IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام

المؤتمـــر العـــام

GC(57)/INF/2
٣٠ تموز/يوليه ٢٠١٣

توزيع عام
عربي
الأصل: انكليزي

الدورة العادية السابعة والخمسون

البند ١٨ من جدول الأعمال المؤقت
(الوثيقة GC(57)/1 وإضافتها Add.1)

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٣

تقرير من المدير العام

ملخص

- تلبية لطلبات الدول الأعضاء، تصدر الأمانة كل عام استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية. ويرد مرفقاً بهذه الوثيقة التقرير الخاص بالعام الجاري، والذي يسلّط الضوء على التطورات البارزة التي شهدها عام ٢٠١٢.

- *ويتناول استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٣ المجالات* التالية: تطبيقات القوى، والبيانات الذرية والنووية، والمعجلات ومفاعلات البحوث، والعلوم والتطبيقات النووية. وثمة وثائق إضافية مرتبطة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٣* متاحة باللغة الانكليزية فقط على موقع الوكالة الإلكتروني،[١] وهي تتناول تكنولوجيا إنتاج الهيدروجين نوويًا والدروس الأولية المستخلصة من حادث فوكوشيما داييتشي النووي لأغراض تطوير تكنولوجيا متقدمة لمحطات القوى النووية.

- ويمكن الاطلاع أيضاً على معلومات عن أنشطة الوكالة المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية في التقرير السنوي لعام ٢٠١٢ (الوثيقة GC(57)/3)، خاصة في القسم الذي يتناول "التكنولوجيا"، وفي تقرير التعاون التقني لعام ٢٠١٢ (الوثيقة GC(57)/INF/4)؛ الصادرين عن الوكالة.

- وقد تم تعديل الوثيقة بحيث تراعى، قدر المستطاع، تعليقات معينة أدلى بها مجلس المحافظين وتعليقات أخرى وردت من الدول الأعضاء.

[١] http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC57/Agenda/index.html

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٣

تقرير من المدير العام

موجز جامع

١- زادت قدرة توليد القوى النووية في العالم إلى ٣٧٢,١ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠١٢، مع وجود ٤٣٧ مفاعلاً قيد التشغيل في نهاية السنة. وتم توصيل ثلاثة مفاعلات جديدة بالشبكة، وأعيد تشغيل مفاعلين كانا في حالة 'إغلاق طويل الأجل'. وتم إغلاق ٣ مفاعلات فقط بشكل دائم في عام ٢٠١٢ بالمقارنة مع ١٣ مفاعلاً في عام ٢٠١١. وكان هناك سبعة وستون مفاعلاً جديداً تحت الإنشاء في نهاية العام، وهو رقم لا يزال مرتفعاً إلى حد بعيد. ومن المتصوّر أن يحدث نمو كبير في استخدام الطاقة النووية في جميع أنحاء العالم – تتراوح نسبته بين ٢٣٪ و١٠٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠ – على الرغم من أن توقعات الوكالة لعام ٢٠٣٠ أقل بما يتراوح بين١-٩٪ من التوقعات التي قُدّمت في عام ٢٠١١. ويُتوقّع أن يكون معظم النمو في بلدان لديها بالفعل محطات قوى نووية عاملة، وخاصةً في الشرق الأقصى حيث النمو المتوقع هو الأشدّ.

٢- ورغم أن بعض البلدان أجّلت القرارات المتعلقة بالشروع في برامج للقوى النووية، فإن بلداناً أخرى واصلت خططها للأخذ بالطاقة النووية. ففي تموز/يوليه ٢٠١٢، أصبحت دولة الإمارات العربية المتحدة أول بلد منذ ٢٧ عاماً يبدأ في تشييد أول محطة للقوى النووية. وبالإضافة إلى دولة الإمارات العربية المتحدة، أحرزت بلدان أخرى عديدة، بما فيها بيلاروس وتركيا، تقدماً نحو إقامة محطتها الأولى للقوى النووية في عام ٢٠١٢.

٣- ووفقاً لطبعة عام ٢٠١١ من 'الكتاب الأحمر'، بعنوان *اليورانيوم في عام ٢٠١١: موارده وإنتاجه والطلب عليه*، التي تصدرها منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي بالاشتراك مع وكالة الطاقة النووية والوكالة الدولية للطاقة الذرية، انخفضت تقديرات موارد اليورانيوم التقليدية المحدّدة القابلة للاستخلاص بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم انخفاضاً طفيفاً مقارنةً بالطبعة السابقة، حيث ارتفع إنتاج اليورانيوم في جميع أنحاء العالم بشكل جوهري، وذلك إلى حد كبير نتيجةً لزيادة الإنتاج في كازاخستان. وطوال عام ٢٠١١، أُبلِغ عن موارد جديدة فيما يخص كثيراً من مستودعات اليورانيوم في أفريقيا. وبحلول النصف الثاني من عام ٢٠١٢ انخفضت أسعار البيع الفوري لليورانيوم، التي كانت قد وصلت في نهاية عام ٢٠١١ إلى ١٣٥ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم، لتبلغ حوالي ١١٠ دولارات للكيلوغرام من اليورانيوم. وفي نهاية عام ٢٠١٢، ارتفعت أسعار البيع الفوري لليورانيوم إلى حوالي ١١٥ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم. ومع ذلك، ظلت أسعار اليورانيوم في الأجل الطويل ثابتة عند حوالي ١٥٨ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم.

٤- وتمت الاستعاضة عن محطة جورج بيس للإثراء بالانتشار في فرنسا، التي أُقفِلت في حزيران/يونيه ٢٠١٢، بمحطة جورج بيس الثانية. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٢، أصدرت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة أول رخصة من نوعها لتشييد وتشغيل مرفق للإثراء بالليزر على نطاق كامل لصالح الشركة العالمية للإثراء بالليزر، وهي إحدى الشركات التابعة لمؤسسة جي-هيتاشي للطاقة النووية.

٥- وفي تموز/يوليه ٢٠١٢، انتهى المعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية من تشييد المرفق الإيضاحي للمعالجة الحرارية الخاملة المتكاملة لأغراض المعالجة الحرارية لوقود الأكسيد المستهلك. وتم الشروع في اختبارات بدء التشغيل في شهر آب/أغسطس.

٦- وفي مجال التصرف في النفايات المشعة، يجري في كندا النظر في تطوير ثلاثة مرافق للتخلص الجيولوجي وهي: المرفق الكائن في موقع بروس للنفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع الناتجة عن شركة أونتاريو لتوليد القوى، وموقع مختبرات تشوك ريفر الجاري دراسته فيما يخص النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع، وموقع ثالث، غير محدّد حتى الآن، خاص بمستودع الوقود النووي المستعمَل ومركز الخبرة الكندي. وفي إسبانيا، تم اختيار موقع فيللار دي كانياس رسمياً في شهر كانون الأول/ديسمبر كموقع للتخزين المركزي للوقود النووي المستعمَل في إسبانيا. وفي شهر كانون الأول/ديسمبر أيضاً، قدّمت شركة بوزيفا في فنلندا طلباً إلى الحكومة الفنلندية للحصول على ترخيص بتشييد مستودع داخل مرفق التخلص من الوقود المستهلك التابع لها في أولكيلووتو، ومن المتوقع أن تبدأ عمليات التخلص النهائي في عام ٢٠٢٠.

٧- وفي عام ٢٠١٢ بدأت في الأردن الأعمال الإنشائية المتعلقة بمفاعل بحوث جديد، وهو مفاعل بحوث متعدد الأغراض تبلغ قدرته ٥ ميغاواط. وحتى كانون الثاني/يناير ٢٠١٣، كان هناك ٢٤٧ مفاعل بحوث قيد التشغيل. وواصلت الوكالة دعم الجهود العالمية لتقليص استخدام وقود اليورانيوم الشديد الاثراء إلى أقصى حد في مفاعلات البحوث. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٢، تم تحويل مفاعل ماريا للبحوث في بولندا من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وتم تحويل مفاعل البحوث TRIGA MARK III في المكسيك من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُعيدَ وقود اليورانيوم الشديد الإثراء النهائي الناتج عن المفاعل إلى الولايات المتحدة الأمريكية في آذار/مارس ٢٠١٢. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، كانت هناك إزالة نهائية لجميع كميات اليورانيوم الشديد الإثراء من النمسا بعد تحقيق تحويل كامل لمفاعل تريغا في فيينا إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وكُلِّلت الجهود التي بُذِلت في النمسا والمكسيك بإزالة كل وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم في مفاعل تريغا من التطبيقات النووية المدنية الدولية في كل أنحاء العالم. وفي عام ٢٠١٢، في إطار برنامج إعادة وقود مفاعل البحوث الروسي، ساعدت الوكالة في إعادة ما يقرب من ١١٠ كيلوغرامات من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج إلى بلد المنشأ من معهد خاركوف للفيزياء والتكنولوجيا بأوكرانيا، وما يقرب من ٢٠ كيلوغراماً من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلك من معهد البحوث النووية في كييف، بالإضافة إلى ما يقرب من ١٠٠ كيلوغرام من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلك من أوزبكستان وبولندا و٢٧ كيلوغراماً من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج من بولندا.

٨- وتعكس التطبيقات النووية التي يتناولها *استعراض التكنولوجيا النووية* هذا ثلاثة مجالات ذات أهمية من حيث الموضوع والدلالة وهي: استخدام التكنولوجيات النووية لتحسين سلامة الأغذية وأمنها، والتطورات الجديدة في مجال مكافحة السرطان، وتسخير التكنولوجيات النووية من أجل التصدّي لتبعات تغيّر المناخ.

٩- ويتم تعزيز سلامة الأغذية وأمنها من خلال تشعيع الأغذية، الذي ينطوي على تعريض الغذاء للإشعاع المؤيِّن في ظل ظروف محكومة بضوابط. وعادةً ما تُستخدَم نظائر الكوبالت-٦٠ أو السيزيوم-١٣٧ المشعة في مرافق التشعيع لتوفير أشعة غاما. ومع ذلك، تتجلى صعوبة المحاولات الرامية إلى زيادة معدلات تطبيق تشعيع الأغذية باستخدام هذه النظائر المشعة بسبب التعقيدات التي تكتنف تدبير مصادر النظائر المشعة وشحنها

واستلامها. ونتيجةً لذلك، يتزايد الاهتمام بتكنولوجيا الحزم الإلكترونية والأشعة السينية، حيث تُستخدَم الكهرباء لإنتاج الإشعاع المؤيِّن. وتتيح هذه التكنولوجيات إمكانية التوسع بدرجة هائلة في تطبيق تشعيع الأغذية لتعزيز سلامة الغذاء، كما تساعد على زيادة الإمدادات الغذائية العالمية من خلال الحدّ من فواقد ونفايات الأغذية.

١٠- وتمثّل سلامة الأغذية مصدراً خطيراً للقلق عقب انبعاث نشاط إشعاعي جرّاء وقوع حادث نووي. وتُستخدَم التقنيات النووية فيما يجري تطويره من ممارسات ميدانية ومختبرية منسّقة، بحيث يمكن للسلطات الزراعية أن تقيِّم سلامة الأغذية على نحو فعال ومتّسق في أقرب وقت ممكن بعد أي حدث نووي. وقد أظهرت الدروس المستفادة من الحوادث أن الإبلاغ وإدارة البيانات في مجال الأغذية والزراعة بحاجة إلى تحسين، خاصةً حيثما تتعدّد البلدان المتضرّرة ويلزم اتّباع نهج منسّق.

١١- ويمثّل العلاج الإشعاعي، الذي يهدف إلى تسليط جرعة دقيقة من الإشعاع على الورم بأقل ضرر للأنسجة السويّة المحيطة به، إحدى الطرق الفعالة لمعالجة السرطان. وتتيح التطورات الحديثة في مجال العلاج الإشعاعي القائم على الفوتونات مزايا جوهرية يُحتمَل أن تفوق مزايا العلاج الإشعاعي التقليدي، بما في ذلك تحسين تَوَزُّع الجرعات، وخفض السُمِّيّة، وسرعة تقديم العلاج، وإحكام السيطرة الموضعية بدرجة أدقّ، وتؤدي هذه المزايا مجتمعةً إلى زيادة فرص البقاء على قيد الحياة. وقد شهد العقدان الماضيان زيادة في الاهتمام بالعلاج بالجسيمات وحدث تطوير لهذا المجال، ولا سيما العلاج بحزم البروتونات والعلاج بحزم أيونات الكربون. كما حدث مزيد من التطوير في مجال استخدام التشعيع الداخلي الثلاثي الأبعاد، حيث يتم العلاج الإشعاعي من خلال وضع مصادر مشعة بالقرب من الأورام أو تجاويف الجسم أو في داخلها. وينطوي استخدام هذه التكنولوجيات المتقدمة على تكاليف باهظة إضافية، وهو ما يجب مضاهاته بالفوائد المحتملة لهذه التكنولوجيات قياساً على الطرق التقليدية.

١٢- ويُشار إلى تحوير المادة على المستوى الذري والجزيئي لاستنباط مواد وأجهزة وهياكل جديدة باسم التكنولوجيا النانوية. ويعدّ مجال الطب أحد التطورات المثيرة للاهتمام في هذا الصدد. فثمة خصائص معيّنة لبعض الهياكل النانوية يمكن أن تساعد على مكافحة السرطان باستخدام نُهُج غير مسبوقة. ونتج عن ذلك ظهور مجال جديد هو الطب النانوي، الذي يعرَّف بأنه التطبيق الطبي للتكنولوجيا النانوية. ففي إطار استهداف الخلايا السرطانية، يمكن أن تعمل أنظمة مخصّصة نانومترية الحجم كوسائل لإيصال العقاقير القادرة على نقل جرعات كبيرة من النويدات المشعة إلى داخل الخلايا الخبيثة، مع تجنّب الأنسجة السويّة وبالتالي الحدّ بصورة كبيرة من التأثيرات الجانبية التي عادةً ما تصاحب العديد من علاجات السرطان الحالية.

١٣- وتضطلع التقنيات النووية بدور مهم في فهم تغيّر المناخ والتنبؤ بمساره في المستقبل والتكيّف مع تبعاته. ففي البيئة البحرية، تؤثّر تبعات تغيّر المناخ مثل تحمُّض المحيطات على مصائد الأسماك وتربية الأحياء المائية الساحلية والشعاب المرجانية وغيرها من الموارد الساحلية. وتقدّم التكنولوجيات النووية إجابات لبعض الأسئلة في مجال العلوم الأساسية حول التفاعل بين الظروف البيئية في النظم الإيكولوجية المحيطية والبحرية من جهة، والكائنات الحية من جهة أخرى. فقد ساعد استخدام كلٍّ من النويدات المشعة والنظائر المستقرة على توفير فهم أفضل لحدوث ظاهرة إلنينيو للتذبذب الجنوبي على مدى فترة ممتدّة لعدة آلاف من الأعوام. كما يجري استخدام التقنيات النووية لدراسة تبعات تحمُّض المحيطات على النظم الإيكولوجية البحرية والتنوع البيولوجي.

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، كان هناك ٤٣٧ مفاعلاً من مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل في جميع أنحاء العالم، بقدرة إجمالية تبلغ ٣٧٢,١ غيغاواط(كهربائي)[٢] (أنظر الجدول ألف-١). ويمثّل ذلك زيادة طفيفة تقدّر بنحو ٣,٧ غيغاواط(كهربائي) في إجمالي الطاقة الإنتاجية، مقارنةً بأرقام عام ٢٠١١. وكانت هناك ثلاث حالات ربط جديدة بالشبكة وهي: نينغدي-١ (١٠٠٠ ميغاواط(كهربائي)) في الصين، وشين-وولسونغ-١ (٩٦٠ ميغاواط(كهربائي))، وشين-كوري-٢ (٩٦٠ ميغاواط(كهربائي)) في جمهورية كوريا. وبالإضافة إلى ذلك، أعيد في كندا توصيل وحدتين كان قد تم إخراجهما من الخدمة الفعلية، وهما بروس ١ وبروس ٢ (٧٧٢ ميغاواط(كهربائي) لكلٍّ منهما).

٢- ولا يزال تأثير الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية محسوساً في عام ٢٠١٢، في صورة انخفاض نسبي لإجمالي عدد حالات البدء في العمليات الإنشائية المتعلقة بمفاعلات جديدة. فقد شهد عام ٢٠١٢ البدء في سبع عمليات إنشائية على النحو التالي: فوكينغ-٤ وشيداووان-١ وتيانوان-٣ ويانغجيانغ-٤ في الصين، وشين-أولتشين-١ في جمهورية كوريا، وبالتييسك-١ في الاتحاد الروسي، وبراكة-١ في دولة الإمارات العربية المتحدة (الشكل ألف-١). وعلى الرغم من أن هذا الرقم أعلى من الرقم الخاص بعام ٢٠١١، فهو أقل بكثير مما كان عليه في عام ٢٠١٠، عندما وصلت الزيادة المطّردة منذ عام ٢٠٠٣ إلى ذروتها مع البدء في ١٦ عملية إنشائية.

الشكل ألف-١ - العمليات الإنشائية في محطة براكة-١ بدولة الإمارات العربية المتحدة (الصورة: مؤسسة الإمارات للطاقة النووية).

٣- ومن ناحية أخرى، فإن عدد المفاعلات التي تم الإعلان رسمياً عن إغلاقها بشكل دائم في عام ٢٠١٢ لم يتجاوز ثلاثة مفاعلات وهي: غينتيللي-٢ في كندا، وأولدبيري-ألف-١ وويلفا-٢ في المملكة المتحدة. وهي تعمل منذ ٣٠ عاماً و٤٥ عاماً و٤١ عاماً على التوالي. وهذا الرقم أقل بكثير من حالات الإغلاق البالغة ١٣ حالة في عام ٢٠١١.

٤- وحتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، كان هناك ٦٧ مفاعلاً تحت الإنشاء، وهو رقم لا يزال مرتفعاً إلى حد كبير (الشكل ألف-٢). وكما هو الحال في السنوات الماضية، ما زالت حالات التوسّع وكذلك احتمالات

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

النمو في الأجلين القريب والطويل تتركّز في آسيا (يُرجى الرجوع إلى الجدول ألف-١)، ولا سيما في الصين. ومن أصل العدد الإجمالي للمفاعلات تحت الإنشاء، هناك ما لا يقل عن ٤٧ مفاعلاً في آسيا، وكذلك ٣٨ مفاعلاً من أصل المفاعلات الجديدة البالغ عددها ٤٨ التي رُبطت أخيراً بالشبكة.

الشكل ألف-٢ - العمليات الإنشائية في محطة شين كوري-٣ بجمهورية كوريا.

٥- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ولأول مرة في الثلاثين سنة الماضية، صدرت تراخيص في عام ٢٠١٢ لتشييد وتشغيل أربع وحدات من AP1000 في المحطتين النوويتين Vogtle وV.C. Summer.

٦- وهناك اهتمام مستمر في جميع أنحاء العالم بتشغيل المحطات القائمة على المدى الطويل. ففي أيار/مايو ٢٠١٢، نظّمت الوكالة المؤتمر الدولي الثالث المعني بإدارة عمر محطات القوى النووية في مدينة سولت ليك سيتي بولاية يوتاه في الولايات المتحدة الأمريكية، برعاية وزارة الطاقة الأمريكية والهيئة الرقابية النووية الأمريكية. وقد حضر المؤتمر أكثر من ٣٥٠ مشاركاً يمثّلون ٣٨ دولة عضواً و٣ منظمات دولية، وناقشوا تأثير حادث فوكوشيما دايتشي على إدارة عمر محطات القوى النووية وتشغيلها في الأجل الطويل.

٧- وفي عام ٢٠١٢، تَواصَلَ في العديد من البلدان الاتجاه إلى رفع معدّلات القوى وإلى تجديد أو تمديد التراخيص للمفاعلات العاملة. ففي فرنسا، أصدرت الهيئة الفرنسية للأمان النووي تجديداً مدته عشر سنوات للترخيص بتشغيل الوحدة ٢ في محطة بيجيه للقوى النووية بعد ثلاثين سنة، وهي الوحدة الفرنسية الثالثة التي تحصل على مثل هذا الإذن. وفي المملكة المتحدة، مُنِحت الهيئة المعنية بإخراج المنشآت النووية من الخدمة إذناً بمواصلة تشغيل المفاعل ويلفا-١ حتى أيلول/سبتمبر ٢٠١٤ عن طريق تحويل الوقود المستعمَل جزئياً من الوحدة ٢. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، جدّدت الهيئة الرقابية النووية الأمريكية تراخيص تشغيل الوحدات الكائنة في محطتي بيلغريم وكولومبيا للقوى النووية لمدة عشرين سنة إضافية، وبذلك وصل العدد الإجمالي لحالات تجديد التراخيص المعتمدة في البلد إلى ٧٣ تجديداً منذ عام ٢٠٠٠. وبالإضافة إلى ذلك، كان هناك ثلاثة عشر طلباً قيد الاستعراض لتجديد التراخيص. وعلاوةً على ذلك، وافقت الهيئة الرقابية النووية الأمريكية في عام ٢٠١٢ على ستة طلبات لرفع معدّلات القوى، وكان هناك ١٦ طلباً لرفع معدّلات القوى قيد الاستعراض أيضاً.

٨- وقد تم مؤقتاً على الأقل إغلاق مفاعلين بسبب تبعات تَهالُك المفاعلات وأثناء قطع التيار الكهربائي طبقاً للجدول الزمني المقرّر في مفاعل دويل-٣ في بلجيكا، أُجرِيت عمليات تفتيش أثناء الخدمة باستخدام الموجات فوق الصوتية للتأكّد من عدم وجود تشقّق تحت الكسوة في وعاء الضغط الخاص بالمفاعل ولم يكتشف المفتشون أي عيوب تحت الكسوة، لكنهم وجدوا بالفعل عدداً كبيراً من المؤشرات على حدوث تصدّعات شبه متوازية في أغلفة قلب المفاعل السفلية والعلوية أساساً. وأظهر تفتيش مماثل في شهر أيلول/سبتمبر في مفاعل تيهانج-٢ وجود مؤشرات مشابهة ولكن إلى حد أقل. ونتيجةً لذلك، ظل مفاعلا دويل-٣ وتيهانج-٢ في حالة إغلاق على

البارد في نهاية العام، بينما قام المرفق بإجراء تقييم هندسي لتحديد ما إذا كان يمكن إعادة أيٍّ منهما إلى الخدمة على نحو مأمون.

٩- وفي بلجيكا، نظراً لوجود عدد كبير بشكل غير عادي من المؤشرات التي اكتُشِفت في مفاعلي دويل-٣ وتيهانج-٢، حشدت الوكالة الاتحادية للرقابة النووية مجموعة من الخبراء الدوليين المتخصصين في مجالات تكنولوجيا أوعية المفاعلات، والاختبارات غير المتلفة، وميكانيكا التشقّقات، والتقييم باستخدام القسم الحادي عشر من مدونة الجمعية الأمريكية للمهندسين الميكانيكيين، والتقييم القطعي للأمان، والتقييم الاحتمالي للأمان.

١٠- وفي اليابان، أعيد تشغيل الوحدتين أوهي ٣ و٤ في تموز/يوليه ٢٠١٢، فأصبحتا أول وحدتين تعودان إلى الخدمة عقب حادث فوكوشيما دايتشي في آذار/مارس ٢٠١١. وعلى مدار العام، دارت مناقشات حول مستقبل القوى النووية في اليابان. وبعد فوز الحزب الديمقراطي الليبرالي في الانتخابات الوطنية في شهر كانون الأول/ديسمبر، أعلن رئيس الوزراء الجديد، شينزو آبي، أن الحكومة ستتولى مراجعة مزيج مصادر الطاقة الوطنية في السنوات المقبلة وستعيد النظر في سياسة الطاقة النووية التي كانت قد أُعلِنت من قِبَل الحكومة السابقة.

١١- ولا تزال القوى النووية تمثل أحد الخيارات المهمة لزيادة إنتاج الكهرباء فيما يخص البلدان ذات الاحتياجات المتزايدة من الطاقة، وقد اتُّخِذت خطوات مهمة بهذا الشأن في عام ٢٠١٢ من قِبَل البلدان التي تخطط للأخذ بالقوى النووية. ففي ١٨ تموز/يوليه ٢٠١٢، أصبحت دولة الإمارات العربية المتحدة أول بلد منذ ٢٧ عاماً يبدأ في تشييد محطة أولى للقوى النووية، وذلك عندما قامت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية بصبّ أول خرسانة بعد حصولها على ترخيص البناء من الهيئة الاتحادية للرقابة النووية. ومن المقرر أن تكون الوحدة براكة-١ قيد التشغيل في عام ٢٠١٧، ويجري التخطيط لإقامة ثلاث وحدات إضافية في عام ٢٠٢٠.

١٢- وفي عام ٢٠١٢ اتّخذت عدة بلدان أخرى خطوات عملية نحو تشييد أولى محطاتها للقوى النووية. ففي حزيران/يونيه ٢٠١٢، استضافت بيلاروس بعثة في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية، خلصت إلى أن بيلاروس في طريقها إلى أن تصبح مهيّأة تماماً لتدشين برنامج للقوى النووية. وفي تموز/يوليه ٢٠١٢ وقّع هذا البلد على عقد مع شركة أتومسترويكسبورت في الاتحاد الروسي للقيام بأعمال الموقع وبناء وحدتين من مفاعلات القوى المبرّدة والمهدّأة بالماء. وتمضي تركيا قُدُماً في برنامجها كذلك، بعد أن وقّعت على عقد في عام ٢٠١٠ لبناء أربع وحدات WWER 1200 في موقع أكويو. كما أعلنت تركيا خلال المؤتمر العام في عام ٢٠١٢ أنها تخطط لبناء محطة ثانية للقوى النووية في موقع ساينوب، وأنها بصدد التفاوض مع المورّدين. وقد أكّدت بلدان أخرى أيضاً عزمها على المضيّ في تطوير برنامج وطني للقوى النووية؛ وواصلت هذه البلدان إقامة البنى التحتية وهي بصدد النظر في الترتيبات التعاقدية الممكنة. وهناك بضع دول أعضاء أخرى تعكف بنشاط على إعداد برنامج للقوى النووية، ولكنها لم تتّخذ قراراً نهائياً بشأن المضيّ في تنفيذه.

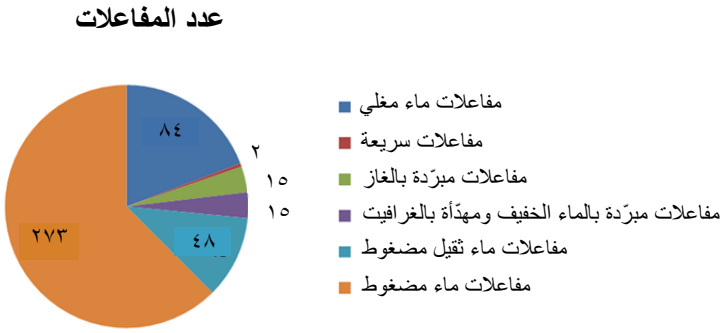
١٣- وبالإضافة إلى بيلاروس، أُوفِدت في عام ٢٠١٢ بعثتان أخريان في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية، إحداهما إلى الأردن والأخرى إلى فييت نام. وكانت بعثة الخدمة المذكورة إلى الأردن، التي أُجرِيت في شهر كانون الثاني/يناير، بعثة متابعة لاستعراض خطة العمل الخاصة بالبلد، التي وُضِعت استجابةً لتوصيات من البعثة الأولى لهذه الخدمة التي أُجرِيت في آب/أغسطس ٢٠٠٩. وقد أشير إلى أنه تم إحراز تقدم في الأردن منذ عام ٢٠٠٩، وخاصةً في الأنشطة المتعلقة بمشروع محطة القوى النووية. كما أُجرِيت بنجاح بعثة الخدمة ذاتها إلى فييت نام في شهر كانون الأول/ديسمبر.

١٤- وتمثّل بعثات الوكالة في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية جزءاً من حزمة شاملة لدعم تنمية الطاقة المستدامة. وبالإضافة إلى بعثات تلك الخدمة، تساعد الوكالة الدول الأعضاء المهتمة على زيادة قدراتها في مجال تحليل وتخطيط نظمها الوطنية للطاقة. وفيما يخص الدول التي لديها برامج سارية أو مزمعة للقوى النووية، فإن الوكالة تُعاوِنُها في تعزيز قدراتها على التخطيط الاستراتيجي الطويل الأجل لنظم

الطاقة النووية الخاصة بها. ففي عام ٢٠١٢، استُخدِمت أدوات الوكالة لتحليل وتخطيط نظم الطاقة الوطنية في أكثر من ١٢٥ دولة من الدول الأعضاء. وتم تدريب أكثر من ٦٥٠ من المحلّلين والمخطّطين في مجال الطاقة من ٦٩ بلداً على استخدام هذه الأدوات. أما فيما يتعلق بالتخطيط الاستراتيجي الطويل الأجل لنظم الطاقة النووية، فإن مشروع الوكالة الدولي المعني بالمفاعلات النووية الابتكارية ودورات الوقود الابتكارية يوفر منهجية وأدوات أخرى، إلى جانب التدريب والمساعدة في إجراء تقييمات لنظم الطاقة النووية. وخلال الفترة ٢٠١١-٢٠١٢، استمرّت تقييمات نظم الطاقة النووية أو بدأ إجراؤها في بيلاروس وإندونيسيا وكازاخستان وأوكرانيا.

١٥- وتعزّز الوكالة مساعداتها في مجال التدريب من خلال التعاون مع المراكز الوطنية في جميع أنحاء العالم. ففي شهر تموز/يوليه، وقّعت على ترتيب عملي مع المدرسة الدولية للدراسات النووية العليا التابعة لشركة كوريا للقوى الكهربائية. وتتمثّل مهمة المدرسة المذكورة في تيسير إمكانية وصول الطلاب والموظفين الأجانب إلى النظام الكوري للتعليم والتدريب في مجال الاستخدامات السلمية للطاقة النووية. ويرسي هذا الترتيب العملي حجر الأساس للتعاون بشأن استقدام الطلبة ووضع المناهج وعقد الحلقات الدراسية وتفعيل برامج التوعية على الصعيد الدولي. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١، وقّعت الوكالة على ترتيب عملي مع هيئة الطاقة الذرية الصينية بشأن التعاون في مجال التشييد المأمون لمحطات القوى النووية. وينصّ هذا الترتيب على توطيد أواصر التعاون بين الوكالة والمركز الدولي الصيني للتدريب الإنشائي من أجل ضمان التشييد المأمون لمحطات القوى النووية الجديدة.

١٦- ومن بين المفاعلات التجارية قيد التشغيل، هناك حوالي ٨٢٪ من المفاعلات المهدّأة والمبرّدة بالماء الخفيف؛ و١١٪ من المفاعلات المهدّأة بالماء الثقيل والمبرّدة بالماء الثقيل؛ و٣٪ من المفاعلات المبرّدة بالغاز، و٣٪ من المفاعلات المبرّدة بالماء والمهدأة بالغرافيت (الشكل ألف-٣). كما يوجد اثنان من المفاعلات المهدّأة والمبرّدة بالمعدن السائل.



الشكل ألف-٣- التوزيع الحالي لأنواع المفاعلات: (BWR: مفاعل ماء مغلي؛ FR: مفاعل سريع؛ GCR: مفاعل مبرّد بالغاز؛ LWGR: مفاعل مبرّد بالماء الخفيف ومهدّأ بالغرافيت؛ PHWR: مفاعل ماء ثقيل مضغوط؛ PWR: مفاعل ماء مضغوط).

١٧- وعلى الرغم من أن الصناعة النووية قد سعت على مدار تاريخها إلى تحقيق وفورات الحجم، فإن هناك اهتماماً متزايداً بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، ويرجع ذلك جزئياً إلى أنها تسمح باستثمارات أصغر وأكثر مرونة وتدريجية مع مرور الوقت. والمفاعلات "الصغيرة" تعني المفاعلات التي تكون قدرتها أقل من ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي). أما المفاعلات "المتوسطة الحجم" فتعني المفاعلات التي تتراوح قدرتها ما بين ٣٠٠ و٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وهناك حوالي ٤٥ من المفاهيم المبتكرة المتصلة بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم بلغت مرحلة ما من مراحل البحث والتطوير. ويرد وصف بعضها في الفقرات اللاحقة.

١٨- وتعكف الأرجنتين على تطوير المفاعل CAREM-25، وهو تصميم لمفاعل ماء خفيف مضغوط من نوع متكامل صغير تقع جميع مكوّناته الأساسية داخل وعاء المفاعل وتتراوح قدرته على توليد الكهرباء ما بين ١٥٠ و٣٠٠ ميغاواط(كهربائي). وقد بدأت أعمال الحفر الموقعي في أيلول/سبتمبر ٢٠١١ لتشييد محطة نموذجية أوّلية من طراز CAREM بقدرة ٢٧ ميغاواط(كهربائي).

١٩- وفي الصين، تعمل الشركة الوطنية النووية الصينية على تطوير المفاعل ACP100، وهو مفاعل صغير نمطي متكامل ومتقدم يعمل بالماء المضغوط بقدرة ١٠٠ ميغاواط(كهربائي)، ويمكن استخدامه أيضا في توليد الحرارة وتحلية مياه البحر. كما أنها تعمل على تطوير المفاعل ACP600، وهو مفاعل متقدم من حلقتين يعمل بالماء المضغوط، وهو مناسب للشبكات الكهربائية التي تعمل بقدرات أصغر.

٢٠- وفي فرنسا، تعكف شركة خدمات مديرية الإنشاءات البحرية (DCNS) على تطوير تصميم فليكسبلو، وهو تصميم لمفاعل نمطي صغير وقابل للنقل تبلغ قدرته ١٦٠ ميغاواط(كهربائي). ويستخدم هذا المفاعل المبرد بالماء والذي يتم تشغيله في قاع البحر تكنولوجيات نووية كامنة وفي عرض البحر للاستفادة من البحر، وهو بالوعة حرارة لامتناهية ومتاحة بصورة دائمة.

٢١- وفي اليابان، تم تطوير مفاعل ماء خفيف بقدرة ٣٥٠ ميغاواط(كهربائي) مزوّد بنظام أوّلي متكامل ويسمّى المفاعل النمطي المتكامل. وقبل الترخيص به، يلزم إجراء اختبارات للتثبُّت، إلى جانب البحث والتطوير فيما يخص المكونات وطرق التصميم، وتطوير التصميم الأساسي. كما تعكف اليابان على تطوير المفاعل 4S، وهو مفاعل سريع مبرّد بالصوديوم السائل دون إعادة التزوّد بالوقود في الموقع. ويتيح التصميم مستويين بديلَين من الخَرج وهما ٣٠ ميغاواط(حراري) و١٣٥ ميغاواط(حراري).

٢٢- ويوفّر تصميم المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النظم في جمهورية كوريا قدرة حرارية مقدارها ٣٣٠ ميغاواط(حراري) وهو مخصص لتحلية مياه البحر. وقد صدرت الموافقة على التصميم المعياري من قِبَل الهيئة الوطنية للأمان النووي في عام ٢٠١٢.

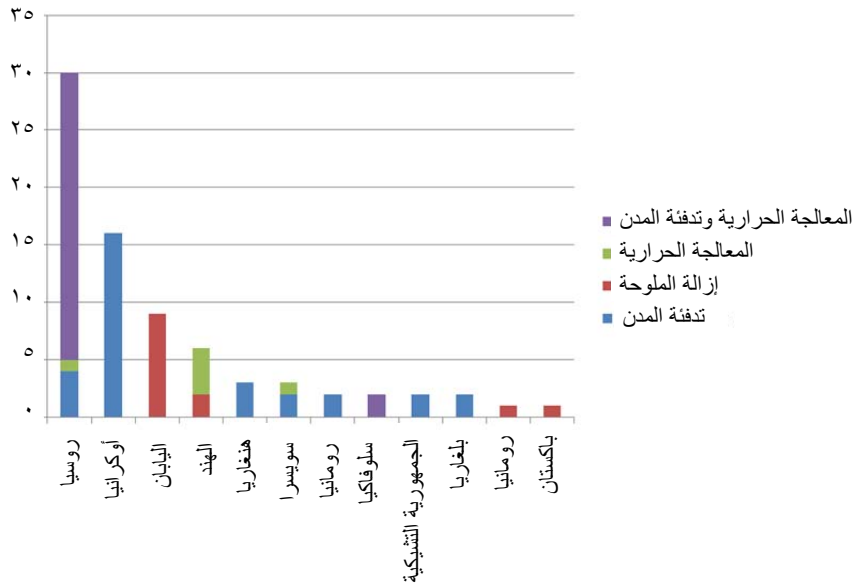
٢٣- ويعكف الاتحاد الروسي على إقامة مفاعلَين مُحمولَين على سفينة، وهما من الطراز KLT-40S وتبلغ قدرة كلٍّ منهما ٣٥ ميغاواط(كهربائي)، لاستخدامهما في أغراض التوليد المشترك للكهرباء والمعالجة الحرارية. ويستند المفاعل KLT-40S إلى المحطة التجارية KLT-40 العاملة بالدفع البحري، وهو شكل مختلف متقدم للمفاعل الذي يُشغِّل كاسحات الجليد النووية. أما المفاعل ABV-6M الذي تبلغ قدرته ٨,٦ ميغاواط(كهربائي) فهو في مرحلة التصميم التفصيلي. وهو مفاعل ماء خفيف مضغوط متكامل يدور فيه المبرِّد الابتدائي دورانا طبيعياً. وفيما يتعلق بالمفاعل RITM-200 الذي تبلغ قدرته ٨,٦ ميغاواط(كهربائي)، وهو حالياً في مرحلة التصميم التفصيلي، فهو مفاعل متكامل ذو دوران مستحثّ لكاسحات الجليد النووية. كما يخطّط الاتحاد الروسي لتشييد عدة وحدات من الطراز SVBR-100 في عام ٢٠١٣. والمفاعل SVBR-100 هو مفاعل سريع نمطي صغير مبتكر مزوّد بسبائك سهلة الانصهار من الرصاص والبزموت كمبرِّد ويبلغ خَرجُه من القوى ١٠٠ ميغاواط(كهربائي).

٢٤- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، هناك أربعة مفاعلات ماء مضغوط متكاملة صغيرة ومتوسطة الحجم (SMRs) قيد التطوير وهي: المفاعل mPower، والمفاعل NuScale، والمفاعل SMR التابع لشركة وستنجهاوس، والمفاعل SMR-160 التابع لشركة هولتيك. ويتكوّن المفاعل mPower من عدد يتراوح بين وحدتين وست وحدات نمطية تبلغ قدرة كلٍّ منها ١٨٠ ميغاواط(كهربائي). وتتوخّى شركة نيوسكيل باور إقامة محطة للقوى النووية مكوّنة كحد أقصى من اثنتي عشرة وحدة نمطية تبلغ قدرة كلٍّ منها ٤٥ ميغاواط(كهربائي). أما التصميم SMR التابع لشركة وستنجهاوس فهو تصميم مفاهيمي لمفاعل تبلغ قدرته ٢٢٥ ميغاواط(كهربائي) ينطوي على نظم أمان خاملة ومكوّنات أثبتت فعاليتها في المفاعل AP-1000. وبدأ أيضاً العمل على تطوير تصميم أحدث لمفاعل SMR، هو التصميم SMR-160 التابع لشركة هولتيك، وهو مفاعل تبلغ قدرته ١٦٠ ميغاواط(كهربائي)

يعتمد على الحَمْل الحراري الطبيعي، بما تنتفي معه الحاجة إلى مضخاتٍ لسوائل التبريد وإلى الاعتماد على مصادر خارجية للقوى. وتعكف مؤسسة جي-هيتاشي على تطوير المفاعل PRISM، وهو مفاعل سريع التوليد مبرّد بمعدن سائل تبلغ قدرته ٣١١ ميغاواط(كهربائي) ويتسم بوجود هيكل تحت سطح الأرض لاحتواء العوازل الزلزالية مزوّد ببالوعة حرارة نهائية مبرّدة تبريداً كامناً بالهواء.

٢٥- وفي الهند، يجتاز مفاعل الماء الثقيل المتقدم بقدرة ٣٠٤ ميغاواط(كهربائي)، الجاري تطويره من قِبَل مركز بهابها للبحوث الذرية، مرحلة التصميم التفصيلي. وسيُستخدَم فيه وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء ووقود خليط الأكسيدين (موكس)، كما سيتضمّن أنابيب للضغط الرأسي وسمات للأمان الهندسي الكامن. أما المفاعل النموذجي السريع التوليد (PFBR-500) الذي تبلغ قدرته ٥٠٠ ميغاواط(كهربائي)، فهو في المرحلة النهائية من تشييده في كالباكام. ومن المقرّر أن يبدأ إدخاله في الخدمة خلال الربع الأول من عام ٢٠١٣. ولدى الهند أيضاً أربعة مفاعلات ماء ثقيل مضغوط تبلغ قدرة كلٍّ منها ٧٠٠ ميغاواط (كهربائي)، بالإضافة إلى مفاعل سريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط(كهربائي) تحت الإنشاء حالياً.

٢٦- وعلى الرغم من أن إنتاج الكهرباء يمثّل إلى حد بعيد الوظيفة الرئيسية للمفاعلات العاملة اليوم، فإن عدداً منها يُستخدَم حالياً لأغراض إزالة الملوحة والمعالجة الحرارية، وتدفئة المدن (الشكل ألف-٤). وثمة استخدامات غير كهربائية إضافية ممكنة في المستقبل، من بينها إنتاج الهيدروجين للأغراض التالية: أولاً، تحسين جودة الموارد البترولية الرديئة النوعية مثل الرمال النفطية مع موازنة انبعاثات الكربون المرتبطة بإخضاع الميثان البخاري لعملية التكسير أو التقطير الهدّام؛ وثانياً، دعم عمليات الإنتاج الواسعة النطاق لأنواع الوقود السائلة الاصطناعية القائمة على أساس الكتلة الأحيائية أو الفحم أو مصادر الكربون الأخرى؛ وثالثاً، الاستخدام بصورة مباشرة كوقود للسيارات، وعلى الأرجح سيارات الخدمة الخفيفة الكهربائية الهجينة العاملة بخلايا الوقود الهيدروجينية.



الشكل ألف-٤- عدد المفاعلات المستخدمة حالياً لأغراض غير كهربائية فضلاً عن إنتاج الكهرباء.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل أو تحت الإنشاء في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات تحت الإنشاء		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٢		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٢	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	% من المجموع	الأعوام	الشهور
الاتحاد الروسي	٣٣	٢٣ ٦٤٣	١١	٩ ٢٩٧	١٦٢,٠	١٧,٦	١٠٩١	٤
الأرجنتين	٢	٩٣٥	١	٦٩٢	٥,٩	٥,٠	٦٨	٧
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٤	٣٣,٢	٣٨	٨
إسبانيا	٨	٧ ٥٦٠			٥٥,١	١٩,٥	٢٩٣	٦
ألمانيا	٩	١٢ ٠٦٨			١٠٢,٣	١٧,٨	٧٩١	٩
الإمارات العربية المتحدة			١	١٣٤٥				
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	١٩٠٠	٨٤,٩	٤٧,٢	٤١٣	٦
إيران (جمهورية-الإسلامية)	١	٩١٥			٠,١		١	٤
باكستان	٣	٧٢٥	٢	٦٣٠	٣,٨	٣,٨	٥٥	٨
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٢٤٥	١٤,٨	٣,٢	٤٣	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩٢٧			٤٥,٩	٥٤,٠	٢٥٤	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٠٦			١٥,٣	٣٢,٦	١٥٣	٣
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٧٦٦			٢٦,٧	٣٣,٠	١٢٨	١٠
جمهورية كوريا	٢٣	٢٠ ٧٩٩	٤	٤ ٩٨٠	١٤٧,٨	٣٤,٦	٤٠٤	١
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٣٠			١٢,٩	٥,٢	٥٦	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٨	١٩,٠	٢١	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٦	٢	٧٨٢	١٤,٣	٥٤,٠	١٤٤	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٩	٤١,٧	٣١	٣
السويد	١٠	٩ ٣٩٥			٥٨,١	٣٩,٦	٤٠٢	٦
سويسرا	٥	٣ ٢٧٨			٢٥,٧	٤٠,٩	١٨٩	١١
الصين	١٧	١٢ ٨١٦	٢٩	٢٨ ٨٧٠	٨٢,٦	١,٩	١٤١	٧
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٠٠	٤٢٣,٥	٧٧,٧	١٨٧٤	٤
فنلندا	٤	٢ ٧٣٦	١	١ ٦٠٠	٢٢,٣	٣١,٦	١٣٥	٤
كندا	١٩	١٣ ٦٩٠			٨٨,٣	١٥,٣	٦٣٦	١١
المكسيك	٢	١ ٥٣٠			٩,٣	٣,٦	٤١	١١
المملكة المتحدة	١٦	٩ ٢٤٦			٦٢,٧	١٧,٨	١٥١١	٨
الهند	٢٠	٤ ٣٩١	٧	٤ ٨٢٤	٢٩,٠	٣,٧	٣٧٧	٣
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٤,٧	٤٣,٣	١١٠	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٩	٣,٦	٦٨	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	١٠٤	١٠١ ٤٦٥	١	١ ١٦٥	٧٩٠,٤	١٩,٣	٣٨١١	١١
اليابان	٥٠	٤٤ ٢١٥	٢	٢ ٦٥٠	١٥٦,٢	١٨,١	١٥٩٦	٤
المجموع [ب، ج]	٤٣٧	٣٧٢ ٥٢٥	٦٧	٦٤ ١٨٠	٢ ٥١٨,٠	١٢,٣	١٥ ٢٢٨	٧

(أ) البيانات مأخوذة من نظام المعلومات عن مفاعلات القوى الخاص بالوكالة (http://www.iaea.org/pris).

(ب) ملحوظة: هذا المجموع يتضمّن البيانات التالية المتعلقة بتايوان، الصين:
٦ وحدات، ٥٠١٨ ميغاواط(كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط(كهربائي) تحت الإنشاء؛
٤٠,٤ تيراواط- ساعة من الكهرباء المولدة نووياً، أي ما يمثّل ١٩,٠% من إجمالي حجم الكهرباء المولّدة.

(ج) يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨١ عاماً) وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ شهور) وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ شهور) وتايوان، الصين (١٨٨ عاماً وشهر واحد).

ألف-٢- مستقبل القوى النووية

٢٧- من المتوقّع أن يؤدّي حادث فوكوشيما داييتشي إلى إبطاء نمو القوى النووية أو ربما تأخيره، لكن ليس إلى ارتداده. وتنشر الوكالة سنوياً سلسلتين من التوقّعات المحدّثة بشأن النمو العالمي في مجال القوى النووية: إحداهما عن التوقّعات المنخفضة والأخرى عن التوقّعات المرتفعة. وتُشير تحديثات عام ٢٠١٢ لكلٍّ من التوقّعات المرتفعة والمنخفضة إلى حدوث نمو في قدرة القوى النووية، بنسبة ٢٣٪ بحلول عام ٢٠٣٠ في التوقّع المنخفض وبنسبة ١٠٠٪ في التوقّع المرتفع. ومع ذلك، فإن معدّل النمو أبطأ مما كان متوقّعاً في عام ٢٠١١، لا سيما في التوقّعات المنخفضة.

٢٨- وتفترض التوقّعات المرتفعة أنه سيتمّ التغلّب في وقت قريب نسبياً على الأزمات المالية والاقتصادية الحالية، وأنه ستجري استعادة المعدلات السابقة للنمو الاقتصادي وللطلب على الكهرباء، ولا سيما في الشرق الأقصى. كما تفترض وضع سياسات عالمية صارمة للتخفيف من حدّة تغيّر المناخ. أما التوقعات المنخفضة فتفترض استمرار الاتجاهات الحالية مع بضعة تغييرات في السياسات التي تؤثّر على القوى النووية. ولا تفترض تحقيق جميع الأهداف الوطنية للقوى النووية. وهي توقعات 'محافظة ولكنها معقولة'. وتوضع التوقعات على مستوى إقليمي، لا على مستوى وطني. وتأخذ التوقعات المنخفضة لعام ٢٠١٢ في الاعتبار تراجعاً محتملاً لحصة القوى النووية من مزيج مصادر الطاقة الكهربائية في اليابان.

٢٩- وفي ظل التوقعات المنخفضة، تنمو قدرة القوى النووية المنشأة في العالم لتصل إلى ٤٥٦ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠، بانخفاض نسبته ٩% عن المستوى الذي كان متوقّعاً في العام السابق. أما في التوقّعات المرتفعة المحدّثة، فهي تنمو إلى ٧٤٠ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠، بزيادة تقل بحوالي ١٪ عما كان متوقّعاً في عام ٢٠١١. وبالقياس إلى التوقعات السابقة التي لم تأخذ في الاعتبار حادث فوكوشيما داييتشي، تقلّصت التوقعات المنخفضة بنسبة ١٦٪ في حين يلاحَظ انخفاض أكثر اعتدالاً نسبته ٨٪ في التوقعات المرتفعة. وتشير التوقعات المنخفضة إلى تأخير ممتدّ لعشر سنوات مقارنةً بالنمو الذي كان متوقّعاً قبل فوكوشيما؛ فالقدرة التي كانت متوقّعة لعام ٢٠٢٠ قبل الحادث يجري توقّعها الآن لعام ٢٠٣٠.

٣٠- ومعظم النمو سيحدث في مناطق لديها بالفعل محطات قوى نووية عاملة. والنمو المتوقع هو الأشدّ في الشرق الأقصى – فمن ٨٣ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٢، تنمو القدرة إلى ١٥٣ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠ في التوقعات المنخفضة وإلى ٢٧٤ غيغاواط(كهربائي) في التوقعات المرتفعة. ويتجلّى في أوروبا الغربية أكبر فَرق بين التوقّعات المنخفضة والمرتفعة. ففي ظل التوقعات المنخفضة، تتدنّى قدرة القوى النووية لأوروبا الغربية من ١١٤ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٢ إلى ٧٠ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠. وفي التوقعات المرتفعة، تنمو القوى النووية إلى ١٢٦ غيغاواط(كهربائي). وفي أمريكا الشمالية، يتوقع السيناريو المنخفض تراجعاً طفيفاً، من ١١٥ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٢ إلى ١١١ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠. وتنبئ التوقعات المرتفعة بزيادة وصولاً إلى ١٤٨ غيغاواط(كهربائي).

٣١- ومن بين المناطق الأخرى التي توجد لديها برامج جوهرية للقوى النووية، منطقة أوروبا الشرقية ومنطقة الشرق الأوسط وجنوب آسيا. وتشهد القوى النووية توسعاً في هاتين المنطقتين في ظل كلٍّ من التوقعات المنخفضة والمرتفعة – إلى مستويات أدنى بما يتراوح بين ٢-٤ غيغاواط(كهربائي) من تلك التي كانت متوقّعة قبل الحادث.

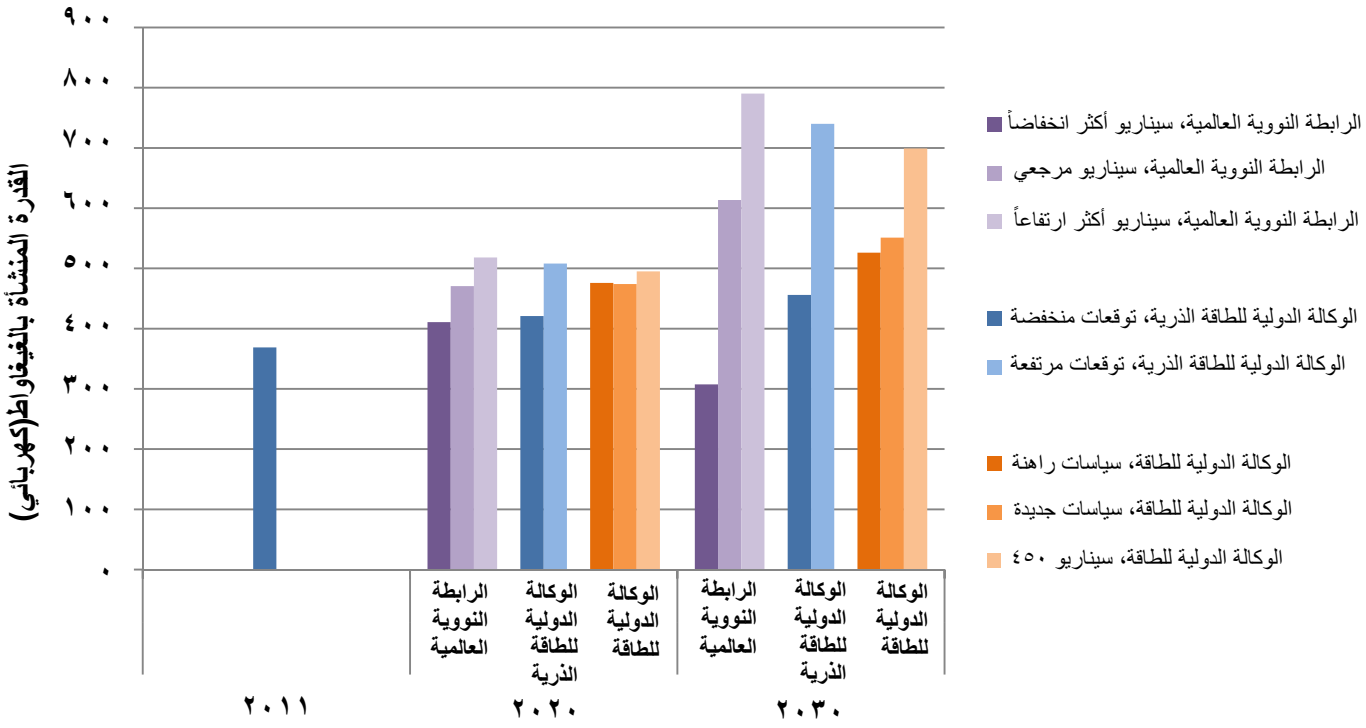
القوى النووية والتنمية المستدامة

٣٢- تضطلع الطاقة بدور مركزي في تحقيق أهداف التنمية المستدامة. والخيارات التي ستتبنّاها البلدان في السنوات المقبلة فيما يتعلق بأنواع الوقود وتكنولوجيات الطاقة قد تحدّد بدقة مدى السرعة التي يمكن أن يتحرّك بها العالم نحو مستقبل مستدام. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٢، عُقِد في ريو دي جانيرو بالبرازيل مؤتمر دولي رئيسي، هو مؤتمر الأمم المتحدة للتنمية المستدامة (عادةً ما يشار إليه أيضاً باسم ريو+٢٠)، من أجل استعراض التقدم المحرز في مجال التنمية المستدامة منذ انعقاد مؤتمر الأمم المتحدة المعني بالبيئة والتنمية (قمة الأرض) في عام ١٩٩٢، وتحديد الخطوط العريضة لمسار الإجراءات المستقبلية على الأصعدة الوطنية والإقليمية والعالمية. وتضع الوثيقة الختامية لمؤتمر ريو+٢٠، بعنوان *المستقبل الذي نريده*، مساراً للتنمية يغطي تشكيلة واسعة من الخيارات الفردية والجماعية ويتناول العديد من القضايا ذات الأولوية، بما في ذلك *توفير فرص الحصول على الطاقة النظيفة للجميع، وضمان ألا تسهم الطاقة المنتَجة في تغيّر المناخ*.

٣٣- وفي تشرين الثاني/نوفمبر-كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، انعقدت الدورة الثامنة عشرة لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيّر المناخ (COP-18) في الدوحة بقطر، جنباً إلى جنب مع الدورة الثامنة لمؤتمر الأطراف في بروتوكول كيوتو. وقد اتّفقت الأطراف في بروتوكول كيوتو على فترة التزام ثانية من عام ٢٠١٣ حتى عام ٢٠٢٠. وبدون هذا الالتزام، ما كان للعالم أن يصل إلى اتفاق دولي يحدّ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (غازات الدفيئة)، كما أنه بدون فرض قيود على انبعاثات غازات الدفيئة لا يكون لانبعاثات القوى النووية المتدنية للغاية أي قيمة اقتصادية. وكان يمكن الإبقاء على القوانين الوطنية أو الإقليمية التي تحدّ من الانبعاثات (كما هو الحال في الاتحاد الأوروبي)، ولكن كان سيحدث ارتداد في التقدم نحو فرض قيود أكثر صرامةً وشمولاً.

٣٤- وقد أصبح تصميم استراتيجيات وطنية مناسبة للطاقة من أجل تلبية الاحتياجات الإنمائية وتوفير خدمات الطاقة الحديثة المستدامة للجميع أمراً معقّداً على نحو مطّرد، بسبب تزايُد عدد العوامل التي تؤثّر في خيارات الطاقة. أوّلها أن ذلك يتطلّب إجراء تقييم شامل لجميع الخيارات الممكنة بشأن العرض والطلب في مجال الطاقة من حيث تبعاتها الاجتماعية والاقتصادية والبيئية. والعديد من الدول الأعضاء، ولا سيما البلدان النامية، تفتقر إلى الدراية والخبرة المحلية للقيام بمثل هذه المهمة، وتعكف الوكالة على توفير الدعم التقني للمساعدة في بناء الدراية المحلية اللازمة لسدّ هذه الثغرة. وثانيها أن مصادر الطاقة المنخفضة الكربون، مثل الطاقة النووية، تقلِّل إلى أدنى حدّ من غازات الدفيئة المنبعثة في أثناء توليد الطاقة وتخفِّف من التأثير السلبي للخلل المناخي على التنمية.

٣٥- وعند دراسة خيارات الطاقة، يفكر عدد كبير من البلدان في القوى النووية باعتباره أحد الخيارات. ومن العوامل التي تسهم في استمرار الاهتمام بالقوى النووية تزايد الطلب العالمي على الطاقة، فضلاً عن المخاوف بشأن تغيّر المناخ وتقلّب أسعار الوقود الأحفوري وتأمين إمدادات الطاقة.



الشكل ألف-٥ – مقارنة بين توقعات القوى النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية (باللون الأزرق)، وتقرير الرابطة النووية العالمية لعام ٢٠١١ بشأن السوق العالمية للوقود النووي (WNA؛ باللون الأرجواني)، وتوقعات الوكالة الدولية للطاقة بعنوان "توقعات الطاقة في العالم لعام ٢٠١٢" (IEA، باللون البرتقالي).

٣٦- كما تنشر الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي توقعات بشأن النمو العالمي في مجال القوى النووية. ووفقاً لتوقعات الوكالة الدولية للطاقة بعنوان *توقعات الطاقة في العالم لعام ٢٠١٢*، في إطار السيناريو المركزي الخاص بها، المشار إليه باسم سيناريو السياسات الجديدة، سوف تصل القدرة العالمية للتوليد النووي إلى نحو ٥٥٠ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠. ويقل ذلك بحوالي ٧٪ عن توقعات الوكالة الدولية للطاقة قبل عام مضى، فيما لا يختلف كثيراً عن الانخفاض المماثل الذي يظهر في التوقعات المنخفضة للوكالة الدولية للطاقة الذرية إذا ما قورن بطبعتها السابقة. ويقارن الشكل ألف-٥ بين توقعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية لعام ٢٠١٢، وسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة لعام ٢٠١٢، وتوقعات الرابطة النووية العالمية لعام ٢٠١١. وتؤدّي السيناريوهات المرتفعة الصادرة عن المنظمات الثلاث إلى نتائج مماثلة، وهو ما ينطبق على السيناريوهات النووية المنخفضة لكلٍّ من الوكالة الدولية للطاقة الذرية والوكالة الدولية للطاقة.

ألف-٣- دورة الوقود[٣]

ألف-٣-١- موارد اليورانيوم وإنتاجه

٣٧- في عام ٢٠١٢، نشرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي أحدث طبعة من 'الكتاب الأحمر'، بعنوان *اليورانيوم في عام ٢٠١١: موارده وإنتاجه والطلب عليه*. وقدّر الكتاب المذكور الكمية الإجمالية لموارد اليورانيوم التقليدية المحدّدة، التي يمكن استخلاصها بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم، بحوالي ٥,٣ مليون طن من اليورانيوم. وهو ما يقلّ بنسبة ١,٤٪ عن التقديرات المستمدّة من الطبعة السابقة (المنشورة في عام ٢٠١٠). وبالإضافة إلى ذلك، كان هناك ما يقدَّر بنحو ١,٨ مليون طن من اليورانيوم من الموارد التقليدية المحدّدة القابلة للاستخلاص بتكاليف تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم، وبذلك وصل مجموع الموارد المحدّدة القابلة للاستخلاص بتكلفة أقل من ٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم إلى ٧,١ مليون طن من اليورانيوم. وكان سعر البيع الفوري لليورانيوم، بعد أن سجّل في أوائل عام ٢٠١١ ارتفاعاً على مدى عامين، قد انخفض بعد حادث فوكوشيما داييتشي ليصل في نهاية العام إلى ١٣٥ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم. وبحلول النصف الثاني من عام ٢٠١٢، انخفضت أسعار البيع الفوري إلى حوالي ١١٠ دولارات للكيلوغرام من اليورانيوم بسبب الشكوك التي أحاطت بالبرنامج النووي لليابان، ولكنها وصلت في نهاية العام إلى حوالي ١١٥ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم. ومع ذلك، ظلت أسعار اليورانيوم في الأجل الطويل مستقرّة عند حوالي ١٥٨ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم.

٣٨- وقد بلغ إجمالي الموارد غير المكتشَفة (الموارد التكهّنية والتخمينية) المذكورة في الكتاب الأحمر أكثر من ١٠,٤٣ مليون طن من اليورانيوم، بزيادة طفيفة عن الرقم المذكور في الطبعة السابقة من الكتاب ومقداره ١٠,٤٠ مليون طن من اليورانيوم. وقُدِّرت الموارد التقليدية غير المكتشَفة بأكثر من ٦,٢ مليون طن من اليورانيوم بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم، إلى جانب كمية إضافية مقدارها ٠,٤٦ مليون طن من اليورانيوم بتكاليف تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم. وكانت هناك أيضاً كميات إضافية تقدَّر بنحو ٣,٧ مليون طن من اليورانيوم من موارد تخمينيّة لم تحدَّد تكاليف إنتاجها.

٣٩- وفي عام ٢٠١١، أُبلِغ عن موارد إضافية فيما يخص كثيراً من مستودعات اليورانيوم في أفريقيا – تحديداً في بوتسوانا وملاوي ومالي والجمهورية الإسلامية الموريتانية وناميبيا وجمهورية تنزانيا المتحدة وزامبيا – حيث تواصلت الجهود المكثفة للتنقيب عن اليورانيوم. وتُجرى الآن دراسة جدوى اقتصادية لمشروع نهر مكوجو في جمهورية تنزانيا المتحدة. وقد وافقت لجنة التراث العالمي التابعة لمنظمة اليونسكو على تعديل حدود محمية سيلوس في تنزانيا كخطوة نحو تطوير موقع اليورانيوم عند نهر مكوجو. ومع ذلك، لا يزال المنجم المحتمل مرهوناً بتقديم طلب من قِبَل شركة يورانيوم وان للحصول على ترخيص بالتعدين. وأفادت التقارير أيضاً في عام ٢٠١٢ بظهور موارد إضافية أو جديدة في كولومبيا وغويانا وباراغواي وبيرو والسويد.

٤٠- وتزيد موارد اليورانيوم والثوريوم غير التقليدية من توسيع قاعدة الموارد. ومن الموارد غير التقليدية اليورانيوم المحتمل أن يكون قابلاً للاستخلاص فيما يرتبط بأنواع الفوسفات، والخامات غير الحديدية،

---

[٣] ترد معلومات أكثر إسهاباً عن أنشطة الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشأن دورة الوقود في الأقسام ذات الصلة من آخر تقرير سنوي للوكالة (الموقع http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012) وفي الموقع www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

والكربوناتيت، والشست الأسود، والليغنيت، وهي موارد لا يمكن استخلاص اليورانيوم منها سوى كمنتَج ثانوي غير مهم، إلى جانب اليورانيوم الموجود في مياه البحر. والقليل جداً من البلدان يبلغ حالياً عن موارد يورانيوم غير تقليدية. والتقديرات الحالية لليورانيوم المحتمل أن يكون قابلاً للاستخلاص تناهز ٨ ملايين طن من اليورانيوم. وقد أعلنت شركة يورانيوم إيكويتيز أن محطتها الإيضاحية المتنقّلة لاستخلاص اليورانيوم من حمض الفوسفوريك باستخدام تقنية للتبادل الأيوني (عملية المعالجة PhosEnergy) بدأت إجراء اختبارات في حزيران/يونيه ٢٠١٢. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٢، أُعلِن أن عمليات الاختبار كانت ناجحة حيث بلغت نسبة استخلاص اليورانيوم أثناء عملية المعالجة المذكورة أكثر من ٩٠٪. وقد تم البدء في إجراء دراسة هندسية لعملية المعالجة PhosEnergy.

٤١- ومنحت حكومة فنلندا ترخيصاً في آذار/مارس ٢٠١٢ لاستخراج اليورانيوم كمنتَج ثانوي من منجم تالفيفارا للنيكل الذي تديره شركة تالفيفارا للتعدين في سوتكامو، بالجزء الشرقي من فنلندا (الشكل ألف-٦). وحتى يتسنّى البدء في إنتاج اليورانيوم، لا تزال هناك حاجة إلى الحصول على تصريح بيئي من الهيئة الإدارية الحكومية الإقليمية لفنلندا الشمالية وتصريح ببدء العمل من هيئة الأمان الإشعاعي والنووي. وتقدّم شركة كاميكو المساعدة التقنية إلى شركة تالفيفارا فيما يتعلق بتصميم دائرة استخراج اليورانيوم وتشييدها وإدخالها في الخدمة وتشغيلها. ويبلغ حجم الموارد غير التقليدية ٠٠٠ ٢٢ طن من اليورانيوم.

الشكل ألف-٦ - مشروع تالفيفارا لليورانيوم، فنلندا.

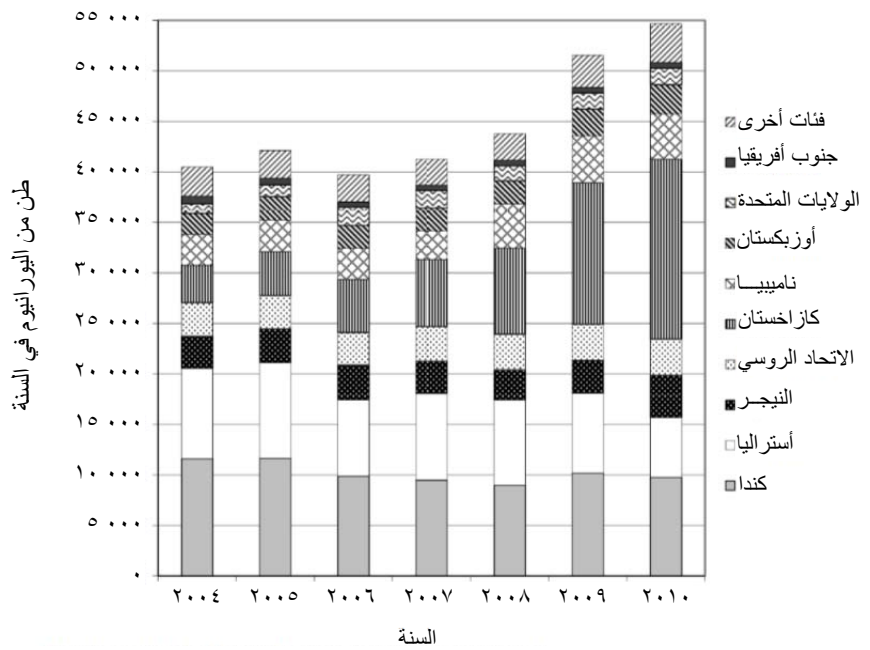
٤٢- وتقدّر موارد الثوريوم في جميع أنحاء العالم بما يتراوح بين ستة إلى سبعة ملايين طن تقريباً. وعلى الرغم من استخدام الثوريوم كوقود لأغراض الإيضاح التجريبي، فإنه لا تزال هناك حاجة إلى مزيد من العمل الجوهري قبل أن يمكن اعتباره كبديل لليورانيوم. وفي كندا، وقّعت مؤسسة كندو للطاقة على اتفاق مع ثلاث شركات تابعة للشركة النووية الوطنية الصينية في آب/أغسطس ٢٠١٢، من أجل توسيع نطاق التعاون معها في مجال تطوير الثوريوم واليورانيوم المعاد تدويره كأنواع وقود بديلة لمفاعلات CANDU الجديدة. ويمثّل هذا الاتفاق المرحلة الثالثة من التعاون بين كندا والصين، الذي كان قد بدأ في عام ٢٠٠٨.

٤٣- وقد أُجرِيت دراسات موسّعة على مياه البحر كمصدر غير تقليدي لليورانيوم. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أبلغ مختبر أوك ريدج الوطني عن تطوير مواد ممتزّة جديدة. ويتم تشعيع الحصير المصنوع من الألياف المعروفة باسم 'HiCap'، التي تتميز بارتفاع مساحاتها السطحية، ثم يجري بعد ذلك إخضاعها للتفاعل

مع مركّبات كيميائية تتآلف مع اليورانيوم. وتتمتع الألياف الناتجة بقدرة امتزاز أعلى بخمسة أضعاف، فضلاً عن سرعة الامتصاص وارتفاع الجودة الانتقائية. ويجري العلماء في جامعة ألاباما تجارب على استخدام ألياف تعتمد على الكيتين – وهو بوليمر أحيائي طويل السلسلة يمكن الحصول عليه من قشور الربيان.

٤٤- وترد في الكتاب الأحمر بيانات عن نفقات التنقيب وتطوير المناجم في جميع أنحاء العالم حتى عام ٢٠١٠، شاملةً العام المذكور. وقد بلغ إجمالي هذه النفقات ٢,٠٧٦ مليار دولار في عام ٢٠١٠، بزيادة نسبتها ٢٢% مقارنةً بأرقام عام ٢٠٠٨ المذكورة في الطبعة السابقة من الكتاب الأحمر.

٤٥- وبلغ إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠١٠، وهي أحدث سنة ذُكِرت في الكتاب الأحمر، ٥٤ ٦٧٠ طناً من اليورانيوم (الشكل ألف-٧). واستحوذت أستراليا وكندا وكازاخستان على ٦٢٪ من هذا الإنتاج. كما استأثرت هذه البلدان الثلاثة، بالإضافة إلى ناميبيا والنيجر والاتحاد الروسي والولايات المتحدة الأمريكية وأوزبكستان، بنسبة قدرها ٩٢%. وتشير تقديرات الرابطة النووية العالمية إلى أن حجم الإنتاج بلغ ٥٤ ٦١٠ أطنان من اليورانيوم في عام ٢٠١١ و ٥٢ ٢٢٢ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٢.



ملحوظة: القيم الخاصة بكلٍّ من الهند وناميبيا وباكستان ورومانيا قيم تقديرية.

الشكل ألف-٧- أحدث البيانات المتعلقة بإنتاج اليورانيوم في العالم (المصدر: اليورانيوم في عام ٢٠١١: موارده وإنتاجه والطلب عليه).

٤٦- وقد تفوّق النضّ الموقعي[٤] على التعدين الجوفي بوصفه طريقة الإنتاج الرئيسية في عام ٢٠٠٩، ويُتوقّع أن تتواصل مستقبلاً الزيادة في نسبة إنتاج النضّ الموقعي من المجاميع العالمية. وشهد عام ٢٠١٢ توسّعات في العديد من المناجم التي تطبّق النضّ الموقعي في كازاخستان، مما زاد حجم الإنتاج في البلد بما يقرب من ٢ ٢٥٠ طناً من اليورانيوم سنوياً.

[٤] ينطوي التعدين التقليدي، أو الجوفي، على إزالة الخام من الأرض، ثم معالجته لإخراج المعادن المنشودة. أما النضّ الموقعي فينطوي على ترك الخام حيث هو في الأرض واستخلاص المعادن منه عن طريق إذابتها باستخدام محلول للنضّ وضخّ المحلول إلى السطح حيث يمكن استخلاص المعادن من هذا المحلول. ويؤدي ذلك إلى الحدّ من تحريك السطح وإلى عدم توليد مخلّفات أو نفايات صخرية.

٤٧- ولم تبدأ عمليات إنتاج خلال السنوات الأخيرة سوى في عدد قليل من مناجم اليورانيوم (على سبيل المثال، في أستراليا خلال عام ٢٠١١ وفي النيجر خلال عام ٢٠١٠). ومنذ عام ٢٠١٠ يتواصل العمل في تشييد مركز للإنتاج بطريقة النضّ الموضعي في خياغدا، بالاتحاد الروسي. وقد جرى تحديث البنية التحتية للسكك الحديدية، وتم الانتهاء من إقامة محطة معالجة جديدة ومرافق لإنتاج حمض الكبريتيك. ويُفترَض أن يكون هذا المركز قادراً على إنتاج ١ ٨٠٠ طن من اليورانيوم سنوياً بحلول عام ٢٠١٨. وفي ناميبيا، تم في عام ٢٠١٢ الانتهاء من المرحلة الثالثة لتوسيع منجم Langer لانغر هاينريتش التابع لشركة بالادين بهدف زيادة الإنتاج السنوي إلى ٢ ٠٠٠ طن من اليورانيوم. وستؤدي المرحلة الرابعة لهذا التوسيع إلى زيادة إضافية في الإنتاج السنوي ليصل إلى ٣ ٩٠٠ طن سنوياً. وبسبب ظروف السوق الحالية، أوقفت شركة أريفا أعمالها المتصلة بتطوير منجم تريكوبجي في ناميبيا.

٤٨- وفي أستراليا، قامت حكومة مقاطعة كوينزلاند في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢ برفع الحظر الذي كان قد حال دون تعدين اليورانيوم فيها منذ عام ١٩٨٢، عندما توقّف منجم ماري كاثلين عن الإنتاج. وفي جنوب أستراليا، أعلنت شركة كوازار للموارد أنها ستبدأ عمليات التعدين بطريقة النضّ الموقعي في مستودعي فور مايل الشرقي والغربي في عام ٢٠١٣. وفي آب/أغسطس ٢٠١٢، أعلنت شركة بي إتش بي بيلليتون أنها ستبحث وضع تصميم بديل أقل اعتماداً على كثافة رأس المال لتوسيع منجم سد أوليمبيك المفتوح في العراء من أجل تحسين اقتصاديات المشروع. ونتيجةً لذلك، لم يكن بمقدور الشركة الموافقة على توسيع منجم سد أوليمبيك قبل الموعد النهائي للاتفاق الإلزامي في ١٥ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢. وفي أستراليا الغربية، حصل منجم ويلونا لليورانيوم التابع لشركة تورو للطاقة على الموافقة البيئية النهائية من حكومة الولاية.

٤٩- وفي كندا، حصلت شركة أريفا للموارد على موافقة بيئية في آب/أغسطس ٢٠١٢ لمشروعها الخاص بمستودع ميدويست. وينطوي هذا المشروع على تطوير منجم مفتوح في العراء، وشق طريق مخصّص للنقل يربط موقع تطوير مستودع ميدويست بموقع العمليات القائم في بحيرة ماكلين، فضلاً عن زيادة الطاقة الإنتاجية لمصنع JEB في بحيرة ماكلين من أجل استيعاب المعدل المخطّط له لصقل الخام المستخرج من مستودع ميدويست.

٥٠- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأت في وايومينغ في آب/أغسطس ٢٠١٢ الأعمال الإنشائية الخاصة بعمليات النضّ الموقعي في منجم مزرعة نيكولز التابع لمؤسسة يورانيرز للطاقة. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٢ أعلنت مؤسسة يورانيرز أن لديها جميع التصاريح والتراخيص الرقابية اللازمة لإنشاء وتشغيل منجم مزرعة نيكولز. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢، تم الحصول على الموافقة الرقابية النهائية لمشروع لوست كريك لليورانيوم التابع لمؤسسة يور-إينرجي. وحصلت مؤسسة يورانيوم إينرجي أيضاً على جميع التراخيص اللازمة للمضي في تطوير مشروعها الخاص باستخراج اليورانيوم بطريقة النضّ الموضعي في جنوب تكساس والمعروف باسم غولياد. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة للحصول على إعفاء لمستودعات المياه الجوفية[٥] قبل الشروع في أنشطة استخلاص اليورانيوم.

---

[٥] إن أحد العناصر المهمة للقانون الاتحادي لمياه الشرب المأمونة في الولايات المتحدة الأمريكية هو السلطة القانونية التي تسمح بأنشطة التنمية المعدنية بطريقة النضّ الموقعي في أجزاء من الطبقات الجيولوجية، تتقاسمها أيضاً مصادر الإمداد بمياه الشرب. ويجب أن تصدر وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة إعفاءً لمستودعات المياه الجوفية في كل موقع منجم قبل القيام بأي استخلاص بطريقة النضّ الموقعي.

٥١- وتشير التقديرات إلى أن إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠١٢ غطّى حوالي ٧٧٪ فقط من الاستهلاك المقدّر لليورانيوم في المفاعلات ومقداره ٦٧ ٩٩٠ طناً من اليورانيوم.[٦] وتمت تغطية الجزء المتبقي من خلال خمسة مصادر ثانوية وهي: مخزونات اليورانيوم الطبيعي العسكرية، ومخزونات اليورانيوم المثرى، واليورانيوم الذي تعاد معالجته من الوقود المستهلك، ووقود مزيج الأكسيدين (موكس) مع الاستعاضة جزئياً عن اليورانيوم-٢٣٥ بالبلوتونيوم من الوقود المستهلك الذي تعاد معالجته، وإعادة إثراء مخلفات اليورانيوم المستنفد. وبمعدل الاستهلاك المقدّر لعام ٢٠١٢، فإن العمر التشغيلي لـ٥,٣ مليون طن من اليورانيوم يبلغ ٧٨ عاماً. ويرجّح ذلك كفتَة موارد اليورانيوم لدى مقارنتها بالاحتياطيات التي يتراوح عمرها بين ٣٠ و٥٠ عاماً بالنسبة لسلع أخرى (مثل النحاس والزنك والنفط والغاز الطبيعي).

ألف-٣-٢- التحويل والإثراء وتصنيع الوقود

٥٢- تقوم ستة بلدان (كندا والصين وفرنسا والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية) بتشغيل محطات على نطاق تجاري لتحويل تُماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) إلى سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6)، كما توجد مرافق تحويل صغيرة قيد التشغيل في الأرجنتين والبرازيل وجمهورية إيران الإسلامية واليابان وباكستان. وتتفرّد الولايات المتحدة الأمريكية باستخدام عملية جافة لتطاير الفلوريد، فيما تستخدم جهات التحويل الأخرى كلها عملية رطبة. وقد ظل مجموع قدرة التحويل السنوية العالمية ثابتاً عند حوالي ٠٠٠ ٧٦ طن من اليورانيوم الطبيعي (طن من اليورانيوم على شكل سادس فلوريد اليورانيوم) في السنة. ومع ذلك، من المتوقع أن تحدث تغييرات جوهرية فيما يتعلق بمحطات جديدة يجري بناؤها في فرنسا (كوميرهيكس الثانية التابعة لشركة أريفا (الشكل ألف-٨)) والولايات المتحدة الأمريكية (محطة هانيويل ميتروبوليس وركس). ويتراوح الطلب الحالي على خدمات التحويل (بافتراض أن نسبة إثراء المخلفات[٧] هي ٠,٢٥٪ من اليورانيوم–٢٣٥) في حدود ما بين ٠٠٠ ٦٠ و ٠٠٠ ٦٤ طن من اليورانيوم في السنة. ومن المتوقع أن تبدأ بحلول عام ٢٠١٨ الأعمال الإنشائية الخاصة بمرفق تحويل جديد في كازاخستان هو أولبا، كمشروع مشترك بين مؤسسة كازاتومبروم وشركة كاميكو الكندية. وسيكون المرفق في موقع مشترك داخل محطة أولبا التعدينية في أوست-كامينوغورسك. ومن المتوقع أن تبلغ قدرته الإنتاجية ٠٠٠ ١٢ طن من سادس فلوريد اليورانيوم في السنة.

---

[٦] صفحة الرابطة النووية العالمية بشأن مفاعلات القوى النووية في العالم ومتطلباتها من اليورانيوم، في نيسان/أبريل ٢٠١٢ (الموقع الإلكتروني: http://worldnuclear.org/info/reactors0412.html)، تاريخ زيارة الموقع: ٧ أيار/مايو ٢٠١٢.

[٧] نسبة إثراء المخلفات، أو معدل تركيز اليورانيوم-٢٣٥ في الجزء المستنفد، تحدِّد بشكل غير مباشر حجم العمل المطلوب على كمية معيّنة من اليورانيوم لضمان نسبة إثراء المنتَج. وتؤدي الزيادة في نسبة إثراء المخلفات مقترنةً بكمية ثابتة وبنسبة ثابتة من اليورانيوم المثرى داخل المنتَج إلى خفض كمية الإثراء اللازمة، ولكنها تزيد المتطلبات فيما يخص اليورانيوم الطبيعي والتحويل، والعكس بالعكس. ويمكن أن تتفاوت نسب إثراء المخلفات بشكل كبير مما يؤثر بالتالي على الطلب المتعلق بخدمات الإثراء.

الشكل ألف-٨- مرفق التحويل COMURHEX II تحت الإنشاء في فرنسا. من المتوقع أن تبدأ عمليات التشغيل التدريجي في ٢٠١٣-٢٠١٤.

٥٣- ويبلغ إجمالي قدرة الإثراء العالمية حالياً نحو ٦٥ مليون وحدة من أعمال الفصل في السنة، مقارنةً بطلب إجمالي يقدَّر بحوالي ٤٥ مليون وحدة من أعمال الفصل في السنة. ويجري تشغيل محطات على نطاق تجاري في كلٍّ من الصين (الشركة النووية الوطنية الصينية)، وفرنسا (أريفا)، والاتحاد الروسي (المؤسسة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم") والولايات المتحدة الأمريكية (USEC ومجموعة يورينكو). وتتولّى مجموعة يورينكو تشغيل محطات للطرد المركزي في ألمانيا وهولندا والمملكة المتحدة (الشكل ألف-٩) والولايات المتحدة الأمريكية. وهناك أيضاً مرافق إثراء صغيرة في الأرجنتين والبرازيل والهند وجمهورية إيران الإسلامية واليابان وباكستان.

الشكل ألف-٩ - مرفق الإثراء يورينكو، كيبينهيرست، المملكة المتحدة

٥٤- ويوجد مرفقان جديدان قيد التطوير للإثراء على نطاق تجاري باستخدام تقنية الإثراء بالطرد المركزي، كلاهما يقع في الولايات المتحدة الأمريكية، وهما: مرفق أريفا إيغل روك، ومحطة الطرد المركزي الأمريكية. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ صدر ترخيص بتشييد مرفق للإثراء بالليزر على نطاق كامل في ولاية كارولاينا الشمالية بالولايات المتحدة الأمريكية، وسيتم بناؤه بواسطة الشركة العالمية للإثراء بالليزر التابعة لمؤسسة جي-هيتاشي. ومن المتوقع أن تكون هذه المحطة قادرة على إنتاج ستة ملايين وحدة من أعمال الفصل في السنة، وعلى إثراء اليورانيوم بنسبة تصل إلى ٨٪ من وزنه باليورانيوم-٢٣٥.

٥٥- وتعكف الأرجنتين على إعادة بناء قدراتها في مجال الانتشار الغازي في بيلكانيو. ويجري حالياً استيراد الخدمات المتصلة بالإثراء من الولايات المتحدة الأمريكية.

٥٦- وفي فرنسا، تم في حزيران/يونيه ٢٠١٢ إغلاق محطة جورج بيس للإثراء بالانتشار التابعة لشركة يورورديف، وكانت مشغّلة منذ عام ١٩٧٩. وتحلّ محطة جورج بيس الثانية محلّ هذه المحطة، في ذات المكان، ولكن ببيانات مِلكيّة مختلفة. وتبلغ القدرة المنشأة الحالية لهذه المحطة ١,٥ مليون وحدة من أعمال الفصل في السنة، مع زيادات مخطّط لها أن تصل إلى ٧,٥ مليون وحدة من أعمال الفصل بحلول عام ٢٠١٦. وشركة أريفا هي حاملة الأسهم الرئيسية في كلٍّ من هاتين العمليتين.

٥٧- وفي آذار/مارس ٢٠١٢، بدأت الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي في التشغيل التجاري لسلاسل الطرد المركزي التعاقبية المحسّنة في قرية روكاشو، بمقاطعة آوموري. وتُجرى مناقشات بشأن التوسيع المزمع للقدرة الحالية من ١٥٠ ٠٠٠ إلى ١,٥ مليون وحدة من أعمال الفصل في السنة، فضلاً عن إقامة محطة إثراء جديدة في اليابان باستخدام تكنولوجيا الطرد المركزي الروسية بموجب اتفاق بين هيئة روزاتوم وشركة توشيبا.

٥٨- وفي عام ٢٠١٢، ظل مجموع القدرات العالمية الحالية لإعادة التحويل[٨] يناهز ٦٠ ٠٠٠ طن من سادس فلوريد اليورانيوم في السنة.

٥٩- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أصدرت الهيئة الرقابية النووية ترخيصاً في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢ للشركة الدولية للنظائر ومنتجات الفلور بغرض تشييد وتشغيل مرفق لإعادة تحويل اليورانيوم المستنفد في نيومكسيكو. وهذا المرفق، الذي سيكون معروفاً باسم محطة عمليات استخراج الفلور وإعادة تحويل اليورانيوم المستنفد (FEP/DUP)، سيستخدم براءة الاختراع الخاصة بالشركة في عملية استخراج الفلور.

٦٠- وظل الطلب السنوي الحالي على خدمات تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف يناهز ٧٠٠٠ طن من اليورانيوم المثرى في مجمّعات الوقود، ولكن من المتوقع أن يزيد إلى حوالي ٨٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة بحلول عام ٢٠١٥. أما بالنسبة لمفاعلات الماء الثقيل المضغوط، فقد بلغت المتطلبات ٣٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة. وهناك الآن العديد من المورّدين المتنافسين على معظم أنواع الوقود. وظل مجموع القدرة العالمية على تصنيع الوقود يناهز ١٣ ٥٠٠ طن من اليورانيوم في السنة (يورانيوم مثرى على شكل عناصر وقود وحزم وقود) لوقود مفاعلات الماء الخفيف، وحوالي ٤٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة (يورانيوم طبيعي على شكل عناصر وقود وحزم وقود) لوقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط. وفيما يخص وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط المصنوع من اليورانيوم الطبيعي، تتم تنقية اليورانيوم وتحويله إلى أكسيد يورانيوم (ثاني أكسيد اليورانيوم) في الأرجنتين وكندا والصين والهند ورومانيا.

٦١- وفي الصين، بلغت القدرة الإنتاجية لمحطة الوقود التابعة للشركة النووية الوطنية الصينية في يبين خلال عام ٢٠١٢ حوالي ٦٠٠ طن من اليورانيوم في السنة. أما بالنسبة للمحطة التابعة للشركة المذكورة في باوتو، بمنطقة منغوليا الداخلية، والتي تقوم بتصنيع مجمعات الوقود الخاصة بمفاعلات CANDU للماء الثقيل المضغوط التابعة لشركة كينشان (٢٠٠ طن من اليورانيوم في السنة)، فيجري توسيع قدرتها المتعلقة بالوقود لتصل إلى ٤٠٠ طن من اليورانيوم في السنة. ويجري حالياً إنشاء محطة جديدة في باوتو لتصنيع الوقود الخاص بالمفاعلات AP1000 في الصين. وعلاوةً على ذلك، في عام ٢٠١٢، بدأت شركة WEC الحكومية لمنتجات الزركونيوم والهفنيوم النووية (SNZWH) إدخال مرفق جديد في الخدمة وهو مخصّص لإنتاج إسفنج الزركونيوم في نانتونغ بالصين. وستنتج المحطة الجديدة الزركونيوم من الرتبة النووية المستخدمة في تصنيع أنابيب

[٨] من أجل تصنيع وقود اليورانيوم المثرى، اليورانيوم، يجب أن يعاد تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المثرى إلى مسحوق ثاني أكسيد اليورانيوم.

مجمعات الوقود النووي، بغرض توفير الإمدادات اللازمة سواء للسوق الصينية من خلال شركة SNWHZ أو السوق العالمية من خلال شركة وستنجهاوس.

٦٢- أما مرفق تصنيع الوقود المخطط لإقامته في كازاخستان، والمقرر أن يكتمل في عام ٢٠١٤، فهو مشروع مشترك تنفّذه شركة أريفا ومؤسسة كازاتومبروم، وتبلغ قدرته المتوقعة ١٢٠٠ طن من اليورانيوم في السنة.

٦٣- وفي أوكرانيا، بدأت بالقرب من سمولين الأعمال الإنشائية الخاصة بمحطة للوقود WWER-1000، وتصل قدرتها المخطط لها خلال عام ٢٠١٥ إلى ٤٠٠ طن من اليورانيوم في السنة. وسيتم بناء هذا المرفق بواسطة شركة الوقود TVEL كمشروع مشترك بين الاتحاد الروسي وأوكرانيا، بنسبة ٥٠٪ زائد واحد من الأسهم تملكها أوكرانيا.

٦٤- وتوفّر عمليات إعادة التدوير مصدراً ثانوياً للإمداد بالوقود النووي من خلال استخدام اليورانيوم المعادة معالجته ووقود موكس. ويتم حالياً إنتاج حوالي ١٠٠ طن من اليورانيوم المعادة معالجته في السنة في إيليكتروستال، بالاتحاد الروسي، لحساب شركة أريفا. ويتم في خط إنتاج واحد بالمحطة التابعة لشركة أريفا في رومان بفرنسا تصنيع نحو ٨٠ طناً من الفلزات الثقيلة لليورانيوم المعادة معالجته على شكل وقود سنوياً لمفاعلات الماء الخفيف في فرنسا. وتبلغ القدرات الحالية لتصنيع وقود موكس في جميع أنحاء العالم نحو ٢٥٠ طناً من الفلزات الثقيلة، حيث تقع المرافق الرئيسية في فرنسا والهند والمملكة المتحدة مع وجود بعض المرافق الأصغر حجماً في اليابان والاتحاد الروسي.

٦٥- ويتم في الهند والاتحاد الروسي تصنيع وقود موكس لاستخدامه في المفاعلات السريعة. ففي الاتحاد الروسي، يوجد مرفق لتصنيع وقود موكس اللازم للمفاعل السريع BN-800 تحت الإنشاء في زهيليزنوغورسك (Krasnoyarsk-26). ولدى الاتحاد الروسي أيضاً مرافق تجريبية في ديميتروفغراد بمعهد بحوث المفاعلات الذرية (RIAR)، وفي أوزيرسك بمحطة مایاك.

٦٦- ويتم في أماكن أخرى تصنيع وقود موكس لاستخدامه في مفاعلات الماء الخفيف. وفي المملكة المتحدة، تم خفض رتبة مصنع سيللافيلد لإنتاج وقود موكس من ١٢٨ إلى ٤٠ طناً من الفلزات الثقيلة في السنة، وفي آب/أغسطس ٢٠١١، أعلنت الهيئة المعنية بإخراج المنشآت النووية من الخدمة أنها أعادت تقييم إمكانات المصنع وسوف تغلقه. وهناك مرافق إضافية لتصنيع وقود موكس تحت الإنشاء في الولايات المتحدة الأمريكية من أجل استخدام فائض البلوتونيوم الذي يمكن استعماله في صنع الأسلحة. وعلى نطاق العالم، هناك ما يقرب من ٣٠ مفاعلاً من مفاعلات الماء الخفيف يُستخدَم فيها وقود موكس في الوقت الحاضر.

ضمان الإمداد

٦٧- في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس المحافظين على إنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وخلال عام ٢٠١٢، واصلت أمانة الوكالة العمل على وضع الترتيبات المالية والقانونية والتقنية وإجراء تقييمات للموقع المخصّص لإنشاء هذا المصرف. وسوف يقع في محطة أولبا التعدينية في كازاخستان. وقد قُدِّمت تعهّدات تزيد قيمتها عن ١٥٠ مليون دولار من قِبَل الدول الأعضاء والاتحاد الأوروبي والمبادرة المعنية بالتهديد النووي لإنشاء مصرف اليورانيوم الضعيف الإثراء. وبحلول نهاية عام ٢٠١٢، كانت قد دُفِعت بالكامل قيمة التعهّدات من قِبَل النرويج (٥ ملايين دولار)، والولايات المتحدة الأمريكية (حوالي ٥٠

مليون دولار)، والمبادرة المعنية بالتهديد النووي (٥٠ مليون دولار)، والكويت (١٠ ملايين دولار)؛ ودفع الاتحاد الأوروبي ٢٠ مليون يورو من أصل ما تعهّد به وهو ٢٥ مليون يورو، وكان يجري وضع اللمسات الأخيرة للترتيبات ذات الصلة مع دولة الإمارات العربية المتحدة (١٠ ملايين دولار).[٩]

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية من دورة الوقود النووي

الوقود النووي المستهلك وإعادة معالجة الوقود النووي

٦٨- تُستخدَم استراتيجيتان مختلفتان لإدارة الوقود النووي المستهلك. في إحداهما تعاد معالجة الوقود النووي لاستخراج المواد القابلة للاستخدام (اليورانيوم والبلوتونيوم) في إنتاج وقود جديد. وفي الأخرى، يُعتبَر الوقود المستهلك ببساطة مجرد نفايات ويتم تخزينه لحين التخلص منه. وحاليًا، تقوم بلدان مثل فرنسا والصين والهند والاتحاد الروسي بإعادة معالجة معظم ما لديها من وقود مستهلك، في حين اختارت بلدان أخرى مثل كندا وفنلندا والسويد التخلص منه مباشرةً. ولم تحسم معظم البلدان قرارها بعد بشأن الاستراتيجية التي ستعتمدها. وتعكف هذه البلدان في الوقت الراهن على تخزين الوقود المستهلك ومواكبة التطوّرات المرتبطة بكلا البديلين.

٦٩- ومن بين التطورات البارزة في عام ٢٠١٢ التي سيتم تناولها بإيجاز في الفقرات التالية، تقدُّم شركة بوزيفا بطلب في فنلندا للحصول على رخصة بتشييد مستودع، وتعليق كندا لطلبها تقديم عروض من الجهات المهتمة باختيار موقع مستودع الوقود النووي المستعمل ومركز الخبرة نظراً للحاجة إلى وقت كافٍ للاستجابة بشكل كامل للردود البالغ عددها ٢١ التي وردت بالفعل متضمِّنةً إبداء الاهتمام، وتقرير من لجنة بلو ريبون في الولايات المتحدة عن المستقبل النووي لأمريكا أوصى، ضمن أمور أخرى، بتبنّي نهج جديد قائم على الموافقة لتحديد مواقع التصرف في النفايات النووية داخل هذا البلد، وباستحداث منظمة جديدة تكرَّس فقط لتنفيذ برنامج التصرف في النفايات. ويتطلب تنفيذ توصيات اللجنة إجراء تغييرات جوهرية في التشريعات التي تنظم مسألة النفايات النووية في الولايات المتحدة.

٧٠- وفي عام ٢٠١٢، تم تصريف حوالي ١٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة كوقود مستهلك من جميع مفاعلات القوى النووية. ويقدّر إجمالي الكمية التراكمية للوقود المستهلك التي تم تصريفها على مستوى العالم حتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢ بما يقرب من ٥٠٠ ٣٦٠ طن من الفلزات الثقيلة، يتم تخزين حوالي ٧٠٠ ٢٥٠ طن منها داخل مرافق تخزين قائمة في محيط المفاعلات أو بعيداً عنها. والكميات التي أعيدت معالجتها بالفعل لا تتجاوز ثلث الكمية التراكمية من الوقود المستهلك الذي تم تصريفه عالمياً، أي حوالي ٨٠٠ ١٠٩ طن من الفلزات الثقيلة. وفي عام ٢٠١٢، بلغت قدرة إعادة المعالجة التجارية العالمية – موزّعةً على أربعة بلدان (فرنسا والهند والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة) – نحو ٤٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة في السنة.

٧١- وفي شهر كانون الأول/ديسمبر، تم رسمياً اختيار موقع فيللار دي كانياس لإقامة مرفق تخزين للوقود النووي المستعمل في إسبانيا (الشكل ألف-١٠). وقد اعتُبِر الموقع مناسباً من زاوية الجيولوجيا وعلم الزلازل والأرصاد الجوية والهيدرولوجيا وهندسة وأخطار المواقع فيما يتعلق بالمراكز السكانية المحلية. وسيقبل المرفق براميل نقل مجمعات الوقود النووي المستعملة التي يجري تخزينها حالياً في كلٍّ من محطتي القوى النووية

---

[٩] يرد وصف آليات أخرى معمول بها حالياً لضمان الإمداد في طبعة عام ٢٠١٢ من استعراض التكنولوجيا النووية.

التابعتين لإسبانيا، كما سيقبل النفايات المزجّجة الناشئة من محطة القوى النووية فانديلوس والمخزّنة حاليا في فرنسا.

الشكل ألف-١٠ - تصوُّر لمرفق تخزين الوقود المستهلك المقرّر بناؤه في فيلادر دي كانياس.

٧٢- وفي الهند، يتواصل تشييد مرفق دورة وقود المفاعلات السريعة في كالباكام. ويجري حالياً في مرفق تصنيع الوقود المتقدم بمركز بهابها للبحوث الذرية في تارابور تصنيع أوتاد وقود موكس الخاصة بالمفاعل النموذجي السريع التوليد المزمع إقامته.

٧٣- وفي اليابان، أعلنت الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي في أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ أنها ستمضي قُدُماً في عملية تشييد محطة إعادة المعالجة التجارية في روكاشو بقدرة ٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة في السنة، التي كانت قد عُلِّقت نتيجة للزلزال والتسونامي في ١١ آذار/مارس ٢٠١١. ومن المقرر أن يتم الانتهاء من الأعمال الإنشائية في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٣.

٧٤- وفي جمهورية كوريا، أكمل المعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية تشييد مرفق PRIDE (المرفق الإيضاحي للمعالجة الحرارية الخاملة المتكاملة) في تموز/يوليه ٢٠١٢ كجزء من مرفق إيضاحي على نطاق هندسي لأغراض المعالجة الحرارية[١٠] لأنواع وقود الأكسيد المستهلكة. وقد بدأت في آب/أغسطس ٢٠١٢ اختبارات بدء تشغيل مرفق PRIDE، تليها اختبارات الأداء التشغيلي والوظيفي لأنظمة التشغيل والمرافق، المخطّط لها أن تنتهي في أوائل عام ٢٠١٣.

٧٥- وفي المملكة المتحدة، من المتوقع أن تكتمل بحلول عام ٢٠١٨ التعاقدات الحالية لإعادة المعالجة في محطة إعادة المعالجة الحرارية للأكاسيد (THORP) في سيللافيلد. وقد أكدت الهيئة المعنية بإخراج المنشآت النووية من الخدمة أنه سيتم إغلاق المحطة بعد ذلك لإخراجها من الخدمة بدلاً من الاضطلاع بتطوير البنية التحتية على النحو المطلوب لتمديد عمرها الافتراضي.

---

[١٠] المعالجة الحرارية تشير إلى أساليب غير مائية لإعادة معالجة الوقود النووي، حيث يتم استخراج المواد وصقلها بدون ماء عند درجات حرارة عالية.

التصرّف في النفايات المشعّة

٧٦- تَنتُج النفايات المشعة من استخدام التكنولوجيات النووية في مجال إنتاج الطاقة وأنشطة البحوث والتطبيقات الطبية والصناعية، وهي نتاج أيضاً لكلٍّ من الاستخدامات العسكرية المتوارثة والحالية. ويتطلب التصرف المأمون في النفايات المشعة قدرات تخزين كافية، كما يقتضي في نهاية المطاف التخلص من تلك النفايات. ومرافق التخلص من النفايات المشعة بجميع فئاتها إما أنها عاملة أو قيد التطوير في جميع أنحاء العالم. وحتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، كان هناك ٤٦٤ مرفقاً للتخزين و١٥٤ مرفقاً للتخلص من النفايات قيد التشغيل في جميع أنحاء العالم[١١] (الشكل ألف-١١).

الشكل ألف-١١ - مرفق HABOG لتخزين النفايات المتوسطة، هولندا.

تقديرات الرصيد العالمي

٧٧- يبلغ الرصيد العالمي من النفايات المشعة التي أُبلِغ عن وجودها في المخازن خلال عام ٢٠١١ (وهي آخر سنة تتوفّر بشأنها بياناتٌ) ما يقرب من ٦٨ مليون متر مكعّب[١٢] (الجدول ألف–٢). وقد قُدِّرت الكمية التراكمية للنفايات المشعة التي تم التخلص منها حتى عام ٢٠١١ بحوالي ٧٦ مليون متر مكعب، وهو ما يتضمن الضخّ في آبار عميقة لنحو ٢٩ مليون متر مكعب من النفايات السائلة، والتخلص مما يقرب من ٤٠٠٠ متر مكعب من النفايات الصلبة القوية الإشعاع، من تشيرنوبيل في المقام الأول. والتراكم السنوي للنفايات القوية الإشعاع التي تتم معالجتها ثابت إلى حد ما، إذ يقدَّر متوسط معدل التراكم بنحو ٨٥٠ متراً مكعباً سنوياً على مستوى العالم (لا يشمل ذلك الوقود المستهلك).

---

[١١] استناداً إلى المعلومات المقدّمة من الدول الأعضاء إلى قاعدة بيانات الوكالة للتصرف في النفايات المتاحة على الشبكة (NEWMDB)، ويمكن الوصول إليها على الموقع http://newmdb.iaea.org/.

[١٢] وُضِع هذا الرقم التقديري بالاستعانة بقاعدة الوكالة لبيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة NEWMDB ومصادر أخرى فيما يخص البلدان التي لا تقدّم تقارير إبلاغ إلى قاعدة البيانات المذكورة.

الجدول ألف-٢. التقديرات العالمية لرصيد النفايات المشعة في عام ٢٠١١ (أحدث البيانات)[١٣].

فئة النفايات	خزن[١٤] [أمتار مكعبة]	تخلص تراكمي [أمتار مكعبة]
نفايات ضعيفة الإشعاع جداً:	١٥٣ ٠٠٠[١٥]	١١٣ ٠٠٠
نفايات ضعيفة الإشعاع:	٥٦ ٦٦٣ ٠٠٠[١٦]	٦٤ ٧٩٢ ٠٠٠[١٧]
نفايات متوسطة الإشعاع:	٨ ٧٢٣ ٠٠٠	١٠ ٥٨٧ ٠٠٠
نفايات قوية الإشعاع	٢ ٧٤٣ ٠٠٠	٧٢ ٠٠٠[١٨]

المصادر: قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة (٢٠١٢)، والتقارير الوطنية الرسمية، والبيانات المتاحة على نطاق عام.

---

[١٣] الأرقام الواردة في الجدول ألف-٢ أرقام تقديرية وليست حصراً دقيقاً لكميات النفايات المشعة التي يجري التصرف فيها حالياً في جميع أنحاء العالم. وبالإضافة إلى ذلك، هناك تباينات كامنة في كميات التخزين المقدّرة من عام إلى آخر بسبب العوامل التالية: (أ) التغييرات في الكتلة والحجم أثناء عملية التصرف في النفايات؛ (ب) والتغييرات في تقارير الإبلاغ أو التصويبات التي تُدخِلها الدول الأعضاء على بياناتها الذاتية؛ (ج) وإضافة دول أعضاء جديدة إلى قاعدة البيانات.

[١٤] تُعالَج النفايات وتُكيّف ويتم إخضاعها لإجراءات مناولة مختلفة أثناء خزنها وقبل التخلص منها. ولذلك، فإن كتلة وحجم النفايات المشعة يتغيران بشكل مستمر أثناء عملية التصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها. وقد يؤدي ذلك إلى تباينات في الكميات المخزونة المقدّرة من سنة إلى أخرى.

[١٥] التقديرات المتعلقة بالنفايات الضعيفة الإشعاع جداً أقل بكثير من النفايات الضعيفة الإشعاع، وذلك لأن العديد من الدول الأعضاء التي لديها مخزونات كبيرة من النفايات لا تحدّد فئة للنفايات الضعيفة الإشعاع جداً. ومع ذلك، فإن العديد من هذه الدول الأعضاء تقوم حالياً بإعادة تقييم تعاريفها لفئات النفايات من أجل مواءمتها بصورة أفضل مع الفئات الموصى بها في *تصنيف النفايات المشعة* (IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, 2009)، وبالتالي فإن هذه التقديرات من المحتمل أن تصبح أكبر في المستقبل، مع انخفاض مُناظِر في فئة النفايات الضعيفة الإشعاع.

[١٦] التقديرات المتعلقة بالنفايات الضعيفة الإشعاع قيد التخزين لا تشمل ما يقرب من ٤x١٠ ٨ متر٣ من النفايات الضعيفة الإشعاع السائلة التي أُبلِغ عنها باعتبارها محفوظة في مستودعات خاصة غير معزولة عن البيئة المحيطة، وذلك لأن هذا لا يفي بتعريف الوكالة لمصطلح 'تخزين' كما هو موضّح في *مسرد الأمان الخاص بالوكالة* (٢٠٠٧). ولهذا السبب، فإن وضع هذه النفايات لا يزال غير محدّد فيما يتعلق بإدراجها في هذه التقديرات.

[١٧] التغّير الكبير في تقديرات التخلّص التراكمي من النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع مقارنةً بالتقرير السابق يرجع إلى إدراج تقديرات الاتحاد الروسي.

[١٨] هذا الحجم من النفايات القوية الإشعاع هو مزيج من عمليات التخلص السائل التي أبلغ عنها الاتحاد الروسي وحوالي ٤٠٠٠ متر مكعب من النفايات المشعة الصلبة التي أبلغت عنها أوكرانيا والتي يُعتبَر أنه تم التخلص منها مؤقتا إلى أن يتم التوصل إلى تصميم/مكان أو حل أكثر دواماً. أما التصرف في النفايات القوية الإشعاع الأوكرانية فكان نتيجة التنظيف الطارئ لمكان الحادث الذي وقع في الوحدة ٤ من محطة تشيرنوبيل للقوى النووية.

التطورات الوطنية بشأن خيارات التخلص

٧٨- تم تشييد عدد كبير من مرافق التخلص من النفايات ويجري تشغيلها اليوم فيما يخص فئات النفايات المنخفضة الإشعاع جداً والمنخفضة والمتوسطة الإشعاع، ومن المقرر أن تبدأ في المستقبل القريب الأعمال الإنشائية الخاصة ببعض مرافق التخلص من الوقود النووي المستهلك. ويشمل تشغيل مرافق التخلص من النفايات عمليات التخلص في خنادق من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً (على سبيل المثال في فرنسا وإسبانيا والسويد)، أو التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مناطق قاحلة (على سبيل المثال في الأرجنتين والهند وجنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً بالقرب من سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في الصين والجمهورية التشيكية وفرنسا والهند واليابان وسلوفاكيا وإسبانيا والمملكة المتحدة وأوكرانيا)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً تحت سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (على سبيل المثال في السويد وفنلندا)؛ والتخلص في حُفَر لدفن النفايات الضعيفة الإشعاع كما يجري في الولايات المتحدة الأمريكية؛ والمرافق الجيولوجية المخصّصة لتلقّي النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (على سبيل المثال في ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية). وتتفاوت خيارات التخلص من المواد المشعة الطبيعية المنشأ تبعاً للوائح التنظيمية الوطنية، حيث تتراوح بين مرافق التخلص في خنادق إلى المرافق المصمّمة هندسياً تحت سطح الأرض (على سبيل المثال في النرويج).

٧٩- وتشمل خيارات التخلص من المصادر المشعة المختومة المهمَلة التخلص المشترك مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة، أو التخلص في حُفَر مخصّصة للدفن، كما هو قيد النظر في عدة بلدان منها غانا وماليزيا والفلبين وجنوب أفريقيا.

٨٠- وقد اتُّخِذت خطوات نحو ترخيص مرافق للتخلص الجيولوجي من النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك في فنلندا وفرنسا والسويد.

٨١- وفي بلجيكا، كان بيان حالة الأمان الذي أعدّته الوكالة البلجيكية للنفايات المشعة والمواد الانشطارية المثراة فيما يخصّ خطتها للتخلص بالقرب من سطح الأرض في ديسيل موضوعاً لاستعراض نظراء دولي نظّمته وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي؛ وكانت النتائج التي توصّل إليها الاستعراض، الذي صدر في أيلول/سبتمبر ٢٠١٢، إيجابية عموماً.

٨٢- وفي كندا، يجري النظر في تطوير ثلاثة مرافق للتخلص الجيولوجي وهي: المرفق الكائن في موقع بروس للنفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع الناتجة عن مؤسسة أونتاريو لتوليد القوى، وموقع مختبرات تشوك ريفر الجاري دراسته فيما يخص النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع، وموقع ثالث، غير محدّد حتى الآن، يخص مستودع الوقود النووي المستعمَل ومركز الخبرة في كندا. وقد اكتملت جزئياً الأعمال الهندسية والتصميمية للمرفق الكائن في موقع بروس. وتتحقّق شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة حالياً من مدى ملاءمة موقع تشوك ريفر . وفيما يتعلق بالموقع الثالث، في ٣٠ أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ علّقت الهيئة المعنية بالتصرّف في النفايات النووية التابعة لهذا البلد مرحلة 'إبداء الاهتمام' من قِبَل الجهات الراغبة في الانخراط في عملية اختيار الموقع الخاص بمستودع الوقود النووي المستعمل ومركز الخبرة في كندا، وذلك من أجل تركيز الجهود على إجراء الدراسات التفصيلية المطلوبة في الجهات التي سبق أن أبدت رسمياً اهتمامها في ذلك التاريخ أو قبله.

٨٣- وتتمثل الخطة المتوسطة الأجل في الصين للتصرف في النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع بها في أن تكون لديها خمسة مواقع إقليمية للتخلص قيد التشغيل بحلول عام ٢٠٢٠، يقدّر إجمالي قدرتها على التخلص بحوالي ٠٠٠ ٠٠٠ ١ متر مكعب. واثنان من هذه المواقع، أحدهما يقع بالقرب من يومين في مقاطعة غانزو شمال غرب البلد فيما يقع الآخر على مقربة من محطة دايا باي للقوى النووية في مقاطعة غواندونغ الجنوبية، قيد التشغيل وتبلغ قدراتهما الحالية ٠٠٠ ٢٠ متر مكعب و ٠٠٠ ٨٠ متر مكعب على التوالي، مع إمكانية التوسع في المستقبل إلى ٠٠٠ ٢٠٠ متر مكعب و ٠٠٠ ٢٤٠ متر مكعب. أما الموقع الثالث، الكائن في جنوب غرب الصين، فهو تحت الإنشاء. ولم يبدأ العمل بعد في الموقعين المتبقّيين بشمال وشرق الصين.

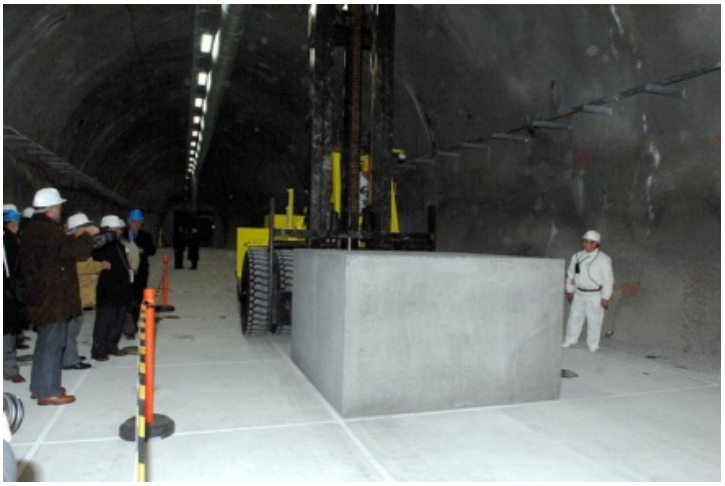
٨٤- وفي فنلندا، تمضي شركة بوزيفا قُدُماً في تشييد مرفق ONKALO للبحوث تحت سطح الأرض. وفي شهر كانون الأول/ديسمبر، تقدّمت بطلب إلى الحكومة الفنلندية للحصول على ترخيص بتشييد مستودع يخص موقع أولكيلووتو، بقصد أن تبدأ عمليات التخلص النهائي في عام ٢٠٢٠.

٨٥- وفي فرنسا، تستعدّ الوكالة الوطنية للتصرف في النفايات المشعة (Andra) للمرحلة الصناعية من مشروعها الخاص بالتخلص العَكوس من النفايات المتوسطة والقوية الإشعاع، Cigéo، والتي ستدخل في الخدمة في عام ٢٠٢٥، كما أنها أجرت مراجعة للجدوى وقامت بعملية ذات طابع رسمي ترمي إلى إشراك أصحاب المصلحة العامة قبل تقديم طلب الترخيص. كما نشرت وكالة Andra طبعة عام ٢٠١٢ من بيان الرصيد الوطني للنفايات المشعة، بما في ذلك خصائص وحجم وأماكن النفايات الوطنية القائمة.

٨٦- وفي ألمانيا، أعلنت الحكومة في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٢ أن جميع أعمال التنقيب والمسح الجارية في مرفق غورليبين لتخزين النفايات الذرية بهدف تحويل ذلك الموقع المؤقت إلى موقع دائم ستتوقف إلى حين اتخاذ قرار سياسي بشأن سبل المضي قُدُماً فيما يخص مرفق غورليبين – إما مواصلة التنقيب أو الوقف المؤقت أو الإغلاق.

٨٧- وفي مرفق التخلص في باتاباتي بالمجر، المصمّم لتلقّي ٠٠٠ ٤٠ متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الناتجة من عمليات تشغيل محطات القوى النووية، تم الانتهاء من الأعمال الإنشائية الخاصة بالمنحدرات المائلة المؤدّية إلى المستودع (الشكل ألف-١٢)، وأنفاق الخدمات، فضلاً عن أول قبوين للتخلص. وخلال حفل الافتتاح الذي أقيم في شهر كانون الأول/ديسمبر، وُضِعت في المرفق أول مجموعة للتخلص من النفايات تتألّف من تسعة براميل للنفايات مغطّاة بالخرسانة (الشكل ألف-١٣). وينصّ مفهوم العمليات على القيام بصورة موازية بتشييد المزيد من أقبية التخلّص في ذات الوقت الذي توضع فيه النفايات داخل الأقبية القائمة.

الشكل ألف-١٢ - المنحدر المؤدّي إلى المرفق الوطني للتخلص من النفايات المشعة في باتاباتي، المجر.



الشكل ألف-١٣ - وضع أول مجموعة للتخلص من النفايات داخل مرفق التخلص في باتاباتي، المجر.

٨٨- وفي جمهورية كوريا، طبقاً للجدول الزمني الراهن، من المقرّر الانتهاء في حزيران/يونيه ٢٠١٤ من إنشاء مرفق غيونغجو للتخلّص، المصمّم للتخلّص من ١٠٠ ٠٠٠ برميل من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع داخل صوامع.

٨٩- وقد أنجزت الوكالة المعنية بالتصرف في النفايات المشعة في ليتوانيا البحوث الخاصة بالمواقع، وتعكف على دراسة خيارات التصميم المتعلقة بمرفق مزمع إقامته للتخلص بالقرب من سطح الأرض، تبلغ قدرته على التخلص حوالي ١٠٠ ٠٠٠ متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصيرة العمر.

٩٠- وفي الاتحاد الروسي، أقرّت الحكومة ثلاث وثائق أساسية بشأن التصرف في النفايات المشعة لدعم الأنشطة القائمة في مجال الطاقة النووية، وأعمال التنظيف، واستصلاح المواقع الملوثة، واستخراج ومعالجة المواد المعدنية والعضوية التي تحوي نسبة عالية من النويدات المشعة الطبيعية. كما بدأ العمل في إقامة مرافق للتخلص من النفايات المشعة. ويجري وضع التصاميم اللازمة لإقامة مختبر تحت الأرض في سلسلة الجبال الجرانيتية نيزهنيكانسكي (على عمق ٥٠٠ متر) في إقليم كراسنويارسك بسيبيريا. وستتم في هذا المختبر دراسة إمكانية التخلص من النفايات القوية والمتوسطة الإشعاع الطويلة العمر في الموقع. ومن المقرّر أن تبدأ عمليات تشغيل مرفق التخلص في عام ٢٠٢١. وبالإضافة إلى ذلك، تم القيام بأعمال التصميم الأولية (الدراسات الجيولوجية والهندسية) فيما يخص مرفقاً للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع القصيرة العمر في الشمال الغربي من الاتحاد الروسي. وبدأ في عام ٢٠١١ تشغيل أول مرفق في هذا البلد للتخزين الجاف بعيداً عن المفاعلات، ضمن المرحلة الأولى للتخزين الجاف في موقع المجمّع التعديني والكيميائي، في زهيليزنوغورسك، كاراسنويارسك.

٩١- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٢، انتهى فريق دولي معيَّن من قِبَل وكالة الطاقة النووية من إجراء مراجعة إيجابية لطلب الترخيص الخاص بمحطة التخلص الجيولوجي والتغليف في أوسكارشام، المقدّم من الشركة السويدية للتصرف في الوقود النووي والنفايات النووية، التي تتوقّع أن تبدأ عمليات تشغيل المحطة بحلول عام ٢٠٢٥.

٩٢- وفيما يتعلق بمرفق أوكرانيا الخاص بالتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في بورياكوفكا، الذي تم تطويره عقب حادث تشيرنوبيل، من المقرّر توسيع قدرة هذا المرفق بمقدار ١٢٠ ٠٠٠ متر مكعب تضاف إلى قدرته الحالية التي تقترب من ٧٠٠ ٠٠٠ متر مكعب، وذلك في إطار مشروع لإعادة الإعمار تموّله المفوضية الأوروبية.

٩٣- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأت في نيسان/أبريل ٢٠١٢ عمليات تشغيل مرفق جديد للتخلص من النفايات المشعة في مقاطعة أندروز، بولاية تكساس. ويقبل هذا المرفق النفايات الضعيفة الإشعاع من ولايتي تكساس وفيرمونت ومن الحكومة الاتحادية. ويضمّ المرفق، الذي يتخذ شكل خندق ويقع في أراضٍ ضحلة، مستودعين متجاورين بتصميم متماثل، أحدهما للنفايات التجارية والآخر لنفايات الحكومة الاتحادية.

٩٤- وقد أُجري عدد من العمليات الناجحة لإزالة مصادر مشعة مختومة مهمَلة من المباني الخاصة بالمستخدمين وجعلها تحت السيطرة، وذلك عن طريق نقلها إما إلى مرفق وطني لتخزين النفايات المشعة أو إلى مؤسسة أخرى تتوفّر فيها ظروف تخزين مناسبة. وبمساعدة مباشرة من الوكالة، تمت في هندوراس استعادة ١٢٥ مصدراً من المصادر المشعة المختومة المهمَلة، بما في ذلك جهاز قديم للتشعيع بأشعة غاما، ونُقِلت إلى مرفق التخزين الوطني. وبمساعدة مباشرة من الوكالة أيضاً، جرت في شباط/فبراير ٢٠١٢ استعادة جهازين للتشعيع بأشعة غاما، وتم تطهيرهما وتحديد خصائصهما وتغليفهما ونقلهما من مستودع ملوث إلى مؤسسة تتوفر فيها ظروف تخزين أكثر أماناً في كوستاريكا. ولضمان تخزين أكثر أماناً على المدى الطويل، تم في هندوراس وكوستاريكا في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٢ تكييف العديد من المصادر المهمَلة للتشعيع الداخلي بالراديوم-٢٢٦ والسيزيوم-١٣٧. وعلاوةً على ذلك، جرت بنجاح في أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ إعادة جهاز تشعيع هندي من أوروغواي إلى بلد المنشأ، كان يتضمّن ١٥ مصدراً من المصادر المهمَلة المشعة العالية النشاط، وذلك بمساعدة مباشرة من الوكالة، وبالتعاون مع كلٍّ من صندوق حظر الانتشار ونزع السلاح في الولايات المتحدة والمبادرة العالمية لتقليص التهديدات.

النفايات المشعة الموروثة

٩٥- يجري حالياً الاضطلاع بأعمال مهمة للقضاء على الإرث النووي للحرب الباردة. وعلى مدى أكثر من خمسة عشر عاماً، برهن فريق خبراء الاتصال التابع للوكالة والمعني بالمبادرات الدولية للإرث النووي في الاتحاد الروسي على فعاليته كمحفل لتبادل المعلومات وتنسيق برامج الإرث النووي في الاتحاد الروسي. وفي عام ٢٠١٢، كان أحد أهم إنجازاته النجاح في شهر تشرين الثاني/نوفمبر في تفريغ وقود مفاعل خاص بغواصة ويحتوي على مبرِّد معدني سائل. وقام الاتحاد الروسي، بمساعدة جوهرية من الشركاء في الفريق المذكور، بتفريغ وقود وتفكيك معظم الغواصات النووية التي تم إخراجها من الخدمة والبالغ عددها ٢٠٠ غواصة، ولم يتبقَّ منها سوى ٥ غواصات لم يتم تفكيكها بعد. ويجري حالياً ختم وحدات مفاعلات الغواصات التي أُفرِغ وقودها مع وضعها في مرافق للتخزين الطويل الأجل. وكان قد تم الانتهاء من أحد هذه المرافق في عام ٢٠١١ بمنطقة الشمال الغربي من الاتحاد الروسي. وفي أيار/مايو ٢٠١٢ تم تدشين مرفق ثانٍ في أقصى الشرق من الاتحاد الروسي، وتلقّى في شهر أيلول/سبتمبر أول مقصورة تضم مفاعلاً لأغراض التخزين (الشكل ألف-١٤). ويجري تنفيذ برنامج مماثل في الولايات المتحدة الأمريكية، التي فكّكت ١١٤ قطعة من الغواصات والسفن النووية.

الشكل ألف-١٤ - تفكيك غواصة نووية.

٩٦- وتتصدّر عمليات التصرّف المأمون وإزالة الوقود النووي المستهلك والنفايات من قواعد بحرية سابقة قائمة الأولويات حالياً على جدول أعمال الفريق المذكور. وهناك مركزان إقليميان لتكييف وتخزين النفايات المشعة تحت الإنشاء في منطقتي الشمال الغربي وأقصى الشرق بالاتحاد الروسي. كما يُنفَّذ بنجاح برنامج دولي لاستعادة مولّدات كهربائية حرارية قوية تعمل بالنظائر المشعة كانت تُستخدَم لأغراض الملاحة (كبطاريات لمنارات بحرية مثلاً) على طول ساحل الاتحاد الروسي. وقد استعيدت غالبية المولّدات المذكورة في هذا البلد، البالغ عددها ١٠٠٧ مولّدات، ولم يتبقَّ منها سوى ٧٥ مولّداً.

التصرّف في النفايات المشعّة: التصدّي لحادث فوكوشيما داييتشي

٩٧- أدّى حادث فوكوشيما داييتشي إلى إيجاد تحديات جسيمة تتعلق بالتصرف في النفايات المشعة، الموجودة داخل الموقع والمنتشرة كذلك على مساحة شاسعة خارج الموقع (الشكل ألف-١٥). وتشمل النفايات الموجودة داخل الموقع كميات كبيرة من المياه المالحة الشديدة التلوث في مباني المفاعلات والتوربينات، بالإضافة إلى مجموعة متنوعة من النفايات الصلبة مثل الحطام وقطع الأشجار والتربة والمعادن، تحتوي أساساً على نويدات السيزيوم المشعة ولكنها تحوي أيضاً تركيزات كبيرة من نواتج انشطار أخرى، وربما مقادير ضئيلة من عناصر ما بعد اليورانيوم. أما النفايات الموجودة خارج الموقع فتشمل كميات كبيرة من الحطام الملوث جرّاء الدمار الذي سبّبته موجات التسونامي، مضافاً إليها كميات كبيرة جداً من المواد الملوثة جرّاء أنشطة مزمعة على نطاق واسع بهدف التنظيف/الاستصلاح في المناطق الحضرية والزراعية والحراجية والمائية الأكثر تضرّراً من انبعاثات السيزيوم المشع (الشكل ألف-١٦).

٩٨- وتجري بشكل مستمر معالجة المياه القوية الإشعاع التي تراكمت في مباني المفاعلات والتوربينات لإزالة السيزيوم داخل مرافق للتنقية أقيمت من خلال التعاون على الصعيدين المحلي والدولي. وتم تخزين المياه المعالَجة داخل خزانات أو أعيد استعمالها لتبريد قلوب المفاعلات التالفة بعد إزالة الملوحة. وحتى تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٢، وصل الحجم التراكمي للمياه المعالَجة إلى حوالي ٥٠٠ ٠٠٠ متر مكعب. وتم تركيب مرافق إزالة متعددة النويدات لإزالة عناصر مشعة أخرى غير السيزيوم، ويجري حالياً تجهيزها لبدء عمليات التشغيل. وتشمل التحديات الجارية الرئيسية في هذا المجال تخزين كميات كبيرة جداً من المياه المعالَجة واستمرار تسرّب المياه الجوفية داخل المباني، مما أدى إلى تزايد أحجام المياه الملوثة المطلوب معالجتها وتخزينها. وقد تم تخزين النفايات الصلبة المتراكمة في الموقع داخل مرافق للتخزين المؤقت، ويجري أخذ عينات وتحليلها لتحديد خصائص النفايات وخيارات التصرف فيها لاحقاً.

٩٩- وتنطوي إزالة حطام الوقود من المفاعلات المتضرّرة ('تفريغ الوقود') على عدد من التحديات التكنولوجية. وسوف يلزم القيام بهذه الأعمال في ظل ظروف تنطوي على جرعات إشعاعية عالية للغاية داخل مباني المفاعلات. وسيتطلب تفريغ الوقود بالتالي تطوير ونشر أدوات خاصة، فضلاً عن مناولة المعدات عن بعد واستخدام تقنيات متقدمة. وسيقتضي الأمر أيضاً تطوير أجهزة يتم التحكم فيها عن بعد لدراسة حالة التلوث بدقة، أو تقنيات يتم تشغيلها عن بعد وبطريقة آلية فيما يخص أنشطة إزالة التلوث (مثل الغسيل، والتنظيف/الكنس، والتنظيف بالفرشاة/كشط الأسطح، والطلاء/رش مواد لإزالة التلوث)، وذلك لمنع تعرّض العمال على نحو لا لزوم له. ومن المقرّر الاضطلاع بأنشطة بحث وتطوير تتعلق بهذه الأجهزة والتكنولوجيات من خلال تعاون متعدد الأطراف فيما بين الخبراء والمؤسسات على الصعيد الدولي.

١٠٠- وفي ١ كانون الثاني/يناير ٢٠١٢، دخل قانون عام ٢٠١١ بشأن التدابير الخاصة المتعلقة بمعالجة التلوث الإشعاعي حيز التنفيذ بالكامل في اليابان. ويجري بناءً على هذا القانون الاضطلاع بعمليات التخطيط والتنفيذ لإزالة التلوث خارج الموقع، فضلاً عن جمع النفايات ونقلها وتخزينها بشكل مؤقت والتخلص النهائي منها. كما تُجرى أنشطة لإزالة التلوث فيما يصل مجموعه إلى ١٠٤ من البلديات. ويشمل ذلك المناطق الواقعة في نطاق ٢٠ كيلومتراً من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، أو المناطق التي يتجاوز فيها معدل التعرض السنوي لجرعات إشعاعية ٢٠ ملي سيفرت. وحتى آب/أغسطس ٢٠١٢، كانت ٧٨ بلدية من أصل ١٠٤ بلديات قد انتهت من أنشطة إزالة التلوث بها. كما يجري بذل جهود مكثفة لتأمين مرفق للتخزين المؤقت، وذلك بهدف إيجاد مكان يصلح لإقامة مثل هذا المرفق خلال عام وبدء عمليات التشغيل في غضون ثلاث سنوات. ومن المتوقّع أن يتم الاضطلاع بالتخلص النهائي في غضون ٣٠ عاماً من بدء التخزين المؤقّت.

الشكل ألف-١٥ - محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية، تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١.

الشكل ألف-١٦ - التخزين المؤقت للتربة التي أزيلت في مشروع نموذجي للاستصلاح بمدرسة Tominari الابتدائية، مدينة Date، تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١.

الإخراج من الخدمة

١٠١- حتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، كان قد تم إغلاق ١٤٢ مفاعلاً من مفاعلات القوى بشكل دائم في جميع أنحاء العالم. ويشمل ذلك ١٨ مفاعلاً للقوى إما تم الإعلان عن دخولها مرحلة الإخراج من الخدمة أو أُغلِقت بشكل دائم في عام ٢٠١٢. وإجمالاً، تم الآن تفكيك ١٦ مفاعلاً للقوى بالكامل، وهناك ٥٢ مفاعلاً آخر في طور التفكيك، ويجري الاحتفاظ بـ٥٩ مفاعلاً في حالة تطويق مأمون أو يُنتظَر البدء في تفكيكها نهائياً، كما توجد ٣ مفاعلات مُقبَرة، و١٢ مفاعلاً لم توضع بعد استراتيجية محدّدة لإخراجها من الخدمة.

١٠٢- وقد أُخرِج من الخدمة الآن أكثر من أربعمائة من مفاعلات البحوث والمجمّعات الحرجة أو هي في طور التفكيك. كما تم إخراج عدة مئات من المرافق النووية الأخرى، مثل مرافق التصرف في النفايات المشعة أو مرافق دورة الوقود النووي، أو تخضع حالياً للتفكيك.

١٠٣- وجرى إحراز تقدم كبير في تنفيذ مشاريع لإخراج مفاعلات للقوى من الخدمة في كلٍّ من فرنسا وإسبانيا والمملكة المتحدة وأوكرانيا والولايات المتحدة الأمريكية. ومن بين أمثلة الإنجازات التقنية، التجميع الجاري للاحتواء المأمون الجديد الخاص بالوحدة الرابعة من محطة تشيرنوبيل للقوى النووية وتفكيك المكونات الداخلية للمفاعلات[١٩] في محطة José Cabrera للقوى النووية في إسبانيا (الشكلان ألف-١٧ وألف-١٨). ومع ذلك، على الرغم من التقدم المحرز في العديد من البلدان، يحتاج الأمر إلى التعجيل بتنفيذ مشاريع الإخراج من الخدمة في بعض الدول الأعضاء التي تكون البنى التحتية النووية فيها أقل تطوراً.

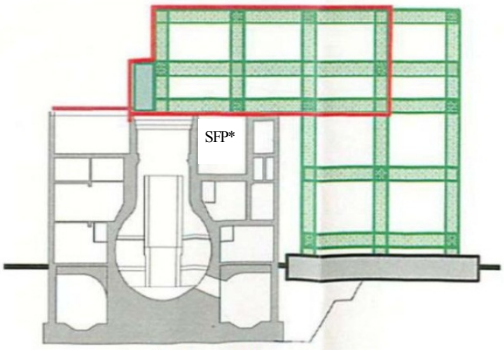
الشكل ألف-١٧ - تفكيك المكونات الداخلية للمفاعل (يساراً) في محطة خوسيه كابريرا للقوى النووية (يميناً) (الصورة: المؤسسة الوطنية للنفايات المشعة).

الشكل ألف-١٨ - تجميع الاحتواء المأمون الجديد الخاص بالوحدة الرابعة في محطة تشيرنوبيل للقوى النووية (الصورة: محطة تشرنوبيل للقوى النووية).

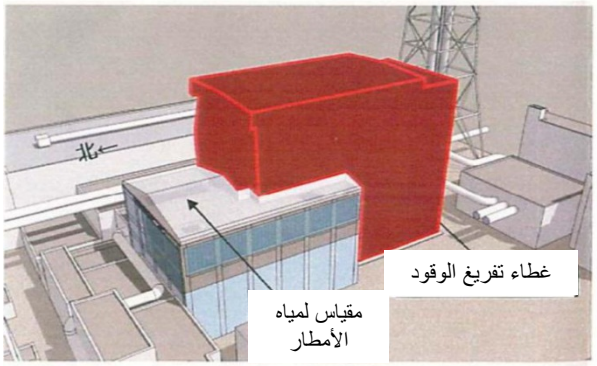
[١٩] 'المكونات الداخلية للمفاعل النووي' هي هياكل رئيسية تقع داخل وعاء المفاعل وتقوم بوظيفة واحدة أو أكثر كدعم قلب المفاعل، والمحافظة على تراصف الوقود، وتوجيه انسياب المبرِّد الابتدائي، وتوفير دروع لحماية وعاء المفاعل من الإشعاعات، وتوجيه الأجهزة المركّبة داخل القلب.

١٠٤- وما زالت هناك تحديات هائلة قائمة فيما يتصل بالإخراج من الخدمة، مثل توفّر التمويل اللازم والخيارات المتعلقة بالتخلص من النفايات، إلى جانب إمكانية الحصول على الموارد التقنية والبشرية المناسبة، وخاصةً في حالة محطات القوى النووية التي تم إغلاقها بعد حادث شديد. ومن بين الأمثلة الأكثر وضوحاً لمثل هذه المرافق النووية، العملية الجارية لإخراج محطة تشيرنوبيل للقوى النووية من الخدمة، وإخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة في المستقبل. ولا يزال انعدام وجود إطار قانوني ورقابي مناسب يشكّل أيضاً أحد العوائق المهمة في بعض البلدان.

١٠٥- وفي اليابان، تم في آب/أغسطس ٢٠١٢ تحديث خارطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل لإخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة. وتمت صياغة تقرير بعنوان *الوضع المرحلي لخارطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل نحو إخراج الوحدات ١-٤ من محطة دايتشي فوكوشيما للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة*[٢٠]، صدر عن إدارة المقر العام للتصدي للطوارئ النووية بالاشتراك مع المجلس المعني بالتصدي المتوسط والطويل الأجل التابع للشركة المذكورة، متضمّناً وصفاً لإطار جميع الأنشطة اللازمة لإخراج المحطة من الخدمة وعمليات التصرف في النفايات المشعة المرتبطة بها (الشكل ألف-١٩).



مخطط لمقطع مستعرض



صورة من المبنى لغطاء تفريغ الوقود

* SFP: حوض الوقود المستهلك

الشكل ألف-١٩ - غطاء حماية لإزالة الوقود المستهلك من حوض الوقود المستهلك في فوكوشيما داييتشي-٤ .

[٢٠] http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20120625_01a.pdf.

ألف-٤- الأمان

١٠٦- في ٢٠١٢، تركزت المناقشات بشأن أمان محطات القوى النووية أساساً على تحديد وتطبيق الدروس التي يمكن تعلُّمها من حادث محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية الذي وقع في آذار/مارس ٢٠١١. وعلى الرغم من وجود دروس إضافية ما زال ينبغي تعلُّمها، فقد وُضعت بالفعل خطط عمل تطبق الدروس الأولية المستفادة من الحادث ويجري تنفيذها على الصعيدين الوطني والدولي. واعتمد المؤتمر العام في أيلول/سبتمبر ٢٠١١ خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي التي تضع برنامجَ عمل يهدف إلى تعزيز الإطار العالمي للأمان النووي. وتحدد خطة العمل ١٢ إجراءً رئيسياً.[٢١] ويمكن تعلُّم دروس أخرى، وعند الاقتضاء إدراجها ضمن هذه الإجراءات من خلال تحديث خطة العمل.

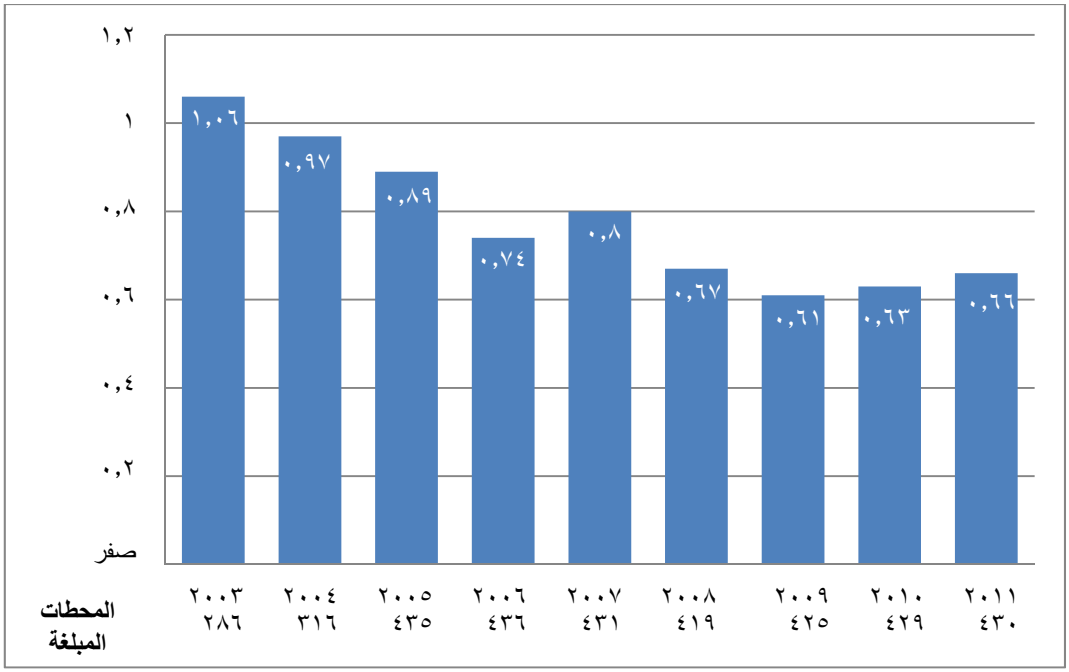
١٠٧- وفي عام ٢٠١٢، عقدت الوكالة ثلاثة اجتماعات خبراء دوليين تتعلق بخطة العمل، وهي: أمان المفاعلات والوقود المستهلك على ضوء الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، المعقود في آذار/مارس، وتعزيز الشفافية وفعالية الاتصال في حالة وقوع طارئ نووي أو إشعاعي، المعقود في حزيران/يونيه، والحماية من حالات الزلازل والتسونامي الشديدة على ضوء الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، المعقود في أيلول/سبتمبر. وعلاوة على ذلك، عقدت اليابان برعاية مشتركة مع الوكالة مؤتمر فوكوشيما الوزاري بشأن الأمان النووي من ١٥ إلى ١٧ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢، وساعد المؤتمر على المساهمة في تعزيز الأمان النووي في جميع أنحاء العالم عن طريق تبادل المزيد من المعارف والدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي النووي مع المجتمع الدولي، على مستوى الوزراء والخبراء.

١٠٨- وعلى الصعيد التشغيلي، لا يزال مستوى أمان محطات القوى النووية عالياً في جميع أنحاء العالم، كما يتضح من مؤشرات الأمان التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغلين النوويين. ويبين الشكل ألف-٢٠ العدد الإجمالي لحالات الإيقاف الطارئ غير المخطط لها، أو الإغلاق، لكل ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل الحرج لمفاعلات القوى. ويشيع استخدام هذا العدد كمؤشر للنجاح في تحسين أمان المحطات. وكما هو مبيّن في الشكل، فقد تحقّقت في السنوات الأخيرة تحسينات مطّردة، على الرغم من أنها ليست هائلة بقدر تلك التي تحققت خلال التسعينات. وتتصل الزيادة التي حدثت من عام ٢٠١٠ إلى عام ٢٠١١ بكبر عدد حالات الإيقاف الطارئ غير المخطط لها الناتجة من الزلزال الذي حدث في اليابان في آذار/مارس ٢٠١١.

١٠٩- ويمكن الاطّلاع على معلومات إضافية حول الأمان النووي في وثيقة *استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٣* أو في *التقرير السنوي للوكالة لعام ٢٠١١*.

---

[٢١] يمكن الاطّلاع على نص خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي على الموقع الإلكتروني التالي:
http://www.http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/Arabic/gc55-14_ar.pdf



الشكل ألف-٢٠- العدد الإجمالي لحالات الإيقاف الطارئ غير المخطط لها، شاملاً حالات الإيقاف الآلية واليدوية على السواء، التي تحدث لكل ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل الحرج لمفاعل القوى. المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة، http://www.iaea.org/pris.

باء- البيانات الذرية والنووية[٢٢]

١١٠- البيانات النووية والذرية الدقيقة حاسمة الأهمية لجميع البحوث والابتكارات النووية. وهذه البيانات ضرورية للعديد من التطبيقات، مثل القوى النووية (الانشطار)، ومفاعلات البحوث، والاندماج النووي، والطب، والاختبارات غير المتلفة، والرصد البيئي.

١١١- وتضطلع مراكز البيانات الإقليمية في جميع أنحاء العالم بأعمال البيانات النووية. ويوجد أحد المراكز الأساسية في الوكالة؛ ومن المراكز الأخرى مصرف بيانات وكالة الطاقة النووية في باريس، فرنسا، ومركز البيانات النووية الروسي في أوبنينسك، والمركز الوطني للبيانات النووية التابع للولايات المتحدة في مختبر بروكهافن الوطني. وتنسق الوكالة أعمال شبكتين تربطان بين هذه المراكز، وهما الشبكة الدولية لمراكز بيانات التفاعلات النووية والشبكة الدولية لمقيّمي بيانات التكوين والاضمحلال النوويين. وتتعامل الشبكة الدولية لمراكز بيانات التفاعلات النووية أساساً مع قاعدة البيانات التجريبية المتعلقة بالتفاعلات النووية، في حين تشرف الشبكة الدولية لمقيّمي بيانات التكوين والاضمحلال النوويين على ملف البيانات المقيّمة للإنشاءات النووية وتضطلع بالتقييمات الأفقية ذات الصلة. وتوفر قواعد البيانات هذه، التي يتم تحديثها باستمرار، مدخلات أساسية للبحث والتطوير في مجال العلوم والتكنولوجيا النووية، بالنسبة لتطبيقات الطاقة وتطبيقات غير الطاقة على السواء.

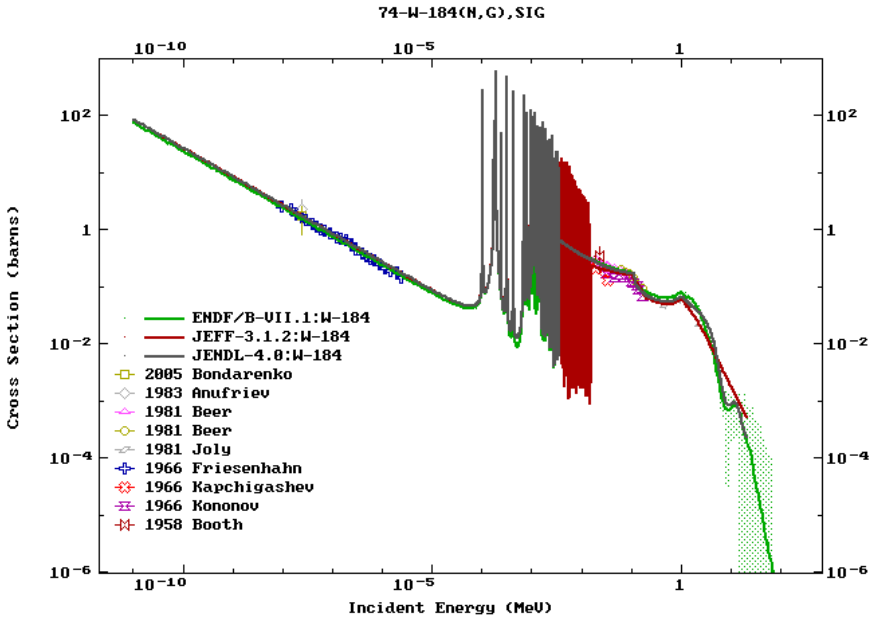
---

[٢٢] ابتداءً من تقرير استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢، يتم تناول التطورات في الأنشطة الانشطارية والاندماجية المتقدمة كل سنتين، بالتناوب مع التطورات المتعلقة بالبيانات الذرية والنووية. وتتيح لنا هذه الزيادة في التركيز بيان الاتجاهات والتطورات المهمة بتفاصيل أكثر.

١١٢- وخلال العام الماضي، نظرت الأوساط الدولية المعنية بالبيانات في إدخال تغيير على شكل تخزين البيانات النووية. وتسمح الامكانيات التقنية الحالية بتغيير الشكل القياسي من الشكل النصّي العريق الحالي القائم على 'البطاقات المثقّبة' إلى لغة مركَّبة حديثة مثل لغة الترميز الموسَّعة (إكس إم إل). وإذا تمت الموافقة على هذا التغيير فسيكون تجديداً مهما.

١١٣- وأبرزت الندوة الدولية بشأن قياس جرعات المفاعلات، التي عُقدت في الولايات المتحدة الأمريكية في أيار/مايو ٢٠١١، أهمية بيانات قياس الجرعات للتمكين من التحديد الدقيق للأطياف والتدفقات النيوترونية. وفي حين أن قاعدة بيانات الملف الدولي لقياس جرعات المفاعلات في الوكالة وفَّرت هذا المعيار لسنوات عديدة، فقد حلّ محل هذا الملف مؤخراً ملف قياس جرعات جديد، هو الملف الدولي لقياس جرعات المفاعلات والاندماج، الذي أعدّته أيضاً الوكالة، والمصمّم ليناسب مجموعة أوسع من التطبيقات، من بينها الاندماج. ويُعتزم أن يتم التحقق من صحة الملف الدولي لقياس جرعات المفاعلات والاندماج وتحسينه حسب الاقتضاء خلال السنوات القليلة المقبلة، ولا سيما من خلال الأعمال التي تنسقها الوكالة.

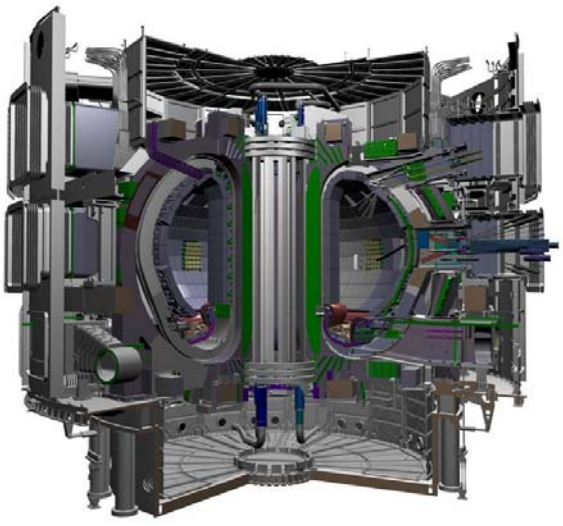
١١٤- ويستعمل المستخدمون بيانات الملفات المقيَّمة كمدخلات في الشفرات من أجل تصميم الأجهزة وإعداد بيانات حالات الأمان والقيام بأنشطة العلوم الأساسية. وخلال عامي ٢٠١١ و٢٠١٢، نُشرت ثلاثة إصدارات جديدة من هذه الملفات على نطاق العالم، وهي: ENDF/B-VII.1 (الولايات المتحدة الأمريكية)، وJEFF-3.1.2 (أوروبا)، وJENDL-4.0 (اليابان). ومن المتوقع أن يتم خلال السنوات القليلة المقبلة التحقّق من صحة هذه الملفات واختبارها على نطاق واسع. وسيساعد ذلك على تحديد أي عيوب، وسيُجرى مزيد من التجارب والحسابات للمساعدة على إعداد صيغ محسَّنة من الملفات. ويرد في الشكل باء-١ مثال للبيانات، بما في ذلك بيانات عدم اليقين، بشأن تفاعل أَسر النيوترونات على التنغستين، مستمدّ من قواعد البيانات الثلاث. وقد أُعدّ هذا الرسم التخطيطي بواسطة برامج حاسوبية طوّرتها الوكالة للتمكين من إجراء مقارنات بصرية أفضل وتحسين نشر البيانات النووية المستمدّة من مجموعة واسعة من مصادر البيانات.



الشكل باء-١ - مثال للبيانات المستمدّة من ثلاث مكتبات للبيانات المقيَّمة الحديثة مع مجموعة مختارة من البيانات التجريبية المستمدّة من قاعدة البيانات التجريبية المتعلقة بالتفاعلات النووية. وتبيّن المنطقة المظلّلة على اليمين كيف يمكن تمثيل معلومات عدم اليقين المستمدّة من الملف ENDF/B-VII.1.

١١٥- وقد بدأت ملفات البيانات المقيَّمة المذكورة أعلاه في الوصول إلى درجة من النضج أخذ فيها الكثير من البيانات يتقارب. غير أنه لا تزال هناك عدة مجالات يتم التعرّف فيها على أوجه قصور، ولكن أوجه القصور هذه تكون عادةً ذات نطاق يجعل من الصعب معالجتها بواسطة مشروع تقييمي واحد. ويُعتبر التعاون الدولي حلاً، وقد تحقّق الكثير بالفعل من خلال الأنشطة التعاونية الخاصة بتقييم البيانات النووية والتي تضطلع بها وكالة الطاقة النووية، التي نشرت ٣٠ تقريراً. وقد اقتُرِح أن يتم توسيع هذه الأنشطة توسيعاً كبيراً من خلال نموذج عمل جديد لتعجيل إحراز تقدّم في مجال البيانات المقيَّمة عن التفاعلات النووية يسمى 'التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة'. وسيُنظر في البداية في سلسلة من ستّة نظائر ذات أولويّة، وهي الهيدروجين-١ والأوكسيجين-١٦ والحديد-٥٦ واليورانيوم-٢٣٥، ٢٣٨ والبلوتونيوم-٢٣٩. ومن المقرّر أن يوفّر ذلك تقييمات نهائية يمكن أن تعتمدها جميع المشاريع ويمكن أن تتناول في المستقبل، تحت إدارة هيئات دولية مثل وكالة الطاقة النووية والوكالة، مجالات من البيانات النووية أوسع كثيراً.

١١٦- والاندماج مصدر محتمل رئيسي للطاقة. ويهدف مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (ITER)[٢٣] إلى إثبات الجدوى العلمية والتكنولوجية لاستخدام الطاقة الاندماجية في الأغراض السلميّة وسمات أمان ذلك الاستخدام. وفي إطار هذا المشروع، يجري حالياً إنشاء جهاز بمستوى محطة قوى، يُتوقّع أن يُثبت جدوى إنتاج ٥٠٠ ميغاواط من طاقة الاندماج (الشكل باء-٢). وقد شكّلت مكتبة البيانات النووية المُقيِّمة المتعلقة بالاندماج-٢-١ (FENDL-2.1) مصدراً للبيانات المرجعيّة لتصميم المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، وأُعدّت الصيغة المحسّنة من مكتبة البيانات النووية المُقيِّمة المتعلقة بالاندماج-٣ (FENDL-3) في إطار مشروع بحثي منسّق من مشاريع الوكالة للمساعدة على تحليل النتائج .



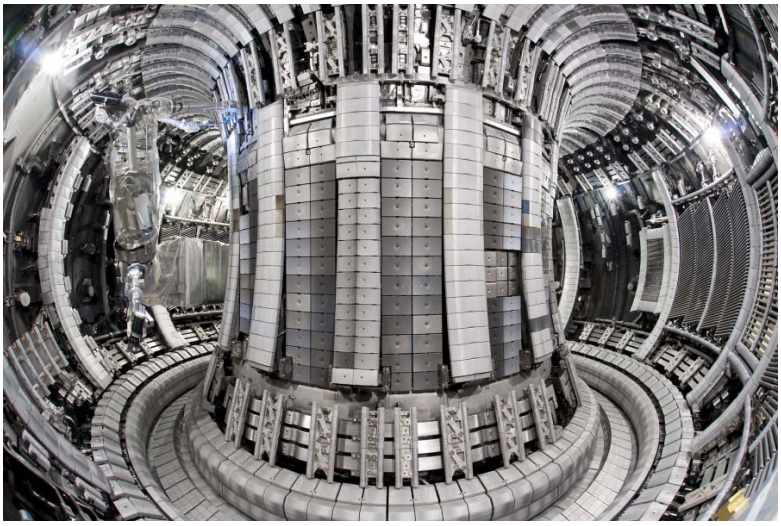
الشكل باء-٢- منظر مقطعي لجهاز المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي الذي يجري بناؤه في فرنسا لبحث إنتاج طاقة الاندماج. وقد استُخدمت كميات كبيرة من البيانات النوويّة والذريّة في تصميم الجهاز، وسيتم استخدامها لتحليل تشغيل الجهاز وتجاربه.

١١٧- واجتذب مؤتمر الوكالة للطاقة الاندماجية الرابع والعشرون، الذي عُقد في سان دييغو، الولايات المتحدة الأمريكية، في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢، نحو ٨٥٠ مشاركاً من ٣٧ دولة عضواً وخمس منظّمات دوليّة.

---

[٢٣] يمكن الاطّلاع على المزيد من المعلومات عن المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في الموقع الإلكتروني http://www.iter.org/.

وقُدِّمت نحو ٧٠٠ ورقة، شملت نتائج تجربة الجدار المماثل لجدار المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (الشكل باء-٣) التي أُجريت على جهاز الاندماج المسمّى الطارة الأوروبية المشتركة، في المملكة المتحدة.



الشكل باء-٣- باطن حجرة تفريغ جهاز الطارة الأوروبية المشتركة بعد اكتمال تركيب الجدار المماثل لجدار المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي.

١١٨- ويتزايد انتشار التقنيات النووية الخاصة بتحليل المواد، وقد نفَّذت صناعات في القطاع الخاص، كجزء من المعدّات 'المنضديّة' القياسيّة، أساليب كانت لا تُستخدم سابقاً إلا في المختبرات النووية. وتُخصّص عدة مؤتمرات دولية لهذا الموضوع. وسيُعقد في سياتل، الولايات المتحدة الأمريكية، في حزيران/يونيه ٢٠١٣ المؤتمر الدولي الواحد والعشرون بشأن التحليل بحزم الأيونات. وأنجزت الوكالة مشروعاً بحثياً منسقاً بشأن قاعدة البيانات المسماة مكتبة البيانات النووية المتعلقة بتحليل الحزم الأيونية، التي توفر البيانات لتحليل الحزم الأيونية، وتنفذ الوكالة مشروعاً بحثياً منسقاً آخر بشأن تقنية تحليلية ذات صلة، هي تقنية انبعاث أشعة غاما بواسطة الحث عن طريق الجسيمات المشحونة.

١١٩- وتتحقق أوجه تقدم في البيانات الذرية والجزيئية بفضل المرافق الجديدة التي تنتج نبضات مكثفة من الأشعة السينية النفَّاذة. وقد أنشئ المعجل الخطي الباعث للأضواء المترابطة في ستانفورد في الولايات المتحدة الأمريكية في عام ٢٠٠٩، وبدأ تشغيل مرفق ساكلا في معهد ريكين هاريما في اليابان في عام ٢٠١١، وفُتح أمام المستخدمين الخارجيين في عام ٢٠١٢. ويُستخدم ضوء الأشعة السينية المنتَج في هذه المرافق لإضاءة أهداف تمتد من الذرات والجزيئات المنفردة إلى الخلايا الحية والبلورات النانوية. وتتيح الشِّدة العالية والنبضات القصيرة للأشعة الصادرة عن هذا الجهاز دراسة المادة في ظروف قصوى ودراسة العمليات المعقدة، مثل التي تجري في الجزيئات البيولوجية، على المستوى الذري.

١٢٠- ويحتوي مرفق الإشعال الوطني الكائن في مختبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية على ١٩٢ جهاز ليزر عالي الطاقة تركِّز الأشعة فوق البنفسجية وترسلها إلى تجويف (جسم أسود) حيث يتم تحويلها إلى أشعة سينية. وفي المرحلة الأولى من تشغيل المرفق، من عام ٢٠٠٩ إلى عام ٢٠١٢، خُصّص لتحقيق كسب في صافي الطاقة ينتُج من تسخين وضغط قرص وقود مصنوع من الديوتيريوم والتريتيوم. ولم يتحقق كسب الطاقة المتنبأ به، ويشير ذلك، في جانب منه، إلى الحاجة إلى بيانات ذرية دقيقة عن المادة في الظروف القصوى. ولا يزال تشغيل المرفق مستمراً.

١٢١- ونجح المركز الافتراضي للبيانات الذرية والجزيئية، وهو مشروع أوروبي للبنية الأساسية لتكنولوجيا المعلومات تم تمويله في البداية للفترة ٢٠٠٩-٢٠١٢، في توفير واجهة بينية مشتركة لنحو ٢٠-٢٥ قاعدة بيانات ذرية وجزيئية، مع تطبيقات في مجالي فيزياء البلازما والفيزياء الفلكية. وقد بُنيت الواجهات البينية وأدوات الاستعلام المرتبطة بها على مخطط لغة الترميز الموسعة XML للذرات والجزيئات والمواد الصلبة (XSAMS)، الذي طوّره فريق دولي نسّقت أعماله الوكالة. وأُطلق الإصدار ٠,١ في عام ٢٠٠٩ والإصدار ١,٠ في عام ٢٠١٢. وهناك مشروع متابعة جارٍ لمشروع المركز الافتراضي للبيانات الذرية والجزيئية.

١٢٢- ويتزايد استناد عمليات قواعد البيانات الذرية والجزيئية على البيانات الحاسوبية. وقد أثيرت في عدد من الاجتماعات التي عُقدت مؤخراً مسألة أن المقاطع العرضية المعدّة بواسطة الحاسوب، مثل المقاطع العرضية التجريبية، تحتوي على عنصر عدم يقين يجب تحديده كمياً. وعُقد في دايجون، كوريا، في أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ الاجتماع التقني المشترك بين الوكالة والمعهد الوطني لبحوث الاندماج، والمعني بتقييم بيانات عمليات التفاعل الذرية والجزيئية وعمليات التفاعل بين البلازما والمواد في الاندماج، وذلك لاستعراض قضايا انتشار الأخطاء وتحليل الحساسية، والوضع الحالي لقواعد البيانات المقيَّمة، وتقييم مجموعات البيانات النظرية والتجريبية، وأساليب التقييم، ودور التوفيقات شبه التجريبية. ولهذا الاجتماع الأول من نوعه دور مهم في تجديد العمل الدولي بشأن عزو عدم اليقين وتقييم البيانات لأغراض العمليات الذرية والجزيئية في الاندماج.

١٢٣- وسيُعقد في نيويورك، الولايات المتحدة الأمريكية في عام ٢٠١٣ المؤتمر الدولي بشأن البيانات النووية لأغراض العلوم والتكنولوجيا. وسيسلط المؤتمر الضوء على عمل العلماء والمهندسين الذين يشاركون في إنتاج البيانات النووية أو استخدامها في عدة تطبيقات.

جيم- المعجِّلات ومفاعلات البحوث

جيم-١- المعجّلات

١٢٤- يتم تعجيل الإلكترونات والبروتونات وغيرها من أنواع الجسيمات المشحونة لإنتاج الأشعة السينية والنيوترونات وحزم الجسيمات المشحونة والنظائر المشعة، لاستخدامها في البحوث وفي التكنولوجيا. وتُعتبر التكنولوجيات القائمة على المعجِّلات عنصراً أساسياً لخدمة التنمية الاجتماعية والاقتصادية، ولها مجموعة واسعة من التطبيقات في مجالات الطاقة والصحة والزراعة والبيئة والمواد والموارد الطبيعية والتعليم.

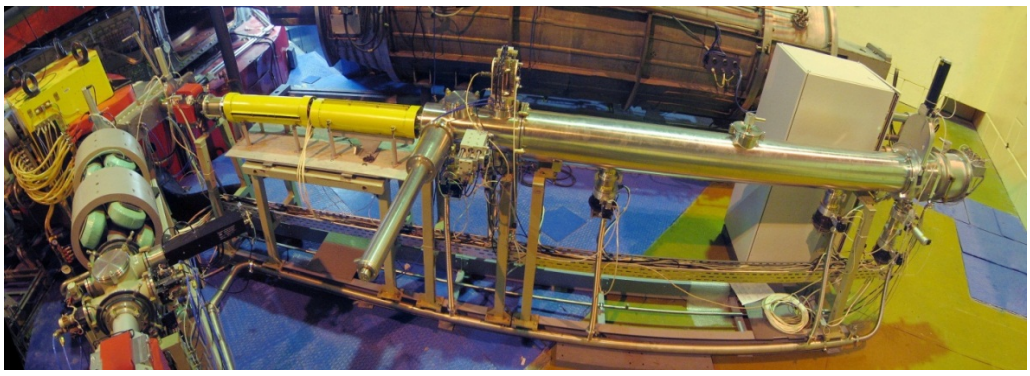
١٢٥- وقد طُوّرت معجلات ذات تصاميم مختلفة كثيرة. وقد تختلف المعجلات في الحجم، حيث يكون بعضها صغيراً بما يكفي ليناسب وضعه على طاولة، بينما قد يبلغ طول معجلات أخرى عشرات الكيلومترات. ويمكن أن يكون شكل المعجلات خطياً أو دائرياً. وقد تُنتج أو تعجِّل حزماً من الجسيمات المشحونة، في نبضات أو على نحو مستمر، باستخدام تقنيات مختلفة. والمعجلات هي الأدوات الأساسية لمجموعة متنوعة كبيرة من التطبيقات القائمة على الفيزياء النووية وذات التأثيرات الاجتماعية المهمة، مثل: إنتاج النظائر المشعة كالفلور-١٨ والنحاس-٦٤ والكربون-١١ وغير ذلك لإعداد المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المستخدمة في تشخيص أنواع السرطان؛ والاستخدام المباشر لحزم المعجلات الإشعاعية لعلاج السرطان؛ والتنقيب عن المعادن والنفط؛ وتجهيز رقائق أشباه الموصلات؛ وتعقيم المعدات الطبية والمنتجات الغذائية؛ وتحديد تاريخ القطع الأثرية؛ وعدة تطبيقات أخرى. وتتم باستمرار دراسة المعجلات لأغراض التطبيقات المبتكرة، ومن التطورات البارزة استخدام السيكلوترون الطبي لإنتاج التكنيتيوم-٩٩م، وهو النويدة المشعة التشخيصية الأكثر استخداما في العالم.

تحديد خصائص المواد

١٢٦- تؤدي التكنولوجيا النووية دوراً رئيسياً في تطوير المواد الجديدة. والتحليل بحزم الأيونات أداة مهمة لتحديد خصائص المواد وأدائها في مجالات مثل علم الآثار، والطب الأحيائي، ورصد التلوث البيئي، والأغذية والزراعة، وعلوم التحاليل الشرعية، والصناعة، والتعدين، ودراسة موجودات التراث الثقافي، إلخ. وعادةً ما تكون تقنيات التحليل بحزم الأيونات غير مدمِّرة؛ غير أن خصائص المواد يمكن أن تتأثر تأثراً شديداً بالإشعاع الأيوني.

١٢٧- وثمة مخاوف بيئية ترتبط بالنظائر المشعة ذات العمر النصفي الطويل الناتجة من الانشطار النووي في المرحلة الختامية من دورة الوقود النووي. وقد أدت هذه الشواغل إلى زيادة جهود البحث والتطوير المبذولة في تطوير تكنولوجيا للحد من كمية النفايات المشعة من خلال تحويلها [٢٤] إما في مفاعلات انشطار سريع أو في نظم تعمل بواسطة المعجِّلات، بما في ذلك في الوكالة، حيث يجري تنفيذ عدد من المبادرات في إطار مشروع *أوجه تقدم تكنولوجيا المفاعلات السريعة والنظم المدفوعة بالمعجلات*.

١٢٨- وتحديد خصائص المواد في الوقت الحقيقي باستخدام الإشعاع السنكروتروني والحزم النيوترونية والأيونية والإلكترونية هو أداة قيّمة للتصدي للتحديات القائمة في مجالي البحوث والتكنولوجيا فيما يتعلق باستخدام مواد معيَّنة في التطبيقات المتصلة بالطاقة. ويمكن أن يساعد على معالجة هذه التحديات تحسين فهم العوامل التي تؤدي إلى تدهور أداء المواد نتيجة للاستخدام أو التقادم. كما أن ابتكار مواد أكثر تطوراً، مثل المواد التي تقلّل من استهلاك الطاقة، قد يساعد على تخفيف الضغط على الموارد الطبيعية للأرض والحد من الضغوط البيئية. ويمكن أن تؤدي الجزيئات المعجَّلة دوراً مهماً في تطوير هذه المواد الجديدة: فيمكن استخدام الأيونات الناتجة من معجِّلات الحزم الأيونية لمحاكاة الضرر الإشعاعي الذي يصيب المواد في مفاعل الانشطار أو الاندماج؛ ويمكن أن تُستخدم أيضاً لإنشاء مواد جديدة من خلال زرع الأيونات؛ وأخيراً، يمكن استخدامها لتحليل تلك المواد. والعينات المصنوعة من المواد الجديدة صغيرة، ولذلك يشار إلى تلك المواد باسم 'المواد النموذجية'. ومن أجل فعالية التكلفة، يلزم فور تصنيع هذه المواد تطوير طرائق بديلة وأبسط لإنتاجها. ويمكن أن يؤدي توصيف عملية التصنيع الذي يتم في الموقع وفي الوقت الحقيقي إلى تسهيل ذلك من خلال المساعدة على تحقيق فهم أفضل لكل الخطوات اللازمة.



الشكل جيم-١- تطوير خط جديد لحزم الأيونات من أجل اختبار صمود الأجهزة الإلكترونية أمام الإشعاعات في المرفق السيكلوتروني U400M في المعهد المشترك للبحوث النووية (الاتحاد الروسي).

---

[٢٤] تحويل عنصر إلى عنصر آخر. وتجري دراسة التحويل كوسيلة لتحويل النويدات المشعة الأطول عمراً إلى نويدات مشعة أقصر عمراً أو مستقرة.

تصوير العناصر والجزيئات بالحزم الأيونية

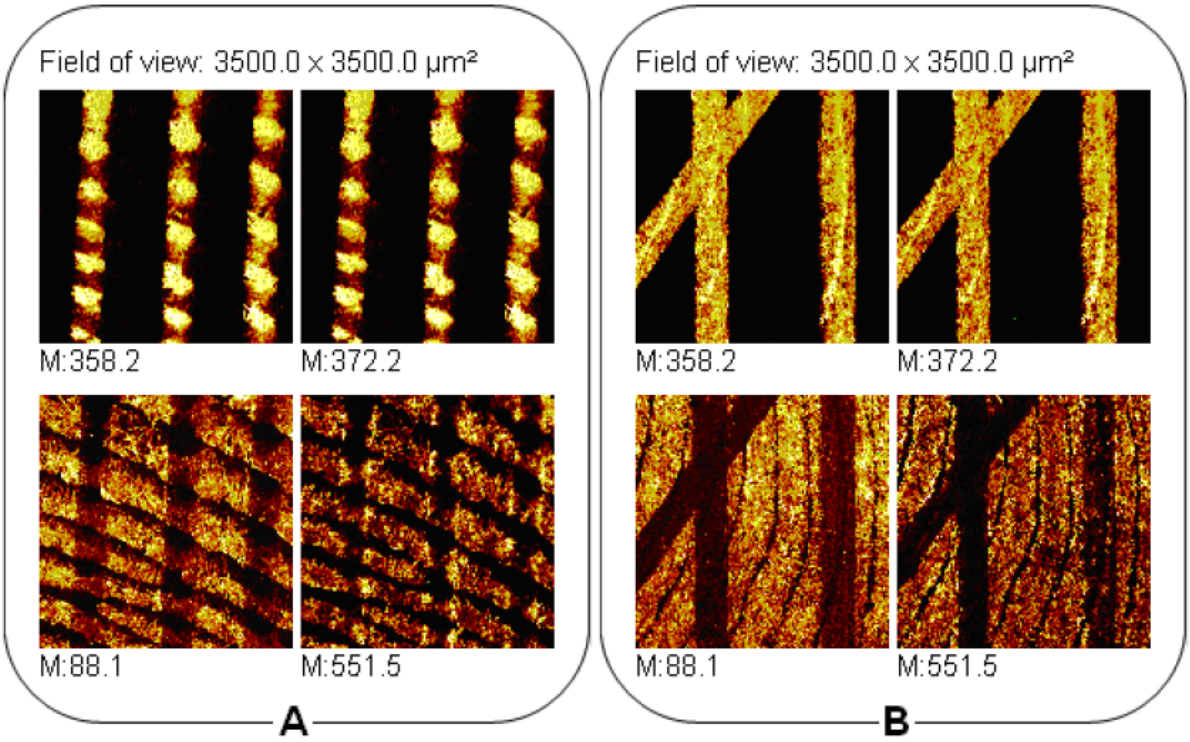
١٢٩- تطوَّر قياس طيف كتلة الأيونات الثانوية، بمرور الأعوام، فأصبح أداة قوية لتحليل العناصر، وخصوصاً في مواد مثل أشباه الموصّلات. وفي الآونة الأخيرة، أصبحت هذه الوسيلة تُستخدَم لإعداد صور عالية الدقة (خرائط) للتركيز الجزيئي للسطوح، بدقة أفقية أقل من ميكرون واحد. وقد تؤدي التطورات الجديدة في مجال تحديد ملامح أعماق المواد الجزيئية، في نهاية المطاف، إلى توفير صورة كاملة ثلاثية الأبعاد للمواد التي يتم تحليلها. إلا أن هناك عيباً في هذا الأسلوب وهو أن التحليل يجب إجراؤه في فراغ. ولتقنيات قياس الطيف الكتلي في ظروف الضغط الجوي المتاحة حالياً، بما في ذلك التقنيات القائمة على المجّ/التأيين بالليزر بمساعدة المصفوفات (MALDI)، والتحليل المباشر في الوقت الحقيقي (DART)، والتأيين بالمجّ بالرش الكهربائي (DESI)، نطاقات متنوعة من الدقة المكانية، كما هو موضح في الجدول جيم-١. ويمكن أن تتأثر حدود الكشف أيضاً بعوامل من بينها اختيار المذيب المستخدم. وثمة عيب آخر هو أن بعض التقنيات قد تدمّر المعلومات الجزيئية. ولا توجد حتى الآن تقنية لقياس الطيف الكتلي قادرة على توفير خرائط جزيئية ذات قيمة كتلية عالية في ظروف الضغط المحيط بدقة حيِّزيّة عالية.

١٣٠- وقد ظهر مؤخراً قياس طيف كتلة الأيونات الثانوية في نطاق المليون إلكترون فولط (MeV-SIMS) كأسلوب يمكن أن ينتج معلومات كيميائية وكذلك معلومات عن العناصر. وتستخدم هذه الطريقة الأيونات الثقيلة في نطاق الطاقة مليون إلكترون فولط، ويتم تعجيل هذه الأيونات بواسطة معجلات الأيونات وتُركَّز في مرفق مسبار ميكروي نووي. ويتم الكشف عن الأيونات الجزيئية الثانوية، المنبعثة من سطح العيّنة المشعَّع، باستخدام طريقة زمن الطيران. ومن المتوقع استحداث تطبيقات واعدة لهذه التقنية في رسم خرائط الجزيئات العضوية، وخاصة في بحوث الطب الأحيائي والتراث الثقافي والتحاليل الشرعية.

١٣١- ومن الممكن استخراج الأيونات في نطاق المليون إلكترون فولط من النظام الفراغي وإلى الهواء عبر نافذة رقيقة. وقد استُخدمت هذه التقنية على نطاق واسع في الماضي لأداء تحليل عناصر الأجسام في الظروف المحيطة وذلك باستخدام التقنيات التقليدية للتحليل بحزم الأيونات. وهناك عدد من المجالات الرئيسية التي يمكن أن تستفيد من نظام للتصوير الجزيئي العالي الدقة في ظروف الضغط المحيط. ومن هذه المجالات ما يلي: علم قياسات الآثار، والعلوم الجيولوجية والبيئية، والتحاليل الشرعية، وعلوم الطب الأحيائي. وترد في الجدول جيم-١ مقارنة بين بعض تقنيات التصوير الجزيئي الرئيسية.

الجدول جيم-١- مقارنة بين بعض تقنيات التصوير الجزيئي الرئيسية [Spoto, G. and Grasso, G., Spatially resolved mass spectrometry in the study of art and archaeological objects, *Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30, 856–863].

المعلومات:	قياس الطيف الكتلي بتقنية المجّ/التأيين بالليزر بمساعدة المصفوفات (MALDI MS)	قياس الطيف الكتلي للأيونات الثانوية (SIMS)	قياس الطيف الكتلي في الظروف المحيطة	قياس الطيف الكتلي للأيونات الثانوية بدقة نانومترية (NanoSIMS)	قياس الطيف الكتلي للأيونات الثانوية في نطاق المليون إلكترون فولط (MeV SIMS)	قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث، بأسلوب التذرية الذريّة (LA-ICP-MS)
الدقة الحيِّزيّة	١٠ ميكرومترات	< ٢٠٠ نانومتر للمواد العضوية	< ٥٠ ميكرومتر. ويجري تطوير تقنية لما يقل عن الميكرون.	٥٠ نانومترا	ميكرومتر واحد	< ١٠٠ ميكرومترات
حجم الجزيئات التي يتم كشفها	حتى ~ ١٥٠ كيلودالتون (بروتينات كبيرة)	حتى ~ ٢ كيلودالتون (ببتيدات صغيرة)	حتى ~ ٥٠ كيلودالتون (بروتينات متوسطة الحجم)	على مستوى العناصر	حتى ~ ١٠ كيلودالتون (ببتيدات كبيرة)	على مستوى العناصر
القدرة على التجسيد الثلاثي الأبعاد	سيتم تطويرها	نعم (دقة بعمق ٥ نانومترات)	توجد إمكانية لتطويرها	نعم	توجد إمكانية لتطويرها	البعض
في الظروف المحيطة والوقت الحقيقي	البعض (المجّ/التأيين بالليزر بمساعدة المصفوفات في ظروف الضغط الجوي) (AP-MALDI)	X	✓	X	✓	X
قابل للنقل	يوجد جهاز منضدي	X	✓	X	X	X
القياس الكمي	بواسطة معايير داخلية، ولكن صعب	قياس كمي نسبي	بواسطة معايير داخلية	يمكن بواسطة الوسم النظيري	غير معروف	✓



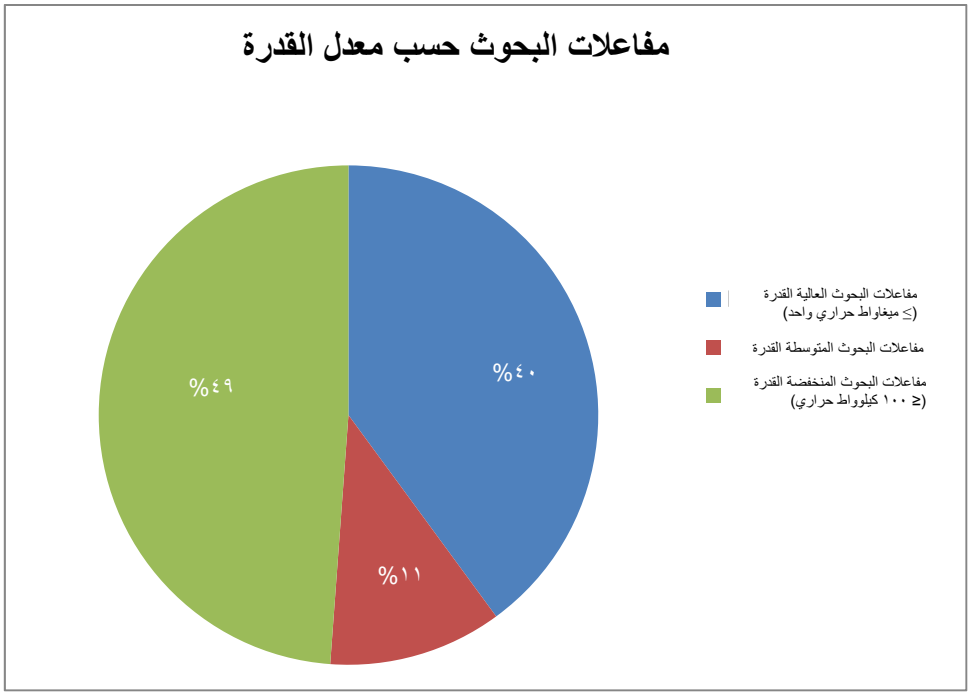
الشكل جيم-٢ - صور لأيونات موجبة، التُقِطت بواسطة قياس طيف كتلة الأيونات الثانوية بدلالة زمن الطيران وفي نطاق المليون إلكترون فولط (keV ToF-SIMS)، لبصمة تم وضعها: (A) بعد وضع الحبر و (B) قبل وضع الحبر على طبقات تحتية ورقية. N.J. Bright, R.P. Webb, S. Bleay, S. Hinder, N.I. Ward, J.F. Watts, K.J. Kirkby & M.J. Bailey, Analytical Chemistry, 84(9), 4083–4087, (2012).

١٣٢- وهناك بروتوكول نُشر في عام ٢٠١٢ يستخدم التصوير بالطريقة التقليدية بواسطة قياس طيف كتلة الأيونات الثانوية بدلالة زمن الطيران وفي نطاق المليون إلكترون فولط (keV ToF-SIMS) لتحديد ما إن كانت البصمة قد وُضعت قبل رسم خط بالحبر أم بعد رسم الخط. وتبيّن الصور الواردة في الشكل جيم-٢ الاختلافات بين الحالتين باستخدام قمم الكتلة المرتبطة بالحبر وبالبصمة. ويبيّن الشكل جيم-٢-ألف أنه عند وضع بصمة على خط موجود مرسوم بالحبر، فإن جزيئات الحبر (M:358.2 وM:372.2) المناظِرة للأصباغ تنحجب في المناطق التي توجد فيها حدبات البصمة (تحدَّد من M:88.1 وM:551.5). ويبيّن الشكل جيم-٢-باء أنه عند رسم خط بالحبر عبر بصمة موضوعة بالفعل على الورق، فإن الأيونات المميِّزة لجزيئات الحبر (M:358.2 وM:372.2) تحجب الأيونات التي تميِّز جزيئات البصمة وتمنع الكشف عن تلك الجزيئات (تُحدَّد من M:88.1 وM:551.5) .

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٣٣- تضم مفاعلات البحوث مجموعة واسعة من أنواع مختلفة من المفاعلات التي لا تُستخدَم عموماً لتوليد القوى. والاستخدام الرئيسي لمفاعلات البحوث هو توفير مصدر نيوتروني للبحوث والتطبيقات المختلفة، بما في ذلك التعليم والتدريب. وهذه المفاعلات صغيرة مقارنةً بمفاعلات الطاقة، التي تتمثل وظيفتها الرئيسية في إنتاج الكهرباء. وتسمى معدلات قدرة مفاعلات البحوث بالميغاواط، ويمكن أن يمتد ناتجها من الصفر (في حالة المجمَّعة الحرجة مثلاً) إلى ما يصل إلى ٢٠٠ ميغاواط حراري، مقارنةً بـ٣٠٠٠ ميغاواط حراري (أي ١٠٠٠ ميغاواط كهربائي) في حالة مفاعل القوى الكبير المعتاد.

١٣٤- وحتى كانون الثاني/يناير ٢٠١٣، كان هناك ٢٤٧ مرفق مفاعل بحوث قيد التشغيل في العالم. وإضافةً إلى ذلك، كان هناك ١٥ مفاعل بحوث في حالة إغلاق مؤقت، و١٥٠ في حالة إغلاق طويل الأمد. ومن بين المفاعلات العاملة، هناك ٤٩ ذات قدرة عالية، تعمل بمعدلات قوى عالية وتوفّر تدفقاً نيوترونياً أعلى. وتم إخراج ٣٠٤ مفاعلات بحوث إضافية من الخدمة. ويجري تشييد أربعة مفاعلات أخرى، اثنان منها في فرنسا (مفاعل جول هورويتز والمفاعل RES)، وواحد في الأردن (مرفق دون الحرجية)، والاتحاد الروسي (المفاعل PIK).[٢٥] وأخيراً، تم التخطيط رسمياً لستة مشاريع مفاعلات بحثية، وذلك - على التوالي – في الأرجنتين (RA-10)، وبلجيكا (MYRRHA) والبرازيل (RMB)، والأردن (JRTR)، وهولندا (PALLAS)، والاتحاد الروسي (MBIR). وأُلغيت خمسة مشاريع قبل عام ٢٠١٢. ويرد في الشكلين جيم-٥ وجيم-٣ والجدول جيم-٢، على التوالي، توزيع مفاعلات البحوث العاملة حسب العمر ومستويات القدرة والاستخدام.



الشكل جيم-٣- تصنيف مفاعلات البحوث القابلة للتشغيل حسب معدل القدرة (المصدر: قاعدة بيانات مفاعلات البحوث بالوكالة في آب/أغسطس ٢٠١٢).

[٢٥] وفقاً لقاعدة بيانات مفاعلات البحوث بالوكالة (http://nucleus.iaea.org/RRDB/)، التي تحتوي على سجلات لمفاعلات البحوث العاملة حالياً والتي كانت تعمل.

الجدول جيم-٢- التطبيقات الشائعة في مفاعلات البحوث على نطاق العالم

نوع التطبيقات	عدد مفاعلات البحوث المشمولة[أ]	عدد الدول الأعضاء التي توجد بها المرافق المستخدمة
إنتاج النظائر	٩٢	٤٥
التشتت النيوتروني	٥٠	٣٣
التصوير الإشعاعي النيوتروني	٧١	٤٠
تشعيع المواد	٧٠	٢٨
التحويل (الأحجار الكريمة)	٢٠	١١
التحويل (إشابة السليكون)	٢٩	١٩
التدريس/التدريب	١٦٥	٥٣
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١٢٤	٥٤
علم التقويم الجيولوجي	٢٥	٢١
العلاج بأَسر النيوترون في نواة البورون (بما في ذلك البحث والتطوير)	٢٢	١٢
تطبيقات أخرى[ب]	١٠٣	٣١

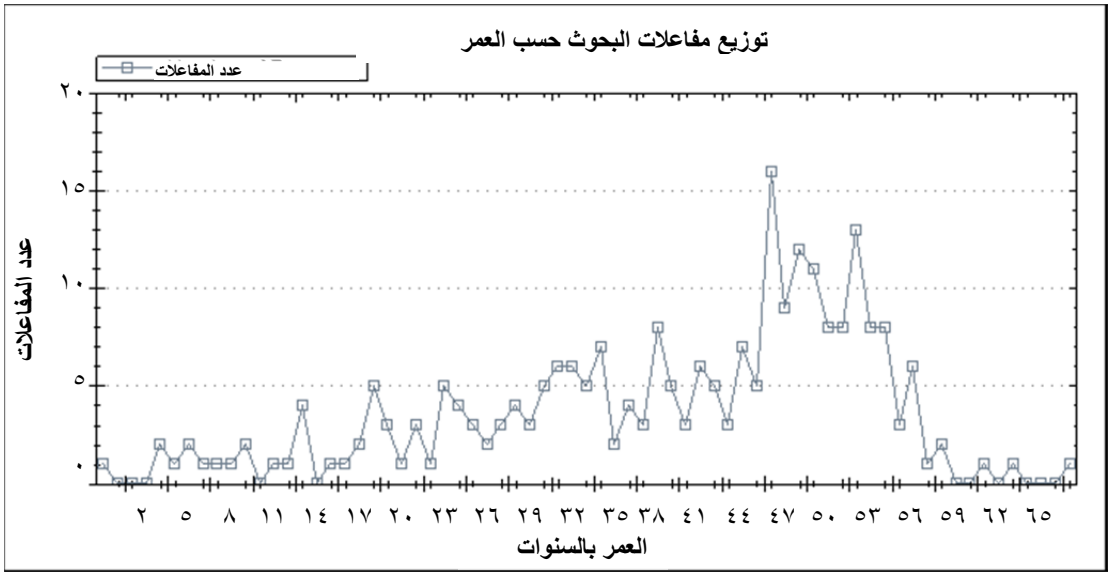
[أ] من بين ٢٥٢ مفاعل بحوث تمت دراستها (٢٢٩ قيد التشغيل، ١٥ في حالة إغلاق مؤقت، ٤ تحت الإنشاء، ٤ مخطّط لها؛ آب/أغسطس ٢٠١٢)

[ب] تشمل التطبيقات الأخرى معايرة واختبار الأجهزة وقياس الجرعات، وتجارب التدريع، وتجارب فيزياء المفاعلات، وقياسات البيانات النووية، وجولات العلاقات العامة والحلقات الدراسية.

١٣٥- وتنظر خمس عشرة دولة عضواً في إنشاء مفاعلات بحوث جديدة أو تخطط لإنشائها. ودخل كلٌّ من أذربيجان وتونس والسودان ولبنان والمملكة العربية السعودية في المراحل الأولى من التخطيط لبناء مفاعل بحوث. وفي الأردن، بدأ تشييد مفاعل بحوث متعدد الأغراض بقدرة ٥ ميغاواط، بينما توجد خطط في فيتنام لبناء مفاعل بحوث جديد كجزء من عقد تجاري شامل لإقامة محطة قوى نووية. كما أن بلداناً ذات برامج قوى نووية قائمة - مثل الاتحاد الروسي والأرجنتين والبرازيل وجمهورية كوريا وجنوب أفريقيا وفرنسا وهولندا والهند - تبني مفاعلات بحوث جديدة لأغراض تجريبية وتجارية محددة، أو تخطط لبنائها.[٢٦]

[٢٦] هناك منشور جديد من منشورات الوكالة يساعد الدول الأعضاء في هذا المجال، وهو (*Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.1)).

الشكل جيم-٤- في عام ٢٠١٢، حقق المفاعل البحثي الصيني المتقدم قدرته الإسمية البالغة ٦٠ ميغاواط عند تشغيله لما مجموعه ~ ٧٠ ساعة تراكمياً. ونتيجةً لذلك، أُدخلت في الخدمة ٥ أجهزة حزم نيوترونية عندما بلغت أنماط تشتت النيوترونات مستوى الجودة المطلوب.



الشكل جيم-٥- توزيع مفاعلات البحوث القابلة للتشغيل حسب العمر.

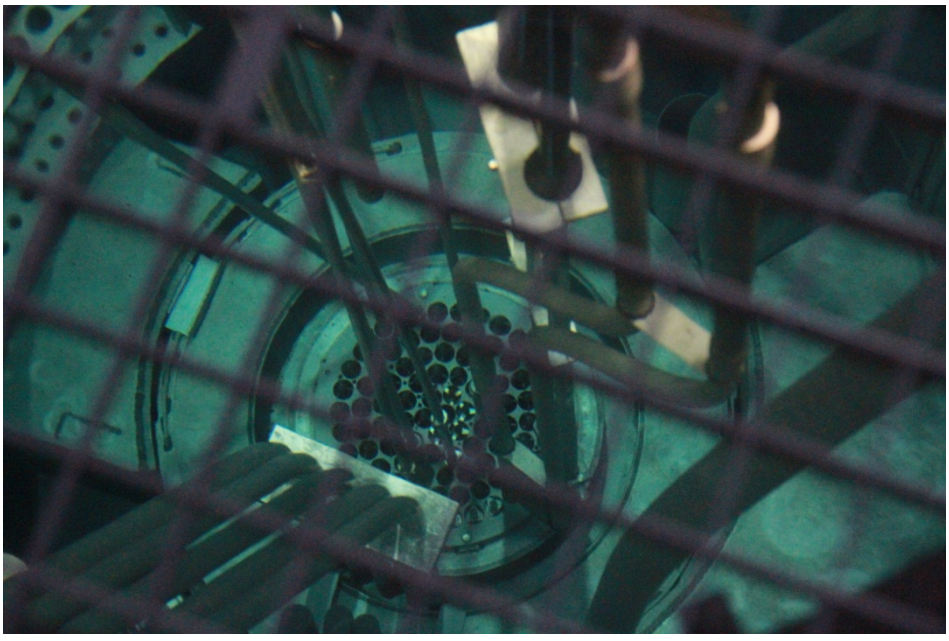
١٣٦- ومع إخراج مفاعلات البحوث القديمة من الخدمة والاستعاضة عنها بمفاعلات متعددة الأغراض أقل عدداً، يُتوقع أن يستمر انخفاض عدد المفاعلات العاملة والمرافق الحرجة المستخدمة في البحوث. وسيلزم تعاون أكبر على الصعيد الدولي لضمان إمكانية الوصول إلى هذه المرافق على نطاق واسع واستخدامها على نحو فعال. وفي عام ٢٠١٢، ساعدت الشبكات أو الائتلافات الإقليمية القائمة لمفاعلات البحوث، التي تيسِّرها الوكالة[٢٧]، على تعزيز هذا التعاون، وقدّمت المساعدة لمفاعلات البحوث لتوسيع قاعدة أصحاب المصلحة فيها.

١٣٧- واستُهلّت في عام ٢٠١٢ خدمة جديدة في الوكالة هي خدمة تقييمات تشغيل وصيانة مفاعلات البحوث، وذلك لإجراء استعراضات نظراء شاملة لتشغيل وصيانة مرافق مفاعلات البحوث؛ والتحقق من الامتثال للإجراءات القائمة الخاصة بالمحطات؛ واقتراح مجالات التحسين؛ وتسهيل النقل المتبادل للمعارف والخبرات بين

[٢٧] شكّلت الوكالة عدة ائتلافات مختلفة لمفاعلات البحوث في منطقة البلطيق، ومنطقة الكاريبي (التي تشمل مشاركة من أمريكا اللاتينية)، ووسط أفريقيا، وآسيا الوسطى، وأوروبا الشرقية، ومنطقة البحر المتوسط.

خبراء البعثات والعاملين في المفاعلات. وأُنجزت البعثة الأولى لهذه الخدمة في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢ في مفاعل مركز بحوث النيوترونات التابع للمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا في الولايات المتحدة الأمريكية، وسبقها عقد اجتماع تمهيدي للبعثة في حزيران/يونيه ٢٠١٢. وعُقد أيضاً في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢ اجتماع تمهيدي لبعثة من هذه الخدمة إلى مفاعل البحوث تريغا في جامعة بافيا في إيطاليا. ومن المتوقع أن تنفّذ البعثة الرئيسية في عام ٢٠١٣.

١٣٨- وطوال عام ٢٠١٢ واصلت المبادرة العالمية لتقليص التهديدات تنفيذ مهمتها المتمثلة في الحد من وجود اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع النووي المدني في جميع أنحاء العالم. وفي عام ٢٠٠٩، تم توسيع نطاق المبادرة من ١٢٩ مفاعلا بحثيا إلى نحو ٢٠٠ مفاعل بحثي تعمل بوقود اليورانيوم الشديد الإثراء، وبنهاية عام ٢٠١٢ كان قد تم تحويل ٨٢ من هذه المفاعلات الى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو أُغلقت قبل هذا التحويل. فعلى سبيل المثال، تم تحويل مفاعل البحوث TRIGA MARK III في المكسيك من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُعيدَ وقود اليورانيوم الشديد الإثراء النهائي الناتج عن هذا المفاعل إلى الولايات المتحدة الأمريكية في آذار/مارس ٢٠١٢. وتم في بولندا في أيلول/سبتمبر ٢٠١٢ تحويل مفاعل البحوث ماريا تحويلاً كاملاً باستخدام وقود يورانيوم ضعيف الإثراء مصمّم خصيصاً. وأعلنت المبادرة في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٢ الإزالة النهائية لكل اليورانيوم الشديد الإثراء من النمسا بعد التحويل الكامل لمفاعل تريغا الموجود في فيينا إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وبالإعادة المأمونة للوقود النمساوي إلى بلد المنشأ تكون قد تمت الإزالة النهائية لكل وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الخاص بمفاعلات تريغا من التجارة المدنية.



الشكل جيم-٦ - قلب مفاعل البحوث من نوع تريغا مارك-٢، الخاص بالجامعة التقنية في فيينا والذي يعمل بوقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وتم تحويل المفاعل من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء في عام ٢٠١٢.

١٣٩- وبدعم من الوكالة، قامت عدة دول أعضاء بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الخاص بمفاعلات البحوث إلى بلد منشئه. ويواصل برنامج إعادة وقود مفاعلات البحوث الروسي إعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك إلى الاتحاد الروسي بأمان. وفي عام ٢٠١٢، ساعدت الوكالة على إعادة ما يقرب من

١١٠ كيلوغرامات من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج إلى بلد المنشأ من معهد خاركوف للفيزياء والتكنولوجيا بأوكرانيا، وإعادة ما يقرب من ٢٠ كيلوغراماً من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلك إلى بلد المنشأ من معهد البحوث النووية في كييف بعد تحويل مفاعل بحوث المعهد من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي آب/أغسطس وأيلول/سبتمبر ٢٠١٢، أُنجزت عمليتا شحن وقود مستهلك أخريان بما يقرب من ١٠٠ كيلوغرام من اليورانيوم الشديد الإثراء من أوزبكستان وبولندا. وأُنجزت بنجاح أيضاً شحنة إضافية واحدة لإزالة حوالي ٢٧ كيلوغراماً من اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج من بولندا. وواصلت الصين جهودها لتحويل المفاعلات النيوترونية المصغَّرة في البلد من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، وتخطط للعمل مع الدول الأعضاء التي اشترت مثل هذه المفاعلات لمساعدتها على تحويل مفاعلاتها وإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلد منشئه.

١٤٠- وكثيراً ما تجرى بعد التحويل إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء وإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلد منشئه عمليات كبيرة للارتقاء بالبنى الأساسية. فمثلاً، في أوكرانيا، يجري تشييد مرفق دون حرج يعمل بواسطة المعجِّلات ويستخدم وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء في معهد خاركوف للفيزياء والتكنولوجيا، بدعم مالي وتقني، بعد إعادة كل اليورانيوم الشديد الإثراء إلى الاتحاد الروسي. ومن المقرر أن يبدأ تشغيل المرفق في عام ٢٠١٤.

١٤١- وخلال عام ٢٠١٢، خفّت أخيراً حدة حالات نقص المعروض التي حدثت في السنوات العديدة الماضية وعادت مستويات الإنتاج إلى وضعها الطبيعي، رغم أن بعض الأسئلة ظلَّت مطروحة حول الإمدادات المتوسطة والطويلة الأمد. واستمر بتركيز متجدّد تحويل عمليات إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء خلال تلك الفترة. وأعلنت أستراليا عن توسيع قدرتها على إنتاج الموليبدينوم-٩٩ باستخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، لتلبية حوالي ٢٥٪ من الطلب العالمي. ولتحقيق هذا الإنتاج، سيُبنى مصنع جديد للأدوية النووية على نطاق تصديري في موعد غايته عام ٢٠١٦، وكذلك مصنع في الموقع نفسه يستخدم تقنية الصخر الاصطناعي (Synroc) لمعالجة النفايات الإضافية الناتجة من توسيع مصنع الموليبدينوم-٩٩.[٢٨] وواصلت جنوب أفريقيا إنتاجها التجاري للموليبدينوم-٩٩ المصنوع من كبسولات اليورانيوم الضعيف الإثراء المستهدفة، وكذلك تحويل عملياتها إلى الاستخدام الحصري لليورانيوم الضعيف الإثراء، في حين بدأ أيضاً اثنان من كبار منتجي النظائر الطبية (بلجيكا وهولندا) تنفيذ خطط لتحويل عمليات إنتاجهما ذات النطاق التجاري من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء. وأخيراً، أصبحت إندونيسيا في نهاية عام ٢٠١١ منتجاً ضيّق النطاق للموليبدينوم-٩٩ لا يستخدم سوى اليورانيوم الضعيف الإثراء.

١٤٢- والأنواع المتقدمة ذات الكثافة العالية للغاية من وقود اليورانيوم-الموليبدينوم التي يجري تطويرها في الوقت الراهن لازمة لتحويل مفاعلات البحوث العالية الفيض العالية الأداء. وعلى الرغم من إحراز تقدّم كبير في تطوير واعتماد أنواع وقود اليورانيوم-الموليبدينوم قبل عام ٢٠١٢، يلزم بذل المزيد من الجهود وإجراء المزيد من الاختبارات، وخصوصاً في سياق برامج التشعيع وفحوص ما بعد التشعيع، وكذلك في ميدان تقنيات التصنيع، لتحقيق التوفّر التجاري لأنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء المعتمدة ذات الكثافة العالية جداً في الوقت المناسب.

---

[٢٨] تكنولوجيا الصخر الاصطناعي (Synroc) هي تكنولوجيا أسترالية تستخدم الضغط المتوازن لتخفيض حجم المنتجات الثانوية النووية بما يصل إلى ٩٩% (مقارنةً بالوسائل الأخرى مثل السَمَنَتة).

١٤٣- وبعد تحويل مفاعلات تريغا ذات الصلة، انخفض الطلب العالمي على وقود تريغا. وخلال مؤتمر بشأن وقود مفاعلات البحوث عُقد في عام ٢٠١٠[٢٩]، أعلنت شركة تريغا الدولية أن ضعف جدوى إمدادات الوقود كعمل تجاري يهدد قدرتها على توفير الوقود على المدى الطويل. ومنذ ذلك الحين، ازداد سعر الوقود كثيراً، الأمر الذي يشكل تحدياً للتشغيل الجاري لعديد من مفاعلات تريغا الثمانية والثلاثين القابلة للتشغيل الموجودة على نطاق العالم.

١٤٤- وواصلت الوكالة في عام ٢٠١٢ دعمها لترويج استخدام مفاعلات البحوث للتعليم والتدريب. وشملت هذه المشاريع إيجاد سبل لزيادة عدد الدورات التدريبية المتاحة وأنواعها، وإشراك مفاعلات البحوث في التعليم العلمي الأساسي .

دال- استخدام التكنولوجيات الجديدة لتحسين أمن الأغذية وسلامتها

دال-١- وضع استراتيجيات وتكنولوجيات للتأهب والتصدي للطوارئ النووية والإشعاعية التي تؤثر على الأغذية والزراعة

١٤٥- يتعين أخذ العديد من العوامل في الحسبان لدى وضع استراتيجية للتأهب والتصدي للطوارئ النووية أو الإشعاعية المحتملة التي قد تؤثر على الأغذية والزراعة. وفي حين أن من المفيد اتباع نهج مشترك، يجب لكي تكون أي استراتيجية فعالة أن تضع في الاعتبار الظروف المحلية الخاصة بالموقع.

١٤٦- وقد أُطلقت نويدات مشعة إلى البيئة خلال حادثي تشيرنوبيل وفوكوشيما دايتشي النوويين. وفي فوكوشيما، تم الكشف عن مستويات عالية من السيزيوم واليود المشعَّين في التربة والنباتات، وولَّد برنامج لرصد الأغذية بيانات أدت إلى إصدار أول قيود على توزيع أغذية محددة في ٢١ آذار/مارس ٢٠١١. وأظهر حادث فوكوشيما دايتشي بوضوح، مثل حادث تشيرنوبيل، أن من المهم أهميةً حاسمة أن تنفّذ في أقرب وقت ممكن بعد الحدث ممارسات ميدانية ومختبرية منسَّقة تستخدم بروتوكولات متسقة لأخذ العينات واستراتيجيات متسقة لتحليل المواد الغذائية والتربة.

دال-١-١- التأهب والتصدي للطوارئ: الحاجة إلى إجراءات تحليلية منسقة وبروتوكولات منسقة لأخذ العينات

١٤٧- بعد وقوع أي حدث يؤدي إلى إطلاق نظائر مشعة في البيئة، ينبغي استخدام استراتيجيات لأخذ العينات لتحديد النظائر المشعة المثيرة للقلق وكذلك حجم التلوث وتوزيعه المكاني. وينبغي استخدام نهج موحد يستند إلى المعلومات الأساسية المناسبة بغية تجنّب المقارنات غير الدقيقة بين تركيزات النويدات المشعة. فمثلاً، يلزم عند تلوث الأراضي الزراعية أن تؤخذ عينات التربة من ذات العمق (التربة السطحية مقابل منطقة جذور المحاصيل).

---

[٢٩] الاجتماع المواضيعي الدولي بشأن التصرف في وقود مفاعلات البحوث لعام ٢٠١٠، الذي نظّمته الجمعية النووية الأوروبية بالتعاون مع الوكالة، والمعقود في مراكش، المغرب، من ٢٢ إلى ٢٥ آذار/مارس ٢٠١٠.

الشكل دال-١ - أخذ عينات التربة في حقول الأرز المتضرّرة، الصورة مقدّمة من وزارة الزراعة والحراجة ومصائد الأسماك، اليابان.

١٤٨- ويمكن أيضاً أن يؤدي عدم وجود بروتوكولات منسقة في مجال ممارسات أخذ العينات الميدانية وإجراء التحليلات المختبرية إلى إنتاج بيانات متضاربة، الأمر الذي يجعل اتخاذ القرارات السليمة صعباً. فمثلاً، يمكن أن يؤثّر شطف النويدات المشعة من سطح الخضروات الورقية على كمية النويدات المشعة التي يُكشف عنها، وأن يؤدي استخدام إجراءات مختبرية مختلفة (استخدام عينات مشطوفة أو غير مشطوفة) إلى تعقيد تفسير البيانات المستخدمة لتنفيذ القيود الغذائية.

١٤٩- ولذا فمن المهم أهميةً حاسمة أن تستخدم سلطات الرقابة على الأغذية والزراعة بروتوكولات وإجراءات موحدة. وينبغي أن تصمَّم هذه الإجراءات بحيث يتم ضمان أخذ عدد سليم إحصائياً من العينات، مع التوزيع الزماني والمكاني المناسب، من أنواع التربة والمواد الغذائية المختلفة. وينبغي أن تكون هناك إرشادات تساعد على تحديد أهمية عدم اليقين التحليلي، ونوع المعدات التحليلية المستخدم، والمنهجية المستخدمة (مثلاً التحليل في الميدان أو في المختبر)، بما في ذلك مواقع أخذ العينات (في الميدان، أو في نقاط التجميع، أو أثناء النقل، أو في مراكز التوزيع، أو في منافذ البيع بالتجزئة، أو في الأسواق).

الشكل دال-٢ - تقنيات الاختبار الخاصة برصد النويدات المشعة في الميدان، غرابن ايغ، النمسا [الوكالة، ٢٠١٢].

دال-١-٢- التعامل مع عينات البيانات الناتجة من أخذ العينات، وتفسير تلك العينات

١٥٠- يمكن أن يشكل وجود كمية كبيرة من البيانات الناتجة من أخذ عينات الأغذية تحديات لوجستية كبرى. والبيانات الفوقية الوصفية (البيانات عن المحتوى المعلوماتي للبيانات) وإعداد وتنظيم قواعد البيانات العلائقية ضروري عندما تُجمع كميات كبيرة من البيانات. ويساعد ذلك على الحفاظ على جودة البيانات، ويتيح إنتاج خرائط ونواتج بيانات تفصيلية، ويوفر معلومات دقيقة للحكومات والمستهلكين والرقابيين.

١٥١- وهناك تحدٍّ إضافي في إدارة البيانات هو عمق ومدى الاستبانة الجغرافية بين مجموعات البيانات. فمثلاً، يلزم أن تكون لعينات الأغذية وعينات التربة المرتبطة بمناطق الإنتاج استبانة جغرافية مكانية متماثلة (إسناد جغرافي متماثل) لكي يتسنى وضع البيانات على الخرائط وعرض البيانات بدقة أكبر. وفي هذا الصدد، يمكن أن تضيف النظم العالمية لتحديد المواقع قيمة إلى البيانات بتوفير المعلومات المكانية لفائدة أصحاب المصلحة في جميع أنحاء العالم. وتساعد هذه المعلومات أيضاً على القيام بعمليات أخذ عينات إضافية في ذات المواقع، بحيث يتسنى رصد التغيرات الزمنية في تركيزات النويدات المشعة في الأغذية والتربة.

دال-١-٣- وضع البيانات على الخرائط

١٥٢- رسم الخرائط نشاط مهم يمكن تسهيله باستخدام عمليات المسح الأرضي والجوي والمائي لرصد ترسيب النويدات المشعة بعد الحوادث الكبرى، وعلى سبيل المثال، عندما يتم الجمع بين عمليات المسح الجوي والمسح الأرضي لرسم خريطة للمدى المكاني لتساقط النويدات المشعة. وتلزم هذه المعلومات، إلى جانب بيانات رصد التربة والأغذية، لتحديد المناطق المتضررة، ولتوفير صورة أوضح لحالة التلوث، ولتحديد خيارات المعالجة المجدية تقنياً واجتماعياً واقتصادياً لاستعادة الإنتاج الزراعي. وتساعد هذه البيانات أيضاً على تطبيق التدابير الزراعية المضادة التي تهدف إلى إبلاغ المشورة السليمة في الوقت المناسب، ويشمل ذلك القيود المفروضة على توزيع واستهلاك منتجات زراعية وحرجية وسمكية محددة.

١٥٣- ويمكن أيضاً تنفيذ الرصد الأرضي بفعالية باستخدام كاشفات أشعة غاما المركّبة على سيارات مناسبة أو التي يحملها أفراد. وينبغي أن يشمل هذا النوع من المعدات قدرات نظام عالمي لتحديد المواقع، من أجل تسجيل أماكن أخذ العينات، بما يتيح التحديد السريع لمواقع التلوث الحرجة ويمكّن من اتخاذ القرارات السليمة في الوقت المناسب. ويمكن أيضاً أن يسهِّل الرصد المتنقل في الميدان تحديد المناطق التي قد تتطلب إجراء عمليات إضافية مفصلة لأخذ العينات والمراقبة. وتشمل التطورات الأخيرة الربط بين البيانات المسندة جغرافياً وتكنولوجيات رسم الخرائط الجغرافية المكانية من أجل النشر السريع للمعلومات على متّخذي القرارات والجمهور.

دال-١-٤- الاستنتاجات

١٥٤- من الضروري أن توفر السلطات المسؤولة القيادة أثناء الكوارث الكبرى، بما في ذلك الحوادث النووية، وفي أعقابها. ويشمل ذلك العمل بمقتضى الدروس المستفادة ووضع استراتيجيات وتكنولوجيات لتحسين التأهب والتصدي للطوارئ النووية والإشعاعية في المستقبل.

١٥٥- ومن الضروري تطوير الممارسات الميدانية والمختبرية الخاصة بالبروتوكولات المنسقة لأخذ العينات والاستراتيجيات التحليلية المنسقة (بما في ذلك التربة والسلع الزراعية والمواد الغذائية) وبرامج المراقبة الخاصة برصد السلع. ويلزم أيضاً تحسين الإبلاغ عن بيانات الأغذية والزراعة وإدارتها. ويشكّل ذلك قضية بصفة

خاصة عندما تتأثر بلدان عديدة بحدث ما ويصبح ضرورياً وجود نهج منسق لجمع البيانات وإدارتها. وتساعد المعدات والبرمجيات العصرية أيضاً على توفير البيانات الدقيقة في الوقت المناسب لكي يتمكن الرقابيون من الاستناد إلى أفضل المعلومات المتاحة في اتخاذ قراراتهم المتعلقة بالتصدي.

١٥٦- وفي الختام، يلزم وضع وتنفيذ تدابير تصدٍّ عملية وفي التوقيت المناسب وفعالة ومنسقة من أجل استعادة الإنتاج الزراعي وضمان سلامة الأغذية. ومن شأن تنفيذ هذه التدابير أن يساعد على جمع بيانات دقيقة ومناسبة أثناء التصدي لأي حدث من أحداث الطوارئ في المستقبل، وأن يتيح تطبيق تدابير مضادة واستراتيجيات استصلاح قائمة على أساس علمي للتصدي لعدم اليقين واستعادة الثقة في الإمدادات الغذائية.

دال-٢- التطبيقات الجديدة لتكنولوجيات تشعيع الأغذية

١٥٧- دور تشعيع الأغذية في تحسين جودة الأغذية وضمان سلامتها والحد من مخاطر الأمراض التي تنقلها معروف منذ سنوات عديدة، والإمكانات التي ينطوي عليها واضحة. ويمكن أن يؤدي تشعيع الأغذية دوراً رئيسياً في مواجهة هذه التحديات من خلال تقليل تلف الأطعمة وفقدها وهدرها ومنع انتشار الآفات الحشرية ذات الأهمية الاقتصادية، مع إتاحة الوصول إلى أسواق التصدير المربحة.

١٥٨- ووفقاً لما تفيد به منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو)، يُفقد أو يُهدر كل سنة ما يقرب من ثلث (١,٣ مليار طن) من جميع الأغذية المنتَجة للاستهلاك البشري. وتقدّر منظمة الصحة العالمية أيضاً أن الأمراض التي تنقلها الأغذية والأمراض التي تنقلها المياه تقتل ٢,٢ مليون شخص سنوياً – وأن أكثر من ١,٩ مليون منهم من الأطفال.[٣٠] ولذلك يمكن أن يكون للحد من فقد الأغذية وهدرها وتحسين جودة الأغذية وسلامتها بالتطبيق المأمون لتكنولوجيات تشعيع الأغذية تأثير مباشر وكبير على الأمن الغذائي العالمي. وتتزايد الصادرات والتجارة في الأغذية المشععة، مع تزايد نطاق تقبُّل هذه التكنولوجيا ودعمها بالمعايير الدولية.

دال-٢-١- تكنولوجيا تشعيع الأغذية

١٥٩- تقنية تشعيع الأغذية من التقنيات القليلة المتاحة للتعامل مع جودة الأغذية وسلامتها، بسبب قدرتها على مكافحة الكائنات العضوية الدقيقة المسبِّبة لتلف الأغذية وللأمراض التي تنقلها الأغذية (عن طريق تعطيل تلك الكائنات وتدميرها) وكذلك الآفات الحشرية الضارة (عن طريق جعلها غير قادرة على التكاثر) دون تأثير كبير على الصفات الحسية والصحية للأطعمة. وتوفر الأطعمة المعالَجة بالتشعيع نفس مزايا الأطعمة المعالَجة بالعمليات البديلة، مثل عمليات التسخين أو التبريد أو التجميد أو المعالجة الكيميائية، ولكن دون رفع درجات حرارة الطعام كثيراً أو ترك بقايا يمكن أن تكون ضارة. ويمكن أن يُستخدَم التشعيع أيضاً لحماية الأغذية المعبّأة، عن طريق منع انتقال التلوث التبادلي بالأخطار الميكروبيولوجية بعد المعالجة.

---

[٣٠] السلامة الغذائية، تقرير من الأمانة إلى جمعية الصحة العالمية الثالثة والستين (A63/11) ٢٥ آذار/مارس ٢٠١٠، http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA63/A63_11-en.pdf.

الشكل دال-٣- باحثون في مركز تطبيقات تكنولوجيا النظائر والإشعاعات التابع للوكالة الوطنية للطاقة النووية، جاكرتا، إندونيسيا، يعدّون وجبات طعام مشعَّعة جاهزة للأكل لذوي الجهاز المناعي المنقوص القدرة، تزيد التنوع الغذائي وتحدّ من مخاطر الأمراض التي تنقلها الأغذية [الوكالة، ٢٠١٢].

١٦٠- ويشتمل تشعيع الأغذية على تعريض الأغذية للإشعاع المؤيِّن في ظروف محكومة بضوابط. ويمكن استخدام أشعة غاما والشعاع الإلكتروني والأشعة السينية لأداء تطبيقات الأغذية في ظل المعايير المعترف بها دولياً الصادرة عن لجنة دستور الأغذية، المشتركة بين الفاو ومنظمة الصحة العالمية، والاتفاقية الدولية لوقاية النباتات. وللأنواع المختلفة من الإشعاعات المؤينة خصائص مختلفة ولذلك تتيح فوائد وعيوباً تكنولوجية مختلفة، لكن أي جرعة معيّنة من أشعة غاما أو الشعاع الإلكتروني أو الأشعة السينية تنتج، بصفة عامة، نفس التأثيرات المتمثّلة في تعطيل الكائنات العضوية المسبِّبة للأمراض وتلف الأغذية، وتأخير النضج، ومنع الحشرات من التكاثر.

١٦١- وقد تطورت تكنولوجيا تشعيع الأغذية كثيراً منذ أن اقتُرحت في وقت مبكر من التسعينات ومنذ تطوير تقنية صنع مصادر قوية للإشعاعات في الخمسينات، وتشمل الآن تطبيقات جديدة للإشعاعات المؤيِّنة وتقنيات معالَجة مختلفة، على سبيل المثال استخدام هذه التكنولوجيا مصحوبةً بأجواء باردة أو معدَّلة.

١٦٢- وحالياً، يتم تشعيع الأغذية أساساً في منطقة آسيا والمحيط الهادئ وفي القارة الأمريكية، ولكن لا يوجد على الصعيد العالمي ما يكفي من مرافق التشعيع التي تعالج الأغذية. ويُستخدم الإشعاع المؤيِّن أساساً لتعقيم الأجهزة الطبية والمستحضرات الصيدلانية، وللحفاظ على القطع الأثرية، ولتجهيز مستحضرات التجميل ومواد التعبئة والتغليف، ولتحسين مواد السلع الاستهلاكية والمصنَّعة. ومعظم المرافق متعددة الأغراض وتعالج مجموعة واسعة من المنتجات، وعلى الرغم من أن الأغذية قد تشكل جزءاً صغيراً من إنتاجها، فالقليل منها مصمَّم بحيث يقوم بكفاءة بتوفير الجرعات المنخفضة نسبياً (٠,١ إلى ١٠ كيلو غراى) التي تُستخدَم لمعالجة الأغذية.

١٦٣- وفي الوقت الحاضر، يعالَج معظم الأغذية المشعَّعة باستخدام أشعة غاما. فمثلاً، من بين مرافق تشعيع الأغذية البالغ عددها نحو ١٧٠ مرفقاً في الصين، يستخدم أكثر من ٩٥٪ أشعة غاما. والوضع مماثل في حالة المرافق التي تشعِّع الأغذية لبلدان الاتحاد الأوروبي، حيث يستخدم ٢٦ مرفقاً أشعة غاما وتستخدم ٦ مرافق الشعاع الإلكتروني. بيد أن استخدام الشعاع الإلكتروني يتزايد على نطاق العالم، وهناك اهتمام متزايد باستخدام الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية لمعالجة الأغذية في مختبرات البحوث وفي المرافق التجارية الكبيرة الحجم.

دال-٢-٢- المصادر الإشعاعية

١٦٤- تستخدم مرافق التشعيع بالنظائر المشعة نظائر الكوبالت-٦٠ أو السيزيوم-١٣٧ المشعة لتوفير أشعة غاما. ويُستخدَم الكوبالت-٦٠ في المرافق التجارية وفي معظم مرافق التشعيع ذات النطاق البحثي، بسبب ارتفاع طاقات أشعة غاما التي يولّدها واستقراره الذاتي كفلزّ، ولكن بعض مرافق التشعيع البحثية تستخدم السيزيوم-١٣٧، الذي له عمر نصفي أطول. ومن عيوب أشعة غاما أنها لا يمكن 'إغلاقها'، ولذلك يجب تشغيل المرفق بصفة مستمرة من أجل الاستخدام الاقتصادي الكامل للمادة المشعة. وعلاوةً على ذلك، يعني الاضمحلال الإشعاعي أن الفترة الزمنية التي تتعرض فيها الأغذية للإشعاع المؤيِّن يتعين أن تزاد بنسبة مئوية قليلة كل شهر، وأن المصدر المشع يتعين أن يعزَّز دورياً بكميات إضافية من النظير المشع للحفاظ على كفاءة تجهيز مقبولة. ويتعين تصميم هذه المرافق بحيث يتم ضمان الاحتواء المأمون لمصدر النظائر المشعة القوي، ولكن تشغيلها سهل نسبياً

١٦٥- أما المرافق ذات المصادر الآلية، أي التي تنتج الشعاع الإلكتروني أو الأشعة السينية، فهي تستخدم الكهرباء لإنتاج الإشعاع المؤيّن، ولذلك تمتاز على مرافق النظائر المشعة بمزيّة أنه يمكن إغلاقها عندما لا تكون هناك حاجة إليها. ويتم إنتاج الشعاع الإلكتروني بتعجيل تيار من الإلكترونات عن طريق مجالات مغنطيسية وكهربائية. وتوصِّل هذه المرافق الجرعة بسرعة، ويمكن أن توصِّل في أقل من ثانية جرعة يحتاج مرفق التشعيع بأشعة غاما إلى عدة ساعات لإيصالها. إلا أن الشعاع الإلكتروني لا يخترق الأغذية بالعمق الذي تخترقها به أشعة غاما، وليس مناسباً لمعالجة شحنات كبيرة الحجم من الأغذية في خطوة واحدة. والشعاع الإلكتروني قادر على تجهيز وحدات الأغذية المعبّأة الأصغر حجماً بمعدل سريع جداً. ويُستخدَم الشعاع الإلكتروني بالفعل للتطبيقات التجارية في الصناعات الطبية وصناعات تعديل المواد والصناعات البيئية، ولكن القليل من مرافق الشعاع الإلكتروني مصمَّم للمعالجة الفعالة للأغذية، وهناك حاجة إلى البحوث لمواصلة تطوير تكنولوجيا الشعاع الإلكتروني لأغراض التطبيقات الغذائية.

١٦٦- وتتولد الأشعة السينية عند تعجيل الإلكترونات في هدف فلزي، مثل التَنتالُم أو التنجستن أو الذهب، لتوليد تيار من الأشعة السينية. ورغم أنه يمكن فقدان كمية كبيرة من الطاقة في شكل حرارة، ينال التشعيع بالأشعة السينية اهتماماً متزايداً لأنه أكثر اختراقاً من الشعاع الإلكتروني ولذلك يمكن أن يُستخدَم لتشعيع عبوات كبيرة الحجم دون حاجة إلى مصدر مشع. ويستخدم مرفق في هاواي الأشعة السينية لتشعيع الفواكه والخضروات الطازجة لتصديرها إلى البر الرئيسي للولايات المتحدة الأمريكية، وتستخدم منشأة كبيرة في سويسرا هذه التقنية الآن لتعقيم الأجهزة الطبية. ومع توفّر الجيل الجديد من ماكينات الأشعة السينية ذات الكفاءة الأكبر والهندسة المحسَّنة، يرجَّح أن يصبح التشعيع بالأشعة السينية أكثر انتشاراً في المستقبل.

الجدول دال-١- مقارنة بين أجهزة التشعيع بالنظائر المشعة وأجهزة التشعيع ذات المصدر الآلي

	التشعيع بالنظائر المشعة	**التشعيع بالمصادر الآلية**	
طريقة الاستخدام	تُطلَق أشعة غاما على الأغذية	يُمرَّر شعاع إلكتروني عبر الأغذية	تُطلَق الأشعة السينية على الأغذية
المصدر	مصدر الإشعاع هو نظير مشع (عادةً الكوبالت-٦٠)	مصدر الإشعاع هو ماكينة تستخدم الكهرباء.	
الاختراق	إشعاع عالي الاختراق (مناسب لمنصّات تحميل الأغذية).	اختراق محدود (مناسب لصناديق الكرتون المحمّلة بالأغذية).	عالي الاختراق (مناسب لمنصّات تحميل الأغذية).
مدة المعالجة	مدة تجهيز معقولة (دقائق/ساعات)	تجهيز سريع للغاية (ثوانٍ/دقائق).	مدة تجهيز متوسطة (دقائق/ساعات).
عند عدم الاستخدام	المصدر عامل على الدوام ويجب تخزينه في وضعية مأمونة عند عدم الاستخدام.	يمكن إغلاق المصدر، ولذلك يقتصد الطاقة.	
مرحلة التطور	تكنولوجيا راسخة، مستخدمة في البحوث وعلى نطاق تجاري.	يلزم المزيد من التطوير من أجل التطبيقات الغذائية. مستخدمة في البحوث وعلى نطاق تجاري ولكن أساساً للأصناف غير الغذائية.	تكنولوجيا ناشئة. يلزم المزيد من العمل بشأن التطبيقات الغذائية. مستخدمة في بعض البحوث وفي القليل من المرافق ذات النطاق التجاري.
الانتشار	معظم الأغذية المشعّعة تُعالَج في هذا النوع من المرافق.	تُعالَج بعض الأغذية بالشعاع الإلكتروني.	هناك مرفق واحد ذو نطاق تجاري يستخدم الأشعة السينية لتشعيع الأغذية.
الصيانة	تتقلص قوة المصدر بمرور الزمن، ويحتاج إلى تغذية.	يلزم إمداد كهربائي جيد، وتحتاج الماكينة إلى صيانة.	

الشكل دال-٤- إعداد منتجات مأمونة للتصدير، باستخدام تكنولوجيا التشعيع بأشعة غاما، هانوي، فيتنام [C. Blackburn، ٢٠١٢].

دال-٢-٣- الاتجاهات

١٦٧- أصبح من الصعب توفير مصادر النظائر المشعة في أنحاء كثيرة من العالم، بسبب الخوف من الإرهاب وبسبب التعقيدات اللوجستية المتزايدة المرتبطة بشحن تلك المصادر عبر الحدود. ومن الأسباب الرئيسية لتزايد الاهتمام بتكنولوجيا الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية أنها تتجنب مسائل الشراء والنقل والتخزين والتخلص والحماية المرتبطة بمصادر النظائر المشعة. ولتشعيع الأغذية فائدة إضافية أيضاً تتمثل في أن التكنولوجيات القائمة على الماكينات لا تشتمل على مواد مشعة وعلى الدلالة النووية لتلك المواد، وبذلك تخفّف من التصورات السلبية لدى المستهلكين. ولذا فمن المتوقع أن تتطور تكنولوجيات الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية كخيار بديل لتشعيع الأغذية.

دال-٢-٤- صادرات الأغذية والتجارة في الأغذية المشعة

١٦٨- يوجد القليل من البيانات الموثوقة عن كميات المواد الغذائية التي يتم تشعيعها على نطاق العالم، ولكن من المعروف أن كمية كبيرة ومتزايدة من الأغذية ذات القيمة العالية تُشعَّع ويُتَّجَر بها سنوياً. وتوجد في معظم مناطق العالم كمية صغيرة ولكن متزايدة من الأغذية يتم تشعيعها امتثالاً للشروط الصحية. فمثلاً، تشير بيانات نُشرت في عام ٢٠١٢ إلى أن أكثر من ٩٢٦٣ طناً من الأغذية، هي أساساً أرجل ضفادع ودواجن وتوابل، تم تشعيعها في الاتحاد الأوروبي.

١٦٩- ويجري تشعيع نسبة كبيرة ومتزايدة من الأغذية لأسباب تتعلق بالصحة النباتية (مثلاً، للقضاء على ذباب الفاكهة والسوس (العُث) والبق المغبَّر)، وهذا التطبيق التجاري الجديد نسبياً ينشِّط التجارة في الأغذية المشعة. وعلى سبيل المثال، يتم تشعيع الفواكه والخضروات الطازجة بجرعات منخفضة (أقل من ١ كيلو غراى) لتصديرها إلى الولايات المتحدة الأمريكية، بعد صدور قرار من إدارة تفتيش الصحة الحيوانية والنباتية بالسماح بالتشعيع كمعالجة 'عامة' ضد الآفات الحشرية خلال الحجر الصحي، تُستثنى منها العَثة في مراحل

معيّنة من حياتها. وتسمح الإدارة المذكورة أيضاً بتشعيع ثمار المانغو الواردة من باكستان لدى وصولها الى الولايات المتحدة، ويجري الآن إنشاء قدرة جديدة لتشعيع الأغذية في المكسيك تستهدف السوق الأمريكية. ووسّعت التطورات الرقابية الأخيرة في الولايات المتحدة الأمريكية أيضاً نطاق الموافقة على مرافق أشعة غاما والشعاع الإلكتروني الخاصة بمعالجة المنتجات الطازجة المستوردة عند نقطة الاستيراد. ويتحرك منظمو المشاريع للاستفادة من هذه الموافقات، الأمر الذي يحفز الاهتمام في بلدان لا تمتلك القدرة على تشعيع الأغذية لولا ذلك. ومن المرجح أن تواصل التجارة في الفواكه والخضروات الطازجة المشععة نموها السريع.

١٧٠- وتتّجر عدة بلدان في المنتجات الطازجة المشععة، بما في ذلك أستراليا وتايلاند وفييت نام والمكسيك ونيوزيلندا والهند والولايات المتحدة الأمريكية. ويدفع ذلك اتجاهاً متزايداً نحو المواءمة الأقاليمية للنُّهج والاستراتيجيات الوطنية المتعلقة بتسويق تشعيع الأغذية تجارياً من خلال مكافحة الآفات الحشرية ذات الأهمية للحجر الصحي الموجودة في المنتجات الطازجة. وتدعم هذا الاتجاه المعايير الدولية لتدابير الصحة النباتية المنبثقة من الاتفاقية الدولية لوقاية النباتات، بما في ذلك المعايير التي وُضعت من خلال مبادرات بحثية للوكالة، مثل المبادئ التوجيهية لاستخدام الإشعاع كمعيار في الصحة النباتية ومعالَجات الصحة النباتية للآفات الخاضعة لقواعد الحجر الزراعي؛ وتشمل هذه المعالَجات الأخيرة أربع عشرة معالجة متّفقاً عليها دولياً من معالجات التشعيع الخاصة بالصحة النباتية تم وضعها من خلال المشاريع البحثية المنسقة للوكالة.

دال-٢-٥- الاستنتاجات

١٧١- يثير التحضر المتزايد والنمو السكاني وتغير المناخ مخاوف بشأن توفّر الأغذية السليمة والصحية والعالية الجودة بتكلفة ميسورة. ويتزايد نقد الأساليب التقليدية المستخدمة للحد من خسائر الأغذية بعد الحصاد، بما في ذلك استخدام التبخير وغيره من المعالجات الكيميائية، بسبب نتائجها التي يمكن أن تكون خطرة على الجمهور والبيئة، ويشمل ذلك معالجات كيميائية معيَّنة مقيّدة بموجب أحكام بروتوكول مونتريال المتعلق بالمواد المستنفِدَة لطبقة الأوزون. وهناك حاجة إلى زيادة استخدام تشعيع الأغذية، ولا سيما تكنولوجيات الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية، من أجل تحسين توفّر الأغذية ومعقولية تكلفتها تحسيناً كبيراً في السنوات المقبلة. فهذه التكنولوجيات يمكن أن توفر معالجة فعالة ومأمونة من أجل ضمان جودة الأغذية والحد من خسائر ما بعد الحصاد في جميع أنحاء العالم.

١٧٢- ومن المرجح أن تشمل أوجه التقدم في المستقبل إجراء البحوث بهدف زيادة تطوير قدرات تشعيع الأغذية باستخدام تكنولوجيات التشعيع بالشعاع الإلكتروني والأشعة السينية. وستكون هذه التكنولوجيات الجديدة مهمة للرقابيين ومقرِّري السياسات والباحثين وقطاع الصناعات الغذائية في وضع المبادرات والسياسات لزيادة التجارة في الأغذية المشععة.

١٧٣- ويوفر التشعيع أيضاً معالجة لما بعد الحصاد يمكن أن تكفل تلبية الصادرات للشروط الصحية والمتعلقة بالحجر الصحي، وبذلك تؤمِّن الوصول إلى أسواق التصدير والعملات الأجنبية، فتساعد على توليد دخل يمكن أن يحقق فائدة مباشرة لمنتجي المواد الغذائية الذين لا يستطيعون بخلاف ذلك أن يستفيدوا من الفرص التجارية الدولية.

هاء- التطورات المستجدة في مجال مكافحة السرطان بالتكنولوجيات النووية

هاء-١- أوجه التقدم الحديثة في مجال العلاج الإشعاعي للسرطان

١٧٤- تعالج تقنيات العلاج الإشعاعي السرطان بفعالية بتسليط جرعة دقيقة من الإشعاعات على الورم مع تعريض الأنسجة السويّة المحيطة به لأقل أضرار. وتتيح أوجه التقدّم الحديثة في مجال العلاج الإشعاعي القائم على الفوتونات مزايا جوهرية يُحتمَل أن تفوق مزايا العلاج الإشعاعي التقليدي. وتنطوي أوجه التقدّم هذه على تقنيات مثل العلاج الإشعاعي المعدل الكثافة، والعلاج الإشعاعي الموجّه تصويرياً، والعلاج بالأشعة المجسمة، والجراحة الإشعاعية المجسمة، والعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم، والعلاج الإشعاعي بالتحكم الآلي، والعلاج الإشعاعي المقطعي الحلزوني، والعلاج القوسي المعدل حجمياً، والعلاج الإشعاعي المتحكّم في الجهاز التنفسي. وقد قدّم استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢ عرضاً موجزاً لهذه التكنولوجيات.[٣١]

هاء-١-١- قضايا تتعلق بالعمل بهذه التكنولوجيات

١٧٥- تسمح بعض التكنولوجيات المشار إليها أعلاه بإعطاء جرعات دقيقة من الإشعاعات لم يكن بالإمكان تصورها سابقاً، وذلك بصورة غير اقتحامية لحجم الورم المحدد بشكل متفرِّد. ولهذه التكنولوجيات مزايا محتملة تتمثل في تحسين توزُّع الجرعات، وخفض الُسمِّية، وسرعة تقديم العلاج، وزيادة إحكام السيطرة الموضعية، وهي مزايا تؤدي كلّها إلى زيادة فرص البقاء على قيد الحياة. ولكنَّ التكنولوجيات المذكورة في مراحل مختلفة من التطور الإكلينيكي، كما أنَّ الدخول إلى الممارسة الطبية الواسعة النطاق سيقتضي توفُّر مزيد من البيانات الداعمة المستقاة من تجارب عشوائية مصمّمة تصميماً جيداً.[٣٢] وهناك أدلة تُثبت بأنَّ العلاج الإشعاعي المعدّل الكثافة يُسهّل اجتناب الخلايا السويّة. فعلى سبيل المثال، توصَّل استعراض أجري مؤخراً للأدلة الإكلينيكية المتعلقة بالعلاج الإشعاعي المعدل الكثافة[٣٣] إلى أنَّ هذا النوع من العلاج يحافظ على إنتاج الغدة النكفية اللعابية ويقلِّص من جفاف الفم المزمن والمتأخر خلال العلاج الإشعاعي لحالات السرطان المتقدمة موضعياً في الرأس والعنق. كما أنه يقلِّص السمية المستقيمية المتأخرة للمرضى المصابين بسرطان البروستات، مما يتيح زيادة الجرعات بأمان، وهو يقلِّص على ما يبدو السمية في عدة مواضع أخرى للأورام. وفي سرطان الثدي، يقلِّص العلاج الإشعاعي المعدَّل الكثافة من نسبة السمية الحادة ويحسّن الجانب الجمالي مقارنةً بالعلاج الإشعاعي التقليدي المماسي للثدي.

١٧٦- واليوم، يُعتبر العلاج الإشعاعي المكيَّف الثلاثي الأبعاد على أنه النهج التقني النمطي، كما أنه يوفِّر علاجاً جيِّد النوعية لأغلبية المرضى وبتكلفة معقولة لكل مريض. وتُعتبر بعض التكنولوجيات الجديدة، مثل العلاج بحزم أيونات الكربون، أو العلاج الإشعاعي بالبروتونات، أو العلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم، تكنولوجيات مناسبة لأنواع محددة من السرطان ولحالات إكلينيكية محددة، ولكنَّها لا يمكن أن تحل محلَّ العلاج الإشعاعي النمطي التقليدي القائم على العلاج الإشعاعي الفوتوني المكيَّف الثلاثي الأبعاد.

---

[٣١] الوثيقة IAEA NTR 2012.

[٣٢] Rosenblatt et al. Radiother & Oncol, 2012

[٣٣] Staffurth J. Clinical Oncol 2010

١٧٧- وبغية اختيار أنسب التكنولوجيات، من الضروري وجود معلومات واضحة عن التكنولوجيات المستخدمة. وفي المقام الأول، ركَّزت التجارب المبكّرة التي استخدمت بعض هذه التكنولوجيات على الجدوى في الأطر الإكلينيكية كنقطة نهائية أساسية، بينما كان التركيز في الآونة الأخيرة على النواتج. ومن الضروري أيضاً تقييم التكنولوجيات الجديدة استناداً إلى بارامترات تُدمج تدابير جودة الحياة، مثل نواتج المرضى المبلّغ عنها وسنوات العمر المعدَّلة الجودة. [٣٤]

الشكل هاء-١ - معجل خطي طبي عصري مجهَّز لتقديم العلاج الإشعاعي الموجّه تصويرياً. ويمكِّن هذا الجهاز من زيادة دقة العلاج الإشعاعي عن طريق التصوير المتكرر للهدف و/أو الأنسجة السليمة قبل العلاج مباشرةً ثم التعامل مع هذه الصور لتكييف هدف الإشعاعات. الصورة: إيدواردو روزينبلات. محفل الجمعية الأوروبية للعلاج الإشعاعي ودراسة الأورام، لندن ٢٠١١.

هاء-١-٢- تكلفة وكفاءة تقنيات العلاج الإشعاعي المتقدمة

١٧٨- يتوقف استخدام تكنولوجيات العلاج الإشعاعي الحديثة والمتقدّمة على تكلفتها وكفاءتها. ولهذه التكنولوجيات تكاليف رأسمالية وتشغيلية أعلى، وهي تنطوي على برامج أكثر صرامة لضمان الجودة، وتحتاج إلى موظفين مؤهلين على النحو الواجب. ويجري اليوم استحداث إجراءات لضمان الجودة تكون قادرة على تلبية الطلبات على التكنولوجيات المتقدمة، وسيكون من الضروري تنفيذها بالاقتران مع التجارب الإكلينيكية المقارنة الرسمية. ومن الضروري كذلك التفكير في العمل بخيارات التكنولوجيات المتقدّمة في العلاج الإشعاعي للأورام في سياق الاحتياجات والأولويات العامة، حيث إنَّ هناك عوامل مهمة، مثل توفر مهنيين مؤهّلين في مجال العلاج الإشعاعي وتمويل المعدات وإمكانية صيانتها. وتدعو الضرورة إلى تدريب الأخصائيين في العلاج الإشعاعي للأورام والفيزيائيين الطبيين والأخصائيين في تكنولوجيا العلاج الإشعاعي والمديرين ومهندسي الصيانة. ويحتاج كل واحد من هؤلاء المهنيين إلى تدريبات كثيرة ليس فقط على التكنولوجيا الجديدة التي ينبغي تنفيذها، وإنما أيضا في أحيان كثيرة على مستوى المتطلبات التعليمية الأساسية للعمل في هذا المجال.

[٣٤] Vikram, Coleman and Deye. Oncol 2009, Part I & Part II

الشكل هاء-٢ - العلاج الإشعاعي بالتحكم الآلي هو نظام جراحة إشعاعية بالتحكم الآلي بدون إطار. والعنصران الرئيسيان لهذا الجهاز هما الإشعاع الناتج من معجل خطي صغير وذراع آلية تسمح بتوجيه الطاقة نحو أي جزء من الجسم من أي اتجاه. الصورة: ايدواردو روزينبلات. محفل الجمعية الأوروبية للعلاج الإشعاعي ودراسة الأورام، لندن ٢٠١١.

هاء-١-٣- العلاج بالجسيمات من أجل معالجة السرطان

١٧٩- يشير العلاج بالجسيمات إلى استخدام جسيمات دون ذرية 'أثقل' في العلاج الإشعاعي. ورغم أنه يمكن اعتبار الإلكترون على أنه 'جسيم'، فإنه يُستخدم بشكل روتيني في الممارسة الإكلينيكية وليست له أي خصائص بيولوجية إشعاعية استثنائية. وعندما تتنقل الجسيمات الأثقل (النيوترونات والبروتونات وأيونات الكربون) عبر الأنسجة، فإنها تودع طاقة أكثر لكل طول مسار وحدة (كالسنتم مثلا). لذلك يكون من المرجّح أكثر أن تُلحق أضراراً بحمض د.ن.أ وتقتل الخلايا. وتودع الإشعاعات القائمة على الفوتونات أو الأشعة السينية جرعة كبيرة من الإشعاعات قريبة من سطح الجسم. وتتضاءل الجرعة الممتصة مع تنقل الفوتون عميقا عبر الأنسجة. وتودع البروتونات طاقة قليلة على سطح الجسم. وبالإضافة إلى ذلك، تطلق البروتونات طاقة قصوى (أو تنتج تأيينا كثيفا) عندما تقترب من نهاية مسارها في الأنسجة. وتسمى عملية إطلاق الطاقة هذه ذروة براج – وقبل بلوغ ذروة براج، تكون جرعة الإشعاعات منخفضة وبعد تجاوز ذروة براج، تنخفض الجرعة لتصل إلى صفر في مساحة جد صغيرة.

١٨٠- وسجلّ استخدام العلاج بالجسيمات من أجل معالجة السرطان هو سجلّ حافل وطويل. فقد استُحدث هذا النوع من العلاج في مطلع الخمسينات عندما بدأ تنفيذ الحالات الأولى من المعالجة بحزم البروتونات، وتلتها حالات المعالجة بالبيون (الجسيمات دون الذرية المشحونة) وبحزم النيوترونات. وقد شهد العقدان الماضيان زيادة في الاهتمام بالعلاج بالجسيمات وتطوراً في هذا المجال، ولا سيما العلاج بحزم البروتونات والعلاج بحزم أيونات الكربون. وهناك اليوم ٤٠ مركزاً للعلاج بالجسيمات عبر العالم، بما في ذلك ٦ مراكز للعلاج بحزم أيونات الكربون. وبالإضافة إلى ذلك، هناك ٢٥ مرفقاً قيد التشييد والتطوير.[٣٥]

---

[٣٥] الفريق التعاوني للعلاج بالجسيمات.

١٨١- ولكنّ التكاليف ما زالت تمثِّل مشكلة بالنسبة لهذه المرافق. فقد أوضح تحليل لتكاليف العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية باستخدام أيونات الكربون والبروتونات والفوتونات[٣٦] أنَّ التكاليف الرأسمالية تتراوح بين ٢٣ مليون يورو و١٣٨ مليون يورو (بحسب توليفات العلاج المحددة)، إلى جانب التكاليف الجارية سنوياً والتي تتراوح بين ٩ ملايين يورو و٣٦ مليون يورو. وفي حالة مرافق البروتونات، استُحدِثت حلول تجارية مدمجة أحدث. وتبلغ تكلفة مرفق الجهاز الواحد الذي يستخدم هذه النماذج الجديدة نحو ١٦ مليون يورو، مقارنةً بتكلفة تضبيط البروتونات التقليدي التي تبلغ ٩٥ مليون يورو.

١٨٢- وهناك مشكلة إضافية فيما يتعلق بالعلاج بالجسيمات، وهي مدى دعم الأدلة العلمية المتاحة لادعاء أنَّ هذا النوع من العلاج يتفوَّق على العلاج النمطي بحزم الفوتونات المستخدم في معالجة الأورام الجامدة.[٣٧] وقد زعم بعض الخبراء العاملين في مرافق حزم الجسيمات أنه ليس هناك أي حاجة أو مبرِّر لإجراء تجارب إكلينيكية تقارن، مثلاً، بين البروتونات والفوتونات، لأن من الواضح أن توزيع الجرعة الفيزيائية وإيداع الطاقة أعلى في البروتونات.

١٨٣- ولكن خبراء آخرين يصرّون على أنه، على غرار أي طريقة ابتكارية أخرى في المعالجة الطبية، من الضروري توفير الأدلة العلمية لكي يتسنى تبرير استخدام طريقة مُكلِفة من حيث الموارد مقارنةً بالمعالجة النمطية. ويقال إنَّ افتراض أن العلاج بالجسيمات يتفوَّق على العلاج بالفوتونات استناداً إلى توزيع الجرعة الفيزيائية وحدها لا يكفي لتبرير الاستعاضة عن العلاج بحزم الفوتونات بالعلاج بالجسيمات.

١٨٤- وبناءً على ذلك، من الضروري توفير بيانات أشمل حول البيولوجيا الإشعاعية والفيزياء الإشعاعية والنواتج الإكلينيكية للعلاج بحزم الجسيمات.

هاء-١-٤- التشعيع الداخلي

١٨٥- التشعيع الداخلي هو تطبيق العلاج الإشعاعي عن طريق وضع مصادر مشعة بالقرب من الأورام أو تجاويف الجسم أو داخلها. وفي أنواع السرطان التي تصيب الجهاز التناسلي، انتقل التشعيع الداخلي تدريجياً من اتباع النهج الثنائي الأبعاد إلى التخطيط الثلاثي الأبعاد استناداً إلى التصوير المقطعي العرضي. وفي هذا النهج العصري، يخضع المريض لتصوير مقطعي حاسوبي أو لمسح تصويري بالرنين المغنطيسي بعد إدخال الأدوات الطبية المستخدمة في التشعيع الداخلي. ولا تمكِّن هذه الطريقة من رؤية هذه الأدوات فحسب، وإنما أيضاً رؤية الورم في حد ذاته وامتداداته والأعضاء المجاورة له التي يمكن أن تتضرر بالإشعاعات. ومن ثم لا توصف جرعة الإشعاعات لنقطة ما كما هو الحال في الماضي، وإنما توصف لحجم لا يشمل الورم السرطاني وامتداداته فحسب، وإنما يشمل أيضاً الأحجام المهددة بنسبة عالية بالتلوث بالخلايا السرطانية.[٣٨]

١٨٦- وقد تتفاوت التكاليف بشكل كبير بحسب التكنولوجيا المختارة. ويمكن لبعض التكنولوجيات، مثل التشعيع الداخلي الثلاثي الأبعاد، والعلاج القوسي المعدل حجمياً، والعلاج بالأشعة المجسمة، أن تستخدم بعض مكوِّنات

---

[٣٦] Peeters et al. Radiother & Oncol, 2010

[٣٧] Holtzscheiter et al. Radiother & Oncol, 2012

[٣٨] Haie-Meder et al. Radiother & Oncol 2005.

العلاج الإشعاعي المركّبة القائمة لأغراض التصوير أو التخطيط. وتحتاج تكنولوجيات أخرى، مثل التكنولوجيات التي تستخدم أيونات الكربون أو البروتونات، إلى مرفق جديد تماماً ومكرَّس لذلك الغرض.

١٨٧- ومن أجل استكمال مثل هذه المرافق، تدعو الضرورة إلى متطلبات إضافية لضمان الجودة، بما في ذلك معدات جديدة، وموظفون إضافيون، ووقت مكرَّس للأنشطة ذات الصلة بضمان الجودة.

١٨٨- ويستدعي إدماج التكنولوجيا المتقدِّمة في نظم العلاج واستدامتها استثمارات إضافية في المباني والمعدات، وتوفير موارد بشرية إضافية مدرَّبة تدريباً جيداً، وإبرام عقود صيانة مُكلِّفة فيما يتعلق بالمعدات المتطوّرة والدقيقة المستخدَمَة.

هاء-٢- التطورات في المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المستخدمة لتصوير وعلاج السرطان

١٨٩- السرطان مرض يظهر عندما تتبدَّل البنية الجزيئية البيوكيميائية الداخلية للخلية بطريقة غير عادية، فتنفلت بذلك عن آليات المراقبة المعتادة التي تنظّم نمو الأنسجة عبر شبكة استشعار خلوي معقدة. وهذه عملية معقدة، ورغم إحراز الكثير من التقدم، فما زال هناك افتقار إلى معالجات فعالة بالنسبة للعديد من أنواع السرطان. ويسلّط هذا القسم الضوء على بعض التطورات التي طرأت مؤخراً في فهم السرطان على المستويين الذري والجزيئي.

هاء-٢-١- التكنولوجيا النانوية والطب النانوي

١٩٠- التكنولوجيا النانوية هي تحوير المادة على المستوى الذري والجزيئي لاستحداث مواد وأجهزة وهياكل جديدة. وعلى المستوى الجزيئي، قد يكون للذرات المنفردة خصائص مختلفة مقارنةً بمجموعات من الذرات ذاتها.

١٩١- والحجم مهم كذلك في مكافحة السرطان نظراً للأنماط السلوكية المختلفة على المستوى الذري. ويمكن أن تساعد النُهُج غير المسبوقة القائمة على خصائص محددة لهياكل نانوية معيَّنة في مكافحة السرطان، وقد أفضى ذلك إلى ظهور المجال الجديد المعروف بالطب النانوي، والذي يُعرَّف بأنه التطبيق الطبي للتكنولوجيا النانوية. ويستغل هذا المجال الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المحسَّنة والمبتكرة في الكثير من الأحيان للمواد النانوية للتمكّن من الكشف عن السرطان والوقاية منه في وقت مبكّر، ولتحسين تشخيص المرض ومعالجته ومتابعته.

هاء-٢-٢- خصائص المواد النانوية التي قد تكون مفيدة لعلاج السرطان

١٩٢- لطالما كانت المواد الكيميائية السامة للخلايا والمركبات الموسومة إشعاعياً (المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية) على مر التاريخ من أنجع الأدوات لمعالجة السرطان. والعلاج الكيميائي وأنواع العلاج بالنويدات المشعة تقتل الخلايا السرطانية، ولكنَّها تقتل كذلك الخلايا السليمة. ومواد العلاج الكيميائي والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية هي عادةً جزيئات صغيرة يمكنها أن تنتشر وتخترق الأنسجة بسهولة، ولكن صنع عقاقير تميِّز بين الخلايا السرطانية والخلايا السويّة يظلّ مسألة جدّ صعبة. بيد أن المواد النانوية قد تقدِّم طريقة لاستهداف الخلايا السرطانية بصورة انتقائية دون إتلاف الأنسجة السليمة، نظراً لمَواطِن ضعف غير مستغَلّة في السابق في هيكل الورم. وتحتاج الأورام لتشكيل أوعية دموية جديدة للإمداد بالأكسجين والمواد المغذّية الأخرى من أجل الحفاظ على استنساخ خلاياها بسرعة. ونتيجةً للنمو السريع للأوعية الجديدة، تكون هذه الأخيرة غير منتظمة وراشحة وتوجد في جدرانها فجوات أكثر وأوسع من تلك الموجودة في الأوعية الدموية السليمة.

ويتراوح حجم الفجوات بين بضع مئات نانومتر وبضعة آلاف نانومتر. وعلى خلاف ذلك، يتراوح حجم المسام في الأوعية الدموية العادية بين ٢ و٦ نانومتر. وتكون الجسيمات النانوية التي يتراوح حجمها بين ١٠ و٣٠٠ نانومتر ذات حجم مناسب لتمرّ عبر فجوات الأوعية الدموية للورم دون اختراق الأنسجة السليمة بشكل كبير. وفي واقع الأمر، تتجمَّع الجسيمات النانوية بصورة انتقائية في نسيج الورم بأي حال من الأحوال نتيجةً لظاهرة فيزيائية محضة تُعرف بأثر النفاذية والاحتجاز المعزَّز.

١٩٣- وتتمتّع الجسيمات النانوية بقدرة على إيواء مادة علاجية داخل قلبها الداخلي مما يجعلها مناسبة للتطبيقات بالاقتران مع أثر النفاذية والاحتجاز المعزَّز. وبهذه الطريقة، ستوفِّر الطبقة السطحية الخاصة بالجسيم النانوي الحماية للمركَّب الموضوع في كبسولات أثناء رحلته لبلوغ الهدف البيولوجي. وقد يُطلَق المحتوى الداخلي لكي يُمارس أثره العلاجي بعد الوصول إلى النسيج المستهدف. ويمكن تصميم الجسيمات النانوية لتفريغ حمولتها العلاجية استجابةً لأي تغيّرات فيزيائية وكيميائية تحدث في المكان المستهدف، عندما تلتقي على سبيل المثال بالبيئة الحمضية لقلب الورم. وهناك في الوقت الحاضر عدد كبير من التجارب الإكلينيكية تنطوي على إعادة صياغة تكنولوجية نانوية لمواد العلاج الكيميائي القائمة لمعالجة السرطان.

هاء-٢-٣- التقدم المحرز في التكنولوجيا النانوية الصيدلانية

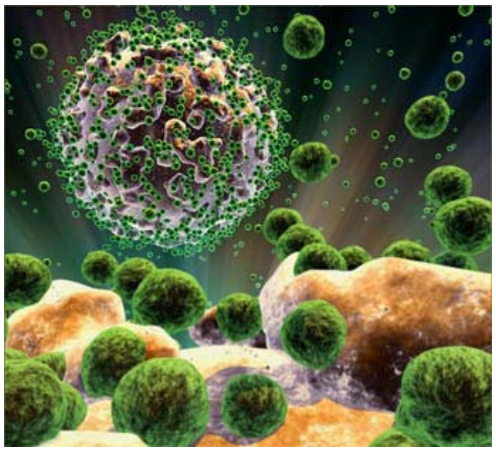
١٩٤- يَستخدم العلاج بالنويدات المشعة ناقلات موسومة إشعاعياً – هي المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية – المصمَّمة لإطلاق مصدر إشعاعي موضعي داخل منطقة الورم. وللمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية مكوِّنان للجرعة، ناقل وكمية ضئيلة من نويدة مشعة تضمحلّ من خلال انبعاث الجسيمات دون النووية. وينشأ الأثر العلاجي في علاج الورم بالنويدات المشعة من جسيمات ألفا أو بيتا التي تنبعث من النويدة المشعة ويمتصّها الورم. والمستحضر الصيدلاني الإشعاعي الأمثل هو الذي يستطيع نقل النويدة المشعة بصورة انتقائية إلى نسيج الورم مع عدم وصول أي إشعاعات إلى الأنسجة السويّة.

١٩٥- والدراسات التي تجري في مجال المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الابتكارية التي تستهدف الورم هي اليوم من أكثر المجالات استقطاباً للاهتمام فيما يتعلق بتصوير الورم ومعالجته على حد سواء. وفي هذا السياق، تم توجيه التقدم المحرز مؤخراً في التكنولوجيا النانوية الصيدلانية نحو استحداث نُهُج واعدة قائمة على تصميم ناقلات نانوية ابتكارية مُصمَّمة لتحسين نواتج العلاج الإشعاعي وجودة التشخيص. ومن التحديات الرئيسية، كيفية ربط النويدة المشعة بشدة بالجزيء الناقل، ومن الواضح أن النهج التكنولوجي النانوي قد يُثبت فائدته بشكل خاص. ووضع القليل من الذرات المشعة في كبسولات داخل غلاف الجسيم النانوي عملية توفّر نهجاً بسيطاً لتفادي نشر النشاط الإشعاعي في الأنسجة السليمة وتفريغ الحمولة العلاجية في الخلايا السرطانية المستهدفة. ويمكن لنظم مخصّصة نانومترية الحجم أن تكون بمثابة وسائل مستهدفة لإيصال العقاقير القادرة على نقل جرعات كبيرة من النويدات المشعة إلى داخل الخلايا الخبيثة، مع تجنّب الأنسجة السويّة وبالتالي الحدّ بصورة كبيرة من التأثيرات الجانبية التي عادةً ما تصاحب العديد من علاجات السرطان الحالية.

هاء-٢-٤- استهداف الخلايا السرطانية

١٩٦- هناك خاصية أخرى مهمة للنظم النانوية تكمن في أنَّ نسب السطح إلى الحجم عالية جداً، وهو ما يجعل السطح الخارجي (الإكليل البروتيني) للجسيمات النانوية مناسباً بصورة خاصة ليتغطّى بعدد كبير من الأنصاف (جزء من الجزيء) القادرة على نقل خصائص وظيفية إضافية إلى النظام. فعلى سبيل المثال، قد يكون من السهل أن تخترق الجسيمات النانوية التي تنقل أكاليل بروتينية (كاتيونية) مشحونة إيجابياً معظم أغشية الخلايا لأنها تتمتع بشحنة سلبية صافية. وعلى العكس من ذلك، سيكون للجسيمات النانوية المغطاة بجزيئات ذات شحنة

محايدة توزيع مختلف في الجسم وقد تصل إلى أهداف محددة أخرى. كما يمكن لتغطية سطح الجسيم النانوي بالجزيئات الوظيفية، مثل الأجسام المضادة أو الببتيدات التي قد تنقله من خلال التفاعل مع مستقبِلات على الغشاء الخارجي للخلايا السرطانية، أن تعزِّز انتقائية الورم وخصوصيته. ويمكن كذلك تغطية أسطُح الجسيم النانوي بجزيئات من شأنها أن تساعد على تجنّب إدراك النظام المناعي، وتغطيتها كذلك بمجموعات جزيئات تساعد على تتبّع مسار الجسيم داخل الجسم لضمان وصوله إلى المكان المنشود (الشكل هاء-٣).



الشكل هاء-٣- صورة لجسيمات كروية نانوية الحجم (اللون الأخضر)، مكوّنة من غلاف مزدوج الطبقات من الجزيئات الدهنية، وهي تطفو في سوائل خارج الخلايا وتهاجم الخلايا السرطانية لتفريغ حمولتها العلاجية.

١٩٧- ويُقدَّر أنه خلال عام ٢٠٠٦ دخل نحو ٢٤٠ منتَج نانوي الحجم إلى خطوط البحوث الصيدلانية. وكثيراً ما كانت الجسيمات الدهنية النانوية، وهي فقاعات جوفاء تلفّها طبقتان من الدهنيات، ناقلات نانوية مفضّلة لإطلاق النويدات المشعة العلاجية الموجودة في تجويفها الداخلي. ويقدِّم الجدول هاء-١ مجموعة مختارة من المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تستهدف السرطان على المستوى النانوي والتي يجري تقييمها إكلينيكياً.

الجدول هاء-١- مستحضرات صيدلانية إشعاعية مختارة تستهدف السرطان على المستوى النانوي

الناقلات النانوية	**النويدات المشعة**
الجسيمات الدهنية	اليود-١٣١، واليتريُوم-٩٠، والرِنيُوم-١٨٨، والنحاس-٦٧
الجسيمات الدهنية	الرِنيُوم-١٨٦
الجسيمات الدهنية	الإنديوم-١١١، والرِنيُوم-١٨٨
الجسيمات الدهنية	الإنديوم-١١١، والرِنيُوم-١٨٨
الجسيمات الدهنية/الجسيمات الدهنية المناعية	الأكتينيوم-٢٢٥
الجسيمات الدهنية المناعية	اليتريُوم-٩٠
الجسيمات الدهنية وجزيئات الديندريمر	البورون-١٠

١٩٨- وبالإضافة إلى الجسيمات الدهنية، يستكشف الباحثون في العالم إمكانية استخدام مجموعة متنوعة من المجالات النانوية البوليمرية الطبيعية والتي هي من صنع الإنسان، وكذلك استخدام الأجسام المضادة، والحمض النووي الريبي، وحمض د.ن.أ كآليات إيصال نانوية الحجم.

هاء-٢-٥- البحث والتطوير على الصعيد الدولي

١٩٩- كثيرة هي عمليات البحوث التي تجري حول استخدام التكنولوجيات الإشعاعية لصنع ناقلات نانوية الهيكل لتحقيق الأداء المستهدف للمواد العلاجية. وفي إطار مشروع بحثي منسق خاص بالوكالة، وضعت الأرجنتين والبرازيل والصين ومصر وهنغاريا والهند وإيطاليا وجمهورية كوريا وماليزيا وبولندا وصربيا وتايلند وتركيا والولايات المتحدة الأمريكية منهجيات ترمي إلى صنع جسيم نانوي وهلام نانوي مع ضبط هيكل المنتَج وحجمه ووظيفته ضبطاً دقيقاً. وقد عملت عدة دول أعضاء كذلك على تحقيق التوافق مع مرافق وإجراءات التشعيع الواسعة النطاق القائمة (إيطاليا)، وكذلك على استحداث إجراءات للجسيمات النانوية والهلامات النانوية استناداً إلى البروتينات (الأرجنتين والبرازيل)، والبوليمرات الطبيعية (ماليزيا وتايلند)، والبوليمرات الاصطناعية (مصر وهنغاريا وإيطاليا وجمهورية كوريا وماليزيا وبولندا وتركيا) والمركّبات غير العضوية (الصين وفرنسا والهند وجمهورية كوريا وصربيا).

٢٠٠- ووُضعت كذلك إجراءات لهياكل نانوية هجينة حيث تُغطّى أسطح الجسيمات النانوية والهلامات النانوية ببوليمرات وظيفية وجزيئات بيولوجية لزيادة توافقها البيولوجي (فرنسا وإيطاليا وتايلند). وفي تايلند تم إنتاج جسيمات نانوية على أساس الكيتوزان (وهي مادة تنتج من الروبيان أو غيره من أنواع المحار القشري)، وذلك عن طريق التحلّل الإشعاعي. ويمكن لهذه الجسيمات النانوية وللجسيمات المشابهة لها أن تكون مواد مرشَّحة محتملة لتثبيت النويدات المشعة المختارة.

٢٠١- ورغم أنَّ عدة ناقلات نانوية مستهدفة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية قد طُبِّقت بنجاح لتصوير ومعالجة نماذج الأورام قبل المرحلة الإكلينيكية وخلالها، فإنَّ هناك تحديات هائلة ما زال ينبغي تجاوزها، مثل الاستقرار الطويل الأمد للناقلات النانوية، وتعزيز إنتاجها، واحتمال سميّة وتدهور منتَجات الناقلات النانوية.

هاء-٢-٦- الاستنتاجات

٢٠٢- مقارنةً بالعلاج المستهدف التقليدي بالنويدات المشعة، يمكن للاستهداف المتعدد الوظائف للناقلات النانوية أن يفرِّغ حمولة أكبر من النويدات المشعة و/أو مواد العلاج الكيميائي و/أو عوامل التصوير في خلايا الأورام. وقد يؤدي ذلك دوراً جوهرياً في تحسين معالجة السرطان عن طريق قتل الخلايا المريضة بصورة انتقائية وفي الوقت ذاته عدم إصابة الأنسجة السليمة بأذى، مما يقلّص من التأثيرات الجانبية ويوفّر راحة أكثر للمريض. ولكن هناك تحديات ما زالت تستلزم التصدي لها، بما في ذلك الاستقرار الطويل الأمد للناقلات النانوية ولا سميّتها، والنجاح في الارتقاء بطريقة الصنع لتكون على نطاق صناعي، وفي الوقت ذاته الحفاظ على مواصفات المنتجات. ومن الضروري التصدي لهذه التحديات من خلال إقامة تعاون موسّع بين الفيزيائيين والكيميائيين والبيولوجيين والأطباء والمؤسسات والمستشفيات والقطاع الصناعي والمنظمات الدولية.

واو- تسخير التكنولوجيات النووية من أجل التصدي لتبعات تغيّر المناخ

واو-١- تحويل الزراعة لمواجهة تحديات تغير المناخ

٢٠٣- تشير التقديرات إلى أنَّ عدد سكان العالم سيتزايد ليبلغ أكثر من تسعة مليارات نسمة بحلول عام ٢٠٥٠، مما سيؤدي إلى الطلب على مزيد من الإنتاج الزراعي. وبما أن الإمدادات من المياه والأسمدة تتوسّع بينما تتدهور جودة التربة وخصوبتها، فإن الأمن الغذائي العالمي يشكِّل تحدياً كبيراً. وبالإضافة إلى ذلك، يؤثر تغير المناخ في هطول الأمطار والظواهر المناخية التي قد تقلِّص من توفّر المياه وقد يكون لها تأثير على الظروف البيئية الضرورية للإنتاج الزراعي. ويؤثر تغير المناخ في الأنشطة الزراعية، ولكن الأنشطة الزراعية تؤثر أيضاً في تغير المناخ. وتُعتبَر الزراعة سبباً مهماً من أسباب تغير المناخ العالمي لأنها مسؤولة عن أكثر من ١٤% من انبعاثات غازات الدفيئة في العالم[٣٩]. لذلك يجب أن تخضع الزراعة لتحول كبير لمواجهة التحديات المتمثّلة في التكيّف مع تغير المناخ والتخفيف من تأثيره على إنتاجية الأرض والأمن الغذائي، عن طريق تحديد واستخدام تكنولوجيات وممارسات جديدة تقلّل من أثر غازات الدفيئة على الزراعة.

واو-١-١- التصدي لتحديات تغير المناخ والأمن الغذائي من خلال الزراعة الذكية مناخياً

٢٠٤- تعمل الفاو وشركاؤها على الترويج للانتقال إلى الزراعة الذكية مناخياً. وتُعرَّف هذه الزراعة على أنها زراعة تؤدي على نحو مستدام إلى زيادة الإنتاجية والقدرة على الصمود (التكيف)، وإلى خفض/إزالة غازات الدفيئة (التخفيف من أثرها)، وفي الوقت ذاته تعزيز تحقيق أهداف الأمن الغذائي والتنمية على الصعيد الوطني.

٢٠٥- وتتناول الزراعة الذكية مناخياً التكيّف مع تغير المناخ وكذلك التخفيف من تأثيره. وتكييف القطاع الزراعي ضروري من أجل تجنب الخسائر وبناء القدرة على الصمود. وتشمل ممارسات التكييف الزراعة الحافظة، وتحسين كفاءة استخدام المياه، وتجميع المياه، وتنويع المحاصيل، واختيار السلالات الحيوانية، واستخدام النظم المتكاملة لإنتاج المحاصيل والثروة الحيوانية. أما التخفيف من التأثير الناتج، فيشمل التدابير التي تقلل انبعاثات غازات الدفيئة من تطبيقات الأسمدة الكيميائية والأسمدة الحيوانية، مع تعزيز إزالة غازات الدفيئة من الغلاف الجوي بواسطة النباتات لتخزينها في وقت لاحق في المواد العضوية للتربة.

٢٠٦- وفي عام ٢٠١٢، أفاد فريق الخبراء الرفيع المستوى المعني بالأمن الغذائي والتغذية والذي يدعم لجنة الأمن الغذائي العالمي بأهمية وضع استراتيجيات خاصة بالزراعة الصامدة أمام المناخ وبالأمن الغذائي. وفي هذا السياق، تعمل الزراعة الذكية مناخياً على إحياء الإنتاج الغذائي والتنمية الريفية، لا سيما في البلدان النامية، وذلك بأسلوب مستدام اقتصادياً واجتماعياً وبيئياً. ولا تضر هذه الزراعة المنخفضة الانبعاثات بالأمن الغذائي لأنَّ الموارد تُستَخدم بكفاءة أكبر ولأن الطاقة تُستهلك بصورة أقل.

---

[٣٩] الفاو(٢٠١٢). نشر الزراعة الذكية مناخياً في إطار نهج بيئي طبيعي أوسع نطاقا. ورقة معلومات أساسية للمؤتمر العالمي الثاني بشأن الزراعة والأمن الغذائي وتغير المناخ. هانوي، فييت نام من ٣ إلى ٧ أيلول/سبتمبر ٢٠١٢.

واو-١-٢- دور التقنيات النووية في الزراعة الذكية مناخياً

الشكل واو-١ - ترك مخلفات المحاصيل على سطح التربة في مزرعة للبن يقلِّص من تبخر المياه من التربة، فييت نام.

٢٠٧- وهناك حاجة إلى توفّر المعلومات عن نسبة المياه التي تؤخذ لكي تستخدمها النباتات (النتح) والمياه المفقودة بسبب تبخرها من التربة، وذلك من أجل تحسين إنتاجية المياه في الزراعة، وهو أمر ضروري للتقليل من الاستخدام العام للمياه، لا سيما في البيئات التي تكون فيها المياه نادرة. ويمكن استخدام هذه المعلومات لوضع ممارسات إدارية من أجل تحقيق الاستغلال الأقصى للمياه وزيادة فهم مصادر ملوحة التربة. ويمكن استخدام قياس البصمات النظيرية للأكسجين-١٨ والديوتيريوم في مياه الري والمياه الموجودة في التربة والنبات والبيئة المحيطة بالمحاصيل من أجل فصل التبخر والنتح ولتقدير ما يرتبط بذلك من فقد للمياه من أنواع التربة المسقيّة. ويمكن استخدام هذه التقنية لتحديد كمية استخدام النباتات للمياه وفقدان المياه من خلال تبخرها في المراحل المختلفة من نمو المحاصيل وعبر نظم الري المختلفة، ولتحسين فهم أصل الملوحة في التربة. وهذه عملية مفيدة لاستحداث ممارسات وتكنولوجيات جديدة من أجل تحسين الري، وإنتاجية مياه المحاصيل؛ وإدارة ملوحة التربة والمياه.

الشكل واو-٢ - تجميع المياه في أحواض زراعية مصدر مهم للري في المناطق الزراعية المسقيّة بمياه المطر، البرازيل.

٢٠٨- وتُعتبَر المواد العضوية في التربة من المكوِّنات المهمة لخصوبة التربة وجودتها. والكربون والنتروجين هما مكوِّنان ضروريان من مكوِّنات المواد العضوية في التربة. ويتحلّل جزء من المواد العضوية في التربة مع وجود الرطوبة فينبعث ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. أما الجزء الثاني فهو مستقر ولا يتحلّل، ونتيجة لذلك لا ينبعث ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وتؤدي إضافة مخلفات المحاصيل والأسمدة الحيوانية، وكذلك إدراج المحاصيل البقولية وتدوير المحاصيل، إلى زيادة المواد العضوية في التربة. ويمكن أن تُقاس في

الموقع البصمات النظيرية للكربون والهيدروجين (الكربون-١٣ والنتروجين-١٥) في التربة وثاني أكسيد الكربون وغازات أكسيد النيتروز المنبعثة باستخدام أجهزة ميدانية محمولة، وأن تُستخدم لتحديد كمية مصادر المواد العضوية المفقودة من التربة الزراعية. ومن الممكن استخدام هذه المعلومات لتحديد الممارسات الإدارية التي تضم كميات أكثر من الكربون والنتروجين في المواد العضوية المستقرة في التربة، مما يؤدي إلى تقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وأكسيد النيتروز من التربة.

٢٠٩- وتوفير المعلومات عن الطلبات على المياه لاستخدامها في المحاصيل مسألة مهمة لوضع جداول دقيقة للري، وللتنبؤ بغلات المحاصيل في ظل مناخ متغيّر. وتقدير هذه الطلبات يقتضي وجود بيانات عن محتوى المياه في التربة على نطاق منطقة بكاملها. وقد شكّل ذلك أحد التحديات في الماضي لأن معظم قياسات المياه في التربة قائمة على أساس نقطة محددة. ويعني ذلك أن من اللازم إجراء قياسات عديدة، وهي عملية مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً. وتأتي التطورات التي طرأت مؤخراً في استخدام النيوترونات المولّدة بصورة طبيعية من الأشعة الكونية وأنواع التربة لتكمِّل القياسات القائمة على أساس نقطة محددة من أجل تقديم قياس موثوق به لمحتوى المياه في التربة على الصعيد الميداني الشامل، وبالتالي إدماج بيانات رطوبة التربة على مساحة كبيرة (تصل إلى ٤٠ هكتاراً). وتوفّر التكنولوجيا كذلك معلومات عن محتوى المياه في التربة بعمق يصل إلى ٧٠ سم، ويمكن استخدامها لتقييم مدى اتساق وكفاءة توزيع المياه، مما يسهِّل وضع جداول للري في المكان المطلوب والوقت اللازم، ويسهّل بالتالي تقليص متطلبات المياه العامة.

٢١٠- ومن الضروري تطوير أصناف المحاصيل لكي تنتج غلة أكثر باستخدام مدخلات أقل، وتتكيّف بأسلوب أفضل مع البيئات غير الملائمة الناجمة عن مناخ متغير. وينتج عن حث الطفرات باستخدام التقنيات النووية تنوع وراثي، كما أنه يساهم في تحسين التنوع البيولوجي. ويُستخدم التحسين الطفري لاستحداث سلالات تتسم بقدرة إنتاجية أعلى وباستقرار أكبر للغلات في البيئات غير الملائمة، بما في ذلك التقلبات المناخية التي تتسبب في الفيضانات والجفاف وهبوب الرياح القوية ودرجات الحرارة القصوى. وتساهم الطافرات المحسَّنة في التقليل من استخدام الأرض وتحسين الزراعة وجعلها أكثر ملاءمة للبيئة. ومن الأمثلة على ذلك، السلالات الطافرة من الشعير هاردي، التي استُحدِثت لتحمّل الظروف المناخية القاسية في مرتفعات تبلغ ٠٠٠ ٥ متر فوق سطح البحر في بيرو. وقد أدت هذه السلالات الطافرة إلى تحسين الأمن الغذائي لسبعة ملايين نسمة من سكان الأنديز الأصليين وتحسين معيشتهم. كما تم إدراج سلالات طافرة من الأرز تتحمل الملوحة في المناطق الساحلية من بنغلاديش. وتستطيع هذه السلالات الطافرة أن تنمو في أنواع التربة المالحة، ونتيجةً لذلك يمكن استخدام مناطق جديدة للإنتاج الزراعي.

٢١١- وستكون أكبر خطوة إلى الأمام هي استحداث أساليب استيلاد سريعة للخصائص الطافرة المرجوة، يمكنها أن تؤدي إلى تقليص دورة الاستيلاد التي تتراوح بين ١٠-١٥ عاماً لتصبح ٢-٣ أعوام، فيتم بذلك توفير استجابة سريعة لاحتياجات الدول الأعضاء المتعلقة باستحداث سلالات محاصيل جديدة لها مجموعة من الصفات، مثل فترات نمو أقصر، وتحمّل ضغوط المياه والملوحة والعواصف ودرجات الحرارة القصوى.

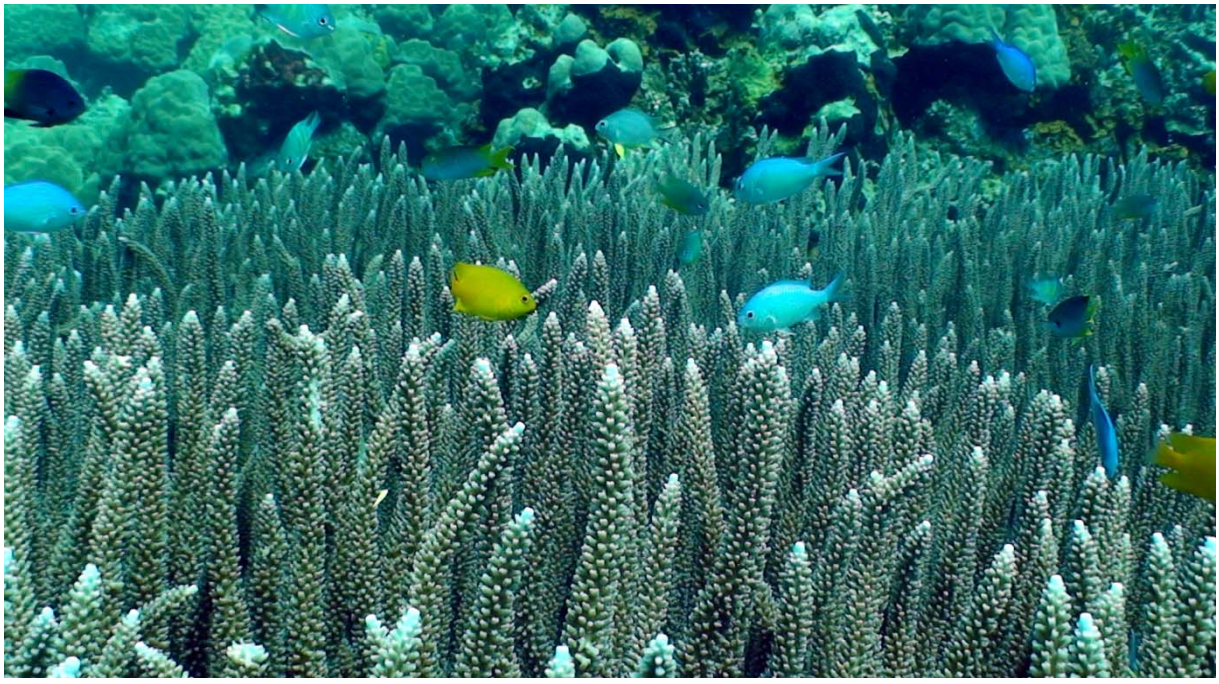
الشكل واو-٣- شعير يتحمَّل البرد في مرتفعات بيرو. تتضمن سلالات الشعير هذه طفرة تنتج رؤوساً متدلية وهي بالتالي محمية من أضرار العواصف. وقد سمح ذلك بزراعة الشعير في مرتفعات غير مسبوقة، وأدى ذلك إلى زيادة غلات الشعير في بيرو بمعدل ٦ أضعاف.

٢١٢- ومن التحديات الكبيرة، إنتاج حيوانات سليمة قادرة على البقاء بالاعتماد على مصادر علفية هامشية أكثر، وفي الوقت ذاته زيادة استخدام الطاقة من علفها والتخفيف من تأثير انبعاثات غازات الدفيئة التي تنتج كمنتج ثانوي. وتجري التحليلات الاستقلابية والجينية للأجهزة الهضمية لدى الماشية من أجل تصنيف أو تحديد بيئة وتنوع مولدات الميثان لتحديد الكائنات العضوية المجهرية الموجودة ودورها في هضم المكوّنات التغذوية. ويسمح ذلك بوضع استراتيجيات تحقق الكفاءة الأمثل للكائنات العضوية المجهرية المجترة و/أو الإضافات العلفية المعتمدة على الاجترار المَعِدي في زيادة امتصاص الطاقة وتقليص انبعاثات الميثان وثاني أكسيد الكربون. وبالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الواسمات الوراثية لاختيار الصفات المرجوة لدى مانحي السوائل المنوية، مثل القدرة على التكيف مع البيئات الحارة والرطبة، ومقاومة الأمراض، وتحسين إنتاج الألبان واللحوم، سيساعد على تعزيز صناعة الثروة الحيوانية في العقود القادمة. وفي كل هذه الدراسات، تُستخدم التقنيات النووية والتقنيات ذات الصلة بالمجال النووي إما كمقتفيات (الوسم النظيري للمكونات التغذوية لاقتفاء مساراتها الأيضية) أو كأساليب مختبرية (القياس المناعي الإشعاعي، والتحليلات الوراثية القائمة على الأساليب الجزيئية، إلخ) لقياس البارامترات المستهدفة.

واو-١-٣- الاستنتاجات

٢١٣- لتحقيق كفاءة الزراعة الذكية مناخياً، ينبغي توفّر معلومات عن العوامل والدوافع التي تؤثّر في تفاعلات الماشية مع التربة والماء والمحاصيل لكي يتكيّف النظام الزراعي بفعالية مع تغير المناخ. ومن الأهمية بمكان رصد وتقييم مختلف استراتيجيات التكييف وتخفيف التأثير الناتج على مستوى المَزارع للترويج لأفضل الممارسات في إدارة المزارع من أجل تعزيز القدرة على الصمود والأمن الغذائي وتحقيق فوائد طويلة الأمد. وتوفّر التقنيات النظيرية والنووية معلومات جديدة للمساعدة على مواصلة تحسين الزراعة الذكية مناخياً.

واو-٢- استخدام التقنيات النووية لدراسة تغير المناخ وتبعاته على البيئة البحرية



الشكل واو-٤- تتعرض الموارد الساحلية لمخاطر تغير المناخ؛ ومن بين هذه الموارد الشعاب المرجانية التي تُعتبر مجمّعات مهمة للتنوع البيولوجي وموائل ومَواطِن حاضنة للعديد من الكائنات البحرية (الصورة مقدّمة من: روبرت ب. دونبار).

٢١٤- ومن المهم جداً استحداث أدوات واستراتيجيات لتمكين البيئة البحرية ومواردها من التكيّف مع تغير المناخ، وكذلك للتخفيف من أثر تغير المناخ عليها. وكما تم التشديد عليه في الاتفاق الخاص بالمحيطات الذي وضعه الأمين العام للأمم المتحدة وفي المناقشات الدولية التي جرت خلال مؤتمر الأمم المتحدة للتنمية المستدامة (مؤتمر ريو +٢٠)، سيتطلب تحقيق هذا الهدف تعزيز التعاون الدولي في مجال البحث العلمي البحري، والرصد والمراقبة، لا سيما فيما يتعلق بالنظم الإيكولوجية الأكثر عرضة للخطر.

٢١٥- ومنذ القرن التاسع عشر، زاد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من ٢٨٠ جزءاً في المليون إلى ٣٩٠ جزءاً في المليون في عام ٢٠١١. ويُعتبر ثاني أكسيد الكربون غاز الدفيئة الرئيسي الذي ينظّم التوزان الحراري العالمي على وجه الكرة الأرضية. وتمتص المحيطات نحو ثلث مجموع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوية التي هي من صنع الإنسان والتي تنجم بالأساس عن حرق الوقود الأحفوري وتغيير استخدام الأراضي.

٢١٦- ومن المعروف أنَّ زيادة وجود ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي تساهم بشكل رئيسي في تغير المناخ وما يتصل بذلك من مشاكل، مثل الاحترار العالمي، وارتفاع مستوى سطح البحر، وتحمض المحيطات، ونضوب الأكسجين، والزيادات في تواتر وشدة الظواهر الجوية العنيفة. ويخلِّف تغير المناخ بدوره تأثيرات مباشرة وغير مباشرة متنوعة على الموارد السمكية وتربية الأحياء المائية الساحلية والشعاب المرجانية وغيرها من الموارد الساحلية، فضلاً عن أنماط السكن البشري في المدن الساحلية المنخفضة الكبرى. كما أنَّ التعديلات التي تطرأ على دورة المياه تتسبَّب في تآكل السواحل وفي توزيع المغذيات والملوّثات ونقلها وتوفّرها البيولوجي، مما قد يؤدي إلى التتريف (العملية التي تجعل الماء غنياً جداً بالمغذيات، الأمر الذي يعزز نمو وزيادة تحلّل الطحالب والنباتات التي ستستهلك مزيداً من الأكسجين وتؤدي في نهاية الأمر إلى نضوب الأكسجين في الماء)، كما يؤدي إلى تلوّث المأكولات البحرية ومنتجات تربية الأحياء المائية.

٢١٧- والتكنولوجيات النووية مهمة لفهم بعض المسائل العلمية الأساسية حول أثر الظروف البيئية في المحيطات على النظم الإيكولوجية والكائنات الحية البحرية.

٢١٨- ويمكن استخدام النويدات المشعة والنظائر المستقرة لدراسة العديد من البارامترات البيئية في الدراسات المناخية التي أُجريت تاريخياً، مثل درجة الحرارة وهطول الأمطار وحموضة مياه البحر. وقد يتم استخدام الكتل الجليدية والرواسب والأغطية الجليدية والشعاب المرجانية باعتبارها 'نظم تخزين' أو 'آليات تسجيل' للظروف البيئية في وقت تكوّنها. ويمكن كذلك تطبيق النويدات المشعة والنظائر المستقرة للحصول على فهم أفضل للعمليات الفيزيولوجية، مثل التكلس أو التراكم البيولوجي للمواد الكيميائية وما يتصل بذلك من ردود فعل الكائنات الحية على تغير الظروف البيئية.

٢١٩- وقد استُخدمت التقنيات النووية والنظيرية وطُوِّرت في مختبرات البيئة التابعة للوكالة للإسهام في اكتساب فهم عالمي للتغييرات الحاصلة في البيئة البحرية فيما يتصل بتغير المناخ، بما في ذلك ارتفاع درجة حرارة المحيطات وتحمض المحيطات.

واو-٢-١- ظاهرة إلنينيو للتذبذب الجنوبي

٢٢٠- ظاهرة إلنينيو للتذبذب الجنوبي هي ظاهرة مناخية مثيرة تحدث كل بضع سنوات وتخلِّف أثراً كبيراً على الطقس وعلى اقتصاديات العديد من البلدان في منطقة المحيط الهادئ. كما أنها تترك أثراً ما على تكوّن الجليد في القطب الجنوبي. ويقترن التذبذب الجنوبي بتغيرات في درجة حرارة مياه البحر في منطقة المحيط الهادئ الشرقية المدارية (ويُعرف ارتفاع درجة الحرارة باسم إلنينيو وانخفاضها باسم لانينيا)، وبتغيرات في الضغط السطحي الهوائي في منطقة المحيط الهادئ الغربية المدارية. كما أنه يغيِّر دوران المحيطات محلياً، الذي يعدُّ إحدى العمليات الرئيسية التي تتحكّم بمناخ كوكبنا.

٢٢١- وتتسبَّب التغيرات القصوى لهذه التذبذبات في الأنماط المناخية في إيجاد ظروف مناخية قاسية، مثل الفيضانات والجفاف في العديد من مناطق العالم، ولها تأثير كبير على الثروة السمكية في العديد من البلدان. والبلدان المعتمِدة على الزراعة وصيد الأسماك، خاصةً تلك الواقعة على المحيط الهادئ، هي الأكثر تضرراً بصورة خاصة.

٢٢٢- وتوضِّح الدراسات التي أُجريت لظاهرة إلنينيو باستخدام النويدات المشعة وكذلك النظائر المستقرة أنه خلال حدوث ظواهر إلنينيو يطرأ تحول في درجات حرارة المحيط في المناطق المدارية وشبه المدارية، ويقترن

ذلك بتغيرات في التبخر وفي التجزئة النظيرية، وهي تغيرات في التكوينات النظيرية من الديوتيريوم والكربون-١٣ والكربون-١٤ والأكسجين-١٨ في مياه البحر. ويمكن دراسة هذه التغييرات في الرواسب أو الشعاب المرجانية أو الكتل الجليدية أو خزانات المياه الجوفية أو حلقات الأشجار. وتساعد هذه الدراسات على تفسير حدوث ظاهرة إلنينيو على مدى فترة ممتدّة منذ عدة آلاف من الأعوام.

واو-٢-٢- دورة الكربون

٢٢٣- تؤدي المحيطات دور بالوعة كبرى للكربون، كما أن احتباسها لكميات متزايدة من ثاني أكسيد الكربون يتسبَّب في زيادة تحمّضها. وتُعتبر 'الجسيمات الغارقة' الآلية الرئيسية التي يتم بواسطتها نقل الكربون والملوّثات من سطح المحيطات إلى أعماق البحار. ويشمل ذلك الكربون الجوي، الذي يُحوَّل من ثاني أكسيد الكربون إلى كتلة حيوية ويُحتبَس في الأعماق بواسطة غرق الجسيمات. لذلك من الضروري فهم الآليات التي تتحكّم في تدفقات المواد من سطح المحيطات إلى أعماق البحار.

٢٢٤- وقد تزايد استخدام النويدة المشعة الطبيعي الثوريوم-٢٣٤ لتحديد كميات تدفقات الجسيمات وكميات الكربون المتنقل من الطبقات العليا للمحيطات في المحيطات المفتوحة وفي البيئات الساحلية. والثوريوم-٢٣٤ هو نظير متفاعل من الجسيمات ويَنتج في مياه البحر نتيجة الاضمحلال الإشعاعي لمادته الأصلية الذائبة، أي اليورانيوم-٢٣٨. وانعدام التوازن بين اليورانيوم-٢٣٨ ونشاط الثوريوم-٢٣٤ الإجمالي المُقاس يجسِّد المعدل الصافي لانتقال الجسيمات من سطح المحيطات وفق مقاييس زمنية تمتد من أيام إلى أسابيع .

٢٢٥- وقد تُغيِّر الكثير من العمليات البيئية المتصلة بتغير المناخ دورة الكربون واحتباس الكربون في المحيطات. وتُخلِّف زيادة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وما ينتج عن ذلك من زيادة في ثاني أكسيد الكربون في مياه البحر تأثيراً تدريجياً في حموضة المحيطات. ويمكن أن يؤثِّر تزايد حموضة المياه في الكثير من العمليات البيولوجية التي تؤدي إلى تكوّن الجسيمات وترسبها عبر عمود الماء (عمود افتراضي للماء من السطح إلى أعماق البحر). وتؤثِّر تغيرات درجات الحرارة في التوقيت الموسمي لتَدرُّج عمود الماء في الربيع والصيف في العديد من المناطق الجغرافية في العالم. كما يؤثر ذلك في ديناميكيات تنقّل الجسيمات والكربون، بما أن تَدَرُّج عمود الماء هو عملية فيزيائية رئيسية في التدفق التنازلي للجسيمات. وقد اتضح بالفعل أنَّ درجات الحرارة الأكثر دفئاً تؤثِّر في مدى تجمّد البحر وسماكة جليده في مناطق خطوط العرض العليا.

واو-٢-٣- تأثيرات تحمض المحيطات

٢٢٦- أوضحت دراسات النمذجة بجلاء أنَّ المناطق القطبية والمدارية مهدّدة على وجه الخصوص بالتأثيرات المجتمعة لتغيُّر المناخ والمتمثلة في ارتفاع الحرارة وتَحَمُّض المحيطات. وتعمل الوكالة على إجراء دراسات تجريبية للتحقق من تأثيرات تحمض المحيطات من أجل التنبؤ بأسلوب أفضل بتأثيراتها على التنوع البيولوجي.

٢٢٧- والنظائر المشعة هي أدوات قيِّمة للتحقق من ردود فعل الكائنات البحرية أمام ارتفاع درجات الحرارة، وتزايد الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون، وتضاؤل نسبة الملوحة ومحتوى الأكسجين. وقد كانت هذه النظائر تُستخدم لتقديم أدلة تصف بعض التأثيرات البيولوجية المتوقع أن تصاحب تغير المحيطات في العالم. وتُستخدم التقنيات النووية لدراسة الكثير من العمليات البيولوجية المهمة، بما في ذلك التكلس والتمعدن البيولوجي والاستقلاب والتراكم البيولوجي والعناصر النزرة.

٢٢٨- ويشيع اليوم استخدام نظير الكالسيوم-٤٥ الباعث لأشعة بيتا لقياس معدّلات التكلّس في العديد من السلالات، بما في ذلك السلالات المرجانية المكوّنة للشعاب المرجانية. وهو يقدّم تقديرات جيدة للمعدل الصافي للتكلّس في الهياكل الجيرية. ويمكن دراسة التمعدن البيولوجي من خلال إدماج عناصر رئيسية أخرى من عناصر الهياكل الجيرية، مثل السترُنشيوم-٨٥.

٢٢٩- وقد كانت النظائر المشعة مفيدة بصورة خاصة في دراسة العمليات الاستقلابية في ظل ظروف بيئية متباينة. فعلى سبيل المثال، يُعتبر أنهيدراز الكربونيك الإنزيمي الفلزي للزنك مادة حفازة في امتصاص الكائنات البحرية للكربون فيما يتعلق بعمليات التمثيل الضوئي والتمعدن البيولوجي والتوازن القائم على أساس التحمّض النظامي، وقد يؤدي إلى تحمض المحيطات أو نضوب الأكسجين في مياه البحر. ويُستخدم نظير الزنك-٦٥ المشع لتقييم تأثير ارتفاع الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون في الاستقلاب العضوي عن طريق دراسة حركيات التمثُّل. وبصورة أعم، فإن النظائر المشعة، مثل الكُوبلت-٥٧ أو الكُوبلت-٦٠ أو المنغنيز-٥٤ أو السلِنيوم-٧٥ تُعتبر مفيدة نظراً للأهمية الاستقلابية للنظائر المستقرة المقابِلة لها. وتؤدي هذه العناصر النزرة وظائف فيزيولوجية أساسية ويمكنها أن تتأثر بالاحترار أو تحمّض المحيطات أو قلة الأكسجين (نضوب الأكسجين) أو تغيّر مستويات الملوحة. وقد تمت دراسة عمليات فيزيولوجية محددة مثل تنظيم الأيونات باستخدام تقنيات حساسة للغاية تستعمل مقتفيات إشعاعية مثل الصوديوم-٢٢ والكلور-٣٦.

واو-٢-٤- التأثيرات في المستقبل

٢٣٠- في المستقبل، من المتوقع أن تؤدي التغييرات الحاصلة في كيمياء كربونات المحيطات بسبب التحمّض، أو الحاصلة في ملوحة المحيطات نظراً لزيادة عمليات إطلاق المياه العذبة في المناطق الساحلية، إلى تحوّل التنوع الكيميائي للعناصر النزرة وتعديل توفّرها البيولوجي للكائنات البحرية. وعلاوةً على ذلك، سيؤدي التغيّر في درجات الحرارة وفرط ثاني أكسيد الكربون وقلة الأكسجين والملوحة إلى إعاقة الوظائف الفيزيولوجية كتنظيم الأيونات. ويمكن استخدام المقتفيات الإشعاعية المُذابة لدراسة قدرات التراكم البيولوجي في ظل تزايد الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون. وقد وفّر تحليل النظائر المشعة بيانات قيّمة لفهم آليات السمية في الكائنات البحرية ولتقييم مخاطر تلوث المأكولات البحرية المخصّصة للاستهلاك البشري. وتتمتع هذه التقنيات بحساسية واستبانة عاليتين، ويمكن استخدامها لفهم التأثيرات التي يتسبَّب الكربون في حدوثها في الكائنات البحرية وتقليص الشكوك التي تحوم حول النتائج البيولوجية لتغيّر كيمياء المحيطات. وتوفير بيانات موثوقة وتقليص الشكوك مسائل جوهرية لوضع نماذج دقيقة للتأثيرات التي تمسّ الثروة السمكية وتوفير تقديرات للتبعات الاقتصادية والاجتماعية المترتّبة على تحمّض المحيطات.

واو-٢-٥- النظائر المستقرة في دراسات تغيّر المناخ

٢٣١- تُستخدم النظائر المستقرة لدراسة العمليات التي تطرأ في المحيطات والمتصلة على نحو وثيق بتحمّض المحيطات جراء تغيّر المناخ، وتغيّر دورة الكربون العالمية.

٢٣٢- وتقدم أنواع الوقود الأحفوري نسبة فريدة من النظيرين المستقرين للكربون (الكربون-١٢ والكربون-١٣)، ويترك احتراق أنواع الوقود هذه بصمات نظيرية مميّزة في الغلاف الجوي. وقد تم تعقّب اجتياح هذا المؤشر البشري المنشأ للمحيطات عن طريق إجراء قياسات محيطية لنظائر الكربون، وبذلك يمكن استخدام الكربون-١٣ كبصمة وراثية لدراسة الكيفية التي تعمل بها المحيطات كبالوعة لغازات الدفيئة. وتمتص الكائنات المكلِّسة كذلك الكربون-١٣ الذائب في مياه البحر، ويمكن بذلك استخدام بصمة الكربون-١٣ في الأغلفة

كأداة لتأريخ الظروف المناخية القديمة. وتجري كذلك إعادة بناء حموضة مياه البحر استناداً إلى التكوّن النظيري من البورون-١١ للشعاب المرجانية الضخمة والمعمِّرة طويلاً. وقد استُخدِمت احتياطيات بديلة على نطاق واسع، مثل السجلات النظيرية للأكسجين (الأكسجين-١٨/الأكسجين-١٦) المحبوسة في الأغلفة الكربوناتية للمواد الأحفورية البحرية الدقيقة، أو في الشعاب المرجانية المعمِّرة طويلاً، وذلك لتقدير درجات الحرارة في الماضي على سطح البحر ومستويات الملوحة ونظم الدوران، مثل حدة وتواتر ظواهر إلنينيو للتذبذب الجنوبي السابقة، وكذلك التغييرات الجليدية ذات الصلة الواقعة بين عصرين جليديين. ويمكن للتغييرات الطويلة المدى التي تحدث في المعدلات النظيرية للأكسجين والهيدروجين خلال تهاطل الأمطار أن تُعبِّر كذلك عن التغييرات الحاصلة في الظروف المناخية المحلية، مثل أنماط العواصف ومسار الكتل الهوائية وتاريخ الأمطار ودرجة حرارة الهواء، وكلّها ظروف يمكن أن تتأثر بشدة بالتغيرات في دوران الكتل المائية. وقد استخدُمت المعدلات النظيرية للنتروجين كذلك كآلية لتسجيل التغييرات الواقعة في الإنتاجية ومستويات المواد المغذية في عمود الماء وأصل مرّكبات النتروجين.

٢٣٣- وتنطوي تقيات جديدة أخرى تستخدم النظائر المستقرة لتعقب تغيّر المناخ على قياس تشكيلة النظائر المستقرة للكربون والهيدروجين في واسمات بيولوجية دهنية محددة تم الاحتفاظ بها في سجلات بيئية مثل الرواسب. ويمكن أن تُعزى واسمات بيولوجية دهنية معيّنة، مستمدة من كائنات تعيش مرة واحدة، إلى مكونات سلائفها، كما أن تكوين نظائرها المستقرة يعبِّر عن الظروف البيئية والمناخية في الوقت الذي ظهرت فيه إلى الوجود. وبناءً على ذلك، يمكن استخدامها كمؤشرات لإعادة تحديد درجات الحرارة ومستويات ثاني أكسيد الكربون والرطوبة والإنتاجية البحرية والمدخلات من الرواسب الناتجة عن تآكل الأرض، وكذلك لتقييم التأثيرات النباتية والبشرية المنشأ على نطاق حوض بأكمله في الجداول الزمنية الجيولوجية.

واو-٢-٦- الاستنتاجات

٢٣٤- التقنيات النووية والنظيرية هي أدوات فريدة تساهم في فهم التغييرات الكيميائية والبيولوجية والإيكولوجية التي تحدث في البيئة البحرية فيما يتصل بتغيّر المناخ.

٢٣٥- ويُمكِّن مقياس الزمن الداخلي للنظائر المشعة الطبيعية من تأريخ آليات تسجيل الظروف البيئية، حيث تعمل الاحتياطيات النظيرية مكان العديد من البارامترات البيئية. ويمكن استخدام إعادة بناء الظروف المناخية التاريخية في الأغلفة الكربوناتية للحفريات البحرية أو في الشعاب المرجانية المعمِّرة طويلاً أو في الرواسب، للمساعدة على التنبؤ بسلوك بارامترات مثل درجة الحرارة وهطول الأمطار وحموضة مياه البحر.

٢٣٦- والحصول على هذه المعارف ضروري لدراسة التأثيرات الإيكولوجية والاجتماعية والاقتصادية للظروف المناخية المقبلة على الحياة البحرية والنظم الإيكولوجية، بما في ذلك الثروة السمكية وتربية الأحياء المائية، ولمساعدة المجتمعات على وضع استراتيجيات للتخفيف من حدة هذه الظروف أو التكيّف معها، وهو الأمر الذي سيتطلّب تعاوناً دولياً متواصلاً ومعزّزاً في مجالات البحوث العلمية بشأن البيئة البحرية ورصدها ومراقبتها، لا سيما فيما يتعلق بالنظم الإيكولوجية الأكثر عرضةً للخطر.