IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام

المؤتمـــر العـــام

GC(56)/INF/3
٩ آب/أغسطس ٢٠١٢

توزيع عام
عربي
الأصل: انكليزي

الدورة العادية السادسة والخمسون

البند ١٦ من جدول الأعمال المؤقت
(الوثيقة GC(56)/1 وإضافتها Add.1)

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢

تقرير من المدير العام

موجز

- 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 ٢٠١١.

- *يتناول استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* المجالات التالية: تطبيقات القوى، وتقنيات الانشطار والاندماج المتقدمة، وتطبيقات المعجلات ومفاعلات البحوث، والتكنولوجيا النووية المستخدمة في ميدان الأغذية والزراعة، والصحة البشرية، والبيئة، والموارد المائية، وإنتاج النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية. وثمة وثائق إضافية مرتبطة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* متاحة باللغة الإنكليزية على موقع الوكالة الإلكتروني[١] بشأن تطوير خيارات بديلة عن التشعيع الجيمي في تقنية الحشرة العقيمة؛ والتصوير لتشخيص وعلاج سرطان الثدي؛ وتطبيقات التكنولوجيا الإشعاعية في التعدين ومعالجة المعادن؛ وخيارات التكنولوجيا بالنسبة لأول محطة قوى نووية تُقام في بلد ما؛ ودور مفاعلات البحوث عند الأخذ بالقوى النووية؛ واستخدام المصادر المشعة المختومة والتصرف فيها.

- ويمكن الاطلاع أيضاً على معلومات عن أنشطة الوكالة المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية في التقرير السنوي لعام ٢٠١١ (الوثيقة GC(56)/2)، خاصة في القسم الذي يتناول "التكنولوجيا"، وفي تقرير التعاون التقني لعام ٢٠١١ (الوثيقة GC(56)/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/GC56/Agenda/index.html.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢[٢]

تقرير من المدير العام

موجز جامع

١- في عام ٢٠١١، ظلت الطاقة النووية تؤدي دوراً هاماً في إنتاج الكهرباء العالمية، رغم الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وكانت القدرة الإجمالية لتوليد الطاقة النووية أقل بقليل من السنوات الماضية بسبب إغلاق ١٣ مفاعلاً بصفة دائمة في عام ٢٠١١، منها ٨ مفاعلات في ألمانيا وأربعة في اليابان في أعقاب الحادث. ولكن تم ربط ٧ محطات جديدة بالشبكة مقارنة بخمس محطات في عام ٢٠١٠ ومحطتين في عام ٢٠٠٩ ومقارنة بعدم ربط أي محطة بالشبكة في عام ٢٠٠٨. ومن المتوقع أن يكون هناك نمو كبير في استخدام الطاقة النووية في جميع أنحاء العالم، بما يتراوح بين ٣٥٪ و١٠٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠، رغم أن توقعات الوكالة لعام ٢٠٣٠ هي أقل من التوقعات التي كانت في عام ٢٠١٠ بما يتراوح بين ٧٪ و٨٪. ولم تتغير العوامل التي ساهمت في زيادة الاهتمام بالقوى النووية، وهي: زيادة الطلب العالمي على الطاقة، والمخاوف من تغير المناخ وأمن الطاقة وعدم التيقّن من إمدادات الوقود الأحفوري. وما زال يُتوقّع أن يحدث معظم النمو في البلدان التي لديها محطات قوى نووية عاملة، لا سيما في آسيا، علماً بأن الصين والهند سيظلان أهم مراكز التوسّع، بينما يظل الاتحاد الروسي مركزاً لنمو متين. ويعبّر الانخفاض بنسبة تتراوح بين ٧٪ و٨٪ في النمو المتوقع لعام ٢٠٣٠ عن التخلي التدريجي السريع عن القوى النووية في ألمانيا، وعن بعض الإغلاقات الفورية، وإعادة الحكومة نظرها في التوسع المخطط له في اليابان، كما يعبِّر عن حالات التأخر في التوسع في عدة بلدان أخرى.

٢- وقد كانت التدابير التي اتخذتها البلدان بسبب حادث فوكوشيما داييتشي النووى متنوعة: فقد أعلن عدد من البلدان عن إجراء استعراضات لبرامجها، واتخذت بلجيكا وألمانيا وسويسرا خطوات إضافية للتخلي تدريجياً عن القوى النووية بالكامل، بينما أعادت بلدان أخرى التأكيد على خطط التوسع التي وضعتها. وأجرت عدة دول أعضاء استعراضات وطنية لتقييم الأمان في عام ٢٠١١ (وأطلق عليها في الكثير من الأحيان "اختبارات الإجهاد")، وقُدِمت التزامات باستكمال أي تقييمات متبقية بسرعة وتنفيذ الإجراءات التصحيحية اللازمة. وفي البلدان التي تفكّر في الأخذ بالقوى النووية، ظل الاهتمام قوياً بهذا المجال. ورغم أن بعض البلدان أشارت إلى أنها ستؤجّل القرارات المتعلقة بالشروع في برامج القوى النووية، فإن بلداناً أخرى واصلت خططها للأخذ بالطاقة النووية.

٣- وقد عقدت الوكالة مؤتمراً وزارياً بشأن الأمان النووي في حزيران/يونيه ٢٠١١. وكانت أهداف المؤتمر مناقشة التقييم الأولي لحادث فوكوشيما، والوقوف على الدروس التي ينبغي الاستفادة منها، والمساعدة على إطلاق عملية لتقوية الأمان النووي في كل أرجاء العالم، والبحث عن سبل لزيادة تعزيز التصدي للحوادث والطوارئ النووية. واعتمد المؤتمر العام في أيلول/سبتمبر ٢٠١١، خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي تحدّد ١٢ إجراءً رئيسياً.

---

[٢] ابتداء من *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢*، سيُركّز الجزء الذي يغطي العلوم والتطبيقات النووية في التقرير على المجالات المواضيعية التي شهدت أهم التطورات منذ السنوات السابقة. ومع تقليص عدد المجالات المواضيعية، سيتم وصف أهم الاتجاهات والتطورات بتفصيل أكبر. وستتواصل عملية التركيز هذه في صيغة عام ٢٠١٣ من تقرير استعراض التكنولوجيا النووية.

٤- وفي طبعة عام ٢٠١١ من 'الكتاب الأحمر' المشترك بين وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والوكالة الدولية للطاقة الذرية، شهدت تكلفة موارد اليورانيوم التقليدية المعروفة المقدّرة بما يقل عن ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم انخفاضاً طفيفاً مقارنة مع ما ورد في الطبعة السابقة، لأن إنتاج اليورانيوم على الصعيد العالمي ارتفع بشكل ملموس، وذلك أساساً بسبب زيادة الإنتاج في كازاخستان. وتم الإعلان عن موارد جديدة طيلة عام ٢٠١١ بالنسبة للكثير من مكامن اليورانيوم في أفريقيا، وأفيد بوجود إنتاج تجاري لأول مرة في منجم النض الموقعي في هانيمون بأستراليا. وانخفضت أسعار اليورانيوم الفورية، التي بلغت في نهاية عام ٢٠١٠ أعلى مستوياتها منذ أكثر من سنتين (١٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم)، وذلك بعد حادث فوكوشيما داييتشي النووي، وأغلقت أسعاره السنة بما قدره ١٣٥ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم.

٥- وقد انشئ، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، في المركز الدولي لإثراء اليورانيوم في أنغارسك في الاتحاد الروسي، أول احتياطي عالمي من اليورانيوم الضعيف الإثراء تحت رعاية الوكالة، وهو يحتوي على ١٢٠ طناً من اليورانيوم الضعيف الإثراء. وأصبح احتياطي اليورانيوم الضعيف الإثراء في أنغارسك متاحاً منذ ٣ شباط/فبراير ٢٠١١ للدول الأعضاء في الوكالة. وبالإضافة إلى ذلك، وافق مجلس المحافظين، في آذار/مارس ٢٠١١، على اقتراح بضمان الوقود النووي قدّمته المملكة المتحدة، وشاركت في تمويله البلدان الأعضاء في الاتحاد الأوربي، والاتحاد الروسي والولايات المتحدة الأمريكية. ويهدف هذا الاقتراح إلى ضمان توريد خدمات الإثراء واليورانيوم الضعيف الإثراء لاستخدامه في محطات القوى النووية. وعلاوة على ذلك، واصلت الأمانة خلال عام ٢٠١١ عملها بشأن وضع الترتيبات الإدارية والمالية والقانونية والتقنية الخاصة بمصرف اليورانيوم الضعيف الإثراء الذي تُنسّقه الوكالة لكي يكون الملاذ الأخير لتوريد اليورانيوم لأغراض توليد القوى النووية. وقبلت الوكالة عرضاً من كازاخستان باستضافة المصرف في محطة أولبا التعدينية، وقد استهلت في عام ٢٠١٢ المفاوضات الرسمية بشأن اتفاق الدولة المضيفة.

٦- وفي مجال إدارة النفايات المشعة، اعتمد مجلس الاتحاد الأوربي في ١٩ تموز/يوليه ٢٠١١ توجيهاً يضع إطاراً خاصاً بالجماعة الأوروبية لإدارة الوقود المستهلك والنفايات المشعة بأسلوب مسؤول وآمن. واعتمد هذا التوجيه مجموعة من المعايير الموحدة لكل البلدان الأعضاء في الاتحاد الأوروبي، تستند إلى معايير الأمان الصادرة عن الوكالة. وفي السويد، قدّمت الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية طلب ترخيص لبناء مرفق للتخلص النهائي من الوقود النووي المستهلك في فورسمارك في آذار/مارس ٢٠١١. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أصدرت لجنة الشريط الأزرق المعنية بالمستقبل النووي الأمريكي مسودة توصيات لصوغ حل طويل الأمد لإدارة الوقود المستهلك والنفايات النووية في الولايات المتحدة الأمريكية في تموز/يوليه ٢٠١١. وقد صدر التقرير النهائي في كانون الثاني/يناير ٢٠١٢.

٧- وفي ٢٠١١ أصدرت منظمة الأغذية والزراعة والمنظمة العالمية لصحة الحيوان إعلاناً بشأن استئصال الطاعون البقري على صعيد العالم، وهو المرض الأكثر فتكاً بالماشية والسبب في المجاعة والفقر على مدى قرون. وهو الداء الثاني فقط الذي تم استئصاله بنجاح، بعد القضاء على الجدري في عام ١٩٨٠. وقد قدّمت التقنيات النووية والتقنيات المرتبطة بالمجال النووي مساهمة هامة من خلال تطوير اختبارات تشخيصية واستخدمها، مثل القياس المناعي الإنزيمي (إليزا)، على غرار ما طوّره مختبر الوكالة للإنتاج والصحة الحيوانيين.

٨- ورغم ذلك، فقد أحدثت عولمة التجارة في الأغذية إلى جانب حركة الحيوانات زيادة لم يسبق لها مثيل في الأمراض والآفات الناشئة والتي تعاود الظهور لدى الحيوانات وكذلك النباتات. وخلال عام ٢٠١١، تم إحراز أوجه تقدّم في استخدام التقنيات النووية للتصدي لأمراض حيوانية أخرى عابرة للحدود، ومنها إنفلونزا الطيور (كتتبع مصدر تفشي المرض باستخدام النظائر المستقرة). والعلماء عاكفون أيضا على دراسة جدوى استخدام التشعيع لإنتاج اللقاحات الفيروسية (لداء الحمى القلاعية، وحمى وادي الصدع، والإنفلونزا، وغيرها من مسببات الأمراض الفيروسية). وقد كانت تقنية تعقيم الحشرات كجزء من برامج مكافحة الآفات الحشرية تستخدم عادة أجهزة التشعيع بالكوبالت-٦٠ أو السيزيوم-١٣٧ التي تنتج إشعاعات مؤينة بأشعة غاما. ولكن ونظراً لتزايد التعقيدات والصعوبات اللوجيستية لشحن النظائر المشعة عبر الحدود، يعمل العلماء على استكشاف طرق جديدة لتعقيم الحشرات من قبيل استخدام أجهزة التشعيع بالأشعة السينية الذاتية الاحتواء والمنخفضة الطاقة.

٩- وقد أثَّر حادث فوكوشيما كثيراً في مساحات شاسعة من الأراضي الزراعية المجاورة للموقع وأثار تحدياً جديداً من حيث وضع تدابير زراعية مضادة للتلوث الإشعاعي. ورغم أنه يجري مرة أخرى اختبار العديد من الخيارات التي استخدمت بفعالية عقب أحداث ماضية (كحادثي كيشتيم وتشرنوبل)، مثل التدابير الإصلاحية الزراعية والكيميائية والمعتمدة على التربة، ورغم أنها تُنفَّذ جزئياً في منطقة فوكوشيما، فإن الظروف الخاصة بالمنطقة المتضررة قد استدعت اتباع نُهُج جديدة لضمان الأمان الغذائي والإنتاج الزراعي المستدام.

١٠- وفي مجال **حماية البيئة**، أظهر حادث فوكوشيما على أن عدداً هائلاً من العينات البيئية تحتاج إلى تحليلها بسرعة كبيرة من أجل الامتثال للحدود التنظيمية ومعايير الجودة. فالأساليب السريعة تسمح بتقليص الوقت الذي يستدعيه التحليل من أيام أو أسابيع لساعات أو أيام. والتحقق من مثل هذه الأساليب وتنفيذها مسألة هامة لا سيما بالنسبة للنظائر المشعة التي تثير مخاوف إشعاعية كبيرة في كل الوسائل البيئية التي يُحتمل أن تتضرر، وكذلك بالنسبة للأغذية والأعلاف الحيوانية.

١١- واستخدام أساليب لأخذ العينات وإجراءات تحليلية محددة العوالم و متحقق منها عملية ضرورية لا سيما في حالة التقييمات البيئية عبر الحدود. وتهدف الشبكة العالمية التي تنسّقها الوكالة للمختبرات التحليلية لقياس النشاط الإشعاعي البيئي (ألميرا) إلى تقديم تحليل موقوت وموثوق للعينات البيئية في حال انطلاق النشاط الإشعاعي على نحو عارض أو مُتعمَّد. وقد ركّز اختبار الكفاءة لعام ٢٠١١ الذي نظّمته شبكة ألميرا على مصادر أشعة ألفا وبيتا وغاما في عينات التربة والمياه. وسيكون التركيز في عام ٢٠١٢ على جودة تحليلات عينات الهباء الجوي وإمكانية مقارنتها. ومقارنة بقياس طيف أشعة غاما الموقعي الجوي والأرضي الأكثر شيوعاً بالنسبة للعينات البيئية، ثمة حاجة جليّة إلى تنصيب نظام رصد موقعي تحت الماء من خلال قياس طيف أشعة غاما العالي الدقة الثابت والمتحرك للبيئة البحرية الساحلية. وسيسمح ذلك بإعادة تشكيل الانطلاقات الإشعاعية السائلة والفحص السريع لتلوث المياه والرواسب.

١٢- وفي مجال الصحة البشرية، يتزايد الاعتراف بأن توفير تغذية مناسبة خلال الأيام الألف الأولى من العمر، من الحمل إلى بلوغ سنتين، يمكن أن يكون له تأثير عميق في قدرة الطفل على النمو والتعلّم، ويمكن أن يكون له تأثير في احتمال الإصابة بأمراض مزمنة، كالسكري وأمراض القلب، في وقت لاحق من الحياة. وتقدّم التقنيات النووية، مثل تخفيف النظائر المستقرة، مزايا لرصد التغيرات الصغيرة نسبياً في تكوين الجسم، ويمكن استخدامها لتقييم برامج التدخل التغذوي. وفي شيلي، أدى الاستخدام الناجح لتقنيات النظائر المستقرة لتقييم برامج التدخل الوطنية إلى وضع في عام ٢٠١١ برنامج نمو الجهاز الحركي وتحفيز النشاط الجسدي بالنسبة للأطفال الذين تتراوح أعمارهم بين ٦ و٢٤ شهراً.

١٣ وكجزء من الجهود المبذولة لتعزيز جودة إدارة البيانات الخاصة بالعلاج بالأشعة، هناك توجه متزايد نحو استخدام "نظام التسجيل والتحقق"، وهو نوع من نظم إدارة قاعدة البيانات عن المرضى الذين يتلقون العلاج الإشعاعي. وبغية ترويج علاج آمن وفعال للمرضى، أصدرت الوكالة في عام ٢٠١١ مبادئ توجيهية تتعلق بالإدارة الجيدة والسليمة لنظم التسجيل والتحقق، وحظيت هذه المبادئ بتأييد من كل كبار مورّدي معدات العلاج الإشعاعي. وتؤدي مختلف النُهُج المتعلقة بالتصوير التشخيصي دوراً يتزايد أكثر فأكثر في الكشف ومعالجة سرطان الثدي. وقد أدى التطور المحرز حديثا في مجال تكنولوجيا التصوير إلى جانب التطور المحرز في تكنولوجيا الحواسيب إلى تحسّن جوهري في إجراءات استهداف الأورام التخطيط للعلاج الإشعاعي. وواصلت الوكالة في ٢٠١١ العمل، من خلال برنامجها الخاص بالعمل من أجل علاج السرطان، وبالتعاون مع شركاء مثل منظمة الصحة العالمية، على تنفيذ برنامجها الشامل لمكافحة السرطان لفائدة الدول الأعضاء.

١٤- وفي مجال الموارد المائية، تقدّم التقنيات النظيرية والأدوات المتصلة بها، مقترنة بالتطورات الجديدة في رسم الخرائط مثل نظم المعلومات الجغرافية والأساليب الإحصائية الجيولوجية، المساعدة للمسؤولين عن إدارة المياه على تحديد مستودعات المياه الجوفية وكثل المياه الجوفية وتحديد كميتها وتصوّرها بأسلوب أفضل. وفي عام ٢٠١١، أصبح استخدام الأجهزة الزهيدة التكلفة والسهلة الاستعمال لتحليل النظائر المستقرة في المياه، استناداً إلى تنظير الطيف بالليزر، إجراءً نمطياً تتبعه أفرقة البحث في كل أرجاء العالم، وقد مكّنتهم هذه الأجهزة من اكتساب استقلالية في قدرتهم على تحليل النظائر المستقرة فيما يتعلق بالتقييم الهيدرولوجي، وبالتالي توفير في التكاليف والوقت. فقد وفّرت الدراسات النظيرية الخاصة بتقييم موارد المياه الجوفية في شبه جزيرة سانتا إيلينا في إكوادور، على سبيل المثال، المعلومات التي ساعدة في زيادة توفر المياه للكثير من سكان المنطقة.

١٥- ويرتبط التقدم المحرز في التصوير النووي ارتباطاً وثيقاً بإنتاج نويدات مشعة جديدة لها خصائص فيزيائية وكيميائية جديدة. وفي عام ٢٠١١، أصبحت النويدات المشعة المستخدمة في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني والمنتجة بواسطة المولدات متاحة أكثر فأكثر في بلدان مثل أستراليا والصين وفرنسا وألمانيا والهند واليابان وجمهورية كوريا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية، لأنه يمكن إنتاجها في المستشفيات دون سيكلوترون داخل الموقع. ولوحظ أن هناك اتجاه آخر في عام ٢٠١١ اتبعه عدد من المصنّعين نحو رفع مستويات نظمهم الخاصة بالسيكلوترونات بغية الحصول على حزم إشعاعية أفضل وطاقات مرتفعة أكثر للاستجابة للطلب الحالي على النويدات المشعة التي تُستخدم في تقنيات التشخيص مثل التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني والتصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد، فضلاً عن التطبيقات العلاجية.

١٦- وفي مجال التكنولوجيات الإشعاعية، أفاد الاجتماع الدولي المعني بالمعالجة الإشعاعية لعام ٢٠١١، باستحداث لقاح فعال للغاية لمكافحة الملاريا وهو في مرحلة متقدّمة من التجارب الإكلينيكية. يستند اللقاح إلى الحيوانات البوغية الموهنة بالإشعاعات وهو يحول دون الوصول إلى طور تلوث الدم بالملاريا، ويقي الفرد من المرض والعدوى.

١٧- وفي تطور آخر خلال عام ٢٠١١ يتعلق بأنواع الوقود الحيوي ، اتضح أن تشعيع الحزم الإلكترونية لتفل قصب السكر يؤدي إلى زيادة الإيثانول الحيوي، وقد اتضح بنجاح أن استخدام أغشية بوليمرية ليفية مطعمة بواسطة الإشعاعات أزال بانتقاء السيزيوم المشع من موقعين أصابهما تلوث جراء حادث فوكوشيما. وتستخدم المقتفيات الإشعاعية والقياسات النووية أكثر فأكثر في التعدين ، وذلك بالأساس في أنشطة التنقيب عن الموارد الطبيعية واستغلالها بفعالية.

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في عام ٢٠١١، ظلت الطاقة النووية تؤدي دوراً هاماً في إنتاج الكهرباء في العالم. وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١، كان هناك ٤٣٥ مفاعلاً للقوى النووية قيد التشغيل عبر العالم، بقدرة إجمالية تناهز ٣٦٩ غيغاواط(كهربائي)[٣] (انظر الجدول ألف-١). ويمثل ذلك انخفاضاً في القدرة الإجمالية بما يعادل ٧ غيغاواط(كهربائي) مقارنة بنهاية عام ٢٠١٠، ويمكن أن يعزى ذلك بالأساس إلى عدد من عمليات الإغلاق الدائم يفوق عدد عمليات ربط محطات بالشبكة. وحالات الربط الجديدة بالشبكة هي: Ling Ao-4 (١٠٠٠ ميغاواط(كهرابائي))، وQinshan-2-4 (٦١٠ ميغاواط(كهربائي))، والمفاعل التجريبي الصيني السريع (٢٠ ميغاواط(كهربائي)) في الصين؛ وKaiga-4 (٢٠٢ ميغاواط(كهربائي)) في الهند؛ وبوشهر-١ (٩١٥ ميغاواط(كهربائي)) في جمهورية إيران الإسلامية؛ والوحدة-٢ من محطة شاشما للقوى النووية (٣٠٠ ميغاواط(كهربائي)) في باكستان؛ وKalinin-4 (٩٥٠ ميغاواط(كهربائي)) في الاتحاد الروسي.

٢- وأثّر الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في العدد الإجمالي لحالات بدء تشييد مفاعلات جديدة في عام ٢٠١١. فالزيادة المطردة التي طرأت منذ عام ٢٠٠٣، والتي وصلت ذروتها بتسجيل ١٦ حالة بدء تشييد في عام ٢٠١٠، توقّفت في عام ٢٠١١ عندما بدأت أعمال التشييد في أربع محطات للقوى النووية فقط، هي: الوحدتان ٣ و٤ من محطة شاشما للقوى النووية في باكستان والوحدتان ٧ و٨ من محطة راجاستان في الهند.

٣- وفي عام ٢٠١١، تم الإعلان رسمياً عن إغلاق ١٣ مفاعلاً بصفة دائمة. ولم يشمل ذلك فقط الوحدات من ١ إلى ٤ في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في اليابان، وإنما أيضاً المحطات Biblis A و Biblis B وBrunsbüttel وIsar-1 وKrümmel وNeckarwestheim-1 وPhilippsburg-1 وUnterweser في ألمانيا. وتم كذلك إغلاق المفاعل Oldbury A2 في المملكة المتحدة بسبب عُمر المفاعل. ويمثل ذلك أكبر عدد من الإغلاقات منذ عام ١٩٩٠، عندما ترك حادث تشيرنوبل الأثر نفسه. وعلى سبيل المقارنة، لم يتم إغلاق سوى مفاعل واحد في عام ٢٠١٠ وثلاثة مفاعلات في عام ٢٠٠٩.

٤- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١، كان يجري تشييد ٦٥ مفاعلاً. ولكن هذا العدد، وإن كان أقل من العام السابق، فهو يظل عدداً كبيراً جداً. وبالإضافة إلى ذلك، وكما هو الحال في السنة الماضية، ما زالت حالات التوسع وكذلك احتمالات النمو في الأجلين القصير والطويل، تتركّز في آسيا (انظر الجدول ألف-١). ومن أصل مجموع عدد المفاعلات قيد التشييد، هناك بالفعل ما لا يقل عن ٤٤ مفاعلاً في آسيا، وكذلك ٣٥ مفاعلاً من أصل المفاعلات الجديدة البالغ عددها ٤٥ التي رُبطت أخيراً بالشبكة.

٥- ورغم حادث فوكوشيما داييتشي، تواصلت في عام ٢٠١١ في عدة بلدان التوجهات الأخيرة نحو رفع القوى وتجديد الرخص أو تمديدها بالنسبة للكثير من المفاعلات العاملة. ففي كندا، منحت هيئة الأمان النووي الكندية تجديداً مدته خمس سنوات لرخصة تشغيل المفاعل Gentille-2 في كيبيك. وفي فنلندا، استكمل المرفق الفنلندي Teollisuuden Voima Oyj في عام ٢٠١١ آخر سلسلة من أعمال الترميم في الوحدة ٢ من محطة أولكيليوتو للقوى النووية، مما أدى إلى رفع قدرة المفاعل (٨٦٠ ميغاواط(كهربائي)) بعشرين

[٣] واحد غيغاواط(كهربائي) يساوي ألف مليون واط من القوة الكهربائية.

ميغاواط(كهربائي). وقد أدى ذلك إلى بُلوغ قدرة محطة أولكيليوتو-٢ ما مجموعه ٨٨٠ ميغاواط(كهربائي)، وهي زيادة بالثلث عن قدرتها الأصلية البالغة ٦٦٠ ميغاواط(كهربائي). وفي فرنسا، وافقت الهيئة الفرنسية للأمان النووي على تمديد العمر التشغيلي لمحطة القوى النووية Fessenheim-1 بعشر سنوات إضافية. وفي المكسيك وفي مطلع العام، شهد المفاعلان اللذان تملكهما الدولة زيادة في القدرة بنسبة ٢٠٪ بعد استكمال مشروع تحديثي استغرق أربع سنوات. وفي إسبانيا، وافق مجلس الأمان النووي على تمديد رخصة التشغيل بعشر سنوات لمحطة كوفريتيس (Cofrentes) للقوى النووية ولوحدتي محطة آسكو (Ascó) للقوى النووية. وبالإضافة إلى ذلك، تم رفع قدرة المفاعلين الموجودين في محطة ألماراز (Almaraz) للقوى النووية بسبعين ميغاواط(كهربائي). وفي سلوفاكيا، استكملت مؤسسة الكهرباء السلوفينية (Slovenské elektrárne) أعمال التحديث وبرنامج زيادة القدرة في وحدتي محطة بوهونيسي (Bohunice) للقوى النووية. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، جدّدت الهيئة الرقابية النووية تراخيص تشغيل المحطات التالية لمدة عشرين سنة إضافية: Vermont Yankee؛ وPrairie Island-1 وPrairie Island-2؛ وKewaunee؛ وPalo Verde-1 وPalo Verde-2 وPalo Verde-3؛ وSalem-1 وSalem-2؛ وHope Creek. وأدى ذلك إلى أن يصل العدد الإجمالي لعمليات تجديد الرخص الموافق عليها في الولايات المتحدة إلى ٧١ تجديداً منذ عام ٢٠٠٠. ويجري حالياً استعراض طلباتٍ لتجديد خمس عشرة رخصة. وفضلاً عن ذلك، وافقت الهيئة الرقابية النووية التابعة للولايات المتحدة على ٥ طلبات برفع القدرات في عام ٢٠١١، وهي حاليا تستعرض ٢٠ طلباً للارتقاء بالقدرات. وأخيراً، أُعلِن في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١ عن اختيار أول موقع لإنشاء محطة قوى نووية جديدة بعد حادث المفاعل النووي في فوكوشيما داييتشي عندما اختارت شركة فينّوفويما محافظة بيهاجوكي في فنلندا موقعاً لمحطة القوى النووية الثالثة في البلد.

٦- وقد كانت التدابير التي اتخذتها البلدان في كل أرجاء العالم بسبب حادث فوكوشيما داييتشي متنوعة. فقد أعلن عدد من البلدان عن إجراء استعراضات لبرامجها الخاصة بالقوى النووية، واتخذ بعض البلدان خطوات للتخلي بالكامل تدريجياً عن القوى النووية، بينما أعادت بلدان أخرى تأكيد نيتها توسيع البرامج القائمة. ورغم أن الحادث لم يغيِّر سياسة بلدان مثل الصين والهند والاتحاد الروسي، التي تتزعّم معظم التوسعات العالمية في مجال القوى النووية، فإنه أثار أسئلة حول الدور المقبل للطاقة الذرية في بعض البلدان. وفي بلجيكا، في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١، أعيد تأكيد القرار المتخذ في عام ٢٠٠٣ والقاضي بإغلاق مفاعلات القوى النووية القديمة في البلد في عام ٢٠١٥، والذي تمت إعادة النظر فيه في عام ٢٠٠٩، واقترحت الحكومة مضاعفة الرسوم الخاصة المفروضة على القوى النووية والتي تدفعها الصناعة النووية سنوياً. وفي فرنسا، احتدم النقاش حول الدور المقبل للقوى النووية. وفي ألمانيا، وافقت الحكومة في حزيران/يونيه ٢٠١١ على مجموعة من الاقتراحات التشريعية تفضي إلى الإغلاق الدائم للمفاعلات النووية في ألمانيا، على أن يتم التخلي تدريجياً عنها مع نهاية عام ٢٠٢٢. وبالإضافة إلى ذلك، أعلِن عن إغلاق وحدات المفاعلات القديمة الثماني بصفة دائمة في آب/أغسطس ٢٠١١. وكانت إيطاليا، التي كانت تفكّر في إنعاش برنامجها للقوى النووية بعد إغلاق آخر محطاتها العاملة في عام ١٩٩٠، قد قرّرت بعد استفتاء حزيران/يونيه ٢٠١١، أن الطاقة النووية لن تصبح خياراً طيلة خمس سنوات أخرى على الأقل، إن لم يكن أكثر. وفي اليابان، أعلن مجلس الطاقة والبيئة في تموز/يوليه ٢٠١١ عزمه تقليص اعتماد البلد على الطاقة النووية. وتم تأكيد ذلك في بيان أبيض نشرته الحكومة اليابانية في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١، وأعلنت فيه أنه سيتم تقليص اعتماد اليابان على الطاقة النووية قدر المستطاع في المستقبل المتوسط والبعيد الأجل وبأنه سيتم صوغ سياسة جديدة للطاقة. ومع نهاية تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١، كانت النسبة التي تعمل من القدرة اليابانية لتوليد الطاقة النووية هي أقل من ٢٠٪. وفي سويسرا، صوّت مجلس الشيوخ في

أيلول/سبتمبر ٢٠١١ على الموافقة على اقتراح بالتخلي تدريجياً عن القوى النووية بحلول عام ٢٠٣٤. ومن المتوقع تنظيم استفتاء عام بشأن هذه المسألة قبل أن يصبح القرار نهائياً.[٤]

٧- ومع ذلك، ورغم هذه التطورات الأخيرة، ما زالت القوى النووية تعتبر خياراً هاماً ليس بالنسبة للبلدان التي لديها برامج قوى نووية قائمة فقط، وإنما أيضاً بالنسبة للبلدان النامية التي لديها احتياجات متزايدة في مجال الطاقة. ورغم أن بعض البلدان أشارت إلى أنها ستؤجّل اتخاذ قرارات في ما إذا كانت ستستهل أم لا برامج للقوى النووية، فإن بلداناً أخرى واصلت خططها الرامية إلى الأخذ بالطاقة النووية، وأدرجت الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي كلما انبثقت تلك الدروس. وأدخلت جمهورية إيران الإسلامية أول محطة لها للقوى النووية في الخدمة في أيلول/سبتمبر ٢٠١١. واتخذت عدة بلدان خطوات ملموسة لتشييد أولى محطاتها للقوى النووية في عام ٢٠١١. وقطعت الإمارات العربية المتحدة وتركيا شوطاً متقدّماً في برامجهما مع البائعين من جمهورية كوريا والاتحاد الروسي على التوالي. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١، وقّعت بيلاروس على عقد لتشييد مفاعلين للقوى النووية مع الشركة الروسية Atomstroyexport. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١، وقّعت بنغلاديش على اتفاق حكومي دولي مع روسيا يتعلق بتوريد مفاعلين بقدرة ١٠٠٠ ميغاواط(كهربائي) وكذلك توريد الوقود، واستعادة الوقود المستهلك، والتدريب وخدمات أخرى. وفي تشرين الثاني/نوفمبر أيضاً، وقّعت فييت نام على اتفاق قرض مع الاتحاد الروسي يتعلق بتمويل أول محطة للقوى النووية في فييت نام.

٨- وفي عام ٢٠١١، أوفدت الوكالة بعثتي استعراض متكامل للبنية الأساسية النووية في الإمارات العربية المتحدة وبنغلاديش. وتشجع كذلك خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي، التي اعتمدها المؤتمر العام في أيلول/سبتمبر ٢٠١١، البلدان المستجدة على إدراج الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي في تخطيطها للبنى الأساسية، وأن تدعو خدمات الاستعراض لزيارتها، كبعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية، وذلك قبل إدخال أولى محطاتها للقوى النووية في الخدمة. وطيلة عام ٢٠١١، استمرت الوكالة في عرض مجموعة واسعة من المساعدات وخدمات الدعم على الدول الأعضاء، بما في ذلك الإرشادات والمعايير، والمساعدة التقنية، وخدمات الاستعراض، والتدريب، وبناء القدرات، وشبكات المعارف، ويجري استعراض العديد منها لكي تُؤخذ الدروس المستفادة من فوكوشيما في الحسبان. وبما أن عدداً قليلاً من البلدان قد قطعت شوطاً متقدماً في خططها وبما أنها تسعى جاهدة لكي تصبح من "العملاء المطلعين"، فإن المساعدة التي تقدمها الوكالة، لا سيما للمنظمات المالكة/المشغِّلة الجديدة، تتزايد أكثر فأكثر.

---

[٤] بالإضافة إلى ذلك، أعلنت تايوان، الصين في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١ عن سياسة جديدة للطاقة النووية تعتمد على التخلي تدريجياً عن القوى النووية رغم عدم تحديد أي إطار زمني محدد.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية الجاري تشغيلها أو تشييدها في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١١		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١١	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الشهور
الاتحاد الروسي	٣٣	٢٣ ٦٤٣	١٠	٨ ١٨٨	١٦٢,٠	١٧,٦	١٠٥٨	٤
الأرجنتين	٢	٩٣٥	١	٦٩٢	٥,٩	٥,٠	٦٦	٧
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٤	٣٣,٢	٣٧	٨
إسبانيا	٨	٧ ٥٦٧			٥٥,١	١٩,٥	٢٨٥	٦
ألمانيا	٩	١٢ ٠٦٨			١٠٢,٣	١٧,٨	٧٨٢	٩
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	١٩٠٠	٨٤,٩	٤٧,٢	٣٩٨	٦
إيران (جمهورية-الإسلامية)	١	٩١٥			٠,١		٠	٤
باكستان	٣	٧٢٥	٢	٦٣٠	٣,٨	٣,٨	٥٢	٨
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٢٤٥	١٤,٨	٣,٢	٤١	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩٢٧			٤٥,٩	٥٤,٠	٢٤٧	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٠٦	٢	١ ٩٠٦	١٥,٣	٣٢,٦	١٥١	٣
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٧٦٦			٢٦,٧	٣٣,٠	١٢٢	١٠
جمهورية كوريا	٢١	١٨ ٧٥١	٥	٥ ٥٦٠	١٤٧,٨	٣٤,٦	٣٨١	١
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٣٠			١٢,٩	٥,٢	٥٤	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٨	١٩,٠	١٩	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٦	٢	٧٨٢	١٤,٣	٥٤,٠	١٤٠	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٩	٤١,٧	٣٠	٣
السويد	١٠	٩ ٣٢٦			٥٨,١	٣٩,٦	٣٩٢	٦
سويسرا	٥	٣ ٢٦٣			٢٥,٧	٤٠,٩	١٨٤	١١
الصين	١٦	١١ ٨١٦	٢٦	٢٦ ٦٢٠	٨٢,٦	١,٩	١٢٥	٦
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٠٠	٤٢٣,٥	٧٧,٧	١٨١٦	٤
فنلندا	٤	٢ ٧٣٦	١	١ ٦٠٠	٢٢,٣	٣١,٦	١٣١	٤
كندا	١٨	١٢ ٦٠٤			٨٨,٣	١٥,٣	٦١٨	٢
المكسيك	٢	١ ٣٠٠			٩,٣	٣,٦	٣٩	١١
المملكة المتحدة	١٨	٩ ٩٥٣			٦٢,٧	١٧,٨	١٤٩٥	٢
الهند	٢٠	٤ ٣٩١	٧	٤ ٨٢٤	٢٩,٠	٣,٧	٣٥٧	٣
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٤,٧	٤٣,٣	١٠٦	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٩	٣,٦	٦٧	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	١٠٤	١٠١ ٤٦٥	١	١ ١٦٥	٧٩٠,٤	١٩,٣	٣٧٠٧	١١
اليابان	٥٠	٤٤ ٢١٥	٢	٢ ٦٥٠	١٥٦,٢	١٨,١	١٥٤٦	٤
المجموع [ب، ج]	٤٣٥	٣٦٨ ٧٩١	٦٥	٦١ ٩٦٢	٢ ٥١٨,٠	١٢,٣٪ [د]	١٤ ٧٩٢	٣

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

ب ملحوظة: هذا المجموع يتضمن البيانات التالية المتعلقة بتايوان، الصين:
٦ وحدات، ٥ ٠١٨ ميغاواط (كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط (كهربائي)، قيد التشييد؛
٤٠,٣٧ تيراواط ساعة من الكهرباء المولدة نووياً، أي ما يمثّل ١٩,٠٢٪ 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 (١٨٢ عاماً وشهر واحد).

د هذه هي النسبة المئوية *للإجمالية* من الطاقة النووية المورّدة في عام ٢٠١١.

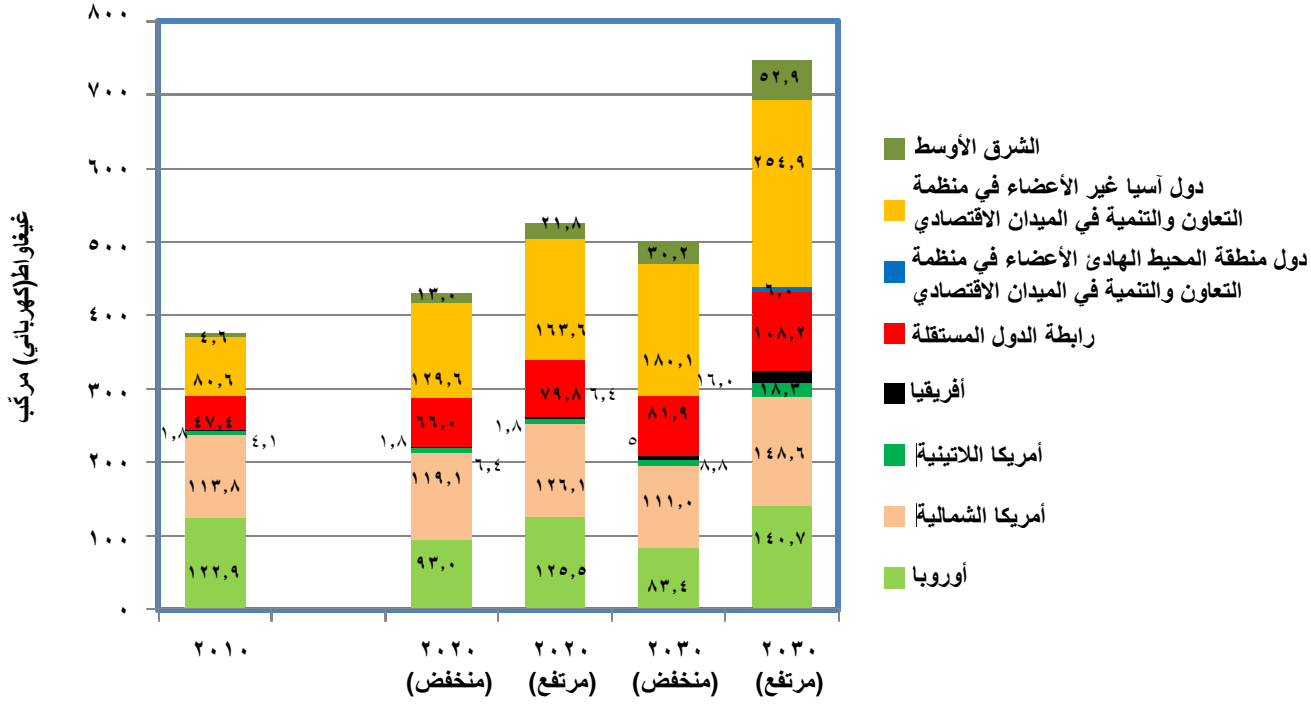
ألف-٢- النمو المتوقّع بشأن القوى النووية

٩- تنشر الوكالة سنوياً سلسلتين من التوقعات بشأن النمو العالمي للقوى النووية: إحداهما عن التوقعات المنخفضة والأخرى عن التوقعات المرتفعة. وتراعي استيفاءاتُ عام ٢٠١١ الآثار التي خلّفها حادث فوكوشيما داييتشي. وتشير استيفاءات عام ٢٠١١ إلى أن قدرة القوى النووية العالمية المتوقعة في عام ٢٠٣٠ هي أقل من القدرة التي كانت متوقّعة قبل الحادث بنسبة تتراوح بين ٧ و٨٪. وبناء على ذلك، يُتوقّع أن يؤدي الحادث عالمياً إلى تباطؤ نمو القوى النووية أو تأجيله، لا إلى ارتداده. وفي التوقعات المنخفضة المستوفاة، تتزايد قدرة القوى النووية المركّبة عالمياً من ٣٦٩ غيغاواط (غيغاواط(كهربائي)) في نهاية عام ٢٠١١ لتصل إلى ٥٠١ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠، وهو عدد أقل مما كان متوقّعاً في العام الماضي بنسبة ٨٪. أما في التوقعات المرتفعة المستوفاة، فإن القدرة تتزايد لتصل ٧٤٦ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠، أي أقل مما كان متوقّعاً في العام الماضي بنسبة ٧٪. ورغم ذلك، فمن المنتظر أن يتزايد عدد المفاعلات النووية العاملة في عام ٢٠٣٠ بنحو ٩٠ مفاعلاً في التوقعات المنخفضة وبنحو ٣٥٠ مفاعلاً في التوقعات المرتفعة، من مجموع المفاعلات البالغ عددها ٤٣٥ مفاعلاً في نهاية عام ٢٠١١. ويتوقّع أن يحدث معظم النمو في البلدان التي لديها بالفعل محطات قوى نووية عاملة.

١٠- وكما هو الحال في السنوات الماضية، يبلغ معدل النمو المتوقع أقصاه في الشرق الأقصى. إذ تتزايد القدرة من ٨١ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٠ لتصل إلى ١٨٠ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠ في التوقعات المنخفضة، وإلى ٢٥٥ غيغاواط(كهربائي) في التوقعات المرتفعة. ولكن هذه المستويات هي أقل من توقعات العام الماضي بنحو ١٧ غيغاواط(كهربائي) و١٢ غيغاواط كهربائي، على التوالي.

١١- وتُظهر أوروبا الغربية أكبر اختلاف بين التوقعات المنخفضة والمرتفعة. وفي التوقعات المنخفضة، تنخفض قدرة القوى النووية في المنطقة من ١٢٣ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٠ إلى ٨٣ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠. وفي التوقعات المرتفعة، تتزايد القوى النووية لتصل إلى ١٤١ غيغاواط(كهربائي)، رغم أنها ما زالت أقل من النمو المتوقّع في العام الماضي بما قدره ١٧ غيغاواط(كهربائي). وفي أمريكا الشمالية، تشير التوقعات المنخفضة إلى انخفاض ضئيل، من ١١٤ غيغاواط(كهربائي) في نهاية عام ٢٠١٠ إلى ١١١ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠. أما التوقعات المرتفعة فتفترض زيادة تصل إلى ١٤٩ غيغاواط(كهربائي)، ولكن ذلك ما زال أقل من النمو المتوقّع في العام الماضي بما قدره ١٧ غيغاواط(كهربائي).

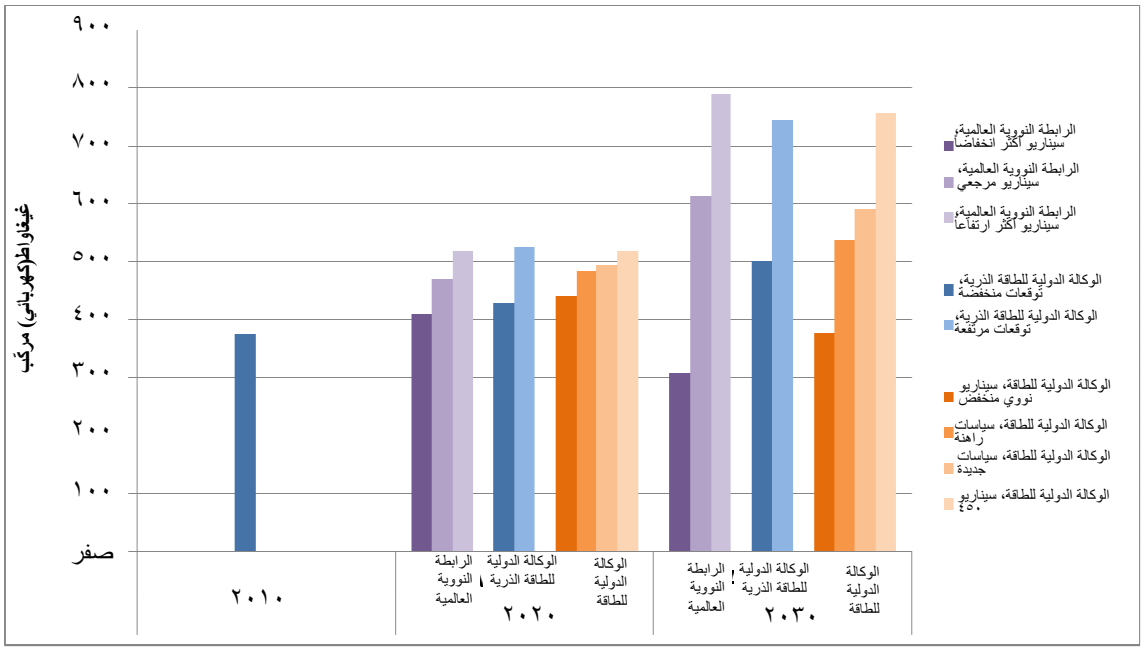
١٢- ومن المناطق الأخرى التي لها برامج قوى نووية كبيرة هي أوروبا الشرقية (بما في ذلك الاتحاد الروسي)، والشرق الأوسط، وجنوب آسيا (بما في ذلك الهند وباكستان). وتتوسّع القوى النووية في هذه المناطق في كل من التوقعات المنخفضة والمرتفعة بمستويات أقل بقليل من المستويات المتوقّعة في العام الماضي. وينطبق ذلك أيضاً على أفريقيا، وأمريكا اللاتينية، وجنوب شرق آسيا، التي لديها برامج أصغر.



الشكل ألف-١ - تطوّر القدرات الإقليمية لتوليد الطاقة النووية في الفترة ٢٠١٠–٢٠٣٠، توقعات الوكالة المنخفضة والمرتفعة في عام ٢٠١١.

١٣- تفترض التوقعات المنخفضة للوكالة أن تواصل الاتجاهات الحالية مسيرتها مع بعض التغييرات الطفيفة في السياسات المؤثرة في القوى النووية. ولكنها لا تفترض بالضرورة تحقيق كل الأهداف الوطنية للقوى النووية. وهذه توقعات تحفظية ولكنها معقولة. وبالنسبة للتوقعات المرتفعة، فإنها تفترض أنه سيتم التغلّب عمّا قريب على الأزمتين المالية والاقتصادية الراهنتين وأنه سيتم استئناف المعدلات السابقة للنمو الاقتصادي والطلب على الكهرباء، لا سيما في الشرق الأقصى. وعلاوة على ذلك، تفترض التوقعات المرتفعة فرض سياسات عالمية صارمة للتخفيف من تغير المناخ.

١٤- أما النمو المتواصل المفتَرَض في كل من التوقعات المنخفضة والمرتفعة فهو يشير إلى أن العوامل التي ساهمت في زيادة الاهتمام بالقوى النووية قبل حادث فوكوشيما دايتشي لم تتغير. وينطوي ذلك على تزايد الطلب العالمي على الطاقة، وكذلك المخاوف من تغير المناخ، وأسعار الوقود الأحفوري المتقلبة، وأمن توريد الطاقة.



الشكل ألف-٢ – مقارنة بين توقعات القوى النووية من طرف الوكالة (بالأزرق)، وتوقعات الوكالة الدولية للطاقة (بالبنفسجي) وتوقعات الوكالة الدولية للطاقة "توقعات الطاقة في العالم لعام ٢٠١١" (بالبرتقالي).

١٥- وتنشر كذلك الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي توقعات بشأن النمو العالمي للقوى النووية. وتقدم *توقعات الطاقة في العالم لعام ٢٠١١* الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة أربع حالات ذات أهمية. ورغم أن التقرير الرئيسي يركّز على ثلاثة سيناريوهات، يشار إليها على التوالي بما يلي: "سيناريو السياسات الراهنة"، و"سيناريو السياسات الجديدة"، وسيناريو ٤٥٠" (حيث يشير الرقم ٤٥٠ إلى الحد من تركيز غازات الدفيئة في الجو إلى ٤٥٠ جزءاً في المليون)، فقد دفع حادث فوكوشيما داييتشي الوكالة الدولية للطاقة إلى استكشاف تداعيات الابتعاد كثيراً عن القوى النووية في سيناريو إضافي، هو "السيناريو النووي المنخفض". وتفترض الحالة النووية المنخفضة عدم تشييد أي مفاعلات جديدة في الدول الأعضاء في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، كما تفترض أنه سيتم خارج الدول الأعضاء في المنظمة المذكورة تشييد النصف فقط من المفاعلات الإضافية المتوقعة في سيناريو السياسات الجديدة. وكان من المفترض أيضاً أن يتقلص العمر التشغيلي للمحطات النووية القائمة. وأدى الانخفاض المتوقع في القوى النووية الناتج عن ذلك إلى زيادة متواضعة في حصة الكهرباء التي تنتجها المصادر المتجددة، وكذلك إلى زيادات متوقّعة كبيرة في استهلاك الفحم، واستهلاك الغاز الطبيعي، وفي أسعار الطاقة، وانبعاثات غازات الدفيئة. ومن شأن هذه الانبعاثات المتزايدة أن تجعل من المستحيل إبقاء الارتفاع في درجة الحرارة العالمية أقل من درجتين مئويتين مقارنة بمستويات ما قبل التصنيع، مما يؤدي إلى ما يُعرف اليوم في علوم المناخ بالتدخل البشري الخطر في النظام المناخي. ويقارن الشكل ألف-٢ توقعات الوكالة، وسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة، وتوقعات الرابطة النووية العالمية.[٥] وتستخدم التوقعات المنخفضة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، وسيناريو السياسات الراهنة للوكالة الدولية للطاقة، والسيناريو المرجعي للرابطة النووية العالمية افتراضات مماثلة "لبقاء الأمور على حالها" وتقدم نتائج قابلة للمقارنة. ويمكن كذلك المقارنة بين السيناريوهات المرتفعة التي تقدمها هذه المنظمات، وكذلك بين السيناريوهات النووية المنخفضة للوكالة الدولية للطاقة وللرابطة النووية العالمية.

---

[٥] *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and demand 2011-2030*, WNA, London, 2011.

ألف-٣- دورة الوقود[٦]

ألف-٣-١- موارد اليورانيوم وإنتاجه

١٦- كل عامين، تقوم الوكالة ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي بنشر ما يسمى 'الكتاب الأحمر' بعنوان *اليورانيوم: موارده وإنتاجه والطلب عليه*. وقد نُشرت أحدث طبعة منه في تموز/يوليه ٢٠١٢. وفي طبعة عام ٢٠١١، بلغ تقدير الكمية الإجمالية المعروفة من موارد اليورانيوم التقليدية، الممكن استخلاصها بتكلفة تقل عن ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، ٥,٣ مليون طن من اليورانيوم. ويقل هذا التقدير بمعدل ١,٤٪ عن التقدير الوارد في الطبعة السابقة. وفضلاً عن ذلك، ثمة كمية تُقدَّر بحوالي ١,٨ مليون طن من اليورانيوم من موارد تقليدية معروفة يمكن استخلاصها بتكلفة تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، ليصل بالتالي إجمالي الموارد المعروفة القابلة للاستخلاص بتكلفة تقل عن ٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم إلى ٧,١ مليون طن من اليورانيوم. ولأغراض المرجعية، شهد السعر الفوري لليورانيوم في عام ٢٠١١ تقلبات تراوحت ما بين ١٦٥ و١٦٩ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم حتى شهر آذار/مارس، وهي أعلى قيمة تم تسجيلها منذ عامين، قبل أن ينخفض إلى ١٥٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم بعد الحادث الذي تعرضت له محطة فوكوشيما داييتشي. ثم تراجع السعر الفوري تدريجياً ليصل إلى ١٣٢ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم في آب/أغسطس، ولكنه عاد وارتفع إلى ١٣٥ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم بحلول نهاية العام.

١٧- وتشمل الموارد غير المكتشفة، على حدّ سواء، موارد يتوقع ظهورها إما في مكامن معروفة أو بالقرب منها، وموارد تتسم أكثر بطابع تخميني يُعتقَد أنها متوافرة في مناطق ملائمة من الناحية الجيولوجية، لكنها لم تُستكشَف بعد. وبلغ إجمالي الموارد غير المكتشفة (الموارد التكهنية والتخمينية) المشار إليها في الكتاب الأحمر ما يفوق ١٠,٤٣ مليون طن من اليورانيوم، مسجلاً ارتفاعاً طفيفاً عن الرقم المشار إليه في الطبعة السابقة (المنشورة عام ٢٠١٠) والذي بلغ ١٠,٤٠ مليون طن من اليورانيوم. وقُدِّرت الموارد التقليدية غير المكتشفة بأكثر من ٦,٢ مليون طن من اليورانيوم بتكلفة تقل عن ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، بالإضافة إلى ٠,٤٦ مليون طن بكلفة تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم. وثمة أيضاً كمية إضافية تُقدَّر بحوالي ٣,٧ مليون طن من اليورانيوم من موارد تخمينية لم يتم بعد تحديد تكاليف إنتاجها.

١٨- وتم، في عام ٢٠١١، الإعلان عن موارد إضافية بالنسبة إلى العديد من مكامن اليورانيوم في أفريقيا — وبالتحديد في بوتسوانا والجمهورية الإسلامية الموريتانية ومالاوي ومالي وناميبيا وزامبيا وجمهورية تنزانيا المتحدة — حيث تواصلت الجهود المكثفة للتنقيب عن اليورانيوم. ووصلت دراسة جدوى مشروع نهر مكوجو، في جمهورية تنزانيا المتحدة، إلى مرحلة متقدّمة. كما أبلغت أمريكا الجنوبية أيضاً عن موارد إضافية أو جديدة لكل من كولومبيا وغيانا وبيرو وباراغواي.

١٩- وتشهد قاعدة الموارد مزيداً من التوسّع بفضل موارد اليورانيوم غير التقليدية والثوريوم. وتشمل الموارد غير التقليدية اليورانيوم الممكن استخلاصه المقترن بأنواع الفوسفات، والخامات غير الحديدية، والكربوناتيت، والشست الأسود، والليغنيت، ولا يمكن استخلاص اليورانيوم من هذه الموارد سوى كمنتج ثانوي غير هام وعلى

---

[٦] ترد معلومات أكثر تفصيلاً عن أنشطة الوكالة بشأن دورة الوقود في الأقسام ذات الصلة من آخر تقرير سنوي للوكالة (الموقع http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2011) وفي الموقع www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

شكل يورانيوم في ماء البحر. وقليلة جداً هي البلدان التي تُبلِّغ في الوقت الراهن عن الموارد غير التقليدية. والأرقام التقديرية الحالية لليورانيوم الممكن استخلاصه المقترن بأنواع الفوسفات والخامات غير الحديدية والكربوناتيت والشست الأسود والليغنيت، تبلغ حوالي ٨ مليون طن من اليورانيوم. وقد أعلنت شركة Uranium Equities Limited أن من المتوقع أن يشهد شهر أيار/مايو ٢٠١٢ انطلاق عملية الإنتاج في مصنعها التجريبي لاستعادة اليورانيوم من الحمض الفوسفوريك باستخدام تقنية تبادل الأيونات. وفي حال تكللت التقنية بالنجاح، يتوقع أن يبدأ الإنتاج التجاري في حوالي عام ٢٠١٥.

٢٠- وقُدِّر حجم الموارد العالمية من الثوريوم بما بين ٦ و٧ مليون طن. ورغم استخدام الثوريوم كوقود للأغراض الإيضاحية، فإن الطريق لا يزال طويلاً قبل أن يمكن النظر إليه على قدم المساواة مع اليورانيوم. وفي الهند، شهد عام ٢٠١١ استهلال عملية اختيار موقع مفاعل الماء الثقيل المتقدّم التجريبي المخطط له في البلد بقدرة ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي). ويتوقع أن يصبح المفاعل قيد التشغيل بحلول عام ٢٠٢٠. بيد أنه لا يتوقع أن يبدأ التسويق الكامل لمفاعلات الماء الثقيل المتقدمة التجريبية قبل عام ٢٠٣٠.

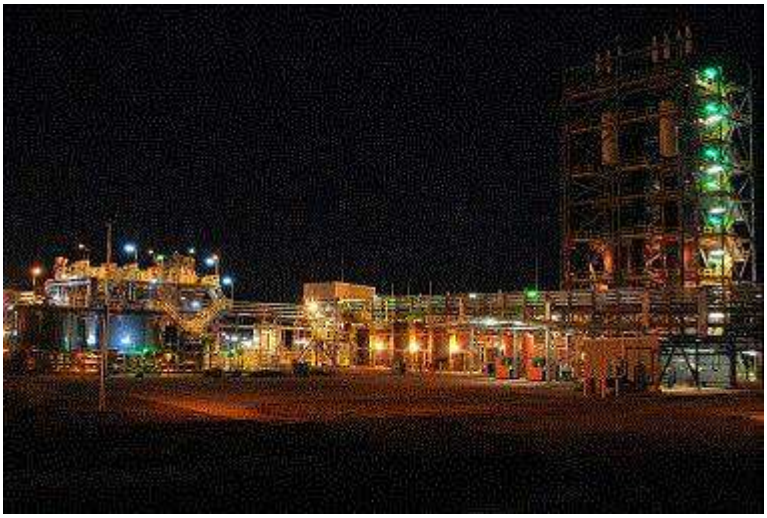
٢١- ولا تتضمن البيانات الواردة في الكتاب الأحمر، بشأن النفقات المرتبطة بالتنقيب وبتطوير المناجم على صعيد العالم، سوى الفترة حتى نهاية عام ٢٠١٠. وقد بلغ مجموعها ٢,٠٧٦ بليون دولار في عام ٢٠٠٨، بزيادة قدرها ٢٢ ٪ مقارنةً بأرقام عام ٢٠٠٨ الواردة في طبعة الكتاب الأحمر السابقة.

٢٢- وفي عام ٢٠١٠، تجاوز الإنتاج العالمي لليورانيوم ٥٤٦٧٠ طناً من اليورانيوم، أي بزيادة نسبتها ٦٪ مقارنةً بكمية ٥١٥٢٦ طناً من اليورانيوم تم إنتاجها في عام ٢٠٠٩. ويتوقع أن يشهد إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠١١ ارتفاعاً ليصل إلى حوالي ٥٧٢٣٠ طناً من اليورانيوم. واستحوذت أستراليا وكازاخستان وكندا على ما نسبته ٦٢٪ من الإنتاج العالمي في عام ٢٠١٠، فيما استحوذت هذه البلدان الثلاثة، مع الاتحاد الروسي وأوزبكستان وناميبيا والنيجر والولايات المتحدة الأمريكية، على ٩٢٪ من إجمالي الإنتاج. وفي كازاخستان، شهد إنتاج اليورانيوم ارتفاعاً في عام ٢٠١٠ بنسبة فاقت ٢٧٪ بالمقارنة مع العام المنصرم، ليصبح هذا البلد، وللسنة الثانية على التوالي، أكبر منتج عالمي لليورانيوم على الإطلاق (متقدّماً من المركز الخامس في عام ٢٠٠٣ والمركز الثاني في عام ٢٠٠٨). وفضلاً عمّا تقدّم، من المتوقع أن يكون إجمالي إنتاج اليورانيوم في كازاخستان قد ارتفع بنسبة ١٢٪ في عام ٢٠١١ مقارنة بما كان عليه في عام ٢٠١٠.

٢٣- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١١، تم التبليغ عن الإنتاج التجاري للمرة الأولى في منجم النض[٧] الموقعي القائم في هانيمون بأستراليا. وعندما يبلغ المنجم حالة التشغيل التام، يتوقع أن تبلغ قدرته ٤٠٠ طن من اليورانيوم في السنة (٢٧٥ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٢). وفضلاً عن ذلك، فقد حصل موقع أولمبيك دام، وهو مركز للتعدين في جنوب أستراليا، على الموافقة البيئية الخاصة بمشروع توسيعه، وينص هذا المشروع على إنشاء حفرة مفتوحة جديدة بمحاذاة المنجم الجوفي القائم. وسيرفع المشروع قدرة المنجم السنوية من القيمة الحالية البالغة ٣٨٠٠ طن من اليورانيوم إلى ١٩٠٠٠ طن من اليورانيوم. وفضلاً عن ذلك، فقد استهل منجم أزيليك لليورانيوم في النيجر العمليات التجريبية في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، ويتوقع أن يبلغ، في عام ٢٠١٢، قدرته الإنتاجية القصوى البالغة ٧٠٠ طن من اليورانيوم في السنة.

---

[٧] ينطوي التعدين التقليدي على إزالة الخام من الأرض، ومن ثم معالجته لإزالة المعدنيات المنشودة. وينطوي النض الموقعي على ترك الخام حيث هو في الأرض واستخلاص المواد المعدنية عن طريق إذابتها باستخدام محلول للنض وشفط المحلول الخصب إلى السطح حيث يمكن استخراج المواد المعدنية من المحلول. ويؤدي ذلك إلى الحد من البعثرة السطحية كما يؤدي إلى عدم توليد أي مخلّفات أو صخور نفايات.



الشكل ألف-٣ . بدأ منجم هانيمون لليورانيوم في أستراليا مرحلة الإنتاج التجاري في أيلول/سبتمبر ٢٠١١ .

٢٤- لم يغطِّ إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠١٠ سوى نحو ٨٥٪ من احتياجات المفاعلات المقدّرة في العالم والتي بلغت ٦٣٨٧٥ طناً من اليورانيوم. وتمت تغطية الكمية المتبقية بواسطة خمسة مصادر ثانوية، هي: مخزونات اليورانيوم الطبيعي العسكرية، ومخزونات اليورانيوم المثرى، واليورانيوم الذي تعاد معالجته من الوقود المستهلك، ووقود مزيج الأكسيدين (موكس) مع الاستعاضة عن جزء من اليورانيوم-٢٣٥ بالبلوتونيوم-٢٣٩ من الوقود المستهلك المعادة معالجته، وإعادة إثراء مخلفات اليورانيوم المستنفد (اليورانيوم المستنفد يحتوي على أقل من ٠,٧٪ من اليورانيوم-٢٣٥). واستناداً إلى معدل الاستهلاك المقدّر لعام ٢٠١٠، يتوقع أن تكفي كمية اليورانيوم الممكن استخلاصه من موارد تقليدية معروفة بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم – والبالغة ٥,٣ مليون طن من اليورانيوم – لحوالي ٨٠ عاماً. ويرجّح ذلك كفاية موارد اليورانيوم لدى مقارنتها بالاحتياطيات الكافية لما بين ٣٠ و٥٠ عاماً بالنسبة لسلع أخرى (مثل النحاس والزنك والنفط والغاز الطبيعي).

٢٥- واستناداً إلى التوقعات المتاحة في عام ٢٠١٠، يتوقع أن ترتفع الاحتياجات العالمية السنوية من اليورانيوم لأغراض مرتبطة بالمفاعلات لتصل إلى ما بين ٩٧٦٤٥ و١٣٦٨٣٥طناً من اليورانيوم بحلول عام ٢٠٣٥. ويمكن لقدرات إنتاج اليورانيوم الأولية المتوقعة حالياً، بما يشمل مراكز الإنتاج القائمة والملتزم بها والمخطط لها والممكنة، أن تلبي الطلب العالمي المتوقع على اليورانيوم حتى عام ٢٠٢٨ في حال الحاجة إلى الكمية القصوى المذكورة، أو حتى عام ٢٠٣٥ في حال الحاجة إلى الكمية الدنيا.

ألف-٣-٢- التحويل والإثراء وصنع الوقود

٢٦- تقوم ستة بلدان (الاتحاد الروسي والصين وفرنسا وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية) بتشغيل مصانع تجارية الحجم لتحويل ثُماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) إلى سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6)، كما أن ثمة مرافق تحويل صغيرة قيد التشغيل في كل من الأرجنتين وباكستان واليابان. وتتفرّد الولايات المتحدة الأمريكية باستخدام عملية جافة لتطاير الفلوريد، فيما تستخدم جهات التحويل الأخرى كلها عملية رطبة. وبقيت القدرة التحويلية العالمية الإجمالية على حالها عند نحو ٧٥٠٠٠ طن من اليورانيوم الطبيعي (طن من اليورانيوم على شكل سادس فلوريد اليورانيوم) في السنة. بيد أنه يتوقع أن يشهد هذا المجال تغييرات جوهرية في فرنسا (مصنع Comurhex II التابع لشركة أريفا) وفي الولايات المتحدة الأمريكية (مصنع

Honeywell Metropolis Works). ويتراوح الطلب الإجمالي الحالي على خدمات التحويل (على افتراض أن نسبة إثراء المخلفات تبلغ ٠,٢٥٪ من اليورانيوم–٢٣٥)[٨] ما بين ٥٩٠٠٠ و٦٥٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة.

٢٧- وتبلغ قدرة الإثراء الإجمالية العالمية حالياً نحو ٦٥ مليون وحدة فصل في السنة، مقارنة بطلب إجمالي قدره نحو ٤٥ مليون وحدة فصل في السنة. ويجري تشغيل مصانع تجارية الحجم في كل من الاتحاد الروسي (روزاتوم)، والصين (برعاية الشركة الوطنية النووية الصينية)، وفرنسا (أريفا)، والولايات المتحدة الأمريكية (مؤسسة USEC ومجموعة URENCO). وتشغّل مجموعة URENCO محطات للطرد المركزي في كل من ألمانيا والمملكة المتحدة وهولندا والولايات المتحدة الأمريكية. كما أن هناك مرافق إثراء صغيرة في كل من الأرجنتين وباكستان والبرازيل وجمهورية إيران الإسلامية والهند واليابان.

٢٨- والعمل جارٍ على إنشاء مرفقين جديدين للإثراء التجاري يستخدمان تقنية الإثراء بالطرد المركزي، ويقع كلاهما في الولايات المتحدة الأمريكية، وهما: مرفق إيغل روك التابع لأريفا، ومحطة الطرد المركزي الأمريكية. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١، صدرت رخصة إنشاء مرفق إيغل روك للإثراء التابع لأريفا.

٢٩- وانكبّت الأرجنتين على الاضطلاع بأعمال البحث والتطوير بشأن تكنولوجيات جديدة في ميدان الإثراء، مثل الإثراء بالطرد المركزي والإثراء بالليزر، فيما تعمل في الوقت ذاته على إعادة بناء قدراتها في ميدان الانتشار الغازي في موقع بيلكانيو.

٣٠- وتتوقع الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي الشروع في التشغيل التجاري لسلاسل الطرد المركزي التعاقبية المحسّنة في قرية روكاشو، بإقليم أوموري، في عام ٢٠١٢، كما تتوقع توسيع القدرة الحالية البالغة ١٥٠٠٠٠ وحدة فصل في السنة لتصل إلى ١,٥ مليون وحدة فصل في السنة بحلول عام ٢٠٢٠. ومن المخطط له إنشاء مصنع جديد للإثراء في اليابان باستخدام تكنولوجيا الطرد المركزي الروسية، وذلك في إطار اتفاق مبرم بين روزاتوم وتوشيبا.

٣١- وفي حزيران/يونيه ٢٠١١، توصل ستة وأربعون بلداً من مجموعة الموردين النوويين إلى اتفاق بشأن صيغة جديدة لشروط التجارة العالمية الخاصة بإثراء اليورانيوم وإعادة معالجة الوقود المستنفد. وبمقتضى المبادئ الإرشادية الجديدة، يجب على البلدان التي ترغب في الحصول على التكنولوجيا النووية أن تفي بمجموعة من المتطلبات، بما يشمل: الامتثال التام لمعاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية (معاهدة عدم الانتشار)، وعدم إصدار الرقباء النوويين الدوليين أي معلومات عن أوجه قصور في ميدان الضمانات، والامتثال لاتفاقات ضمانات الوكالة، والتقيّد بمعايير الأمان الدولية.

٣٢- وفي عام ٢٠١١، بقيت القدرات العالمية الإجمالية الحالية في ميدان إعادة التحويل مستقرة عند نحو ٦٠٠٠٠ طن من سادس فلوريد اليورانيوم في السنة بعد أن دخلت ثلاثة مرافق لإعادة التحويل مرحلة التشغيل في عام ٢٠١٠ — اثنان منها في الولايات المتحدة الأمريكية (في كل من بادوكاه بولاية كنتاكي وبورتسموث بولاية أوهايو)، وواحد في الاتحاد الروسي (مرفق W-CEP في كراسنويارسك).

---

[٨] نسبة إثراء المخلفات، أو معدل تركيز اليورانيوم-٢٣٥ في الجزء المستنفد، تُحدِّد بشكل غير مباشر كمية العمل المطلوب على كمية معيّنة من اليورانيوم لضمان نسبة إثراء المنتج. ويؤدي الارتفاع في نسبة إثراء المخلفات مقترنة بكمية ثابتة وبنسبة ثابتة من اليورانيوم المثرى داخل المنتج إلى تخفيض كمية الإثراء اللازمة ولكنه يزيد المتطلبات فيما يخص اليورانيوم الطبيعي والتحويل، والعكس صحيح. وتتفاوت نسب إثراء المخلفات بشكل كبير وتؤثر بالتالي على الطلب على خدمات الإثراء.

٣٣- وبات هناك عدة مورّدين متنافسين لمعظم أنواع الوقود. وبقيت القدرة العالمية الإجمالية على صنع الوقود تناهز ١٣٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة (يورانيوم مثرى على شكل عناصر وقود وحزم وقود) لوقود مفاعلات الماء الخفيف، و٤٠٠٠ 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 في الأرجنتين ورومانيا والصين وكندا والهند. واستقر الطلب السنوي الحالي على خدمات تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف عند نحو ٧٠٠٠ طن من اليورانيوم المثرى في مجمّعات الوقود، ولكن يتوقع أن يرتفع إلى حوالي ٩٥٠٠ طن من اليورانيوم في السنة بحلول عام ٢٠٢٠. وكما بالنسبة إلى مفاعلات الماء الثقيل المضغوط، بلغت المتطلبات ٣٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة. ويجري العمل حالياً على توسيع المرافق القائمة في الصين كما أنه من المخطط إقامة مرافق تصنيع جديدة في كازاخستان وفي أوكرانيا. ومرفق التصنيع المخطط له في كازاخستان، بقدرة متوقعة تبلغ ١٢٠٠ طن من اليورانيوم في السنة، هو مشروع مشترك بين شركة أريفا وشركة كازاتومبروم، ويتوقع استكماله في عام ٢٠١٤.

٣٤- وتوفّر عمليات إعادة التدوير إمداداً ثانوياً بالوقود النووي من خلال استخدام اليورانيوم المعادة معالجته ووقود موكس. ويتم حالياً إنتاج حوالي ١٠٠ طن من اليورانيوم المعادة معالجته في السنة في إلكتروستال، الاتحاد الروسي، لحساب أريفا. وقد تم الترخيص لأحد خطوط الإنتاج في مصنع أريفا القائم في رومان بفرنسا لتصنيع ١٥٠ طناً من اليورانيوم المعادة معالجته إلى وقود في السنة وقد سُلِّمت بالفعل مجمعات وقود لمفاعلات الماء المضغوط إلى مفاعلات في كل من بلجيكا وفرنسا والمملكة المتحدة.

٣٥- وتبلغ القدرة الحالية على صنع وقود موكس حوالي ٢٥٠ طناً من الفلز الثقيل، وتقع المرافق الرئيسية في فرنسا والهند والمملكة المتحدة مع وجود بعض المرافق الأصغر حجماً في الاتحاد الروسي واليابان. وفي اليابان، تعكف الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي على بناء مرفق جديد لصنع وقود موكس (١٣٠ طناً من وقود موكس بالفلزات الثقيلة) في روكاشو، ويتوقع استكماله في آذار/مارس ٢٠١٦. وفي الاتحاد الروسي، يجري العمل على بناء مرفق لصنع وقود موكس للمفاعل السريع طراز BN-800 في زيليزنوغورسك (Krasnoyarsk-26). كما يملك الاتحاد الروسي مرفقين تجريبيين، أحدهما في ديميتروفغراد ضمن معهد بحوث المفاعلات النووية، والثاني في أوزيرسك ضمن محطة مایاك. وفي المملكة المتحدة، يضاف حالياً مرفق جديد لتصنيع وقود موكس إلى مصنع سيلافيلد لإنتاج وقود موكس، وذلك لإتاحة الوفاء بالعقود الجديدة الطويلة الأمد للإمداد بهذا الوقود. كما تعكف الولايات المتحدة الأمريكية على بناء مرافق إضافية لتصنيع وقود موكس بغية استخدام الكميات الفائضة من البلوتونيوم الصالح للاستعمال في صنع الأسلحة. ويُستخدم وقود موكس حالياً في ٣٢ مفاعلاً حرارياً عبر العالم.

ضمان الإمداد

٣٦- أنشئ، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، في المركز الدولي لإثراء اليورانيوم في أنغارسك بالاتحاد الروسي، أول احتياطي عالمي من اليورانيوم الضعيف الإثراء تحت رعاية الوكالة. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، تحقق مفتشو ضمانات الوكالة من احتياطي اليورانيوم الضعيف الإثراء المكوّن من ١٢٠ طناً من اليورانيوم الضعيف الإثراء، علماً بأن نسبة إثراء ثلث هذه المواد تبلغ ٤,٩٥٪. واحتياطي اليورانيوم الضعيف الإثراء، الذي تقدّر قيمته الحالية بأكثر من ٣٠٠ مليون دولار، متاح للدول الأعضاء في الوكالة التي تعاني من إعاقة إمداداتها من اليورانيوم الضعيف الإثراء لأسباب غير مرتبطة باعتبارات تقنية أو تجارية. وستزوّد الوكالة

الدول الأعضاء المؤهّلة باليورانيوم الضعيف الإثراء لأغراض توليد القوى النووية بأسعار السوق، وتستخدم العائدات المحققة لتجديد مخزون اليورانيوم الضعيف الإثراء. ويتحمل الاتحاد الروسي كلفة اليورانيوم الضعيف الإثراء المخزون، بالإضافة إلى تكاليف الصيانة والأمان والأمن والضمانات. وقد بدأ، في ٣ شباط/فبراير ٢٠١١، نفاذ الاتفاق المعقود بين حكومة الاتحاد الروسي والوكالة بشأن إقامة احتياطي مادي لليورانيوم الضعيف الإثراء على أراضي الاتحاد الروسي وإمداد الوكالة باليورانيوم الضعيف الإثراء منه لفائدة الدول الأعضاء في الوكالة، وكان هذا الاتفاق قد وُقِّع في فيينا بتاريخ ٢٩ آذار/مارس ٢٠١٠. وقد بات احتياطي اليورانيوم الضعيف الإثراء الموجود في أنغارسك متاحاً للدول الأعضاء في الوكالة منذ ذلك التاريخ.

٣٧- وفي آذار/مارس ٢٠١١، وافق مجلس المحافظين على اقتراح لضمان توريد خدمات الإثراء واليورانيوم الضعيف الإثراء لاستخدامه في محطات القوى النووية قدّمته المملكة المتحدة، وشاركت في رعايته الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي والولايات المتحدة الأمريكية. وقد أدى ذلك إلى وضع مسودة 'اتفاق نموذجي لضمان الوقود النووي' يمكن بموجبها لدولةٍ تورِّد اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تقدّم خدمات الإثراء أن توافق على عدم الكف عن عمليات التوريد إلى الجهات المتلقية التي تمتثل لالتزاماتها الدولية ولمعايير الترخيص بالتصدير المنشورة. وكانت المملكة المتحدة قد تقدّمت بهذا العرض أصلاً في عام ٢٠٠٧، وقد تواصل تطويره خلال عام ٢٠٠٩.

٣٨- وفضلاً عن ذلك، فقد وافق مجلس المحافظين، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، على إنشاء مصرفٍ لليورانيوم الضعيف الإثراء، أي مخزون مادي من اليورانيوم الضعيف الإثراء يخضع لولاية الوكالة وتحكمها. والغرض من إنشاء مصرف اليورانيوم الضعيف الإثراء هذا هو لاستخدامه كآليةٍ لدعم السوق التجارية من دون الإخلال بها، وذلك في حال إعاقة إمداد إحدى الدول الأعضاء باليورانيوم الضعيف الإثراء وعدم التمكن من استعادة هذا الإمداد بالوسائل التجارية، شرط أن تفي الدولة المعنية بمعايير الأهلية التي حدّدها المجلس. وخلال عام ٢٠١١، واصلت أمانة الوكالة العمل على وضع الترتيبات الإدارية والمالية والقانونية والتقنية الضرورية. وفي أيار/مايو ٢٠١١، عمّمت الوكالة معايير اختيار الدولة المضيفة التي لديها موقع ملائم لاستضافة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء ودعت الدول الأعضاء إلى الإعراب عن اهتمامها باستضافة المصرف المذكور. وكانت كازاخستان هي الدولة العضو الوحيدة التي أعربت رسمياً عن اهتمامها وقد قبلت الوكالة عرض كازاخستان لاستضافة المصرف في محطة أولبا التعدينية. واستُهلت في عام ٢٠١٢ المفاوضات الرسمية بشأن اتفاق الدولة المضيفة، وقامت فرق الوكالة بزيارة موقع أولبا في عام ٢٠١٢ لإجراء تقييمات مفصّلة للمتطلبات الخاصة بعمليات الارتقاء بنظم الأمان والأمن. ووردت تعهّدات فاقت قيمتها ١٥٠ مليون دولار من جانب الدول الأعضاء والاتحاد الأوروبي والمبادرة المعنية بالتهديد النووي لإنشاء مصرف اليورانيوم الضعيف الإثراء. وبنهاية عام ٢٠١١، كانت القيمة الكاملة للتعهدات قد سددت بواسطة النرويج (٥ ملايين دولار) والولايات المتحدة (٥٠ مليون دولار تقريباً) والمبادرة المعنية بالتهديد النووي (٥٠ مليون دولار)؛ وقد سدد الاتحاد الأوروبي ١٠ ملايين يورو من أصل تعهّده بسداد ٢٥ مليون يورو، كما استمر العمل على استكمال الترتيبات مع الكويت (١٠ ملايين دولار) والإمارات العربية المتحدة (١٠ ملايين دولار).

٣٩- ولن تتضرر حقوق الدول الأعضاء، بما فيها حق إقامة أو توسيع قدراتها الإنتاجية الخاصة في ميدان دورة الوقود النووي، كما أنها لن تتعرّض للتقويض أو التقليص، بأي شكل من الأشكال، نتيجة إنشاء هذه الآليات لضمان الإمداد.

٤٠- وفي آب/أغسطس ٢٠١١، بات النظام الأمريكي لضمان الإمداد بالوقود متاحاً أيضاً في الولايات المتحدة الأمريكية. وهو يتضمن ٢٣٠ طناً من اليورانيوم الضعيف الإثراء المثرى بنسبة ٤,٩٥٪.

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

٤١- شهد عام ٢٠١١ تفريغ ١٠٥٠٠ طن من الفلزات الثقيلة على شكل وقود مستهلك من كافة مفاعلات القوى النووية. ويشار إلى أن الكمية الإجمالية التراكمية للوقود المستهلك التي أفرغت على صعيد العالم حتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١ تناهز ٣٥٠٥٠٠ طن من الفلزات الثقيلة، ويخزن حوالي ٢٤٠٠٠٠ طن منها في مرافق خزن قائمة في محيط المفاعلات أو بعيداً عنها. والكميات التي تمت معالجتها لا تتجاوز ثلث الكمية التراكمية من الوقود المستهلك المفرّغ عالمياً، أي حوالي ١٠٠٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة. وفي عام ٢٠١١، بلغت قدرة إعادة المعالجة التجارية العالمية – المنتشرة في أربعة بلدان (الاتحاد الروسي وفرنسا والمملكة المتحدة والهند) – حوالي ٤٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة في السنة.

٤٢- وبحلول أواسط عام ٢٠١١، كانت الصين قد أكملت الاختبار البارد لمحطتها التجريبية لإعادة المعالجة بقدرة ٥٠ طن من الفلزات الثقيلة في السنة، كما كانت قد أكملت ٥٪ من عملية الاختبار الساخن (٥٪ محلول الوقود المستهلك + ٩٥٪ محلول محاكاة). وتتواصل أعمال البحث والتطوير لتوفير الدعم التقني لضمان استقرار عمليات المحطة التجريبية لإعادة المعالجة. وتخطط الصين أيضاً لإنشاء مرفق لإعادة المعالجة التجارية والعمل جارٍ على عملية اختيار الموقع. وفضلاً عن ذلك، فقد استكملت، في محطة كينشان للقوى النووية، عملية إيضاح الاستخدام المباشر لليورانيوم المعاد تدويره كوقود في مفاعل من طراز كاندو. وقد شهدت الوحدة ١ من محطة كينشان، في عامي ٢٠١٠ و٢٠١١، تشعيع ٢٤ حزمة وقود لمفاعلات كاندو مكوّنة من ٣٧ عنصر وقود تحتوي على مكافئ اليورانيوم الطبيعي المصنوع عن طريق مزج يورانيوم أعيدت معالجته بيورانيوم مستنفد.

٤٣- ويتواصل في الهند بناء مرفق دورة وقود المفاعلات السريعة في كالباكام. ويضم المرفق محطة لتصنيع الوقود وإعادة المعالجة، ومصنعاً للمجمعات الفرعية الخاصة بقلوب المفاعلات، ومحطة لأكسيد اليورانيوم المعادة معالجته، ومحطة للتصرف في النفايات وكلها معدّة لخدمة المفاعل النموذجي السريع التوليد المقبل بقدرة ٥٠٠ ميغاواط(كهربائي).

٤٤- وفي اليابان، كان بناء محطة إعادة المعالجة التجارية بقدرة ٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة في السنة في روكاشو قد شارف على الانتهاء عندما تم تعليق العمل نتيجة للزلزال والتسونامي اللذين ضربا البلد في ١١ آذار/مارس ٢٠١١.

ألف-٣-٤- التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة

٤٥- بلغ الرصيد العالمي من النفايات المشعة التي تم التبليغ عن تخزينها في نهاية عام ٢٠١٠ (وهو آخر عام تتوافر بشأنه بيانات) ما يناهز ٦١,٤ مليون متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصير العمر[٩]، و١٣,٩ مليون متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويل العمر، و٤٢٣٠٠٠ متر مكعب من النفايات القوية الإشعاع (انظر الجدول ألف-٢).

---

[٩] تعزى الزيادة الظاهرة في خزن النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصير العمر منذ صدور *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١* إلى إدراج بيانات جديدة حول خزن النفايات المشعة الضعيفة الإشعاع السائلة.

الجدول ألف-٢- التقديرات العالمية لرصيد النفايات المشعة في عام ٢٠١٠ (آخر عام تتوافر بشأنه بيانات)[١٠].

فئة النفايات[١١]	**خزن**[١٢] (متر مكعب)	**تخلص تراكمي** (متر مكعب)
نفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع القصير العمر	٦١ ٣٨١ ٠٠٠	٢٤ ٧٢٠ ٠٠٠
نفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع الطويل العمر	١٣ ٩٠١ ٠٠٠	٦٢٥ ٠٠٠
نفايات قوية الإشعاع	٤٢٣ ٠٠٠	٤ ٠٠٠

المصدر: قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة (٢٠١١)، ومراجع أخرى.[١٣]

٤٦- وشملت عمليات التخلص التراكمي من النفايات المشعة، حتى نهاية عام ٢٠١٠، ما يناهز ٢٤,٧ مليون متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصير العمر؛ و٦٢٥٠٠٠ متر مكعب من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويل العمر؛ والتخلص من حوالي ٤٠٠٠ متر مكعب من النفايات القوية الإشعاع الآتية بشكل رئيسي من تشرنوبل. وتدنّي معدل التخلص مقابل الخزن بالنسبة للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويل العمر والنفايات القوية الإشعاع يعكس القصور العام في قدرات التخلص بالنسبة لهاتين الفئتين من النفايات على الصعيد العالمي.

---

[١٠] الأرقام الواردة في الجدول ألف-٢ تقديرية وينبغي عدم الإخطاء باعتبارها حصراً دقيقاً لمخزونات النفايات المشعة التي يجري التصرف فيها على صعيد العالم. وفضلاً عن الفوارق المعتادة التي يمكن أن تبرز بين الكميات المخزونة المقدّرة من عام لآخر نتيجة للتغيّرات في كتلة النفايات وحجمها خلال عملية التصرف في النفايات، تشهد الكمية الإجمالية من النفايات المحصورة تزايداً متواصلاً نتيجة إضافة المزيد من الدول الأعضاء إلى قاعدة بيانات الوكالة الخاصة بالتصرف في النفايات المتاحة على الشبكة، ونتيجة توفير هذه الدول لبيانات مفقودة، بما فيها البيانات المتعلقة بسنوات ماضية.

[١١] يتم حالياً التبليغ عن الأرصدة في قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة بناء على التوصيات بشأن تصنيف النفايات كما وردت في دليل الأمان المعنون *تصنيف النفايات* المشعة (العدد 111-G-1.1 من سلسلة وثائق الأمان الصادرة عن الوكالة، فيينا، ١٩٩٤). وقد استعيض عن تلك التوصيات بمخططِ تصنيفٍ جديدٍ يرد في دليل الأمان العام المعنون تصنيف النفايات المشعة (العدد GSG-1 من *سلسلة معايير أمان الوكالة*، فيينا، ٢٠٠٩). ويجري حالياً تحويل البيانات الواردة في قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة إلى مخطط التصنيف الجديد.

[١٢] تعالج النفايات وتُكيّف وتخضع لإجراءات مناولة متنوعة قبل خزنها أو التخلص منها. لذلك فإن كتلة النفايات المشعة وحجمها يشهدان تغيّرات متواصلة خلال عملية التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها. وقد يؤدي ذلك إلى بروز فوارق في تقديرات الكميات المخزونة من عام لآخر.

[١٣] تشمل المصادر، بالإضافة إلى قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة، التقارير الوطنية المتاحة علناً والمقدّمة إلى الاتفاقية المشتركة بشأن أمان التصرف في الوقود المستهلك وبشأن أمان التصرف في النفايات المشعة، وغيرها من البيانات المنشورة.

٤٧- وتنتشر في كافة أنحاء العالم مرافق قيد التشغيل أو قيد التطوير للتخلص من جميع فئات النفايات المشعة. وتشمل الخيارات المتاحة استخدام الخنادق للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً (إسبانيا وسلوفاكيا والسويد وفرنسا)، ومن نفايات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية (الجمهورية العربية السورية وماليزيا)، ومن النفايات الضعيفة الإشعاع في المناطق القاحلة (جمهورية إيران الإسلامية وجنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ واستخدام هياكل اصطناعية قريبة من سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (إسبانيا وبلجيكا وبلغاريا والجمهورية التشيكية ورومانيا وسلوفاكيا وسلوفينيا وفرنسا وليتوانيا والمملكة المتحدة والهند واليابان)؛ واستخدام مستودعات متوسطة العمق للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (الجمهورية التشيكية وجمهورية كوريا والنرويج وهنغاريا واليابان) ومن نفايات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية (النرويج)؛ واستخدام حفر الدفن للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (الولايات المتحدة الأمريكية) ومن المصادر المشعة المختومة المهملة (غانا والفلبين وماليزيا)؛ واستخدام المرافق الجيولوجية العميقة المخصصة للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية) والنفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك (السويد وفرنسا وفنلندا).

٤٨- تنوي بلجيكا التخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصير العمر في مرفق للتخلص السطحي ضمن نطاق بلدية ديسل. وقد استهلت الوكالة البلجيكية للنفايات المشعة والمواد الانشطارية المخصبة حالة أمانٍ انطوت، في عام ٢٠٠٩، على تقييم للأثر البيئي سيستكمل في عام ٢٠١٢. وستقدّم الوكالة المذكورة بعدئذٍ طلباً للحصول على رخصة بناء وتشغيل. ومن المتوقع أن يصبح المرفق قيد التشغيل في عام ٢٠١٦.

٤٩- وفي بلغاريا، افتُتح مرفق لخزن الوقود المستهلك رسمياً في أيار/مايو ٢٠١١ داخل محطة كوزلودوي للقوى النووية.

٥٠- وفي كندا، قدّمت شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء رسمياً، في نيسان/أبريل ٢٠١١، بياناً بشأن الأثر البيئي ومجموعة الوثائق النهائية اللازمة لرخصة إعداد موقع وبناء مستودع جيولوجي عميق للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع على مقربة من موقع بروس النووي. ويجري في الوقت الحاضر تنفيذ دراسة جدوى لتقييم مدى ملاءمة موقع مختبرات تشولك ريفر لاستضافة مرفق للتصرف الجيولوجي في النفايات، وهو كناية عن مستودع يقع مبدئياً على عمق ٥٠٠ م يُقترح استخدامه لعزل واحتواء النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع الناتجة عن موقع مختبرات تشولك ريفر المذكور.

٥١- وفي الدنمارك، تم تعيين ستة أماكن محتملة لاستضافة مستودع للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع المولّدة في البلد، وذلك في إطار دراسة عُرضت على الحكومة في أيار/مايو ٢٠١١.

٥٢- وفي فرنسا، سيشهد عام ٢٠١٢ انطلاق مرحلة التصميم الصناعي لمشروع سيجيو Cigéo الرامي إلى التخلص من النفايات العالية الإشعاع الناتجة بشكل خاص عن محطات القوى النووية وعن إعادة معالجة وقودها المستهلك.

٥٣- وفي أولكيلووتو بفنلندا، تعكف شركة بوسيفا للتصرف في النفايات النووية على بناء مرفق أونكالو الجوفي لتحديد خصائص الطبقات الصخرية، الذي وصل إلى عمق التخلص النهائي في عام ٢٠١٠. وتنوي بوسيفا أن تقدّم طلب رخصة بناء مستودع في هذا الموقع إلى الحكومة الفنلندية في نهاية عام ٢٠١٢ بحيث تبدأ أعمال التخلص النهائي في عام ٢٠٢٠.

٥٤- وفي غانا، دُشِّن مرفق للتخلص من النفايات المشعة لدى هيئة الطاقة الذرية في غانا بمدينة أكرا لغرض الخزن المأمون والآمن للمصادر المشعة التي لم تعد صالحة أو لازمة.

٥٥- وفي ألمانيا، استؤنفت في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠ الاستقصاءات في منجم غورليبن للتنقيب، بوصفه موقعاً محتملاً للتخلص من النفايات القوية الإشعاع/الوقود النووي المستهلك، وذلك بعد فترة توقف استمرت عشر سنوات. وتضطلع بهذه الاستقصاءات شركة DBE. وتتكفّل الشركة أيضاً بالجهود الجارية لإعادة بناء منجم كونراد وتحويله إلى مستودع وطني للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع. وسيقع هذا المرفق على عمق يتراوح بين ١٠٠٠ و١١٠٠ متر تحت سطح الأرض ومن المتوقع أن يبدأ تشغيله في عام ٢٠١٩. وفي شباط/فبراير ٢٠١١، استكملت أعمال ردم الجزء الأوسط من المرفق. وقدّمت شركة BfS، وهي مالكة رخصة مستودع مورزليبن، طلباً للحصول على رخصة إغلاق المستودع.

٥٦- وتشرف الشركة العمومية المحدودة للتصرف في النفايات المشعة في هنغاريا على استكمال بناء مستودع جوفي (على عمق حوالي ٢٠٠ م) في باتاباتي للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الناتجة عن محطات القوى النووية. وفيما باتت مساحة الخزن في الجزء السطحي من المرفق قيد التشغيل، يتوقع أن يدخل مرفق التخلص في الخدمة في عام ٢٠١٢. ومن المتوقع استكمال مجمّع مماثل للتخلص في غيونغجو بجمهورية كوريا في عام ٢٠١٢. وقد بدأ تشغيل الجزء المخصص للخزن من المرفق في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠.

٥٧- وفي ليتوانيا، أصدرت هيئة التفتيش الحكومية المعنية بأمان القوى النووية رخصةً لمحطة إيغنالينا للقوى النووية من أجل بناء مرافق لاستعادة النفايات المشعة الصلبة وإخضاعها للمعالجة التمهيدية.

٥٨- وفي روسيا، بدأ في عام ٢٠٠٣ تشييد مرفق جديد من مرافق الخزن الجاف للوقود المستهلك ضمن مجمّع زيليزنوغورسك لكيميائيات التعدين في منطقة كراسنويارسك. وقد استُكمل في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١ تشييد المرحلة الأولى من المرفق وهي قادرة على استيعاب ٨١٠٠ طن من الوقود المستهلك الناتج عن المفاعلات العالية القدرة المزودة بقنوات.

٥٩- وفي ١٦ آذار/مارس ٢٠١١، قدّمت الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية طلباً إلى السلطات للحصول على رخصة لبناء مرفق تخلص نهائي من الوقود النووي السويدي في فورسمارك الواقعة ضمن نطاق بلدية أوستهامار، ومحطة للتغليف في أوسكارشامن. وبحسب تقدير الشركة المذكورة، يجوز أن تبدأ عمليات التشغيل بحلول عام ٢٠٢٥.

٦٠- وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١، افتتح مرفق جديد للتخلص من النفايات المشعة قرب مقاطعة آندروز بتكساس في الولايات المتحدة الأمريكية. وتشغّل المرفق شركة Waste Control Specialists؛ ويضم المرفق خنادق ترابية ضحلة مرخّصة لاستقبال نفايات ضعيفة الإشعاع من الفئات ألف وباء وجيم.

٦١- وفي الولايات المتحدة الأمريكية أيضاً، أصدرت لجنة الشريط الأزرق المعنية بالمستقبل النووي الأمريكي، المنشأة في كانون الثاني/يناير ٢٠١٠، مسودة توصيات خاصة بصوغ حل طويل الأمد للتصرف في

ما تخلّفه الولايات المتحدة الأمريكية من وقود نووي مستهلك ونفايات نووية في تموز/يوليه ٢٠١١.[١٤] وقد صدر التقرير النهائي في كانون الثاني/يناير ٢٠١٢.

٦٢- وفي ١٩ تموز/يوليه ٢٠١١، أقرّ مجلس الاتحاد الأوروبي توجيهاً صادراً عن المجلس (الوثيقة 2001/70/EURATOM) بشأن التصرّف المسؤول والمأمون بالوقود المستهلك والنفايات المشعة، واعتمد هذا التوجيه مجموعة من المعايير المتجانسة المطبقة على الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي، بالاستناد إلى معايير الوكالة الخاصة بالتصرف في النفايات والتخلص منها. وينطوي التوجيه على إلزام الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي بإقامة برامج وطنية وتعهدها تشمل، ضمن جملة أمور، المفاهيم أو الخطط والحلول التقنية للتصرف في الوقود المستهلك وفي النفايات المشعة من لحظة توليدها إلى حين التخلص منها. وعلى الدول الأعضاء أن تبلغ المفوضية الأوروبية ببرامجها الوطنية وأن تقدّم التقارير إلى المفوضية بشأن تنفيذ التوجيه في موعد أقصاه ٢٣ آب/أغسطس ٢٠١٥ ومرة كل ثلاث سنوات بعد ذلك.

٦٣- ولا يزال التصرف المأمون والآمن في المصادر العالية النشاط يثير صعوبات كبيرة نتيجة للقيود الهائلة، لا سيما المالية منها، التي تحول دون التمكن بسهولة من إعادتها إلى بلد المنشأ عند انتهاء عمرها التشغيلي. وقد نُفّذ عدد من العمليات الناجحة الرامية إلى تكييف وإزالة المصادر المشعة المختومة المهملة من مباني الجهات المستخدمة وإخضاعها للتحكم إمّا من خلال نقلها إلى مرفق وطني لخزن النفايات المشعة أو، في بعض الحالات، نقلها إلى خارج البلد كلياً. ولم يعد لدى سنغافورة أي مصادر عالية النشاط مهملة ضمن أراضيها منذ أيلول/سبتمبر ٢٠١١، حين تمت إزالة آخر مصدر مشع عالي النشاط مختوم مهمل بغية إعادة تدويره. ونُفِّذ إجراء مماثل في مدغشقر حيث أعيد مصدر فرنسي المنشأ للعلاج عن بعد إلى فرنسا في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١.

النفايات المشعة الموروثة

٦٤- يُضطلع حالياً بأعمال هامة للتخلص من المواد النووية الموروثة عن حقبة الحرب الباردة. فمنذ ما يناهز خمسة عشر عاماً، برهن فريق خبراء الاتصال التابع للوكالة والمتعلق بالمشاريع الدولية للنفايات المشعة في الاتحاد الروسي عن كونه محفلاً مجدياً لتبادل المعلومات والتنسيق فيما بين برامج الإرث النووي في الاتحاد الروسي. وبحلول نهاية عام ٢٠١١، كان الاتحاد الروسي، بمساعدة هائلة من جانب شركاء فريق خبراء الاتصال المذكور، قد سحب الوقود من ١٩٦ من أصل ٢٠٠ غواصة تم إخراجها من الخدمة وقام بتفكيكها. ويتم حالياً ختم وحدات مفاعلات الغواصات التي أزيل وقودها، كما يتم وضعها في مرفق للخزن الطويل الأجل. وبات فريق خبراء الاتصال يعطي الأولوية القصوى للسحب المأمون للوقود النووي المستهلك والنفايات من قواعد بحرية سابقة. والعمل جارٍ على إنشاء مركزين إقليميين لتكييف النفايات المشعة وخزنها. ويجري العمل أيضاً على تنفيذ بنجاح برنامج دولي لاستعادة مولّدات كهربائية حرارية قوية تعمل بالنظائر المشعة كانت تستخدم لأغراض الملاحة (كبطاريات المنارات البحرية) على طول ساحل الاتحاد الروسي. وقد استعيدت غالبية مولّدات هذا البلد البالغ عددها ١٠٠٧ مولّدات، إذ لم يتبقَّ منها سوى ١١٩ مولّداً.

٦٥- وتضطلع حالياً كل من كندا (مختبرات تشولك ريفر النووية) والاتحاد الروسي (مايك والمجمع الكيميائي السيبيري) والولايات المتحدة الأمريكية (مختبر سافانا ريفر الوطني) بتنفيذ برامج واسعة النطاق لمعالجة النفايات الموروثة. وفي هانفورد بالولايات المتحدة الأمريكية، باتت عملية تشييد أكبر محطة لمعالجة

[١٤] للمزيد من المعلومات، يرجى زيارة الموقع الإلكتروني التالي: http://brc.gov/.

النفايات في العالم مكتملة بنسبة ٥٠٪ تقريباً. وتبلغ ميزانية المحطة ١٢ بليون دولار ويتوقع أن يبدأ تشغيلها في عام ٢٠١٩. وستقوم بمعالجة وتثبيت نحو ٢٠٠٠٠٠ متر مكعب من مجموعة من النفايات الموروثة الشديدة التنوّع عن طريق إخضاعها لمعالجة تمهيدية ومن ثم تزجيجها.

النفايات المشعة الناتجة عن الحادث الذي تعرضت له محطة فوكوشيما داييتشي

٦٦- لا تتطلب النفايات المشعة الناتجة عن الحادث الذي تعرضت له محطة فوكوشيما داييتشي التدابير على الأمد القصير التي أُتخذت في موقع محطة القوى النووية بعد الحادث فحسب، بل تتطلب أيضاً اتخاذ تدابير طويلة الأمد للتصرف في جميع النفايات على مدى عمرها التشغيلي، سواء كانت داخل الموقع أو خارجه.

٦٧- واستجابة لطلب قدّمته حكومة اليابان، نظمت الوكالة بعثة لتقصي الحقائق نُفِّذت في الفترة من ٧ إلى ١٥ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١ لدعم استصلاح المناطق الشاسعة الملوّثة خارج موقع محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وتمثلت أهداف البعثة في توفير المساعدة لليابان في خططها الرامية إلى استصلاح مناطق شاسعة تلوّثت من جراء الحادث؛ واستعراض استراتيجيات اليابان وخططها وأنشطتها في ميدان الاستصلاح، بما يشمل رسم خرائط التلوث؛ وإطلاع المجتمع الدولي على ما خلصت إليه من استنباطات ضمن إطار الجهد المشترك الرامي إلى النشر الواسع النطاق للدروس المستفادة من الحادث. وقد سلّط تقرير البعثة، الصادر في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١، الضوء على تسعة مجالات أحرز فيها قدر هام من التقدّم وقدّم المشورة بشأن اثنتي عشرة نقطة قد تحتاج إلى تحسين، بحسب وجهة نظر فريق البعثة. وتشمل المشورة تحسيناتٍ في الاستراتيجية والخطط وتقنيات معيّنة في ميدان الاستصلاح وهي تراعي، على حدّ سواء، المعايير الدولية والخبرات المستقاة من برامج استصلاحية في بلدان أخرى.

٦٨- وسيتطلب استصلاح الأراضي الملوّثة المحيطة بفوكوشيما إنشاءَ مرافق خزن تتسع لما يتراوح بين ١٥ و٢٨ مليون متر مكعب من النفايات. وتحتاج مرافق الخزن إلى مساحة تتراوح بين ٣ و٥ كلم مربع، كما يجب أن تكون جاهزة للاستعمال في غضون ٣ سنوات. وسيلزم النظر في خيارات التخلص النهائي من هذه النفايات في الوقت المناسب.

٦٩- وأدّى تراكم كميات كبيرة من المياه الملوّثة بالسيزيوم–١٣٤ والسيزيوم–١٣٧ في أقبية المفاعلات وأبنية التربينات والخنادق إلى وضع حرج نشأت عنه مخاطر فيضان وحصول تسرّبات إلى البيئة. وبالإضافة إلى الكميات الكبيرة المعنية، يكمن أحد التحديات الرئيسية التي تعيق معالجة هذه المياه الملوّثة في احتوائها على زيوت وعلى نسب تركيز عالية من أيونات الصوديوم الناتجة عن مياه البحر. وقد تضرّرت مرافق المعالجة القائمة وهي غير متاحة للاستخدام. وقد تمت السيطرة على الوضع عن طريق الإسراع في حشد الدعم المحلي والدولي لإقامة نظم معالجة كفؤة ذات إنتاجية عالية نجحت في معالجة أكثر من ١٥٠٠٠٠ متر مكعب من مياه الصرف. وقد استخدمت في المعالجة مجموعة متنوّعة من التكنولوجيات المركّبة على سقالات أفقية نقّالة، بما فيها التلبّد–الترسّب، وتبادل أيونات الزيوليت، والتناضح العكسي، والتبخّر. وقد أعيد بنجاح تدوير المياه المزال تلوثها والمحلاّة لتبريد قلوب المفاعلات المتضررة. وتتم أيضاً معالجة المياه الموجودة في أحواض خزن الوقود المستهلك الواقعة داخل المفاعلات عن طريق نشر نظم متحرّكة ذات قدرة أدنى. وتتركّز التحديات المستقبلية الناشئة عن هذا المجهود في التصرّف في الرواسب الطينية ذات النشاط الإشعاعي العالي وفي أعمدة الزيوليت المستهلك.

٧٠- وسيتطلب إفراغ الوقود من المفاعلات المتضررة استحداث أدوات خاصة ومعدات مناولة وحلول لمعالجة إشكالية النفايات المحتوية على عناصر ما وراء اليورانيوم. ويتوقع أن يستغرق استحداث الأدوات والطرائق اللازمة للتصرف في هذا النوع من النفايات بعض الوقت، وسيتطلب مستوى عالياً من الدراية العلمية.

الإخراج من الخدمة

٧١- شهدت إحصائيات إخراج مفاعلات القوى من الخدمة على الصعيد العالمي تغيّراً طفيفاً في عام ٢٠١١. ففي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١، كان قد تم إغلاق ١٢٤ مفاعلاً من مفاعلات القوى. واستكملت عملية التفكيك بالنسبة لمفاعل واحد في عام ٢٠١١ – وهو مفاعل ويندسكيل المتقدّم المبرد بالغاز في المملكة المتحدة – ليصل بالتالي عدد المفاعلات المغلقة والمفككة كلياً إلى ١٦ مفاعلاً. ويجري العمل على تفكيك خمسين مفاعلاً من مفاعلات القوى، فيما وُضِع ٤٩ مفاعلاً في حالة احتواء مأمون، وأقبرت ٣ مفاعلات، ولم تُحدَّد بعد استراتيجيات الإخراج من الخدمة بالنسبة إلى ٦ مفاعلات.

٧٢- واستكمل في عام ٢٠١١، بعد ١٢ عاماً من الجهد المضني، تفكيك مفاعل ويندسكيل المتقدّم المبرد بالغاز، وهو كناية عن محطة نووية تجريبية شُيِّدت في ستينات القرن الماضي. وأتاح المشروع تحديد المخططات اللازمة لإخراج ١٤ مفاعلاً آخر من النوع ذاته من الخدمة في جميع أنحاء المملكة المتحدة مع بلوغ هذه المفاعلات نهاية أعمارها التشغيلية.

٧٣- وفي أواخر عام ٢٠١١، وقّعت شركة ستودسفيك السويدية عقداً مع الشركة البريطانية المحدودة للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع بشأن نقل خمسة مبادلات حرارية قديمة، يزن كلٌّ منها أكثر من ٣٠٠ طن، من محطة بركلي ماغنوكس للقوى النووية التي تم إخراجها من الخدمة إلى السويد وتفكيكها، وسيُعاد خلال هذه العملية تدويرُ ما يصل إلى ٩٠٪ من محتواها من المعادن.

٧٤- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، قدّرت كلفة أعمال التفكيك والإخراج من الخدمة في القطاع النووي بحوالي ٦٩,٣ بليون دولار. وتبيّن أن الأموال كافية للإخراج من الخدمة في الولايات المتحدة الأمريكية. وقد أظهر نقلُ ملكية محطة زيون للقوى النووية من شركة إكسيلون إلى شركة إينيرجي سولوشنز في عام ٢٠١٠ أن الأموال المخصصة قانوناً لسداد تكاليف أنشطة الإخراج من الخدمة المستقبلية تكفي لتنفيذ هذه الأنشطة فعلياً.

ألف-٤- الأمان[١٥]

٧٥- في عام ٢٠١١، تركّزت المحادثات بشأن أمان محطات القوى النووية على الحاجة إلى تحديد وتطبيق العِبَر الممكن استخلاصها من الحادث الذي تعرّضت له محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، نتيجةً للكارثتين الطبيعيتين الهائلتين اللتين ضربتا اليابان في ١١ آذار/مارس ٢٠١١، ألا وهما الهزة الأرضية والتسونامي.

٧٦- وقد دعت الوكالة إلى عقد مؤتمر وزاري بشأن الأمان النووي في حزيران/يونيه ٢٠١١ لمناقشة التقييم الأولي لحادث فوكوشيما، والوقوف على الدروس التي ينبغي استخلاصها، والمساعدة على إطلاق عملية لتقوية الأمان النووي في كل أرجاء العالم، والبحث عن سبل لزيادة تعزيز التصدي للحوادث والطوارئ النووية. وفي عام ٢٠١١، أجرت عدة دول أعضاء استعراضات في إطار التقييمات الوطنية للأمان (ويطلق عليها في الكثير

[١٥] ترد معلومات إضافية حول الأمان النووي في وثيقة *استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٢* أو في التقرير السنوي للوكالة.

من الأحيان اسم "اختبارات الإجهاد")، وقُدِمت تعهّدات باستكمال أي تقييمات متبقية بسرعة وتنفيذ الإجراءات التصحيحية اللازمة.

٧٧- وتتمثل العبرة الأولية المستقاة من الحادث في ضرورة قيام مشغلي محطات القوى النووية في العالم باستعراض وتعزيز ما يلي، حسب الاقتضاء: (أ) التدابير الوقائية لمواجهة المخاطر القصوى من قبيل التسونامي؛ (ب) وإمكانيات توفير الطاقة وسبل التبريد في حال التعرض لحوادث جسيمة؛ (ج) والتحضيرات لمواجهة الحوادث الجسيمة؛ (د) وقواعد تصميم المحطات، أي الافتراضات بشأن مجموعة حوادث محددة مسبقاً، التي ينبغي مراعاتها.

٧٨- وعلى الرغم من وجود دروس إضافية ينبغي استخلاصها، فقد استكمل فعلاً، على الصعيدين الوطني والدولي، إعداد خطط عمل تنطوي على تطبيق الدروس الأولية المستفادة من الحادث. وتُحدد خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي برنامجَ عمل يهدف إلى تقوية الإطار العالمي للأمان النووي. وهذه الخطة، التي أقرّها المؤتمر العام في أيلول/سبتمبر ٢٠١١، تنص على ١٢ إجراءً رئيسياً.[١٦]

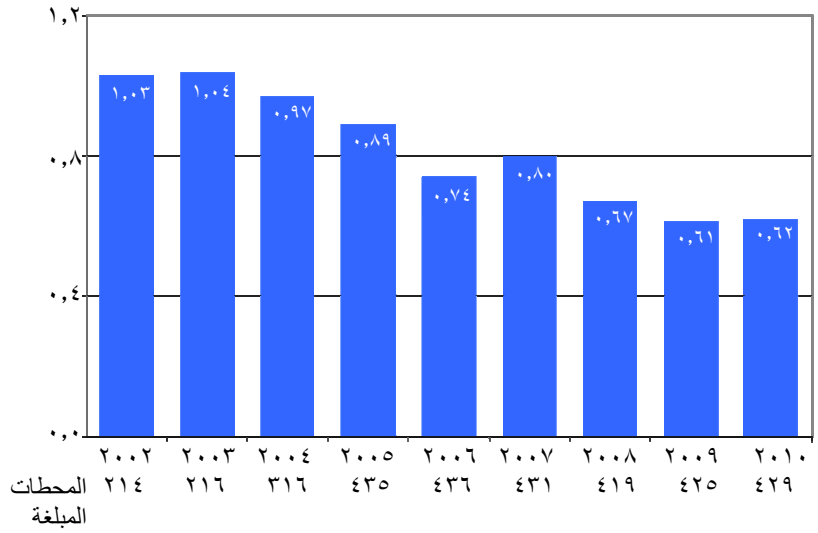
٧٩- ويمكن استخلاص دروس أخرى، وعند الاقتضاء، إدراجها ضمن هذه الإجراءات من خلال تحديث خطة العمل. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١، أعلنت حكومة اليابان أن المفاعلات في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية بلغت 'حالة إغلاق بارد' وباتت في وضع مستقر، كما أعلنت السيطرة على انبعاث المواد المشعة.

٨٠- وعلى الصعيد التشغيلي، يبقى مستوى أمان محطات القوى النووية عالياً في مختلف أنحاء العالم، وفقاً للمؤشرات التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغلين النوويين. ويبرز الشكل ألف-٤ العدد الإجمالي لحالات الإيقاف الطارئ غير المخطط لها، آلية كانت أم يدوية، التي تحصل على مدى ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل الحرج لمفاعل القوى، وقد توصّلت الوكالة إلى هذا العدد بفضل إحصائيات قاعدة بيانات نظام المعلومات عن مفاعلات القوى.[١٧] ويرصد هذا المؤشر الأداء من خلال تقليص عدد حالات إغلاق المفاعلات التام غير المخطط له، ويشيع استخدامه لتوفير إشارة إلى النجاح في تحسين أمان المحطات. وكما يبرز من الشكل ألف-٤، فقد تحقّقت على مدى السنوات الأخيرة الماضية تحسينات مطّردة، على الرغم من أنها ليست هائلة بقدر تلك المحققة خلال تسعينات القرن الماضي. بيد أن الفجوة ما زالت واسعة بين الأفضل أداءً والأسوأ أداءً، بما يتيح المجال لمواصلة التحسين. ويتضمن استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٢ مزيداً من التفاصيل في معلومات الأمان بشأن مواضيع نووية متقاطعة وبشأن التطوّرات الأخيرة في ميدان الأمان على مدى عام ٢٠١١، بما يتعدّى التركيز على الحادث الذي تعرضت له محطة فوكوشيما داييتشي.

---

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

[١٧] الموقع الإلكتروني: http://prisweb.iaea.org.



الشكل ألف-٤ . العدد الإجمالي لحالات الإيقاف الطارئ غير المخطط لها، آليةً كانت أم يدوية، التي تحصل على مدى ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل الحرج لمفاعل القوى (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية).

باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان

٨١- وتواصل باستمرار الخبرات التشغيلية المستقاة من المفاعلات القائمة، بالإضافة إلى التقدّم المحرز في العلوم والهندسة النووية، تحفيز أعمال تطوير تصاميم مفاعلات متقدمة جديدة. وينطوي هذا القسم على لمحة موجزة عن هذه الأعمال بالنسبة لتصاميم المفاعلات المستندة أولاً إلى تقنية الانشطار النووي وثانياً إلى تقنية الاندماج النووي.

باء-١- الانشطار المتقدم

باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء

٨٢- في كندا، تواصل هيئة الأمان النووي الكندية عملية الاستعراض الممهّد للمشروع بشأن تصميم المفاعل كاندو-٦ المعزز بقدرة ٧٠٠ ميغاواط(كهربائي)، وينطوي هذا التصميم على ابتكارات عديدة مستندة إلى تصميم المفاعل كاندو-٩ كما يراعي الخبرات المستفادة مؤخراً من وحدات كاندو-٦ المُنشَأة في الصين وجمهورية كوريا. كما واصلت شركة كاندو للطاقة تطوير المفاعل كاندو المتقدم (طراز ACR-1000) الذي ينطوي على مستوى عالٍ جداً من التوحيد القياسي للمكوّنات وعلى استخدام يورانيوم طفيف الإثراء للتعويض عن استخدام الماء الخفيف كمبرّد أساسي. وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١١، أكملت هيئة الأمان النووي الكندية المراحل الثلاث المكوّنة لعملية الإستعراض الممهّد للمشروع بشأن المفاعل ACR-1000، ليكون بذلك أول مفاعل قوى نووية متقدّم يخضع بالكامل لمثل هذا الاستعراض بواسطة هيئة الأمان النووي الكندية. وتدأب شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة بنشاط على تطوير مفاعل كاندو فائق الحرجية مبرد بالماء، ممّا سيعزز مكانة كندا القيادية على رأس البرنامج الخاص بهذا النوع من المفاعلات ضمن إطار المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات.

٨٣- ويتواصل في الصين تشييد ٢٧ مفاعلاً من مفاعلات الماء المضغوط. وتشمل هذه المجموعة مفاعلات ماء مضغوط تطورية بقدرة ٦٥٠ ميغاواط(كهربائي) و١٠٨٠ ميغاواط(كهربائي) يقوم تصميمها على أساس تكنولوجيا محطات قائمة قيد التشغيل، فضلاً عن تصميمات أكثر حداثة لمفاعل AP-1000 وتصميمات مفاعل الماء المضغوط الأوروبي. وقد جرى ربط مفاعل لينغ آو-٤ — وهو مفاعل جديد قائم على أساس تصميم مفاعل الماء المضغوط CPR-1000 — بالشبكة في ٣ أيار/مايو ٢٠١١. وتواصل الصين العمل على تطوير تصميمي CAP-1400 وCAP-1700، وهما نسختان أكبر حجماً عن AP-1000. وفي الوقت ذاته، تواصل الصين استثماراتها البحثية بشأن تصميم مفاعل صيني فائق الحرجية مبرد بالماء.

٨٤- وفي فرنسا، تواصل أريفا تسويق مفاعل الماء المضغوط الأوروبي بقدرة تفوق ١٦٠٠ ميغاواط(كهربائي)، كما تواصل تطوير مفاعل الماء المضغوط ATMEA بقدرة تفوق ١١٠٠ ميغاواط(كهربائي) مع شركة Mitsubishi Heavy Industries اليابانية، ومفاعل الماء المغلي KERENA بقدرة تفوق ١٢٥٠ ميغاواط(كهربائي) بالشراكة مع شركة E.ON الألمانية.

٨٥- وتضم الهند خمسة مفاعلات قيد التشييد، بما يشمل ثلاثة مفاعلات ماء ثقيل مضغوط تطوّرية بقدرة ٧٠٠ ميغاواط(كهربائي) ومفاعلين مبردين ومهدأين بالماء بقدرة ١٠٠٠ ميغاواط(كهربائي). كما طوّرت شركة القوى النووية الهندية المحدودة مفاعل ماء ثقيل مضغوط تطوّري بقدرة ٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وينكب مركز بهابها للبحوث الذرية على وضع اللمسات الأخيرة على تصميم مفاعل ماء ثقيل متقدم بقدرة ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي) سيستخدم الثوريوم المهدّأ بالماء الثقيل، ومبرّد بالماء الخفيف المغلي في أنابيب ضغط عمودية، وينطوي على نظم أمان خاملة.

٨٦- وفي اليابان، العمل جارٍ على تشييد مفاعلين متقدّمين يعملان بالماء المغلي في أوهما وشيمان-٣، وقد بلغت مفاعلات أخرى من النوع ذاته مرحلة التخطيط. وتواصل هيتاشي تطوير نسخ بقدرة ٦٠٠ و٩٠٠ و١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي) من مفاعلات الماء المغلي المتقدمة، بالإضافة إلى المفاعل ABWR-II بقدرة ١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وقد طوّرت شركة ميتسوبيشي للصناعات الثقيلة نسخة بقدرة ١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي) من مفاعل الماء المضغوط المتقدم APWR للسوق الأمريكية، ويشار إليها بلفظة US-APWR، وقد بلغت النسخة المذكورة مرحلة المصادقة على التصميم بواسطة الهيئة الرقابية النووية. ويجري العمل أيضاً على تطوير نسخة أوروبية من المفاعل APWR ويشار إليها بلفظة EU-APWR، وستخضع للتقييم بغية تحديد مدى امتثالها لمتطلبات شركات توزيع الكهرباء الأوروبية. وفضلاً عمّا تقدم، تواصل اليابان تطوير تصميم ابتكاري لمفاعل فائق الحرجية مبرّد بالماء.

٨٧- وفي جمهورية كوريا، يتواصل التقدّم في تشييد أول مفاعل قوى متقدم من طراز APR-1400 وفقاً للخطة الموضوعة. ويتواصل تطوير نسخة أوروبية من مفاعل APR-1400، ويشار إليها بلفظة EU-APR-1400، وسيتم تقييم امتثالها لمتطلبات شركات توزيع الكهرباء الأوروبية. وقد بدأت عملية مصادقة الهيئة الرقابية النووية للولايات المتحدة على النسخة الأمريكية من المفاعل، ويشار إليها بلفظة US-APR-1400، وتهدف هذه العملية إلى إنجاز المصادقة النهائية في عام ٢٠١٥. وبموازاة ذلك، تواصل في عام ٢٠١١ تطوير مفاعل +APR بقدرة ١٥٠٠ ميغاواط(كهربائي) ومفاعل APR-1000.

٨٨- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، عدّلت الهيئة الرقابية النووية في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١ طلبَ تعديل اعتماد التصميم الخاص بمفاعلات وستينغهاوس AP1000، مضيفةً إليها استيفاءاتٍ وتعزيزات تصميمية.

٨٩- وتواصل تشييد ثمانية مفاعلات مبردة ومهدأة بالماء في الاتحاد الروسي، بما يشمل مفاعلات من الطراز WWER-1000 وأخرى من الطراز WWER-1200. وتواصل أيضاً تنفيذ الخطط لتطوير المفاعل WWER-1200A، وكذلك المفاعلين WWER-600 وWWER-1800، استناداً إلى تصميم المفاعل الحالي من طراز WWER-1200. وإلى جانب ذلك، واصل الاتحاد الروسي العمل على مفاعل ابتكاري فائق الحرجية مبرّد بالماء من طراز WWER-SC، ويتواصل تشييد المفاعل KLT-40S، وهو مفاعل صغير عائم يستخدم لتطبيقات تخصصية.

باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة

٩٠- يجري العمل على تطوير مفاعلات سريعة منذ سنوات عدة في العديد من البلدان، لا سيما لاستخدامها في التوليد. ويتيح توليد البلوتونيوم، بالاقتران مع إعادة معالجة الوقود وإعادة تدويره، للمفاعلات السريعة بأن تستخرج من اليورانيوم ٦٠ إلى ٧٠ ضعفاً من الطاقة التي تستخرجها المفاعلات الحرارية — وهي قدرة من شأنها أن تتيح زيادات هائلة جداً في القوى النووية على المدى الطويل. ويمكن للمفاعلات السريعة أن تساهم أيضاً في تقليص مخزونات البلوتونيوم وتخفيض المدة اللازمة لعزل النفايات القوية الإشعاع من خلال استخدام نظائر ما وراء اليورانيوم المشعة وتحويل عدد من المنتجات الانشطارية الطويلة العمر.

٩١- وفي الصين، تم في ٢١ تموز/يوليه ٢٠١١ ربط المفاعل التجريبي الصيني السريع الحوضي بقدرة ٦٥ ميغاواط(حراري) (٢٠ ميغاواط(كهربائي))، الذي بلغ مرحلة الحرجية للمرة الأولى في ٢١ تموز/يوليه ٢٠١٠، بشبكة توزيع الكهرباء. ويجري حالياً تنفيذ برنامج فيزيائيات الإطلاق الخاص بالمفاعل المذكور.

٩٢- وتجري على قدم وساق أعمال تشييد المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط(كهربائي) في كالاباكام بالهند: إذ تم تركيب أوعية الأمان والأوعية الرئيسية والداخلية، كما تم إغلاق مبنى المفاعل. ومن المزمع إدخاله في الخدمة في مطلع عام ٢٠١٣.

٩٣- وتدأب اليابان على تطوير المفاعل الياباني السريع المبرّد بالصوديوم بقدرة ١٥٠٠ ميغاواط(كهربائي) في إطار مشروع اليابان الخاص بتطوير تكنولوجيا دورة المفاعلات السريعة. وعلى إثر الأحداث التي شهدتها محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في آذار/مارس ٢٠١١، تعيد اليابان تقييم جدوى الاستمرار في البرنامج، ومن المتوقع صدور قرار بشأن مواصلة تنفيذ المشروع فور توصل الحكومة إلى توافق آراء بشأن سياستها المنقحة في ميدان الطاقة النووية.

٩٤- وتعكف جمهورية كوريا على تنفيذ برنامج مكثف للبحث والتطوير دعماً للمفاعل السريع المبرد بالصوديوم بقدرة ٦٠٠ ميغاواط(كهربائي)، والمسمّى المفاعل الكوري المتقدم المبرد بفلز سائل KALIMER.

٩٥- وفي الاتحاد الروسي، الذي يشغّل في بيلويارسك أقوى مفاعل سريع تجاري قائم (أي مفاعل BN-600)، يتواصل تحقيق التقدم في عملية بناء المفاعل السريع طراز BN-800. ومن المتوقع أن تستكمل أعمال التشييد في عام ٢٠١٤، وأن تُستهل، في العام ذاته، عملية الإدخال في الخدمة. كما استهل الاتحاد الروسي في عام ٢٠١٠ برنامج الهدف الاتحادي المعنون "الجيل الجديد من تكنولوجيات القوى النووية للفترة ٢٠١٠–٢٠١٥ والتوجّهات المستقبلية حتى عام ٢٠٢٠"، ويرمي هذا البرنامج إلى تطوير مفاعل سريع متقدم مبرّد بالصوديوم (طراز BN-1200)، ومفاعلين سريعين ابتكاريين مبرّدان بالفلز السائل الثقيل (المفاعل BREST-OD-300 المبرّد بالرصاص، والمفاعل SVBR-100 المبرّد بخليط الرصاص والبزموث المنصهرين)، بالإضافة إلى دورتي

الوقود المرتبطتين بهما، فضلاً عن مفاعل سريع بحثي جديد متعدد الأغراض مبرد بالصوديوم يشار إليه باسم MBIR.

٩٦- واستهلت مؤخراً برامج صناعية متنوعة في كل من أوروبا واليابان وجمهورية كوريا والاتحاد الروسي، وتهدف هذه البرامج إلى بدء تشغيل محطات إيضاحية ونماذج أولية عن المفاعلات السريعة الجديدة بحلول فترة ٢٠٢٥–٢٠٣٠.

٩٧- وبغية تلبية الاحتياجات الأوروبية للطاقة على المدى البعيد، بما يشمل ضمان أمن الإمدادات والأمان والاستدامة والتنافسية التجارية، قام الاتحاد الأوروبي في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٠ — في إطار خطته الاستراتيجية لتكنولوجيا الطاقة — برسم مساره التكنولوجي الرامي إلى تطوير المفاعلات النيوترونية السريعة. ويتكوّن هذا المسار ممّا يلي: المفاعل السريع المبرد بالصوديوم كمسار أول — استناداً إلى الخبرات السابقة في هذا التصميم في أوروبا — وتكنولوجيتين بديلتين قائمتين على مفاعلات نيوترونية سريعة يجب دراستهما على المدى الأبعد وهما: المفاعل السريع المبرد بالرصاص والمفاعل السريع المبرد بالغاز. ويتوقع برنامج الإيضاح والتنفيذ ذو الصلة — أي المبادرة الصناعية النووية المستدامة الأوروبية — أن يتم، في فرنسا، تشييدُ النموذج الأولي للمفاعل السريع المبرد بالصوديوم ويشار إليه باسم ASTRID والمحطتين الإيضاحيتين، ALFRED وALLEGRO، لكل من التكنولوجيتين البديلتين القائمتين على أساس المفاعل السريع المبرد بالرصاص والمفاعل السريع المبرد بالغاز على التوالي. ويلقى البرنامج الدعم أيضاً من خلال تشييد مرفق تشعيع طيفي سريع دون حرجي يسمّى MYRRHA، ويستخدم المرفق المذكور أيضاً كمرفق تجريبي للنموذج الأولي من مفاعل Alfred السريع المبرّد بالرصاص. ولاختبار رصد الحالة دون الحرجية، تم بناء نسخة معدومة القوى من MYRRHA، تعرف باسم GUINEVERE، ويجري تشغيلها في مختبرات مركز البحوث النووية البلجيكي في مول.

باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز

٩٨- في الصين، وافق مجلس الدولة في شباط/فبراير ٢٠٠٨ على خطة تنفيذية لإيضاح خصائص المفاعل المرتفع الحرارة المبرد بالغاز. وتخضع رخصة المشروع للاستعراض حالياً.

٩٩- وفي اليابان، استكملت اختبارات أشدّ صرامة — فترة إجمالية مدتها ٩٠ يوماً، منها ٥٠ يوماً عند حرارة ٩٥٠ درجة مئوية — على مفاعل الاختبارات الهندسية المرتفع الحرارة. وتدرس الحكومة اليابانية جدوى ربط هذا المفاعل بنظام لإنتاج الهيدروجين بغية إنتاج الهيدروجين على نطاق ضيق.

١٠٠- وتواصل جمهورية كوريا الاستثمار في عدد من المرافق الاختبارية لإجراء الاختبارات الهندسية على النظم والمكوّنات الخاصة بمفاعل مرتفع الحرارة مقرون بمرفق لإنتاج الهيدروجين. ويجري التخطيط أيضاً لتطبيقات الاستفادة من الحرارة المتولّدة عن العمليات، إذ يتعاون عدد من مستخدمي الحرارة الصناعية مع المجتمع البحثي النووي من أجل إيجاد الطرائق المثلى لإنتاج الحرارة والهيدروجين بواسطة مفاعل مرتفع الحرارة. ومن المتوقع انتقاء مفهوم المفاعل بحلول عام ٢٠١٥. ويحظى مشروع تطوير الهيدروجين النووي وإيضاحه بدعم راسخ من جانب الصناعة والحكومة على حد سواء.

١٠١- وفي جنوب أفريقيا، أوقف في عام ٢٠١٠ تنفيذ خطط انتقال المفاعل النمطي الحصوي القاع إلى مرحلة التشييد، وذلك نتيجة جملة من الأمور منها القيود التمويلية الناشئة عن الأزمة المالية العالمية. ويبقى المشروع

مشمولاً "بخطة للعناية والصون" من أجل حماية الملكية الفكرية والأصول المعنية، إلى أن تتخذ الحكومة قرارها بشأن ما تعتزم فعله مستقبلاً.

١٠٢- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تواصلت الاختبارات التجريبية لأمان الوقود النظيري الثلاثي الهيكل، الذي يتم قياسه استناداً إلى معدلات أعطال الوقود، في مفاعل الاختبار المتقدم القائم في مختبر أيداهو الوطني. ويتمثل الهدف من هذه التجارب في توفير بيانات الأداء التشعيعي لدعم تطوير عملية الوقود بغية تأهيل الوقود للعمل في ظروف التشغيل العادي وفي الظروف العابرة وظروف الحوادث، ولدعم شيفرة المحاكاة PARFUME الخاصة بتطوير وتصديق النماذج والقواعد الخاصة بأداء الوقود وبإطلاق نواتج الانشطار، ولتوفير الوقود النظيري الثلاثي الهيكل TRISO المشعع لفحوص ما بعد التشعيع واختبارات الأمان/السخونة. وتتواصل أعمال فحوص ما بعد التشعيع واختبارات السخونة على وقود TRISO المشعع وعلى عيّنات نموذجية مضغوطة ناتجة عن اختبار الوقود الأول (AGR-1). كما تم تلقيم اختبار الوقود الثاني (AGR-2) في مفاعل الاختبار المتقدم في شهر حزيران/يونيه ٢٠١٠، والعمل جارٍ على تنفيذ الاختبار. أمّا الاختباران الثالث والرابع (AGR-3/4)، فقد تم جمعهما ضمن سلسلة اختبارات تجريبية واحدة، وهما يشملان جسيمات TRISO المصمّمة بشكل يضمن تعطّلها، وستوفّر سلسلة الاختبارات المذكورة بيانات عن إطلاق نواتج الانشطار للتصديق على نماذج المحاكاة، بالإضافة إلى معلومات عن الأداء التشعيعي لوقود TRISO المشغَّل في ظل درجات حرارة أعلى. وقد أُدخل اختبار الوقود الثالث والرابع إلى مفاعل الاختبار المتقدم في مختبر أيداهو الوطني في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١ حيث سيتم تشعيعه لمدة سنتين. وتتواصل اختبارات زحف تشعيع الغرافيت في مفاعل الاختبار المتقدم المذكور من أجل توفير معلومات الأداء لعدة أنواع من الغرافيت النووي ذي الجودة التجارية. أمّا اختبار زحف تشعيع الغرافيت الثاني، AGC-2، فقد أُدخل إلى مفاعل الاختبار المتقدم في شباط/فبراير ٢٠١١، ويجري العمل حالياً على تشعيعه. واستكمل استعراض التصميم الخاص باختبار زحف تشعيع الغرافيت الثالث AGC-3 وسيكتمل تصنيعه خلال عام ٢٠١٢. ويتركّز استخدام أموال مشروع المحطة النووية من الجيل المقبل على مواصلة العمل على حملتي تشعيع وقود TRISO والغرافيت، وعلى خلق شراكة بين القطاعين العام والخاص لتصميم وترخيص وبناء المفاعل الإيضاحي للمحطة النووية من الجيل المقبل.

باء-١-٤- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم[١٨]

١٠٣- وفقاً للتصميم المعتمد لدى الوكالة، المفاعلات الصغيرة هي مفاعلات قادرة على توليد قوى كهربائية بقدرة تقل عن ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي) فيما المفاعلات المتوسطة الحجم هي مفاعلات قادرة على توليد قوى كهربائية بقدرة تتراوح بين ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي) و٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). ويمكن للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أن تتيح خياراً جذاباً ومقبول التكلفة لتوليد القوى النووية بالنسبة للعديد من البلدان النامية التي لديها شبكات صغيرة لتوزيع الكهرباء، وبنى أساسية غير كافية، وقدرات استثمارية محدودة أو حين تكون المرونة مطلوبة في ميدان إنتاج الطاقة. وتثير المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم اهتماماً خاصاً فيما يتعلق بقدرات التوليد المشترك والعديد من تطبيقات المعالجة الحرارية المتقدمة المستقبلية.

---

[١٨] أصدرت الوكالة كتيّباً بعنوان حالة تصاميم المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، ويمكن تحميل نسخة منه عبر الموقع الإلكتروني التالي: http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf. والمقصود من هذا الكتيّب أن يكمّل نظام المعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدمة التابع للوكالة، والمتاح عبر الموقع الإلكتروني التالي: http://aris.iaea.org.

١٠٤- ويجري في الوقت الحالي تشييد ١٣ مفاعلاً من المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم في ستة بلدان هي: الاتحاد الروسي والأرجنتين وباكستان وسلوفاكيا والصين والهند. ويجري تطوير مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم منبثقة عن أنواع المفاعلات الرئيسية كلها بما فيها مفاعلات الماء الخفيف، ومفاعلات الماء الثقيل، والمفاعلات المبردة بالغاز، والمفاعلات السريعة المبردة بالفلز السائل.

١٠٥- وفي الأرجنتين، بدأ في أيلول/سبتمبر ٢٠١١ نشر المفاعل CAREM — وهو قائم على تصميم مفاعل ماء خفيف مضغوط متكامل تقع جميع مكوّناته الرئيسية داخل وعاء المفاعل وبقدرة توليد كهرباء تتراوح بين ١٥٠ و٣٠٠ ميغاواط(كهربائي) — مع بدء أعمال الحفريات الموقعية للمحطة النموذجية CAREM بقدرة ٢٧ ميغاواط(كهربائي).

١٠٦- وفي البرازيل، جرى تطوير التصميم المفاهيمي للمفاعل النووي ذي القاع الثابت بقدرة ٧٠ ميغاواط(كهربائي) الذي لا يحتاج إلى إعادة تزويده بالوقود في الموقع.

١٠٧- أمّا كندا، فطوّرت ونشرت على الصعيد العالمي سلسلة مفاعلات كاندو التي تتسم بمعدلات قوى متنوعة. ومفاعل كاندو-٦ المعزز هو النسخة الجديدة التي احتفظت بالخصائص الأساسية لتصميم مفاعلات كاندو-٦ ويتسم هذا المفاعل بقدرة إجمالية على توليد الكهرباء تبلغ ٧٤٠ ميغاواط(كهربائي).

١٠٨- وطوّرت الصين مفاعلات ماء مضغوط بقدرة ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي) و٦٠٠ ميغاواط(كهربائي). وقد نُشرت عدة وحدات من هذا المفاعل فيما العمل جارٍ، منذ عام ٢٠١١، على بناء وحدتين من طراز CNP-600. وقامت باكستان أيضاً بنشر وحدتين من طراز CNP-300 استوردتهما من الصين. وفضلاً عن ذلك، فقد وقّعت الشركة الوطنية النووية الصينية في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١، اتفاقاً مع سلطات البلدية في مدينة جانغجو لبناء مفاعلي قوى نووية نمطيين صغيرين.

١٠٩- وعلى مدى السنوات القليلة الفائتة، عملت فرنسا على تطوير محطة فلكسبلو Flexblue، وهي محطة قوى نووية بحرية صغيرة ستوضع في قاع البحر وتربط بشبكات توزيع الكهرباء البرية، وتناهز قدرتها ١٥٠ ميغاواط(كهربائي).

١١٠- أمّا الهند فلديها، قيد التشغيل أو قيد التشييد، ٢١ مفاعلاً من مفاعلات الماء الثقيل بقدرة ٢٢٠ ميغاواط(كهربائي)، و٥٤٠ ميغاواط(كهربائي)، و٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وقد بلغ مفاعل الماء الثقيل المتقدم بقدرة ٣٠٤ ميغاواط(كهربائي) مرحلة التصميم الأساسي، علماً بأنه سيستخدم وقوداً مكوّناً من اليورانيوم الضعيف الإثراء ومن خليط أكسيد الثوريوم وسينطوي على أنابيب ضغط عمودية وعلى سمات أمان خاملة.

١١١- وتعكف اليابان على تطوير المفاعل الفائق الأمان والصغير والبسيط — وهو مفاعل سريع صغير مبرّد بالصوديوم مصمم لتوليد قدرة تتراوح بين ١٠ و٥٠ ميغاواط(كهربائي) ويمكن حفظه في قبو جوفي مختوم أسطواني الشكل على أن يشيّد المبنى فوق سطح الأرض.

١١٢- وطوّرت جمهورية كوريا تصميم المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النظم، بقدرة حرارية تبلغ ٣٣٠ ميغاواط(حراري). ومن المزمع استخدامه لتحلية مياه البحر. واستُهل مشروع تصميم محطة تجريبية بغية إجراء التحقق الشامل من الأداء. ومن المتوقع أن تصدر الموافقة النهائية على التصميم المعياري للمفاعل المتقدم

النمطي المتكامل النظم بقدرة ١٠٠ ميغاواط(كهربائي) خلال الربع الأول من عام ٢٠١٢، قبل بناء النموذج الأولي للمحطة.

١١٣- وفي باكستان، هناك ثلاثة مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم قيد التشغيل، وهي KANUPP-1 وCHASNUPP-1 وCHASNUPP-2. ويتواصل العمل على تشييد مفاعلين من طراز CNP-300 مستوردين من الصين للوحدتين ٣ و٤ من محطة CHASNUPP.

١١٤- وفي الاتحاد الروسي، يجري العمل على تطوير ستة مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم مبرّدة بالماء الخفيف. وثمة وحدتان من سلسلة KLT-40S قيد التشييد وسيتم تركيبهما على بارجة لاستخدامهما لتوليد حرارة المعالجة والكهرباء في آن معاً. كما طوّر الاتحاد الروسي المفاعل SVBR-100 وهو مفاعل صغير سريع مبرّد بسبائك الرصاص والبيزموث المنصهرين يبلغ معدل طاقته ١٠٠ ميغاواط(كهربائي).

١١٥- وفي سلوفاكيا، يجري العمل على تشييد وحدتين من المفاعل VVER-440 على أساس التكنولوجيا الروسية للوحدتين المتوقع إضافتهما إلى محطة Mochovce (الوحدة ٣ والوحدة ٤). ويتوقع أن يبدأ تشغيل الوحدة الأولى في عام ٢٠١٢ والثانية في عام ٢٠١٣.

١١٦- وفي الولايات المتحدة، ثمة أربعة مفاعلات ماء مضغوط متكاملة مبرّدة بالماء الخفيف قيد التطوير وهي: مفاعل mPower ومفاعل NuScale ومفاعل Holtec النمطي المأمون ضمنياً ومفاعل ستينغهاوس الصغير Westinghouse SMR. وتستند محطة mPower إلى تصميم الوحدات المزدوجة وهي مكوّنة من وحدتين نمطتين بقدرة ١٨٥ ميغاواط(كهربائي) مع إمكانية إضافة وحدات مزدوجة إضافية وفقاً للاحتياجات. وتستند محطة NuScale إلى مفهوم محطة قوى نووية تستوعب ما يصل إلى اثني عشر وحدة نمطية ذاتية الاحتواء تبلغ قدرة كل منها ٤٥ ميغاواط(كهربائي) ضمن نطاق المحطة، على أن يتم تشغيلها في ظروف الدوران العادي في ظرف التشغيل وظرف ما بعد الحوادث. ويقوم مفاعل وستينغهاوس الصغير بقدرة ٢٢٥ ميغاواط(كهربائي) على أساس تصميم مفاهيمي ينطوي على نظم أمان خاملة ويستند إلى بعض من فلسفات الأمان الخامل والسمات التصميمية الخاصة بتصميم مفاعل الماء الخفيف الضخم AP-1000. أمّا مفاعل Holtec، فيتمتّع بقدرة ١٤٥ ميغاواط(كهربائي)، وكما هي الحال بالنسبة لوحدات NuScale النمطية، فإنه لا يستلزم مضخات لتدوير سائل التبريد. ومن المتوقع أن يتم إخضاع المفاهيم الأربعة لاستعراض المصادقة على التصميم لدى الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة بين عامي ٢٠١٣ و٢٠١٥. ويهدف مشروع المفاعل الدولي المبتكر والمأمون، الذي ينفّذه الآن ائتلاف دولي، إلى تطوير تصميم مفاعل ماء مضغوط متكامل قادر على توليد الكهرباء بقدرة ٣٣٥ ميغاواط(كهربائي). وتم تطوير مفاعل القوى الابتكاري الصغير النمط PRISM — وهو مفاعل سريع التوليد مبرّد بالفلز السائل بقدرة ٣١١ ميغاواط(كهربائي) — وتجري حالياً دراسة طلب المصادقة على تصميمه لدى الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة.

١١٧- ويتواصل العمل على تطوير عدة تصاميم لمفاعلات مبردة بالغاز ضمن فئة المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم. فقد بنت الصين المفاعل HTR-10، وهو مفاعل مرتفع الحرارة اختباري حصوي القاع مبرّد بالهليوم. وللمتابعة، وافقت الحكومة الصينية، في آذار/مارس ٢٠١١، على بناء مفاعل نمطي من طراز HTR-PM مكوّن من وحدتين نمطيتين قدرة كل منهما ٢٥٠ ميغاواط(حراري). وفي الولايات المتحدة الأمريكية، يتميّز مفاعل الهليوم النمطي التوربيني الغازي ذو قدرة ١٥٠ ميغاواط(كهربائي) بكونه يقوم على أساس تصميم مفاهيمي يتيح له إمكانية إنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الكهربائي عند حرارة عالية أو بواسطة التكسير

الحراري الكيميائي لجزيئات الماء. وفي الختام، يقوم تصميم الوحدة النمطية لمضاعفة الطاقة على أساس جهد يرمي إلى استخدام الوقود النووي المستهلك من دون إخضاعه لإجراءات إعادة المعالجة التقليدية.

باء-١-٥- المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (إنبرو) والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات

١١٨- رحّب المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (إنبرو)، الذي يدعم الدول الأعضاء في تطوير ونشر نظم الطاقة النووية المستدامة، في عام ٢٠١١، بانضمام ثلاثة أعضاء جدد — مصر وإسرائيل والأردن — ليصل بالتالي عدد أعضائه إلى ٣٥ عضواً. وحدّد المنشور المعنون "الرؤية الإنمائية لمشروع إنبرو للفترة ٢٠١٢-٢٠١٧"، الذي صيغ عام ٢٠١١، الهدف الاستراتيجي بالعمل في اتجاه ضمان استدامة النظام العالمي للطاقة النووية عن طريق نمذجة السيناريوهات الانتقالية وتحليلها؛ وتشجيع الابتكارات التقنية والمؤسساتية المطلوبة؛ ودعم الدول الأعضاء في وضع استراتيجياتها الوطنية الطويلة الأمد للطاقة النووية.[١٩]

الشكل باء-١ . استدامة الطاقة النووية في العالم ومساهمة مشروع إنبرو في ذلك.

١١٩- وفي عام ٢٠١١، استهل مشروع جديد ضمن إطار محفل إنبرو للتحاور حول الطاقة النووية والابتكارات لتحديد 'الاعتبارات المشتركة بين المستخدمين'، ولا سيما مستخدمي التكنولوجيا للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم. كما شهد عام ٢٠١١ تنفيذَ أربع بعثات لتقييم نظم الطاقة النووية في كل من أوكرانيا وإندونيسيا وبيلاروس وكازاخستان، وتوسيعَ نطاق حزمة دعم تقييم نظم الطاقة النووية التي طوّرتها الوكالة لدعم البلدان في تقييماتها الذاتية بحيث باتت تشمل أمثلة عن العينات المستخدمة، بالإضافة إلى نسخة عن البرنامج الإلكتروني لتقييم نظم الطاقة النووية. واختُتم في عام ٢٠١١ تنفيذ المشروع التعاوني المعنون 'النسق الهندسي العالمي لنظم الطاقة النووية الابتكارية القائمة على المفاعلات الحرارية والسريعة بما يشمل دورات الوقود المغلقة'. وقد أتاح تعيين وقياس المزايا الناتجة عن الانتقال إلى نظام للطاقة النووية مستدامٍ عالمياً يقوم على أساس المفاعلات السريعة ودورات الوقود المغلقة. واستهل في عام ٢٠١١ مشروع متابعة بعنوان 'تقييم استدامة التفاعلات التآزرية للفريق الإقليمي المعني بالطاقة النووية'، ويهدف إلى التوصل إلى قياس مفصل لمزايا التعاون والتآزر فيما بين البلدان المعنية بعملية الانتقال.

---

[١٩] يمكن الاطّلاع على هذا المنشور عبر الوصلة الإلكترونية التالية: http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_(Final).pdf.

١٢٠- وينسّق المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات (محفل الجيل الرابع)، من خلال نظام قائم على عقود واتفاقات، أنشطة البحوث بشأن النظم الستة للطاقة النووية من الجيل المقبل التي اختيرت في عام ٢٠٠٢ وهي مبينة في *خارطة الطريق لتكنولوجيا الجيل الرابع من نظم الطاقة النووية*: أي المفاعلات السريعة المبرّدة بالغاز، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالرصاص، ومفاعلات الملح المصهور، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم، والمفاعلات فوق الحرجة المبرّدة بالماء، والمفاعلات الفائقة الحرارة. وتستخدم النظم الستة المختارة مجموعة متنوعة من تكنولوجيات المفاعلات وتكنولوجيات تحويل الطاقة ودورة الوقود. وتنطوي تصاميمها على أطياف النيوترونات الحرارية والسريعة، ودورات الوقود المغلقة والمفتوحة، وطائفة واسعة من أحجام المفاعلات، من الصغير جداً إلى الضخم جداً. واستناداً إلى درجة النضج التقني لكل نظام على حدة، من المتوقع أن تكون هذه النظم متاحة لعرضها تجارياً في الفترة المتراوحة بين ٢٠٢٠ و٢٠٣٠ أو بعد ذلك. ويضم محفل الجيل الرابع في الوقت الراهن ١٣ عضواً.[٢٠]

١٢١- وتتعاون الوكالة ومحفل الجيل الرابع في مجالات المخاطر والأمان، ومقاومة الانتشار والحماية المادية، ونمذجة التقييم الاقتصادي ومنهجياته، فضلاً عن مواضيع أخرى مثل المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، واستخدام الثوريوم والانعكاسات على دورة الوقود. وفي عام ٢٠١١، أعاد الاجتماع البيني الخامس المشترك بين مشروع إنبرو ومحفل الجيل الرابع التأكيد على التعاون بين مشروع إنبرو والمحفل، لا سيما بخصوص طرائق تقييم مقاومة الانتشار وجوانب الأمان في المفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم.

باء-٢- الاندماج

١٢٢- مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي هو مشروع اختباري يسعى إلى إثبات الجدوى العلمية والتكنولوجية وسمات الأمان المرجوة من استخدام الطاقة الاندماجية في أغراض سلمية. ويشارك في مشروع التعاون الدولي هذا كلٌّ من الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. ويشهد المفاعل تطوّرات متسارعة، أبرزها تكثيف أعمال التشييد الموقعي وزيادة عدد حزم المشتريات لمختلف مكوّنات الأجهزة والمرافق. والتقدّم المحرز في بناء موقع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي خلال عام ٢٠١١ يشمل الانتهاء من بناء الخلية الساخنة، وانتهاء أعمال حفر قاعة التجميع، وحصيرة القاعدة الخرسانية للحفرة الزلزالية الخاصة بمجمّع توكاماك، ومرفق صنع المِلفّات الكهربائية للحقل المغناطيسي الحلقي. وفي نهاية عام ٢٠١١، كان قد تم التوقيع على ما مجموعه ٦٥ من أصل ١٢٦ ترتيباً من ترتيبات المشتريات، بكلفة إجمالية تجاوزت ٣ بلايين يورو، بما يمثل ٧٤٪ من القيمة الإجمالية للمشتريات اللازمة لبناء المفاعل التجريبي. وفي الدول الأعضاء في مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، يتواصل العمل على صنع المكوّنات الرئيسية (مثل الوعاء الفراغي) وتصنيع الأجزاء الأساسية (مثل الموصلات الفائقة الخاصة بالحقل المغناطيسي الحلقي). ولكن يلزم تنفيذ الإجراءات الرامية إلى تدنية حالات التأخير في الجدول الزمني للمشروع نتيجة للزلزال والتسونامي اللذين ضربا اليابان في آذار/مارس ٢٠١١.

١٢٣- وبموازاة مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، تم أيضاً تكريس جهود دولية لوضع خارطة طريق لإنتاج الكهرباء باستخدام الاندماج بالاحتواء المغنطيسي. وتركّزت هذه الأنشطة على مسائل العلوم والتكنولوجيا ذات الصلة بإنشاء محطة إيضاحية للقوى الاندماجية وأعمال البحث والتطوير التي ينبغي

---

[٢٠] الاتحاد الروسي والأرجنتين والبرازيل وجمهورية كوريا وجنوب أفريقيا وسويسرا والصين وفرنسا وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان واليوراتوم.

تنفيذها بغية الوصول إلى مثل هذه المحطة. وقد جرى تعيين عدد من المسائل ذات الأهمية الاستراتيجية التي تتطلب مزيداً من الانتباه من جانب المجتمع الدولي، وهي:

- الافتراضات المستخدمة في قواعد تصميم نظم الاندماج — تعتمد تصاميم المفاعلات الاندماجية بشكل كبير على الافتراضات الفيزيائية والتكنولوجية المستخدمة في مرحلة التصميم؛
- تطوير مواد الاندماج — اختبارات التشعيع ضرورية، ويمكنها أن تحدد المسار الحرج لتطوير المواد الهيكلية ومواد البطانة الداخلية للمحطة الإيضاحية للقوى الاندماجية؛
- تطوير البطانيات — الاكتفاء الذاتي فيما يخص التريتيوم مطلبٌ أساسي لتطوير الاندماج بما يتعدى نطاق المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، لذا فإن توليد البطانيات سيكون مطلوباً لأي مرفق اندماجي نووي مقبل، بغض النظر على الهدف المرجو منه؛
- الحلول لمعالجة مسألة البلازما المنبعثة — إن المتطلبات الخاصة بانبعاث الحرارة والجسيمات فيما يخص الأجهزة الاندماجية ذات العامل التشغيلي المرتفع تتجاوز تلك اللازمة للمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي؛
- المتطلبات اللازمة لمختلف خيارات المرافق المقبلة — يلزم وضع خطة لسد الثغرات فيما يخص التأهب وتلبية احتياجات التطوير للتكنولوجيات الاندماجية الرئيسية في الوقت المناسب لدعم الجداول الزمنية الخاصة بالمرفق.

١٢٤- وتتسم هذه المسائل بأهمية استراتيجية إذ أن السبل المعتمدة لتناولها ستترك أثراً راسخاً على خارطة الطريق بمجملها. وحتى الآن، لم يتوصل المجتمع الاندماجي الدولي إلى أي توافق آراء بشأنها.

١٢٥- وستعقد الدورة الرابعة والعشرين من مؤتمر الوكالة للطاقة الاندماجية (FEC 2012) في مدينة سان دييغو، بولاية كاليفورنيا في الولايات المتحدة الأمريكية في الفترة من ٨ إلى ١٣ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢.

الشكل باء-٢ . رفع مِلفات التصحيح الفائقة التوصيل المعدّة للاستخدام في المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، معهد فيزياء البلازما، هيفيه، الصين.

جيم- التطبيقات الخاصة بالمعجلات ومفاعلات البحوث

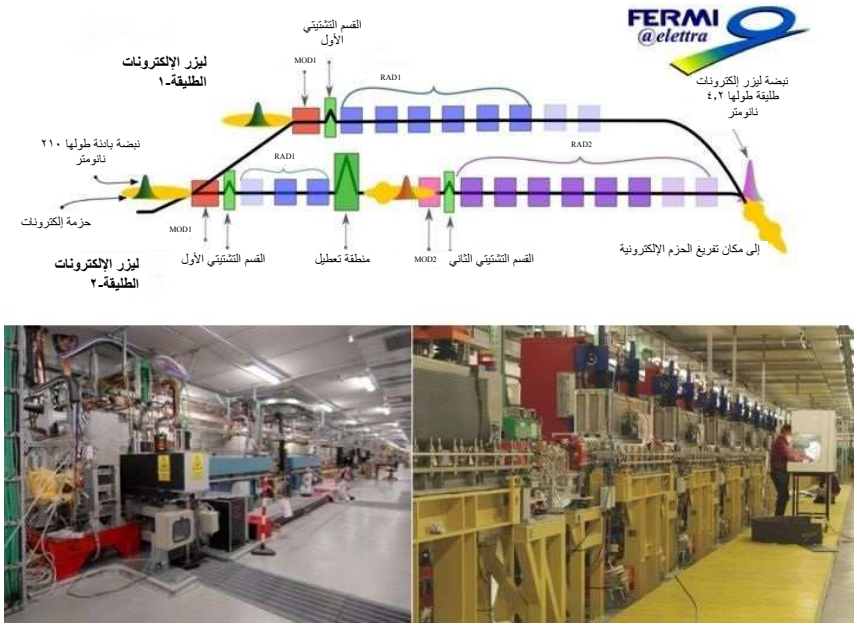
جيم-١- المُعجّلات

١٢٦- استُخدمت على مدى العقود القليلة الماضية مصادر النيوترونات القائمة على المعجِّلات، مثل المصادر الموجودة في مرافق مصادر التشظية باستخدام النيوترونات، كمكمِّل لمفاعلات البحوث. وتوجد حاليا مرافق جديدة لمصادر التشظية قيد التصميم والبناء في السويد وفي الصين. وجرى في الصين في ٢٠ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١١ الاحتفال بوضع حجر الأساس لمصدر التشظية باستخدام النيوترونات الصيني، المؤلف أساساً من معجِّل خطي لإيونات الهيدروجين السالبة الشحنة وسنكروترون بروتوني سريع الدوران. ومن المتوقع أن يستغرق إكمال تشييد مصدر التشظية باستخدام النيوترونات الصيني سبع سنوات، ويعتزم بدء الإدخال في الخدمة والتشغيل في عامي ٢٠١٦ و٢٠١٨ على التوالي. وفي السويد، يجري تطوير مصدر التشظية الأوروبي. ويقع مصدر التشظية في لوند بالسويد، وتشارك في استضافته الدنمارك، وستقوم بتمويله وتشغيله شراكة مؤلفة من ١٧ بلدا أوروبيا. ويجري حاليا استعراض للتصميم الفني سيستخدم كمخطط لتشييد مصدر التشظية الأوروبي، ومن المقرر أن يبدأ التشييد في عام ٢٠١٣. ومن المتوقع أن يصبح المصدر عاملا في عام ٢٠١٩، وأن يتيح فرصا جديدة للباحثين في عدد كبير من ميادين البحوث في مجال تحاليل المواد على مستويات الكميات السائبة وعلى المستوى الجزيئي. وتشمل هذه الميادين ما يلي: علم الفلزات؛ وعلوم المواد، بما في ذلك المواد النانوية والمواد الجديدة الخاصة ببحوث الطاقة؛ وعلم الآثار؛ والهندسة البيئية؛ وتكنولوجيا الأغذية؛ وكذلك العلوم الكيميائية والبيوكيميائية والصيدلية.

١٢٧- وقد أثر الزلزال وتسونامي اللذان حدثا في اليابان في آذار/مارس ٢٠١١ تأثيراً شديداً على مجمَّع بحوث معجِّلات البروتونات الياباني. وكان العمل جارياً، في عام ٢٠١١، على تقييم الأضرار الناجمة وإصلاحها، ويتوقع استئناف عمليات المجمَّع بعد ذلك.

١٢٨- ويجري تشييد مرافق سنكروترونات جديدة في جميع أنحاء العالم لتلبية الطلب المتزايد من جميع الأوساط العلمية. وقيد التشييد حالياً في لوند بالسويد مرفق السنكروترونات من الجيل الثالث MAX IV، ويُعتزم إدخال المرفق المكتمل في الخدمة في عام ٢٠١٤. ويشمل تصميم المرفق أيضاً خيار ليزر إلكترونات طليقة هو الآن في المرحلة الثانية من مراحل التطوير. كما بدأ مرفق الحزم الضوئية السنكروترونية "ألبا" في إسبانيا إدخال الحزم الإشعاعية في الخدمة خلال عام ٢٠١١، ومن المتوقع أن يستقبل أول مستخدميه في أوائل عام ٢٠١٢.

١٢٩- وأحرزت كل مرافق الجيل الرابع القائمة على ليزر الإلكترونات الطليقة – أي FERMI@Elettra (إيطاليا) وXFEL (ألمانيا) وSwissFEL (سويسرا) – تقدماً كبيراً. ويستطيع المرفق FERMI@Elettra، الذي أُدخل في الخدمة في ربيع عام ٢٠١١، توليد نبضات بالغة القصر (تدوم أقل من 10^{-15} ثانية) في منطقة الطول الموجي من ١٠ نانومترات إلى ١٠٠ نانومتر. وأدى ظهور ليزر الفيمتوثانية إلى ثورة في العديد من مجالات العلوم، من فيزياء الجوامد إلى البيولوجيا. ويحفز هذا المجال البحثي الجديد المتمثل في علوم الأشعة فوق البنفسجية الفراغية الفائقة السرعة (VUV) والأشعة السينية تطوير مصادر جديدة لتوليد نبضات الفيمتوثانية.



الشكل جيم-١ - رسم تخطيطي لليزر الإلكترونات الطليقة FERMI، ومشاهد داخلية للمرفق. (الصورة مقدمة من: FERMI@Elettra).

١٣٠- ويؤدي التعاون الدولي دورا رئيسيا في مجال تطبيقات الشعاع الأيوني. ومن الأمثلة على هذا التعاون مشروع كاريزما (CHARISMA) الذي يموله الاتحاد الأوروبي (البنى التحتية لأبحاث التراث الثقافي المتقدمة: التآزر من أجل اتباع نهج متعدد التخصصات بشأن الحفظ/الترميم). ويجمع مشروع كاريزما بين جهود أهم المتاحف الأوروبية (مثل متحف ديل برادو، والمتحف البريطاني) ومختبرات البحوث (مثل مرفق السنكروترون الفرنسي سولي (Soleil)) وأفرقة البحوث الجامعية، بغية التشارك في الوصول إلى المرافق المتقدمة، وتطوير التقنيات الخاصة بالتراث الثقافي، وتوفير التدريب للباحثين الشباب. وتستخدم عدة أساليب، بما في ذلك التقنيات التحليلية التقليدية والمتقدمة على السواء، لدراسة الخصائص الحجمية والمجهرية والسطحية للمصنوعات اليدوية، مثل اللوحات الفنية والمنحوتات والأشغال المعدنية والخزفيات والمخطوطات والكتب المطبوعة والمواد الأثرية وغيرها.

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٣١- على مدى السنوات الخمس الماضية، وسع عدد من الدول الأعضاء اهتمامه بالطاقة النووية أو التكنولوجيات النووية الأخرى، بما في ذلك ما يلي: النظائر الطبية والصناعية التي تنتجها المفاعلات، واستخدام التكنولوجيات النووية لمزاولة البحوث العلمية المتقدمة. ونتيجة لذلك، أخذت مفاعلات البحوث تصبح عناصر حاسمة الأهمية على نحو متزايد في تطوير البنى التحتية النووية الوطنية أو الإقليمية.[٢١] وإضافة إلى ذلك، نشأ اتجاه نحو زيادة استخدام مفاعلات البحوث القديمة وتجديدها، حيث تعمل الوكالة مع الدول الأعضاء على تحسين استدامة المرافق من خلال تحالفات دولية تتمركز حول مرفق واحد أو أكثر.

---

[٢١] يمكن الاطلاع على معلومات إضافية في الملحق الملائم من ملاحق وثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* على الموقع الإلكتروني GovAtom/GC.

١٣٢- وفي نهاية عام ٢٠١١، كان هناك ٦٧٢ مرفق مفاعل بحوث في مختلف أنحاء العالم، منها ٢٣٢ عاملة، و١٣ مغلقة مؤقتاً، و٢١١ مغلقة بصفة دائمة، و٢١٣ أخرجت من الخدمة، و٣ قيد التشييد.[٢٢] وعلاوة على ذلك، كان هناك مشروعان مخطط لهما، وألغيت ٥ مشاريع. ووفقاً للمناقشات الأولية التي عُقدت مع الوكالة، تنظر ١٤ دولة عضواً (مفصلة أدناه) في إنشاء مفاعلات بحوث جديدة أو في التخطيط لإنشائها. وبالنسبة لكثير من هذه الدول الأعضاء، يشكل ذلك خطوة مبكرة في برنامج وطني للأخذ بالقوى النووية بالتوازي مع التطبيقات السلمية الأخرى للتكنولوجيات النووية. والواقع أن أذربيجان وتونس والسودان والمملكة العربية السعودية في المراحل المبكرة من التخطيط لبناء مفاعل بحوث كجزء من برنامج وطني أكبر للقوى النووية. وقد بدأت أعمال التشييد في مفاعل البحوث المتعدد الأغراض الذي تبلغ قدرته ٥ ميغاواط في الأردن، في حين يهدف مشروع في فيتنام إلى إقامة مفاعل بحوث جديد دعما لبرنامج وطني للقوى النووية. كما أن دولا نووية راسخة – منها الاتحاد الروسي والأرجنتين والبرازيل وجمهورية كوريا وجنوب أفريقيا وفرنسا وهولندا والهند – تبني مفاعلات بحوث جديدة لأغراض تجريبية وتجارية محددة، أو تخطط لبنائها.

١٣٣- ومع إخراج مفاعلات البحوث القديمة من الخدمة والاستعاضة عنها بمفاعلات أقل عدداً تؤدي أغراضاً أكثر تعدداً، يتوقع أن ينخفض عدد مفاعلات البحوث العاملة والمرافق الحرجة إلى ما يتراوح بين ١٠٠ مفاعل و١٥٠ مفاعلاً في موعد أقصاه عام ٢٠٢٠. وسيلزم مزيد من التعاون الدولي لضمان وصول واسع النطاق إلى هذه المرافق واستخدامها بكفاءة. وتبرهن الشبكات الدولية التعاونية أيضاً على أنها مُفيدة في الارتقاء بالمرافق القائمة واستحداث مرافق جديدة. وعليه، فإضافة إلى التحالفات الستة القائمة في مجال مفاعلات البحوث في منطقة البلطيق، ومنطقة الكاريبي (التي تشمل مشاركة من أمريكا اللاتينية)، ووسط أفريقيا، وآسيا الوسطى، وأوروبا الشرقية، ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، من المتوقّع إقامة تحالفات وشبكات جديدة – وضرورية – لزيادة استغلال مفاعلات البحوث وجعل المفاعلات المتبقية مُجدية حقاً. وفي هذا الصدد، تساعد الوكالة الدول الأعضاء أيضاً على إنشاء شبكة مواضيعية من مرافق مفاعلات البحوث التي تستطيع أن تتعاون في أنشطة تشغيل وصيانة مشتركة، بما في ذلك وضع منهجية لتنفيذ خدمة الوكالة لتقييمات تشغيل وصيانة مفاعلات البحوث. والأهداف الرئيسية لبعثات خدمة تقييمات تشغيل وصيانة مفاعلات البحوث هي إجراء استعراضات نظراء شاملة لتشغيل وصيانة مرافق مفاعلات البحوث؛ والتحقق من الامتثال للإجراءات القائمة الخاصة بالمنشآت؛ واقتراح مجالات التحسين؛ وتسهيل النقل المتبادل للمعارف والخبرات بين خبراء هذه البعثات والعاملين في المفاعلات. وستدعم الشبكة أيضاً تبادل المعلومات المتعلقة بإدارة تقادم مفاعلات البحوث، وستتعاون بشأن المشاريع البحثية المنسقة ذات الصلة، وستتقاسم التحديات المشتركة، وستطور الأنشطة المشتركة.

١٣٤- وقد نوقشت القضايا والتحديات الرئيسية التي تواجهها مفاعلات البحوث في الوقت الحاضر مناقشة واسعة النطاق في المؤتمر الدولي المعني بمفاعلات البحوث: إدارتها المأمونة واستخدامها الفعال، المعقود في الرباط بالمغرب من ١٤ إلى ١٨ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١. ويقام هذا الحدث الكبير الذي تنظمه الوكالة والمتعلق بمفاعلات البحوث كل أربع سنوات. وخلص المؤتمر الأخير إلى أمور من بينها أن تحالفات مفاعلات البحوث تتيح الفرصة لتقديم منتجات وخدمات من خلال مفاعلات متعددة لا يتسنى تقديمها من خلال مفاعل وحيد، ولذلك ينبغي أن تستفيد الدول الأعضاء من هذه التحالفات حيثما يكون ذلك ممكناً. وكان استنتاج مهم آخر أن الدول الأعضاء التي تخطط لبناء مفاعل بحوث جديد ينبغي أن تطبق "نهج المعالم" الذي وضعته الوكالة، وأن تضمن وجود خطط الاستغلال السليم والبنية التحتية الرقابية والخاصة بالأمان. ويقدم مصممو وموردو مفاعلات

[٢٢] وفقاً لقاعدة بيانات الوكالة لمفاعلات البحوث (http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/).

البحوث حالياً مجموعة متنوعة من مفاعلات البحوث والمرافق التابعة لها. وقد نُصحوا في المؤتمر باعتماد نهج "الأمان عن طريق التصميم" وبذل قصارى جهدهم لبلوغ الحد الأقصى لبارامترات السلامة والكفاءة، بما يشمل الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما دايتشي. وعلاوة على ذلك فقد لوحظ في المؤتمر، على أساس دراسة استقصائية أعدتها الوكالة عن طريق استبيان، أنه تم في ثلثي مرافق مفاعلات البحوث المشاركة اتخاذ بعض الاجراءات نتيجة لحادث فوكوشيما دايتشي. وأوصى المؤتمر بأن يعيد مشغِّلو مفاعلات البحوث النظر بفعالية في أساس تصميم مفاعلاتهم وتحليل سلامتها، بغية تقييم التغييرات والتحسينات، إن وجدت، التي ينبغي إجراؤها (بما يناسب الموقع وخصائص المرفق) لكي تكون المرافق قادرة على الصمود أمام أحداث خارجية شديدة متعددة.

١٣٥- وطوال عام ٢٠١١، واصلت المبادرة العالمية لتقليص التهديدات، التي ترعاها الولايات المتحدة، تنفيذ مهمتها المتمثلة في الحد من وجود اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع النووي المدني، بما في ذلك من خلال تحويل وقود مفاعلات البحوث والكبسولات المستهدفة المستخدمة لإنتاج النظائر المشعة من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠٠٩ تم توسيع نطاق المبادرة من ١٢٩ مفاعلاً بحثياً لتشمل نحو ٢٠٠ مفاعل في جميع أنحاء العالم تعمل بوقود اليورانيوم الشديد الإثراء، وبنهاية عام ٢٠١١ كان قد تم تحويل ٧٦ من هذه المفاعلات الى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو أُغلقت قبل التحويل. ومن الأمثلة الأخيرة مفاعل بحوث فيتنام الذي حقق الحرجية في ٣٠ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١ باستخدام ٧٢ مجمعة من مجمعات وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، وبذلك اكتمل العمل الذي بدأ في عام ٢٠٠٨ لتحويل قلب المفاعل من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء.

١٣٦- وبدعم من الوكالة، قامت عدة دول أعضاء بإعادة اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم كوقود لمفاعلات البحوث إلى بلد منشئه. وكانت إعادة الوقود إلى الاتحاد الروسي ناجحة جدا في عام ٢٠١٠، حيث تمت إعادة شحن ٢٥٠٠ كيلوغرام من الوقود المستهلك من فينتشا بصربيا إلى الاتحاد الروسي. واستمرت جهود الإعادة إلى المنشأ بنجاح في عام ٢٠١١، الذي تم فيه إنجاز الكثير في دول أعضاء الأخرى. فقد تم التوقيع على عقد ثلاثي مع معهد خاركوف (أوكرانيا) لإعادة آخر مخزون لديه من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج (حوالي ٢٢٤ كلغ) إلى الاتحاد الروسي قبل مارس ٢٠١٢. وواصلت الصين جهودها لتحويل المفاعلات النيوترونية المصغَّرة في البلد من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، وهي تخطط للعمل مع الدول الأعضاء التي اشترت مثل هذه المفاعلات لمساعدتها على تحويل مفاعلاتها ولإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلد منشئه. ووقعت حكومة المكسيك اتفاقين في آب/أغسطس وتشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١ لتحويل مفاعل أبحاث تريغا (TRIGA) الموجود في البلد إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء وإعادة الوقود إلى الولايات المتحدة. وقد تمت الشحنة الأولى في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١١، واستكملت عملية الإعادة إلى بلد المنشأ في شباط/فبراير ٢٠١٢.

١٣٧- واستمر في عام ٢٠١١ أيضا تحويل عمليات إنتاج النظائر الطبية من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأُحرز تقدم كبير. وشهدت الدول الأعضاء نقصا حادا في الموليبدينوم-٩٩ ابتداء من آخر عام ٢٠٠٧ وإلى الربع الثالث من عام ٢٠١٠، وذلك بسبب الاغلاق المتكرر وغير المتوقع لمفاعلات قديمة تستخدم في تشعيع الكبسولات المستهدفة ولمرفق لتجهيز كبسولات اليورانيوم المستهدفة. وبعودة المفاعلات ومرافق الإنتاج إلى العمل وانضمام منتجين جدد إلى مجموعة الموردين الصغيرة نسبيا، خفت حدة النقص في عام ٢٠١١ وعاد المنتجون إلى تحويل كبسولات الموليبدينوم-٩٩ المستهدفة من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء. وأفادت أستراليا بإحراز تقدم في جهودها لزيادة إنتاج الموليبدينوم-٩٩ القائم على اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأكدت مصر في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١١ نجاح اختبارات التشعيع

والإدخال في الخدمة لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ من كبسولات اليورانيوم الضعيف الإثراء المستهدفة. وواصلت جنوب أفريقيا انتاجها التجاري للموليبدينوم-٩٩ المصنوع من كبسولات اليورانيوم الضعيف الإثراء المستهدفة، في حين بدأ أيضاً اثنان من كبار منتجي النظائر الطبية (بلجيكا وهولندا) وضع وتنفيذ خططَ عملٍ لتحويل عمليات إنتاجهما ذات النطاق التجاري من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء. وعلاوة على ذلك، أكملت الوكالة في عام ٢٠١١ مشروعاً بحثياً منسقاً مدته ست سنوات ساعد سبع دول أعضاء (باكستان ورومانيا وشيلي وكازاخستان وليبيا وماليزيا ومصر) في جهودها لتقييم جدوى الإنتاج الوطني لإمدادات ضيقة النطاق من الموليبدينوم-٩٩ باستخدام من اليورانيوم الضعيف الإثراء القائم على الانشطار أو عن طريق أساليب التنشيط النيوتروني. وأخيراً، اكتسبت البحوث في مجال طرق إنتاج الموليبدينوم-٩٩ البديلة المستندة إلى تقنيات المعجِّلات بعض الزخم خلال عام ٢٠١١، ويرجح أن تستمر في السنوات المقبلة.

١٣٨- والأنواع المتقدمة الفائقة الكثافة من وقود اليورانيوم-الموليبدينوم التي يجري تطويرها في الوقت الراهن مطلوبة لتحويل مفاعلات البحوث العالية الفيض والعالية الأداء. وعلى الرغم من إحراز تقدّم كبير في تطوير وتأهيل أنواع وقود اليورانيوم-الموليبدينوم في عام ٢٠١١، يلزم بذل المزيد من الجهود وإجراء المزيد من الاختبارات، وخصوصاً في سياق برامج التشعيع وفحوصات ما بعد التشعيع، لتحقيق التوافر التجاري في الوقت المناسب لأنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء المؤهلة ذات الكثافة العالية جداً.

دال- الأغذية والزراعة

دال-١- الإنتاج الحيواني والصحة البيطرية

١٣٩- اتخذ مؤتمر منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو) في حزيران/يونيه ٢٠١١ قراراً بإعلان القضاء على مرض الطاعون البقري في العالم. واحتفلت الوكالة بهذا الإنجاز الهام أثناء الدورة العادية الخامسة والخمسين لمؤتمرها العام في أيلول/سبتمبر ٢٠١١. وقد قدمت التقنيات النووية والمتصلة بالمجال النووي مساهمة هامة في القضاء على مرض الطاعون البقري، وذلك بتطوير الاختبارات التشخيصية وتنفيذها. وعلى الخصوص، أدى القياس المناعي الإنزيمي، وهو اختبار قادر على الكشف عن الأجسام المضادة الخاصة بالطاعون البقري، وكذلك عن الفيروس، دوراً جوهرياً في رصد حملة التطعيم والحالة المرضية لقطعان الحيوانات، وفي مراقبة مجموعات الماشية للتأكد من خلوها من هذا المرض. وكان هذا الاختبار يقوم على وسم الأجسام المضادة بالنظائر المشعة، الذي سبق تطويره، باستخدام الفوسفور-٣٢ والكبريت-٣٥ لوسم الأجسام المضادة الثانوية. وتستخدم في نظم القياس المناعي الإنزيمي الحالية مكونات مشعَّعة (أمصال ومستضدات) لتعطيل العوامل التي يمكن أن تكون معدية ولضمان أمان الاختبارات المصلية. وهذه التقنيات مفيدة أيضا في التصدي للأمراض الحيوانية الأخرى العابرة للحدود.

١٤٠- أما التتبع التقليدي لمسارات هجرة الطيور البرية، باستخدام واسمات خارجية تقليدية أو تكنولوجيات ساتلية (الوسم بوضع حلقات أو بوضع جهاز إرسال) فلا يمكن أن يعطي معلومات إلا عن عدد محدود من الطيور البرية التي وُسمت على هذا النحو. وتم في عام ٢٠١١ إثبات أن تكنولوجيا التتبع بالنظائر المستقرة يمكن أن تعطي معلومات عن كل طائر يؤسر أو يموت. وأخذ يتضح أن هذا مفيد للغاية في الاستقصاءات الوبائية لأنفلونزا الطيور (التتبع للوصول إلى مصدر التفشي)، لأن هذا المرض يمكن أن يُنقل بسهولة عبر مسافات طويلة في فترة قصيرة نسبياً من الزمن. وهناك اهتمام متزايد باستخدام هذه التكنولوجيا لتتبع منشأ المنتجات الحيوانية المعدة للتجارة، بصورة مستقلة عن الوثائق القانونية المطلوبة لاستيراد هذه المنتجات وتصديرها.

وعلى وجه التحديد، في حالة من الطيور، يمكن أن تختلف أنساق النظائر المستقرة للريش والمخالب والمناقير تبعا لأنماط حركة الطيور وغذائها، وهذا يتيح تحديد مسارات الهجرة. وقد أجري في عام ٢٠١١ "اختبار للتحقق من المفهوم"، وسيتم الشروع في أنشطة البحوث في عام ٢٠١٢ من خلال مشروع بحثي منسق، بغية دمج البيانات المتحصل عليها من تحديد أنساق النظائر المستقرة مع البيانات المتحصل عليها من الكشف عن الفيروس في العينات البيئية (من البراز ومن الخزانات المائية الطبيعية)، ورسم الشفرة العمودية الجينية. وسيتيح ذلك الكشف المتزامن عن مسارات الهجرة وأنواع الطيور المعنية ووضعيتها كناقل للمرض، باستخدام استراتيجيات أكثر مرونة لأخذ العينات.

١٤١- وعلى خلاف النتائج الواعدة المتحصل عليها باستخدام اللقاحات المشعَّعة بأشعة غاما فيما يتعلق بالكائنات الممرضة البكتيرية (*Brucella abortus*, *Listeria monocytogenes*)، والأولية (*Trypanosoma anulata*, *Schistosoma japonicum*, *Plasmodium*, *Theileria parva*) والطفيلية (*Dictiocaulus viviparous*, *Dictiocaulus filarial*) فإن إنتاج اللقاحات الفيروسية المشعَّعة لم يدرس بعد دراسة كافية. وقد أظهرت النتائج التي قدمها علماء من كلية العلوم الجزيئية والعلوم الطبية البيولوجية في *جامعة أديلايد* بأستراليا خلال اجتماع الخبراء الذي عقد في مقر الوكالة في فيينا بالنمسا في نيسان/أبريل ٢٠١١ أن لقاحات الأنفلونزا المعطلة بأشعة غاما يمكن أن تحفز استجابة مناعية ذات نطاق أوسع كثيرا من نطاق الاستجابة المناعية التي تحفزها اللقاحات التقليدية (المعطلة أو الموهنة). وهذا يشمل المناعة المتواسطة بالخلايا التائية والمناعة المتواسطة بالخلايا البائية، في حين أن اللقاحات التقليدية لا تحفز أساساً سوى المناعة المتواسطة بالخلايا البائية. وعلاوة على ذلك فإن هذه اللقاحات تُظهر تفاعلية مشتركة بين الأنواع الفرعية المختلفة من الأنفلونزا، وبالتالي توسع نطاق الأنواع التي تشملها الحماية. ومن المتوقَّع أنه في المستقبل القريب سيكون من المرجح أن إجراء المزيد من البحوث بشأن جدوى استخدام التشعيع لإنتاج اللقاحات الفيروسية (لداء الحمى القلاعية، وحمى وادي الصدع، والإنفلونزا، وغيرها من مسببات الأمراض الفيروسية) سيقدم مساهمة كبيرة في تحسين استراتيجيات مكافحة أمراض حيوانية معينة.

١٤٢- واستجابة لحادث فوكوشيما الذي وقع في عام ٢٠١١، تعمل الوكالة على تحسين البرامج الحاسوبية الموجهة إلى جمع العينات وتحليلها وتفسيرها واتخاذ القرارات فيما يتعلق بتلوث الأغذية في حال حدوث طارئ نووي أو إشعاعي. وقد صُممت هذه البرامج الحاسوبية في شكل قاعدة بيانات تكامل مرجعي، باستخدام أرقام فريدة للربط بين البارامترات المنفردة في عملية أخذ العينات/الإبلاغ. ولذلك فإن الفكرة هي أن البرامج الحاسوبية ستكون قادرة على أن تولِّد في الوقت الحقيقي العديد من التقارير التي يحددها المستخدم. وإضافة إلى ذلك، تم تطوير حزم معلومات شاملة للدول الأعضاء لمساعدتها على تنفيذ التدابير العلاجية المتعلقة بالمنتجات الحيوانية والمنتجات الزراعية الأخرى. وستشكل هذه البرامج الحاسوبية، عند اكتمالها، منصة حاسوبية لتزويد الدول الأعضاء بالمبادئ التوجيهية لرفع مستوى خططها الوطنية للطوارئ، فضلاً عن تعزيز التدابير المضادة الزراعية بعد وقوع حادث نووي.

دال-٢- إدارة التربة والمياه

١٤٣- من المتوقع أنه بحلول عام ٢٠٥٠ سيكون عدد سكان العالم قد بلغ ٩ بلايين نسمة، وهو ما يمثل زيادة قدرها حوالي بليوني نسمة خلال فترة ٣٩ عاماً. وهذا يعني زيادة بنسبة ٥٠ في المائة متوقعة في الطلب على المياه. وتستخدم الزراعة حالياً ١١ في المائة من مساحة اليابسة في العالم لإنتاج المحاصيل، وتمثل ٧٠ في المائة من مجموع المياه المسحوبة من مستودعات المياه الجوفية ومجاري المياه والبحيرات. وعلى أساس الاتجاهات

الحالية في تحقيق مكاسب في كفاءة وإنتاجية استخدام المياه في الزراعة، من المتوقع أن تستوجب تلبية هذا الطلب زيادة كفاءة استخدام المياه في الزراعة، فضلاً عن تحسين الممارسات الخاصة بحماية نوعية المياه في الأراضي الزراعية. ويمكن أن يساعد التقدم في مجال التكنولوجيا النووية على التصدي لهذه التحديات.

دال-٢-١- تقدير فواقد المياه وآثارها على الملوحة في إطار أنظمة الري بالغمر من خلال استخدام النظائر المستقرة

١٤٤- أظهرت الدراسات الأخيرة[٢٣] أن قياسات التغيرات في البصمات النظيرية للمياه (الديوتيريوم والأوكسيجين-١٨) في مختلف المراحل أثناء الري بالغمر يمكن استخدامها لتقدير فواقد المياه التي تحدث عن طريق التبخّر والتعرّق من الأراضي المزروعة بالمحاصيل لأنواع مختلفة من التربة ومن معدلات الري. ويستند هذا النهج إلى المبدأ الذي مفاده أن جزيئات الماء المحتوية على النظائر الأخف (الهيدروجين-١ والاوكسجين-١٦) تغادر سطح السائل بسهولة أكبر من السهولة التي تغادره بها جزيئات الماء المحتوية على النظائر الأثقل (الديوتيريوم والأكسجين-١٨) أثناء التبخر، وهذا يجعل المياه المتبقية مثراة بالنظائر الأثقل. وقد أظهرت هذه الدراسات أيضاً أن رصد الديوتيريوم والأكسجين-١٨ وتركيزات الكلوريد في مياه الري ومياه التربة والمياه تحت السطحية مع مرور الوقت يمكن أن يساعد على تقييم آثار التبخر والتعرّق على تطور ملوحة التربة في إطار نظم الري بالغمر. وتشير النتائج المتحصل عليها من أربعة مواقع دُرست في استراليا في عام ٢٠١١ إلى أن التعرّق هو السبب الغالب لفقدان المياه، وبالتالي فهو أكبر مساهم في الأثر الملوحي مقاسا بازدياد تركيز الملح في التربة أثناء فترة الدراسة البالغة ١٤ يوماً خلال الري بالغمر. وكانت الآثار الملوحية الناجمة عن التعرّق (٠,٤ إلى ٢,٦ طن من الملح للهكتار) أكبر بثلاثة أضعاف إلى ٥٠ ضعفاً من تلك الناجمة عن التبخر (٠,٠١ إلى ٠,٣ طن من الملح للهكتار) من مياه الري ومياه التربة.

دال-٢-٢- قياس رطوبة التربة على نطاق منطقة بكاملها باستخدام نيوترونات الأشعة الكونية

١٤٥- المعلومات عن محتوى الرطوبة في التربة على نطاق منطقة بكاملها مفيدة لتقدير احتياج مختلف المحاصيل إلى المياه، ولذلك تساعد على تحديد مواعيد الري الواسع النطاق وتوقعات غلة المحاصيل ودراسات تغير المناخ. وكان الحصول على هذا القياس يشكل تحديا في الماضي لأن معظم الأجهزة المتوفرة ذات نطاق ضيق من حيث الكشف عن رطوبة التربة، لا يزيد قطره على ٠,٠٥-١ متر حول الأجهزة. ونتيجة لذلك، يلزم عدد كبير من القياسات، الأمر الذي يمكن أن يستغرق الكثير من الوقت والتكلفة. ويشكل تطوير نهج نيوترونات الأشعة الكونية مؤخراً في استراليا والولايات المتحدة الأمريكية اختراقاً.[٢٤] وينطوي هذا الأسلوب على قياس النيوترونات السريعة المتولدة طبيعياً من الأشعة الكونية وتلك الناتجة من التربة من جراء التصادم مع المياه الموجودة على سطح الأرض أو بالقرب منه، بحيث يتسنى رسم خريطة لحالة رطوبة التربة على مساحة يبلغ قطرها حوالي ٧٠٠ متر وبعمق يصل إلى ٧٠ سم، وهذا يشمل مناطق تجذّر معظم المحاصيل. ونتيجة لذلك، يمكن أن يكون هذا الجهاز الجديد مكملاً لأجهزة القياس النقطية، مثل المسبر النيوتروني لقياس رطوبة التربة، لإعداد قياس موثوق لمحتوى الرطوبة في التربة على مستوى الحقل بأكمله. وعلاوة على ذلك فإن مسبر نيوترونات الأشعة الكونية المستخدم في هذه التقنية، والذي يشار اليه باسم "كوزموس" (COSMOS) (اختصاراً

---

[٢٣] Van den AKKER, J. et al.: Salinity Effects from Evaporation and Transpiration under Flood Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering **137** (2011):1-11.

[٢٤] DESILETS, D. et al. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. Water Resour. Res., **46** (2010): W11505, doi:10.1029/2009WR008726.

لعبارة "نظام مراقبة رطوبة التربة بالأشعة الكونية")، متين ويمكن حمله بسهولة إلى داخل الحقل، كما أنه يدمج بيانات رطوبة التربة على مساحة أكبر بألف ضعف من المساحة التي يغطيها المسبر النيوتروني لقياس رطوبة التربة (SMNP). وبالتالي فإن تقنية كوزموس هي تقنية أقل استهلاكا للوقت وأكثر اقتصادا لقياسات رطوبة التربة على نطاق منطقة بكاملها. ويمكن أيضاً استخدامها لتقييم مدى اتساق توزيع المياه وكفاءة نظم الري الواسعة النطاق.

الشكل دال–١ – تركيب نظام "كوزموس" في مرعى في أستراليا (الصورة مقدمة من:
Dr Chris Smith, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO): Land and Water, Canberra

دال-٢-٣- البلوتونيوم (البلوتونيوم-٢٣٩ والبلوتونيوم-٢٤٠) – إمكانية استخدام نويدة مشعة متساقطة لتقييم تآكل التربة وتدهور الأراضي

١٤٦- أظهرت الدراسات الأخيرة [٢٥،٢٦] أنه يمكن استخدام نظيرين من نظائر البلوتونيوم تنبعث منهما جسيمات ألفا، وهما البلوتونيوم-٢٣٩ والبلوتونيوم-٢٤٠ (اللذين يبلغ عمرهما النصفي ٢٤١١٠ سنوات و٦٥٦١ سنة، على التوالي) لتعقّب حركة التربة والرواسب في الأجسام المائية. وهذان النظيران مماثلان للسيزيوم-١٣٧ [٢٧] من حيث أنهما من النويدات المشعة المتساقطة الناشئة من اختبارات الأسلحة النووية، ويوجدان عادة في معظم أنواع التربة، ولذلك ليست هناك حاجة لوسم التربة بهذين النظيرين. غير أن الميزة الرئيسية للبلوتونيوم-٢٣٩ والبلوتونيوم-٢٤٠ مقارنة بالسيزيوم-١٣٧ هي أن العمر النصفي لنظيري البلوتونيوم هذين أطول من العمر النصفي للسيزيوم-١٣٧ (٣٠ عاما)، الأمر الذي يضمن توافر البلوتونيوم في الأجل الطويل لكي يستخدم لتتبع حركة التربة والرواسب. ويلزم إجراء المزيد من الدراسات لاختبار هذين النظيرين في إطار مجموعة من الظروف الايكولوجية – الزراعية.

---

[٢٥] TIMS, S.G. et al.: Plutonium as a tracer of soil and sediment movement in the Herbert River, Australia. Nucl .Instrum Meth Section B. **268** (2010) 1150-1154

[٢٦] HOO, W.T et al. 2011: Using fallout plutonium as a probe for erosion assessment. J. Environ. Radio. **102** (2011), .937-942

[٢٧] ZUPANC, V and MABIT, L. 2010. Nuclear techniques support to assess erosion and sedimentation processes: preliminary results of the use of ^{137}Cs as soil tracer in Slovenia. Dela, **33** (2010) 21-36.

دال-٣- الممارسات والتكنولوجيات العلاجية الزراعية الخاصة بالتخفيف من آثار التلوث الإشعاعي

١٤٧- نُفِّذت التدابير الزراعية المضادة الخاصة بمكافحة التلوث الإشعاعي لأول مرة على نطاق واسع بعد وقوع حادث كيشتيم في عام ١٩٥٧ في مصنع مایاك لإعادة معالجة الوقود في الاتحاد السوفياتي السابق[٢٨]. وتم تكييف هذه الممارسات وزيادة تطويرها ونُفذت في المناطق المتضررة من حادث تشيرنوبيل في عام ١٩٨٦. واقتُرحت إجراءات علاجية زراعية جديدة لأنواع التربة الصالحة للزراعة والمراعي قائمة على تقييم لخواص التربة (الشكل دال-٢). ووُضعت أيضا ونُفذت على نطاق واسع في المناطق المتضررة من الحادث تدابير مضادة فعالة للحد من تلوث المنتجات الحيوانية – ومن هذه التدابير استخدام رابطات نويدات مشعة محددة لمعالجة أغذية الحيوانات (مثلا استخدام سداسي سيانوفيرات الأمونيوم الحديدي للحد من امتصاص السيزيوم المشع في القناة الهضمية للحيوانات الراعية)، وإضافة نظائر مستقرة مثل الكالسيوم لمنع امتصاص السترونشيوم المشع، والتغذية النظيفة، والرصد الحي للحيوانات.

الشكل دال-٢ - استخدام الخيارات العلاجية القائمة على التربة في مرج خثّي رطب في مستوطنة يلنه بمنطقة ريفنو بأوكرانيا (الصورة مقدمة من المعهد الأوكراني لعلم الأشعة الزراعي في كييف).

١٤٨- ونتيجة لذلك، تم اقتناء وتحليل كمية كبيرة من البيانات عن فعالية التدابير المضادة الزراعية، إلى جانب معلومات عن العوامل المساعدة مثل الموارد المطلوبة والتكاليف. وإضافة إلى ذلك، بُذلت جهود كبيرة لتحديد العديد من العوامل الأخرى التي تؤثر على التطبيق المحتمل لمختلف الخيارات العلاجية. ومن هذه العوامل الظروف البيئية المختلفة، وخصائص النويدات المشعة، واستخدام الأراضي في المناطق الملوثة، والممارسات العلاجية التي استخدمها بالفعل المزارعون المحليون وأصحاب المصلحة. ويمكن أن يكون لكل هذه العوامل تأثير كبير على فعالية التدابير المضادة الزراعية. وتم مؤخرا استعراض هذه الاستنتاجات والدروس المستفادة

[٢٨] Alexakhin, R.M., "Remediation of areas contaminated after radiation accidents and incidents", Remediation of contaminated environments (Voigt, G. and Fesenko, S,. Eds.), Elsevier, Amsterdam (2009) 177-222, Ch. 4.

استعراضاً نقدياً من جانب الوكالة في "تقرير محفل تشيرنوبيل"[٢٩] وفي بعض استعراضات المتابعة من جانب الوكالة ومنظمات دولية أخرى.[٣٠]

١٤٩- وقد طرح حادث فوكوشيما الذي وقع في اليابان في عام ٢٠١١، والذي أثر تأثيرا كبير على منطقة شاسعة من الأراضي الزراعية، تحديات جديدة. ورغم أن العديد من الخيارات التي استُخدمت بفعالية عقب حادثي كيشتيم وتشيرنوبيل (التدابير المستندة إلى التربة، والتدابير الإصلاحية الكيميائية – الزراعية) يجري اختبارها، وتنفيذها جزئياً، في منطقة فوكوشيما، فإن الظروف المعيَّنة للمنطقة المتأثرة تستدعي اتباع نُهُج جديدة لضمان أمان الأغذية واستدامة الإنتاج الزراعي. وعلى الخصوص، اقتُرحت تقنيات جديدة لمعالجة حقول الأرز المغمورة بالمياه.

١٥٠- ومن المعروف جيدا أن إزالة التربة السطحية التقليدية تنتج كميات كبيرة من التربة المتخلص منها. وقد اختُبر استخدام محلول لتصليب التربة في اليابان كنهج لإزالة طبقات من التربة السطحية أكثر ضحالة وبسهولة أكبر (الشكل دال-٣). ومزية هذه التكنولوجيا هي أنها تتيح إزالة أسرع وأكفأ للنشاط الإشعاعي (أكثر من ٨٠٪) من التربة الملوثة. ولا يزيد الوقت اللازم لتنفيذ المعالجة عن عشرة أيام فقط للهكتار الواحد (بما في ذلك الوقت اللازم للسماح التربة السطحية بالتصلب بعد استخدام سائل التصليب).

الشكل دال-٣- اختبار إزالة التربة السطحية بعد استخدام سائل لتصليب التربة (الصورة مقدمة من وزارة الزراعة والحراجة ومصائد الأسماك/الوكالة اليابانية للطاقة الذرية/المنظمة الوطنية لبحوث الزراعة والأغذية، اليابان).

١٥١- وهناك تقنية جديدة ثانية يجري اختبارها في اليابان مصممة خصيصا للتربة المغمورة بالمياه (أي حقول الأرز). ويتم تخفيض مستويات النشاط الإشعاعي في التربة بخلط الطبقة الرقيقة من التربة السطحية في ظروف الانغمار بالمياه، وتصريف التربة المعلَّقة (الجزء المؤلف من الصلصال إلى الغرين الخفيف)، وفصل الرواسب من المياه، وأخيراً التخلص من الرواسب وحدها (الشكل دال-٤).

---

[٢٩] http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf.

[٣٠] Fesenko, S.V., Alexakhin, R.M., Balonov, M.I., Bogdevich, I.M., Howard, B.J., Kashparov, V.A., Sanzharova, N.I., Panov, A.V., Voigt, G., Zhuchenko, Y.M., An extended review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident, Sci. Total. Environ. **383** (2007) 1-24.

الشكل دال-٤- تصريف التربة المعلَّقة من حقول الأرز في اليابان كخيار علاجي (الصورة مقدمة من وزارة الزراعة ومصائد الأسماك والأغذية - المنظمة الوطنية لبحوث الزراعة الأغذية).

١٥٢- وتراوحت كفاءة هذه التقنية في الحد من تركيز السيزيوم المشع في التربة ومعدل الجرعة الخارجية، كما لوحظ في عام ٢٠١١ في موقع اختبار في ولاية فوكوشيما، بين ١٥ في المائة و٧٠ في المائة، تبعا لخصائص التربة، أي محتواها من الطين والدُّبال. وينبغي ملاحظة أن هذه التقنية تولد نفايات تقل بما يصل إلى ٣٠ مرة مما تولده التقنيات التي تعتمد على الإزالة التقليدية لأربعة سنتيمترات من طبقة التربة السطحية. ولذلك تقلل هذه الطريقة من تدهور خصوبة التربة.

دال-٤- بدائل التشعيع بأشعة غاما لأغراض تقنية الحشرة العقيمة[٣١]

١٥٣- كانت تُستخدم عادة لتعقيم الحشرات، كجزء من برامج مكافحة الآفات الحشرية، أجهزة التشعيع بالكوبالت-٦٠ أو السيزيوم-١٣٧ التي تنتج أشعة غاما المؤينة. بيد أنه، نتيجة للتعقيدات والصعوبات اللوجستية المتزايدة في شحن النظائر المشعة عبر الحدود، بدأ بذل جهود للبحث عن خيارات أخرى لتعقيم الحشرات لاستخدامها في برامج مكافحة الآفات الحشرية. والأجهزة المنخفضة الطاقة والقائمة بذاتها للتشعيع بالأشعة السينية، التي تستخدم في المعاهد الطبية لتشعيع الدم، لا تنبعث منها الأشعة السينية إلا عندما يتم تشغيل التيار الكهربائي، وتكون طاقة الأشعة السينية في حدود بضع مئات كيلو الكترون فولط، وتتطلب تدريعاً أقل بكثير من التدريع الذي تتطلبه أجهزة التشعيع بأشعة غاما.

١٥٤- وقد أجريت تجارب تعقيم لمقارنة آثار الكوبالت-٦٠ أو الأشعة السينية على الحشرات. ولم تسفر المعلومات بشأن الخصوبة المتبقية ومعدلات ظهور الحشرات البالغة والقدرة على المنافسة في التزاوج بين الذكور المعالجة بأشعة غاما والذكور المعالجة بالأشعة السينية التي تتنافس على الإناث ذوات الخصوبة في الأقفاص الميدانية عن الكشف عن اختلافات كبيرة حتى الان. وقد زُودت بالفعل عدة دول أعضاء في الوكالة بآلات تتضمن جميع التعديلات التي تم تحديدها خلال مرحلة التحقق. ومع ذلك ستلزم عدة سنوات لجمع بيانات كافية للتأكد مما إن كان هذا البديل صالحا حقيقة لتعقيم الحشرات في ظروف التشغيل الروتيني الواسع النطاق.

---

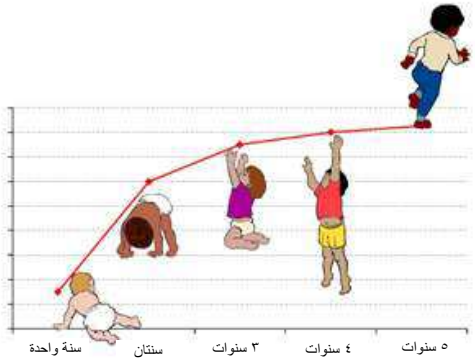
[٣١] يمكن الاطلاع، في الموقع GovAtom، على معلومات إضافية في الوثائق ذات الصلة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢*.

هاء- الصحة البشرية

هاء-١- التغذية

هاء-١-١- نوعية النمو خلال أول ١٠٠٠ يوم تؤثر في صحة الشخص لاحقا خلال حياته

١٥٥- هناك اعتراف متزايد بأن التغذية المناسبة خلال الأيام الألف الأولى من العمر، من الحمل إلى إكمال سنتين، يمكن أن يكون لها تأثير عميق في قدرة الطفل على النمو والتعلّم، وفي احتمال الإصابة بأمراض مزمنة كالسكري وأمراض القلب في وقت لاحق من العمر.[٣٢] والمعايير الحالية لتقييم نمو الطفل قائمة أساسا على الوزن والطول أو الارتفاع (منظمة الصحة العالمية، جنيف، ٢٠٠٦[٣٣] و ٢٠١١[٣٤]). ويمكن للمهنيين العاملين في مجال الصحة مراقبة نمو الطفل باستخدام رسوم بيانية توضح النمو الطبيعي من حيث الوزن والطول أو الارتفاع بالنسبة لسن الطفل. وفي حين أن هذه القياسات البشرية ضرورية فإن هناك حاجة إلى تعريف للنمو الصحي يشمل مقاييس لـ "نوعية النمو". ويرتبط النمو السليم بتطور الأنسجة النحيلة، في حين أن فائض الدهون في الجسم مرتبط بازدياد احتمال الإصابة بالأمراض غير المعدية بعد البلوغ. إلا أنه لا توجد حاليا أية معايير لتكوين الجسم لدى الأطفال.



الشكل هاء-١- صورة مأخوذة من WHO Child Growth Standards تظهر تطور نمو الطفل في السنوات الخمس الأولى من حياته. وتستند هذه المعايير إلى بيانات (الطول والوزن والسن) مستمدة من حوالي ٨٥٠٠ من الأطفال الأصحاء الذين يتغذون بالرضاعة الطبيعية وأطفال من خلفيات إثنية وبيئات ثقافية واسعة الاختلاف: البرازيل وعمان وغانا والنرويج والهند والولايات المتحدة الأمريكية. (حقوق الطبع والنشر لمنظمة الصحة العالمية، ٢٠٠٦)

١٥٦- وفيما يخص العديد من البلدان التي تمر بمرحلة انتقالية، حدث تحسن في وزن الأطفال دون حدوث تحسن متناسب في طولهم، ونتيجة لذلك فإنه إذا تم قياس الطول فإن الأطفال ذوي الوزن العادي يتم توصيفهم

---

[٣٢] انظر موقع "1,000 Days" على العنوان التالي: http://www.thousanddays.org/.

[٣٣] WHO Multicentre Growth Reference Study Group. WHO Child Growth Standards: Length/height-for-age, weight-for-age, weight-for-length, weight-for height and body mass index-for-age: Methods and development. Geneva: منظمة الصحة العالمية، ٢٠٠٦. انظر الموقع: http://www.who.int/childgrowth/standards/technical_report/en/.

[٣٤] WHO Anthro (version 3.2.2, January 2011): Software for assessing growth and development of the world's children. See: http://www.who.int/childgrowth/software/en/.

بقدر متزايد بأنهم قصار القامة وسمان نسبياً. وهذا يثير القلق بشأن "نوعية النمو". فالأطفال الرضع ذوو الوزن أو الطول المتماثل يمكن أن يختلفوا كثيراً من حيث تكوين الجسم. وعلى سبيل المثال، يكون الأطفال الهنود صغارا ونحفاء عند الولادة مقارنة بالأطفال الأوروبيين حديثي الولادة، ولكن تكون لديهم دهون أكثر في الجسم، ويكونون أكثر عرضة لخطر الإصابة بالأمراض غير المعدية في وقت لاحق خلال حياتهم بعد البلوغ.[٣٥] فمن الواضح أنه على الرغم من أن قياسات الطول والوزن تقدم معلومات مفيدة فإن من الضروري تقييم المكونات التي تسهم في وزن الجسم، وخصوصاً المعدلان النسبيان للكتلة الخالية من الدهون وكتلة الدهون.

١٥٧- وتتيح التقنيات النووية، مثل التخفيف بالنظائر المستقرة، مزايا من حيث حساسيتها وخصوصيتها، لرصد التغيرات الصغيرة نسبياً في تكوين الجسم، ويمكن استخدامها، مثلاً، لتقييم برامج التدخل الغذائي المصممة لمكافحة العبء المزدوج الناجم عن الأمراض المتصلة بالتغذية، حيث يجتمع سوء التغذية الحاد مع البدانة والأمراض المزمنة ذات الصلة.[٣٦]

١٥٨- وفي تشيلي، استُخدمت تقنيات النظائر المستقرة لتقييم برامج التدخل الوطنية الهادفة إلى الحد من انتشار البدانة لدى الأطفال الذين لم يبلغوا سن الالتحاق بالمدارس بعد. وخُفض معدل انتشار البدانة لدى الأطفال (الذين تتراوح سنهم بين عامين و٣ أعوام) الملتحقين بمراكز الرعاية النهارية الوطنية من ١٠,٤ في المائة إلى ٨,٤ في المائة. واعترافاً بالحاجة إلى التدخل في وقت أبكر، أنشئ برنامج جديد في عام ٢٠١١ ستُستخدم فيه تقنيات النظائر المستقرة للتحقق من صلاحية "برنامج نمو الجهاز الحركي وتعزيز النشاط الجسدي" للأطفال الذين تتراوح سنهم بين ٦ أشهر و٢٤ شهراً.

١٥٩- وقد أعدت الوكالة في عام ٢٠١١، بالتعاون الوثيق مع خبراء دوليين، مبادئ توجيهية لتوحيد التقنيات المستخدمة لتقييم تكوين الجسم لدى الرضع وصغار الأطفال.[٣٧] وتوفر هذه المبادئ التوجيهية خطوة أولى ضرورية نحو وضع معايير لتقييم نمو وتغذية الرضع وصغار الأطفال باستخدام التقنيات النووية وغير النووية لتقييم تكوين الجسم.

هاء-٢- أوجه التقدم في استخدام الطب الإشعاعي لعلاج السرطان

هاء-٢-١- العلاج الإشعاعي العصري يتطلب إدارة جيدة للبيانات

١٦٠- على مدى العقد الماضي، أصبحت تكنولوجيا العلاج الإشعاعي للأورام متزايدة التعقُّد والحوسبة. وهناك عدد من الأجهزة العلاجية المساعدة والتكميلية، التي تولج يدوياً في الحزم الإشعاعية بغية تغيير تدفقها (شدتها) عمداً، وبذلك تحسين العلاج، متاحة الآن في شكل أجهزة رقمية أيضاً. فمثلاً يحدَّد شكل حزمة الإشعاعات حالياً، في كثير من الأحيان، بواسطة مسدِّدات متعددة الصحائف، لا تشكل المجال فحسب بل يمكن أيضاً أن تتحرك

---

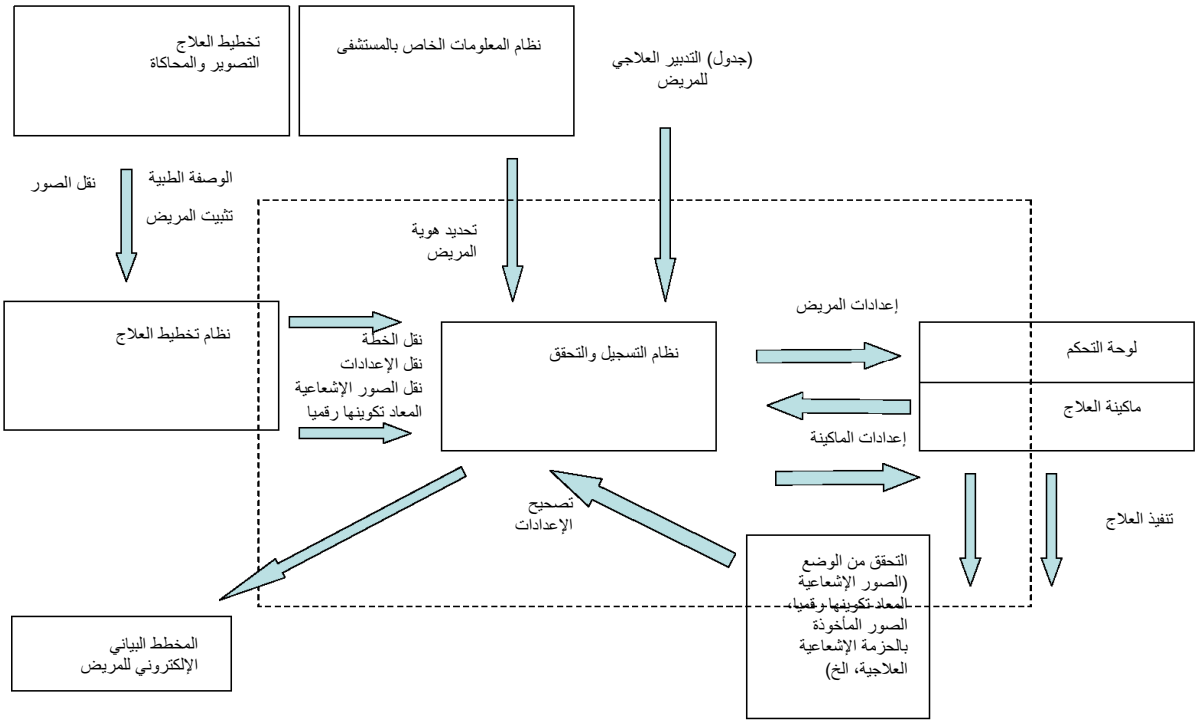
[٣٥] YAJNIK, C.S. et al., Neonatal anthropometry: the thin–fat Indian baby. The Pune Maternal Nutrition Study, Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord. 27 2 (2003) 173–180.
WORLD HEALTH ORGANIZATION, Appropriate body-mass index for Asian populations and its implications for policy and intervention strategies, Lancet 363 (2004) 157–163.

[٣٦] CORVALAN, C. et al., Impact of growth patterns and early diet on obesity and cardiovascular risk factors in young children from developing countries, Proc. Nutr. Soc. 68 3 (2009) 327–337.
UAUY, R., KAIN, J. and CORVALAN, C., How can the Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) hypothesis contribute to improving health in developing countries?, Am. J. Clin. Nutr. 94 6 (2011) 1759S–1764S

[٣٧] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، Body Composition Assessment from Birth to Two Years of Age (قيد الطبع).

داخل المجال أثناء العلاج. ولم يعد ممكنا برمجة هذه العلاجات المعقدة وتنفيذها يدوياً، بالنظر إلى عدد البارامترات التي تحدِّد علاج كل مريض يتلقى العلاج الإشعاعي. ومن ثم فإن السجلات الإلكترونية للمرضى ضرورية. وتتضمن هذه السجلات ليس فقط التفاصيل الإدارية الخاصة بالمرضى وسجلات الوصفات الطبية الاشعاعية الخاصة بهم والجرعات الإشعاعية التي يتلقونها بل أيضا تفاصيل جميع البارامترات التي تحدد كل مجال من المجالات الإشعاعية الخاصة بهم. وتلزم تدابير أمنية هرمية محكومة بكلمة سر لضمان أن تبقى هذه السجلات سليمة ومحتوية على المعلومات الصحيحة بغية ضمان أن يتم تنفيذ العلاج بطريقة يمكن تكرارها كل يوم خلال فترة العلاج الإشعاعي، التي تستغرق عادة بضعة اسابيع.

١٦١- و"نظام التسجيل والتحقق" (RVS) هو نوع من نظم إدارة قواعد بيانات المرضى الذين يتلقون العلاج الإشعاعي يشكل عنصراً أساسياً في معظم أقسام العلاج الإشعاعي الرقمي العصرية. وتربط هذه النظم بين جميع المعدات الخاصة بصور العلاج الإشعاعي وتخطيط العلاج وتنفيذه (انظر الشكل هاء-٢). وكثيراً ما يوفر معدات العلاج الإشعاعي بائعون مختلفون، ومن ثم فإن التقيد ببروتوكولات اتصالات رقمية موحدة ضروري لضمان سلامة نقل البيانات عبر جميع الواجهات البينية. وتقليدياً، كانت جميع معدات العلاج الإشعاعي تخضع لإجراءات صارمة لمراقبة الجودة لضمان أن جميع سبل استخدامها تؤدي عملها بطريقة ملائمة. بيد أنه لم تكن هناك مبادئ توجيهية دولية بشأن اختبارات القبول والضمان المنهجي لجودة نظم التسجيل والتحقق. ومن أجل تعزيز أمان علاج المرضى وفعاليته، أعدت الوكالة في عام ٢٠١١ مبادئ توجيهية بشأن الإدارة السليمة لجودة نظم التسجيل والتحقق، حظيت بتأييد من كل كبار مورّدي معدات العلاج الإشعاعي.



الشكل هاء-٢ - شكل توضيحي لتبادل البيانات النمطي بين نظام التسجيل والتحقق وغيره من قطع المعدات في قسم عصري للعلاج الإشعاعي. وقد يقترح الصانعون المختلفون حلولاً مختلفة، تتيح درجة أكبر أو أقل من التكامل بين المكونات المختلفة.

هاء-٢-٢- الاتجاهات الراهنة في معالجة السرطان بالعلاج الإشعاعي

١٦٢- كان الاستهداف الدقيق للأورام مع الإبقاء على أكبر قدر ممكن من الأنسجة السوية هو الهدف الأسمى لممارسة العلاج الإشعاعي. وعلى مدى العقدين الماضيين، تحسنت القدرة على تحقيق هذا الهدف الى حد بعيد. وقد تسنى هذا الإنجاز بفضل أوجه التقدم في تكنولوجيا التصوير، وتحديدا تطور التصوير المقطعي الحاسوبي (CT) والتصوير بالرنين المغنطيسي (MRI) والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني (PET) ودمج التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي (fusion PET/CT).[٣٨]

١٦٣- وأدت التطورات في تكنولوجيا التصوير، مقرونة بأوجه التقدم في تكنولوجيا الحواسيب، إلى تغيير جذري في عمليات استهداف الأورام وتخطيط العلاج الإشعاعي. وأدت القدرة على عرض المعلومات التشريحية في عدد مختار لا نهائي من المناظر إلى ظهور العلاج الإشعاعي الممتثل الثلاثي الأبعاد (3D-CRT)؛ وهو طريقة يكون فيها الجرم المعالج متوافقا توافق دقيقا مع شكل جرم الورم.

١٦٤- ففي ***العلاج الإشعاعي المعدل الكثافة (IMRT)***، تخصَّص معدلات شدة غير موحدة لأقسام ضئيلة من حزم الأشعة تسمى حزيمات الأشعة. وتؤدي القدرة على التحكم الأمثل في شدة الشعاعات المنفردة داخل كل حزمة أشعة إلى زيادة كبيرة في التحكم في مدى التدفق الكلي للإشعاعات (أي عدد الفوتونات الإجمالي/الجسيمات التي تمر عبر جرم معين في كل وحدة زمنية). وهذا بدوره يسمح بتصميم التوزيعات المثلى للجرعات حسب الاقتضاء. وكثيراً ما يؤدي تحسين توزيعات الجرعات إلى تحسين السيطرة على الأورام والحد من السمية في الأنسجة السوية [٣٩].

١٦٥- ويمكن تعريف ***العلاج الإشعاعي الموجّه تصويرياً (IGRT)*** بأنه تكنولوجيا تهدف الى زيادة دقة العلاج الإشعاعي عن طريق التصوير المتكرر للهدف و/أو الأنسجة السليمة قبل العلاج مباشرة ثم تكييف العلاج على أساس هذه الصور. وهناك عدة خيارات متاحة للتوجيه التصويري: المسح بالتصوير المقطعي الحاسوبي غير المدمج مع العلاج، أو التصوير (الكيلو فولطي) بالأشعة السينية المدمج مع العلاج، أو التصوير باستخدام الواسمات المزروعة النشطة، أو التصوير بالموجات فوق الصوتية، أو التصوير المقطعي الحاسوبي الوحيد الشريحة، أو التصوير المقطعي الحاسوبي التقليدي، أو التصوير المقطعي الحاسوبي بالشعاع المخروطي المدمج مع العلاج [٤٠].

١٦٦- ***والعلاج الإشعاعي المقطعي الحلزوني ((Helical tomotherapy (HT))*** هو طريقة علاج إشعاعي يعطى فيها الإشعاع للمقاطع بالتوالي (ومن هنا استخدام البادئة اليونانية "tomo"، التي تعني "المقطع" أو "الشريحة"). ويختلف هذا الأسلوب لإعطاء الإشعاع عن غيره من أشكال العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية، التي يتم فيها

---

[٣٨] VIKRAM, B., COLEMAN, C.N., DEYE, J.A., Current status and future potential of advanced technologies in radiation oncology: challenges and resources. Oncol 23 3 (2009) 279.

[٣٩] GALVIN, J.M., EZZEL, G., EISBRUCH, A., et al., Implementing IMRT in clinical practice: a joint document of the American Society for Therapeutic Radiology and Oncology and the American Association of Physicists in Medicine, Int J Radiat Oncol Biol Phys 58 5 (2004) 1616–34.

[٤٠] VAN HERK, M., Different styles of image guided radiotherapy, Seminars in Radiation Oncology, 17 4 (2007) 258–267.

تشعيع جرم الورم بكامله في وقت واحد.[٤١] والمزية الرئيسية لهذا الأسلوب هي القصر النسبي للوقت الإجمالي للتشعيع.

١٦٧- ***والعلاج القوسي المعدل حجمياً (VMAT)*** هو تقنية يتم فيها إعطاء جرعة موزعة ثلاثية الأبعاد مشكَّلة تشكيلا دقيقا، تعطى عن طريق دوران جسر المعجِّل الخطي دورة واحدة قدرها ٣٦٠ درجة.[٤٢] وتتسنى هذه التقنية من خلال خوارزمية لتخطيط العلاج تقوم بتغيير ثلاثة بارامترات في وقت واحد أثناء العلاج: تغيير سرعة دوران الجسر، وتغيير شكل فتحة العلاج باستخدام حركة رقائق جهاز مسدِّد متعدد الرقائق، وتغيير معدل الجرعة المعطاة.

١٦٨- ***والعلاج بالأشعة المجسَّمة (SRT)*** (ويسمى أيضا "الجراحة الإشعاعية"، على الرغم من أنه لا ينطوي على أية جراحة) يشتمل على إعطاء جرعة عالية نسبيا من الإشعاع لجرم صغير، باستخدام تقنية للتحديد المجسَّم الدقيق لمكان الجرم. ويشير العنصر المجسم من التقنية إلى تعطيل أو تثبيت المريض بواسطة نظام إطار جامد للرأس ينشئ نظام إحداثيات خاصاً بالمريض طوال عملية العلاج.[٤٣] ويستخدم هذا الأسلوب عادة في علاج الأورام الموجودة داخل الجمجمة. وبعد وضع إطار الرأس، وذلك عادة باستخدام أربعة دبابيس تخترق فروة الرأس وتؤثر في السطح الخارجي للجمجمة، تجرى دراسة تصويرية (تصوير مقطعي حاسوبي، تصوير بالرنين المغنطيسي) لتحديد مكان الجرم المستهدف بالنسبة إلى إحداثيات إطار الرأس.

١٦٩- ***والعلاج الإشعاعي بالتحكم الآلي*** هو نظام جراحة إشعاعية بالتحكم الآلي من دون استخدام إطار. والعنصران الرئيسيان للعلاج الإشعاعي بالتحكم الآلي هما الإشعاع الناتج من معجل خطي صغير والذراع الآلية التي تسمح بتوجيه الطاقة نحو أي جزء من الجسم من أي اتجاه.

١٧٠- ***والتشعيع الداخلي (BT)*** هو تنفيذ العلاج الإشعاعي عن طريق وضع مصادر مشعة بالقرب من الأورام أو تجاويف الجسم أو داخلها. وفي هذا الأسلوب العلاجي، يمكن إعطاء جرعة إشعاعية عالية للورم محلياً، مع انخفاض الجرعة انخفاضا سريعا في الأنسجة السوية المحيطة. وكان التشعيع الداخلي ينفذ في الماضي في معظم الحالات بمصادر الراديوم أو الرادون. وحالياً يتزايد تزايداً سريعاً استخدام نظائر مشعة منتجة اصطناعيا، مثل السيزيوم-١٣٧ والإيريديوم-١٩٢ والذهب-١٩٨ واليود ١٢٥- والبلاديوم-١٠٣.

١٧١- ***العلاج الإشعاعي المخصص للجهاز التنفسي.*** يواجه المختصون بعلاج الأورام بالأشعة مشاكل معينة في علاج إجزاء الجسم التي يمكن فيها أن تتحرّك أعضاء الجسم والأورام أثناء العلاج. وحركة الهدف بسبب التنفس أو أي سبب آخر أثناء العلاج تزيد من احتمال إخطاء المنطقة المستهدفة أو إعطائها جرعة أقل من الجرعة الواجبة. ومع ازدياد دقة إيصال جرعة الإشعاعات أكثر فأكثر، تصير حركات أعضاء الجسم والأورام عاملا مؤثرا هاما في دقة إيصال الجرعة. وهذا التأثير كبير بصفة خاصة فيما يتعلق بالأورام الموجودة في الصدر، لأنها تتحرك أثناء التنفس. وليست الحركة مشكلة فيما يتعلق بالأورام الموجودة في الصدر وحدها؛

---

[٤١] ROCK MACKIE, T., et al., Tomotherapy; a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy. Med Phys 20 6 (1993) 1709¬1719.

[٤٢] OTTO, K., Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. Med Phys 35 1 (2008) 310.

[٤٣] BOURLAND, J.D., "Stereotactic radiosurgery", Clinical Radiation Oncology, 2nd edn (GUNDERSON, L.L., TEPPER, J., Eds), Elsevier Churchill Livinstone, (2007) 151 Ch. 6.

فعموماً تتحرك أيضاً الأورام الموجودة في الحنجرة والبطن (الكبد) والبروستات والمثانة والحوض أثناء تطبيقات المعالجة وبينها.

١٧٢- ***استخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني في تخطيط العلاج الإشعاعي.*** شهدت السنوات الأخيرة اتجاهاً صاعداً في استخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني (PET) والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي (PET/CT) في علاج الأورام. وإلى جانب التشخيص وتحديد مرحلة تطور المرض والكشف عن الانتكاس والمتابعة، يتمثل أحد التطبيقات الرئيسية للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني/التصوير المقطعي الحاسوبي في تقييم الاستجابة للعلاج وتخطيط العلاج. ويوفر التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني معلومات جزيئية عن البيئة المجهرية للورم ("التصوير الوظيفي")، علاوة على التصوير التشريحي. ولذلك فمن المفيد للغاية إدراج بيانات للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني في تخطيط العلاج الإشعاعي. واستخدام التصوير الوظيفي لتحسين رسم حدود هدف العلاج هو مثال جيد للعلاج المصمم حسب احتياجات الفرد. والواقع أنه بدلاً من استخدام حقل سبق تحديده أو مجموعة من الحقول سبق تحديدها، يتم تشكيل الجرعة الإشعاعية حسب الورم لكل مريض على حدة.[٤٤]

١٧٣- ***العلاج بالجسيمات: الحزم الإشعاعية البروتونية والأيونات الثقيلة.*** يتزايد استخدام العلاج بالجسيمات في مجال العلاج الإشعاعي للأورام، مع تزايد التركيز على استخدام العلاج بالحزم الإشعاعية البروتونية. ووفقاً للبيانات الواردة من "الفريق التعاوني للعلاج بالجسيمات" (Particle Therapy Co-Operative Group)، كان يوجد على نطاق العالم ٣٠ مركزاً عاملاً للعلاج البروتوني في آذار/مارس ٢٠١٠، وتم علاج أكثر من ٦٧ ٠٠٠ مريض بهذا الأسلوب. ويتوقع أن يتضاعف في المستقبل القريب عدد مراكز العلاج البروتوني العاملة.

١٧٤- وقد أدت التطورات التكنولوجية الحديثة في مجال العلاج الإشعاعي للأورام إلى تحسين توزيع الجرعات وخفض السمية في مواضع الورم المختارة، الأمر الذي يمكن أن يؤدي بدوره إلى زيادة محتملة في فرص السيطرة المحلية على الأورام وإلى تحسين معدلات الشفاء. وهذا أحد الأسباب لاكتساب هذه العلاجات شعبية في أوساط المختصين بالعلاج الإشعاعي للأورام ومديري المستشفيات. غير أن الإيرادات الإضافية الناتجة من توفير العلاج الإشعاعي المعدل الكثافة وغيره من التكنولوجيات الجديدة يمكن أن تؤدي إلى الإفراط في استخدامها. والأدلة العلمية الإكلينيكية بشأن السيطرة المحلية على الأورام وبشأن المعدلات الإجمالية للبقاء على قيد الحياة بعد الإصابة بالسرطان فيما يتعلق بمعظم مواضع الأورام غير حاسمة عموما في الوقت الراهن.

١٧٥- وتواصل الوكالة، من خلال برنامجها المسمى برنامج العمل من أجل علاج السرطان، وبالتعاون مع شركائها مثل منظمة الصحة العالمية، توفير سبل المكافحة الشاملة للسرطان للدول الأعضاء. وفي عام ٢٠١١ أوفدت ثماني بعثات متكاملة تابعة للبرنامج المذكور لتقييم القدرات والاحتياجات الوطنية من حيث مختلف عناصر المكافحة الشاملة للسرطان، وذلك إلى أوغندا وباراغواي وبوليفيا والجزائر والفلبين وكولومبيا وليسوتو ونيجيريا. واستقبل كل من المواقع الإيضاحية النموذجية الثمانية للبرنامج (ألبانيا وتنزانيا وسري لانكا وغانا وفييت نام ومنغوليا ونيكاراغوا واليمن)، باستثناء موقع واحد، بعثة متابعة من البرنامج وشركائه لمتابعة التوصيات الخاصة باتباع نهج المكافحة الشاملة للسرطان من خلال الشراكات.

---

٤٤ CHITI, A., KRIENKO, M., GREGOIRE, V., Clinical use of PET-CT data for radiotherapy planning; What are we looking for? Radiot Oncol 96 (2010) 277–279.

هاء-٢-٣- التصوير التشخيصي والعلاج لسرطان الثدي[٤٥]

١٧٦- على الرغم من أن معدل الإصابة بسرطان الثدي (معبراً عنه بمعدل موحد حسب السن) أعلى بما يقرب من ثلاثة أضعاف في البلدان المتقدمة منه في البلدان النامية، فإن هذا النوع هو أكثر أنواع سرطانات الإناث شيوعا بغض النظر عن المستوى الاجتماعي – الاقتصادي للبلد المعني. ومعدل الوفيات في هذا الصدد آخذ في التزايد، ولا سيما في مناطق العالم التي لا توجد فيها برامج للكشف المبكر. والسن، والتاريخ العائلي والوراثة، والحمل الأول في وقت متأخر، والبدانة، هي عوامل خطر مثبتة جيدا لسرطان الثدي. ويؤدي التصوير دوراً حاسم الأهمية في فحص سرطان الثدي، وفي تصنيف أورام الثدي وتحديد مداها.

١٧٧- ويُكشف عن معظم سرطانات الثدي عن طريق تصوير الثدي بالأشعة السينية، وعادة كجزء من برامج الفحص على الصعيد الوطني. ويستخدم الفحص بالموجات فوق الصوتية روتينياً كمكمل أساسي للفحص البدني والتصوير الشعاعي للثدي في تقييم الكتل المريبة/الغامضة في الثدي. كما أصبحت الموجات فوق الصوتية هي الطريقة المفضلة لتوجيه إجراءات التدخل عن طريق الجلد في كتل الثدي، من الخزعة الارتشافية بالإبرة إلى الاستئصال. ويؤدي التصوير بالرنين المغناطيسي مع استخدام عامل تباييني دوراً هاماً في تحديد ما إن كانت كتل الثدي الغامضة في تصوير الثدي كتلاً خبيثة أم حميدة، وكذلك في تحديد المدى المحلي للمرض الخبيث.

١٧٨- وإلى جانب التصوير الإشعاعي (التصوير الإشعاعي للثدي، والتصوير بالموجات فوق الصوتية، والتصوير بالرنين المغناطيسي)، تؤدي تقنيات التصوير الخاصة بالطب النووي دورا تكميليا متزايدا في التوصيف التشخيصي لآفات الثدي، وخصوصا عند استخدام أجهزة مخصصة لتصوير الثدي، وذلك بالنسبة للتصوير الوميضي التقليدي للثدي وكذلك، وفي المقام الأول، بالنسبة للتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني. والإجراءات القائمة على النويدات المشعة ضرورية للجراحة الموجَّهة بالأشعة لدى المريضات المصابات بسرطان الثدي، وذلك إما من حيث تحديد أماكن الآفات الخفية الموجَّه بالأشعة أو من حيث خزعة العقدة الليمفاوية الخافرة الموجَّه بالأشعة في مرحلة المعالجة الأولية. والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني لكامل الجسم هو أيضا ذو أهمية قصوى لتحديد مرحلة المرض في مجموع الجسم، ولإعادة تحديد مرحلة المرض بعد العلاج التمهيدي من سرطان الثدي المتقدم محليا، ولتقييم فعالية علاج الأورام.

١٧٩- ويعالج سرطان الثدي عادة بالجمع بين الجراحة والعلاج الإشعاعي والعلاج الكيميائي والعلاج الهرموني. ويستند اختيار العلاج إلى عوامل التوقعات الإكلينيكية والمرضية، التي تشمل مرحلة المرض عند عرض المريض على الطبيب، وحالة أنسجة الورم وتمايزها، والسن، والحالة من حيث انقطاع الطمث، ووجود مستقبلات الإستروجين و/أو البروجستيرون أو عدم وجودها، وفرط تعبير مستقبل عامل نمو البشرة البشري من النوع ٢ (*HER2/neu*).

١٨٠- في المراحل المبكرة من سرطان الثدي، يؤدي العلاج الإشعاعي بعد الجراحة إلى تحسين السيطرة المحلية على الورم وإلى تحسين معدلات البقاء على قيد الحياة. ومن ناحية أخرى فإن لدى الباقيات على قيد الحياة بعد الإصابة بسرطان الثدي احتمال أعلى لحدوث المضاعفات في الأجل الطويل. وعادة ما تحدث مظاهر تسمم القلب، مثل مرض الشريان التاجي، والتهاب التامور، واعتلال عضلة القلب، والداء الصمَّامي، وشذوذ

---

[٤٥] يمكن الاطلاع على معلومات إضافية في الملحق الملائم من ملاحق وثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* على الموقع الإلكتروني GovAtom/GC.

التوصيل، الخ، بعد العلاج بعشر سنوات أو أكثر. وخلال العقد الماضي، ساهم التقدم في تكنولوجيا العلاج الإشعاعي في تقليل سمية علاج سرطان الثدي. ويتيح استخدام العلاج الإشعاعي الممتثل الثلاثي الأبعاد (3D CRT) إيصال جرعة الاشعاع اللازمة إلى جرم يتوافق بدقة مع جرم الورم. وفي الوقت نفسه، يمكن عدم تعريض الأعضاء السوية (مثل القلب والرئة).

١٨١- والعلاج الإشعاعي المعدل الكثافة (IMRT) هو نوع متطور من العلاج الإشعاعي الممتثل الثلاثي الأبعاد، تخصص فيه معدلات شدة غير موحدة لأقسام ضئيلة من حزم الأشعة تسمى حزيمات الأشعة. وتتيح القدرة على التحكم الأمثل في شدة الشعاعات المنفردة داخل كل حزمة اشعة (ويسمى ذلك أيضاً "تشكيل الجرعة") توزيع الجرعة بطريقة مفيدة، فتعطى جرعة عالية للورم وجرعة منخفضة للأعضاء السوية (القلب والرئة والجلد، الخ).

١٨٢- وثمة تقنية علاج إشعاعي متقدمة أخرى عالية الدقة تستخدم بنجاح في العلاج الإشعاعي لسرطان الثدي وتعالج مشكلة تحرك الهدف بسبب التنفس الطبيعي. ويضع هذا الأسلوب في الاعتبار البعد الرابع، أي الحركة في الزمن، وهذا هو السبب في أنه يمكن أن يشار إليه أيضا باسم "العلاج الإشعاعي الممتثل الرباعي الابعاد" (4D CRT). ويتيح هذا العلاج الإشعاعي المحوسب المخصص للجهاز التنفسي تحليل حركات الصدر، وتطلق فيه الحزمة الإشعاعية العلاجية بالتزامن مع الدورة التنفسية .ويمكن اختيار مرحلة معينة من الدورة التنفسية (الشهيق أو الزفير) للتشعيع. ولذلك يكون الهدف مشمولا دائما بالحزمة الإشعاعية، مع تجنب تعريض الأعضاء الحرجة تعريضا مفرطا بسبب انخفاض هامش الأمان[٤٦].

١٨٣- وفي التشعيع الجزئي المعجَّل للثدي (APBI) – حيث يعالَج موضع الورم بجرعة عالية لكل جزء، وتُنجز دورة العلاج المحلي الكاملة بعد الجراحة في خمسة أيام أو أقل – يمكن استخدام التشعيع الداخلي بمعدل جرعة مرتفع إلى جانب العلاج الإشعاعي بحزمة إشعاعية خارجية. والتشعيع الداخلي هو تنفيذ العلاج الإشعاعي عن طريق وضع مصادر مشعة بالقرب من الأورام/موضع الورم أو تجاويف الجسم أو داخلها. وفي هذا الأسلوب العلاجي، يمكن إعطاء جرعة إشعاعية عالية للورم محلياً، مع انخفاض الجرعة سريعاً في الأنسجة السوية المحيطة. وفي حالة سرطان الثدي يمكن إجراء التشعيع الداخلي الخلالي بقثاطير متعددة أو التشعيع الداخلي في التجاويف باستخدام بالون قابل للنفخ.

١٨٤- وما زال علاج سرطان الثدي المتقدم محليا (ورم متقدم داخل الثدي بحجم أكبر من ٥ سنتيمترات أو ورم غزا الجلد أو جدار الصدر، أو ورم من أي حجم في الثدي مع الانبثاث إلى عقد في مناطق مختلفة) يشكل تحدياً كبيراً.[٤٧،٤٨] وفي حالة المرض القابل للجراحة (عندما يكون الورم غير راسخ والعقد غير راسخة ولا توجد انبثاثات بعيدة، في العظام أو الدماغ أو الكبد، الخ، مثلاً)، يتألف العلاج من مزيج من الجراحة و/أو العلاج الكيميائي و/أو العلاج الهرموني، والعلاج الإشعاعي. وقد تم إثبات فائدة كل من هذه الأساليب في تجارب

---

[٤٦] GIKAS, S.M., YORKE, E., Deep inspiration breath hold and respiratory gating strategies for reducing organ motion in radiation treatment, Seminars in Radiat Oncol **14** 1 (2004) 6575.

[٤٧] SINGLETARY S.E., ALLRED, C., ASHLEY, P., et al., Revision of the Amercian Joint Committee on Cancer Staging System for breast cancer. J Clin Oncol 2002; 20 (17): 3628-3636.

[٤٨] GREENE, F.L., PAGE, D.L., FLEMING, I.D., et al (eds), AJCC Cancer Staging Manual, Sixth Edition, 2002; New York, NY, Springer-Verlag.

عشوائية كبيرة.[٤٩،٥٠،٥١،٥٢] وحتى عند إعطاء العلاج الكيماوي المساعد، يوجد احتمال كبير لحدوث نكسة محلية بعد الجراحة الكافية. وعوامل الخطر التي تنذر بحدوث فشل محلي تشمل السن، وحجم الورم، وحالة ما قبل انقطاع الطمث، وعدد الغدد الليمفاوية الإيجابية، واستخدام العلاج لمجموع الجسم. وقد أفيد بأن النكسة المحلية قد تحدث بعد فترة قصيرة تبلغ ما بين ٣ أشهر و١٢ شهراً[٥٣]، ولكن معظم النكسات المحلية تحدث في غضون ٣ سنوات.

١٨٥- وتجري الوكالة حالياً دراسة في إطار برنامج بحثي منسق (CRP E33025) حول مريضات سرطان الثدي اللائي خضعن لعملية استئصال الثدي ويحتجن إلى العلاج الإشعاعي بعد الجراحة. وفي هذه التجربة الإكلينيكية يقارن بين نوعين مختلفين من ترتيبات حقل العلاج الإشعاعي، لبحث ما إن كان يمكن أم لا يمكن تجنب تشعيع المنطقة الواقعة فوق الترقوة. وبما أن أهداف البحوث الإكلينيكية للوكالة تستند إلى المزية المحتملة لاستراتيجيات الاقتصاد في استخدام الموارد فإن التجزيء المستخدم في هذه الدراسة يقصّر المدة الإجمالية للعلاج الشعاعي إلى ٣ أسابيع، مقارنة بـ ٥ أسابيع في حالة التجزيء التقليدي. ومن شأن هذا النهج أن يسمح لإدارات العلاج الإشعاعي المشغولة التي لديها قوائم انتظار طويلة بأن تستخدم البروتوكولات القائمة على الأدلة مع إعطاء علاجات أقصر أو أبسط.

واو- البيئة

واو-١- أساليب التحليل الإشعاعي السريع يمكن أن تُحدث تحسناً في تقييم التلوث الإشعاعي في أحوال الطوارئ

١٨٦- أظهر حادث فوكوشيما أنه قد يلزم تحليل عدد هائل من العينات البيئية خلال فترة قصيرة جداً، الأمر الذي ينهك كثيراً الموارد البشرية والمادية واللوجستية للمختبرات التحليلية. وكما هو واضح من الكم الكبير جداً من البيانات الواردة من السلطات اليابانية بانتظام في الوقت القريب من 'الوقت الحقيقي' فإن من المهم أهمية

---

[٤٩] TAGHIAN, A.G., JEONG, J.H., MAMOUNAS, E.P., et al, Low locoregional recurrence rate among node-negative breast cancer patients with tumors 5 cm or larger treated by mastectomy, with or without adjuvant systemic therapy and without radiotherapy: results from five national surgical adjuvant breast and bowel project randomized clinical trials. J Clin Oncol 2006; 24 (24): 3927-3932.

[٥٠] TAGHIAN, A., JEONG, J., MAMOUNAS, E. et al., Patterns of loco regional failure in patients with operable breast cancer treated by mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen and without radiotherapy: results from five national Surgical Adjuvant breast cancer and Bowel Project randomized clinical trials. J Clin Oncol 2004; 22 (21): 4247-4254.

[٥١] NIELSEN, H.M., OVERGAARD, M., GRAU, C., JENSON, A.R., OVERGAARD, J., Study of failure pattern among high-risk breast cancer patients with or without postmastectomy radiotherapy in addition to adjuvant systemic therapy: long-term results from the Danish Breast Cancer Cooperative Group DBCG 82 b and c randomized studies. J Clin Oncol 2006; 24 (15): 2268-2275.

[٥٢] RECHT A., GRAY, R., DAVIDSON N.E., et al., Locoregional failure 10 years after mastectomy and adjuvant chemotherapy with or without tamoxifen without irradiation: experience of the Eastern Cooperative Oncology Group. J Clin Oncol 1999; 17 (6): 1689-1700.

[٥٣] ADENIPEKUN, A., CAMPBELL, O.B., OYESEGUN, A.R., ELUMELU, T.N., Radiotherapy of early breast cancer in Ibadan: outcome of chest wall irradiation alone in clinically nodes free axilla. African Journal of Medicine & Medical Sciences 2002; 31(4): 345 - 7.

حاسمة في مثل هذه الحالات تعجيل وقت المعالجة التحليلية وتحسين الاستراتيجيات التحليلية إلى الحد الأمثل بغية الامتثال للحدود الرقابية الكمية ومعايير الجودة المقبولة.

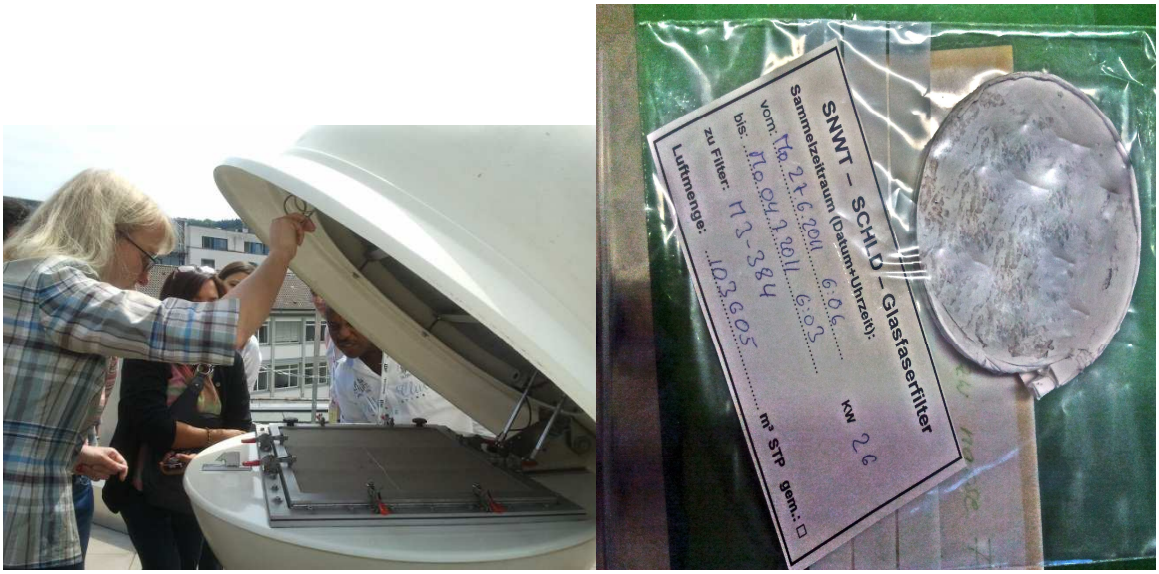
١٨٧- وسواء في حالة الطوارئ النووية أو الانطلاقات العرضية من المنشآت النووية المختلفة أو الأعمال الشريرة المتعلقة بهجوم إشعاعي فإن السرعة التي يتاح بها للسلطات تقييم للانطلاقات البيئية والتلوث يمكن أن تكون لها آثار هائلة على أمان الأفراد المعرضين للخطر والمجموعات السكانية المعرضة للخطر. والأساليب الشائعة الموصى باستخدامها فور وقوع حادث يسفر عن إطلاقات بيئية محتملة هي رصد الإشعاعات من خلال قياسات معدل الجرعة وأساليب الفحص السريع، مثل رصد إشعاعية الهباء الجوي والغازات ورسم خرائط الإشعاعات. وفي العديد من أنواع الحالات العرضية، يمكن تقييم التلوث الإشعاعي البيئي بسرعة باستخدام القياس الميداني لطيف أشعة غاما، وينطوي ذلك القياس على فحص الترسيب في الموقع، ورسم خرائط تلوث التربة باستخدام وحدات متنقلة، فضلاً عن إجراء مسوحات بأشعة غاما للجو وتحت المياه. وبذلك يمكن فحص مساحة واسعة في فترة زمنية قصيرة نسبياً، وتحديد مدى التلوث وحجمه، وتحسين استراتيجيات أخذ العينات إلى الحد الأمثل.

١٨٨- وفي مرحلة لاحقة من الحدث الإشعاعي، ينبغي إجراء تحليلات أكثر دقة، وفقا لبروتوكولات متحقق من صحتها، للعينات التي تم جمعها، من أجل تقييم التعرض للإشعاعات تقييما أكثر دقة. وتقتضي إعادة التشكيل الشاملة للجرعات إجراء تحليل لكامل طيف النويدات المشعة، بما في ذلك الأشكال الغازية والجسيمية والسائلة، بدءاً من المراحل المبكرة جداً من انطلاق الإشعاعات. وتجرى عادة قياسات إجمالية ومطيافية لأشعة ألفا وبيتا وغاما على العينات الإجمالية أو المعالجة بواسطة الكيمياء الإشعاعية. وقد أبرز حادث فوكوشيما أهمية وجود مختبرات تحليلية قادرة على مواجهة الزيادة الكبيرة المحتملة في عبء العمل. وتسمح الأساليب السريعة بتقليص الوقت اللازم للتحليل من أيام أو أسابيع إلى ساعات أو أيام. والتحقق من سلامة هذه الأساليب وتنفيذها ضروري لاسيما بالنسبة للنظائر المشعة التي تشكل شواغل إشعاعية كبيرة في كل الوسائط البيئية التي يُحتمل أن تتأثر، وكذلك، وفي غاية الأهمية، فيما يتعلق بالأغذية وبالأعلاف الحيوانية.

١٨٩- واستخدام أساليب لأخذ العينات وإجراءات تحليلية واضحة المعالم ومتحقق منها هام بوجه خاص في حالة التقييمات البيئية عبر الحدود، التي تشارك فيها عدة مختبرات أو شبكات من المختبرات وتكون فيها المقارنة بين القياسات قضية رئيسية. وتدعم الوكالة المختبرات وشبكات المختبرات التابعة للدول الأعضاء، عن طريق التدريب، والمشاريع البحثية المنسقة، وتوفير المواد المرجعية لمجموعة واسعة من الملوثات، والتعاون على تطوير التقنيات التحليلية وتنفيذها، وتنظيم اختبارات الكفاءة والمقارنات بين المختبرات. وتتألف شبكة "ألميرا" التي تنسّقها الوكالة، وهي شبكة عالمية للمختبرات التحليلية الخاصة بقياس النشاط الإشعاعي البيئي، من مختبرات ترشحها الدول الأعضاء، وهي قادرة على توفير تحليل موثوق وفي الوقت المناسب للعينات البيئية في حال انطلاق نشاط إشعاعي عرضاً أو عمداً.

١٩٠- وتضطلع شبكة "ألميرا" بالتحقق التعاوني من صلاحية الأساليب السريعة، وستركز جهودها بقدر أكبر على النظائر المشعة والعينات المثيرة للاهتمام فيما يتعلق بحالات الطوارئ. وقد ركّز اختبار الكفاءة لعام ٢٠١١ الذي نظّمته شبكة ألميرا على باعثات أشعة ألفا وبيتا وغاما في عينات التربة والمياه. ووُضع حد زمني قصير مدته ٣ أيام بعد استلام العينات للإبلاغ السريع عن النويدات المشعة التي تنبعث منها أشعة غاما، وذلك لاختبار أداء المختبرات التحليلية في ظل القيود الزمنية. وفي المستقبل ستعد الوكالة والمختبرات المنضوية إلى شبكة "ألميرا" مواد مرجعية واختبارات كفاءة إضافية ذات حدود زمنية قصيرة للإبلاغ، بغية التغطية الشاملة لجميع

المتطلبات التي تفرضها حالات الطوارئ. وسيكون تركيز الاهتمام خلال عام ٢٠١٢ على جودة تحليلات عينات الهباء الجوي وإمكانية مقارنتها.



الشكل واو-١ - جهاز كبير الحجم لجمع الهباء الجوي يقوم بتشغيله المكتب الاتحادي للوقاية من الإشعاعات في سالتس غيتر بألمانيا، ومرشِّح هباء جوي تم تدميجه من أجل القيام فورا بالعد المطيافي لجسيمات غاما – يجري الإيضاح العملي لتشغيلهما للمشاركين في الدورة التدريبية الأقاليمية المتقدمة للوكالة حول "النشاط الإشعاعي في البحر: التقنيات التحليلية وإدارة الجودة"، التي استضافها معهد كارلسروهه للتكنولوجيا في عام ٢٠١١.

١٩١- وأظهر حادث فوكوشيما أيضاً أن إسناد العبء التحليلي إلى المختبرات ضمن شبكة منسقة تنسيقاً جيداً ونشر المختبرات المتنقلة هما حلان إضافيان مفيدان ويتطلبان تخطيطاً مسبقاً. ومن المهم بالقدر نفسه لدعم اتخاذ القرارات في الوقت المناسب وجود آلية سريعة وموثوقة للتحقق من البيانات والإبلاغ بها. كما أن تكنولوجيا الاتصالات النقالة العصرية تجلب إلى الميدان القوة المجتمعة لقواعد البيانات العلائقية الحاسوبية، ونظم المعلومات الجغرافية، والتوثيق بالوسائط المتعددة، والوصول إلى الإجراءات بالاتصال الحاسوبي المباشر، والمساعدة التشغيلية، دعماً لإمكانية تتبع البيانات وجودتها. وتكامل الاستشعار عن بعد مع رصد الأحوال المائية – الجوية ونمذجتها هو أمر حاسم الأهمية لتوفير التوجيه السريع لدى القيام بضبط استراتيجية الرصد، وكذلك في وقت لاحق عند إعداد تدابير التصدي التي تتخذها السلطات. ومقارنة بالقياس الموقعي الجوي والأرضي الأكثر شيوعاً لطيف أشعة غاما، ثمة مجال يحتاج بوضوح إلى التطوير التكنولوجي وهو الرصد الموقعي تحت الماء من خلال القياس العالي الدقة الثابت والمتحرك لطيف أشعة غاما في البيئة البحرية الساحلية، الذي يسمح بإعادة تشكيل الانطلاقات الإشعاعية السائلة والفحص السريع لتلوث المياه والرواسب.

زاي- الموارد المائية

١٩٢- يواصل الطلب على المياه في مجالات الزراعة والطاقة والصناعة وللاستخدامات الحضرية نموه على نطاق العالم. وإلى جانب القلق المتزايد حول تأثير التغير المتوقع في المناخ على الدورة الهيدرولوجية، يجلب هذا الطلب المتزايد تغيرات كبيرة في تخصيص الموارد المائية وإدارتها. وفي بعض الأماكن، تصاعد الموقف الى

صراع بسبب الصعوبات في توفير فرص الحصول على المياه الصالحة للشرب، على النحو الذي أُبرز في تقرير يوم المياه العالمي لعام ٢٠١١[٥٤]، الذي تناول مشكلة الحصول على المياه في سياق التنمية الحضرية. وبما أن معظم المياه السطحية تم تخصيصها و/أو أخذت تتلوث فمن المتوقع أن تؤدي المياه الجوفية دوراً أكبر في المستقبل القريب، وأن توفر جزءاً كبيراً من المياه العذبة في العالم. ولسوء الحظ، يفتقر معظم البلدان إلى المعرفة اللازمة بموارد المياه الجوفية فيها لضمان إمدادات كافية من المياه.

١٩٣- فمن أجل اعتماد سياسات ملائمة تسهِّل التشارك في الموارد المحدودة، يلزم الحصول على معلومات سليمة وشاملة عن مدى توافر الموارد المائية الموجودة وحالتها. وتوفِّر الأساليب النظيرية معلومات فريدة من نوعها يمكن استخدامها لتقييم موارد المياه الجوفية ورسم الخرائط لها بسرعة وفعالية. كما أن التقنيات النظيرية والأدوات الجيوكيميائية المتصلة بها، مقترنة بالتطورات الجديدة في رسم الخرائط باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والأساليب الإحصائية الجيولوجية، تساعد الخبراء والمديرين على تحسين رسم حدود مستودعات المياه الجوفية وكتل المياه الجوفية وتحديد كميتها وتصوّر هندستها وحجمها وخصائصها. وللخرائط التي تحدد المسطحات المائية الأكثر صموداً أمام تغير المناخ أو مناطق التجدُّد النشطة أهمية حاسمة في ضمان الحصول على المياه في الأجل الطويل.

زاي-١- الاتجاهات في مجال الحصول على بيانات النظائر المستقرة

١٩٤- في عام ٢٠١١، أصبح استخدام أجهزة زهيدة التكلفة وسهلة التشغيل لتحليل النظائر المستقرة في المياه (الأوكسيجين-١٨ والديوتيريوم)، استناداً إلى التحليل الطيفي الليزري، إجراء نمطياً لدى أفرقة البحوث في جميع أنحاء العالم. ونتيجة لهذا الابتكار، أصبحت أفرقة عديدة في البلدان المتقدمة النمو والنامية مستقلة في قدرتها على تحليل النظائر المستقرة لأغراض الدراسات الهيدرولوجية، متفادية التأخير في الحصول على النتائج التحليلية من المختبرات الشهيرة ومستفيدة من انخفاض التكاليف. فعلى سبيل المثال، هناك دراسات تهدف إلى تقييم مصادر المياه الجوفية في شبه جزيرة سانتا ايلينا في إكوادور (انظر الشكل زاي-١) تجري بطريقة أكثر كفاءة نظرا لتوافر جهاز تحليل من هذا النوع. ومن المتوقع أن يتسارع خلال العام المقبل تطوير أجهزة تحليل جديدة للكربون-١٣ والنيتروجين-١٥ على أساس نفس التكنولوجيا، وبذلك يسهِّل استخدام هذه النظائر في دراسة المياه الجوفية والسطحية.

---

[٥٤] أنظر الموقع: http://www.unwater.org/downloads/World_Water_Day_2011_Final_Report_Web.pdf

الشكل زاي-١ - تحسين فرص الحصول على موارد المياه الجوفية في المجتمعات المحلية في المناطق الساحلية من إكوادور هو إحدى نتائج تحسُّن الفهم العلمي الذي تحقق معظمه بفضل البيانات المتحصل عليها من أجهزة تحليل النظائر المستقرة (الصورة مقدمة من: ESPOL، غاياكيل، إكوادور).

زاي-٢- تأريخ المياه الجوفية

١٩٥- خلافاً لما عليه الحال فيما يتعلق بمعدات تحليل النظائر المستقرة، يفتقر العديد من الدول الأعضاء النامية إلى معدات التحليل اللازمة لقياس مستويات النشاط الضعيفة للنويدات المشعة التي كثيرا ما تستخدم في تأريخ المياه الجوفية، وهو أمر مهم لتقييم استدامة المياه الجوفية وتعرضها للتلوث ومعدلات تجدُّدها. وتستخدم عادة للحصول على هذه المعرفة النويدات المشعة البيئية، مثل التريتيوم أو الكربون-١٤. وفي السنوات الأخيرة، أدى عدد من التطورات التحليلية إلى تحسين تحليل هذه النظائر (على سبيل المثال تحليل التريتيوم باستخدام أساليب التراكم الداخلي للهيليوم (helium in-growth) وقياس الطيف الكتلي)، ولكن عدد المرافق لا يزال محدودا. وبالمثل، تستخدم الآن بتواتر أكبر طريقة التريتيوم/الهيليوم-٣ لتأريخ كتل المياه الجوفية الحديثة التجدد، ولكن إمكانية الوصول إلى المرافق التحليلية القادرة على دعم هذه التقنية محدودة أيضاً.

١٩٦- وقد ازداد استخدام نظائر الغازات الخاملة لتأريخ المياه الجوفية في عدة نطاقات عمرية ازدياداً كبيراً في العامين الماضيين، ويواصل تزايده، كما تتزايد البحوث في هذا المجال. وعلى سبيل المثال، تعكف مؤسسات مثل مختبر أرغون الوطني بالولايات المتحدة الأمريكية وجامعة هايدلبرغ بألمانيا على تطوير تقنيات التحليل الاقتفائي الاصطيادي للذرات (ATTA)، التي تفتح آفاقا جديدة لتأريخ المياه الجوفية باستخدام النظائر المشعة للغازات الخاملة. وفي حالة المياه الجوفية الحديثة التجدد (ما يصل الى ١٠٠ سنة)، يستخدم الكريبتون-٨٥. وفي حالة تجدُّد المياه الجوفية خلال ما يصل إلى ٢٠٠٠ سنة مضت، استخدم أيضا الأرغون-٣٩ بنجاح. وفي حالة مستجمعات المياه الجوفية الكبيرة الموجودة في الأحواض الرسوبية، مثل نظام المستجمع المائي الصخري النوبي في شمال افريقيا ونظام مستجمع غاراني المائي في أمريكا الجنوبية، حيث يمكن أن يصل عمر المياه الجوفية في هذه المستجمعات العميقة إلى مليون سنة، يتزايد استخدام نويدات مشعة طويلة العمر مثل الكربتون-٨١[٥٥]،

---

[٥٥] أنظر الموقع:
http://www.nytimes.com/2011/11/22/science/rare-krypton-81-isotope-helps-track-water-in-ancient-nubian-aquifer.html?src=dayp.

ويؤدي ذلك إلى تحسين نماذج تدفق المياه الجوفية ونقلها. وتتيح الهيدرولوجيا النظيرية إمكانية الحصول على المعلومات المطلوبة عن كميات المياه المتاحة، فضلاً عن نوعية المياه وتطورها المتوقع. وتواصل الوكالة أداء دور رئيسي في استعراض هذه الأدوات والمنهجيات الجديدة وتقييمها وفي توفير إمكانية الحصول عليها ونقل المعرفة بها إلى الدول الأعضاء المهتمة.

حاء- إنتاج النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية

حاء-١- النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية

حاء-١-١- التطورات الأخيرة في مجال النظائر المشعة المنتجة بواسطة المولِّدات والمستخدمة في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني

١٩٧- كان التقدم المحرز في التصوير النووي مرتبطا دائما ارتباطاً وثيقاً بإنتاج نويدات مشعة جديدة ذات خصائص فيزيائية وكيميائية جديدة. وأخذ الحصول على النظائر المشعة المنتجة بواسطة المولِّدات لاستخدامها في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني يصبح أكثر سهولة لأن هذه النظائر يمكن إنتاجها في المستشفيات دون وجود سيكلوترون في الموقع. وحالياً، يتوافر الغاليوم-٦٨ المنتج من مولدات الغاليوم-٦٨/غاليوم-٦٨ التجارية، ويستخدم على نطاق واسع في مجال التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني. وهذا تطور تقني مهم لأن الغاليوم-٦٨، نظرا لكونه مشابها من الناحية الكيميائية لِلُتِشيُوم-١٧٧ واليتريُوم-٩٠ (وهما نويدتان مشعتان يتزايد استخدامهما لعلاج أنواع معينة من السرطان)، يمكن ربطه ببتيدات نشطة بيولوجيا، مثل الأوكتريوتيد، باستخدام المسار الكيميائي الراسخ عن طريق الربط بالمادة الكيميائية DOTA واستخدامه لرسم حدود أورام الأعصاب والغدد الصماء من خلال عمليات المسح التشخيصي، وذلك قبل العلاج. واستنادا إلى النجاح في استخدام مادة DOTATATE الموسومة بالغاليوم-٦٨ يقوم العديد من الباحثين بالاستكشاف النشط لإمكانية استخدام ببتيدات جديدة موسومة بالغاليوم-٦٨ لتصوير أنواع أخرى من الأورام. ومن الأمثلة على تلك الببتيدات البومبيسين، الذي هو ببتيد معروف بأن له مستقبلات في أورام الثدي والبروستاتا والرئتين. وقد تم وسم البومبيسين بالغاليوم-٦٨، ويجري تقييم فائدته في تصوير هذه الأورام. وإضافة إلى نظام مولِّدات الغاليوم-٦٨/غاليوم-٦٨، يجري في عدة مراكز بحوث إنتاج نظم مولِّدات أخرى لباعثات البوزيترونات يمكن أن تصبح مثيرة للاهتمام، منها مثلا نظم التيتانيوم-٤٤/سكانديوم-٤٤، والسلينيوم-٧٢/زرنيخ-٧٢، والنيوديميوم-١٤٠/براسوديميوم-١٤٠.

حاء-١-٢- تطوير نظم قائمة على المُسيّلات المجهرية لتركيب المقتفيات المستخدمة في التصوير المقطعي البوزيتروني

١٩٨- تتطلب الأساليب المستخدمة لوسم الجزيئات البيولوجية بالفلور-١٨ لاستخدامها كمقتفيات في التصوير المقطعي المناعي بالانبعاث البوزيتروني (immuno-PET) تحسيناً واسع النطاق لظروف الوسم الإشعاعي لتبلغ الحد الأمثل. وغالباً ما تستخدم هذه العمليات كميات كبيرة من الجزيئات البيولوجية القليلة التوافر. أما نظم المُسيّلات المجهرية فتستخدم كميات صغيرة من السوائل المحتوية على مكونات نشطة من أجل تركيب المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الخاصة بالتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني. وتتيح نظم المُسيّلات المجهرية مزايا عديدة، مثل ازدياد كفاءة التفاعلات الكيميائية من جراء نسب السطح إلى الحجم العالية جداً، فضلاً عن سرعة ودقة التحكم في درجة الحرارة. ومن الفوائد الإضافية أن طريقة إنتاج المستحضرات

الصيدلانية الإشعاعية خاضعة لدرجة عالية من التحكم ومرنة وقابلة للتكرار وموثوقة، وذلك بفضل أتمتة العمليات، كما أن المكونات الرئيسية للمُسيّلات المجهرية منخفضة التكلفة وقابلة للاستبدال فيما بينها ويسهل التخلص منها ومضمونة الجودة. وتلبية متطلبات الحماية من الإشعاعات لنظام المُسيّلات المجهرية أقل تكلفة بكثير، نظرا لصغر حجم النظام. ويتيح هذا النظام أيضاً استغلال الحيِّز في المختبر بطريقة أفضل. ونظم المُسيّلات المجهرية فعالة بصفة خاصة عند النظر في استخدام جزيئات بيولوجية نادرة وغالية للوسم الإشعاعي لأغراض التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني.

١٩٩- ويمكن أن تتيح الرقائق الحاسوبية الرقمية الخاصة بتوليد قطرات المُسيّلات المجهرية، التي تم تطويرها مؤخراً، القياس والخلط المتحكم فيهما حاسوبياً لمادة الوسم بالفلور-١٨ والجزيء البيولوجي والعازل بنسب محددة. وهذا يسمح عملياً بسرعة التحسين إلى الحد الأمثل لظروف التفاعل في الأحجام النانولترية، وبعد ذلك يمكن نقل تلك الظروف إلى الوسم بالفلور-١٨ على النطاق التطبيقي للشظايا المشكَّلة هندسيا للأجسام المضادة الخاصة بالسرطان. وسيكون لهذه التقنيات، التي أصبحت متاحة في عام ٢٠١١، تأثير كبير على البحوث قبل الإكلينيكية والتطبيقات الإكلينيكية للمقتفيات الجديدة الخاصة بالتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، ولا سيما تطبيقات المقتفيات الخاصة بالتصوير المقطعي المناعي بالانبعاث البوزيتروني (immune-PET) حيث تكون الجزيئات البيولوجية الأساسية متوفرة بكميات صغيرة. ويعكف عدد من الشركات المصنعة في جميع أنحاء العالم على تطوير أساليب جديدة للوسم بالفلور-١٨ باستخدام تكنولوجيات التركيب الكيميائي الإشعاعي القائمة على المُسيّلات المجهرية.

حاء-١-٣- استخدام السيكلوترونات المتعددة الجسيمات لإنتاج النظائر المشعة

٢٠٠- ثمة اتجاه أمكنت ملاحظته في عام ٢٠١١ وهو أن عددا من المصنّعين قاموا بترقية نظمهم السيكلوترونية بغية زيادة الحزم والطاقات الإشعاعية من أجل تلبية الطلب الراهن على النويدات المشعة المستخدمة في التطبيقات الإكلينيكية للتصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد، والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، وفي العلاج. وتطوير السيكلوترونات الجديدة المتعددة الجسيمات والمتعددة الاستعمالات الخاصة بإنتاج النظائر والقادرة على تسريع البروتونات والديوتيرونات والهليوم-٣ وجسيمات ألفا بمعدلات شدة عالية هو اتجاه جديد في تكنولوجيا السيكلوترونات يتيح استخدام حزم غير الحزم البروتونية لإنتاج كميات معقولة من النويدات المشعة. ويمكن استخدام أشعة ألفا لإنتاج نظائر علاجية جديدة مثل باعث جسيمات ألفا الأستاتين-٢١١ وباعث جسيمات بيتا النحاس-٦٧. وعلى الرغم من أنه يمكن نظرياً إنتاج كل نويدة مشعة بعدة طرق نووية فإن التفاعل (بروتون، نيوترون) المستخدم على نظير مستهدف مثرى هو أكثر الطرق فعالية. وسيؤدي ظهور السيكلوترونات المتعددة الجسيمات إلى توسيع نطاق مجموعة النويدات المشعة، فضلا عن إتاحة طرق جديدة لتوفير النظائر المشعة المثيرة للاهتمام المحدودة التوافر حالياً. فمثلاً يمكن إنتاج النحاس-٦٤ واليود-١٢٤ واليتريُوم-٨٦، التي لها استخدامات راسخة، فضلاً عن النظائر المشعة الناشئة مثل الكوبالت-٥٥ والبروم-٧٦ والزركونيوم-٨٩ والروبيديوم- ٨٢ المستقر والتكنيتيوم-٩٤ المستقر واليود-١٢٠، الخ، عن طريق التفاعلات ذات الطاقة المنخفضة (بروتون، نيوترون) أو (بروتون، ألفا) أو (ديوتيرون، نيوترون). ويتطلب إنتاج نظائر مشعة مثل الحديد-٥٢ والسلِينيوم-٧٣ والسترُنشيوم-٨٣ باستخدام البروتونات متوسطة الطاقة أو الديوتيرونات دراسة خاصة من حيث المعالجة الكيميائية اللاحقة.

حاء-٢- تطبيقات التكنولوجيا الإشعاعية

حاء-٢-١- لقاح مشعَّع بأشعة غاما يُظهر إمكانيات في المعركة ضد الملاريا

٢٠١- الملاريا مرض تسببه طفيليات، ويمكن أن يكون مميتا، ويصيب الملايين من الناس على نطاق العالم. وعلى الرغم من أن إجراءات التطعيم القائمة على اللقاحات الفيروسية الحية الموهنة نجحت فيما يتعلق بعدد من الأمراض المُعدية – بما في ذلك شلل الأطفال والحمى الصفراء والحصبة والجدري – فإن تطوير لقاح فعال ضد البلازموديوم المنجلي (*Plasmodium falciparum*)، أكثر طفيليات الملاريا فتكا، لا يزال أحد التحديات الكبرى في الطب الحديث.

٢٠٢- وفي الاجتماع الدولي المعني بالمعالجة الإشعاعية الأخير (IMRP-2011)، الذي عقد في مونتريال بكندا في حزيران/يونيه ٢٠١١، أبلغ باحثون من شركة Sanaria Inc والمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا وشركة Protein Potential عن تطوير لقاح شديد الفعالية يستند إلى خلايا بوغية موهنة إشعاعيا، يمنع وصول العدوى إلى طور تلوث الدم بالملاريا، فيحمي الفرد من المرض ويمنع أيضاً انتقال المرض إلى الآخرين. ويتألف اللقاح المبلغ عنه من *خلايا بلازموديوم* منجلي بوغية موهنة ناشطة أيضياً وغير متكاثرة، تنتج بواسطة التشعيع بأشعة غاما. وتم بنجاح اجتياز التحدي المتمثل في تصنيع كميات كافية من اللقاح تلبي المعايير الرقابية للتجارب الإكلينيكية الأولية. وأنجزت بنجاح أهداف هامة مثل تحديد الجرعة الإشعاعية التي توهن جميع الطفيليات دون أن تقلل من قوة اللقاح، ووضع منهجية إشعاعية ونظام رصد يمتثلان امتثالاً كاملاً لجميع ممارسات التصنيع الجيدة الراهنة التي تشترطها إدارة الأغذية والعقاقير في الولايات المتحدة. وأنجزت المرحلة ١ من تجربة لقاح خلايا البلازموديوم المنجلي البوغية، التي شارك فيها ٨٠ متطوعاً، وثبتت فاعلية اللقاح. ويجتاز اللقاح الآن مرحلة متقدمة من التجارب الإكلينيكية، وقد يحل محل اللقاحات الموجودة حالياً التي تتسم بمعدلات عالية نسبيا من المضاعفات.

حاء-٢-٢- أغشية مطعمة بواسطة الإشعاعات تساعد على تنظيف المياه الملوثة في منطقة فوكوشيما

٢٠٣- أحدث التسونامي الذي سببه الزلزال العنيف في اليابان في آذار/مارس ٢٠١١ أضراراً بإمدادات الكهرباء وأوقف دوران مياه تبريد المفاعل النووي في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. ونتيجة لانصهار المفاعل النووي، تشتت مواد مشعة في المنطقة المحيطة، بما في ذلك في العديد من المسطحات المائية.

٢٠٤- وبغية إزالة السيزيوم المشع من هذه المياه الملوَّثة إزالة إنتقائية، تم اختبار مادة ماصة بوليمرية ليفية، استحدثتها مديرية علوم الحزم الكمِّية التابعة للوكالة اليابانية للطاقة الذرية بواسطة التطعيم الإشعاعي لمونومر مناسب داخل قماش بوليثيلين غير منسوج. وتم استخدام الأقمشة الماصة المطعمة المطوية في خرطوشة لإزالة السيزيوم المشع من بركة في منطقة ليتاتي-موراء، وكذلك من بركة سباحة مدرسة في مدينة فوكوشيما. وكلل هذان الاختباران كلاهما بالنجاح. وتتمثل ميزة إضافية لهذه التقنية في أنه لا تتم إزالة السيزيوم المشع وحسب بل أيضاً، نتيجة لجمع العنصر السام جمعاً مباشراً، لا تنتج أي رواسب طينية، ولذلك تزول الحاجة إلى أي معالجة وتنقية إضافيتين.

الشكل حاء-١ - أغشية مطعمة تستخدم لإزالة السيزيوم المشع من المياه في منطقة فوكوشيما (الصورة من: الوكالة اليابانية للطاقة الذرية، تاكاساكي، اليابان)

حاء-٢-٣- استخدام تكنولوجيا الشعاع الإلكتروني لإنتاج الإيثانول الأحيائي من مخلفات الصناعات الزراعية

٢٠٥- وفقاً لمنشور الوكالة الدولية للطاقة الصادر مؤخرا بعنوان *خارطة طريق التكنولوجيا: الوقود الحيوي لأغراض النقل*، يمكن أن يشكل الوقود الحيوي نسبة ٢٧٪ من جميع أنواع وقود النقل في موعد أقصاه عام ٢٠٥٠، مقارنة بنسبة ٢٪ فقط اليوم.[٥٦] وهذا يمكن أن يقلل كثيرا من انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون، مع تعزيز أمن الطاقة، ودون إضرار بالأمن الغذائي إذا استخدمت المنتجات الثانوية للصناعات الزراعية. وكانت أنواع الوقود الحيوي التقليدية، أو أنواع الجيل الأول، تنتج من المواد الغذائية، مثل الذرة وقصب السكر، في حين أن أنواع الجيل المتقدم، أو الثاني، من الوقود الحيوي تصنع من مخلفات الصناعات الزراعية، مثل القش وكيزان الذرة وتفل قصب السكر. وأحد الأمثلة للوقود الحيوي الإيثانول الحيوي، الذي له خصائص مماثلة للبترول ولكنه خال من الكبريت وسهل التحلل ويوفر للمزارعين مصدرا بديلا للدخل غير إنتاج المواد الغذائية. وثمة فائدة أخرى للجيل الثاني من الوقود الحيوي، مثل الإيثانول، مقارنة بالبنزين، وهي الحد من انبعاثات غازات الاحتباس

---

[٥٦] أنظر الموقع: http://www.iea.org/papers/2011/biofuels_roadmap.pdf.

الحراري. فقد أظهرت الدراسات أن الايثانول المنتج من قصب السكر يقلل من غازات الاحتباس الحراري بنسبة ٨٦ في المائة إلى ٩٠ في المائة إذا لم يكن هناك تغيير كبير في استخدام الأراضي.

٢٠٦- ولا يزال إنتاج أنواع الوقود الحيوي المتقدمة في مرحلة التطوير، حيث يلزم إجراء مزيد من التحسينات في كفاءة التحويل، وخفض التكاليف. في حالة إنتاج الإيثانول الحيوي من مصادر السليلوز، يتمثل أحد التحديات في أن الحلمأة الأنزيمية للسليلوز بطيئة ومكلفة.

٢٠٧- وفي الاجتماع الدولي المعني بالمعالجة الإشعاعية المعقود في حزيران/يونيه ٢٠١١، أفيد أن الحلمأة الحرارية (٤٠ دقيقة، ١٨٠ درجة مئوية) إلى جانب التشعيع بالشعاع الإلكتروني (٥٠ كيلو غراي) لتفل قصب السكر تؤدي إلى انخفاض في كمية السكاكر القليلة السُّكَّريد التي يشكلها التحلل الجزئي للسليولوز والهيميسليولوز. وأشارت أعمال سابقة قامت بها أفرقة بحثية في البرازيل وجمهورية كوريا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان إلى أن تشعيع تفل قصب السكر بالشعاع الإلكتروني عند ٣٠ كيلو غراي يمكن أن يعزز الحلمأة الإنزيمية للسليولوز بنسبة ٧٥ في المائة وأن يزيد غلة الإيثانول الحيوي.

الشكل حاء-٢ - حصاد قصب السكر في البرازيل (الصورة مقدمة من: معهد البحوث النووية وبحوث الطاقة، ساو باولو، البرازيل).

حاء-٣- التكنولوجيات الإشعاعية المستخدمة في التعدين[٥٧]

٢٠٨- يتزايد استخدام المقتفيات الإشعاعية والقياسات النووية في التعدين، وذلك أساساً للتنقيب عن الموارد الطبيعية واستغلالها استغلالاً فعالاً. وفي حين أن المقتفيات الإشعاعية التي يمكن الكشف عنها بسهولة أكثر تستخدم في الدراسات غير الاقتحامية في العمليات الصناعية فإن القياسات النووية تستخدم في عمليات التنقيب عن الموارد. والتغلغل العميق للنيوترونات وأشعة غاما يجعل التقنيات النووية مناسبة لتطبيقات تسجيل تقدم حَفر الآبار، ولذلك تستخدم هذه التقنيات على نطاق واسع في صناعات النفط والغاز واليورانيوم منذ فترة طويلة. وبدأ الان استخدام هذه التقنيات في صناعات تعدين الفحم الحجري والمعادن أيضاً.

٢٠٩- وفضلاً عن ذلك فإن مختلف طرق قياس الطيف النووي تستخدم بنجاح في الميدان وفي البيئات الصناعية لتحليل العينات في الموقع. ويتيح المطياف النووي العصري المحمول تحقيق وفورات ضخمة في الزمن وفي العمل دون إخلال بالأداء، المطابق لأداء الجهاز المختبري التقليدي .

---

[٥٧] يمكن الاطلاع، في الموقع GovAtom، على معلومات إضافية في الوثائق ذات الصلة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* .

٢١٠- وصناعات التعدين والصناعات الميتالورجية وصناعات معالجة المعادن هي من الجهات المستفيدة الرئيسية من هذه التقنيات والتكنولوجيات. وبسبب الفوائد المغرية المستمدة من استخدام المقتفيات الإشعاعية والقياس الإشعاعي، يتوسع ويتطور على الدوام استخدامها في هذه الصناعات. وتستحدث حالياً مقتفيات إشعاعية جديدة وبرامج حاسوبية سهلة الاستعمال وأجهزة كشف جديدة ونظم جديدة لاقتناء البيانات، ويؤخذ بها في الممارسة العملية.