الليزر على المستوى الجزيئي هي عملية فصل النظائر عن طريق التنشيط بالليزر (SILEX) التي يُستخدم فيها سادس فلوريد اليورانيوم. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، قررت شركة سيليكس سيستمز (Silex Systems) الأسترالية التخلي عن حيازة حصة الأغلبية في الشركة العالمية للإثراء بالليزر (Global Laser Enrichment)، وهي مشروع مشترك مع شركات جنرال إلكتريك وهيتاشي وكاميكو. وصرَّحت شركة سيليكس سيستمز بأنَّه رغم الوصول إلى مرحلة متقدمة في المفاوضات مع شركتي جنرال إلكتريك وهيتاشي، فإنَّ الملف التجاري الخاص بالشركة العالمية للإثراء بالليزر ينطوي على عدد مفرط من المخاطر.

صُنع الوقود

٥٢- في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، أطلقت شركتا لايتبريدج (Lightbridge) وفراماتوم إنك (Framatome Inc.) الأمريكيتان العاملتان في مجال تكنولوجيا الوقود النووي شركة إنفشن (Enfission)، وهي مشروع مشترك بينهما مناصفةً يرمي إلى استحداث مجمعات الوقود النووي لأغراض الوقود الفلزي المتقدِّم الذي تصنعه شركة لايتبريدج، وترخيص تلك المجمعات وتسويقها تجاريًّا. ويُصنع ذلك الوقود من سبيكة من الزركونيوم واليورانيوم ويستخدم تصميماً فريداً من نوعه من حيث التكوين وهندسة قضبان الوقود، وتقول الشركة إنَّ ذلك التصميم يوفِّر تحسينات على الجوانب الاقتصادية والمتصلة بالكفاءة والأمان في محطات القوى النووية في الوقت الحاضر وفي المستقبل.

٥٣- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، أعلنت شركة وستنغهاوس إلكتريك أنَّها قد وقَّعت عقداً مع الشركة الوطنية لتوليد الطاقة النووية "إينرغوأتوم" لتمديد فترة اضطلاعها بتوريد الوقود النووي للمفاعلات من طراز VVER في أوكرانيا من عام ٢٠٢٠ حتى عام ٢٠٢٥.

٥٤- وفي آذار/مارس ٢٠١٨، أعلنت شركة وستنغهاوس والشركاء الأوروبيون الثمانية المتحالفون معها عن الانتهاء بنجاح من تنفيذ مشروع مموَّل من الاتحاد الأوروبي يهدف إلى تنويع مصادر توريد الوقود النووي للمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء الموجودة في أوروبا من طراز VVER-440 الروسي التصميم.

٥٥- وفي آذار/مارس ٢٠١٨، بدأت الوحدة ١ في محطة إدوين إ. هاتش للقوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية الاختبارات الأولية باستخدام مجمعات الوقود المتحمِّل للحوادث التي تصنعها الشركة العالمية للوقود النووي (GNF)، والتي تتكوَّن من كسوة للوقود مصنوعة من الحديد والكروم والألومنيوم، تُعرف باسم IronClad، وكسوة للوقود مصنوعة من الزركونيوم المطلي تُعرف باسم ARMOR. وفي أيار/مايو ٢٠١٨، وقع اختيار شركة المرافق السويدية فاتنفال على شركة جينوزا (GENUSA) (وهي مشروع مشترك بين شركة إينوزا الإسبانية والشركة العالمية للوقود النووي) لتتولى توريد الوقود اللازم لثماني عمليات لإعادة التحميل بالوقود في محطة فورسمارك للقوى النووية من عام ٢٠٢٠ وحتى عام ٢٠٢٣.

٥٦- وفي نيسان/أبريل ٢٠١٨، وقعت شركة الوقود النووي الروسية TVEL (وهي جزء من الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم") اتفاقات مع هيئة الطاقة الذرية الإيرانية وشركة إنتاج وتطوير القوى النووية لاستبدال مجمعات الوقود من طراز (UTVS) بخراطيش وقود من طراز TVS-2M في المفاعل من طراز VVER-1000 في محطة بوشهر للقوى النووية في جمهورية إيران الإسلامية في عام ٢٠٢٠. وفي آب/أغسطس، ورَّدت شركة TVEL أول دفعة من الوقود النووي المعدل من طراز (TVSA-T.mod.2) لاستخدامه في المفاعل من طراز VVER-1000 في محطة تيميلين للقوى النووية في الجمهورية التشيكية. وفي محطة روستوف للقوى النووية في الاتحاد الروسي، تم تحميل المفاعل VVER-1000 بدفعة تجريبية من خراطيش الوقود من طراز TVS 2M المزودة بمصفاة مضادة للحطام، والتي طُوِّرت في إطار مشروع "المنع التام لأعطال الوقود النووي" الذي يضطلع به في ذلك البلد.

٥٧- وفي أيار/مايو ٢٠١٨، وقعت شركة إينوزا الإسبانية وشركة وستنغهاوس إلكتريك اتفاق تعاون إطارياً للعمل سويًّا على تطوير الوقود المتحمِّل للحوادث من نوع EnCore والذي تصنعه شركة وستنغهاوس. ويستفيد هذا الوقود من مفاهيم مثل الأغلفة المصنوعة من سبائك الزركونيوم المطلية بالكروم، والأغلفة المصنوعة من كربيد السليكون، وأقراص الوقود المصنوعة من سيليسيد اليورانيوم (U_3Si_2).

٥٨- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، أعلن مجمّع الوقود النووي في الهند عن اعتزامه التوسع في مرافق إنتاج مكوِّنات الوقود والمفاعلات في حيدر آباد وكوتا بغية تلبية الطلب المترتب على المفاعلات الجديدة المقترحة.

٥٩- وفي آب/أغسطس ٢٠١٨، وقعت شركة SNC-Lavalin الكندية عقد خدمات هندسية واتفاق ترخيص مع شركة كينشان الثالثة للقوى النووية من أجل تنفيذ حزمة وقود معدَّل مكوَّنة من ٣٧ عنصراً وخاصة بالمفاعلات من طراز CANDU-6، يُستخدم فيها مكافئ اليورانيوم الطبيعي واليورانيوم الطبيعي. ومن المعتزم استخدام هذا الوقود في الوحدتين ١ و٢ في المرحلة الثالثة من محطة كينشان للقوى النووية في مقاطعة تشجيانغ الصينية. وسوف يمثِّل ذلك أول استخدام تجاري لحزمة الوقود المعدَّل المذكورة التي يُستخدم فيها كلٌّ من مكافئ اليورانيوم الطبيعي واليورانيوم الطبيعي.

٦٠- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٨، وقعت شركة فراماتوم عقداً لتوريد قضبان الوقود المطلية بالكروم وتركيبها في الوحدة ١ في محطة أركنسو نيوكليار وان (Arkansas Nuclear One) للقوى النووية التابعة لشركة إنترجي (Entergy) في أواخر عام ٢٠١٩. وتعاقدت شركة فاتنفال أيضاً مع شركة فراماتوم لتتولى توريد الوقود اللازم لعشر عمليات لإعادة التحميل بمجمعات الوقود المصنوعة في مرفقها الكائن في لينغن، ألمانيا، في الفترة بين عامي ٢٠٢١ و٢٠٢٤، وذلك للمفاعلات فورسمارك-٣ ورينغهالز-٣ ورينغهالز-٤.

٦١- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٨، أصدرت إدارة الأمن النووي الوطنية في الولايات المتحدة إشعاراً بإنهاء التعاقد موجّه إلى التحالف الذي يتولى تشييد مرفق صُنع وقود خليط الأكسيدين (وقود موكس)، الذي يُطلق عليه أيضاً اسم "مشروع موكس"، في موقع سافانا ريفر (Savannah River) في ولاية كارولينا الشمالية. وكان الهدف من هذا المرفق هو التصرف في كمية لا تقلُّ عن ٣٤ طناً من البلوتونيوم الذي يمكن استخدامه في صُنع أسلحة عن طريق تحويله إلى وقود يُستخدم في المفاعلات النووية التجارية.

٦٢- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، أُنتجت أول دفعة صناعية من وقود موكس للأغراض التجارية في المجمَّع التعديني والكيميائي في زيليزنوغورسك، الاتحاد الروسي، لتُستخدم في المفاعل النيوتروني السريع من طراز BN-800.

ألف-٣-٢- ضمان الإمدادات

٦٣- في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس محافظي الوكالة على إقامة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وانتهت الوكالة وكازاخستان في عام ٢٠١٥ من وضع الإطار القانوني الأساسي الخاص بإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في موقع محطة أولبا التعدينية في أوست-كامينوغورسك، كازاخستان.

٦٤- وفي عام ٢٠١٨، دخل اتفاق العبور المبرم مع الصين حيّز النفاذ، ووُقِّعت عقود النقل مع المنظمتين المفوَّضتين من الاتحاد الروسي وكازاخستان.

٦٥- وأوشكت خطة الأنشطة المحددة على الاكتمال، بعد أن عالجت جملة من المسائل، بما في ذلك مسائل متعلقة بالإطار الرقابي في كازاخستان وبأمن وأمان الموقع.

٦٦- ووقَّعت الوكالة عقوداً مع شركة Kazatomprom الذرية الوطنية في كازاخستان وشركة Orano Cycle في فرنسا لشراء اليورانيوم الضعيف الإثراء، وتهدف إلى إتمام تسليم اليورانيوم إلى مرفق تخزين اليورانيوم الضعيف الإثراء الخاص بالوكالة قبل نهاية عام ٢٠١٩.

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

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية

التصرف في الوقود المستهلَك

٦٨- تبلغ كمية اليورانيوم التي تم تفريغها من محطات القوى النووية حتى اليوم ما يزيد على ٤٠٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة. وإلى الآن، يُخزَّن نحو ٧٥٪ من الوقود المفرَّغ من مفاعلات القوى التجارية إمَّا في أحواض المفاعلات أو في مرافق لخزن الوقود المستهلَك خزناً جافاً/رطباً في مواقع بعيدة عن المفاعلات. ويوجد في الوقت الراهن ١٥١ موقعاً للخزن بعيداً عن المفاعلات في ٢٧ بلداً.

٦٩- واستقبل نظام الخزن الجاف القائم على خزن البراميل تحت الأرض في محطة القوى النووية المغلقة في سان أونوفري في الولايات المتحدة الأمريكية أولى شحنات نقل براميل الخزن المعبأة بالوقود في شباط/فبراير ٢٠١٨. ووقع الاختيار على التصميم القائم على الخزن تحت الأرض لأنَّه يوفِّر مقاومة ضد الأحداث الزلزالية البالغة الشدَّة. وفي شباط/فبراير ٢٠١٨ أيضاً، أعلنت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة عن قبولها طلب الترخيص المقدَّم في آذار/مارس ٢٠١٧ لإنشاء مرفق للخزن المؤقت المجمَّع في مقاطعة ليا بولاية نيو مكسيكو. ويُعتزم أن يستخدم هذا المرفق أيضاً نظام الخزن الجاف القائم على خزن البراميل تحت الأرض، ليبدأ بخزن كمية من الوقود المستهلَك قدرها ٨٦٨٠ طناً من الفلزات الثقيلة.

٧٠- وفي تموز/يوليه ٢٠١٨، طلبت وزارة التحول الإيكولوجي الإسبانية من مجلس الأمان النووي أن يوقف مؤقتاً إصدار التقرير بشأن طلب الترخيص الخاص بتشييد مرفق مقترح للخزن المركزي للنفايات القوية الإشعاع والوقود النووي المستهلَك. ووافق مجلس الأمان النووي في ٢٥ تموز/يوليه ٢٠١٨ على برنامج الأنشطة المتعلقة بتنفيذ الوقف المؤقَّت.

٧١- وفي اليابان، بدأ العمل في آب/أغسطس ٢٠١٨ من أجل إزالة الوقود المستهلَك من صهريج الخزن المملوء بالصوديوم والخاص بمفاعل مونجو النموذجي السريع التوليد. ويجري نقل مجمعات الوقود إلى حوض خزن داخل الموقع بعد إزالة الصوديوم المتبقي.

٧٢- وفي محطة بورسله للقوى النووية في هولندا، تم تفريغ أول حمولة من وقود موكس المستهلَك ووُضعت في حوض الوقود المستهلَك بالمفاعل في أيار/مايو ٢٠١٨. ويُتوخَّى تخزين وقود موكس المستهلَك في الحوض لفترة أربع سنوات إلى حين نقله. وتتَّبع هولندا استراتيجية لإعادة التدوير سوف تؤدي إلى عدم تبقي أي وقود مستهلَك يتطلب التخلص الجيولوجي العميق، كما أوضح تقرير مشروع أوبرا (OPERA) الصادر في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨.

٧٣- وفي اليابان، يجري توفير مساحة في الحوض المشترك لخزن الوقود المستهلَك في فوكوشيما عن طريق نقل مجمعات الوقود إلى مرفق للخزن الجاف المؤقت داخل الموقع. وقد بدأ العمل في المرفق المؤقت منذ نيسان/أبريل ٢٠١٣ وهو يحتوي على مساحة تتسع لخزن ٥٠ برميلاً من براميل الخزن الجاف. وتلقى المشغِّلون التدريب العملي في عام ٢٠١٨ لتمكينهم من تفريغ الوقود عن بُعد من حوض الوقود المستهلَك الخاص بالوحدة ٣ وخزنه في الحوض المشترك لخزن الوقود المستهلَك.

٧٤- وفي ألمانيا، سوف تُنقل ملكية مرافق الخزن الجاف في مواقع بعيدة عن المفاعلات من شركات المرافق العامة إلى شركة BGZ المملوكة للدولة اعتباراً من ١ كانون الثاني/يناير ٢٠١٩.

٧٥- وفيما يخص الكمية المتبقية من الوقود المستهلَك المفرَّغ من محطات القوى النووية على الصعيد العالمي، والبالغة ١٠٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة تقريباً، فقد خضعت لإعادة المعالجة. وتبلغ القدرة العالمية على إعادة المعالجة قرابة ٥٠٠٠ طن سنويًّا فيما يخص وقود الأكسيد العادي، بيد أنَّ هذه القدرة ليست مستخدمة بالكامل في الوقت الراهن.

٧٦- ويبلغ مجموع القدرة السنوية لمحطتي إعادة معالجة الوقود التابعتين لشركة أورانو، وهما المحطتان UP2-800 وUP3 الكائنتان في لا هاغ، فرنسا، ١٧٠٠ طن، في حين تبلغ الكمية التي تُعيد المحطتان معالجتها فعليًّا في المتوسط ١٠٠٠-١١٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنويًّا (وقد أعادتا معالجة ما يزيد على ٣٤ ٠٠٠ طن من الوقود النووي المستهلَك منذ عام ١٩٧٦): ويُعاد تدوير ما يُستخلص من البلوتونيوم إلى وقود موكس في محطة ميلوكس موقع ماركول. وباشرت شركة أورانو في عام ٢٠١٨ عملية إخراج محطتها UP2-400 من الخدمة، وتنتمي هذه المحطة إلى الجيل الأول من محطات إعادة المعالجة.

٧٧- وبلغت كمية الوقود المستهلَك المفرَّغ من المفاعلات من طراز VVER-1000 والتي أُعيدت معالجتها في عام ٢٠١٨ في المحطة RT-1 الكائنة في مجمَّع مایاك الإنتاجي في أوزيرسك، الاتحاد الروسي، ما يزيد على ٣٢ طناً من الفلزات الثقيلة بعد عمليات ترقية نُفِّذت في عام ٢٠١٧. وبالإضافة إلى ذلك، اكتملت أيضاً عملية إعادة المعالجة التجريبية لوقود موكس المستهلَك المفرَّغ من المفاعل السريع BN-600. ومُنحت رخصة لتشغيل أول مركز تجريبي إيضاحي معني بالتكنولوجيات الابتكارية في مجال إعادة المعالجة في المجمع التعديني والكيميائي في كراسنويارسك، وجرت بالفعل في عام ٢٠١٨ عملية إعادة معالجة لمجمعة وقود مستهلَك واحدة مفرَّغة من مفاعل من طراز VVER-1000. وهناك مركز تجريبي إيضاحي ثانٍ قيد التشييد تبلغ قدرته ٢٥٠ طناً من الفلزات الثقيلة ومن المقرَّر الانتهاء منه في عام ٢٠٢٠.

٧٨- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، وقَّعت الصين وفرنسا اتفاقاً بشأن تشييد محطة لإعادة المعالجة وإعادة التدوير في الصين. وفي حزيران/يونيه، أطلقت شركة أورانو والشركة الوطنية النووية الصينية الأعمال التحضيرية المتصلة بتلك المحطة، التي ستبلغ قدرتها ٨٠٠ طن من اليورانيوم في السنة.

٧٩- وفي أواخر كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٧، أعلنت الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي، وهي الجهة المشغِّلة لمحطة إعادة المعالجة في روكاشو، تأخير الانتهاء من إقامة المرفق لفترة ثلاث سنوات للتمكين من الوفاء بمتطلبات رقابية إضافية، مثل ضمان إمكانية الاحتواء والتعافي في حالة وقوع حادث عنيف.

٨٠- وأكملت محطة إعادة المعالجة الحرارية للأكاسيد في المملكة المتحدة عمرها التشغيلي في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨. وعلى مدار عمرها، عالجت هذه المحطة كمية من وقود الأكسيد مقدارها ٩٣٠٠ طن من اليورانيوم، بما في ذلك وقود مفرَّغ من المفاعلات المحلية المتقدمة المبردة بالغاز، ومن مفاعلات واقعة خارج البلاد تعمل بالماء المضغوط والماء المغلي، ومن المفاعلات النموذجية في المملكة المتحدة.

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

ألف-٤-١- إخراج المرافق النووية من الخدمة

٨١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، كان هناك ١٧٣ من مفاعلات القوى التي إمَّا قد أُغلقت أو تخضع حاليًّا للإخراج من الخدمة وذلك في شتي أنحاء العالم. ومن بين هذه المفاعلات، هناك ١٧ مفاعلاً انتهى إخراجها من الخدمة تماماً، في حين يقترب عدد آخر من المراحل النهائية من عملية الإخراج من الخدمة. وهناك ما يزيد على ١٥٠ مرفقاً من مرافق دورة الوقود النووي التي إمَّا أُغلقت إغلاقاً دائماً أو تخضع حاليًّا لعملية الإخراج من الخدمة، ويقترب عدد المرافق التي انتهى إخراجها من الخدمة من ١٣٠ مرفقاً. وهناك أكثر من ١٢٠ مفاعلاً من مفاعلات البحوث التي إمَّا أُغلقت إغلاقاً دائماً أو تخضع حاليًّا لعملية الإخراج من الخدمة، ويزيد عدد مفاعلات البحوث التي انتهى إخراجها من الخدمة تماماً على ٤٤٠ مفاعلاً.

٨٢- ويتمخض نشر التكنولوجيات المثبتة والعمل المضطلع به في مجال البحث والتطوير عن تحسينات مستمرة، ولا سيما في البلدان التي لديها برامج واسعة النطاق في ميدان القوى النووية. وعلى سبيل المثال، فقد أُحرز تقدُّم تقني في تنفيذ عمليات إزالة التلوث وتجزئة مكونات الدائرة الأولية في عدَّة محطات للقوى النووية في الاتحاد الروسي وإسبانيا وألمانيا وسلوفاكيا والسويد وفرنسا. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، استضافت إيطاليا بعثة أوفدتها الوكالة في إطار خدمة الاستعراض المتكاملة المتعلقة بالتصرف في النفايات المشعة والوقود المستهلَك، وبرامج الإخراج من الخدمة والاستصلاح (خدمة "أرتميس")، بهدف استعراض خطط شركة إدارة المحطات النووية بشأن تفكيك وعاءَي ضغط المفاعلين والأجزاء الداخلية في محطتي غاريانو وترينو للقوى النووية. وجاء هذا الاستعراض في سياق متابعة بعثة سابقة أُوفدت في إطار خدمة "أرتميس" في عام ٢٠١٧ بغرض استعراض مجمل خطط الإخراج من الخدمة الخاصة بجميع المواقع التابعة لشركة إدارة المحطات النووية.

٨٣- ويتواصل إحراز التقدُّم في المشاريع المدعومة من المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير والرامية إلى إخراج محطات قوى نووية من الخدمة في أوكرانيا وبلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا. وتشمل الأمثلة على ذلك بدء تشغيل مرفق الإذابة بالبلازما الجديد المعني بالنفايات المتأتية من عملية الإخراج من الخدمة في محطة كوزلودوي للقوى النووية، والانتهاء من هدم أبراج التبريد في محطة بوهونيتسه للقوى النووية، والتشغيل الكامل للوحدة ٤ في نظام الاحتواء المأمون الجديد بموقع تشرنوبل.

الشكل-ألف-٤- عملية تفكيك مكوِّنات مفاعل القوى النووية شوز ألف (Chooz A)، فرنسا (يساراً)، وتقدُّم العمل في أنشطة الإخراج من الخدمة في مفاعل البحوث في ماغوريلي، رومانيا (يميناً).
(الصورتان من: هيئة كهرباء فرنسا، الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

٨٤- وفيما يتعلق بإخراج مفاعلات البحوث من الخدمة، فقد وصلت حاليًّا عملية تفكيك الدرع البيولوجي الخاص بالمفاعل VVR-S الذي تبلغ قدرته ٢ ميغاواط (حراري) في ماغوريلي بالقرب من بوخارست، رومانيا، إلى مراحل متقدمة من التنفيذ (الشكل ألف-٤). وانتهت تماماً عملية الإخراج من الخدمة في مفاعل البحوث المتجانس "فوتون" في طشقند، أوزبكستان، حيث رُفع التحكُّم الرقابي عن الموقع وصار الآن متاحاً للاستخدامات الصناعية البديلة.

٨٥- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٨، أصدرت شركة تيسير التعويض عن الأضرار النووية والإخراج من الخدمة في اليابان *الخطة الاستراتيجية التقنية لعام ٢٠١٨ بشأن إخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة*. وما زال العمل يتقدم في إخراج موقع فوكوشيما داييتشي من الخدمة، حيث اكتمل إنشاء الجدران التي لا تسمح بنفاذ الماء إلى جانب اليابسة (الجدران المتجمدة) وأُنجزت التحضيرات لإزالة الوقود من حوض الوقود المستهلَك في الوحدة ٣.

ألف-٤-٢- الاستصلاح

٨٦- شهد عام ٢٠١٨ إحراز تقدُّم في مشاريع استصلاح مواقع إنتاج اليورانيوم الموروثة في آسيا الوسطى. وأُنجز المشروع المموَّل من المفوضية الأوروبية والمعنون "إجراء تقييم متكامل للأثر البيئي ودراسة جدوى بشأن إدارة واستصلاح موقعي إنتاج اليورانيوم الموروثين ديغماي وتابوشار في طاجيكستان". واضطُلع بعمل مكثَّف في إطار مشروع مماثل مموَّل من المفوضية الأوروبية بشأن موقع إنتاج اليورانيوم الموروث مايلو-سو في قيرغيزستان. وفي إطار البرنامج الحكومي الدولي المحدِّد الهدف الخاص برابطة الدول المستقلة، الذي يقوده الاتحاد الروسي من الناحية التقنية، تم تحويل موقع إلقاء المخلَّفات في كادجي-ساي في قيرغيزستان إلى منطقة آمنة بيئيًّا. وتواصل الاضطلاع بأعمال هندسية واسعة النطاق في مرفقي تويوك-سو ودالني. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨، وافق مجلس رؤساء حكومات رابطة الدول المستقلة على توفير التمويل لتنفيذ أنشطة استصلاح في طاجيكستان، ومن المقرر بدء هذه الأنشطة عام ٢٠٢٠. ويتولى تنسيق الدعم الدولي المقدَّم إلى بلدان آسيا الوسطى في استصلاح مواقع إنتاج اليورانيوم الموروثة لديها فريقُ التنسيق المعني بمواقع اليورانيوم القديمة، في ظلِّ قيادة مشتركة بين الوكالة والمفوضية الأوروبية وممثلين من الدول المستفيدة.

٨٧- واكتمل في عام ٢٠١٨ وضع الغطاء المؤقت على آخر حوض مخلفات كبير في موقع كولميتش، في إطار مشروع شركة فيزموت (Wismut) للاستصلاح البيئي، وهو مشروع واسع النطاق يهدف إلى استصلاح مواقع إنتاج اليورانيوم الموروثة في شرق ألمانيا (الشكل ألف-٥). وبذلك، تكون جميع المخلفات المشعة (البالغ حجمها ١٧٨ مليون متر مكعب) قد وُضعت تحت غطاء مأمون. وسوف تستمر الأعمال الرامية إلى وضع الغطاء النهائي على حوض المخلفات في موقع كولميتش حتى عام ٢٠٢٨. وفي بعض المواقع الأخرى، بدأت شركة فيزموت المملوكة للحكومة الاتحادية تنتقل إلى تنفيذ المهام الطويلة الأجل، ولا سيما معالجة المياه وأعمال مراقبة البنود المستصلحة وصيانتها في الأجل الطويل.

الشكل-ألف-٥- حوض المخلفات قيد الاستصلاح في موقع كولميتش، ألمانيا، ٢٠١٨ .
(الصورة من: شركة Wismut GmbH)

٨٨- وأبلغت اليابان على نحو منتظم بالتقدُّم المحرز في إزالة التلوث خارج الموقع. وفي منطقة مسح التلوُّث المكثَّف، وهي المنطقة التي بلغت فيها قياسات معدل الجرعة الإشعاعية في الهواء مستوى أعلى من ٠,٢٣ ميكروسيفرت/ساعة (أي ما يعادل أكثر من ١ ملي سيفرت/سنويًّا)، انتهت جميع البلديات المسؤولة من أنشطة إزالة التلوث المخطط لها حتى آذار/مارس ٢٠١٨. وقد اكتمل الآن جميع ما هو مطلوب من عمليات إزالة التلوث الكاملة النطاق، فيما عدا ما يلزم الاضطلاع به في المناطق "المتعذرة العودة إليها".

٨٩- وفي عام ٢٠١٨، انتهت شركة تطوير التعدين المملوكة للدولة (EDM)، وهي المسؤولة عن برنامج استصلاح مناجم اليورانيوم القديمة في البرتغال، من أعمال الاستصلاح البيئي للمناجم الموروثة التالية: كاستيليجو، فورميغا، فالي دي فيديرا، فاليس، بوفوا دي سيرفايس. وفي أورجايريسا، تواصل الشركة أعمال الإخراج من الخدمة فيما يخص محطة المعالجة الكيميائية القديمة التي أُنشئت في أربعينات القرن العشرين لأغراض إنتاج ركازة اليورانيوم، وبدأت مؤخراً أعمال الاستصلاح البيئي في خمسة مناجم يورانيوم قديمة أخرى. ومن بين مناجم اليورانيوم القديمة البالغ مجموعها ٦٢ منجماً، تم حتى الآن استصلاح ٤٠ منجماً، وهي الآن قيد الصيانة اللاحقة للاستصلاح وتخضع للرصد المستمر، وقد زُوّدت عند الاقتضاء بمحطات لمعالجة المياه بالأساليب الإيجابية والسلبية.

ألف-٤-٣- التصرف في النفايات المشعة

التصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة

٩٠- استمر العمل على استكشاف خيارات التصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة عند انتهاء عمرها، بما في ذلك التخلص المشترك منها مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة. وزاد عدد خيارات إعادة التدوير والإعادة إلى بلد المنشأ. وبلغت المشاريع المعنية بالتخلص داخل حفر السبر مراحل مختلفة من التطور في عدَّة بلدان، بما في ذلك غانا وماليزيا والفلبين. ويخضع تنفيذ مشروع التخلص داخل حفر السبر في ماليزيا الآن للاستعراض النهائي لحالة الأمان، على أن تبدأ أعمال الحفر في أوائل عام ٢٠١٩.

٩١- وشهد عام ٢٠١٨ إجراء عدد من العمليات الناجحة لإزالة مصادر مشعة مختومة مهملة من مباني المستخدمين وإخضاعها للتحكُّم في ظروف تخزين مناسبة. واكتملت إزالة جميع المصادر المهملة المتبقية من الفئتين ١ و٢ في البرازيل بشحن آخر دفعة من المصادر إلى الولايات المتحدة الأمريكية. وفي إطار هذه العملية، وهي أكبر عملية تُستخدم فيها الخلية الساخنة المتنقلة حتى اليوم، تم التصرف في ٨١ مصدراً من المصادر المستخدمة في العلاج الإشعاعي الخارجي، يبلغ مجموع نشاطها الإشعاعي ١٠٩٣ تيرابيكريل (٥٠٠ ٢٩ كوري)، إمَّا بالإعادة إلى بلد المنشأ أو الإرسال إلى شركة تعمل في مجال إعادة تدوير المصادر. وبتمويل من كندا، أُزيل ٢٧ مصدراً من المصادر المشعة المختومة المهملة من الفئتين ١ و٢ من إكوادور وأوروغواي وباراغواي وبوليفيا وبيرو، ونُقلت لتخضع لإعادة التدوير. وأُزيلت أيضاً ٣ مصادر مشعة مختومة مهملة من الفئتين ١ و٢ من لبنان. وفي عدَّة دول أعضاء أخرى، بما في ذلك ألبانيا وبوركينا فاسو وتونس ومقدونيا الشمالية وقبرص ونيبال، استُهلَّ العمل من أجل إزالة المصادر من الفئتين ١ و٢.

٩٢- واكتمل في عام ٢٠١٨ إدخال مرفق طقم الأدوات المتنقل في الخدمة المعدُّ للاستخدام بالاقتران مع نظام التخلص داخل حفر السبر، ويُعتزم أن يُضطلع بالتنفيذ لأول مرة في ماليزيا في أوائل عام ٢٠١٩.

٩٣- وأُنجزت عمليات تنطوي على تكييف مصادر مشعة مختومة مهملة في الأردن وإندونيسيا وسري لانكا وسلوفينيا وشيلي وغانا وفييت نام وقبرص وماليزيا وهندوراس، وتلقى الموظفون المحليون في هذه البلدان التدريب الملائم على تكييف المصادر المشعة المختومة المهملة. وبعد ذلك حازت مؤسستان في دولتين عضوين على الموافقة والترخيص من السلطة الوطنية المختصة لإجراء عمليات التكييف، وهو ما سيساعد دولاً أعضاء أخرى على المستوى الإقليمي في المستقبل.

٩٤- وأُعدَّت و/أو حُدِّثت قوائم بالأرصدة الوطنية من المصادر المشعة المختومة المهملة، وكذلك من المصادر المختومة المستعملة، في أنتيغوا وبربودا وبابوا غينيا الجديدة وبربادوس وبليز وجزر البهاما ودومينيكا وغيانا.

٩٥- وأُتيح الاطلاع على الفهرس الدولي للمصادر والأجهزة المشعة المختومة لمجموعة أوسع من المستخدمين من الدول الأعضاء، تيسيراً للتعرُّف على ما يُعثر عليه في الميدان من المصادر المشعة المختومة المهملة. واستهلَّت في عام ٢٠١٨ جهود تهدف إلى إضافة مزيد من التفاصيل عن المصادر والأجهزة.

التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها

٩٦- في شباط/فبراير ٢٠١٨، بدأت شركة سيكلايف (Cyclife) التابعة لهيئة كهرباء فرنسا عمليات معالجة ١٨٠٠ طن من الفلزات الملوَّثة إشعاعيًّا التي نتجت عن عمليات الإخراج من الخدمة الخاصة بمحطات ترينو وغارليانو ولاتينا للقوى النووية في إيطاليا، بناءً على اتفاق وقعته مع شركة إدارة المحطات النووية في إيطاليا في عام ٢٠١٧.

٩٧- وبدأت محطة تشرنوبل للقوى النووية في معالجة النفايات المشعة السائلة، في خطوة كبرى صوب تنظيف آثار الحادث النووي الذي وقع في عام ١٩٨٦، حيث شرع المشغِّلون في نقل جانب كبير من النفايات النووية السائلة في المرفق إلى الخزن الطويل الأجل. وسوف تعالج محطة معالجة النفايات المشعة السائلة في موقع تشرنوبل كمية قدرها ٠٠٠ ٢٢ طن من المياه الملوثة الناتجة عن الحادث وكذلك عن تشغيل المفاعلات الثلاثة الأخرى الكائنة في الموقع. ويتوقع أن تزيل محطة معالجة المياه الملوثة، والتي بدأ تشغيلها في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، الملوثات المشعة من المياه بمعدَّل يقترب من ٢٠٠٠ طن في السنة على مدى السنوات العشرين المقبلة.

٩٨- وبدأ تشغيل مرفق للإذابة بالبلازما في محطة كوزلودوي للقوى النووية في بلغاريا، ما ييسِّر معالجة النفايات النووية دعماً لأنشطة الإخراج من الخدمة. وتتيح التكنولوجيا معالجة النفايات بأقل قدر من المخاطرة بوقوع تلوث مشع. وتتَّخذ النفايات شكلاً نهائيًّا مستديماً وخالياً من المواد العضوية والسوائل، حيث تتحول من الناحية العملية إلى خبث زجاجي خامل كيميائيًّا ولابلوري. ويُضاف إلى ذلك أنَّ النفايات المشعة القديمة المكيَّفة في مصفوفة من الفحم القيري أو الخرسانة يمكن أن تُعاد معالجتها في مرفق بلازما لإنتاج حزمة للتخلص من النفايات تفي بمعايير القبول الخاصة بمرفق التخلص من النفايات قرب سطح الأرض في محطة كوزلودوي. وباستخدام تكنولوجيا البلازما، سوف يقلِّل المرفق كثيراً من حجم النفايات الضعيفة الإشعاع والمتوسطة الإشعاع الناتجة عن المفاعلات من ١ إلى ٤ في محطة كوزلودوي، والتي أُغلقت في الأعوام بين ٢٠٠٢ و٢٠٠٦، وعن المفاعلين ٥ و٦، اللذين لا يزالان قيد التشغيل. وفي البلازما، تذوب الفلزات وتتأكسد. ويذوب فيها أيضاً حطام الخرسانة والرمال والحبيبات غير العضوية والمواد العازلة والأسبستوس.

٩٩- وأُطلق في اليابان في نيسان/أبريل ٢٠١٨ مشروع لإيضاح استخدام تكنولوجيا التحقُّق من النفايات المشعة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، ويتألف هذا المشروع من جزأين رئيسيين. وينطوي الجزء الأول على استحداث ودراسة صيغ لمصفوفات تكييف النفايات في شكلها المستديم. وسوف تُجرى اختبارات لهذه الصيغ على النطاق المختبري (١٠٠ غرام) والتجريبي (١ كغ) وشبه الصناعي (١٠٠ كغ) في مختبرات ماركول التابعة للمفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة. أمَّا الجزء الثاني من المشروع فيتمثَّل في إجراء دراسات للجدوى فيما يتعلق بتنفيذ العمليات الإجرائية، ومبادئ التشغيل والصيانة، والتخلص من النفايات.

١٠٠- وأُنجزت أول عملية لنقل نفايات سائلة مشعة من صهريج نفايات تحت الأرض إلى مرفق "للكميات الضخمة" — وحدة التخلص ٦ في موقع سولت ستون (Saltstone) — في موقع سافانا ريفر التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة. وقد صُمِّمت وحدات التخلُّص في موقع سولت ستون بهدف احتواء النفايات الضعيفة الإشعاع الموجودة في شكل مادة طينية والناتجة عن تصليد النفايات غير الخطرة الموجودة في شكل أملاح ذائبة بعد إزالة التلوث منها في الموقع الكائن في ولاية كارولينا الجنوبية. وتستند الصهاريج الخرسانية الاسطوانية إلى تصميم يُستخدم تجاريًّا لتخزين المياه وسوائل أخرى. ووحدة التخلص ٦، التي اكتمل إنشاؤها العام الماضي، هي أول وحدة للتخلص من الكميات الضخمة يضمها الموقع، وهي أكبر بما يزيد على عشرة أضعاف من سائر

وحدات التخلص القائمة في الموقع. ويبلغ قطر الوحدة ٦ نحو ١١٤ متراً ويبلغ ارتفاعها زهاء ١٣ متراً. ويُعتزم إجمالاً إنشـــاء ٧ من وحدات التخلص من الكميات الضـــخمة من هذا القبيل لتلبية احتياجات الموقع في مجال التخلص من النفايات.

التخلص من النفايات المشعة

١٠١- توجد حول العالم مرافق قيد التشغيل معنية بالتخلص من جميع فئات النفايات المشعة، باستثناء النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلَك (المعلن عنه باعتباره من النفايات). وتشمل هذه المرافق التخلص في خنادق في حالة النفايات الضعيفة الإشعاع جداً (على سبيل المثال في إسبانيا والسويد وفرنسا) أو التخلص في مناطق قاحلة في حالة النفايات الضـعيفة الإشـعاع (على سـبيل المثال في جنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصممة هندسيًّا الواقعة قرب سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في الاتحاد الروسي وإسبانيا وبولندا والجمهورية التشيكية وسلوفاكيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند وهنغاريا واليابان)؛ والمرافق المصممة هندسيًّا الواقعة في تكوينات جيولوجية ضمن نطاق عمق معيَّن للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (على سبيل المثال في الاتحاد الروسي وألمانيا والجمهورية التشيكية والسويد وفنلندا وهنغاريا).

١٠٢- وهناك مرافق أخرى للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع بلغت مراحل مختلفة من عملية الترخيص أو التشـــييد، بما في ذلك في بلجيكا (ديســـيل)، وبلغاريا (كوزلودوي-راديانا)، وكندا (كينكاردين)، وألمانيا (كونراد)، وجمهورية إيران الإسلامية (طالمسيتلمسي)، وليتوانيا (ستاباتيشكيس)، ورومانيا (ساليجني)، وسلوفينيا (فربينا)، وكذلك مرفق للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في كندا (تشوك ريفر).

١٠٣- وتتفاوت خيارات التخلص من المواد المشـعة الطبيعية المنشـأ باختلاف اللوائح التنظيمية الوطنية، حيث تتراوح بين مرافق للتخلص في خنادق إلى مرافق مصـممة هندسـيًّا تحت سـطح الأرض، كما في النرويج على سبيل المثال.

١٠٤- وتواصل المؤسسة الحكومية للنفايات المشعة في بلغاريا تشييد مرفق للتخلص قرب سطح الأرض من النفايات الضعيفة الإشعاع في موقع راديانا، بالقرب من محطة كوزلودوي للقوى النووية.

١٠٥- وفي جمهورية إيران الإســلامية، يتواصــل العمل على تشــييد مرفق طالمســي للتخلص قرب ســطح الأرض، وقُبلت حاويات نفايات لتُستخدم في الخزن في الموقع رهناً ببدء عمليات التخلُّص.

١٠٦- وفي فنلندا، تعكف شركة بوسيفا المعنية بالتصرف في النفايات على إجراء اختبار موقعي شامل للنظام الخاص بالمستودع الجاري تشييده في أولكيليوتو، على النحو المشترط لاستصدار رخصة تشغيل المستودع. والهدف من الاختبار هو إيضـــاح التصـــميم الكامل للنظام المطلوب اســـتخدامه لوضـــع مجمعات الوقود النووي المعبَّأة في براميل من النحاس والصلب في أنفاق مشيَّدة خصيصاً لغرض الخزن من خلال حُفر للخزن محفورة في الصـــخور الغرانيتية المســـتضـــيفة. ويشـــمل الاختبار ردم أنفاق الخزن بطمي البنتونايت وتركيب نظام الغلق النهائي القائم على دسـام مصـنوع من الخرسـانة المسـلحة. وسـوف يُسـتخدم في الاختبار برميلان بالحجم الكامل مزودان بعناصر باعثة للحرارة لمحاكاة الحرارة المتبقية الناتجة من الوقود المستهلَك.

١٠٧- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، أصدرت السلطات في السويد حُكْمَين لهما تأثير في عملية الترخيص الخاصة بالمرفق السويدي للتخلص من الوقود المستهلَك الذي اقترحته الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية. حيث أيَّدت الهيئة السويدية للأمان الإشعاعي إنشاء مرفق التخلص النهائي في فورسمارك، وذكرت أنَّ الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية لديها القدرات اللازمة لتنفيذ التخلص النهائي على نحو مأمون. وجاء في تصريح صادر عن محكمة الأراضي والشؤون البيئية أنَّ طلب الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية يستوفي في معظم جوانبه متطلبات الموافقة، لكن تظل هناك بعض أوجه عدم اليقين المتصلة بأداء البراميل النحاسية في الأجل الطويل فيما يتعلق بعمليات تآكل النحاس. وتعمل الشركة على إعداد ردٍّ على طلب المحكمة الحصول على مزيد من المعلومات في هذا الصدد.

١٠٨- والحلُّ الذي اعتُمد في فرنسا للتصرف في النفايات القوية والمتوسطة الإشعاع الطويلة العمر هو التخلص الجيولوجي العميق في الطبقتين الكالوفية والأكسفوردية من تكوينات الحجر الطَّفلي. ويهدف مشروع سيجيو (Cigéo) الذي تضطلع به الوكالة الوطنية للتصرف في النفايات المشعة (وكالة "أندرا") إلى تنفيذ هذا القرار كما تجسَّد في قانون اعتُمد في عام ٢٠٠٦. وتعكف وكالة "أندرا" على وضع اللمسات النهائية على مرحلة التصميم التفصيلي، وتُجري عمليات رامية إلى ضبط خط الأساس عند المستوى الأمثل. وعقب مرحلة الدراسة التقنية بشأن ملف خيارات الأمان، استشارت هيئة الأمان النووي الفرنسية الجمهور في عام ٢٠١٧ بشأن مسوَّدة الرأي الذي تعتزم إصداره في هذه المسألة. وبعد تحليل المساهمات الواردة، أصدرت هيئة الأمان النووي رأيها في كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، قالت فيه إنَّ المشروع قد بلغ على وجه العموم مستوى كافياً من النضج التقني فيما يتعلق بمرحلة ملف خيارات الأمان. غير أنَّ الهيئة طلبت أن يتضمَّن طلب الإذن بالتشييد الذي تعتزم الوكالة الوطنية للتصرف في النفايات المشعة التقدُّم به في عام ٢٠١٩ أو أوائل عام ٢٠٢٠ معلومات تكميلية عن مبررات التصميم المعماري لمرفق التخلص، وتصميم المنشأة وتحديد مساحتها بما يكفل مواجهة الأخطار الطبيعية، ورصد المرفق، والوقاية من احتمالية اندلاع حريق في علب النفايات المصنوعة من القطران، وإدارة الأوضاع اللاحقة لوقوع الحوادث.

١٠٩- وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨، أعلن المجلس الاتحادي السويسري عن قراره بشأن المرحلة الثانية من الخطة القطاعية بشأن المستودعات الجيولوجية العميقة. وأتاح القرار للجمعية التعاونية الوطنية للتخلص من النفايات المشعة، وهي المنظمة المسؤولة عن التصرف في النفايات المشعة في سويسرا، أن تركِّز أنشطة تحديد خصائص المواقع بمزيد من التفصيل على المناطق الثلاث المتبقية التي يمكن اختيار المواقع فيها. كما أنَّ القرار يستهلُّ من الناحية العملية المرحلة الثالثة والأخيرة التي تهدف إلى التقدُّم بطلب لترخيص مرفق للتخلص الجيولوجي بحلول عام ٢٠٢٤.

١١٠- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨، نشرت حكومة المملكة المتحدة سياستها بشأن العمل مع المجتمعات المحلية، في إطار إطلاق عملية وطنية قائمة على قبول الجمهور لتحديد موقع لإنشاء مرفق للتخلص الجيولوجي.

باء- البيانات الذرية والنووية

١١١- تقوم عدّة وكالات بإصدار مكتبات البيانات النووية ذات الأهمية الأساسية بالنسبة لجميع أنشطة البحث والتطوير في مجال التطبيقات النووية، سواء في مجال القوى النووية أو غيره، بالإضافة إلى البيانات التي تستضيفها الوكالة.[٤] وكانت أهم الإصدارات في عام ٢٠١٨ على النحو المبيَّن أدناه:

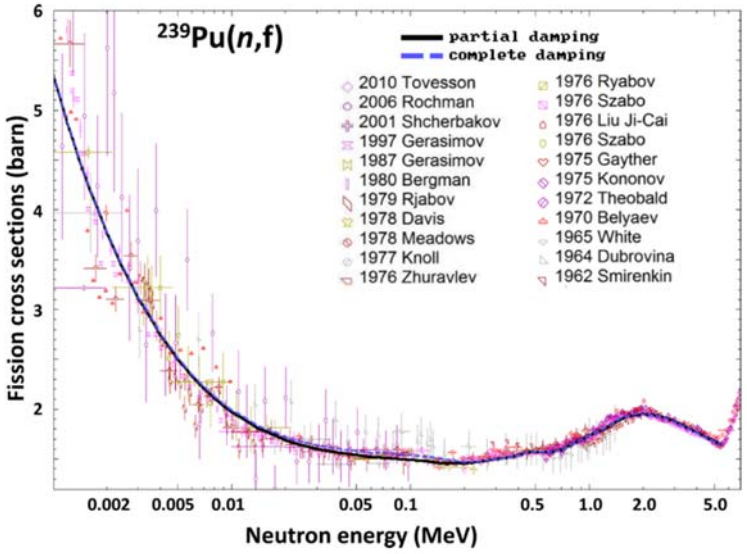
- إذ تتضمَّن مكتبة البيانات النووية ENDF/B-VIII، التي تصدرها الولايات المتحدة الأمريكية، التغييرات الرئيسية لتفاعلات النيوترونات فيما يتعلق بأهمّ النويدات لأغراض التطبيقات النووية، لاسيما أبرز نظائر اليورانيوم، والحديد، والأكسجين، والهيدروجين. وقد بُذل جهد كبير في تقييم القياسات الجديدة للكميات المتعلقة بالإنشطار للأكتينات، مثل أطياف نيوترونات الانشطار السريع وكذلك متوسط عدد النيترونات الانشطارية. وخضعت مكتبة البيانات النووية ENDF/B-VIII لعملية تحقُّق مستفيضة، خاصةً ما يتعلق بالمعايير المرجعية للحَرَجيَّة.
- وأما مكتبة البيانات النووية JEFF-3.3، التي تصدرها وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، فمن المتوقع أن تُستخدم في الغالب في تحليلات المفاعلات، وبرمجيات المفاعلات، وتحليلات دورة الوقود النووي، والاندماج النووي في أوروبا.
- ويتضمَّن ملف البيانات الضوئية النووية الجديد JENDL/PD-2016، الذي أصدرته اليابان، بيانات عن التفاعلات النووية المستحثة بالفوتونات، مثل امتصاص الفوتون، وانشطار الفوتون، والمقاطع العرضية لإنتاج الجسيمات والنويدات المتخلّفة، والمقاطع العرضية ثنائية الفوارق للجسيمات المنبعثة. وتتضمن المكتبة بيانات عن ٢٦٨١ نويدة يتراوح نطاق طاقة الفوتون الساقط لها بين ١ و ١٤٠ مليون الكترون فلط.
- ويهدف ملف مقاطع التفعيل العرضية لأغراض إخراج المرافق النووية من الخدمة المعروف باسم JENDL/AD-2017، وهو أيضاً من إصدار اليابان، إلى تلبية احتياجات تقييم مخزون المواد المشعّة خلال إخراج المرافق النووية من الخدمة.
- وجاء الإصدار الجديد TENDL-2017 من مكتبة البيانات النووية المقيَّمة، المبنية على برمجيات محاكاة التفاعلات النووية TALYS، ليحلّ[٥] محلّ الإصدار TENDL-2015. وتتضمن المجموعة ملفات البيانات المنسَّقة ENDF-6، بما في ذلك بيانات التغايرات، وبطاقة ساقطة تصل إلى ٢٠٠ مليون الكترون فلط، لما مجموعه ٢٨١٣ نظيراً (جميعها مستقرة أو ذات عمر نصفي أكبر من ١ ثانية) للنيترونات الساقطة، وكذلك الفوتونات، والبروتونات، والديوتيرونات، والتريتونات، والهليوم-٣ وجسيمات ألفا.

[٤] متاح عبر الموقع https://www-nds.iaea.org

[٥] متاح عبر الموقع https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html

١١٢- وستكون البيانات المتعلقة بقياس طيف امتصاص أشعة غاما الكلي (TAGS) بمثابة إضافة مهمة لمكتبات بيانات الاضمحلال القائمة، لما قد يكون لها من تأثير في حسابات حرارة الاضمحلال وأطياف مضادات النيوترينو. لذا من المهم استعراض الحالة الراهنة لقياس طيف أشعة غاما الكلي ومناقشة متطلبات البيانات الجديدة. واستكملت الوكالة في عام ٢٠١٨ تقييماً مفصّلاً لبيانات الاضمحلال لنواتج الانشطار الرئيسية المسهمة في حرارة الاضمحلال لنطاق عريض من نُظم الوقود، وهو ما قاد إلى نسخة محدَّثة من جداول الأولويات الخاصة بقياسات طيف امتصاص أشعة غاما الكلي وطيف امتصاص أشعة غاما عالي الاستبانة، وستنشر الوكالة التقييم المفصّل في عام ٢٠١٩.

١١٣- وأُطلقت في عام ٢٠١٨ الشبكة الدولية المعنية بتقييم البيانات النووية (INDEN) لتحفيز التقدُّم في عمليات تقييم المقاطع المستعرضة النيترونية للنويدات وثيقة الصلة على وجه الخصوص بالتكنولوجيات النووية (الشكل باء-١). وسيقوم خبراء الفيزياء النووية بتنسيق جهودهم فيما يتعلق بالقياسات الابتكارية وعمليات محاكاة النماذج من أجل التوصُّل إلى أفضل جداول بيانات تضمّ التفاعلات النووية المحتملة للنويدات الخفيفة مثل نويدات الكربون والنتروجين، والمواد الهيكلية مثل الكروم والنيكل، والأكتينات المهمة مثل نظائر البلوتونيوم. وبمعزل عن التحسينات الأساسية للبيانات النووية، سيتم التحقُّق من التحديثات في مكتبات البيانات النووية مباشرةً من خلال المعايير المرجعية للحرجيّة المتكاملة معها للطاقة الحرارية والطاقة النيوترونية السريعة. والخبراء الذين يسهمون في هذا التطور هُم في الغالب من الصين والدول الأوروبية واليابان والولايات المتحدة الأمريكية، بينما تؤدّي الوكالة دوراً تنسيقياً.



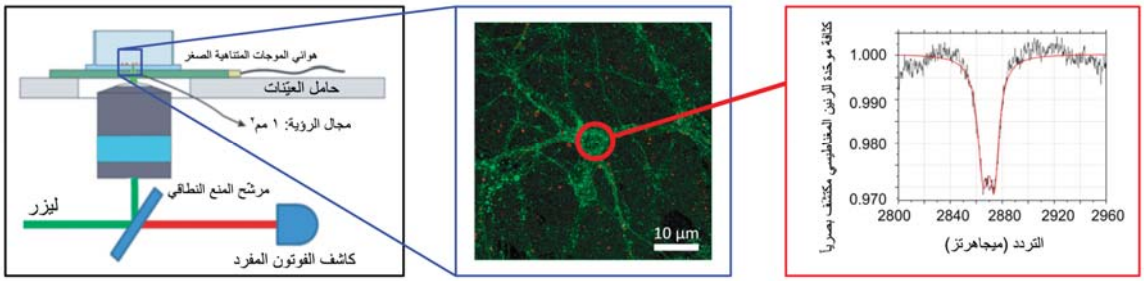
الشكل- باء-١ الحالة الراهنة للمقاطع الانشطارية المستعرضة لليورانيوم-٢٣٥ قيد الدراسة في إطار تعاون الشبكة الدولية المعنية بتقييم البيانات النووية

جيم- التطبيقات الخاصة بالمُعجِّلات ومفاعلات البحوث

جيم-١- المعجِّلات والأجهزة المرتبطة بها

جيم-١-١- تكنولوجيات ابتكارية من خلال هندسة الحُزم الأيونية

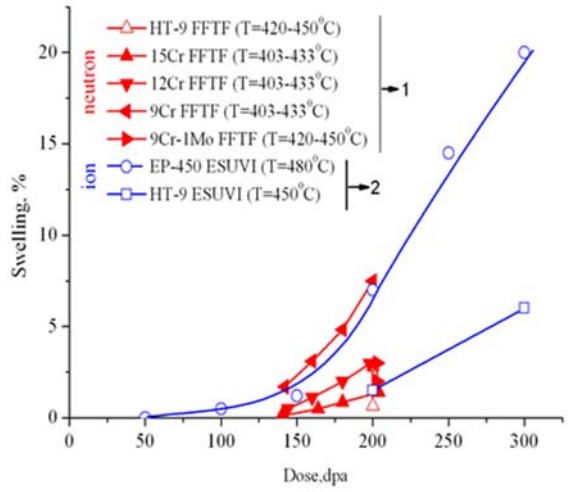
١١٤- بفضل أحدث التطورات في تكنولوجيا المعجِّلات، من الممكن إنشاء عيوب نشطة بصرياً بحجم الذرات ضمن فئة واسعة من المواد، تتراوح من أشباه الموصلات ذات فجوة نطاق واسعة (مثل الماس وكربيد السليكون ونيتريد الغاليوم) إلى مواد ثنائية الأبعاد (مثل نيتريد البورون السداسي) (الشكل جيم-١). وتمثل هذه النظم منصة واعدة في الانبعاث الفوتوني المفرد، وهو مجال ناشئ ذو تطبيقات في مجالات الاتصالات الآمنة (توزيع المفاتيح الآمنة مع حالات الفوتون المفرد) والتوسيم/الاستشعار الخلوي. ويجري في الوقت الحاضر إعداد استراتيجيات متعدّدة لزَرْع الأيونات في إطار جهود تعاونية دولية بدعم من الوكالة. وفي المستقبل القريب، يمكن التنبؤ بابتكارات ريادية في كلّ من الاتصالات الكمية-الآمنة والتكنولوجيا الحيوية.



الشكل-جيم-١- تطبيق الحُزم الأيونية لإنشاء ماسّات نانوية وميضية داخل خلايا عصبية حيّة في مستنبَت: (يساراً) رسم بياني للنسق التجريبي للتصوير والتقاط الإشارات؛ (في الوسط) خريطة مجهرية متحدة البؤرة تبرز ماسّات نانوية وميضية مستوَعبة؛ (يميناً) رنين مغناطيسي من الماسّات النانوية مكتشَف بصرياً. (الصورة مقدّمة من باولو أوليفيرو، جامعة تورينو، المعهد الوطني للفيزياء النووية في إيطاليا، والمعهد الوطني لبحوث الأرصاد الجوية في إيطاليا)

جيم-١-٢- محاكاة تلف مواد المفاعلات بالاستعانة بالمعجِّلات

١١٥- بإمكان الحُزم الأيونية، في حال انتقائها وتهيئتها كما يجب، أن تقوم تجريبياً بنمذجة تلف المواد الناجم عن النيوترونات الحرارية أو السريعة الموجودة في المفاعلات الانشطارية أو الاندماجية وبما أنه لا يوجد في الوقت الحاضر مصادر نيوترونية اندماجية مخصّصة ذات تدفُّق عالٍ بما يكفي لمحاكاة ظروف التشعيع ذات الصلة بتلك التي يمرُّ بها الجدار الأول في مفاعل الاندماج، يتم استخدام معجِّلات الحُزم الأيونية كبديل لاستنساخ أكبر قدر ممكن من التغيرات الهيكلية المجهرية بالإضافة إلى تكوين المواد من أجل إجراء دراسات مفصّلة لتحديد الصفات الهيكلية المجهرية. وعلى سبيل المثال، يمكن أن يقترن واحد إلى ثلاث معجِّلات إلكتروستاتية، من بضع مئات الكيلوفولطات إلى بضع ميغافولطات، لتعمل ضمن تهيئة أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الحُزم لإحداث أضرار بالستية وفي نفس الوقت زرع عناصر التحويل ذات الصلة مثل الهيليوم والهيدروجين، وهي نواتج التفاعل الرئيسية التي يسببها النيوترون في المواد الهيكلية.



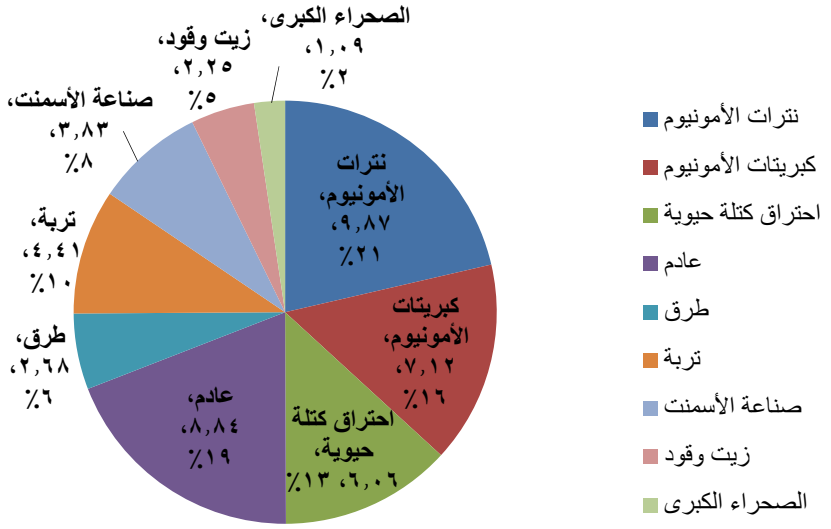
الشكل-جيم-٢ - مقارنة بين المواد المنتفخة بفعل النيوترونات السريعة (باللون الأحمر) وتشعيعات الحُزم الأيونية (باللون الأزرق)، تم تقديمها كدالةٍ على جرعات التلف المختلفة (إزاحة لكل ذرة). (الصورة مقدَّمة من في. فوبيفودين، مركز خاركوف للفيزياء والتكنولوجيا)

١١٦- ومع ذلك، وقبل أن يكون هذا النهج مؤهلاً بالكامل، لابدَّ من جهود وتنسيق دوليين في شكل تمرين موَّحد قادر على تحديد إمكانية استنساخ النتائج في مواقع مختلفة، والمبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات للمعجِّلات، وإلى أيّ درجة يمكن استخدام التشعيع بالحُزم الأيونية لإجراء فحص سريع للمواد الهيكلية النووية في المستقبل. وفي هذا السياق، تنسّق الوكالة[٦] لتجربة تشعيع تقابلية حول العالم لمقارنة هياكل التلف المجهرية لفولاذ T91 فيما بين معجِّلات الحُزم الأيونية، وكذلك بين معجِّلات الحُزم الأيونية وإشعاع للمادة ذاتها في مفاعل البحوث في مفاعل الأبحاث السريع BOR-60 في الاتحاد الروسي.

جيم-١-٣- رصد تلوث الهواء واسع النطاق باستخدام تقنيات تحليلية نووية

١١٧- تلوُّث الهواء مشكلة عالمية يمكن أن تؤثر في البيئة وصحة الإنسان، وتضطلع إدارة نوعية الهواء بدور مهم في خفض مستوى الانبعاثات. ومع ذلك، ثمة نقص في البيانات اللازمة لدعم تحديد مصادر التلوث التي تؤثر في سكان المدن الرئيسية، وكذلك لتوضيح مسارات انتقالها عبر الحدود. ومن أجل تطوير استراتيجيات وأدوات أفضل للتخفيف من آثار التلوث، تستخدم الدول الأعضاء، بدعم من الوكالة، تقنيات تحليلية نووية وأساليب تكميلية أخرى لتحديد تكوين عناصر الجسيمات الدقيقة المحمولة جواً (الشكل جيم-٣). وتعمل مثل هذه المعلومات على تحديد المصادر الرئيسية للتلوث (تقسيم المصادر) ومساهمتها المحدَّدة في التلوث الملحوظ (المخزون). وتتميز عدّة تقنيات بمزايا القدرة متعددة العناصر، كونها غير متلِفة (ما يسمح بالحفاظ على العينات لإجراء مزيد من التحليل) والسرعة في الحصول على معلومات عن قرابة ٢٠ عنصراً كيميائياً ذات صلة بتحديد المصدر. ومن بين هذه التقنيات، يُعدُّ تحليل الحُزم الأيونية، ومقياس الطيف بالأشعة السينية الفلورية، والتحليل بالتنشيط النيوتروني الأكثر استخداماً.

[٦] هي قائمة على مشروع بحثي منسَّق سابق للوكالة بعنوان *محاكاة المعجِّلات والنمذجة النظرية لآثار الإشعاعات في المواد الهيكلية*، ونُشرت النتائج في عام ٢٠١٨.



الشكل-جيم-٣- مثال على المساهمة النسبية لمصادر التلوث (قائمة مصادر التلوث)، استناداً إلى التحليل الأولي للعينات باستخدام تقنيات نووية مختلفة. (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

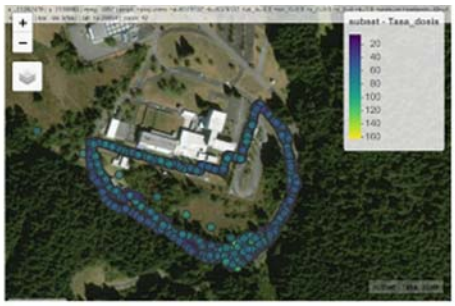
١١٨- وانعكس أيضاً الاهتمام المتزايد وأهمية الموضوع أثناء تمرين اختبار الكفاءة الذي تجريه الوكالة باستخدام عينات من غبار المناطق الحضرية المحمّل في مرشحات الهواء، حيث شارك أكثر من ٤٠ مختبراً تحليلياً من ٣٣ دولة عضواً، وقدّمت المختبرات المشارِكة نتائجها كجزء من إجراءات ضمان ومراقبة الجودة المعمول بها لديها.

جيم-١-٤- القياسات الميدانية لتوصيف التلوث السطحي

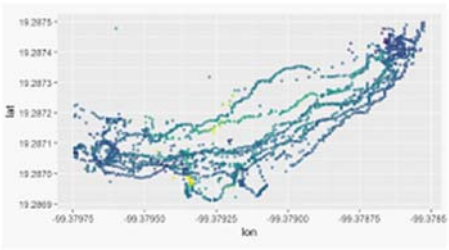
١١٩- يُعَدُّ تعدين اليورانيوم وتجهيزه صناعة مكثفة خلّفت تركة في العديد من البلدان التي لديها مواقع متأثرة إشعاعياً خاضعة لرقابة تنظيمية لا تتفق مع المعايير الدولية الحالية. كذلك أدى استغلال الموارد المعدنية الأخرى، بما في ذلك النفط، إلى تراكم كميات كبيرة من المواد المشعّة الموجودة في البيئة الطبيعية. وقد تلوّثت مواقع أخرى نتيجة للحوادث النووية و/أو الإشعاعية، فضلاً عن تجارب الأسلحة النووية. وعلى سبيل المثال، فإنَّ مستودعات المخلفات بمفردها تستحوذ على أكثر من ٥٠ موقعاً، ويزيد حجم المخلفات وصخور النفايات على ٨٠٠ مليون طن في منطقة آسيا الوسطى وحدها. ويمكن أن تؤدي هذه المواقع من حيث المبدأ إلى تعرُّض أفراد الجمهور للإشعاعات المؤيّنة، ما يترتب عليه آثار صحية سلبية.

١٢٠- ويوفّر أحدث جيل من الأجهزة المحمولة، وحرية الوصول إلى نُظم المعلومات الجغرافية وتطوير أدوات النمذجة الإحصائية الحيوية خيارات متعددة لتنفيذ عمليات المسح في الموقع لمجموعة متنوعة من السيناريوهات والمكونات البيئية. وقد بلغت التقنيات في الموقع مستوى عالياً من الأداء التحليلي وتوفر العديد من المزايا مقارنة بالتقنيات الأكثر تقليدية، بما في ذلك التحديد السريع لتركيزات/نشاطات الملوّثات، وتحديد البؤر الساخنة، وخفض تكلفة الاستقصاءات، والتحديد السريع للتوزيع المكاني للملوّثات. ومن شأن القياسات في الموقع أيضاً أن تحسّن استراتيجيات أخذ العينات لغرض إجراء تحليلات مختبرية عالية الدقة إذا ما لزم الأمر.

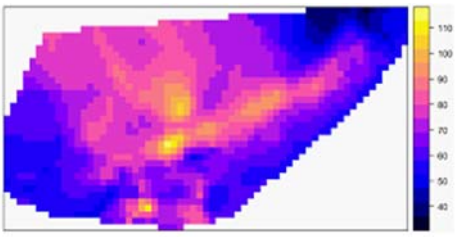
١٢١- وبناء على طلب من الدول الأعضـــاء، شـــملت أنشـــطة الوكالة في عام ٢٠١٨ في هذا المجال ما يلي: عروض إيضـاحية ميدانية لرسـم الخرائط الإشـعاعية دعماً لإطلاق موقع مجمع فوتون للإشـعاع والتكنولوجيا في أوزبكستان بعد التخلص من النفايات المشعّة؛ وعرض إيضاحي عن قدرات نُظم رسم الخرائط الإشعاعية القائمة على الطائرات المسـيّرة لقياســات الموقع في حال حدوث طارئ نووي في البرازيل؛ ودعم دورة تدريبية وطنية بشأن القياسات الإشعاعية، والتقنيات والمنهجيات في الموقع في المكسيك (الشكل جيم-٤).



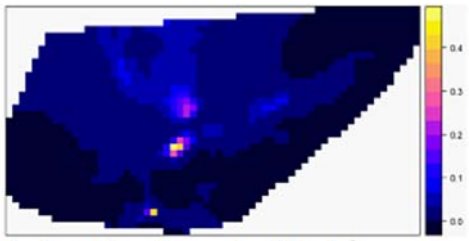
(أ) مسارات مُقاسة



(ب) القياسات في مساحة الاهتمام



(ج) استقراء قيّم معدلات الجرعة (نانوسيفرت/ساعة)



(د) احتمالية تجاوز ١١٤ نانوسيفرت/ساعة

الشكل-جيم-٤- مثال على نتائج تمرين قياس ميداني أُجري كجزء من دورة تدريبية وطنية في إطار مشروع التعاون التقني MEX7011. وتمثَّل مسارات القياسات في الخرائط، بما في ذلك استقراء معدلات الجرعة في المنطقة التي جرى مسحها، وكذلك تقديرات الاحتمالات لتجاوز مستوى معين.
(المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٢٢- تَرِدُ في الجـدول جيم-١ التطبيقـات الأكثر تواتراً لمفـاعلات البحوث. ويمكن أن تتراوح قـدرة هـذه المفاعلات بين الصـــفر (على ســـبيل المثال، المجمّعات الحرجة أو دون الحرجة) وما يقرب من ٢٠٠ ميغاواط (حراري). وتصـميم مفاعلات البحوث أكثر تنوعاً بكثير من تصـميم مفاعلات القوى، ولها أيضـاً أوضـاع تشـغيل مختلفة، يمكن أن تكون ثابتة أو نبضية.

الجدول جيم-١- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم[٧].

نوع التطبيقات (أ)	عدد مفاعلات البحوث المشمولة (ب)	عدد الدول الأعضاء التي تستضيف مثل هذه المرافق
التدريس/التدريب	١٦٣	٥٣
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١١٩	٥٣
إنتاج النظائر المشعّة	٨٤	٤٤
التصوير الشعاعي النيوتروني	٧٢	٤٠
تشعيع المواد/الوقود	٦٨	٢٩
التشتت النيوتروني	٤٧	٣١
التقويم الجيولوجي	٢٥	٢٢
التحويل (معالجة السليكون)	٢٣	٢٠
التحويل (الأحجار الكريمة)	١٩	١٥
العلاج النيوتروني، بصفة أساسية البحوث والتطوير	١٤	١٢
استخدامات أخرى (ج)	١١٩	٣٦

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

(ب) من بين ٢٣٩ مفاعل بحوث تمت دراستها (٢٢٦ عاملة، و١٣ في حالة إغلاق مؤقت؛ حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨).

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

١٢٣- ووفقاً لقاعدة بيانات مفاعلات البحوث التابعة للوكالة، تمَّ تشييد ٨٤١ مفاعل بحوث في ٦٧ بلداً، منها ٢٥٢ مفاعل بحوث قيد التشغيل في ٥٥ بلداً. ولدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث العاملة حيث يمتلك (٥٩) مفاعل بحوث، تليه الولايات المتحدة الأمريكية (٥٠)، والصين (١٧) واليابان (٩). وعلى نطاق العالم، يعمل ٦٦ مفاعل بحوث عند مستويات قدرة بـــ ٥ ميغاواط أو أعلى، وبالتالي فإن هذه المفاعلات توفّر تدفقات نيوترونية أكبر تدعم المنتجات والخدمات التي تتطلب سعة عالية.

١٢٤- ولا يمكن الاستغناء عن مفاعلات البحوث لتوفير النظائر المشعّة لقطاعَي الطب والصناعة، وتوفير الحُزم النيوترونية للبحوث المتعلقة بالمواد والاختبارات غير المتلِفة، وتقديم الخدمات التحليلية وخدمات التشعيع للقطاعين الخاص والعام، وتقديم الخدمات الخاصة بدراسات الإرث الثقافي والبيئة. وتشجع الوكالة مشغِّلي مفاعلات البحوث على وضع أو تحديث خطط استراتيجية فيما يتعلّق باستخدام مرافقهم. وفي السنوات الثلاث الماضية، قدَّم ٣٨ مرفقاً خططه الاستراتيجية إلى الوكالة للحصول على المزيد من المشورة بشأن سُبل استخدامه المستدام والكُفء.

١٢٥- ويبلغ عمر نصف مفاعلات البحوث العاملة أكثر من ٤٠ عاماً. ويمكن أن تتجاوز دورات حياتها ٦٠ سنة، غير أنه من المهم للغاية أن يتمَّ في الوقت المناسب وضع برامج مناسبة فيما يتعلّق بإدارة التقادُم والتجديد والتحديث. ونظراً للاتجاه العام صوب التخفيض في تمويل مثل هذه المرافق والتخطيط المحدود فيما يتعلّق بالتعاقب، ستمثّل نُظُم الإدارة السليمة، والبرامج الخاصة بالتشغيل والصيانة وإدارة الأعمار التشغيلية، عاملاً

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

حيوياً حتى تتمكّن من أداء مهامها على نحو فعَّال من حيث التكلفة. ومن هذا المنطلق، أوفِدت بعثات استعراض النظراء الخاصة بتقييم تشغيل وصيانة مفاعلات البحوث إلى كلّ من أوزبكستان والبرتغال وبنغلاديش وجمهورية الكونغو الديمقراطية. ومن المتوقع أن يبدأ العديد من ٥٦ مفاعل بحوث في حالة إغلاق دائم في ٢٢ دولة عضواً أعمال التحضير للإخراج من الخدمة في المستقبل القريب. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٨، أغلق مالكو مفاعل الماء المغلي في هالدن بالنرويج المفاعل المذكور بصفة دائمة، ما أزال أحد مرافق الاختبار الرئيسية لبحوث الوقود والمواد. وفي شهر آذار/مارس، أُغلق أيضاً بشكل دائم مفاعل البحوث الوطنية الشامل في كندا، وهو أحد المنتجين الرئيسيين للنظائر المشعّة الطبية، بعد فترة تشغيل استمرت ٦١ عاماً.

١٢٦- وهنالك مفاعلات بحوث جديدة قيد التشييد في كلّ من الاتحاد الروسي والأرجنتين وأوكرانيا وجمهورية كوريا وفرنسا والمملكة العربية السعودية والهند. ولدى عدة دول أعضاء خطط رسمية لتشييد مفاعلات جديدة، بما في ذلك بلجيكا وبوليفيا وبيلاروس وتايلند وزامبيا وطاجيكستان (استكمال مفاعل أرغوس-FTI) وفييت نام ونيجيريا وهولندا والولايات المتحدة الأمريكية. وتنظر دول أعضاء أخرى، مثل اثيوبيا وأذربيجان وبنغلاديش وتونس وجمهورية تنزانيا المتحدة وجنوب أفريقيا والسنغال والسودان وغانا والفلبين وكينيا وماليزيا ومنغوليا وميانمار والنيجر، في تشييد مرافق جديدة. وأوفَدت الوكالة أول بعثتَي استعراض نظراء خاصتين بخدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية فيما يخصُّ مفاعلات البحوث، الرامية إلى تقديم الدعم والإرشاد إلى الدول الأعضاء المستهلة لمشاريع مفاعلات بحوث جديدة، إلى فييت نام ونيجيريا. فيما استضافت زامبيا بعثة تحضيرية في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية الخاصة بمفاعلات البحوث. وفي أيلول/سبتمبر، دخل مفاعل بحوث من النوع الحوضي بقدرة ٢ ميغاواط، شُيّد في موقع شمال ترومباي في مركز بهابها للبحوث الذرية في الهند، حيّز التشغيل.

١٢٧- وواصلت الدول الأعضاء التي تخطط لبناء قدراتها النووية الوطنية أو المحافظة عليها لأغراض برامجها الخاصة بالعلوم والتكنولوجيا، بما يشمل القوى النووية، إبداء اهتمامها بإمكانية الاستفادة من مفاعلات البحوث. وبناء عليه، عزّزت ووسَّعت الوكالة في عام ٢٠١٨ صكوكها وأدواتها الأربع وهي: مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت، وهو بمثابة أداة للتدريب عن بُعد تستخدم أساساً لأغراض التعليم الأكاديمي (تواصلت جلسات البث في عام ٢٠١٨ لمناطق أفريقيا وأوروبا وأمريكا اللاتينية والكاريبي)؛ والدورات الدراسية الإقليمية عن مفاعلات البحوث (RRRS)، لتقديم التدريب الأساسي؛ ومبادرة أوروبا الشرقية بشأن مفاعلات البحوث، لتقديم التدريب العملي المتقدّم، في المقام الأول لفائدة المهنيين الشباب، ومخطط مراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث المسمَّاة من الوكالة، لتقديم التدريب المتخصص المتقدِّم للمهنيين الشباب وكبار المهنيين، والذي تنفِّذه في الوقت الراهن ستة مرافق في الاتحاد الروسي وبلجيكا وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية.

١٢٨- وأطلق المعهد الوطني الفرنسي للعلوم والتكنولوجيا النووية منصة جديدة متعدِّدة الوسائط، بعنوان "القلب المفتوح الافتراضي المعزَّز"، لتقديم التعليم والتدريب بشأن فيزياء المفاعلات وتشغيلها.

١٢٩- وتمثّل استمرارية التصرُّف في الوقود النووي المستهلَك الخاص بمفاعلات البحوث وكذلك استمرارية خزنه بطريقة مأمونة وموثوقة واقتصادية تحدّياً للعديد من الدول الأعضاء، وكذلك هو الحال بالنسبة إلى تحديد الخيارات الختامية المُجدية التي يجب أن تمتثل لمتطلبات وقيود عدم الانتشار، والسياسة الوطنية، والاقتصاد والبيئة، فضلاً عن القضايا التقنية. وتواجه العديد من البلدان التي لديها مفاعل بحوث واحد أو أكثر أو لديها برنامج قوى نووية محدود أو ليس لديها أي برنامج من هذا القبيل مشكلة التخلّص النهائي من الكميات الصغيرة نسبياً من الوقود النووي المستهلَك؛ حيث قد تكون هذه البلدان مُلزَمة باتخاذ قرار بشأن مستقبل مفاعلات البحوث الخاصة بها نظرا إلى المدة المحدودة التي تستغرقها البرامج الدولية الخاصة باسترداد الوقود النووي المستهلَك

الخاص بمفاعلات البحوث. وتُبذل في الوقت الراهن جهودٌ جماعية بتنسيق من الوكالة لوضع نماذج دعم اتخاذ القرارات من أجل مساعدة الدول الأعضاء على انتقاء الخيار الأكثر جدوى للسيناريو الذي تعتزم كلّ منها اتباعه في هذا الشأن.

١٣٠- وقد تم حتى اليوم تحويل ٩٩ مفاعل بحوث وأربعة من مرافق إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، أو تأكيد أنها في حالة إغلاق. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨، تم تحويل المفاعل المصدري النيوتروني المصغّر في نيجيريا من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُعيد الوقود النووي الشديد الإثراء المشعَّع إلى الصين في كانون الأول/ديسمبر. وحتى الآن استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى الولايات المتحدة الأمريكية عمليات الإزالة أو التخلُّص المؤكَّد مما يزيد على ٤٤١٥ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلَك، مثلما استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة الوقود الروسي المصدر عملية إزالة حوالي ٢٢٨٠ كغ من الوقود.

١٣١- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٨، استكملت "كوريوم"، المزوّد الرائد بحلول الطب النووي، تحويل عملية صُنع المواد المستهدَفة لتقتصر على اليورانيوم الضعيف الإثراء، ما جعل قرابة ٧٥٪ من الموليبدينوم-٩٩ المباع في العالم اليوم يُنتج دون استخدام اليورانيوم الشديد الاثراء. وفي عام ٢٠١٨، أسفرت حالات الانقطاع لفترات قصيرة في بعض مرافق تشعيع ومعالجة المواد المستهدفة المصنوعة من الموليبدينوم-٩٩ في العالم عن حدوث بعض حالات النقص في الإمدادات الإقليمية. وقد عوَّضت جهود هيئات إدارة سلسلة الإمداد والمنتجين الدوليين الرئيسيين، فضلاً عن جهود التخفيف الفعّالة من قبل الممارسين الصحيين، بعض التقلبات في الإنتاج. وبدأت شركة نورث ستار للنظائر المشعة الطبية في الولايات المتحدة الأمريكية إنتاج الموليبدينوم-٩٩ باستخدام مستهدفات غير مصنوعة من اليورانيوم الشديد الإثراء في عام ٢٠١٨.

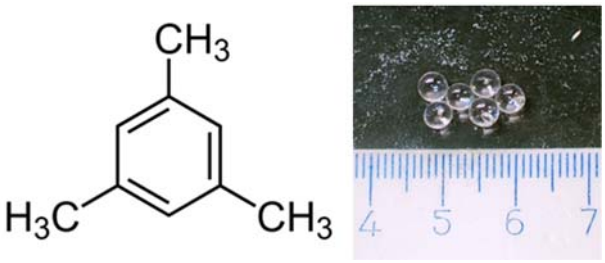
١٣٢- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٨، قرَّرت الحكومة الاتحادية في بلجيكا تقديم مساهمة مالية كبيرة (للفترة ٢٠١٩-٢٠٢٠) من أجل استحداث تكنولوجيا ابتكارية قائمة على المعجّلات لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ دون استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء. وقرَّرت الحكومة أيضاً، في أيلول/سبتمبر ٢٠١٨، تقديم الدعم لجهود تطوير مفاعل البحوث الهجين المتعدد الأغراض الخاص بالتطبيقات التكنولوجية المتقدمة (المفاعل الهجين) باستثمار كبير على نطاق زمني واسع (على مدى الفترة ٢٠١٩-٢٠٣٧). والمفاعل الهجين هو نظام قائم على المعجّلات سوف يُستخدم في المقام الأول لدراسة التحوُّل النووي، واستحداث الجيل المقبل من النظائر المشعة الطبية، ودراسة المواد المتقدمة.

جيم-٢-١- تكنولوجيات جديدة في المهدئات لإنتاج نيوترونات باردة

١٣٣- توفر المهدئات الباردة نيوترونات متدنية الطاقة باستخدام مواد منتقاة بعناية في درجات حرارة خفيضة. ومثل هذه النيوترونات ملائمة بوجه خاص لدراسات علوم المواد. وتشمل التصاميم المبتكرة لإنتاج حُزم النيوترونات الباردة تطوير مهدئات صلبة قُرصية، مثل ذلك قيد التشغيل في مفاعل البحوث IBR-2 النبضي في "دوبنا"/المعهد المشترك للبحوث النووية. وفي المهدئات الباردة الصلبة، المُعدَّة على وجه العموم من الميثان، يولّد التحلُّل الإشعاعي للميثان غاز الهيدروجين ويمكن أن يتلف الانتفاخ الناجم وعاء المهدئ. غير أن الأقراص الصغيرة في نظام "دوبنا"/المعهد المشترك للبحوث النووية (الشكل جيم-٥) مصنَّعة من هيدروكربونات أكثر مقاومة للإشعاعات وتُضخّ بشكل متواصل إلى وعاء المهدئ، وتُزال بسهولة في نهاية عمرها النافع، وعليهِ يتم التقليل من احتمال التلف. وهذا المنهج المبتكر يُطبّق حالياً على المصادر النيوترونية القائمة على مفاعلات

البحوث أو المدفوعة بالمعجِّلات. وبالإضافة إلى ذلك، أثمر مشروع بحثي مندسَّق للوكالة استُكمل في عام ٢٠١٨ عن عدد من النتائج المهمة الأخرى المتعلقة بالتصـــاميم المبتكرة، والنماذج الأولية والاختبارات حقيقية النطاق لمثل هذه المهدّئات المتقدّمة.

١٣٤- وأما المســـتجد البارز الآخر فهو تطوير مهدئات باردة ســـائلة. وانطوى ذلك على عزل "حالة دوامة" نووية واحدة في الهيدروجين السائل بمساعدة مواد حفازة (أي باراهيدروجين). وفي مثل هذه التصاميم، يمكن أن تقطع النيوترونات الباردة المفيدة مسافات بعيدة دون مزيد من التفاعل، ما يمكّن من تشييد مهدئات باردة منخفضة الأبعاد (أصابع، رقاقة منبسطة)، وحولها يمكن رصّ أجهزة التشتت النيوتروني بفعالية أكبر.



الشكل-جيم-٥- صورة الأقراص المصنَّعة في "دوبنا"/المعهد المشترك للبحوث النووية والمستخدمة لتهدئة النيوترونات السريعة (يساراً)، والتمثيل البياني لهيكليتها الجزيئية. (الصورة مقدَّمة من "دوبنا"/المعهد المشترك للبحوث النووية)

دال- التكنولوجيات الإشعاعية

دال-١- التصوير المقطعي بالأشعة الكونية: مسبر من النجوم

١٣٥- التصوير الإشعاعي بالميونات هو تقنية ناشئة تستخدم الإشعاعات الأساسية الموجودة في الطبيعة في شكل ميونات الأشعة الكونية. وتنشأ ميونات الأشعة الكونية الأرضية عندما تتفاعل الأشعة الكونية الأولية عالية الطاقة مع الغلاف الجوي للأرض، وينجم عن ذلك ميونات نشطة. ولها سمات تشبه سمات الإلكترونات غير أن كتلتها أكبر بكثير. وتنطوي ميونات الأشعة الكونية على مستوى من الطاقة يفوق الأشعة السينية النمطية بنحو ١٠ ٠٠٠ ضـــعف، وتطلق طاقة في المقام الأول من خلال التأيُّن. وبإمكان مثل هذه الميونات أن تخترق الهياكل الكبيرة جداً. وهذه الميونات ذات شـــحنة وتترك من ورائها آثار تأيُّن مع فقدانها للطاقة أثناء عبورها من خلال المادة. ويتيح ما سبق الكشف عنها في الكواشف الوميضية وكواشف التأيُّن، مثلما يتيح قياس آثارها.

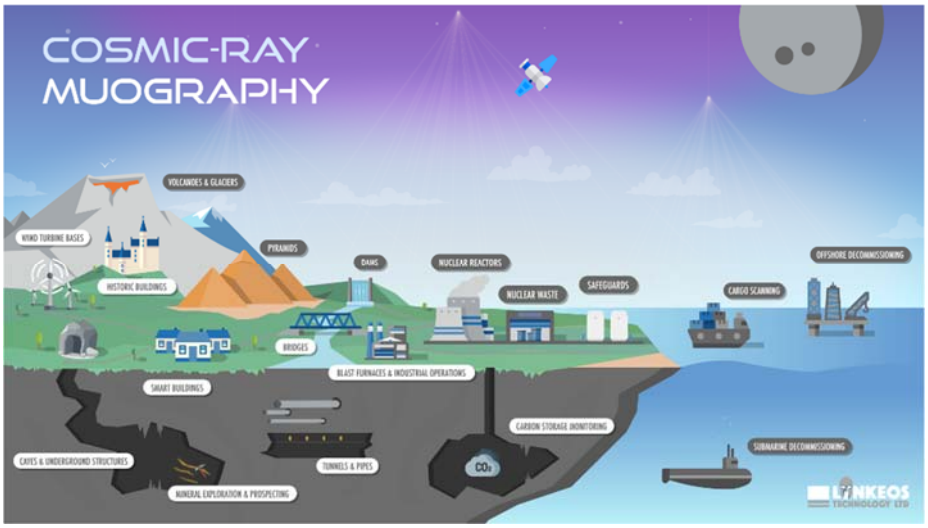
١٣٦- وتتمثل المزية الرئيسية لهذه التقنية، القائمة على تشتُّت أو امتصاص الميونات، في إمكانية الكشف عن الاختلافات في كثافة المواد ذات العدد الذري العالي في الحجم المغلق (حتى وإن كانت مدمجة) بطريقة ســـليمة دون استخدام أي مصادر إشعاعية. ويتطلب التصوير الإشعاعي بالميونات توافُر مستويَيْن سطحيين للكاشف على أقل تقدير بما يسمح بتعريف مسارات الميونات الكونية المكتشفة، وكثيراً ما تُستخدم ثلاثة أو أربعة مستويات

سطحية من أجل تحسين الاستبانة والكفاءة. ويمكن تصوير الأجسام الصغيرة الحجم عن طريق إعادة تشكيل مسارات الميونات قبل تفاعلها مع هذه الأجسام وبعده، أمَّا الأهداف الكبيرة الحجم فيجري تكوين صورة ثنائية الأبعاد لها عن طريق مقارنة التدفُّق بقياس مرجعي. ولا تقتصر نتائج التصوير الإشعاعي بالميونات بالضرورة على الصور ثنائية الأبعاد، إذ يمكن الجمع بين المعلومات المستمدة من أجهزة كشف متعددة تقوم بتصوير الحجم نفسه لتشكيل صورة ثلاثية الأبعاد عن طريق تدوير الهدف أو أجهزة الكشف حوله.

١٣٧- ويتم استهداف مجالات تطبيقات مختلفة في جميع أنحاء العالم مثل قياس سماكة صهارة البركان على عُمق ١ كم؛ وتحديد التجاويف غير المكتشَفة سابقاً لهرم في مصر[٨] وهياكل تحت أرضية في نابولي بإيطاليا[٩]. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية استخدام الميونات كأداةٍ جديدة لدراسة الهياكل المدنية مثل المباني والجسور والأنفاق. وكانت هناك زيادة لافتة في عدد المنشورات بشأن هذا الموضوع في السنوات الأخيرة.

دال-١-١- التطبيقات

١٣٨- مجالات تطبيقات تقنية التصوير المذكورة آخذة في التزايد وتشمل العلوم الجيولوجية، والأمان والأمن النوويين، والهندسة المدنية، وعلم الآثار. وفي هذه المجالات، يمكننا أن نجد تطبيقات تجمع بين التدريع، والاستبانة، والمقاييس الزمنية والتي يُعدُّ التصوير المقطعي بالميونات طريقة تصوير مناسبة لها. الشكل دال-١ يتصور العديد من التطبيقات المختلفة.

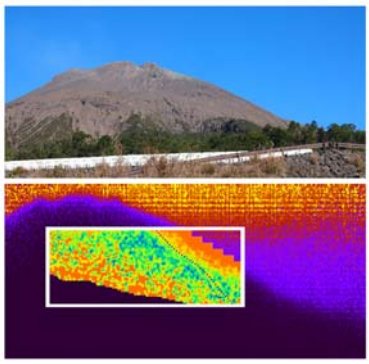


الشكل- دال-١ رسم معلوماتي بياني يوضّح التطبيقات المختلفة للتصوير المقطعي بالميونات
(المصدر: شركة Lynkeos Technology Ltd، المملكة المتحدة)

[8] Morishima, K. et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature 552, 386-390 (2017).

[9] Saracino, G. et al., Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), Scientific Reports 7:1181 (2017).

١٣٩- التطبيق الأكثر نموذجية في علوم الأرض هو تصوير داخل البراكين. وقد استخدم علماء البراكين هذه الطريقة في على سبيل المثال فرنسا وإيطاليا واليابان[١٠،١١،١٢] وباستخدام هذه التقنية، من الممكن التنبؤ بثوران البركان ومن ثمّ الاستعداد المسبق له وتقليل آثار الكوارث الطبيعية. الشكل دال-٢ يظهر أول صورة ميونية عالية الاستبانة لبركان ساكوراجيما في اليابان.



الشكل- دال-٢ - صورة ناجحة لبركان ثائر. الصورة الداخلية السفلى تظهر داخل بركان باستبانة قدرها ١٠ مليون x ١٠ مليون (الصورة: أولاه وآخرون[٩]، جامعة طوكيو، اليابان)

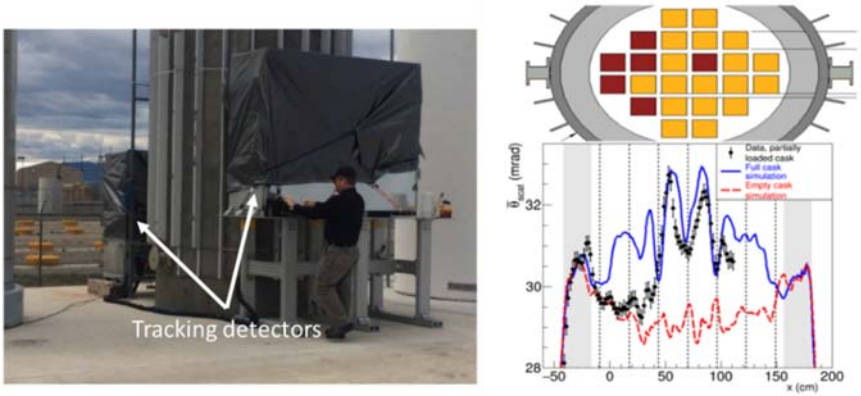
١٤٠- يمثل تطوير نُظم للتصوير المقطعي بالميونات لأغراض التطبيقات الصناعية تحدياً حالياً للمجتمع العلمي. إذ يمكن أن تعاني المعدات الصناعية، مثل أفران الصهر والأفران الدوّارة، تآكلاً داخلياً لا يمكن قياسه بسهولة باستخدام التقنيات المتاحة حالياً. ومثل هذه الأنواع من المرافق كبيرة بما فيه الكفاية للتصوير بالإرسال والتصوير بالتناثر معاً ويمكن استخدام الطريقتين لقياس التآكل. لذلك، يمكن أن يساعد التصوير المقطعي بالميونات في عملية التشخيص، ما يجعل العمليات الإنتاجية للشركات أكثر كفاءة من حيث توفير الطاقة والتكاليف الاقتصادية. وتشمل تطبيقات الهندسة المدنية الإضافية رصد المباني التاريخية، والهياكل الكبيرة من قبيل الجسور وتوربينات الرياح، وربما أيضاً الهياكل الواقعة على منصات النفط. وفي أعقاب كارثة انهيار جسر مؤخراً في جنوة بإيطاليا، قد تشهد تطبيقات الهندسة المدنية الآن تطوراً أسرع.

[10] D'Alessandro, R., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, Phil. Trans. R. Soc. Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

[11] Oláh, L., Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt. Sakurajima, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

[12] Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T., and Varga, D., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports 8 3207 (2018) 1-13.

١٤١- ويوفر الأمان والأمن النوويان تطبيقات مهمة أخرى للتصوير الإشعاعي بالميونات. وحقيقة أن المواد والنفايات المشعّة تخزَّن في حاويات مدرَّعة مصمَّمة لاحتواء الإشعاع تعني أيضاً أنه لا يمكن استخدام إشعاع مشابه لتصوير محتوياتها. وإن قدرة التصوير الإشعاعي بالميونات على التمييز بين الوقود النووي والمعادن الأخرى مسألة بالغة الأهمية بالنسبة للتطبيقات في مجال الأمن النووي،[١٣] لا سيما بالنسبة لفحص البضائع لأغراض الأمن القومي، ولكن أيضاً للتطبيقات المتعلقة بالضمانات، ومنها على سبيل المثال رصد براميل الخزن الجاف وتحديد خصائص النفايات المشعة الموروثة ذات الخصائص الهندسية المعقَّدة[١٤،١٥].



الشكل- دال-٣- صورة لمقتفيات ميونية موضوعة على جانبي برميل الخزن MC-1 المحمَّل جزئياً (يساراً) رسم بياني يظهر موقع حُزم الوقود (أعلى اليمين) المفقودة (أحمر) والمحمَّلة (أصفر). إشارة تجريبية (أسود) مقارنة بتوقعات مونت كارلو لبرميل محمَّل بالكامل (أزرق) وفارغ (أحمر) (أسفل اليمين). (الصورة من: كريستوفر موريس، مختبر لوس ألموس الوطني، الولايات المتحدة الأمريكية).

١٤٢- وربما كان البحث عن مواد نووية خاصة داخل حاويات الشحن أحد التطبيقات الأولى المحتملة للتصوير المقطعي بالميونات. ويُعدُّ تصوير محتويات حاويات النفايات النووية وضمان جودة عمليات معالجة النفايات النووية من بين التطبيقات الرئيسية الأخرى في مجال الأمان النووي[١٦]. وتمّ مؤخراً نشر نظام إيضاح في موقع سيلافيلد بالمملكة المتحدة. وأخيراً، يمكن أيضاً تصوير المفاعلات النووية نفسها باستخدام الميونات الكونية. وفي اليابان، عمل فريق من الباحثين على تصوير الكوريوم في مفاعلات فوكوشيما دايتشي، بدعم من عمليات المحاكاة التي تشير إلى إمكانية القيام بذلك[١٧].

١٤٣- ومن المتوقع أن يصبح التصوير الإشعاعي بالميونات تقنية تجد مكانها بين تقنيات التصوير الأخرى، خاصة لما تتسم به من مزايا خاصة، فلا جرعة إشعاعية تتجاوز مستويات الإشعاعات الأساسية الطبيعية؛ وقدرته على اختراق الأجسام السميكة؛ وقدرته على قياس كل من الكثافة والعدد الذري. والناحية السلبية الرئيسية لهذه التقنية هو التعرُّض الطويل الأمد اللازم للعديد من التطبيقات.

---

13 Durham, J. M., et al., Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering, Phys. Rev. Applied 9 044013 (2018).

14 Morris, C. L., et al., Application of muon tomography to fuel cask monitoring, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

15 Yang, G., et al., Novel muon imaging techniques, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

16 Mahon, D., et al., First-of-a-Kind Muography for Nuclear Waste Characterisation, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

17 Miyadera, H., et al., Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, AIP Advances 3 052133 (2013).

هاء- الصحة البشرية

هاء-١- خدمات معايرة التصوير الإشعاعي للثدي بالأشعة السينية

هاء-١-١- الخلفية

١٤٤- يستخدِم التصوير الإشعاعي للثدي، ما يُعرف بالماموغراف، أشعة سينية منخفضة الجرعة بُغية الكشف عن سرطان الثدي وتشخيصه. ويُستخدم ضمن برامج الكشف عن سرطان الثدي بين السكان في مراحله المبكرة، وعليهِ تتعرض أعداد كبيرة من النساء للإشعاع خلال هذه العملية. من المهم أن تُقاس بدقة جرعة الإشعاع المستخدَمة في الفحص حتى يتسنى الحدّ من المخاطر الكامنة إلى أبعد حدّ ممكن وتحقيق أقصى فائدة ممكنة. وقد حدّدت منظمة الصحة العالمية ضمان الجودة كأحد المعايير الأساسية لتنفيذ صورة الماموغراف بنجاح. وبفضل ضمان الجودة، يمكن تعديل كلّ من الجرعة الإشعاعية وجودتها (الأطياف الإشعاعية) لنظام الماموغراف بُغية تحسين جودة الصورة، مع الحفاظ على الجرعة الإشعاعية عند أدنى مستوى ممكن.

١٤٥- وللقياس الدقيق للجرعات دور مهم في عملية تحقيق المستوى الأمثل. ويتعيّن معايرة معدات قياس الجرعات المستخدَمة في هذه القياسات في مختبر معايرة معترف به. ويجب أن تستند المعايرة إلى النظام الدولي للوحدات بحيث تستند جميع الجرعات المقاسَة في مؤسسات مختلفة إلى معيار دولي فريد، وهو ما يسهّل بالتالي المقارنة فيما بينها. وفي العادة يضطلع بهذه المسؤولية أحد مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات، الذي يوفر للمستشفيات معايرات يمكن إسنادها إلى ذلك المعيار.

هاء-١-٢- السّمات الإشعاعية

١٤٦- كان من المعتاد استخدام أنابيب الأشعة السينية ذات أنود الموليبدينوم وترشيح الموليبدينوم لتصوير الثدي بمعاينة الصورة الشعاعية على الشاشة. واستُخدمت هذه السمة الإشعاعية كمعيار لعمليات قياس الجرعات والمعايرات الإكلينيكية. وتستخدم وحدات الماموغراف الحديثة طائفة أوسع من السّمات الإشعاعية التي تحققت من خلال توليفات مختلفة للأنودات/الترشيحات واختيارات فلطية الأنابيب. وغالباً ما تستخدم نُظم التصوير الرقمي للثدي أنابيب الأشعة السينية القائمة على أنود تنجستن. وإكلينيكياً يمكّن ذلك من تحقيق جودة صورة أفضل بإعطاء المريضة جرعة أقلّ.

١٤٧- والسمات الإكلينيكية المستخدَمة في مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات موحَّدة، وهي قائمة حالياً على توليفة أنود الموليبدنوم/ترشيح الموليبدنوم. ويتمثّل التحدي في تغطية كامل نطاق السّمات الإشعاعية المستخدَمة إكلينيكياً بحيث تتحقق القياسات الدقيقة في جميع الحالات الإكلينيكية. والحاجة إلى أنابيب الأشعة السينية القائمة على أنود الموليبدنوم تقتصر على عمليات معايرة التصوير الشعاعي للثدي، في حين يُستخدم أنود تنجستن عادةً لنوع آخر من التصوير الإشعاعي التشخيصي بالأشعة السينية والمعايرات ذات الصلة. ويمكن أن يشكّل ذلك ضغطاً اقتصادياً على مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات التي تحتاج إلى اقتناء نظام أشعة سينية قائم على أنود الموليبدنوم فقط لأغراض معايرات التصوير الإشعاعي للثدي.

هاء-١-٣- مقاييس الجرعات الإشعاعية

١٤٨- تقليدياً استُخدمت غرف التأيُّن لقياس الجرعات الطبية. وفي العادة، لا تعتمد استجابة غرفة التأيُّن اعتماداً قوياً على طاقة الحُزمة الساقطة. لذا يمكن استخدامها في قياسات لنطاق عريض من سمات (طاقات) الحُزم الإشعاعية المختلفة. وتُستخدم طبقة قيمة النصف كبديلٍ لتحديد جودة الحُزمة الإشعاعية. لذلك يمكن توفير معامِلات المعايرة لغرف التأيُّن لبعض السّمات الإشعاعية، فيما يمكن اشتقاق المعامِلات الخاصة بالطاقات الأخرى الاستقراء فيما بين القيم المختلفة لطبقة قيمة النصف. وبهذه الطريقة يمكن أداء القياس الدقيق للجرعات لمجموعة كاملة من السّمات الإشعاعية المختلفة الخاصة بالتصوير الإشعاعي للثدي والمتاحة في المستشفيات.

١٤٩- ويتزايد في الآونة الأخيرة الاستخدام الإكلينيكي لمقاييس الجرعات القائمة على أشباه الموصّلات، وهو يحلّ تدريجياً محلّ غرف التأيُّن لأن مثل هذه المقاييس الأصغر حجماً يسهل التعامل معها ويمكن استخدامها أيضاً لقياس العديد من الكميات الأخرى (على سبيل المثال طبقة قيمة النصف، فلطية الأنبوب) ويترتب على ذلك تعرُّض واحد فقط. غير أن الاعتماد المتأصل لاستجابتها على الطاقة أكثر وضوحاً مقارنةً بغرف التأيُّن. لذلك يطوّر المصنّعون أساليب تعويض داخلية متعددة قائمة على الجودة الإشعاعية للتعويض عن هذا التأثير. غير أن العديد من المستخدمين لا يفهمون بشكل كامل كيفية إجراء هذه التصحيحات. وهو ما يفرض تحدّيات إضافية فيما يتعلق بقياس ومعايرة مقاييس الجرعات المستخدمة في التصوير الإشعاعي للثدي.

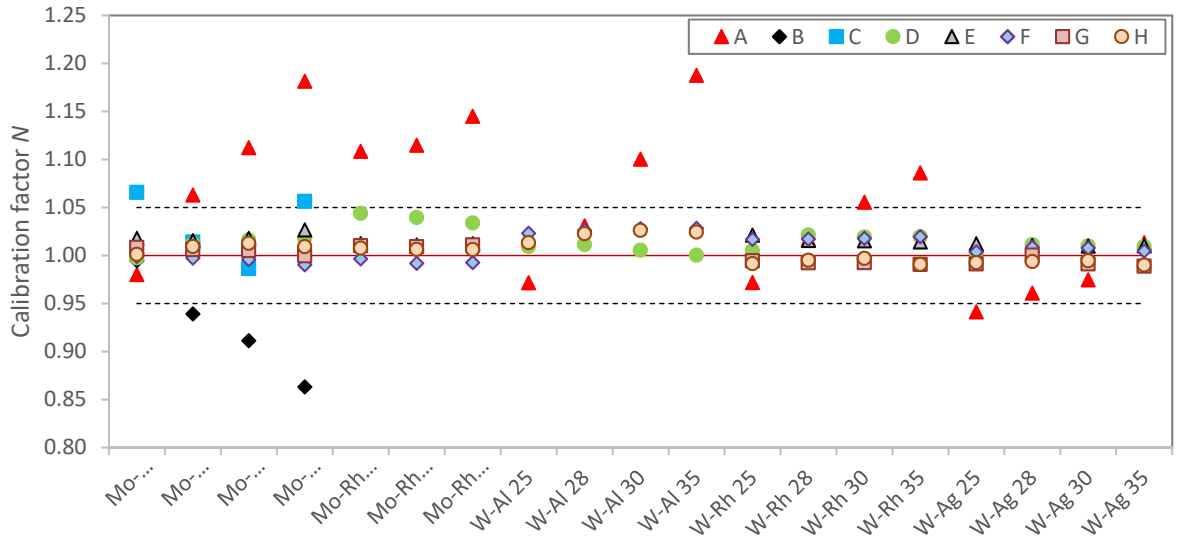
هاء-١-٤- عمليات المعايرة

١٤٩- ينبغي أن تتمَّ معايرة معدات قياس الجرعات على نحو منتظم في مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات. وخلال إجراء المعايرة، تتمُّ مقارنة استجابة مقياس الجرعات بالمعايير المرجعية الوطنية التي يمكن تتبُّعها، مثلما يتمُّ تحديد مُعامِل معايرة لمقياس الجرعات. وفي العادة ليس باستطاعة مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات أن توفر المعايرات للعدد الكبير من السّمات الإشعاعية المحتملة والتي يتم استخدامها إكلينيكياً.

١٥١- وبالنسبة لمعاير غرف التأيُّن فإن تفاوُت الجودة الإشعاعية لا يمثل مشكلة بسبب الاعتماد الضئيل جداً لاستجابتها على الطاقة. غير أن الأمر ليس كذلك فيما يخلص مقاييس الجرعات القائمة على أشباه الموصّلات حيث الاعتماد على الطاقة أكثر وضوحاً.

هاء-١-٥- تطورات أخرى

١٥٢- يتيح مختبر المعايرة التابع للوكالة لأعضاء شبكة الوكالة/منظمة الصحة العالمية لمختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات إمكانية الوصول إلى المجموعة الكاملة من السمات الإشعاعية التي قد تكون مطلوبة لقياس الجرعات الإشعاعية للتصوير الإشعاعي للثدي. وتمت معايرة عدّة أنواع مقاييس في مختبر المعايرة التابع للوكالة. وبناء على نتائج المعايرات (الشكل هاء-١) التي أُجريت في مختبر المعايرة التابع للوكالة، تبيَّن أن بعض المقاييس القائمة على أشباه الموصّلات تعوّض بشكل جيد جداً عن التغيرات في السمات الإشعاعية. ويعني ذلك إمكانية استخدامها للقياسات في نطاق واسع من السمات الإشعاعية المستخدَمة إكلينيكياً.



الشكل- هاء-١- عامل المعايرة N (ملي غراي/ملي غراي) تم قياسه في مختبر قياس الجرعات التابع للوكالة لثمانية مقاييس مبنية على أشباه الموصّلات (A-H) كوظيفة للجودة الإشعاعية.

١٥٣- غير أن مختبرات المعايير الثانوية لقياس الجرعات في الدول الأعضاء لا تملك بالضرورة جميع تلك السّمات الإشعاعية المتاحة لمعايرة المقاييس المستخدَمة في التصوير الإشعاعي للثدي. وعليهِ يُشجّع مصنّعو أشباه الموصّلات على تطوير أسلوب موحَّد يمكن استخدامه لمعايرة هذه المقاييس ضمن ظروف موحَّدة.

١٥٤- واستخدام أجهزة أنود الموليبدنوم/ترشيح الموليبدنوم لإنتاج مجموعة قياسية من السّمات الإشعاعية لمعايرة مقاييس الجرعات المستخدمة في التصوير الإشعاعي للثدي لا يمثّل الاتجاه الإكلينيكي الحالي. لذلك، ينبغي وضع سمات إشعاعية قياسية جديدة باستخدام أنود التنجستن. وينبغي أن تشتمل المقاييس القائمة على أشباه الموصّلات على وضعية معايرة يمكن فيها استخدام هذه السّمات الإشعاعية القياسية بطريقة يمكن معها التحقُّق من أداء المقياس في جميع السّمات الإشعاعية الإكلينيكية وتأكيدها. ومن شأن ذلك أن يجنّب حدوث الأخطاء في قياس الجرعات والإسهام في جودة التشخيص أو فحص سرطان الثدي في جميع أنحاء العالم.

هاء-٢- الجراحة الموجَّهة بالأشعة في السرطانات النسائية

هاء-٢-١- الخلفية

١٥٥- يُعَدُّ السرطان من بين الأسباب الرئيسية للوفيات في جميع أنحاء العالم. وفي الأورام الخبيثة في منطقة الفَرْج والغشاء المبطّن للرحم وعُنق الرحم، يرتبط استخدام الجراحة الموجَّهة بالأشعة بتقليل الاعتلال في الأجلين القصير والطويل مقارنة بتشريح العقد اللمفاوية بشكل كامل.

١٥٦- والعقدة اللمفاوية الخافرة هي أول عقدة لمفاوية ناحية تجفّف اللِّمف من الورم الأساسي. لذا تُعدُّ العقد اللمفاوية الخافرة أول عقد تتلقى انبذار الخلايا الانبثاثية المنقولة باللّمف. وبات رسم خريطة العقد اللمفاوية الخافرة وأخذ خزعة منها تقنية روتينية في جراحة السرطان (الثدي والجلد)، ما أسهم في جعل الإجراءات الجراحية ضمن أضيق نطاق ممكن.

١٥٧- ويوفر الكشف عن الغدد اللمفاوية الخافرة معلومات تكهنية بشأن حالة العقد ويمكن أن يساعد على تجنُّب الاعتلال من العلاج المفرط. وعلاوة على ذلك، بما أنه لا توجد طرائق تصوير قادرة على اكتشاف بالانبثاثات المجهرية، تُعدُّ خزعة العقدة اللمفاوية الخافرة الطريقة الوحيدة الموثوقة لفحص الغدد اللمفاوية وتحديد الانبثاثات – المجهرية في العقدة اللمفاوية الناحية.

هاء-٢-٢- سرطان عُنق الرحم

١٥٨- يحتل سرطان عُنق الرحم المرتبة الثالثة بين أمراض السرطان النسائية الأكثر حدوثاً في البلدان المتقدّمة، غير أنه الأكثر حدوثاً في البلدان النامية بل والسبب الأول للوفيات بين النساء في سنّ الحمل. وبشكل عام، ينتشر سرطان عُنق الرحم موضعياً نحو أعضاء منطقة الحوض المجاورة، ولكن يمكن أيضاً أن ينتشر نحو العقد اللمفية ضمن حدود المنطقة الموضعية، وفي بعض الحالات النادرة، شوهِد انبثاث في الدم يتصل بالكُليتين أو الكبد أو العظام أو الدماغ. وتمت دراسة الفائدة الممكنة من الكشف عن العقدة اللمفاوية الرقيبة في حالات سرطان عُنق الرحم في إطار دراسة موسَّعة شملت ٥٠٧ امرأة وكذلك في استعراضات تألّفت من ٨٣١ مريضة. وباستخدام التقنية المدمجة تمَّ التوصل إلى معدل اكتشاف ٩٣,٥٪ و٩٦٪، وهي قيمة تنبؤية سلبية عالية (٩٤٪ و٩٧٪) ومعدّل سلبية كاذبة ٨٪. والنتيجة المهمة هي ارتفاع معدل الاكتشاف والقيمة التنبؤية السلبية في الأورام التي تقلُّ عن ٢ سم (٩٤٪ مقابل ٨٤٪ و٩٩٪ مقابل ٨٩٪).

هاء-٢-٣- سرطان بطانة الرحم

١٥٩- سرطان بطانة الرحم هو الورم الخبيث الأكثر شيوعاً في المسالك التناسلية للإناث في البلدان المتقدمة. وتشير مشاركة العقدة الحوضية أو العقد اللمفاوية المجاورة للأبهر بتنبؤ أسوأ بمسار المرض، ويتراوح معدّل البقاء على قيد الحياة لخمس سنوات بين ٤٤٪ و ٥٢٪. وفي حالة السرطانات الشبيهة بسرطان بطانة الرحم (درجة ٣ "تمايُز قليل الوضوح"، مشاركة الغدّة الرحمية >٥٠٪) أو عند المرضى حيث هستولوجيا الأورام عالية المخاطر (ساركومة سرطانية حليمية مصلية واضحة الخلية إزالة كل الأورام والأعضاء المصابة، بما في ذلك استئصال العقدة اللمفاوية الحوضية والمجاورة للأبهر. ولكن في حالات الإصابة بسرطان بطانة الرحم منخفض المخاطر فإنّ معدل حدوث غزو العُقد اللمفاوية منخفض للغاية ولا يوجد حتى الآن إجماع واضح بشأن إدارة المرض. وعند بعض المرضى يتمُّ تعديل الدرجة المتدنية نسيجياً وزيادتها بعد الفحوص الباثولوجية لعينة الورم بأكملها. وفي هذه الحالات، قد تكون الإزالة المسبقة لكل الأورام والأعضاء المصابة.

١٥٩- ويمكن أن يعدّل تشخيص غزو العُقد اللمفاوية إدارة المرض وإدخال علاج مساعِد. وبالإضافة إلى ذلك، من المهم التأكيد على حقيقة أن غالبية مريضات سرطان بطانة الرحم لديهن مخاطر جراحية عالية بسبب السمنة وحالات الاعتلال المصاحبة المرتبطة بها. وفي مثل هذا الوضع، قد يقلل مفهوم العقدة اللمفاوية الخافرة بشكل كبير من حالة الاعتلال ما بعد الجراحة إذا كان من الممكن تجنُّب استئصال العقد اللمفاوية منهجياً حتى عند المريضات اللائي يعانين أوراماً عالية المخاطر. ويمكن أن يوفّر الكشف العقدة اللمفاوية الخافرة ليس فقط إزالة كل الأورام والأعضاء المصابة دون زيادة عدد المضاعفات التي يمكن أن تنجم عن الاستئصال الكامل للعُقد اللمفاوية، ولكن أيضاً زيادة حساسية التدريج، بحيث تُجرى الكيمياء المناعية على عُقد لمفاوية محدَّدة. ورغم إجراء عدّة دراسات في مجال الكشف عن العقدة اللمفاوية الخافرة في حالات سرطان بطانة الرحم، فإن الدلائل العلمية للتحقُّق من صحة هذه النقطة مازالت غير كافية.

هاء-٢-٤- سرطان المبيض

١٦١- نسبة حدوث العُقد اللمفاوية المصابة بالسرطان في مرحلة مبكرة من سرطان المبيض منخفضة، وتتراوح من ٥,١٪ إلى ١٥٪. وتنطوي إزالة العُقد اللمفاوية الحوضية وتلك المجاورة للأبهر على زيادة فترة الجراحة وربما الإصابة بالاعتلال. ولكن ينبغي النظر في الكشف عن العقدة اللمفاوية الخافرة في حالات سرطان المبيض.

هاء-٢-٥- الاتجاهات المستقبلية

١٦٢- التطور الأهمّ في مجال السرطانات النسائية هو إدخال الأجهزة المستخدَمة أثناء العملية من قبيل كاميرا أشعة غاما المحمولة. ويوفر هذا الجهاز صورة أثناء العملية لتحديد موقع العقد اللمفاوية الخافرة قبل بدء الاستئصال. وبمجرد الإزالة، يمكن لصورة إضافية للمجال الجراحي أن تؤكد نجاح عملية الاستئصال عن طريق خلوّه من النشاط. وتستغرق هذه العملية ما بين ٥ دقائق (في سرطان الفرج وسرطان عنق الرحم) و١٥ دقيقة (في سرطان بطانة الرحم)، وهذه فترة قصيرة نسبياً في عملية جراحية كاملة.

١٦٣- والسلوك مفرط الأيضية للسرطانات النسائية يجعل التشخيص وتحديد مواضع الكتل المتكررة بتوجيهٍ من التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني أمراً مجدياً. ويمكن أن يتمثّل المرض المتكرر، وهو سهل التشخيص من خلال التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي، في شكل انتشار كبير على امتداد جوف البطن، ويجب علاجه من خلال العلاج الكيميائي؛ وقد يتمثّل في بؤرة ورمية صغيرة ومنعزلة. وفي مثل هذه الحالات تحديداً، يمكن استخدام مسبار التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني المحمول باليد أثناء العملية الجراحية لتوجيه الجراحة، وتحديد الكتلة الورمية وتمييزها عن الأنسجة الطبيعية أو الندبية. والجراحة الموجَّهة بالتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني مفيدة خاصةً في الكشف عن الآفات الملموسة، أو الآفات التي تغطيها أنسجة متليّفة. وتتمثل الصعوبة التقنية الرئيسية في نسبة الامتصاص الفسيولوجية العالية في الأنسجة المحيطة: الكبد، والطحال، والكليتين، والمثانة، وغيرها. وهذا النشاط العالي، إلى جانب الاستبانة الحيزية المتدنية لبعض الأجهزة، يجعل ذلك غير مناسب كموجّه فيما يتعلق باستئصال الحواف. ومن بين فوائد هذا النوع من الجراحة هو انخفاض الاعتلال الناجم عن الجراحة، بسبب التحديد المباشر لموقع الآفات من خلال المسبار وكذلك بسبب خفض حجم الشق. ويُوصى بإجراء صورة باستخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني قبل الجراحة، لتحديد موقع البؤر الورمية وللتخطيط لعملية الاستئصال.

١٦٤- وعلى الرغم من الفوائد المحتملة لهذا الإجراء، مازالت الجراحة الموجهة التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني غير مستخدَمة على نطاق واسع. وتتمثل المشاكل الرئيسية فيما يلي : أ) المواقع غير محدَّدة، لأن المسبار يمكن أن يكتشف الأنسجة الورمية والأنسجة الملتهبة؛ ب) الصعوبات التقنية، كما هو موضح أعلاه، بسبب النشاط العالي في تجويف البطن (يُوصى بنسبة ١,٥: ١ كحدّ أدنى) ولأن حجم المسبار لا يسمح باستخدام الجراحة المنظارية. ج) تعرّض الموظفين للإشعاع، على الرغم من أن بعض الدراسات تحدّد حداً أقصى سنوياً هو ٢٦٠ ساعة لهذا النوع من الجراحة؛ د) أسباب مالية.

١٦٥- وفي الآونة الأخيرة، تمَّ اختبار مقتفٍ جديد مع الأورام الخبيثة النسائية، وخاصةً في سرطان عنق الرحم؛ وتتألف المعدات الجديدة المستخدَمة لتصوُّر هذا العامل من كاميرا فلورية متعددة الأطياف توفر تصوراً للمقتفي أثناء الجراحة. ويتم حقن المقتفيات الفلورية (خُضرة الإنْدوسِيانين) عند بداية الجراحة ويتم تصورها خلال الفحص الجراحي للحوض.

واو- الأغذية والزراعة

واو-١- تطورات جديدة تشير إلى تحوُّل في نموذج تشعيع الأغذية والتشعيع الخاص بالصحة النباتية

١٦٦- لطالما مثَّل تشعيع الأغذية داخل المنشأة في إطار التشغيل العادي للمنشأة التجارية الغذائية غاية منشودة. فحالياً، يُعهد تشعيع الأغذية في كثير من الأحيان إلى مرافق منفصلة كبيرة يديرها متعاقدون متخصصون، غير أن تطوير جيل جديد من أجهزة التشعيع وأنظمة قياس الجرعات والتطبيقات يمهد الطريق أمام اتِّباع نهج جديد. فالتكنولوجيا تقلّص حجم مولدات الحزم الإلكترونية والأشعة السينية، وتشير التطورات الأخيرة في مجال التشعيع بالمصادر الآلية إلى أنه قد يتسنى تركيب وحدات التشعيع بسهولة أكبر في خطوط تعبئة الأغذية أو كجزء من مرفق تصنيع الأغذية.

١٦٧- وينطوي التشعيع على معالجة الأغذية بتمريرها عبر حزمة من الإشعاع المؤيّن. وتستطيع الحزمة الإشعاعية أن تمرّ عبر العبوة وكذلك عبر الأغذية، تماماً مثلما يمكن للأشعة السينية أن تمرّ عبر جسم الإنسان، ولكن خلافاً للإشعة السينية الطبية فإن الغرض هو إيداع طاقة لإحداث بعض التغيير من دون زيادة درجة الحرارة زيادة كبيرة. ويمكن معالجة الأغذية الصلبة والأغذية المعبأة مسبقاً بل حتى المجمدة منها بهذه الطريقة مع إحداث تغييرات سلبية طفيفة في الأغذية، بينما يحمي التغليف الأغذية بعد المعالجة. لكن هذه العملية مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً، ولذلك لا يشعِّع المنتجون الأغذية بلا داعٍ. ولا تُستخدم هذه العملية إلا عندما تجلب تغييراً مفيداً ما، إما لتحسين جودة المنتَج العالية أو للحفاظ عليها. وتشمل الأمثلة على ذلك ما يلي: استخدام التشعيع لضمان خلوّ الأغذية من البكتيريا المسبّبة لتسمم الطعام؛ أو الحد من عدد الكائنات الدقيقة المتلِفة للأغذية، وبالتالي إبقاء الأغذية أكثر طزاجةً لفترة أطول؛ أو لمنع التبرعم دون استخدام مواد كيميائية (كما في حالة الزنجبيل واليام والثوم والبصل والبطاطس)؛ أو كمعالجة صحية نباتية من أجل منع انتشار الكائنات العضوية الغازية (الذباب والحشرات والسوس والعث، وربما البزاقات والقواقع وحتى البذور غير المرغوب فيها). والغرض الأخير مهم بصفة خاصة لشحنات الفواكه والخضراوات الطازجة التي يمكن أن تنتقل فيها الآفات، ومن خلال التجارة الدولية تتأسَّس في مواقع جديدة حيث يمكن أن تضر بالبيئات والزراعة المحلية. وفي حين أن استخدام المواد الكيميائية الخاصة بالتبخير يخضع للتقييد بدرجة متزايدة بسبب الشواغل الصحية و/أو البيئية فإن استخدام التشعيع لا يترك أي مخلفات كيميائية ضارة ويسبب آثاراً سلبية ضئيلة على جودة الأغذية.

١٦٨- وتلزم مصادر قوية للإشعاع المؤيّن، وتتعين إدارتها بطريقة صحيحة. وتُشعَّع معظم الأغذية باستخدام أشعة غاما المستمدة من الكوبالت-٦٠. وتنبعث أشعة غاما المستمدة من الكوبالت-٦٠ بطاقَتَيْن تبلغان ١,١٧ و ١,٣٣ مليون الكترون فلط وبكتلة صفرية، ولذلك يمكنها أن تخترق أحجاماً كبيرة من المنتجات الضخمة (يمكن مثلاً تشعيع منصات محمَّلة بأكياس التوابل دفعة واحدة). ويتضاءل مصدر التشعيع بمعدل واحد في المائة تقريباً في الشهر (يبلغ العمر النصفي للكوبالت-٦٠ حوالي خمس سنوات) ولذلك يجب زيادة زمن التعريض قليلاً كل شهر من أجل إيداع نفس المقدار من الطاقة (الجرعة الإشعاعية). وبمرور الوقت، يتعين تجديد المصدر.

١٦٩- وتُشعَّع بعض الأغذية باستخدام إشعاعات الحزم الإلكترونية. ويمكن أن تكون للحزمة الإشعاعية- طاقات تصل إلى ١٠ مليون الكترون فلط؛ ولكل إلكترون في الحزمة شحنةٌ كهربائية سالبة عامة وكتلة صغيرة لكنها ملموسة. وعلى الرغم من أن هذا يعني أنه يمكن تشغيل الحزم الإلكترونية عند الحاجة وتوجيهها وتركيزها باستخدام المجالات المغناطيسية، فإنه يعني أيضاً أنها تتفاعل وتتصادم بسهولة مع الذرات في الأغذية، فتنقل الطاقة بسرعة وبمعدل مرتفع على مسافة قصيرة نسبياً: فالحزم الإشعاعية لا تتغلغل إلى عمق كبير، وهي مناسبة لتشعيع عبوات الأغذية التي يبلغ عمقها عدة سنتمترات أو نحو ذلك.

١٦٩- وتُعالَج كميات من الأغذية أقلّ بكثير عن طريق التشعيع بالأشعة السينية، الذي يتم أثناءه توجيه وابل من الحزمة الإلكترونية إلى هدف معدني لتحويل الطاقة الحركية للإلكترونات إلى أشعة سينية، وذلك عموماً بطاقات في حدود ٥ مليون إلكترون فلط، ولكن تصل في بعض البلدان إلى ٧,٥ مليون إلكترون فلط. وتخترق الأشعة السينية الأجسام بنفس درجة اختراق أشعة غاما، لأن كتلتها صفرية، ومن ثم فالأشعة السينية مفيدة أيضاً في تشعيع المنصات الكبيرة من الأغذية الكبيرة الحجم دفعةً واحدة. بيد أن قدراً كبيراً من الطاقة يُهدر في شكل حرارة عندما يتم تحويل الحزمة الإلكترونية في الهدف المعدني، وتُنتِج نسبة قليلة منها فقط الأشعة السينية.

١٧١- ويتمُّ إنتاج كل من الحزم الإلكترونية والأشعة السينية باستخدام الآلات، ويمكن إنشاء خصائص وطاقات مختلفة للحزم بتغيير بارامترات الآلات أو حسب التصميم. وعلى خلاف الكوبالت-٦٠، يمكن إيقاف تشغيل هذه المصادر عند عدم الحاجة إليها. كما أن التاريخ يدل على أن الآلات قابلة جداً للابتكارات التكنولوجية.

١٧٢- وبوجود التشعيع من مصدر نويدات مشعة أو آلات، ينطوي نموذج العمل التجاري الحالي في العادة على وجود منشأة تشعيع بمثابة مقدِّم خدمة قائم بذاته يتعاقد مع الآخرين على توفير خدمات التشعيع. وكثيراً ما توجد منشآت التشعيع التجارية على الطرق التجارية الرئيسية أو مراكز النقل، مثل محطات الشحن التي تخدم الموانئ والمطارات. والمرفق نفسه هو أساساً مستودع كبير يوجد في وسطه جهاز تشعيع. وتدخل الأغذية غرفة التشعيع من القطاع غير المشعَّع (منطقة استلام البضائع) من المستودع، وتُعرَّض للحزمة الإشعاعية لمدة موقوتة، ولذلك تتعرض لجرعة إشعاعية دنيا محددة، وتخرج من الغرفة إلى القطاع المشعَّع (منطقة البضائع المعدَّة للإرسال) من المستودع. ويُحتفظ بها هناك إلى أن يتسنى اعتمادها باعتبارها تلقت المعالجة التشعيعية الصحيحة، عن طريق التحقق من وقت التعرض المسجل والقراءات التوكيدية لمقاييس الجرعات الإشعاعية التي رافقتها خلال العملية. وحالما تُعتمد الأغذية باعتبارها مشعة بالطريقة الصحيحة، تُشحن إلى أي مكان يحدده المالك.

١٧٣- ومن المرجح أن يستمر هذا الأسلوب الراسخ في العمل، ولكن التكنولوجيا الجديدة تمكِّن من أن تكون وحدات التشعيع مصغَّرة، وعلى الرغم من أن هذه الوحدات المصغرة توفر حالياً مصادر حزم منخفضة الطاقة فإنها تُستخدم في الصناعة لتعقيم مواد التعبئة والتغليف والمعدات الطبية والعينات البيولوجية في المصانع، في إطار عملية التصنيع العادية. وبمرور الوقت، يمكن أن تصبح مولِّدات الحزم الإلكترونية والأشعة السينية الصغيرة أكثر قوة ولذلك أكثر فائدة في تشعيع الأغذية. وتشير مثل هذه التطورات إلى مستقبل يمكن فيه تشعيع الأغذية على خطوط التعبئة والتغليف، أو أثناء التصنيع، أو عند حصاد الأغذية طازجة في المزرعة. وقد حان الوقت لوضع أسس تقنية متينة لدعم التشعيع بالحزم الإلكترونية والأشعة السينية لكي يتيح هذا التحول في النموذج توفير فرص أعمال تجارية جديدة في نهاية المطاف في مجال تشعيع الأغذية والتشعيع الخاص بالصحة النباتية. وتهدف الوكالة، بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، إلى تسريع البحث والتطوير الرامي إلى تسهيل إيجاد تقنيات عملية للتشعيع بالحزم الإلكترونية والأشعة السينية من أجل إطلاق الإمكانات المستقبلية لهذا التشعيع لإيجاد معالجات جديدة ومحسَّنة لتشعيع الأغذية.

١٧٤- وتشمل الأنشطة البحثية الحالية في الولايات المتحدة الأمريكية بناء جهاز محمول منخفض الطاقة في شكل كابينة للتشعيع بالأشعة السينية (١٦٠ كيلو إلكترون فلط)[١٨] بغية توليد إشعاع مؤيّن لمعالجة الفاكهة المعبأة في صناديق لتطهيرها من الحشرات كعلاج خاص بالحَجْر الزراعي. وتقيّم البحوث في جمهورية كوريا آثار

18 Follett, P., Kirk, R., A portable cabinet X-ray machine to control insects in exported fruit https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE_Portable_X-ray_Machine.pdf

الأشعة السينية المنخفضة الطاقة على خصائص الأطعمة الميكروبيولوجية والفيزيائية-الكيميائية وتلك المرتبطة بالحواسّ (اللون والطعم والرائحة والملمس). والمفهوم الذي يستند إليه هذا البحث هو إيجاد كبائن صغيرة للأشعة السينية لكي تُستخدم في المستشفيات لضمان سلامة الأغذية للمرضى المعرضين للخطر (كالمرضى منقوصي المناعة). وقد أخذ العمل التعاوني بين الباحثين في بولندا واليابان سبيله إلى إيجاد نهج جديد لتشعيع المنتجات الغذائية والزراعية يتعلق بالتغلغل المحدود للإلكترونات بطاقات تقلُّ عن ٣٠٠ كيلو إلكترون فلط. وهذا تطبيق جديد يرمي إلى إزالة البكتيريا والعفن والخمائر من سطوح المنتجات الغذائية. وقد قورنت هذه المعالجة بالتشعيع التقليدي بالحزم الإلكترونية (١٠ مليون إلكترون فلط) لقرون الفلفل الأسود، وقرون الفلفل الأبيض، وفلفل جامايكا الكامل. وكانت المعالجة السطحية فعّالة مثل التشعيع التقليدي في الحد من الميكروبات والقضاء عليها.[١٩]

١٧٥- ويجري أيضاً تطوير أدوات لمساعدة مرافق التشعيع بالمصادر الآلية. ففي الصين، تم تطوير نموذج لإثبات المفهوم لجهاز أشعة سينية لمسح المنتجات المعلبة قبل المعالجة التشعيعية، من أجل تحديد ما إذا كانت حزمة الأغذية داخلة ضمن مواصفات التشعيع الصحيح بالحزم الإلكترونية.[٢٠] ويجري تطوير مفهوم مماثل في فييت نام، ولكن هنا تُستخدم أشعة غاما المستمدة من مصادر الكوبالت-٦٠ المسدَّدة الصغيرة لفحص المنتجات المعلبة، من أجل اختبارها قبل التشعيع بالحزم الإلكترونية. وتم تجريب الجهازين كليهما في المرافق التجارية الخاصة بالتشعيع بالحزم الإلكترونية - وهما يعطيان قياساً سريعاً لسمك الكتلة (أحد البارامترات الرئيسية في الحزم الإلكترونية) ويستخدمان خوارزميات مختلفة للتنبؤ الدقيق بتوزيع الجرعات الناتج من التشعيع بالحزم الإلكترونية. ويمكن تقييم فعالية التشعيع بالحزم الإلكترونية بسرعة، ويمكن استنتاج التشكيل الأمثل للمنتج عن طريق المحاكاة قبل إجراء المعالجة الفعلية. وفي أحدث الأبحاث في الصين، يجري اختبار نظام سيحاكي توزيع الجرعة على ثلاثة أبعاد، ويمكن أن يُحدِث هذا النظام ثورة في قياس الجرعات في معالجات التشعيع.

١٧٦- وفي عام ٢٠١٥ أقامت مجموعة بولر Bühler للهندسة الغذائية شراكة استراتيجية مع شركة كوميت COMET، التي تنتج مصابيح الحزم الإلكترونية الصغيرة. وقد أنتجتا معاً ماكينة لإزالة التلوث الميكروبي من الأغذية المجففة، باستخدام حزم إلكترونية منخفضة الطاقة.[٢١] ويجري تقييم عدد من هذه الأجهزة الجديدة في منشآت مختلفة تقوم بتجهيز التوابل. وطورت شركة ميفيكس Mevex، التي توفر مرافق الحزم الإلكترونية والأشعة السينية، "صندوق ميفكيس للأشعة السينية"، وهو نظام أشعة سينية مضغوط الحجم وذاتي التدريع للأبحاث أو للتجهيز التجاري الضيق النطاق للسلع ذات القيمة العالية، بما في ذلك المنتجات الغذائية والزراعية. وتشغل أرضية جهاز التشعيع ومعه التدريع مساحة مترين مربعين تقريباً، ويتوافر بطاقات تصل إلى ٢ مليون إلكتروني فلط. وهو مصمَّم لتوفير معدلات جرعة عالية في منتجات يصل ارتفاعها إلى ٤٠ سم، على منصة دوارة يبلغ قطرها ٤٠ سم. وتعمل شركة نيوتيك NucTech، وهي مورِّد لمرافق الحزم الإلكترونية والأشعة السينية الكبيرة ومقرها في الصين، على مواصلة تطوير أداة جديدة للكشف عن سُمك الكتلة، يمكن توفيرها تجارياً للاستخدام في مرافق الحزم الإلكترونية من أجل فحص المنتجات والتحقق من صلاحيتها وربما رسم خرائط الجرعات التي تلقتها، قبل التشعيع، وبذلك تقتصد الوقت والمال وتحسِّن الإنتاجية.

---

19 Gryczka, U., Migdał, W., Bułka, S., The effectiveness of the microbiological radiation decontamination process of agricultural products with the use of low energy electron beam, Radiation Physics and Chemistry 143 (2018) 59-62.

20 Qin, H., et al., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, Radiation Physics and Chemistry 143 (2018), 8-13.

21 Hertwig, C., Meneses, N., Mathys, A., Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review, Trends in Food Science & Technology 77 (2018) 131-142.

واو-٢- استخدام التكنولوجيات النووية للتكيُّف السريع للمحاصيل والنظم المحصولية مع تغير المناخ

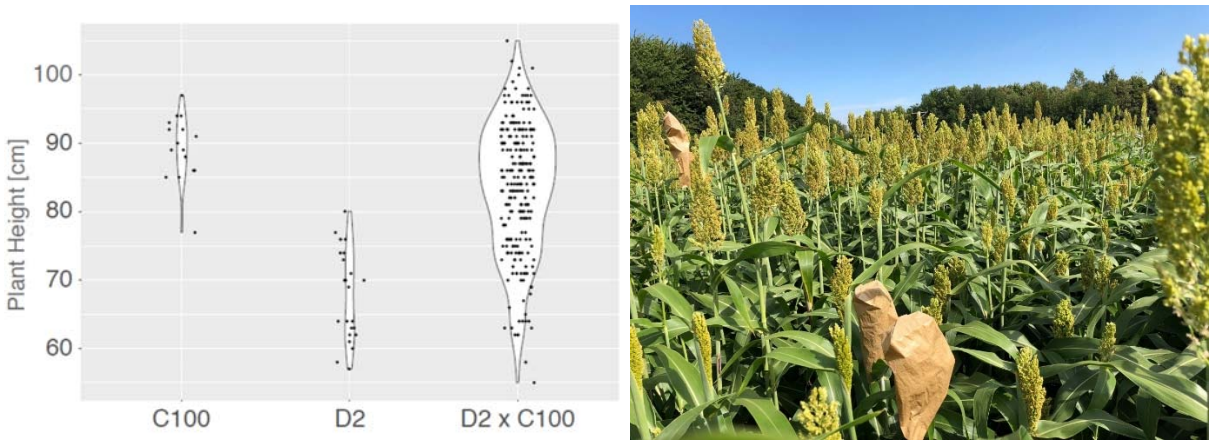
١٧٧- يؤثر الجفاف ودرجات الحرارة المفرطة والفيضانات ونقص المغذيات في التربة أو وجود السُّميات المعدنية فيها تأثيراً مباشراً في غلات المحاصيل، من خلال آثار هذه العوامل على تثبيت النباتات ونموها، ويؤثر عليها بصورة غير مباشرة من خلال تأثير هذه العوامل في طبيعة وشدة الضغوط الأحيائية، مثل الأمراض والحشرات والأعشاب الضارة. ومن دون اتخاذ تدابير تكييف مناسبة لإنتاج المحاصيل، سيقلّص تغير المناخ غلة المحاصيل، مفضياً إلى انعدام الأمن الغذائي وانهيار النظم الغذائية، لا سيما في البلدان النامية. كما يمكن أن يؤدي إلى تغيرات في التوزيع الجغرافي لأنواع المحاصيل.

١٧٨- وتدعو الخسائر الكارثية التي تصيب المحاصيل نتيجة تغير المناخ إلى إيجاد مسارات مبتكرة لتحسين أنواع المحاصيل من أجل ضمان الأمن الغذائي العالمي. وفي عصر ما بعد الجينوم، يشكّل الجمع بين الاستيلاد الطفري للنباتات والانتقاء بمساعدة الواسمات، وتحديد الأنماط الظاهرية العالي الإنتاجية، وصفة قوية للتكييف السريع للنباتات مع تغير المناخ. ويسعى استيلاد النباتات عادةً إلى تحسين أداء المحاصيل في مواجهة الضغوط الأحيائية واللاأحيائية التي يواجهها إنتاج المحاصيل خلال كل موسم من المواسم الزراعية.

واو-٢-١- الاستيلاد الطفري للنباتات بمساعدة الواسمات من أجل تعجيل تطوير أصناف ذكية مناخياً

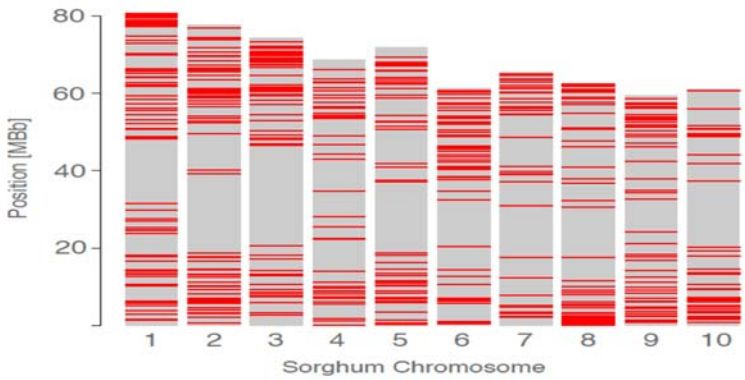
١٧٩- لا يزال الاستيلاد الطفري للنباتات أسرع نهج لإيجاد تباين جيني جديد من أجل التكييف السريع مع تغير المناخ. ويمثل مزج الاستيلاد الطفري للنباتات مع الجيل التالي من تحديد الأنماط الجينية العالي الإنتاجية ومع التنميط الظاهري الدقيق العالي الإنتاجية وسيلةً ضرورية لتعجيل مثل هذا التكييف. وتساعد هذه العملية العلماء على فهم الأسس الجزيئية للتباينات الجينية الناتجة عن الاستيلاد الطفري، بما يؤدي إلى تطوير واستخدام الواسمات الجزيئية التي تعجّل عملية الاختيار وتطوير الأصناف النباتية. ومن ثم فإن تكنولوجيات الواسمات الجزيئية المستندة إلى دراسات الارتباطات على كامل مستوى الجينوم، وكذلك التحديد الأكثر تركيزاً للارتباطات الجينية لمسار محدد من مسارات الأليل/الجين السلالة/الجين مع تحليل أداء التنميط المظهري، والتحقق من صحة هذا التحديد واستخدامه، يسهّل تعجيل عملية تحسين السلالات النباتية.

١٧٩- وقد وضعت الوكالة الآن، بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، تسلسل سير عمل للتحديد الفعّال من حيث التكلفة للطفرات المستحثّة التي تسبب أنماطاً ظاهرية معيّنة، وبدأت في نقل هذا التسلسل إلى الدول الأعضاء من خلال الزمالات التدريبية. وتم وضع بروتوكولات للبيولوجيا الجزيئية، ويجري حالياً توفير الموارد الحاسوبية اللازمة لتحليل البيانات. ويسهّل هذا التسلسل لسير العمل نهُج رسم الخرائط الجينية المدعوم بالجيل التالي من تحليل التسلسل الجيني. وكان أحد الإنجازات الرئيسية في عام ٢٠١٨ استخدام معايرة بالواسمات الجزيئية لأول مرة في مختبرات الوكالة، وذلك تحديداً لمعايرة سمة من سمات جودة الشعير كعلف (العُصافة السفلى البرتقالية). وتم تحديد الطفرات المسببة لهذه السمة وتطوير معايرة للواسمات. ويجري الآن اختبار معايرة التنميط الجيني في برنامج لتحسين أنواع الشعير بهدف إدخال سمة العُصافة السفلى البرتقالية في شعير الكلأ الشتوي المقلنس. وتتنبأ المعايرة بالنمط المظهري تنبؤاً صحيحاً، وبالتالي هي مفيدة للانتقاء بمساعدة الواسمات. ويضاف إلى ذلك، تجري دراسة رائدة بشأن الذرة الرفيعة القصيرة القامة المبكرة النضج، تحاول رسم خريطة السمات بتحليل تسلسل الجينوم الكامل لعدة مئات من أفراد مجموعات منعزلة من الذرة الرفيعة، يليه تحليل الأنماط الجينية المتباينة من أجل تحديد المواقع الجينية السببية (الشكلان واو-١ و واو-٢).



الشكل واو-١- نباتات تنمو في حقل في زايبرسدورف بالنمسا (صيف عام ٢٠١٨)؛ وتنعزل القزامة الطفرية بطريقة مندلية. وتوضِّح الصورة إلى اليسار توزيعات طول نباتات النوع البريّ والنوع الطافر والنوع F2.

١٨١- وفي حين أن الاستيلاد الطفري للنباتات المقرون بتكنولوجيا الواسمات الجزيئية هو الهدف النهائي لتعجيل تكيُّف المحاصيل مع تغير المناخ، فإن الاستيلاد الطفري للنباتات القائم بذاته ما زال يُستخدم في تطوير أنواع متكيفة مع الظروف المناخية المناوئة. وقد أطلقت باكستان مؤخراً، من خلال نقل تكنولوجيا الاستيلاد الطفري للنباتات، ثلاثة أصناف طافرة من القطن متكيفة مع الإجهاد الذي ينجم عن درجات الحرارة العالية، تنتج أليافاً ذات غلة وجودة مستدامتين. وتغطي هذه الأصناف الطافرة الآن حوالي ٢٠٪ من المساحة المزروعة بالقطن في باكستان، ومن المتوقع أن ترتفع هذه النسبة إلى ٣٠-٤٠٪ في السنتين إلى السنوات الثلاث القادمة. وبالمثل، شهد المزارعون في زامبيا وزمبابوي في الآونة الأخيرة زيادة بنسبة ١٠-٢٠٪ في غلة اللوبيا الصينية من أصناف طُورت عن طريق الاستيلاد الطفري للنباتات وتتسم بتحمُّل أكبر للجفاف ومقاومة الحشرات.



الشكل-واو-٢- توزيع تعدُّد أشكال الوحدات النووية الأحادية والإنديلات الصغيرة عبر كروموسومات الذرة الرفيعة على النحو الذي تم تحديده في تحليل تسلسل الجينوم الكامل لستة خطوط طافرة.

واو-٢-٢- التصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية لأغراض تحديد الأنماط الظاهرية غير الاقتحامي عالي الإنتاجية للنباتات

١٨٢- من المعترف به أن عدم وجود مرافق لإجراء الفحص غير الاقتحامي للنباتات الكاملة أو للأنسجة النباتية بإنتاجية عالية يشكل أحد أهم العراقيل أمام تحسين المحاصيل حالياً، وتحديداً في مرحلة انتقاء النباتات ذات الأداء الأفضل. وقد أصبح التصوير بالرنين المغناطيسي النووي شائعاً بقدر متزايد لفهم الوظائف الوعائية النباتية، أي وظائف نسيج الخشب ولحائه، والعمليات الهيدروديناميكية ذات الصلة. وتُستخدم الآن أيضاً بصورة روتينية تكنولوجيا نووية ذات صلة، وهي التصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية، للتطبيقات غير الطبية، بما فيها العلوم النباتية، كما أن التقديرات التي تُجرى بالاستفادة من التصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية والتي تتنبأ بالسمات المورفولوجية والتشريحية للنباتات تُستخدم بقدر متزايد في تحديد الأنماط الظاهرية للنباتات. وتشمل الأمثلة على التحليل بالتصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية في علوم النباتات دراسة بقاء النباتات في ظروف الإجهاد المائي؛ وتقييم تحمّل الذباتات للظل والتقاط الأوراق للضوء؛ وتحليل أمراض الجذور؛ وتطوُّر النظام الجذري والتفاعلات بين الجذور. وميزة هذه التقنيات تأتي في المقام الأول من طبيعتها غير الاقتحامية وقدرتها على التحديد الكمي للعمليات الفسيولوجية في الوقت الحقيقي. ويستمر إجراء تحسينات في الأجهزة لالتقاط الصور على كل من المقياسين العياني والمجهري، في حين أن الاستخدام عالي الإنتاجية للتصوير المقطعي الحاسوبي بالأشعة السينية في تزايد تدريجي. ومن شأن استكمال التسلسل الحالي لسير العمل في الدراسات الجينية والجزيئية في مجال الاستيلاد الطفري للنباتات، والبروتوكولات الحالية لتحديد الأنماط الظاهرية، بتقنيات التصوير النووي غير الاقتحامي العالي الإنتاجية، أن يمكِّن من تعجيل مسار الاستيلاد الطفري للنباتات.

واو-٣- التطبيق المبتكر للتكنولوجيات النظيرية والنووية في تغذية الحيوان

١٨٣- بحلول عام ٢٠٥٠، من المتوقع أن يزداد الطلب العالمي على الأغذية ذات المنشأ الحيواني بنسبة ٦٠-٧٠٪.[٢٢] ولتحقيق هذه المهمة الضخمة المتمثلة في زيادة إمدادات الحليب واللحوم والبيض وغيرها من المنتجات الحيوانية الصالحة للأكل زيادة مستدامة، في غضون فترة زمنية محددة، ستحتاج صناعة الثروة الحيوانية إلى تكثيف نظمها الإنتاجية استناداً إلى التكنولوجيا. وسيتعين مضاعفة إمدادات العلف والكلأ وإمكانية الوصول إلى المراعي والأراضي العشبية والأراضي الصالحة للرعي الجيدة من أجل تلبية الطلب المتوقع في مجال تغذية الحيوان. ويزداد الوضع تعقُّداً بالتنافس المتزايد بين الأعلاف والأغذية لتغذية الحيوانات والبشر وبتأثير الإنتاج الحيواني في البيئة.

١٨٤- وفي الوقت الحالي، يُستخدم ما يقرب من ٨٠٠ مليون طن من الحبوب (ثلث إجمالي إنتاج الحبوب) في أعلاف الماشية، ومن المتوقع بحلول عام ٢٠٥٠ أن يُستخدم أكثر من ١,١ مليار طن.[٢٣] وفي عام ٢٠٠٦، قدِّر أن انبعاثات غازات الدفيئة العالمية الناتجة عن عمليات تربية الماشية تبلغ ٧,١ غيغا طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وهو ما يمثل ١٤,٥٪ من مجموع انبعاثات غازات الدفيئة الناشئة من النشاط البشري.[٢٤] وهناك حاجة إلى البحث والتطوير المبتكر، ودمج التقنيات النووية مع التقنيات التقليدية، ليس فقط لتحسين نظم التغذية في المرابط ونظم الرعي الحالية بل أيضاً لتوسيع نطاق مصادر العلف والكلأ ليشمل الأراضي العشبية والصالحة

22 FAO, The future of food and agriculture: Trends and challenges (2017) FAO, Rome http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf

23 Makkar, H. P. S., Review: Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change, Animal 12 (2018) 1744-1754.

24 FAO, Key facts and findings, http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode

للرعي غير المستخدمة، والمنتجات الثانوية الصناعية، ونفايات الأغذية، والإنتاج الضخم للطحالب أحادية الخلية وإنتاج الكلأ بالاستزراع المائي النباتي الحيواني، واستكشاف الأعلاف الحيوانية الأخرى الأقل شهرة وغير التقليدية. وسيساعد ذلك على بناء مجموعة بيانات عالية الجودة وتوفير المعلومات اللازمة للاستفادة منها في اتخاذ القرارات السياسية ولفائدة المستثمرين المحتملين.

١٨٥- وتغطي الأراضي العشبية أكثر من ٤٠٪ من المناطق البرية لكوكب الأرض، باستبعاد غرينلاند وأنتاركتيكا، وإذا استُخدمت هذه الأراضي الاستخدام الأمثل للاستفادة منها كمصدر للأعلاف للثروة الحيوانية فسينتفع منها ملايين المزارعين على نطاق العالم.[٢٥] والحيوانات المجترة هي أهم أنواع الماشية في المناطق المدارية، ويستند إنتاجها بقدر كبير إلى الرعي في المراعي الطبيعية (الشكل واو-٣). ويمكن استخدام التقنيات النووية والنظيرية لبناء قاعدة بيانات بشأن استهلاك الأغذية واختيار النظام الغذائي وتحديد المحتويات الغذائية للأعشاب واستعراض أنواع الأعشاب التي تشكل غذاءً للحيوانات. وهذا مطلوب لاتخاذ مختلف القرارات الإدارية، مثل التحسين الأمثل لتخصيص الكلأ للأنواع المختلفة من الحيوانات، واختيار أنواع النباتات الملائمة لإعادة نثر البذور في المراعي والأراضي الصالحة للرعي المتدهورة، وتصميم استراتيجيات تكميلية مناسبة. ويتيح الاستخدام الكفء للأراضي العشبية إمكانيات لزيادة احتجاز الكربون واستصلاح الأراضي وإنتاجية الثروة الحيوانية.

الشكل واو-٣- التربية المشتركة للأنواع التي ترعى الأعشاب والأنواع التي ترعى أطراف الأشجار هو ممارسة شائعة في الأراضي العشبية الجماعية في زمبابوي

واو-٣-١- استخدام التقنيات النووية لدراسة وتحسين تغذية الحيوانات التي ترعى الأعشاب

١٨٦- تبيَّن أن التكنولوجيات التقليدية المتعلقة بتجارب تغذية الحيوانات في بيئتها الطبيعية، والتحليل المختبري للقابلية للهضم والتحليل الغذائي لمواد التغذية والأعلاف المستخدمة في نظم التغذية في المرابط، ليست فعالة في تقدير تناول الأغذية الطوعي واختيار النظام الغذائي لدى الحيوانات التي ترعى الأعشاب. وتجلب أوجه التقدم الحديثة في تطوير الأدوات والبروتوكولات، من أجل تطبيق مزيج من التقنيات النووية والتقليدية المبتكرة، حلولاً للتحديات يمكن فيها تحليل وتقدير استهلاك الأغذية واختيار النظام الغذائي والقابلية للهضم لدى الحيوانات التي ترعى في مراعٍ غير متجانسة.

25 Suttie, J. M., Reynolds, S. G., Batello, C., Grasslands of the World (2005) Rome, FAO
http://www.fao.org/docrep/008/y8344e/y8344e05.htm

١٨٧- وقد ظلت الوكالة تعمل مع الدول الأعضاء على تطوير أدوات لتغذية الحيوانات من أجل إتاحة الاستخدام المتكامل لنظائر الكربون-١٣ المستقرة لمركَّبات محددة من الـــ ن-ألكانات الطويلة السلسلة، والتنظير الطيفي للأشـــعة تحت الحمراء القريبة، من أجل تقدير اســـتهلاك الأغذية لدى الحيوانات المجترة واختيار النظام الغذائي وتركيبته والقابلية للهضـــم. ويســـاعد ذلك على بلوغ الحد الأمثل لاســـتهلاك المغذيات الحيوانية من خلال تكميل الأعلاف أثناء الرعي، ويمنع الرعي المفرط للمراعي والأراضي العشبية.

واو-٣-٢- الـ ن-ألكانات تساعد على تقدير استهلاك الأغذية وقابليتها للهضم واختيار النظام الغذائي

١٨٨- تحتوي جميع النباتات العليا التي تشـكل غذاءً للحيوانات على طبقة من الشـمع على أسـطحها الخارجية (ن-ألكانات) تختلف اختلافاً كبيراً في الأنواع المختلفة، ويمكن تحليل بياناتها الكمية من أجل التمييز بين الأنواع النباتية التي تشكل غذاءً للحيوانات. ولذلك تُستخدم الـــ ن-ألكانات كواسمات روثية لتقدير قابلية النباتات للهضم، ويُستخدم مزيج من هذه البيانات مع بيانات المخرجات الروثية من أجل حساب استهلاك الحيوانات للعلف. ويمكن أن تنشـأ الـــ ن-ألكانات كواسـمات روثية من النظام الغذائي (الواسـمات الداخلية) أو يمكن أن يتم إعطاؤها عن طريق الفم (الواسمات الخارجية). وعلى الرغم من أن الـــ ن-ألكانات كواسمات روثية يمكن أن تميّز بين العديد من النباتات في النظم الغذائية للحيوانات المجترة فهي لا تستطيع التمييز بين جميع النباتات، لا سيما بين عشرات النباتات الموجودة في المراعي غير المتجانسة. غير أن إثراء نظائر الكربون الموجـودة فـي الـ ن-ألكانات يمكـن أن يميز بدقة بين الأنواع النباتية الموجودة في المراعي غير المتجانســة. وقد أثبت التطبيق المشــترك لتكنولوجيا الـ ن-ألكانات والكربون-١٣ فعاليته العالية في تقدير استهلاك الأغذيـة وتكويـن النظـام الغذائـي والقابليـة للهضـم. ويتم تحليل نظائر الكربون لمركبات محددة (الكربون-١٣/الكربون-١٢) باســـتخدام الفصـــل الكروماتوغرافي الغازي/تنظير الطيف الكتلي بالاحتراق لتحديد نســـب النظائر، بعد تصـــبين النظائر واســـتخلاصـــها وتنقيتها. وبالإضـــافة إلى ذلك، فقد اســـتُخدمت بنجاح تكنولوجيا ابتكارية واعدة قائمة على الليزر، وهي تقنية قياس طيف اضـــمحلال الرنين في التجاويف، في تحديد المحتوى من الكربون-١٣، وهو ما أتاح توفير القياســـات في فترة زمنية أقصر وباستخدام طريقة أبسط في معالجة العينات قبل القياس.

واو-٣-٣- تحليل المغذيات المتبقية في الروث باستخدام التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة يساعد على تقدير المحتويات الغذائية واستهلاك الأغذية الطوعي واختيار النظام الغذائي

١٨٩- يتمثل تحليل التنظير الطيفي للأشـــعة تحت الحمراء القريبة في إضـــاءة عينات من الأعلاف أو الروث بطيف واسع (العديد من الأطوال الموجية أو الترددات) من ضوء الأشعة تحت الحمراء القريبة، التي يمكن للعينة محلّ الاهتمام امتصاصها أو نقلها أو عكسها أو تشتيتها. وعادةً ما تكون الإضاءة في نطاق الطول الموجي ٨٠٠- ٢ ٥٠٠ نانومتر. وتُقاس شـــدة الضـــوء كدالة للطول الموجي قبل وبعد تفاعله مع العينة، وتُحســـب الانعكاســـية الانتشـارية، التي هي مزيج من الامتصـاص والتشـتت تسـببه العينة. ويوفر التنظير الطيفي للأشـعة تحت الحمراء القريبة بيانات نوعية عن البروتين الخام، والمحتويات الليفية، ونســـبة أنواع النباتات ومكوناتها المورفولوجية، واستهلاك الأغذية الطوعي، وقابلية النظام الغذائي للهضم. وقد وفر تحليل التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة انحرافات معيارية أصـــغر بنســـبة ٦٠-٨٥٪ عندما تم تحليل العينات المقسَّـــمة من خلال كل من الكيمياء الرطبة والتنظير الطيفي للأشـعة تحت الحمراء القريبة باسـتخدام تقنيات مزدوجة التعمية. ويشـير ذلك إلى وجود

أخطاء بشرية أقلّ لدى استخدام التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة وإلى أن البيانات تكون أكثر اتساقاً من البيانات المستمدة من التحليل بالكيمياء الرطبة التقليدية.[٢٦]

١٩٠- وقد أصبح التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة تقنية متعددة الاستخدامات لا تحتاج إلى إعداد العينات، وتقلل التكاليف ووقت التحليل، وتتيح القدرة على مسح العينات عبر الزجاج ومواد التعبئة والتغليف.

واو-٣-٤- تألق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة يحدد المحتوى المعدني في الكلأ بدقة

١٩١- تشكل أنواع الكلأ الجزء الأكبر من النظم الغذائية للحيوانات المجترة؛ غير أن تركيز المعادن فيها يتباين تبايناً كبيراً، ما يؤثر في أداء الحيوانات وصحتها. وتقنية تألُّق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة (EDXRF) هي تقنية مطيافية متعددة المعادن وغير متلِفة تجعل تحليل المعادن وتقديرها بسيطاً ومباشراً ومتسقاً. وتنطوي هذه التقنية على مسح عينات العلف المجفف المطحون المستمدة من مجموعة واسعة من النباتات الطازجة أو القش أو العلف الأخضر المطمور، عند ٢٠-٤٠ كيلو إلكترون فلط، مقترناً بالتصفية بمصفاة من الألمنيوم والمعايرة باستخدام البرامج الحاسوبية المناسبة، وعلى سبيل المثال برنامج Bruker SpectraEDX (من شركة بروكر، هامبورغ، ألمانيا).[٢٧] وعند تحديد تركيز المعادن الشائعة في حصص أغذية المجترات (الصوديوم والمغنيسيوم والفوسفور والكبريت والكلور والكالسيوم والبوتاسيوم والمنغنيز والحديد والنحاس والزنك)، تراوَح معامل التحديد بين ٠,٩٣ و ٠,٩٩، بينما كان معامل التباين ضمن نطاق مقبول (٥-١٤٪). ويمكن استخدام تألُّق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة في الحقل في مختلف نظم الإنتاج الحيواني لتحديد تركيز المعادن. وتوفِّر البيانات التي يتم جمعها الأساس لتكميل الأغذية بالمعادن من أجل تعزيز صحة الحيوانات وإنتاجيتها.

١٩٢- والتغذية هي السبيل للإنتاج الحيواني المربح والمستدام. وهي تؤثر على نمو الحيوان وصحته ورفاهه وإنتاجيته وجودة منتجاته، وتمثل أكثر من ٧٠٪ من تكلفة أي عملية للثروة الحيوانية. ولا تتأثر التغذية بتوافر الموارد وحسب بل لها أيضاً تأثير مباشر على قاعدة الموارد (المراعي والأراضي العشبية والبيئة). وتتطلب تلبية الطلب الدائم التزايد على الأغذية ذات الأصل الحيواني تحسين إنتاجية الثروة الحيوانية والحد من آثارها على البيئة. ولتحقيق ذلك، يمكن لجميع التقنيات الثلاث المذكورة أعلاه، عند التحقق من صلاحيتها وتطبيقها معاً، أن توفر إجابة كاملة بشأن العناصر الغذائية المتوفرة في الأعلاف والكلأ، وإمكانية الوصول إليها، واستساغة الحيوانات لها، وقابليتها للهضم، بغية دعم المغذيات وتحويل الطاقة من أجل تحسين النمو والصحة والأداء. وتحدِّد تقنيات الكربون-١٣ والنـ-ألكانات النباتات التي استُهلكت والكميات المستهلَكة منها، وتحدِّد تقنيات تألُّق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة التركيبة المعدنية للنظام الغذائي، ويقدِّر التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة تركيبات المغذيات المتبقية في روث الحيوانات. وحالياً تُستخدم تكنولوجيا التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة للحيوانات التي تغذَّى في المرابط، لتقدير كمية الأغذية المستهلَكة وتركيبة النظام الغذائي والمحتويات الغذائية. وبالنسبة للحيوانات الرعوية، يمكن استخدام تقنية الكربون-١٣ وتقنية تألُّق الأشعة السينية المشتّتة للطاقة، مقترنة بالتنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة، ويمكن للتقنيات الثلاث مجتمعة معاً إعطاء

---

26 De Ondarza, M. B., Ward, R., Accurate analysis: NIRS versus wet chemistry, Hoards Dairyman (February 2013) 129, http://www.foragelab.com/Media/Accurate%20analysis%20NIRS%20versus%20wet%20chemistry.pdf

27 Berzaghi, P., Lotto, A., Mancinelli, M., Benozzo, F., Technical note: Rapid mineral determination in forages by X-ray fluorescence, Journal of Dairy Science 101 (2018) 9967-9970.

تقدير شامل للمغذيات الموجودة في الأعلاف واستهلاك الأعلاف وتركيبة النظام الغذائي (الشكل واو-٤). وعلاوة على ذلك فتقنية التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة وتقنية تألُّق الأشعة السينية المشتِّتة للطاقة كلتاهما متنقلتان، وتتطلبان القليل من الصيانة، ومعدلات الأخطاء البشرية فيهما منخفضة مقارنة بالكيمياء الرطبة، ولا تتطلبان أي إعداد للعينات. وستتضمن التطورات المستقبلية نهجاً متكاملاً يجمع بين هذه التقنيات الثلاث من أجل تحديد جودة الأغذية المستهلَكة وكميتها.

الشكل واو-٤- يوفر التحقق من تكنولوجيا التنظير الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة بواسطة الـ ن-ألكانات وبيانات نظائر الكربون المستقرة عن تلك الـ ن-ألكانات في الخوارزمية الرياضية وإدماج تقنية تألُّق الأشعة السينية المشتِّتة للطاقة لتحليل المعادن حلاً متنقلاً كاملاً لتحليل العلف والكلأ وتقييم تغذية الحيوان.

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

www.iaea.org

International Atomic Energy Agency
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

GC(63)/INF/2

19-02858A